

Thèses de DOCTORAT de sciences soutenues en 2005

Ph.D thesis presented in 2005

Dans le cadre des programmes d'études en métrologie coordonnés par le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), des travaux de thèses, en vue de l'obtention d'un Doctorat de sciences, sont effectués dans les laboratoires nationaux de métrologie ou les laboratoires associés au LNE. Les thèses soutenues en 2005 sont présentées ici par laboratoire mentionnant, pour chaque thèse, l'auteur, le titre, l'établissement et la spécialité de rattachement, la date de soutenance et le résumé.

LNE

Matthieu BRIZARD – Développement et étude d'un viscosimètre absolu à chute de bille. – Université Joseph Fourier de Grenoble – *Mécanique et énergétique* – 20 mai 2005.

L'augmentation de l'incertitude tout au long de l'échelle de viscosité étant le principal inconvénient de la viscosimétrie capillaire, un viscosimètre absolu à chute de bille a été développé, qui permet de couvrir une large gamme de viscosité tout en gardant une faible incertitude. La mesure de viscosité repose alors sur la mesure de la vitesse limite de chute de la bille. Un banc expérimental a été développé afin d'atteindre une incertitude relative de l'ordre de 10^{-3} . Il permet d'observer la trajectoire de la bille à l'intérieur d'un tube cylindrique rempli du liquide étudié et d'obtenir l'évolution de la vitesse. La caractérisation métrologique de ce banc expérimental est présentée en utilisant tout d'abord la loi de propagation des incertitudes et ensuite la simulation numérique de Monte-Carlo. Enfin, les mesures de viscosité et les incertitudes obtenues avec le viscosimètre à chute de bille sont confrontées à celles obtenues avec un viscosimètre capillaire.

Vincent CARPENTIER – Étude pour le développement d'un générateur d'air humide. – Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand – *Chimie physique, métrologie, hygrométrie* – 13 juin 2005.

Aujourd'hui, les hygromètres de référence sont raccordés aux études de température par l'intermédiaire des générateurs d'air humide. Afin de permettre l'étalonnage d'hygromètres pour des températures de rosée positives allant jusqu'à 90 °C, un prototype de générateur d'air humide a été réalisé. Le modèle de transfert de masse et de chaleur en deux dimensions, établi dans ce cadre, est présenté. L'incertitude type composée sur la température de rosée est estimée en utilisant la loi de propagation des incertitudes puis par propagation des distributions. L'étalonnage d'un hygromètre de référence a été réalisé entre 20 °C et 80 °C afin de valider les résultats obtenus.

Cécile GUIANVARCH – La cavité de couplage acoustique pour l'étalonnage des microphones par la méthode de réciprocité : Modèles analytiques et application à la mesure d'impédances de petits composants. – Université du Maine – *Acoustique* – 9 septembre 2005.

Les laboratoires de métrologie acoustique utilisent en général des microphones de haute qualité comme étalon de référence pour leurs appareils de mesures acoustiques. Ces microphones, appelés étalons de laboratoire, doivent

eux-même être étalonnés avec une grande précision. Depuis plusieurs décennies, la méthode usuelle (normalisée) pour étalonner ces microphones, c'est-à-dire pour déterminer leur efficacité en pression, est la méthode de réciprocité. Cette méthode nécessite l'usage de deux microphones couplés acoustiquement par une cavité close généralement de forme cylindrique, fermée par des parois latérales rigides et aux extrémités par les membranes des microphones, l'un étant utilisé en émetteur, l'autre en récepteur. Le produit des efficacités des microphones est déduit de mesures électriques et du calcul analytique de l'admittance acoustique de transfert du système.

Les équipements et les techniques de mesures actuels permettent d'atteindre une précision dans les mesures électriques de l'ordre du centième de décibel. Une précision du même ordre de grandeur est alors recherchée dans le calcul de l'admittance acoustique de transfert, qui repose sur la modélisation du champ acoustique dans la cavité de couplage. Il est donc nécessaire que cette modélisation soit aussi complète et précise que possible. Les modèles actuellement en usage ne paraissent pas aujourd'hui, de ce point de vue, présenter toutes les « garanties » nécessaires pour accéder à un étalonnage dont la précision est compatible avec la précision de la mesure électrique. Ainsi, l'objet de cette étude est d'établir des modèles analytiques plus complets pour le champ de pression dans la cavité de couplage, prenant en compte les effets de couches limites visqueuses et thermiques et la structure fine de la répartition spatiale du champ acoustique.

Au-delà des résultats qui doivent conduire à la révision des normes actuellement en vigueur, les résultats obtenus portent l'espoir de mener à une méthode de mesure fine des caractéristiques d'entrée des petits composants acoustique qui fait défaut à l'heure actuelle et de mener à terme à des ouvertures sur la métrologie des micro-composants acoustiques (attendus dans le cadre de la caractérisation des oreilles artificielles et de la miniaturisation des capteurs).

Enfin, des développements futurs portant sur de nouvelles modélisations de capteurs microphoniques, qui prendraient en compte les effets de déformées réalistes des membranes et corrélativement la répartition spatiale des mouvements acoustiques dans les micro-cavités et micro-conduits qui constituent ces capteurs, permettront aux modèles proposés de donner leur « pleine mesure » en terme de finesse de mesure et de caractérisations de capteurs et mini-composants acoustiques.

Ludovic LAHOUSSE – Contribution à la construction de machines de grande précision géométrique : le concept d'information dans l'amélioration des performances des machines. – École nationale supérieure d'arts et métiers de Lille – *Mécanique et génie mécanique* – 4 octobre 2005.

La thèse présente la conception et la réalisation d'une machine de mesure de très haute précision. Cette machine dont le domaine d'exploration est un carré de 300 mm sur une épaisseur d'une cinquantaine de micromètres doit permettre d'atteindre des incertitudes d'une dizaine de nanomètres sur la mesure d'une longueur d'un centimètre,

l'incertitude suivant l'axe Z étant limitée à deux nanomètres sur la même distance. Ces deux incertitudes doivent rester limitées à respectivement cinquante et dix nanomètres pour une mesure correspondant à l'envergure du domaine de mesure.

Pour atteindre ce niveau de performance, cette machine introduit des principes innovants appuyés sur des concepts originaux. Le travail expose ces concepts et détaille leur mise en oeuvre sur un démonstrateur dont l'objectif est de valider le bien-fondé des principes adoptés et de conduire à une évaluation de performances et une optimisation des solutions utilisées.

Une analyse des causes d'imprécision des machines à coordonnées est présentée, appuyée sur des concepts qui conduisent à identifier la notion de précision à celle d'information. On en déduit les principes et les limites d'application des différentes méthodes de correction de géométrie des machines qui sont exposés rapidement.

Une technique de construction nouvelle de machine est présentée qui permet d'étendre le domaine d'application de la correction en exploitant des données saisies en temps réel par des capteurs judicieusement disposés. Cette technique apporte un progrès dans l'immunité aux perturbations extérieures et la possibilité d'évaluer en permanence l'état de la machine et la qualité de son système de correction

La conception de la machine est détaillée. Les choix qui ont conduit à la conception de certains détails de son architecture sont explicités et motivés. Le choix et l'implantation des différents capteurs sont exposés. Le compromis coût/incertitude est introduit ainsi que la stratégie d'exploitation des indications fournies.

La matérialisation des éléments constituant la « chaîne métrologique » est détaillée en fonction de la minimisation de la sensibilité aux perturbations dynamiques et thermiques à laquelle on souhaite aboutir. De nombreux détails de conception sont exposés et justifiés.

Un aperçu sur les stratégies d'étalonnage est présenté.

ENSMP et LNE

Paul André MEURY – Alliages métalliques pour l'étalon de masse de la balance du watt et des étalons secondaires. – Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – *Sciences et génie des matériaux* – 7 décembre 2005.

L'unité de masse, le kilogramme, est la dernière unité de base du système international à être définie par un étalon matériel. Sa définition, datant de 1901, se trouve limitée par la stabilité du matériau formant le prototype international. Des dérives allant jusqu'à 2 µg par an sont d'ailleurs observées au niveau des copies du prototype international en platine iridié. Pour tenter d'améliorer l'exactitude sur la détermination de l'unité de masse, différentes expériences ont débuté afin de relier le kilogramme à une constante fondamentale de la physique. L'un de ces programmes a pour nom « balance du watt » et vise à établir un lien entre des mesures mécaniques et des mesures électriques. Cette voie se présente à l'heure actuelle comme l'expérience la plus prometteuse. Dans le

dispositif expérimental français, l'utilisation de l'alliage de Pt-Ir n'est pas envisageable comme étalon de masse de référence. Les recherches se sont alors orientées vers des alliages en or platiné et autres métaux précieux.

En parallèle la dissémination de l'unité de masse aux multiples et sous multiples du kilogramme de 1 g à 10 kg s'effectue généralement à l'aide d'étalons en acier inoxydable. Si la stabilité de la masse du prototype international n'est pas assurée, ce phénomène est encore plus accentué au niveau de ces étalons secondaires. Pour profiter de l'amélioration attendue de la conservation de l'unité de masse, il faut améliorer la stabilité de ces étalons. La caractérisation de nouveaux alliages métalliques pour réaliser des étalons et l'étude de leur stabilité devient donc nécessaire.

LNE-INM

Zaccaria SILVESTRI – Caractérisation physico-chimique de surface des étalons de masse. – Université de Versailles – Conservatoire national des arts et métiers – *Lasers, métrologie et communications* – 31 octobre 2005.

Le kilogramme reste encore aujourd'hui la seule des sept unités de base du Système international (SI) définie par un étalon matériel appelé le prototype international du kilogramme. Ce prototype est un cylindre constitué d'un alliage de platine iridié (90%Pt-10%Ir) faisant par définition 1 kg exactement. Ce prototype ainsi que tout autre étalon de masse sont exposés à de nombreuses sources de contamination faisant évoluer leur masse malgré les précautions mises en oeuvre. Cette définition pose donc le problème de la pérennité et de l'universalité de l'unité de masse. C'est pourquoi de nouvelles pistes de recherche essayent de relier l'unité de masse à une constante physique fondamentale. Ces expériences pourraient conduire à une nouvelle définition. Ainsi, depuis 2000, le projet français « Balance du watt » a été lancé afin de relier l'unité de masse à la constante de Planck. Parmi les options retenues pour réaliser le dispositif expérimental, le choix du matériau de la masse de transfert est particulièrement important puisque celle-ci sera très proche d'un circuit magnétique délivrant une induction de 1 T. Par conséquent, ce matériau doit non seulement avoir une susceptibilité magnétique volumique la plus faible possible (de l'ordre de 10^{-5}) mais aussi présenter toutes les propriétés indispensables aux matériaux de la métrologie des masses (bonne dureté, forte masse volumique, alliage homogène,...). Certains alliages comme l'or-platine ou des matériaux comme l'iridium pourraient satisfaire ces critères. Afin de comparer les « performances » de ce nouveau matériau, le platine iridié a été choisi comme alliage de référence. Pour comprendre les mécanismes d'évolution de la masse en tenant compte de l'état de surface, du nettoyage et des conditions de conservation de ces étalons, il est indispensable de caractériser l'état de surface par des méthodes rugosimétriques, d'évaluer la stabilité par des méthodes de comparaisons de masse, et de caractériser les contaminants de surface par des méthodes

spectrométriques. Dans le cadre de ces travaux de recherche, nous avons utilisé des techniques déjà présentes au sein de l'Institut National de Métrologie comme la technique de l'effet mirage pour l'étude de l'adsorption de solvants de nettoyage, un rugosimètre optique pour caractériser l'état de surface et le polissage, un comparateur de masse de 100 g pour étudier la stabilité après nettoyage mais aussi un nouveau dispositif de spectrométrie de masse de thermodesorption pour l'étude des molécules physisorbées.

Laura Patricia GONZALES-GALVAN – Matérialisation de la candela (unité d'intensité lumineuse dans le Système international) à l'aide de photomètres dont la chaîne de raccordement au radiomètre cryogénique est parfaitement établie. – CNAM – *Système physique, lasers et métrologie* – 22 décembre 2005.

La définition la plus récente de la candela, adoptée en 1979 par la 16^e Conférence générale des poids et mesures est la suivante : La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est de 1/683 watt par stéradian. Cette définition ne donne pas de méthode pratique pour sa réalisation, elle ne donne qu'une relation directe entre les grandeurs photométriques et les grandeurs radiométriques. Depuis plusieurs années, les mesures radiométriques ont connu un développement important, et une réduction notable des incertitudes grâce au développement des radiomètres cryogéniques à substitution électrique, qui servent de références radiométriques. Il est donc logique de rattacher la réalisation de la candela aux mesures radiométriques faites avec le radiomètre cryogénique.

La matérialisation de la candela est faite actuellement à l'utilisation de photomètres. Les photomètres sont composés de trois composants : détecteur, filtre et diaphragme. Le détecteur utilisé peut être un seul détecteur ou un détecteur piège, lequel est composé de trois détecteurs placés de façon à ce que les pertes par réflexion soient minimales. Le filtre $V(\lambda)$, correspondant à la vision photopique, est réalisé à l'aide d'une combinaison de verres présentant différents facteurs de transmission. Le diaphragme est utilisé pour délimiter la quantité de lumière qui arrive sur le photomètre.

Dans ce travail nous avons utilisé des détecteurs pièges qui ont une traçabilité au radiomètre cryogénique. De cette manière nous obtenons la sensibilité du détecteur piège aux longueurs d'onde des lasers employés. En utilisant comme étalon un détecteur non sélectif, nous obtenons la sensibilité spectrale de ces mêmes détecteurs pièges sur l'intervalle de mesure de 380 nm à 780 nm. Les filtres $V(\lambda)$ sont mesurés pour obtenir leur facteur de transmission dans le même intervalle. La surface du diaphragme est obtenue en utilisant la méthode des moindres carrés à partir des mesures des points des bords du diaphragme avec une table micrométrique. Ces trois éléments étant caractérisés, nous faisons le calcul du facteur d'adaptation spectral du photomètre et nous utilisons l'équation du corps noir de Planck pour obtenir le

flux énergétique de l'illuminant utilisé. La sensibilité lumineuse du photomètre est égale à la sensibilité du photomètre à 555 nm divisée par, le produit de l'efficacité lumineuse maximale et du facteur d'adaptation spectral. Cette valeur de la sensibilité lumineuse est donnée en unité de courant électrique divisée par le flux lumineux. Comme nous connaissons la surface du diaphragme nous calculons l'éclairement lumineux qui arrive sur le photomètre. En utilisant la loi de l'inverse carré de la distance nous trouvons l'intensité lumineuse de la source.

Le travail exposé dans le document décrit la réalisation pratique de l'unité d'intensité lumineuse, la candela, effectuée à l'Institut national de métrologie (LNE-INM) du Conservatoire national des arts et métiers (CNAM) et son raccordement au radiomètre cryogénique, meilleure référence actuelle des mesures radiométriques.

LPIB et LNE-INM

Youssef HAIDAR – Étude en champ proche et champ lointain de surfaces métalliques : apport des microscopes à sonde locale à l'étude des étalons de masse. – Université de Bourgogne – *Physique* – 15 juin 2005.

Dans le Système international d'unités (SI), le kilogramme est l'unité de masse, qui est définie comme étant égale à la masse du prototype international du kilogramme en platine iridié. Le contrôle des étalons de masse est essentiel vis-à-vis, entre autres, des industries qui doivent garantir une production calibrée. Ce travail est consacré à l'étude en champ proche et en champ lointain des surfaces des étalons de masse métalliques, en lien avec différents instituts, laboratoires nationaux et internationaux de la métrologie. Nous avons mené deux types de mesures : mesures de type *shear force* pour déterminer la topographie locale de la surface et mesures en champ proche optique pour approfondir l'analyse de la surface par mesure optique localisée à haute résolution. Une analyse de l'évolution de la topographie des surfaces des étalons de masse et de la structure du champ proche optique diffracté par les défauts de ces surfaces a été menée au cours de ce travail de thèse.

LKB et LNE-INM

Pierre CLADÉ – Oscillations de Bloch d'atomes ultra-froids et mesure de la constante de structure fine. – Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) – *Physique/Optique quantique, physique atomique et moléculaire* – 3 octobre 2005.

Il est possible, à partir de la mesure de la vitesse de recul d'un atome qui absorbe un photon, de déterminer le rapport h/m entre la constante de Planck et la masse de l'atome étudié et d'en déduire une valeur de la constante de structure fine, α . Pour effectuer cette mesure, nous utilisons la méthode des oscillations de Bloch qui nous permet de transférer un grand nombre de reculs aux

atomes. Un senseur inertielle, basé sur des transitions Raman sélectives en vitesse, nous permet alors de mesurer la quantité de mouvement transférée aux atomes. Une mesure présentant une incertitude statistique de 4,4 ppb, ainsi qu'une étude des différents effets systématiques (5 ppb), nous a permis d'obtenir une détermination de α avec une incertitude de 6,7 ppb. Cette incertitude est comparable à l'incertitude des meilleures déterminations de α basées sur l'interférométrie atomique.

LNE-SYRTE

Harold MARION – Contrôle des collisions froides du ^{133}Cs , tests de la variation de la constante de structure fine à l'aide d'une fontaine atomique double rubidium-césium. – Université Paris VI – *Physique quantique* – 11 mars 2005.

Nous avons mis au point une méthode de mesure du déplacement de fréquence dû aux collisions entre atomes froids. C'est l'effet systématique qui limite le plus l'exactitude des fontaines à ^{133}Cs (environ 10^{-15} en valeur relative) ; on peut le mesurer au niveau de 0,5 %. Ceci ouvre des perspectives d'améliorations des performances des fontaines en terme d'exactitude jusqu'à 10^{-16} . La fontaine a aussi obtenu une stabilité de l'ordre de $1,6 \cdot 10^{-14}$ à 1 s. Nous avons découvert, à champ magnétique très faible (5 ± 1 mG), des résonances de Feshbach. Nous avons aussi effectué une nouvelle mesure absolue de la transition hyperfine du ^{87}Rb , qui est la plus précise jamais réalisée et sert maintenant de définition pour l'étalon secondaire de fréquence ^{87}Rb . En comparant cette valeur avec celles mesurées les années précédentes, nous avons pu tester la stabilité de la constante de structure fine au niveau de 10^{-15} an^{-1} . Nous avons comparé localement notre fontaine avec les autres fontaines du laboratoire, avec dans le meilleur des cas une stabilité combinée de $5 \cdot 10^{-4}$ à 1 s. La différence de fréquence des deux horloges se moyenne comme du bruit blanc de fréquence jusqu'à $3 \cdot 10^{-16}$. Le bilan d'exactitude de la fontaine double a été évalué à environ $7 \cdot 10^{-16}$ pour la partie césium et environ $8 \cdot 10^{-16}$ pour la partie rubidium. Nous avons contribué à la réalisation de l'échelle de Temps Atomique International, par des séries de calibrations de masers à hydrogène. Une comparaison de fontaines atomiques par liaisons satellitaires a été expérimentée entre notre laboratoire et nos homologues allemands. Cette mesure a permis de déterminer le bon accord qu'il y a entre les deux horloges.

Audrey QUESSADA-VIAL – Développement d'une horloge optique à atomes de strontium piégés : réalisation d'un laser ultra-stable et stabilité de fréquence. – Université de Paris VI – *Lasers et matière* – 30 mai 2005.

L'objectif de la thèse était le développement d'une nouvelle génération d'étalons de fréquence optique utilisant des atomes piégés. La stabilité de fréquence d'une telle horloge sera limitée dans un premier temps par le bruit de l'oscillateur local. La première partie a été

consacrée aux différents paramètres comme le rapport cyclique ou la méthode d'interrogation pouvant réduire les effets de ce bruit : la séquence temporelle du cycle d'horloge doit être optimisée. Avec l'oscillateur local qui a été réalisé, un laser ultra stable, la stabilité attendue est de quelques $10^{-16} \cdot \tau^{-1/2}$ soit près de deux ordres de grandeurs mieux que les fontaines atomiques actuelles.

La deuxième partie décrit une source d'atomes froids de strontium performante, étape essentielle pour réduire le temps de préparation des atomes dans le cycle. Finalement, la mesure de la transition d'horloge $^1S_0 - ^3P_0$ du ^{87}Sr est démontrée avec une incertitude de 15 kHz.

Thomas ZANON – Développement d'une horloge atomique à piégeage cohérent de population. Études théorique et expérimentale des régimes impulsionsnel et continu. – Université Paris VI – *Physique atomique et optique quantique* – 17 octobre 2005.

La thèse présente la méthode d'interrogation d'une transition d'horloge à l'aide d'une séquence d'impulsions CPT (*Coherence Population Trapping*) analogue à la technique des champs oscillants séparés de Ramsey. Différentes séquences d'impulsions CPT appliquées sur une vapeur atomique de Césium en régime Lamb-Dicke sont étudiées expérimentalement et conduisent à l'observation de franges aussi étroites que 60 Hz à une fréquence de 10 GHz. Une étude théorique du phénomène CPT en régime continu et en régime impulsionsnel permet de mettre en évidence et de comparer les déplacements de fréquence de la transition d'horloge. L'asservissement d'un oscillateur à quartz à l'aide d'un train d'impulsions CPT, a conduit finalement à la mesure d'une stabilité relative préliminaire de $3,5 \cdot 10^{-12}$ sur la seconde.

Yvan MAKSIMOVIC – Développement d'une horloge à atomes froids spatiale : le projet PHARAO. – Université Paris VII – *Physique des solides et milieux denses* – 30 novembre 2005.

Le refroidissement d'atomes par laser a sensiblement amélioré les performances des horloges atomiques. Par comparaison avec les dispositifs à jet thermique, l'utilisation dans les fontaines atomiques d'atomes très lents a permis d'augmenter leur temps d'observation de deux ordres de grandeur. Ce temps reste limité sur terre à une demi-seconde par la pesanteur qui accélère inévitablement les atomes.

Le refroidissement d'atomes en microgravité permet de s'affranchir de cette limitation. C'est l'une des motivations majeures du projet PHARAO qui vise à placer une horloge à atomes froids de césium en orbite et à réaliser des comparaisons de fréquence avec des horloges sol par

lien micro-onde pour des tests de relativité générale et de physique fondamentale de résolution inégalée. Le projet PHARAO, qui s'appuie sur le développement au sol des horloges atomiques, prévoit une exactitude relative de fréquence de $2 \cdot 10^{-16}$.

La thèse retrace les recherches liées au développement et à l'évaluation du modèle d'ingénierie de PHARAO. La première partie traite de la réalisation et de la caractérisation d'un prototype de la source laser spatiale, travaux qui ont conduit à la mise au point des premiers lasers à cavité étendue spatialisables. La seconde partie est consacrée au test du modèle d'ingénierie de la source hyperfréquence PHARAO. Après une caractérisation complète de ce sous-système, les performances finales de l'horloge sont entièrement validées. Enfin, les comparaisons de fréquences atomiques réalisées à l'aide de la fontaine transportable du LNE-SYRTE, présentées à la fin de ce mémoire, s'inscrivent dans le développement des techniques de comparaisons utilisées pour le projet PHARAO.

Philippe MERCK – Développement d'une station terrienne de comparaison d'horloges atomiques par liaisons micro-ondes avec un satellite de télécommunications. – Observatoire de Paris – *Dynamique des systèmes gravitationnels* – 12 décembre 2005.

La thèse a consisté à développer au LNE-SYRTE une station terrienne TWSTFT (*Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer*) dédiée aux comparaisons d'horloges atomiques par liaisons micro-ondes avec un satellite de télécommunications. La station est équipée d'un modem SATRE générant une porteuse à spectre étalé modulée par un code pseudo-aléatoire de bruit à 2,5 Mchips/s. L'objectif principal est de contribuer à la réalisation du Temps Atomique International (TAI) calculé par le BIPM en utilisant une technique indépendante du GPS. Les travaux ont porté sur la mise en oeuvre de logiciels de pilotage de la station, d'acquisition et de traitement statistique des données de comparaisons d'horloges, en mesure et en étalonnage. Un bilan complet d'incertitudes a été établi pour la liaison étalonnée OP-PTB. Les données de mesures de la station ont été intégrées dans le calcul du TAI depuis le 1^{er} janvier 2005 sur la liaison étalonnée OP-PTB, avec une exactitude de 1 ns, soit six fois plus faible que sur la même liaison effectuée par GPS C/A. De plus, cette technique a permis d'atteindre le bruit des masers à hydrogène actif sur la liaison OP-PTB à seulement 0,6 jour, soit une stabilité de fréquence de $2 \cdot 10^{-15}$, qui par ailleurs est atteinte par la technique GPS P3 au bout de deux jours. Enfin, les travaux ont été complétés par l'étude et la réalisation d'un dispositif d'étalonnage en absolu du retard interne de la station, basé sur un simulateur de satellite.