HAL open science

Rotation terrestre et systèmes célestes : contributions et éléments de prospective

Sébastien Lambert

▶ To cite this version:

Sébastien Lambert. Rotation terrestre et systèmes célestes : contributions et éléments de prospective. Planète et Univers [physics]. Observatoire de Paris, 2021. tel-03965699

HAL Id: tel-03965699

https://hal-obspm.ccsd.cnrs.fr/tel-03965699

Submitted on 31 Jan 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

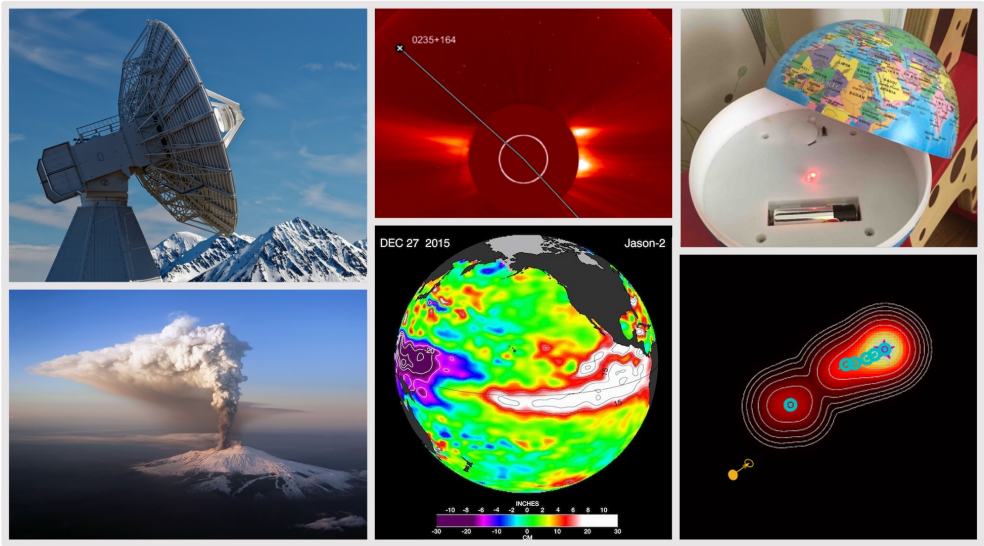
Rotation terrestre et systèmes célestes

Contributions et éléments de prospective

Mémoire présenté en vue de
l'obtention du diplôme d'habilitation à diriger des recherches par

Sébastien Lambert

astronome-adjoint au département Systèmes de Référence Temps Espace (SYRTE)
Observatoire de Paris - Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, LNE
messagerie électronique : sebastien.lambert@obspm.fr



et soutenu le 24 septembre 2021 devant le jury composé de
Mme Marie-Christine Angonin - Observatoire de Paris
Mme Véronique Dehant - Observatoire Royal de Belgique
Mme Hélène Sol - Observatoire de Paris
Mr Jean-Paul Boy - Institut de Physique du Globe de Strasbourg
Mr François Mignard - Observatoire de la Côte d'Azur
Mr David Salstein - Atmospheric and Environmental Research (AER)
Mr Jan Vondrák - Académie des Sciences de la République Tchèque

Table des matières

Introduction **3**

Recherche **4**
Le VLBI . . . 4
Un état de l'art . . . 4
La barrière des 0,1 mas . . . 6
Pertinence de l'approche directe . . . 10
Le repère de référence céleste . . . 12
L'ICRF3 parmi les plus précis . . . 12
Peut-on faire encore plus précis ? . . . 17
Astrométrie, AGN et trous noirs . . . 19
La rotation de la Terre . . . 22
Le pôle fait sa météo . . . 22
Avons-nous détecté la graine ? . . . 24
Rotation terrestre, marées et volcans . . . 26

Services d'observation **27**
Tâche de service principale : IVS . . . 27
Tâches de service secondaires : ICRS Center et *Gaia* . . . 30

Enseignement **30**

Quelques éléments de prospective **30**
En forme de SWOT . . . 30
Futur du repère céleste . . . 31
Perspectives en géosciences . . . 32

Références **33**

Annexes **39**
Curriculum vitae . . . 39
Publications . . . 40

Introduction

Tard dans la nuit du 14 avril 1912, quelque part dans l'Atlantique nord, alors qu'un quatuor à cordes contrepointe joyeusement dans une salle de restaurant de première classe, un matelot se penche par dessus le bastingage d'un paquebot de croisière. Le visage blafard sous une lune glacée, il se tourne vers son supérieur, et dit en désignant les flots d'un doigt gris et tremblant : « Capitaine, l'eau monte, je crois que nous coulons ! »

Homme d'expérience, visionnaire, au fait des derniers progrès scientifiques, le seul maître à bord après Dieu enfouit sa pipe dans une barbe d'empereur, tire quelques bouffées de fumée bleue qui auréolent étrangement sa casquette et répond d'une belle voix de basse, le regard aussi calme que les eaux sombres qui miroitent à ses pieds : « Allons, moussaillon, c'est peut-être seulement le niveau des mers qui s'élève. »

L'avenir donnera raison un peu à chacun mais aucun des deux ne sera là pour en profiter pleinement. Cet épisode illustre bien que quand on s'attaque aux systèmes de référence, tout est question de point de vue. Et, accessoirement, que ce point de vue peut avoir des implications fortes, que ce soit sur le plan pratique ou scientifique.

Mes recherches ne m'ont pas (encore) amené à mesurer le niveau des mers mais à être de ceux qui fabriquent et maintiennent les références d'espace qui sont à la base de ce type de mesures et de leur précision. Pour parfaire ces mesures, on a besoin, en premier lieu, de bâtir des repères les plus stables et les plus précis possibles, grâce à quelque instrument adapté qui donne accès à des points de référence. Un repère terrestre, attaché à la croûte, matérialisé par des stations géodésiques au sol forme le socle de la géolocalisation précise. Ce repère tourne, bouge, se déforme avec la Terre. Au-dessus, là où tout semble immuable, dans le ciel, on peut réaliser le même type de repère basé cette fois-ci sur les coordonnées angulaires d'objets célestes stables ou bien dont on connaît le mouvement. Le repère céleste fondamental est aujourd'hui fabriqué au moyen de radiosources extragalactiques, distantes de plusieurs centaines de millions, voire de milliards, d'années-lumière, pour certaines aux confins de l'univers observable, car ce sont elles qui offrent le plus de garantie quant à la stabilité (elles sont loin et très ponctuelles) et l'accessibilité (elles brillent puissamment dans le domaine radio). Le ciel tourne au-dessus de la Terre (ou l'inverse) et si l'on veut rattacher repères céleste et terrestre, il faut connaître la rotation instantanée de la Terre en y intégrant toutes ses petites irrégularités, fussent-elles de quelques millisecondes ou de quelques millimètres.

La réalisation des repères d'espace possède donc cette particularité d'émarger à des domaines qui pourraient sembler déconnectés au premier abord : rotation terrestre, géodésie et astrométrie. En élargissant un peu, cela donne *géophysique* et *astrophysique*. Un instrument d'observation cristallise ce lien fort : l'interférométrie radio à très longue base (VLBI) qui relie les confins de l'univers à la croûte terrestre et constitue, de ce fait, la technique fondamentale en géodésie et dont les applications s'étendent depuis l'exploration de l'intérieur terrestre jusqu'à la physique fondamentale en passant par l'étude des trous noirs. VLBI, repère céleste et rotation terrestre seront donc au centre de ce mémoire. Si, dans ma communauté, on s'intéresse particulièrement à améliorer les performances (précision, exactitude) des techniques géodésiques et des repères de référence et à comprendre ce qui fait varier la rotation de la Terre, nous nous intéresseront également à ce que VLBI, repères et rotation terrestre peuvent apporter à des domaines scientifiques aujourd'hui en apparence déconnectés du nôtre. Mieux mesurer la Terre, c'est mieux comprendre comment elle se déforme, comment elle interagit avec son environnement, et donc mieux connaître sa structure et son évolution et la structure et l'évolution du milieu environnant. On verra donc dans la suite comment nos mesures de rotation terrestre nous permettent de mesurer la forme du noyau liquide et de la graine ou de mieux comprendre l'évolution du climat, la sismicité et le volcanisme. En retour, si on mesure mieux la Terre, on mesure mieux le ciel et on peut ainsi améliorer nos connaissances sur les quasars et les trous noirs ou encore mener des tests de physique fondamentale qui demandent une précision extrême. Au final, lorsqu'on comprend ce qu'il se passe dans la Terre et dans le ciel, on peut modéliser, prévoir et donc, en insérant ces modèles et prévisions dans les chaînes d'analyse observationnelle, encore mieux mesurer et utiliser ces mesures pour, à nouveau, approfondir la science ou améliorer les applications. Nos deux marins du début naviguaient pour le compte d'une société transatlantique. Nous, au sein de la communauté des systèmes de référence, nous travaillons pour

servir des enjeux forts tels ceux exprimés par la résolution 69/266 des Nations Unies sur la nécessité du maintien d'un repère de référence géodésique global pour le développement durable, mais également, et plus simplement, pour la connaissance pure.

Ce mémoire n'est pas une seconde thèse et je ne vais pas y raconter en détails toutes mes recherches passées. Je pense plus pertinent de passer en revue les avancées récentes et d'y apposer une réflexion sur l'avenir de nos recherches et services.

Recherche

Le VLBI

Un état de l'art

Le principe de l'interférométrie radio à très longue base, ou VLBI [1], est d'observer simultanément des objets lointains au moyen de couples d'antennes radio distantes de plusieurs milliers de kilomètres. La résolution angulaire théorique d'un tel dispositif est de l'ordre ou inférieure à la milliseconde de degré. En pratique, les signaux électromagnétiques reçus par les antennes sont quasi-identiques et peuvent différer légèrement à cause d'une phase méconnue induite par la géométrie du triangle antennes-radiosource ou par le milieu traversé. La corrélation des signaux entre eux permet de reconstruire la densité de flux radio sur le ciel (mode *imageur*) ou d'obtenir le retard de réception entre plusieurs antennes (mode *géodésique*). C'est ce second mode, le mode *géodésique*, qui m'occupe principalement. Lorsqu'on modélise ce retard, de nombreux paramètres interviennent dont la transformation de coordonnées entre repère terrestre et repère céleste. Cette transformation qui a occupé une partie importante de ma thèse (Lambert, 2003) est fonction des positions des stations d'observation au sol et des objets observés sur la sphère céleste, ainsi que des angles décrivant la rotation de la Terre autour de son axe et l'orientation de cet axe vis-à-vis des points de référence (voir p.e. Lambert & Bizouard, 2002 ; Capitaine et al., 2003). C'est cette dépendance qui donne au VLBI l'accès aux repères célestes et terrestres et à la mesure de la rotation de la Terre.

La session d'observations de VLBI géodésique la plus ancienne contenue dans la base de donnée de l'IVS [2] date du 3 août 1979. Depuis, plus de 18000 sessions ont été menées. Loin d'entrer dans sa crise de la quarantaine, la technique VLBI géodésique évolue plutôt vers une phase de maturité. En témoignent le déploiement, lent mais sûr, des antennes du VGOS (VLBI Global Observing System, ex-VLBI2010, Petrachenko et al., 2009), et la volonté de pérennisation qui en découle.

Les apports de la mission *Gaia* (Prusti et al., 2016) de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) sont considérables en astrophysique et dans le domaine des repères célestes. Là encore, en apportant une précision comparable à celle du VLBI, *Gaia* apporte une nouvelle lumière et un nouveau rôle au VLBI. Ce ne sont donc pas là des techniques concurrentes mais des techniques sœurs habiles à apporter chacune des informations qui se complètent que ce soit par les longueurs d'onde, la densité (*Gaia* est plus dense) ou la durée dans le temps (le VLBI est plus ancien et plus pérenne). On verra plus loin comment *Gaia* est intervenue dans la construction de l'ICRF3 (Charlot et al., 2020) et comment l'utilisation jointe des résultats du VLBIB et de *Gaia* permet d'ouvrir un nouveau champ de recherche dans le domaine des noyaux actifs de galaxies.

On a, par ailleurs, montré le potentiel du VLBI en physique fondamentale pour les tests de relativité et l'invariance de Lorentz (avec l'obtention des meilleures contraintes depuis le sol ; voir Lambert & Le Poncin-Lafitte, 2009, 2011 ; Titov et al., 2018 ; Le Poncin-Lafitte et al., 2016), et sa capacité, depuis les années 2010, à mesurer directement l'accélération du système solaire dans l'univers (dont nous détenons la première mesure ; voir Titov et al., 2011 ; Titov & Lambert, 2013).

Pour la rotation terrestre, le VLBI est la technique fondamentale car elle permet de se rattacher au repère céleste que l'on qualifie de quasi-inertiel et donc de mesurer l'orientation de la Terre par rapport à l'espace sous la forme des deux angles de nutation et du temps universel UT1. Le VLBI reste l'unique technique permettant de mesurer précisément ces trois paramètres. Par ailleurs, le VLBI mesure, comme le système de navigation global par satellites (GNSS) et les autres techniques de télémétrie laser et

1. De l'Anglais *very long baseline interferometry*.
2. Le VLBI géodésique est opéré par l'IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, Nothnagel et al., 2017), organisme international sous l'égide de l'Union Astronomique Internationale (UAI) et de l'Union Internationale de Géodésie et de Géophysique (UGGI) et dont on reparlera dans la section consacrée aux activités de service.

Doppler, les coordonnées du pôle vis à vis du pôle géographique ou conventionnel, et demeure donc la seule technique mesurant la totalité des paramètres d'orientation terrestre [3]. Si le GNSS, de par son réseau plus dense et son taux d'observation plus important, permet une mesure plus précise et plus dense que le VLBI, il a néanmoins besoin de ce dernier sur le long terme de par son impossibilité à former un système céleste autonome. On a donc, encore, ici, plusieurs techniques complémentaires qui partagent leurs points forts pour améliorer la détermination de paramètres communs. Et c'est ce partage efficace qui constitue le but des combinaisons inter-techniques comme la combinaison à la base de la série de référence internationale des paramètres de rotation de la Terre (connue sous le nom de C04, voir Bizouard et al., 2019) délivrée par l'IERS [4] dont le centre de produits des paramètres de rotation de la Terre est hébergé à l'Observatoire de Paris.

Si la France se distingue dans la technique VLBI bien que ne possédant aucune antenne radio dédiée à cette technique [5] c'est qu'elle a su asseoir sa place au niveau de l'analyse de données et de leur exploitation scientifique en développant des compétences très spécifiques d'ordre astronomique. L'Observatoire de Paris en particulier a été dès les années 1990 très actif, d'une part dans la définition des repères de référence céleste internationaux (ICRS ; Arias et al., 1995 ; Feissel & Mignard, 1998) et, dans le cadre de l'IERS, dans l'analyse des catalogues de coordonnées de radiosources à l'origine des premiers repères de référence célestes extragalactiques et ce même établissement a donc été impliqué dans la génération du premier repère céleste international, l'ICRF1, adopté en 1998 par l'UAI comme repère céleste fondamental, ainsi que de ses extensions (Ma et al., 1998 ; Fey et al., 2004). A la création de l'IVS, l'Observatoire de Paris a répondu présent pour être centre d'analyse et centre de données de l'IVS (sous ma direction depuis 2010), avec pour mission l'analyse opérationnelle des observations géodésiques, et pour abriter le centre de produits du système céleste sous la direction de Jean Souchay. Ma compétence en VLBI ne se situe pas au niveau de la technologie (antennes, récepteurs...) mais dans l'analyse des observations grâce à des logiciels dédiés, incluant Calc/Solve, dont j'ai appris le fonctionnement lors de mon séjour post-doctoral à l'Observatoire Naval des Etats-Unis et que j'ai par la suite implanté à l'Observatoire de Paris, et le logiciel DYNAMO développé par le CNES à des fins de traitement multi-technique.

L'analyse des données de VLBI géodésique vise à extraire du retard par ligne de base les quantités physiques qui sont à la base de ce retard : paramètres d'orientation terrestres (EOP) et leurs dérivées temporelles, positions des radiosources observées, positions et vitesses des stations d'observation, éventuellement d'autres paramètres d'ordre astronomiques ou géophysiques comme des amplitudes de modèles harmoniques de variations de position de station ou de l'axe de rotation, et un ensemble de paramètres rapidement variables décrivant l'impact de la troposphère et des horloges sur le retard. Pour que le système d'équations soit inversible, on cumule des retards sur 24 heures et on estime la valeur moyenne des EOP et des positions et vitesses sur cet intervalle, tandis que les paramètres rapides relatifs à la troposphère et aux horloges sont estimés sur des intervalles plus courts (quelques minutes à quelques heures). Comme cela fait tout de même beaucoup de paramètres, on ajoute des équations de contraintes qui les relient entre eux. Parmi ces contraintes, les contraintes minimales contiennent la substance des repères de référence en stipulant la non rotation globale du repère de référence céleste et les non rotation et non translation globales du repère terrestre. On s'efforce également de donner aux modèles des valeurs a priori les meilleures possibles en utilisant les standards les plus récents tels ceux des IERS Conventions (Petit & Luzum, 2010). C'est tout cela que j'appelle analyse standard ou état de l'art. En termes modestes, il s'agit de ce qu'on peut faire de mieux mais qui reste tout de même améliorable. Cette expression de Normand signifie que l'on a utilisé en amont de l'analyse les *meilleurs* modèles, que l'on utilise la stratégie d'analyse *la plus adaptée* et que l'on obtient un résultat dont la barre d'erreur (standard) voisine les quelques microsecondes de degré. Mais, un modèle a beau être le meilleur parmi les autres, une stratégie d'analyse

3. Les paramètres d'orientation terrestre sont aussi notés EOP (Earth orientation parameters) et comprennent deux coordonnées du pôle de rotation dans le repère terrestre ou mouvement du pôle, l'angle de rotation sidérale de la Terre ou temps universel UT1 et les deux coordonnées du pôle dans le repère céleste, soit cinq paramètres au total.

4. Le service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence ou IERS (International Earth rotation and Reference systems Service) est un organisme international coordonnant les mesures et modèles relatifs à la rotation terrestre, sous l'égide de l'Union Astronomique Internationale (UAI) et de l'Union Internationale de Géodésie et de Géophysique (UGGI).

5. Ce n'est que partiellement vrai car il a existé par le passé des antennes mobiles qui ont observé depuis des sites de la France métropolitaine comme Grasse ou Toulouse. Par ailleurs, on note avec intérêt qu'un projet de construction à Tahiti d'un observatoire géodésique fondamental, incluant une antenne VGOS, est en cours. Le point fort de ce projet est de combler l'absence de stations VLBI dans l'océan Pacifique sud.

la plus adaptée parmi les autres, le résultat n'en reste pas moins approximatif et donc améliorable, même si on a la fâcheuse impression que quoi qu'on fasse, on stagne devant une barrière infranchissable qui se situe, en terme de retard inexpliqué, vers les 20 à 30 picosecondes, ce qui correspond, en gros, à 0,1 milliseconde de degré (mas) en précision angulaire.

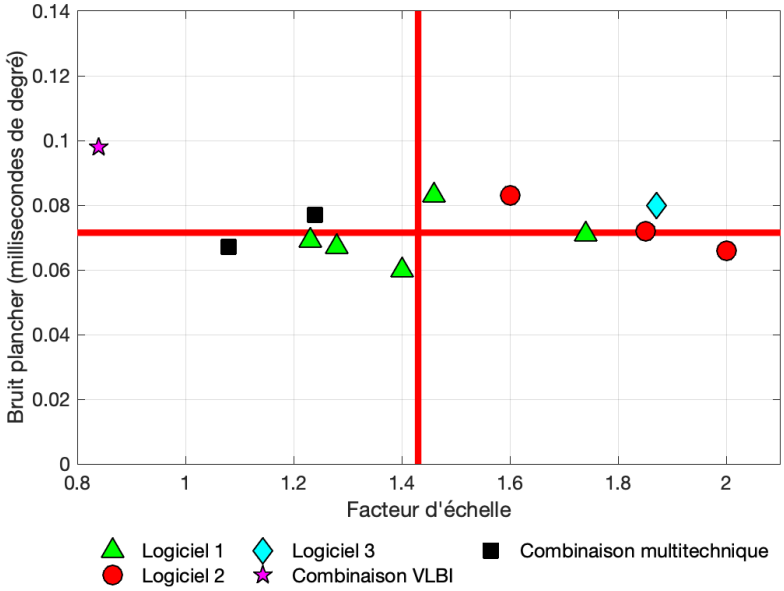


FIGURE 1 – Représentation graphique de la table 2 de Gattano et al. (2016) montrant le bruit plancher et le facteur d'échelle des erreurs standards déterminés selon la méthode exposée dans l'article pour plusieurs séries de nutation produits au sein de l'IVS et de l'IERS.

La barrière des 0,1 mas

Pour appréhender cette barrière (que j'appelle *barrière des 0,1 mas* sans que cette valeur soit précise ni robuste mais seulement indicative de l'ordre de grandeur), il faut s'interroger sur les sources d'erreur du VLBI et également sur le sens de la précision des mesures. Dans chacune de mes études relatives à des *produits VLBI* (nutation, position des sources, paramètres de rotation terrestre), j'ai toujours distingué fortement la précision des paramètres (leur erreur standard) d'avec leur stabilité (sensibilité à la stratégie d'estimation). Et il apparaît qu'en général, la stabilité contredit ce que dit l'erreur standard : si cette dernière tend à être toujours plus petite (et encore, on verra qu'en réalité, elle tend aussi vers une limite même lorsqu'on accumule de plus en plus d'observations), la valeur du paramètre oscille selon la stratégie d'analyse autour d'une valeur moyenne avec un écart-type largement supérieur, parfois d'un facteur dix. En gros, si l'erreur standard sur un paramètre est de 10 microsecondes de degré, la répétabilité de ce paramètre est dix fois plus grande, soit 0,1 milliseconde de degré.

Nous avons récemment illustré ces idées avec deux doctorants (César Gattano et Ibnu Nurul Huda) ayant partiellement consacré leur thèse aux nutations (Gattano et al., 2016 ; Nurul Huda et al., 2020) où nous avons cherché à poser les limites sur la capacité à détecter la nutation libre du noyau et de la graine dans les nutations. Nous y avons analysé les séries temporelles de nutation produites par les divers centres d'analyse de l'IVS et avons, pour chacune d'entres elles, estimé une sorte de précision interne sous la forme d'un bruit plancher et d'un facteur d'échelle suivant une méthode exposée par Herring et al. (2002) et éprouvée dans plusieurs de mes travaux appliqués à la rotation terrestre ou aux repères célestes (Lambert et al., 2008 ; Lambert, 2014 ; Rosat et al., 2017 ; Liu et al., 2018). Ces deux paramètres sous-entendent que, lorsque la série de nutation est dépouillée de tout signal (en l'occurrence les signaux périodiques et le mouvement libre associé à la nutation du noyau liquide), il doit rester un signal plat fait de bruit gaussien de χ^2 proche de 1. En VLBI, que ce soit dans les séries de nutation ou d'autres quantités (coordonnées de stations, de radiosources...) on observe généralement que le bruit gaussien

résiduel possède un χ^2 supérieur à l'unité, suggérant des barres d'erreur sous-estimées. La figure 1 illustre les résultats de Gattano et al. (2016). J'ai volontairement ici supprimé la référence des centres d'analyse mais laissé la distinction des logiciels sans les nommer. Que faut-il voir dans cette figure ? Que si l'on confie à peu près les mêmes données à dix analystes différents, il en sortira dix séries de nutation très proches mais suffisamment différentes pour que l'ajustement de certains paramètres géophysiques soit significativement impacté voire caduque comme la détection de la résonance associée à la graine solide. Gattano et al. (2016) conclut ainsi que l'écart entre les estimations de la période de la nutation libre de la graine à partir de séries de nutation produites par dix centres d'analyse différents est de l'ordre de la période elle-même, ce qui rend impossible la détermination définitive de cette période. Sur toutes nos séries, les bruits planchers, interprétés en tant que précision interne des séries, vont de 0,06 mas à 0,08 mas pour les solutions individuelles et de 0,07 mas à presque 0,1 mas pour les solutions combinées, le maximum étant pour la combinaison de l'IVS qui est sensée donner la nutation la plus fiable. Si les autres solutions ont un facteur d'échelle supérieur à un, signifiant donc que les erreurs standards sont sous estimées vis à vis des écarts à la moyenne qui n'ont pas de sens physique avéré, celle de l'IVS possède toutefois un facteur d'échelle inférieur qui suggère que cette solution possède des erreurs standards très prudentes, sinon réalistes. Plus réalistes, du moins, que celles des solutions individuelles. Comme suggéré dans Herring et al. (2002) et ainsi que je l'ai pratiqué dans chacun de mes travaux sur la nutation, l'exploitation géophysique des nutations (par exemple l'ajustement des fréquences de résonance du noyau liquide et de la graine) doit se faire avec ces erreurs modifiées. Ce travail de Gattano et al. (2016) était la première pierre d'un projet de géophysique interne à partir des nutations et développé par un doctorant (Ibnu Nurul Huda) et un postdoctorant CNES (Yann Ziegler) dont j'ai co-dirigé les recherches avec Christian Bizouard et sur lesquelles nous reviendrons plus loin.

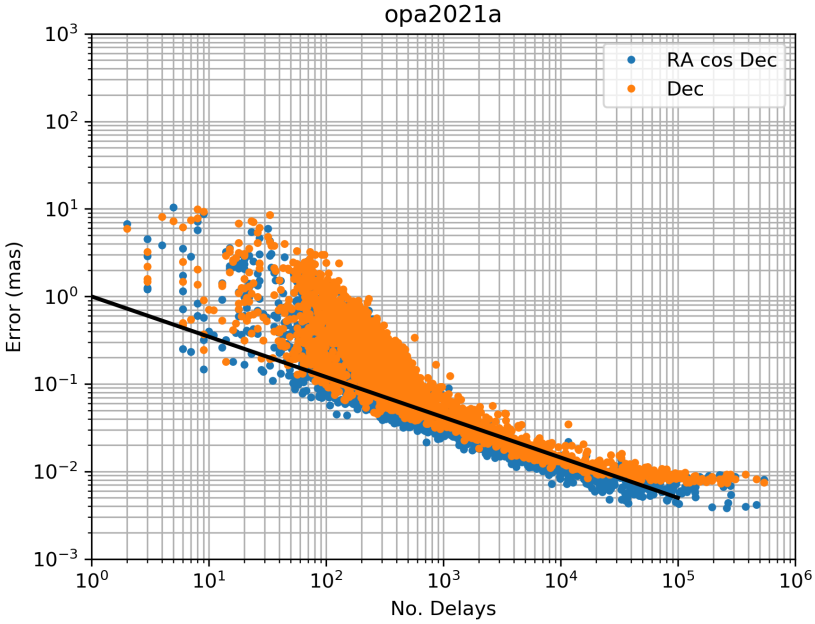


FIGURE 2 – Représentation des erreurs standards sur la position et du nombre d'observations associées à chaque radiosource entrant dans la solution opérationnelle opa2021a délivrée par le centre d'analyse IVS de l'Observatoire de Paris. La droite rouge de pente -1/2 figure la loi suivie par un bruit gaussien dont la précision décroît en $1/\sqrt{N}$ où N est le nombre d'observations.

Gattano et al. (2016) avance que la nutation n'est pas déterminée à mieux que 0,06 mas. Qu'en est-il des autres grandeurs comme, par exemple, les positions des radiosources qui sont, à la différence des nutations, estimées comme paramètres globaux, c'est-à-dire que chaque estimation de chaque coordonnée est basée sur la totalité des retards accumulés en 40 ans (soient une dizaine de millions) ? Les plus petites erreurs standards sur les coordonnées des sources voisinent quelques microsecondes de degré. L'estimation d'une précision interne peut se faire en comparant des solutions *indépendantes*, ce qui est impossible lorsqu'on se limite au VLBI tout seul. Le moyen de contourner au mieux ce problème a

été avancé dans Fey et al. (2015) lorsque nous avons réalisé la seconde version de l'ICRF (ICRF2) : deux prototypes de l'ICRF2 ont été créés au moyen de deux sous-ensembles de sessions regroupant des réseaux fortement différents, garantissant une sorte d'indépendance des deux catalogues obtenus. Leur comparaison a permis d'estimer un bruit plancher et un facteur d'échelle pour les erreurs standards avec le prétexte que ces dernières devaient expliquer les différences entre les deux catalogues. Le bruit plancher de l'ICRF2 a été estimé à 0,04 mas. Celui de l'ICRF3 à 0,03 mas par la même méthode. Avec Niu Liu, doctorant de l'université de Nankin qui a effectué une année collaborative au SYRTE, nous avons approfondi ces estimations et utilisé des méthodes alternatives à Fey et al. (2015) en nous insipirant de Gattano et al. (2016) et Lambert (2014). Nous avons notamment montré que lorsqu'on se restreignait à l'hémisphère nord (là où il y a eu le plus d'observations) on pouvait descendre à 0,01 mas Liu et al. (2018). Les graphiques de tous ces articles montrent que si on accumule des observations (c'est-à-dire les triades formées par deux stations - soit une ligne de base - observant une radiosource), on tend vers ce bruit plancher. Pourquoi y a-t-il un plancher ? La réponse, en général, est que l'on tombe sur des processus non gaussiens qui émergent du bruit thermique lorsque celui-ci diminue du fait du nombre grandissant d'observations. Une illustration est montrée sur la figure 2 (version actualisée de Lambert, 2014) où l'on montre les erreurs standards de position des radiosources en fonction du nombre d'observations. Un processus gaussien suivrait la droite rouge qui descend en $1/\sqrt{N}$ où N est le nombre d'observations. On voit clairement que quand le nombre d'observations est trop grand, on sort du régime. Ce comportement est généralisé à tous les catalogues produits par tous les centres d'analyse de l'IVS (Lambert, 2014). L'explication probable de ce phénomène est la présence d'erreurs liées aux stations (troposphère, horloges) mal modélisées. L'erreur sur ces paramètres décroît en effet comme $1/\sqrt{N_s}$ où N_s est le nombre de stations. En revanche, les erreurs sur les paramètres astronomiques et géodésiques dérivés des retards par ligne de base décroît comme $1/\sqrt{N_b}$ où N_b est le nombre de ligne de base, qui est en N_s^2. Cette seconde erreur décroît donc plus vite que la première qui finit par surgir. L'introduction dans les logiciels d'une modélisation adaptée pourrait aider à résoudre ce problème mais cela n'est pas encore fait ou alors à l'état expérimental (Gipson, 2007 ; Romero-Wolf et al., 2012). Il s'agit là de l'une des pistes permettant de franchir, dans le futur, ce que j'ai appelé la barrière des 0,1 mas.

Le cas des horloges est intéressant dans le cadre d'un laboratoire comme le SYRTE susceptible de proposer des dispositifs plus stables que les masers à hydrogène qui servent à l'heure actuelle de système de datation à chaque télescope. Par ailleurs, on peut se demander ce qu'apporterait un système de liens fibrés reliant tous les télescopes d'un continent à un même étalon primaire, établissant de facto la synchronisation d'une partie du réseau VLBI et permettant de ne plus estimer les paramètres d'horloges pour nombre de télescopes. Clivati et al. (2017) a implémenté un tel dispositif avec succès bien que limité à un télescope. Pour avoir une idée de l'impact d'une mauvaise estimation des paramètres d'horloge dans une session VLBI, on peut regarder la figure 3 qui représente les biais de l'horloge de la station de Wettzell estimés toutes les 5 minutes ainsi que les paramètres de rotation terrestre estimés sur l'ensemble de la session, en prenant pour station de référence successivement les autres stations du réseau observant. On remarquera que l'erreur sur le biais d'horloge peut monter jusqu'à plusieurs centaines de picosecondes, c'est-à-dire devient significative au regard du résidu qui est habituellement de l'ordre de quelques dizaines de picosecondes. La position du pôle et le temps universel sont affectés aussi d'une erreur équivalente à quelques millimètres. C'est donc relativement petit mais de l'ordre des erreurs que l'on cherche à éliminer lorsqu'on a le millimètre pour objectif.

Tout logiciel d'analyse VLBI comporte plusieurs segments dont la modélisation et l'inversion du système d'équations d'observation. Il existe plusieurs logiciels dans lesquels 90% de la chaîne est identique. Je ne discuterai pas ici les possibles impacts de l'algorithme d'inversion qui varie entre les moindres carrés (Calc/Solve, VieVS) et le filtrage de Kalman (OCCAM) car je ne suis pas expert dans ce domaine mais ce point mériterait d'être clarifié au sein de la communauté VLBI par une étude impliquant à la fois les analystes de haut niveau et les développeurs. Plusieurs campagnes de comparaison de logiciels ont été entreprises par l'IVS mais ces campagnes n'ont jamais été au delà de la comparaison du retard théorique (Plank et al., 2010 ; Klopotek et al., 2016). En général, les retards théoriques sont en bon accord entre les logiciels ce qui est déjà un point important. La comparaison au delà, c'est-à-dire au niveau de l'inversion, nécessite un travail beaucoup plus conséquent, car on devient très sensible à la manière dont on élimine les retards aberrants, dont on pondère les observations, dont on modélise les paramètres rapidement variables comme la troposphère ou les horloges. Si la plupart des logiciels ont codé

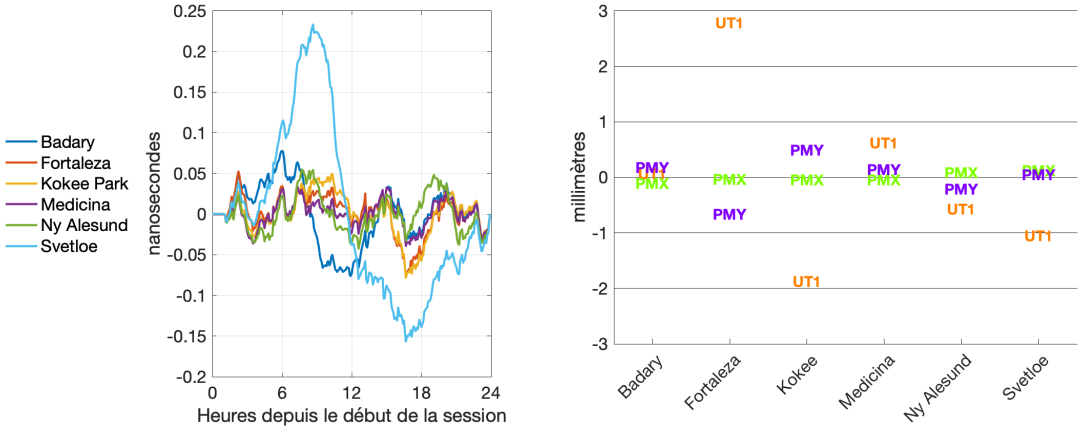


FIGURE 3 – Ajustement des paramètres d'horloge pour la station de Wettzell pour la session VLBI géodésique du 19 janvier 2019 et dans laquelle l'horloge de référence est choisie successivement à chacune des autres stations. A droite, différence des estimations des coordonnées du pôle et de UT1 à leur a priori.

les algorithmes de ce type, il en existe plusieurs et une véritable campagne de comparaison obligerait à ce que les logiciels implémentent plusieurs algorithmes communs, ce qui demanderait un travail très lourd pour les développeurs et une tâche difficile à coordonner entre les centres d'analyse volontaires. Les campagnes de comparaison s'arrêtent donc en général avant ce stade. En revanche, les différences entre logiciels transparaissent lors d'études qui confrontent les solutions de plusieurs centres d'analyse comme la réalisation des ICRF (Fey et al., 2015 ; Charlot et al., 2020), la contribution de l'IVS à l'ITRF (Nothnagel et al., 2015 ; Bachmann et al., 2016) ou encore la combinaison de l'IVS (Böckmann et al., 2007). Il apparaît en général que certains logiciels donnent des solutions significativement différentes de tous les autres. Si ces logiciels sont minoritaires, on peut avoir tendance à considérer leur solution comme marginale sans aucun argument solide pour savoir si leur solution est déficiente, ce qui est très dangereux car la majorité n'a pas forcément raison. De même dans les processus de combinaison entre solutions, il convient de faire attention à ne pas sélectionner les solutions qui se ressemblent et éliminer celles qui sont différentes de la moyenne car on éliminerait des solutions, là encore, sans argument solide quant à leur vraie qualité. C'est pourquoi je pense nécessaire dans un futur proche une comparaison non pas des retards mais des algorithmes d'inversion qui permettrait de trancher des qualités et défauts de chaque algorithme. Dans Lambert (2014) par exemple, je mentionne que la totalité des solutions de Calc/Solve montre la structure typique de la figure 2 pour l'erreur de position des radiosources versus le nombre d'observations mais que celle d'OCCAM semble continuer de suivre une décroissance en $1/\sqrt{N}$. Indication qu'OCCAM (utilisant un filtrage de Kalman), malgré ses erreurs standards toujours plus importantes que celles de Calc/Solve, donne des résultats plus réalistes ?

D'autres explications de ces limites sont à rechercher dans la physique des objets observés (quasars) ou des systèmes observants (radiotélescopes) ou dans le fait que le réseau d'observation (à la fois réseau de quasars et réseau de radiotélescopes) varie d'une session à l'autre. Ce dernier problème est englobé dans ce que l'on nomme l'effet de réseau ou l'effet de repère de référence et qui demande comment rattacher des observations faites avec des instruments différents. Ce problème n'a pour l'instant jamais été adressé rigoureusement et la solution se trouve peut-être dans un traitement différent des repères de référence figés actuels. Cette recherche constitue l'une des possibles voies futures. Quant à la physique des objets, notamment celle des quasars, nous y reviendrons dans la partie consacrée à l'ICRF un peu plus loin. La correction de l'effet de la structure de la radiosource sur le retard VLBI (Charlot, 1990 ; Fey & Charlot, 1997 ; Fey & Charlot, 2000) est une piste à considérer sérieusement, bien qu'elle soit régulièrement avancée sans vrai progrès. Plusieurs études récentes portent des résultats qualitatifs ou généraux sur l'amplitude de cet effet qui est au moins aussi handicapant que les autres sources d'erreur majeures du VLBI (Schaap et al., 2013 ; Plank et al., 2015 ; Xu et al., 2016 ; Shabala et al., 2017 ; Xu et al., 2017 ; Anderson & Xu, 2018 ; Xu et al., 2019). Ces résultats sont intéressants car ils permettent, par exemple, de sélectionner des sources qui ont des effets de structure faibles, mais pour l'instant, la question de la correction de l'effet de structure n'a pas été tranchée. La raison en est, à mon sens, que l'évaluation de

cet effet, qui résulte de l'intrication de la structure *vraie* de la radiosource et de son échantillonnage par le réseau d'observation, produit au moins autant d'incertitude que de correction (voir par exemple Petrov, 2007, dont je cite ici la dernière phrase de l'abstract, traduite de l'anglais : *J'ai montré que l'algorithme traditionnel d'imagerie VLBI CLEAN produit des cartes de flux qui ne sont pas forcément utilisables pour la réduction des sessions VLBI géodésiques car le bruit dans les données rend le calcul de la contribution de la structure de la source au retard VLBI hautement instable.*) Cela peut s'améliorer dans le cadre du système VGOS où il est prévu à terme d'avoir une cadence d'observation suffisante pour, lors d'une session géodésique, imager les sources telles que le réseau les voit et corriger l'effet de structure. Cela demandera du développement dans la capacité d'imager, les algorithmes actuels comme ceux contenus dans DIFMAP (Shepherd, 1997) étant extrêmement sensibles aux paramètres d'analyses et les résultats diffèrent souvent significativement d'un analyste à l'autre, créant des incertitudes de l'ordre des effets que l'on voudrait corriger. Par ailleurs une utilisation opérationnelle demande la capacité de tourner en boîte noire et donc une robustesse accrue.

Il existe certainement d'autres influences non identifiées. Lorsqu'on regarde le résidu inexpliqué après ajustement des paramètres standards au cours de l'ère VLBI, tel qu'affiché sur la figure 4 (petits points bleus et lissage en noir), on ne peut que remarquer qu'il y a du signal : un peu d'annuel et du décennal. Rien de bien cyclique mais rien de suffisamment irrégulier pour être imputé au développement du réseau (qui se signerait plutôt par des variations par à-coup). La moyenne de ces résidus est autour de 20 ps, soient 6 mm en terme de positionnement et un peu moins de 0,2 mas en angle. Influence astronomique ? La superposition du champ magnétique polaire du soleil (données du Wilcox Solar Observatory à l'université de Stanford, Californie) montre une similarité frappante qui suggère un effet solaire non modélisé dans la chaîne d'analyse VLBI. Autre effet encore inconnu ? Cela mérite recherche dans un futur proche car si un tel effet non modélisé subsiste, il constitue une limitation non négligeable à l'accroissement de la précision du VLBI.

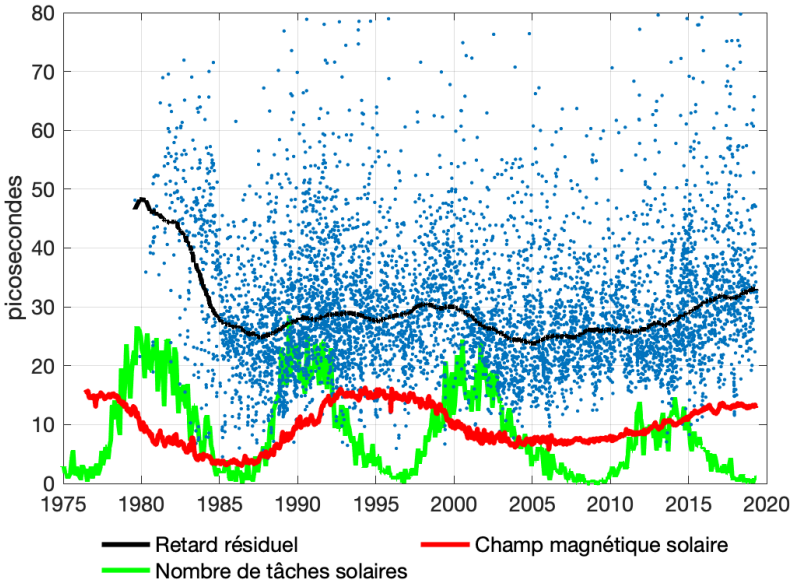


FIGURE 4 – Les petits points bleus représentent le retard résiduel inexpliqué après ajustement de tous les paramètres pour chaque session VLBI (environ 6000 sessions) dans la solution opérationnelle opa2019a délivrée par le centre d'analyse IVS de l'Observatoire de Paris. La ligne noire est un lissage de ces derniers. En vert et rouge sont superposés, respectivement, le nombre mensuel de tâches solaires (données du Solar Influence Data Center) et le champ magnétique polaire du soleil (données du Wilcox Solar Observatory) lissés et mis à l'échelle.

Pertinence de l'approche directe

Parmi les stratégies d'analyse innovantes, nous avons développé l'approche *directe* qui consiste à introduire de nouvelles dérivées partielles dans le logiciel d'analyse VLBI pour estimer de nouveaux

paramètres plutôt que de les estimer a posteriori sur, par exemple, les résidus ou des produits VLBI intermédiaire. L'un des cadres d'application de l'approche directe était la méthode d'ajustement des paramètres géophysiques de Mathews et al. (2002) qui consistait à (i) analyser les retards VLBI pour fabriquer des séries temporelles de nutation, (ii) ajuster des amplitudes sur ces séries nutations et (iii) ajuster les paramètres géophysiques d'intérêt sur ces amplitudes. Cela multiplie les phases de calcul et engendre une perte de l'information sur la covariance entre les paramètres et il semblerait plus *propre* et élégant d'ajuster directement les paramètres géophysiques sur les retards VLBI. Toutefois, ce faisant, on prend le risque de perdre en souplesse et en contrôle pour certaines erreurs systématiques. L'approche directe agit alors un peu comme une boîte noire alors que l'approche indirecte est comme plusieurs petites boîtes noires entre lesquelles on peut vérifier si tout va bien et corriger le tir le cas échéant. Par ailleurs, si les paramètres d'intérêt sont peu corrélés avec les autres, au final, la méthode indirecte donnera le même résultat que la méthode directe. En réalité, tout n'est ni tout blanc ni tout noir et chaque approche s'avère préférable dans certains cas.

Nous avons implémenté l'approche directe dans Le Poncin-Lafitte et al. (2016), ce qui contraste avec les études précédentes basées sur les résidus de données de tirs laser sur la lune. La précision (erreur standard) obtenue par une approche indirecte consistant à estimer le paramètre d'intérêt sur les résidus VLBI (retard inexpliqué) était de 10^{-8} alors qu'elle est de 10^{-5} avec l'approche directe. La différence entre les deux méthodes traduit une corrélation entre ce paramètre et d'autres paramètres du système d'équations du VLBI (positions des radiosources) qui, si on les néglige, affectent donc les résultats de manière impressionnante. L'approche directe permet donc, en propageant rigoureusement la matrice de covariance du système complet, une contrainte prudente sur le paramètre. On notera que les estimations du paramètre post-newtonien de Lambert & Le Poncin-Lafitte (2009) et Lambert & Le Poncin-Lafitte (2011) utilisent également cette approche qui était déjà prévue dans le logiciel.

Titov et al. (2011) et Titov & Lambert (2013) constituent, à l'inverse, des exemples d'approches indirectes. Nous y avons estimé l'amplitude de l'aberration séculaire liée au mouvement du système solaire dans l'univers en l'ajustant sur les pentes des séries temporelles de position astrométrique de centaines de radiosources que nous avions préalablement déterminées à partir de l'analyse des retards VLBI. Notre méthode a permis un contrôle à plusieurs niveaux des valeurs aberrantes : dans les retards, dans les points des séries temporelles, dans leurs pentes. Les études parallèles utilisant l'approche directe consistant à ajuster directement l'aberration séculaire sur les retards (e.g. Xu et al., 2012) s'avèrent très sensibles aux erreurs systématiques (voir aussi MacMillan et al., 2019), incontrôlables dans cette approche moins souple. Les erreurs standards sont réduites dans l'approche directe d'un facteur 2 à 5 mais il faut être prudent sur l'interprétation de cette précision puisque, justement, on observe des erreurs systématiques inexplicables par la physique (voir plus loin dans ce mémoire).

Revenons au cadre des nutations évoquées plus haut : dans Nurul Huda et al. (2020) on a choisi d'entrer les dérivées partielles du retard VLBI par rapport aux amplitudes des nutations, puis par rapport aux paramètres géophysiques de Mathews et al. (2002). Etant méfiants vis-à-vis de l'erreur standard relativement petite (une ou deux microsecondes de degré) sur les amplitudes de nutation, nous avons mis en place une méthode pour tester sa robustesse : nous recalculons ces amplitudes pour deux listes de sessions relativement indépendantes (typiquement les sessions paires et impaires, d'où l'appellation *Even-Odd* de cette méthode). Pour des nutations de périodes longues devant le temps entre deux sessions (une semaine), on devrait obtenir les mêmes amplitudes quelle que soit la liste. Or, on a une petite différence qui varie de quelques microsecondes de degré à une dizaine de microsecondes de degré, pour une erreur standard dix fois moindre. Ce résultat très intéressant est résumé sur la figure 5 qui montre les écarts entre les amplitudes des nutations données par le modèle de Mathews et al. (2002) et le VLBI tels qu'ajustés sur les retards VLBI ainsi que trois types d'erreur associés à ces ajustements. L'erreur standard, la plus faible, est issue du processus d'inversion par moindres carrés - ces erreurs apparaissent de l'ordre de la microseconde de degré et ne varient pas beaucoup avec la période de la nutation considérée. L'erreur empirique *Even-Odd* est la différence entre les amplitudes ajustées sur les sessions paires uniquement et les sessions impaires uniquement. Dans ce cas, il apparaît que certaines bandes de fréquences sont plus robustes que d'autres. Enfin, en bleu, on voit la différence entre deux contributions atmosphériques calculées avec des séries de moment cinétique atmosphérique issues de deux modèles de circulation différents - ici NCEP/NCAR Reanalysis (Kalnay et al., 1996) et ECMWF (Dee et al., 2011 ; Dobslaw & Dill, 2018) - et qui posent une incertitude sur l'amplitude finale (hors

contribution atmosphérique) des nutations annuelles qui est très éloignée de l'erreur standard. Dans le cadre de l'étude de Nurul Huda et al. (2020), on verra plus loin dans ce mémoire l'impact négatif des erreurs standards sous-estimées sur l'interprétation physique des résultats.

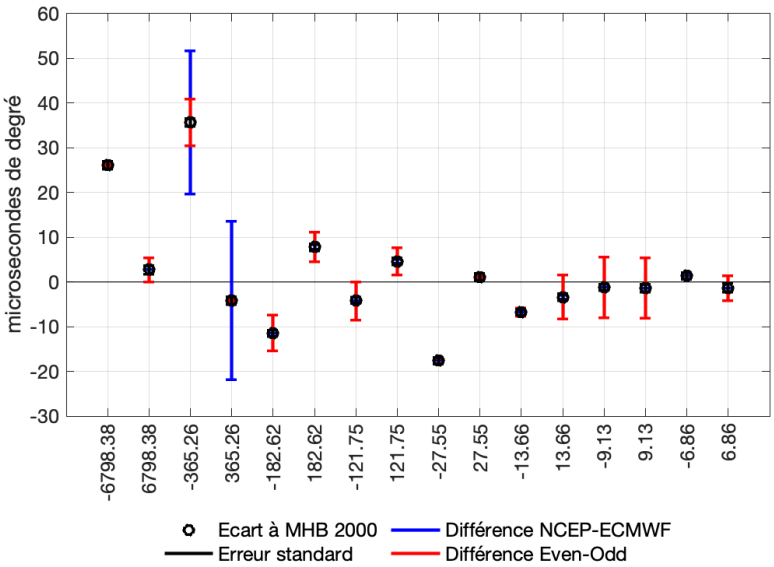


FIGURE 5 – Les écarts entre les amplitudes des nutations données par MHB 2000 et le VLBI (Nurul Huda et al., 2020) ainsi que trois types d'erreur associés à ces ajustements : erreur standard en noir, différence entre estimations sur les sessions paires et impaires en rouge et différence entre les contributions atmosphériques calculées à partir de deux modèles de circulation indépendants.

En conclusion, il est important d'être capable de distinguer si une stratégie d'analyse est plus pertinente qu'une autre et si elle apporte quelque chose en terme d'exactitude et de robustesse. Cela ne sert à rien d'avoir une erreur standard sur un paramètre plus petite si la valeur de ce paramètre est soumise à une erreur systématique incontrôlée. Ainsi, l'une des missions de l'analyste VLBI n'est pas seulement de se servir du logiciel d'inversion des retards VLBI (Calc/Solve, OCCAM, VieVS, DYNAMO ou autre) mais de construire un protocole permettant d'accéder à une erreur empirique plus pertinente, plus représentative et réaliste, que l'erreur standard et à établir un diagnostic sur la pertinence des valeurs des paramètres calculés (et par là même sur la pertinence de leur exploitation scientifique). Nous avons développé plusieurs protocoles applicables à plusieurs types de paramètres en jouant sur la comparaison entre erreurs standards et stabilité ou dispersion des résultats (Lambert, 2014 ; Gattano et al., 2016 ; Liu et al., 2018 ; Nurul Huda et al., 2020). D'autres méthodes sont également applicables comme la comparaison des produits VLBI à des indicateurs externes comme une technique indépendante : *Gaia* dans le cas de l'ICRF (voir la section suivante et Charlot et al., 2020 ; Liu et al., 2020) ou le moment cinétique de l'atmosphère et des océans, méthode utilisée par Ray et al. (2005) dont nous nous servons pour contrôler la qualité de séries de mouvement du pôle et de longueur du jour issues de la combinaison multi-techniques que nous développons actuellement au SYRTE (Lambert et al., 2017b).

Le repère de référence céleste

L'ICRF3 parmi les plus précis

A l'heure actuelle, l'un des repères de référence céleste les plus précis est la troisième version de l'ICRF, ou ICRF3 (Charlot et al., 2020). Le travail effectué pour la réalisation de ce repère a permis de lever un certain nombre d'incertitudes et d'apporter des réponses à un certain nombre de questions qui subsistaient depuis la réalisation précédente, l'ICRF2 (Ma et al., 2009 ; Fey et al., 2015). Elle a également suscité un certain nombre de questions et d'idées directrices pour les travaux futurs. L'ICRF3 arrive ainsi à un moment charnière de l'histoire des repères de référence notamment parce que, comme je l'ai dit plus haut, le VLBI est en pleine croissance et qu'il a enfin une technique sœur en *Gaia*.

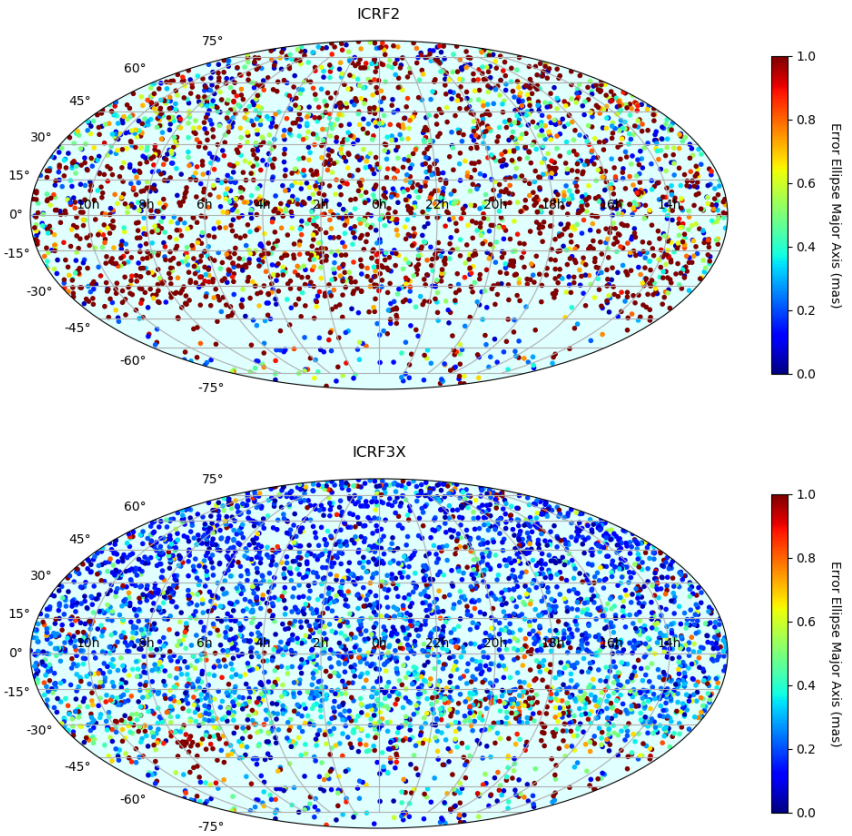


FIGURE 6 – En haut, l'ICRF2. En bas, l'ICRF3. La couleur représente l'amplitude du grand axe de l'ellipse d'erreur. On note que l'ICRF2 est relativement *rouge* tandis que l'ICRF3 est dans le bleu, ce qui signifie une amélioration globale des erreurs de position.

La réalisation du repère de référence fondamental ICRF3 a été initiée en 2012. Trois ans après la publication et l'adoption par l'UAI de l'ICRF2 (Ma et al., 2009 ; Fey et al., 2015), il convenait en effet de s'atteler à un certain nombre de tâches qui visaient à améliorer les zones d'ombres de ce dernier repère. Parmi ces zones d'ombre, deux méritaient une attention particulière et qui sont illustrées sur la figure 6 en haut à gauche qui montre la répartition des sources de l'ICRF2 en fonction de leur ellipse d'erreur. Ce qui saute au yeux est la transition brutale dans la densité de radiosources aux alentours de 40°S. D'autre part, on note un grand nombre de sources *rouges* dénotant une précision de positionnement supérieure ou égale à 1 mas, ce qui est gros pour du VLBI. Pour l'asymétrie nord-sud, on incriminera le réseau VLBI mondial qui est, pour des raisons historiques, essentiellement dans l'hémisphère nord. Quant aux positions peu précises de près de 2000 sources, on a affaire à des sources observées dans le cadre du programme VLBA Calibrator Survey (voir Petrov et al., 2008, et références) qui ne le furent bien souvent que dans une seule session. (On a pris l'habitude de désigner ces sources par *sources VCS.*) Rien de bien grave, donc : pour améliorer les choses, il suffit d'observer davantage dans le sud (au besoin d'y mettre de nouveaux télescopes) et de réobserver plusieurs fois les sources VCS, le cumul d'observation amenant rapidement à une amélioration de la précision de positionnement. Le groupe de travail UAI *Third realization of the International Celestial Reference Frame*, dont le premier mandat s'est étendu sur la période 2012-2015, s'est donné pour but de combler ces lacunes en programmant de nouvelles observations des sources VCS et en observant dans l'hémisphère sud grâce aux télescopes VGOS récemment mis en service en Australie et Nouvelle-Zélande (celles-ci observant notamment avec l'Afrique du Sud, l'Antarctique et l'Asie).

Le second mandat (2015-2018) a été consacré à la création du catalogue à proprement parler. La feuille de route a été conçue pour répondre aux questions : quelle configuration d'analyse devons-nous choisir pour avoir le catalogue le plus précis possible et le moins déformé possible ? quelles sources de définition devons-nous choisir pour porter les axes du repère ? et pour aligner ce nouveau repère sur l'ICRS et

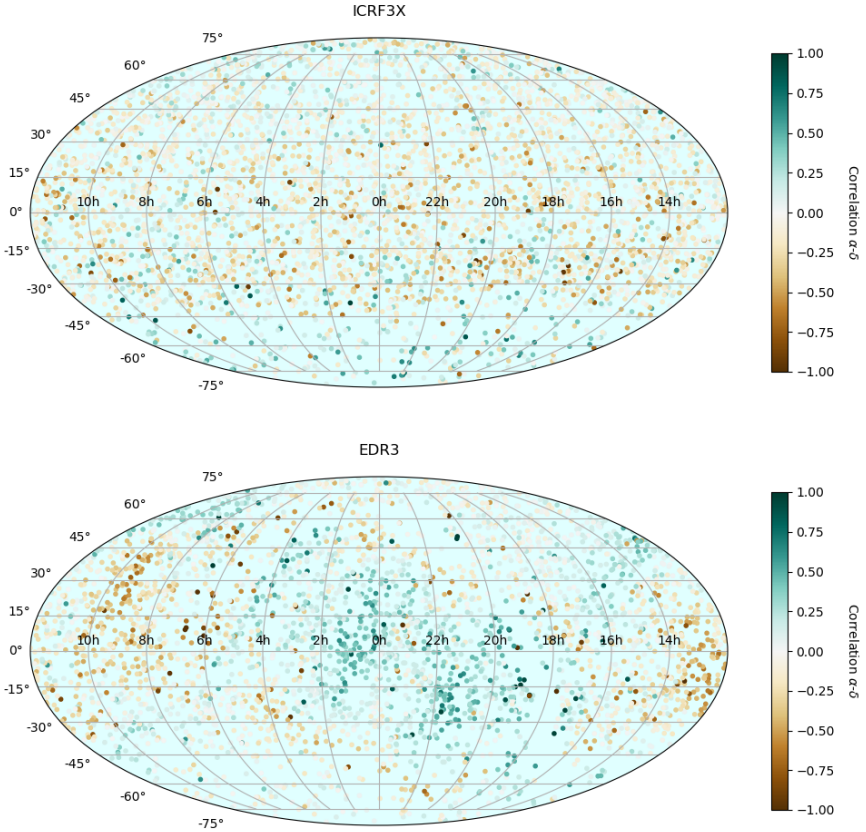


FIGURE 7 – En haut, l'ICRF3. En bas, les contreparties optiques de *Gaia* EDR3. La couleur représente la corrélation entre les estimations de α et de δ. On ne note pas de tendance flagrante dans les corrélations de l'ICRF3, sauf peut-être un peu plus de rouge vers le pôle sud, signifiant une difficulté à estimer l'ascension droite et la déclinaison avec la même précision dans ces régions peu observés. Pour *Gaia* EDR3, on voit que la corrélation porte l'empreinte de la loi de balayage.

ses réalisations antérieures. Le groupe de travail a été restreint aux acteurs majeurs de la communauté VLBI mondiale, incluant les responsables des principaux centres d'analyse volontaires pour participer aux analyses des observations et les responsables des principaux logiciels d'analyse. Mon rôle à l'intérieur du groupe de travail a été double : d'une part contribuer aux analyses des observations en tant que responsable du centre d'analyse de l'Observatoire de Paris, d'autre part valider l'ensemble des solutions prototypes émergeant des différents centres d'analyse. Cette validation comprenait la comparaison des solutions VLBI entre elles et avec les solutions de référence (ICRF2, *Gaia* DR1 puis DR2 restreintes aux contreparties optiques de l'ICRF) et l'estimation des déformations globales. Enfin, j'ai implémenté une méthode nouvelle permettant le choix des sources de définition portant les axes du repère.

Une étape cruciale de la construction de l'ICRF3 a donc été la mesure des déformations globales. Ces déformations globales contiennent en quelques sorte l'exactitude du repère : on l'a évoqué plus haut, on peut avoir une précision (erreur standard) très faible sur la position sans pour autant que cette position soit correcte lorsqu'elle inclut des biais significatifs. Cette étape a pris tout son sens dans le contexte de *Gaia* alors qu'elle n'avait que bien moins de sens lors des précédentes réalisations. En effet, lors de l'établissement des précédents repères, le VLBI était la seule technique à atteindre des précisions inférieures à la milliseconde de degré pour les objets extragalactiques. Autrement dit, il était impossible de comparer les solutions VLBI à des solutions indépendantes. Le VLBI ne pouvait être comparé qu'à lui-même et, de facto, d'éventuelles anomalies à grande échelle apparaissant dans toutes les solutions VLBI possibles (même avec des variations subtiles dans la stratégie d'analyse) ne pouvaient être mises en évidence clairement. Cette situation a radicalement changé avec l'arrivée des catalogues de *Gaia* qui possèdent une précision du même ordre que le VLBI et, surtout, des erreurs systématiques différentes, inhérentes à sa propre loi de balayage qui est bien différente de celle du VLBI. L'indépendance des solutions VLBI et *Gaia* est illustrée qualitativement sur la figure 7 qui montre successivement la corrélation entre ascension droite et déclinaison pour l'ICRF3 en bande S/X et les contreparties optiques extraites de *Gaia* EDR3 (Early Data Release 3 et EDR3 ; Prusti et al., 2016 ; Brown et al., 2021). On notera pour le VLBI, une relative uniformité des corrélations entre ascension droite et déclinaison. Pour l'échantillon issu de *Gaia* EDR3, on note des inhomogénéités dans les corrélations qui suivent la densité d'observations suivant la loi de balayage. On sent d'emblée que les deux techniques ne montreront pas les mêmes erreurs systématiques : si celles du VLBI ont toutes les raisons d'être zonales, de part l'asymétrie nord-sud chronique, celles de *Gaia* ne le seront pas mais pourraient apparaître à des degrés plus hauts dans les harmoniques. La figure 8 de gauche montre les erreurs standards lissées pour l'ICRF2, l'ICRF3 en bande S/X et des contreparties dans *Gaia* EDR3. On note immédiatement que pour le VLBI l'erreur croît lorsque la déclinaison décroit, résultat à la fois de la raréfaction des observations dans le sud et de leur qualité moindre à cause d'un réseau déficient. Pour l'échantillon de *Gaia* EDR3, l'erreur est certes plus grande mais aussi plus uniforme. Sur la figure 8 de droite, on montre non plus l'erreur standard mais les différences à l'ICRF3 de l'ICRF2 et de *Gaia* EDR3. On y voit que l'ICRF3 diffère fortement de l'ICRF2 par une erreur systématique zonale de l'ordre de 0,1 mas. Imaginons un instant que *Gaia* n'existe pas. Que conclure ici ? Que l'ICRF2 avait raison ? Que l'ICRF3 a raison et que c'est l'ICRF2 qui était faux ? Il y a des raisons d'ordre *philosophique* pour penser que l'ICRF3 est meilleur puisqu'il y a plus d'observations, que certains modèles ont été améliorés dans la chaîne d'analyse et que nous-mêmes avons plus d'expérience, mais cela ne constitue pas un argument scientifique suffisant. La comparaison à *Gaia* montre, en revanche, que l'ICRF3 et les contreparties optique de *Gaia* sont proches. Or, comme on l'a dit plus haut, il n'y a aucune raison que les deux techniques aient les mêmes erreurs systématiques. La figure 8 de droite prouve que l'ICRF3 est une amélioration nette de l'ICRF2 : il est cohérent avec une mesure indépendante. Et la déformation zonale a disparu.

Qu'avons-nous corrigé pour faire disparaître la déformation zonale de l'ICRF2 ? D'une part, l'accumulation des observations dans le sud et sur les sources VCS a amélioré la corrélation entre les coordonnées de la source et la contribution troposphérique qui a pour effet de diminuer artificiellement la déclinaison (Mayer et al., 2017). C'est donc le résultat des campagnes d'observation entreprises lors du premier mandat du groupe de travail et de la continuation du programme régulier de l'IVS. Un autre effet avait été négligé à l'époque de l'ICRF2, celui de l'aberration galactique que nous avions mise en évidence pour la première fois au moyen d'observations VLBI en 2011 (Titov et al., 2011 ; Titov & Lambert, 2013). Ces études avec Oleg Titov avaient non seulement permis de mesurer l'amplitude de l'aberration suivant une méthode complètement cinématique mais également démontré la sensibilité du VLBI à ce phénomène qui

ne devait donc plus être négligé dans les travaux futurs. Dans l'ICRF3, il a été décidé de modéliser l'effet de l'aberration galactique en prenant pour amplitude une valeur moyenne représentative des estimations par VLBI réalisées par plusieurs équipes et cohérente avec les déterminations indépendantes basées sur les masers. La valeur optimale de 5,8 μas par an a été choisie dans le cadre d'un groupe de travail de l'IVS dont j'étais membre (MacMillan et al., 2019). La modélisation de l'aberration galactique absorbe une bonne partie des différences entre ICRF2 et ICRF3 : l'époque moyenne des observations de l'ICRF2 étant environ 2003 et celle de l'ICRF3 étant 2013, la modélisation compense ainsi une dérive séculaire des sources cumulée sur environ 10 ans, soit un terme dipolaire d'amplitude quelques 60 μas dirigé vers le centre galactique. On notera que *Gaia* a déterminé une valeur de l'aberration galactique de 5,05 μas par an (Klioner et al., 2021), sensiblement différente de celle du VLBI (l'erreur formelle est de 0,35 μas). La raison de la différence n'est pas éclaircie à l'heure actuelle. La plage de valeurs issues du VLBI va de 5,1 à 6,4 μas par an, valeurs associées à des erreurs du même ordre que celle de *Gaia*. Toutefois, les valeurs dérivées de l'astronomie galactique vont de 4,8 à 5,4 μas par an (voir les références dans MacMillan et al., 2019), et sont donc en meilleur accord avec *Gaia* et indiquant une possible surestimation systématique de la part du VLBI.

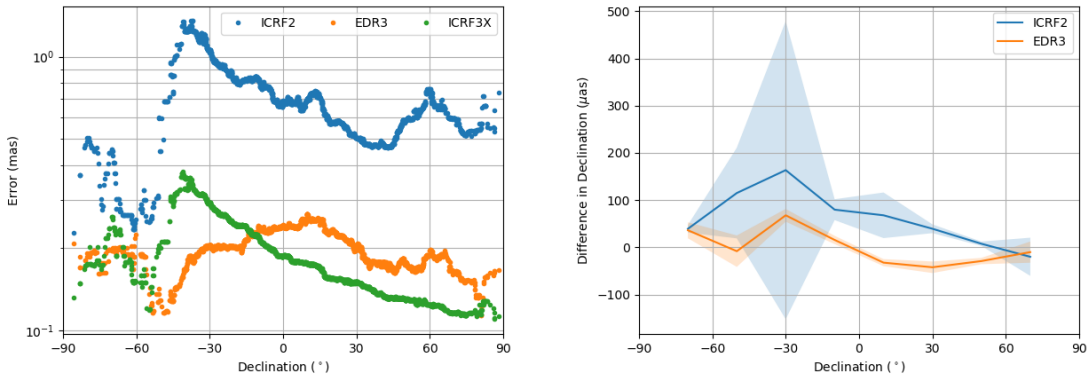
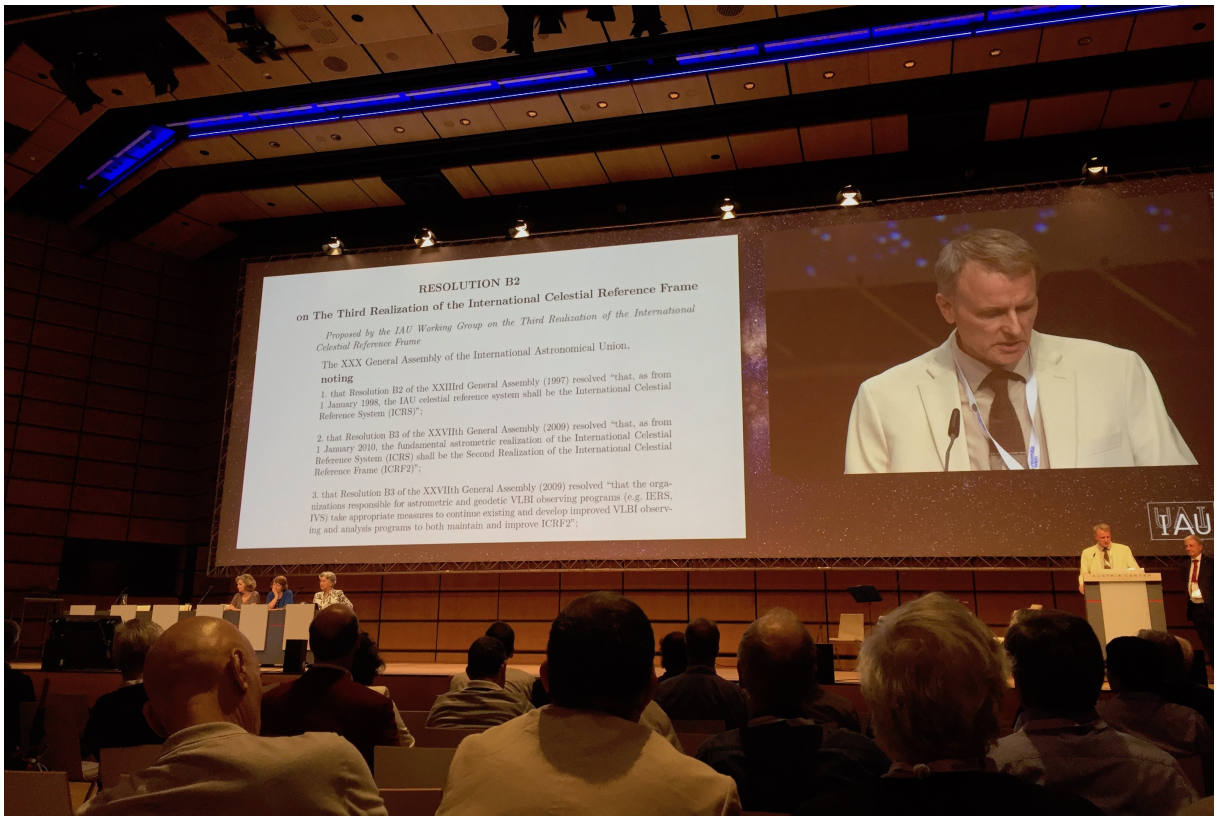


FIGURE 8 – A gauche, lissage de l'erreur standard des ICRF2, ICRF3 et *Gaia* EDR3 (restreinte aux contreparties optiques de l'ICRF3) en fonction de la déclinaison. A droite, écart moyen de déclinaison entre ICRF3 et ICRF2 et entre *Gaia* EDR3 et ICRF2 par boîtes de 20° de déclinaison.

Que reste-t-il de méchant dans l'ICRF3 en termes d'erreurs systématiques ? Si on regarde les déformations entre *Gaia* DR2 et l'ICRF3, on note que la déformation dipolaire n'est plus significative : l'amplitude du dipôle est de 18 ± 13 μas. Elle n'est pas nulle toutefois. Il y a deux contributions principales à cette déformation. L'une était l'aberration galactique qui a été corrigée. A titre d'exemple, si on prend l'ICRF2 et qu'on le corrige de l'aberration galactique pour l'amener à la même époque de référence que l'ICRF3, on trouve que la déformation dipolaire selon Y est non significative mais celle en Z l'est (environ 40 μas, significatifs à 3σ). Cette déformation selon Z, qui varie selon le cosinus de la déclinaison, est le résultat des déficiences du réseau déjà évoquées. Elle apparaît également, avec une amplitude comparable, dans le terme en $\cos 2\delta$. Dans les deux cas, on a donc une erreur systématique qui décale les sources vers les pôles. Par rapport au sous-ensemble correspondant de *Gaia*, l'ICRF3 ne montre plus le terme en $\cos\delta$ mais toujours celui en $\cos 2\delta$. L'erreur systématique inhérente au VLBI a été amoindrie entre l'ICRF2 et l'ICRF3 mais subsiste toujours ! On notera que les études comme Titov et al. (2011) mesurent en fait l'aberration totale résultant de l'accélération du système solaire dans l'univers. Si la composante majoritaire de cette accélération est bien celle due à la rotation du système solaire autour du centre de la Voie Lactée, d'autres aberrations moindres proviennent d'orbites plus amples mais plus lentes, produisant des aberrations nettement sous la microseconde de degré par an. La composante non galactocentrique du vecteur d'aberration estimée dans les études mentionnées par MacMillan et al. (2019), et qui est répercutée dans les erreurs systématiques en cosinus de δ et de 2δ, peut trouver son origine également dans un mouvement du système solaire perpendiculairement au disque galactique, mais cela est peu probable, ainsi que discuté par Titov & Lambert (2013) où nous mentionnons que l'aberration résultante ne doit pas dépasser 0,5 μas par an au moment où l'accélération est la plus forte, c'est-à-dire aux éloignements

maximums du disque galactique. Cette composante non galactocentrique est très variable selon les études. Son amplitude est de quelques dixièmes de microsecondes de degré par an et de l'ordre de l'incertitude formelle ou moins. Sa robustesse médiocre interdit encore toute interprétation physique.



Lecture du texte de la résolution B1.3 en séance plénière à l'assemblée générale de l'UAI à Vienne en août 2018 par le président du comité des résolutions juste avant son adoption à l'unanimité.

A l'heure actuelle, l'ICRF3 (Charlot et al., 2020) est le repère le plus précis existant avec un bruit plancher de 30 μas, soit un peu meilleur que l'ICRF2 (40 μas) mais avec un nombre supérieur de sources (4535 contre 3414) et surtout une erreur médiane beaucoup plus faible (0,2 mas contre plus de 0,7 mas). Il a été adopté par l'UAI comme repère fondamental en août 2018 lors de l'assemblée générale de l'UAI. Cette amélioration drastique de l'erreur médiane est à imputer aux sources VCS qui ont été réobservées et dont l'erreur formelle de position est maintenant considérablement meilleure. L'ICRF3 est donc plus homogène du point de vue des erreurs que l'ICRF2. L'ICRF3 est donc un progrès net en termes d'uniformité et d'erreur médiane mais relativement moindre en termes de bruit interne. On l'a déjà évoqué plus haut : il semble y avoir une barrière à quelques dizaines de microsecondes de degré qui fait que, même si l'on cumule des observations, on butte. C'est là la question importante pour la suite : comment franchir la barrière ? Il est clair que si on fabrique l'ICRF4 dix ans après l'ICRF3 (2028, donc...) et en suivant la même stratégie que pour ce dernier, on risque de ne pas constater beaucoup de différences. Voici donc quelques pistes de réflexion.

Peut-on faire encore plus précis ?

Que faire pour améliorer la précision du repère céleste ? Il existe plusieurs pistes et je ne prétends pas les connaître toutes. Une première piste est le point de vue purement statistique : la précision avec laquelle un repère de N sources est orienté est en $1/\sqrt{N}$ et il suffit donc d'augmenter le nombre de sources. Toutefois, il y a deux objections à cette thèse. Premièrement, si on veut gagner un ordre de grandeur dans la précision, il faut donc multiplier le nombre de sources de référence par 100, et on imagine mal que d'ici l'ICRF4, le VLBI ait observé 400000 sources de manière régulière et dense. Deuxièmement, l'assertion qui

précède est vraie si la position de la radiosource est assimilable à un bruit blanc. Seulement dans ce cas, l'ajout de nouvelles observations permet de diminuer l'erreur sur la moyenne. Or, Gattano et al. (2018) montre que la position astrométrique des sources varie principalement selon un bruit de scintillation ou de marche aléatoire.

La seconde piste est un point de vue local, relatif à chaque source prise individuellement : puisque les points de référence de l'ICRF bougent et qu'on peut en mesurer le mouvement apparent, peut-on utiliser l'information présente dans ces séries temporelles astrométriques pour améliorer la stabilité du repère céleste ? Cette variabilité positionnelle des points de référence a été évoquée à de multiples reprises dans la littérature (Fey et al., 1997 ; Feissel-Vernier, 2003 ; Feissel-Vernier et al., 2006 ; MacMillan & Ma, 2007 ; Lambert et al., 2008 ; Gattano et al., 2018) et a servi comme critère de discrimination majeur dans le choix des sources de définition de l'ICRF2 (Fey et al., 2015) et de l'ICRF3 (Charlot et al., 2020) ou lors de propositions de sources de définition alternatives (Feissel-Vernier, 2003 ; Lambert & Gontier, 2009). Les travaux pré-cités considèrent ces séries comme des signaux stationnaires mais on peut songer à une modélisation plus réaliste. Une tentative en ce sens est la modélisation par fonctions linéaires par morceaux de Karbon et al. (2016) qui permet ensuite d'appliquer les contraintes minimales sur toutes les sources et non seulement les sources de définition. C'est ce qui se rapproche le plus des modélisations des mouvements post-sismiques de l'ITRF 2014 (Altamimi et al., 2016). D'autres modélisations plus complexes doivent être explorées.

Il existe aussi d'autres pistes de recherche comme la recherche de sous-ensembles de radiosources - temporairement - stables pouvant servir de sources de définition temporaires. C'est l'un des cœurs du projet de recherche de César Gattano (postulant au CNAP). Il est à noter qu'une telle solution ou celle avancée par Karbon et al. (2016) remettent en question le paradigme de l'ICRF qui est un système sans époque de référence dans lequel les points de référence sont fixes et qu'elles nécessiteraient un changement notable du format des catalogues qui contiendraient alors non plus seulement des positions mais autre chose comme des vitesses et donc des époques de référence. Toutefois, on est déjà dans ce cas avec l'ICRF3 puisque, l'aberration galactique induisant un mouvement linéaire des sources, les positions qui y sont données le sont pour 2015.0. On notera que le système sous-jacent, lui, est toujours pour J2000.0.

Une troisième piste est celle de la combinaison multi-technique, une façon de faire couramment utilisée dans notre communauté pour la construction de l'ITRF et le calcul des paramètres d'orientation de la Terre. Le but d'une combinaison est de compenser les faiblesses d'une technique, forte par ailleurs, par les forces d'une autre, chaque technique ayant ses points forts et ses points faibles. Ainsi, le VLBI est-il la seule technique reliant la Terre au repère quasi-inertiel (ICRF) et, grâce à cela, peut mesurer la nutation et le temps universel. En revanche, son réseau terrestre relativement pauvre n'en fait pas une technique très performante pour la mesure de la position du pôle qui est plutôt l'apanage du système de navigation global par satellites (GNSS). Actuellement, l'ITRF et les paramètres d'orientation terrestre bénéficient donc de cette combinaison mais pas l'ICRF qui reste uniquement déterminé par VLBI, posant par là un problème de cohérence et entrainant régulièrement des discussions enflammées au sein de la communauté : l'ICRF est cohérent avec son propre repère terrestre et ses propres paramètres de rotation terrestre, à la différence par exemple de la série de référence C04 qui est cohérente avec (comprendre *alignée sur*) la version courante de l'ITRF (Bizouard et al., 2019). Selon la communauté, il faudrait donc produire l'ICRF selon une méthode de combinaison dite *au niveau des observations* ou *au niveau des équations normales* et qui a la vertu d'inverser tous les paramètres (repère terrestre, repère céleste et EOP) en une seule fois. J'avoue ne pas être un partisan aveugle de cette stratégie. A cette heure, plusieurs équipes s'y sont essayées mais aucune n'a réellement apporté un argument scientifique définitif en sa faveur ni même (ce qui est plus inquiétant) une combinaison complète et opérationnelle. Il est évident que combiner des données permet, en accroissant le nombre d'observations, de diminuer l'erreur standard. En revanche, les gains sur la répétabilité et les erreurs systématiques sont en général très faibles (voir le très pragmatique article de Ray et al., 2005). Or, cette combinaison est lourde à mettre en place notamment lorsqu'on veut contrôler les modèles et a priori entrant en jeu dans chaque technique. Elle demande en particulier des contributions coordonnées de plusieurs spécialistes des différentes techniques et donc une bonne coordination d'institutions difficile à gérer sur le moyen et long terme. En comparaison, les combinaisons a posteriori permettant d'obtenir l'ITRF et la C04 ont l'avantage que l'on peut y contrôler chaque étape (revoir la discussion plus haut sur les aspects similaires entre les approches directes et indirectes en VLBI). C'est afin de tester la pertinence de la combinaison *au niveau des équations normales* que je me suis investi

dans ce projet au SYRTE avec le logiciel DYNAMO du CNES. En testant la combinaison entre VLBI et GNSS sur 2002-2020, on a montré que l'ajout du GNSS aux observations VLBI permet de diminuer significativement la corrélation entre les angles de nutation et les dérivées temporelles du mouvement du pôle, ce qui améliore nettement la détermination des nutations (Lambert et al., 2017b ; Richard et al., 2021). On observe ainsi que pour des sessions à réseau faible, la nutation est aberrante lorsqu'elle n'est déterminée qu'à partir du VLBI alors qu'elle est réaliste lorsqu'on y joint le GNSS. Cet argument est en faveur de pousser plus loin la combinaison et d'estimer le repère céleste. En quoi le GNSS (ou la télémétrie laser ou encore le système DORIS) qui n'observe pas les quasars peut-il aider dans la construction de l'ICRF ? De la même manière qu'il peut aider dans la détermination de paramètres comme la nutation auxquels il n'est pas sensible : en contraignant les autres paramètres communs entre lui et le VLBI, dont le repère terrestre et le pôle. Dans notre combinaison VLBI-GNSS, nous avons récemment relaxé les coordonnées des quasars et les analyses devraient suivre pour évaluer la qualité des estimations. Ce travail a été retardé par divers facteurs dont la nécessité de boucler la combinaison opérationnelle. Un projet parallèle auquel nous participons est l'ANR GEODESIE (Coulot et al., 2017) qui devrait aboutir vers 2022 également à un *ICRF multi-techniques* mais sans but opérationnel. Il existe des projets concurrents qui donnent des résultats encourageants (Soja et al., 2017) et qui préfigurent que, lors du prochain ICRF, nous serons en mesure de présenter plusieurs de ces ICRF d'un nouveau type et donc en mesure d'avoir l'ITRF et l'ICRF pleinement cohérents.

Astrométrie, AGN et trous noirs

La sous-section précédente aurait presque pu être placée dans le premier chapitre de ce mémoire tant elle est *instrumentale* et ne fait aucun cas de la nature physique des points de référence de l'ICRF. Par ailleurs, la question de savoir ce que l'astrométrie ultra-précise faite dans le cadre de l'ICRF peut apporter à la connaissance des objets de référence est encore à l'heure actuelle rarement posée : un certain nombre d'études émergent toutefois notamment, on va le voir, sous l'impulsion de *Gaia*. Les dernières années ont pour autant été riches sur le plan astrométrique : depuis 2018 et pour la première fois, en compilant l'ICRF3 et *Gaia*, nous possédons les coordonnées absolues de plusieurs centaines de sources radio en quatre bandes de fréquences (8 GHz, 22 GHz, 32 GHz et optique [6]) avec des précisions similaires de l'ordre de ou inférieures à 0,1 mas (voir la figure 10), ce qui ouvre la voie à des études rigoureuses quant à l'alignement ou non des centroïdes, suivant une approche statistique sur la population ou une approche individuelle sur des sources connues. Il y a dans de tels résultats le reflet de propriétés des différents types de sources, de leur jet et de leur disque. Tout cela commence à peine à être exploité en profondeur.

Lambert et al. (2021) compare les positions des sources de l'ICRF3 (Charlot et al., 2020) à celles de la dernière version du catalogue *Gaia* (Early Data Release 3 et EDR3 ; Prusti et al., 2016 ; Brown et al., 2021) ainsi qu'aux cartes de flux et de polarisation radio à 15 GHz établies par l'équipe du projet MOJAVE au VLBA (Lister et al., 2019) pour 194 sources communes à ces bases de données. Cette étude, prise en complément d'études récentes de collègues de la communauté du VLBI imageur (Kovalev et al., 2017 ; Petrov & Kovalev, 2017 ; Petrov et al., 2018 ; Plavin et al., 2019 ; Kovalev et al., 2020) met en lumière plusieurs résultats. Les centroïdes radios X, K et Ka sont *proches* les uns des autres (dans 0,1 mas) et rangés en ordre de fréquences croissantes vers l'intérieur du jet et de façon cohérente avec un effet d'opacité dépendant de la fréquence. K et Ka sont donc plus proches de la base du jet que X (et dans la direction présumée du trou noir central dans le voisinage duquel le jet est émis) conformément à un modèle simple d'auto-absorption d'émission synchrotron (voir Blandford et al., 2019, et références). Les centroïdes optiques sont en général dans le jet radio. Dans la moitié des cas, ils sont proches du centroïde X (c'est-à-dire à une distance inférieure à 3σ) et cela suggère donc que c'est la même composante VLBI qui domine en bande X et en optique. Dans environ 40% des cas, le centroïde optique coïncide avec une composante radio dans le jet mais éloignée (de 0,1 mas jusqu'à plusieurs mas) de la composante dont le flux domine et qui est identifiable au centroïde en bande X. Cette composante,

6. Vocabulaire : on nomme respectivement les bandes à 8, 22 et 32 GHz bandes X, K et Ka. Par ailleurs, on peut trouver dans la littérature la notation S/X et X/Ka pour X et Ka. Cela vient du fait que les positions en X et en Ka émanent au départ de deux jeux de données VLBI dans les bandes S et X et dans les bandes X et Ka, la doublure des fréquences servant à la correction troposphérique. A l'inverse, les positions en bande K sont obtenues à partir d'une observation en bande K uniquement. On trouvera plus de détails dans Charlot et al. (2020).

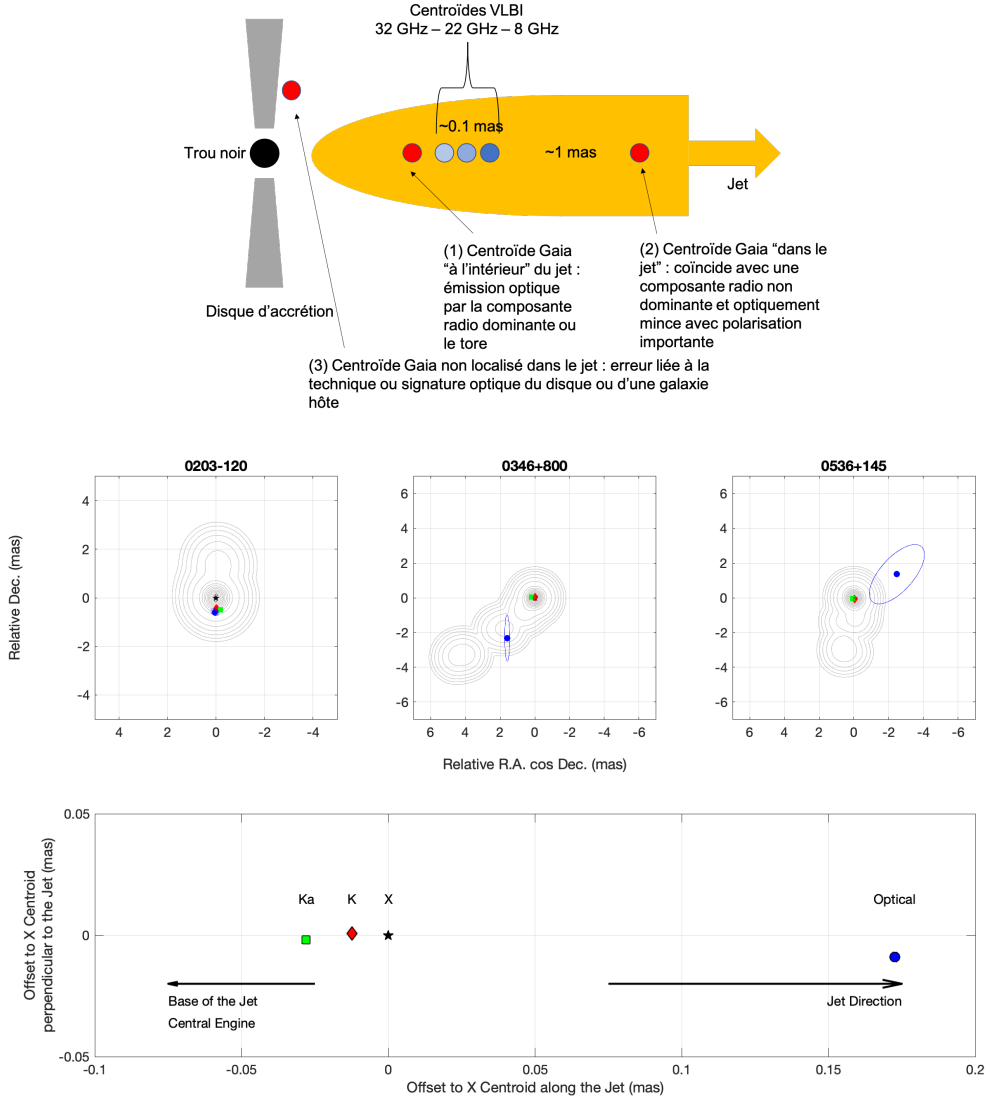


FIGURE 10 – En haut, schéma général des émissions radio et optique dans une radiosource extragalactique tel qu'éclairé par Lambert et al. (2021). En dessous, trois exemples de cartes de flux obtenues au VLBA à 15 GHz (base de données MOJAVE, Lister et al., 2019) sur lesquelles on a superposé les positions des centroïdes à 8 GHz, 22 GHz, 32 GHz (ICRF3, Charlot et al., 2020) et optique (*Gaia* EDR3, Brown et al., 2021). En bas, les positions médianes des centroïdes comptées le long du jet et commentées dans Lambert et al. (2021). Dans les trois exemples, 0203-120 correspond à la configuration (1) dans le schéma et 0346+800 au cas (2) ; 0536+145 pourrait être un cas (3).

souvent stationnaire, peut posséder un degré élevé de polarisation linéaire en radio (quelques dizaines de pour-cent, c'est-à-dire nettement plus que pour la composante identifiée comme noyau), témoignant d'un champ magnétique bien organisé typique d'une émission synchrotron. L'émission optique dans ces sources est dominée par une composante optiquement mince dans le jet. Un degré de polarisation optique élevé a aussi été enregistré pour certaines de ces sources dans une étude indépendante de Kovalev et al. (2020). Ces cas doivent être étudiés plus en profondeur. Ils constituent notamment des sources intéressantes pour le raccordement radio-optique, le centroïde optique ayant une contrepartie accessible en radio. Dans les 10% de cas restants, le centroïde optique est parfois à l'intérieur du jet, parfois ailleurs. Cela suggère que la nature de l'émission optique est, dans la moitié des cas, différente de celle de l'émission radio. La position du centroïde optique peut résulter d'émissions par une partie du jet différente de celle émettant en radio, d'émissions par le disque d'accrétion ou par une galaxie hôte ou un barycentre de tout cela. La figure 10 résume les paradigmes de nos études. Cette étude est en cours de continuation (stage de M2 d'Antonin Pierron en co-tutelle avec le LUTH) et nous nous confrontons à d'autres indicateurs (comme le flux en radio et optique) afin de déterminer si les zones d'émissions optiques sont dans le jet ou dans le disque. Dans le futur, il faudra améliorer certaines faiblesses inhérentes à ce type d'études. Tout d'abord, une faiblesse concerne l'alignement de l'astrométrie absolue (VLBI géodésique, *Gaia*) et de l'astrométrie relative (VLBI imageur), en pratique l'alignement des positions à 8 GHz sur les cartes à 15 GHz qui est imparfaite dans, on va dire, 0,1 mas à 0,2 mas à cause de l'effet de structure, de l'effet d'opacité entre 8 et 15 GHz et du décalage temporel entre les observations MOJAVE, VLBI et *Gaia*. Par ailleurs, le biais en déclinaison pour le catalogue en bande Ka dû à un réseau encore trop faible peut biaiser les interprétations astrophysiques des décalages entre X, K et Ka (Liu et al., 2021).

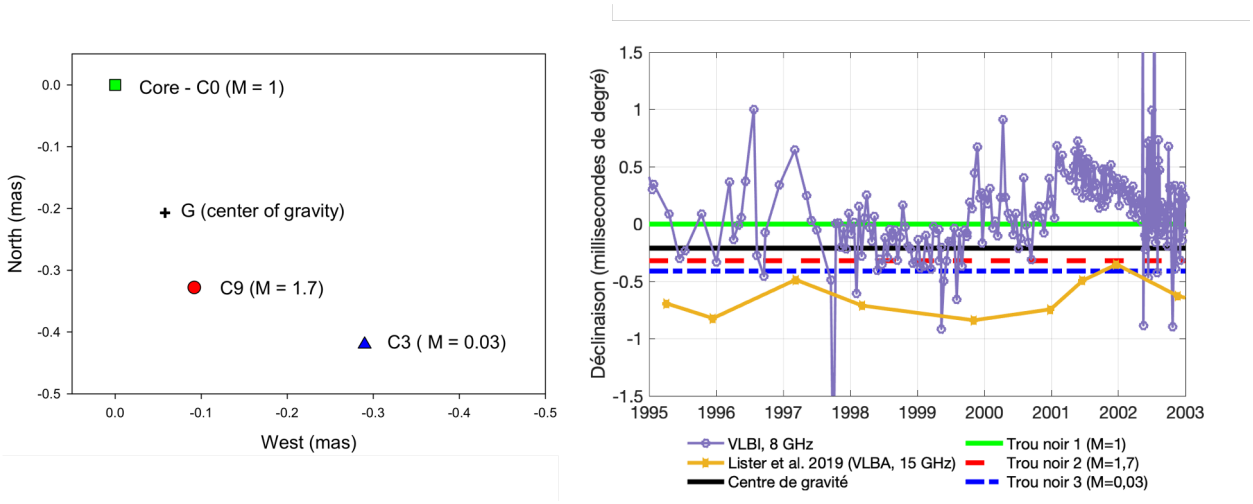


FIGURE 11 – A gauche, le modèle de trois trous noirs proposé par Roland et al. (2020) d'après les données à 15 GHz de Lister et al. (2019). Le point (0,0) de ce modèle a été positionné arbitrairement sur la composante la plus brillante, ici dénommée C0 et dont on suppose le trou noir de masse 1 (arbitraire). Les masses des autres trous noirs peuvent être évaluées par rapport à cette masse de référence. A droite, et en se limitant à la déclinaison pour plus de visibilité, en mauve, on voit la série temporelle de position astrométrique de 2201+315 telle que calculée de manière opérationnelle au centre d'analyse IVS de l'Observatoire de Paris avec les données géodésiques à 8 GHz. En jaune, j'ai reconstruit la série temporelle de position à partir des composantes publiées par Lister et al. (2019) à 15 GHz. La déclinaison relative zéro de cette série est basée sur le choix de Lister et al. (2019) de centrer leurs cartes sur la composante C0 et est donc cohérente avec la carte de gauche de Roland et al. (2020). On note que, même si les longueurs d'onde sont différentes, il y a des similitudes dans les comportements des deux séries. En vert, rouge, bleu et noir, j'ai positionné les trous noirs et leur centre de gravité tels que donnés par Roland et al. (2020).

L'utilisation des ajustements des positions des composantes VLBI au cours du temps (*modelfit*) de Lister et al. (2019) donne des résultats intéressants quand on considère par exemple que les mouvements apparents des composantes résultent d'un modèle simple de plusieurs trous noirs dont on cherche les rapports des masses, la distance angulaire et l'inclinaison du jet perpendiculaire au disque d'accrétion. La résolution de ces paramètres peut se faire via une méthode décrite dans Roland et al. (2013) par itérations successives et intégrations numériques des équations de la précession, résolues pour seize paramètres d'intérêt décrivant l'état dynamique et physique du système. Elle a permis par exemple de proposer des modèles simples pour certaines radiosources bien observées dont celle illustrée dans la figure 11 où il est

suggéré que, pour la radiosource 2201+315, trois trous noirs coexistent dans un carré de 0,5 mas de côté (Roland et al., 2020). (Nous avions traité le cas de 1928+738 dans Roland et al., 2015, qui suggérait aussi plusieurs trous noirs séparés de plusieurs millisecondes de degré.) Cette radiosource est intéressante du point de vue géodésique car elle fait partie des sources très observées par le VLBI géodésique entre 1995 et 2009 et sa série temporelle astrométrique est très fournie ainsi qu'on le voit sur la figure. Plus que le cas spécifique de cette source, il faut regarder l'intérêt général de tels modèles : notre étude montre que les sources communément observées en VLBI géodésique et qui servent de points d'attache pour mesurer le ciel et la Terre, et que l'on pense positionnées à moins de 0,1 mas, sont en réalité (potentiellement) des systèmes complexes s'étendant sur plusieurs fois cette distance et (potentiellement) fortement instables. On notera donc avec intérêt que lorsqu'on parle de bruit plancher de 0,04 mas dans le positionnement d'une source, c'est une notion vague au regard d'un système qui mesure dix fois plus !

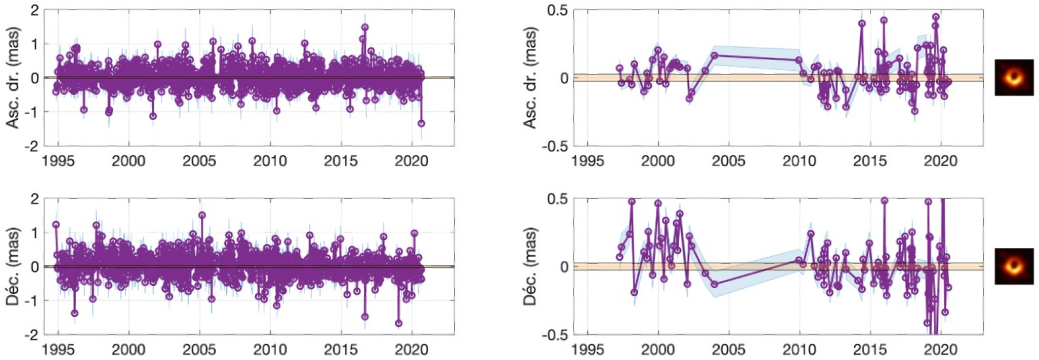


FIGURE 12 – Montage autour de la radiogalaxie supergéante M87 (NGC 4486, Virgo A ou 1228+126) dont le trou noir central a été récemment imagé par VLBI millimétrique (Event Horizon Telescope Collaboration, 2019). Les séries temporelles représentent les positions astrométriques de M87 calculées au centre d'analyse IVS de l'Observatoire de Paris à partir d'observations géodésiques. Elles sont obtenues après retrait des observations dont les erreurs sont supérieures à 0,5 mas (à gauche) et 0,08 mas (à droite). Les patchs horizontaux oranges représentent la taille angulaire de l'horizon d'évènement du trou noir de M87, soit environ 50 μas. L'image du trou noir de M87 est reproduite à l'échelle pour la série de droite. Attention, l'information astrométrique sur la position du trou noir par rapport aux émissions radio est inexistante. Ce que montre cette figure, c'est que les meilleures données géodésiques ont des précisions en deçà de la taille de l'horizon d'évènement du trou noir de M87 et qu'un effort est à faire dans le futur pour relier une telle imagerie à très haute résolution à celle du VLBI classique et aux séries de position astrométrique.

Pour terminer ce chapitre, regardons sur la figure 12, la fameuse radiogalaxie Messier 87 ou Virgo A et la première *image* du trou noir publiée en avril 2019 (Event Horizon Telescope Collaboration, 2019). Si l'alignement des origines sur ces images a été arbitraire, ce que montre essentiellement cette figure, c'est que les meilleures données de VLBI géodésique ont des précisions en deçà (10 μas) de la taille de l'horizon d'évènement du trou noir de M87 (50 μas) et qu'un effort est à faire dans le futur pour relier une telle imagerie à très haute résolution à celle du VLBI classique (par exemple le VLBI mais aussi le système géodésique VGOS) et aux séries de position astrométrique pour placer le tout dans le cadre de l'astrométrie globale, absolue, des repères de référence multi-longueurs d'onde.

La rotation de la Terre

Le pôle fait sa météo

Je ne vais pas ici dresser un bilan des effets de l'atmosphère et des océans sur la rotation terrestre, renvoyant le lecteur, pour des études récentes, par exemple à Bizouard (2020) mais plutôt illustrer cette interaction par quelques résultats. La démarche des principaux travaux de ce domaine consiste à tenter d'expliquer les variations de la rotation de la Terre observées par les variations du moment cinétique des couches fluides externes selon l'approche de la conservation du moment cinétique ou selon l'approche des moments de force (Barnes et al., 1983). Ces quantités climatiques peuvent être reconstruites à partir des grilles de pression de surface, traînée et vitesses de vents à différents niveaux de pression mais sont fortement dépendantes de la résolution des grilles et de la manière dont sont résolues les équations dans les modèles de circulation. On peut donc avoir, selon les modèles, des moments cinétiques et des moments

de force significativement différents. Un modèle peut donc mieux expliquer la rotation terrestre observée qu'un autre, ou mieux à certaines fréquences et moins bien à d'autres.

A l'époque où j'ai commencé mes recherches figurait comme question non résolue l'excitation des mouvements libres de la rotation terrestre, c'est-à-dire les mouvements du pôle associés à des résonances. Pour une Terre possédant un manteau, un noyau fluide et une graine, il y a trois mouvements libres. Le plus imposant est le mouvement de Chandler, variation principale qui apparaît dans le mouvement du pôle, avec une amplitude de 0,2 seconde de degré (soit environ 5 mètres) et sa période caractéristique de 430 jours environ. Ensuite vient le mouvement libre du noyau liquide, dont la signature sur le manteau est appelée nutation libre du noyau (ou FCN pour *free core nutation*). La FCN est l'analogue de Chandler pour le noyau liquide et son mouvement libre-forcé est détecté dans les observations VLBI à hauteur de 0,2 mas avec une période dans l'espace de 430 jours environ (e.g. Herring et al., 2002). Le troisième mouvement libre est la nutation libre de la graine (ou FICN pour *free inner core nutation*), on en reparlera un peu plus loin [7]

Le mouvement de Chandler est un terme dit *libre*, qui existe parce que le manteau est aplati et qu'il n'y a pas de raison que l'axe de rotation soit confondu avec l'axe d'inertie (mouvement d'Euler). Si ce mouvement subsiste, il est toutefois amorti par la dissipation dans le manteau et, en l'absence d'une excitation externe non nulle, il aurait disparu en quelques années. Le mouvement de Chandler est donc un mouvement *libre-forcé* selon l'expression de Plag (1997). Les hypothèses sur la source de l'excitation ont d'abord été sismiques (Dahlen, 1971), internes (géomagnétiques : Rochester & Smylie, 1965 ; Bellanger et al., 2001) puis atmosphériques et océaniques (Gross, 2000 ; Brzeziński & Nastula, 2002). L'étude de Gross (2000) montre toutefois qu'en moyenne, l'excitation combinée de l'atmosphère et de l'océan à la fréquence de Chandler concorde en amplitude avec celle du mouvement du pôle observé. La question de la variabilité temporelle restait à résoudre et c'est ce qui a fait l'objet de Bizouard et al. (2011) où nous montrons l'exceptionnelle cohérence en amplitude et phase des variations du terme de Chandler et de celles du moment cinétique de l'atmosphère et de l'océan.

Qu'en est-il de sa petite sœur associée au noyau liquide ? Malheureusement pour elle, à l'inverse du mouvement de Chandler, il s'avère à l'heure actuelle impossible d'en prédire l'amplitude - et surtout sa variabilité temporelle - au moyen des moments cinétiques de l'atmosphère et de l'océan (Lambert, 2006). La raison est que le comportement de l'atmosphère est très mal connu aux fréquences diurnes qui correspondent à une variabilité sur des petites échelles spatiales (Bizouard et al., 1998 ; Yseboodt et al., 2002 ; de Viron et al., 2005). Ce problème a non seulement des conséquences sur la FCN mais également, on va le voir plus loin, sur la détermination précise des résonances et leur interprétation en termes de composition interne de la Terre.

On notera que les études citées ci-dessus visent à expliquer la rotation terrestre au moyen du climat mais on n'y retourne jamais le problème en se demandant ce que l'observation de la rotation terrestre peut nous apprendre sur le climat. J'illustrerai donc cette vision par l'effet d'El Niño sur la rotation terrestre qui, bien que défriché de multiples fois (Chao, 1984 ; Rosen et al., 1984 ; Ponte & Rosen, 1999 ; de Viron et al., 2001 ; de Viron & Dickey, 2014) réserve toujours ses surprises. Le El Niño de 2015-16 a été l'un des plus gros jamais enregistré ces quarante dernières années. On s'attendait donc à un effet notable sur la longueur du jour. On l'a eu, avec une anomalie de 0,8 ms, comparable à celle constatée pour l'El Niño de 1982-83. Etudier un El Niño de plus versus la rotation terrestre a-t-il un intérêt ? Oui, si on se demande ce qu'il peut avoir de différent de ses prédécesseurs. Notamment, il ne s'agissait pas d'un El Niño comme ses prédécesseurs de type *Eastern Pacific* mais d'un *Central Pacific* qui se produit loin des côtes américaines. Dans cette dernière configuration, on s'attend à des effets beaucoup plus ténus sur la rotation terrestre (de Viron & Dickey, 2014) car les moments de force de montagne sur les Andes et les Rocheuses sont moindres. Alors qui a produit l'anomalie de longueur du jour ? Réponse : pas le moment de force de

7. Attention : Chandler, FCN et FICN peuvent représenter deux choses à la fois liées et distinctes. Elles sont d'abord des *résonances*, c'est-à-dire des modes propres de rotation du noyau et de la graine, tout comme Chandler est une résonance, mode de rotation propre du manteau. En ce sens, elles apparaissent comme des fréquences de résonance dans les équations de la dynamique rotationnelle des couches qui composent la Terre. Ces fréquences sont grosso modo proportionnelles à l'aplatissement de la couche fluide mitigé par d'éventuels couplages aux interfaces. En second lieu, l'existence de ces résonances dans les équations fait que manteau, noyau et graine peuvent tourner librement autour d'un axe qui n'est pas confondu avec leur axe d'inertie. C'est ce qu'on appelle le *mouvement libre*. Lorsque ce mouvement libre est excité, il donne lieu à une oscillation dont l'amplitude dépend de l'excitation et dont la période est celle associée aux fréquences de résonance. La phase variable, soumise à l'excitation extérieure, fait que le mouvement libre peut sembler avoir une période légèrement différente celle de la résonance.

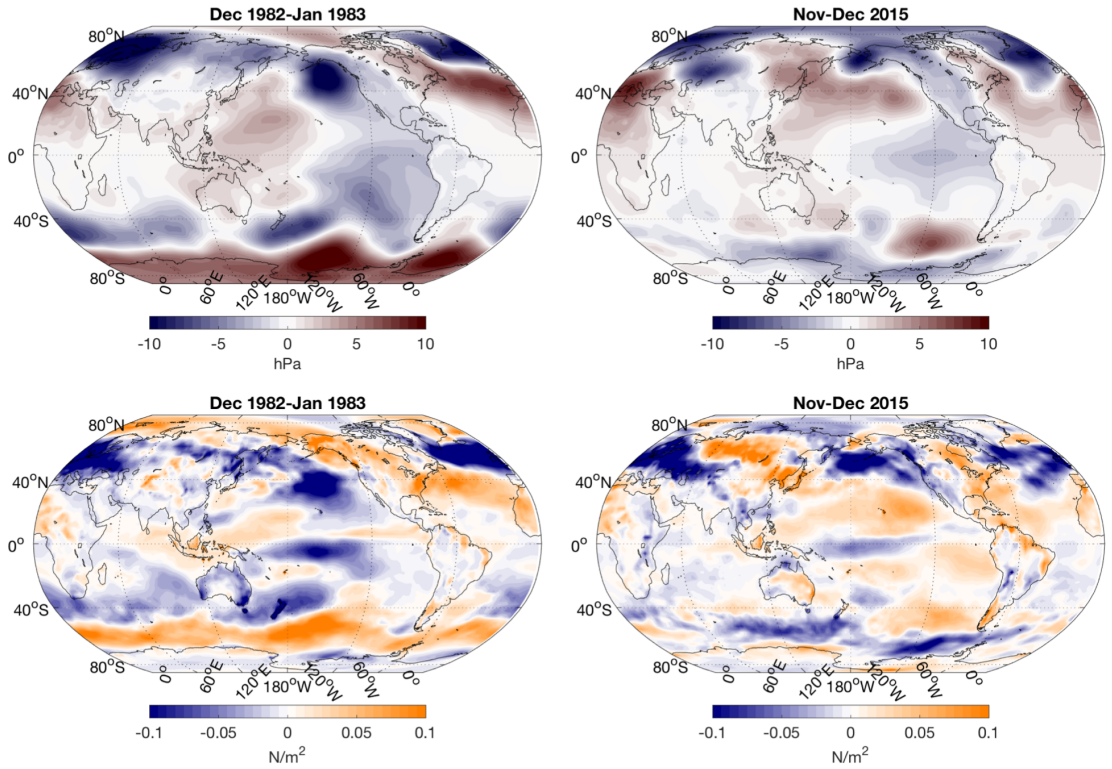


FIGURE 13 – Les anomalies de pression et de friction en moyenne sur les deux mois précédant le pic de moment cinétique lors des hivers 1982-83 et 2015-16 (Lambert et al., 2017a). Contrastant avec la situation de 1982-83, celle de 2015-16 oppose une anomalie de pression négative sur le centre-est du Pacifique à des anomalies positives au nord et au sud, engendrant une circulation de type Hadley (c'est-à-dire montant sur l'équateur, puis migrant vers les pôles et redescendant sur les latitudes moyennes) et des anomalies positives de la friction qui contribuent à ralentir la rotation de la Terre. Les données sont celles du centre européen de prédiction à moyen terme (ECMWF ERA-Interim, Dee et al., 2011).

montagne mais celui de friction qui est intervenu entre les côtes américaines et le centre de la dépression associée au El Niño. On a donc eu affaire à un mécanisme d'excitation de la rotation terrestre nouveau, jamais vu jusqu'à lors, et pour cause, cela a été le premier gros El Niño de type *Central Pacific* (voir la figure 13 et Lambert et al., 2017a). On voit donc, dans cette étude, que la comparaison à la rotation terrestre a permis non seulement d'expliquer cette rotation mais aussi d'en découvrir un peu plus sur le phénomène météorologique et elle constitue à ce titre un intéressant exemple d'aller-retour dans lequel deux domaines sont bénéficiaires et décloisonnés : nous avons montré que le moment cinétique expliquait l'anomalie de longueur du jour constatée mais nous avons aussi montré qu'elle ne l'expliquait pas *comme d'habitude* et nous avons établi un scénario d'interaction entre atmosphère et Terre solide, dominé par la friction, différent de ceux invoqués lors des deux précédents épisodes, dominés par la pression.

Avons-nous détecté la graine ?

La nutation de la Terre, réponse de notre planète à l'excitation des marées, reflète sa structure interne. Le VLBI est la seule technique donnant accès à cette quantité. Une partie de mes recherches de thèse et de postdoctorat avait été consacrée au modèle de Mathews et al. (2002) (aussi appelé MHB 2000 ou IAU 2000A) pour, d'une part l'implémenter dans le cadre de la nouvelle transformation de coordonnées cartésiennes basée sur l'origine non-tournante (Lambert & Bizouard, 2002 ; Capitaine et al., 2003) et pour calculer l'effet les déformations résultant des redistributions causées par le potentiel lui-même (Lambert & Capitaine, 2004 ; Lambert & Mathews, 2006 ; Mathews & Lambert, 2009). Le modèle MHB 2000 n'explique pas toute la nutation observée par VLBI : il reste, dans un résidu d'écart-type environ 0,2 milliseconde de degré, le mouvement libre-forcé causé par la nutation libre du noyau liquide (FCN) dont j'ai dit plus haut qu'il était imprévisible et un certain nombre de sources d'erreur non élucidées mais

potentiellement liées à la perturbation des nutations par l'atmosphère et à l'instabilité du système céleste (Dehant et al., 2003). Par ailleurs, la détection de la nutation libre de la graine (FICN) ne fait pas consensus dans la communauté. Le modèle de Mathews et al. (2002) est basé sur les équations d'Euler-Liouville linéarisées, c'est-à-dire qu'on néglige les termes qui couplent les composantes du vecteur de rotation entre elles. Ces contributions sont en dessous de la microseconde de degré et il s'avère qu'à l'époque, il était justifié d'agir de cette manière mais dans un futur proche, il faudra examiner plus précisément ces contributions ainsi que certains termes d'origine planétaire non pris en compte (Ferrándiz et al., 2018). La linéarisation des équations permet d'écrire de façon élégante une relation entre la nutation du modèle de Terre réelle et celle d'une Terre rigide via une fonction de transfert géophysique qui dépend d'un petit nombre de paramètres décrivant l'intérieur et la structure de la Terre (aplatissement du manteau, du noyau et de la graine, élasticité des interfaces, constantes de couplage aux interfaces). En comparant nutation observée et nutation pour la Terre rigide, on peut ajuster par des méthodes statistiques classiques ces paramètres. Il existe plusieurs écueils dans le traitement de ces équations : pour que le système linéaire soit comparable aux nutations observées, il faut y avoir retiré ou modélisé tout ce qui n'est pas lié à la non-rigidité de la Terre. Par exemple, la contribution atmosphérique et océanique aux nutations qui constituent malheureusement une forte source d'erreur. L'ensemble des études menées jusqu'en 2016 concluent généralement à une bonne stabilité (à l'intérieur d'un jour) de la période de résonance de la FCN, tant sur le plan temporel que sur celui de l'impact de la stratégie d'analyse (Lambert & Dehant, 2007 ; Gattano et al., 2016 ; Rosat et al., 2017) où les conclusions sont toutefois plus incisives quant à la détection de la FICN. Cette dernière apparaît comme extrêmement sensible à la stratégie d'analyse VLBI et également à la stratégie d'analyse des séries de nutations, ce qui positionne la balle dans le camp des observateurs et des analystes plutôt que dans celui des théoriciens de la géophysique. En effet, d'une série de nutation à l'autre, la période ou le facteur de qualité de la résonance de la graine peuvent varier de 100% de leur valeur, ce qui met en porte-à-faux la détection de la FICN clamée dans les diverses études antérieures (Mathews et al., 2002 ; Koot et al., 2008). Afin de préciser cette (non-)détection de la FICN, j'ai initié à partir de 2016 un projet de réanalyse des données VLBI et des séries de nutation via des méthodes nouvelles. Ce projet s'est concrétisé dans la thèse d'Ibnu Nurul Huda (2016-2019) que j'ai co-dirigée avec Christian Bizouard et dans le post-doctorat de Yann Ziegler (2016-2018) financé par le CNES. Pour Ibnu, il s'agissait tout d'abord de tester l'approche *directe* pour estimer les nutations et les paramètres géophysiques, c'est-à-dire ajuster ces paramètres non plus sur les séries a posteriori de nutation mais directement sur les retards VLBI, soit en court-circuitant nombres d'étapes pendant lesquelles on perd de l'information sur la covariance des paramètres (Nurul Huda et al., 2020). On a déjà discuté plus haut de cette approche. Pour Yann, il s'agissait de développer une approche bayésienne, dérivée de Rosat et al. (2017) pour tester la détection de la FICN dans les données VLBI, d'abord sur les données synthétiques dont on maîtrise les erreurs standards et systématiques, puis sur des données réelles pour lesquelles on ne connaît pas a priori ces mêmes erreurs. Egalement, Yann a implémenté une estimation conjointe de la FCN et de la FICN sur les données VLBI et gravimétriques, remarquant à juste titre que les données VLBI disponibles à l'IVS ne sont nullement indépendantes les unes des autres. Dans les deux cas, les travaux devaient bénéficier de nouvelles modélisations des effets de marées et des contributions atmosphériques et océaniques. (Nurul Huda et al., 2020) comme Ziegler et al. (2020) font état d'une sous-estimation des erreurs sur les données VLBI, assimilable à des erreurs systématiques non contrôlées en amont qui nécessitent une recalibration (effectuée lors de l'inversion bayésienne) d'un facteur 2 à 3. L'étude de Ziegler et al. (2020) conclut qu'il existe une résonance entre 600 et 1200 jours, attribuable à la FICN. La partie imaginaire de cette fréquence de résonance (son facteur de qualité) est par contre extrêmement mal contrainte (figure 14), ce qui met en garde quant à une interprétation géophysique des résultats, notamment en termes de champ magnétique aux interfaces entre noyau liquide, manteau et graine.

L'ensemble des études d'Ibnu et Yann apportent également une vision synthétique des effets des résonances. Notamment, elles introduisent la notion de variabilité en fréquence de la résonance, qui est naturelle quand on considère que les admittances sont elles-mêmes dépendantes de la fréquence d'excitation. Ainsi, dans les bandes progrades et rétrogrades diurnes, respectivement associées au mouvement du pôle semi-diurne et à la nutation, la fréquence de Chandler mesurée par VLBI est-elle de 400 jours et 380 jours, loin des 430 jours bien connus. Dit autrement, la réponse rotationnelle de la Terre à l'excitation de marée dans ces bandes de fréquence se décrit par une fonction de transfert géophysique dont la fréquence

de résonance n'est pas la fréquence de Chandler habituelle mais une fréquence modifiée principalement par la réponse dynamique des océans aux processus spécifiques à ces bandes de fréquence (marées lunisolaires et marée du pôle) (Bizouard et al., 2019 ; Nurul Huda et al., 2021).

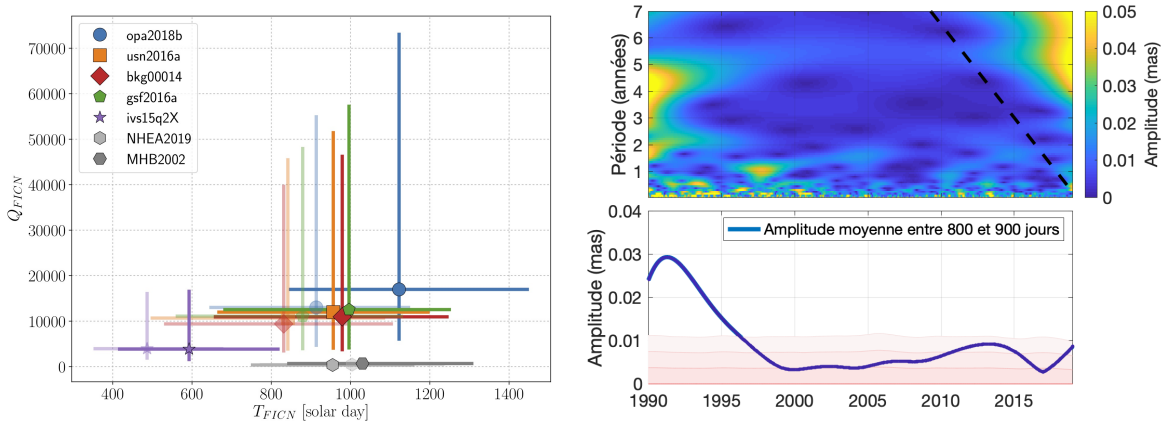


FIGURE 14 – A gauche, les résultats finaux des estimations de la période (en jours) et du facteur de qualité de la FICN pour diverses séries opérationnelles Ziegler et al. (2020). Y figurent aussi les valeurs de MHB 2000 et celles de l'étude de Nurul Huda et al. (2020) (NHEA2019). A droite, l'analyse en ondelettes de la série opérationnelle de nutation opa2019a préalablement dépouillée des principales nutations résiduelles avec la méthode explicitée dans Gattano et al. (2016) et interpolée à un point par jour. Le cadre du bas montre l'amplitude moyenne dans la bande présumée de la FICN selon Ziegler et al. (2020), soit entre 800 et 900 jours (soit 2,19-2,46 ans) : s'il se situe dans cette bande, le mouvement libre ne serait guère plus ample que la dizaine de microsecondes de degré. Les niveaux roses plus ou moins pâles indiquent l'intervalle de confiance à 60, 95 et 99% estimés par méthode de Monte-Carlo et suggèrent que le signal détecté par l'ondelette dans cette bande de fréquence n'est pas significatif au delà de 95%.

Rotation terrestre, marées et volcans

La chaîne de mécanismes menant au déclenchement des éruptions volcaniques reste aujourd'hui débattue (voir p.e. Bardintzeff, 2020). Elle fait intervenir des processus de mélange et de transformation du magma (contamination par des fluides en profondeur ou en surface amenant à un déséquilibre chimique et thermodynamique, cristallisation, exsolution des gaz) depuis un magma contenant des bulles de gaz (dans la chambre magmatique profonde) à un gaz contenant des bulles de magma (dans le conduit et à la sortie, lors d'une éruption plinienne par exemple). Dans Lambert & Sottili (2019), nous suggérons une modulation de la sismicité sous l'Etna et du volume de magma émis par le volcan au cours du dernier siècle par la marée du pôle ou plus exactement par la modulation en 6-7 ans de la marée polaire due au battement entre le mouvement du pôle saisonnier et le mouvement libre de Chandler. Il s'agit donc d'une modulation assez lente de la sismicité et des éruptions. En effet, si la marée lunisolaire provoque une élévation diurne de quelques 20 cm, les déformations en surface causées par le mouvement du pôle (marée du pôle) et par l'excès de longueur du jour (marée rotationnelle) sont plus ténues à courtes période mais deviennent concurrentes, voire dominantes, aux échelles interannuelles (voir le spectre sur la figure 15). Le rôle des marées dans la sismicité et le volcanisme a été abordé dans plusieurs études à l'échelle globale (e.g. Neuberg, 2000 ; Cochran et al., 2004 ; Métivier et al., 2009 ; Varga & Grafarend, 2018 ; Dumont et al., 2020) notamment sur les zones peu connues des dorsales océaniques (Stroup et al., 2007 ; Tolstoy, 2015 ; Scholz et al., 2019) et sur le mouvement horizontal des plaques tectoniques (Zaccagnino et al., 2020). Des zones ciblées et criblées de mesures comme la faille de San Andrea (Kilston & Knopoff, 1983 ; Bucholc & Steacy, 2016 ; van der Elst et al., 2016 ; Moncayo et al., 2019 ; Delorey et al., 2017) et des volcans-laboratoires comme l'Etna (Sottili et al., 2007), le Stromboli (Sottili & Palladino, 2012) ou autre (Dumont et al., 2021) ont également été largement étudiés. L'effet des variations de la longueur du jour est évoqué dans quelques études seulement (e.g., Palladino & Sottili, 2012, 2014 ; Sottili et al., 2015 ; Ambrosino et al., 2019). L'Etna est un volcan-école, bien surveillé ces dernières décennies. Situé au plongement de la plaque africaine sous la plaque eurasienne, sa sismicité est celle d'une région tectoniquement active avec séismes fréquents, de magnitudes et de profondeurs modérées. Notre étude suggère également que certaines régions de l'Etna sont davantage influencées par la marée du pôle : proche du cratère (dans

un rayon de 30 km), à faible profondeur (moins de 20 km) et que les faibles séismes (magnitude entre 1 et 2,5) sont davantage concernés par cette modulation.

Nous continuons à l'heure actuelle ce travail en recherchant la signature maréale à longue période (par exemple celle en 18,6 ans et celle de la marée polaire) dans les signaux sismiques ou volcanologiques de la région de Naples. Si le Vésuve est actuellement dormant, sa sismicité semble modulée par la marée en 18,6 ans. Il en est de même pour celle de la région beaucoup plus dangereuse et étroitement surveillée des Champs Phlégréens, immense caldera de 400 km^2 immédiatement au nord du centre-ville de Naples. La dernière éruption, celle du Monte Nuovo, s'est produite il y a 3500 ans. Depuis, le site montre une activité hydrothermale soutenue (fumerolles de Solfatare et Pisciarelli) et on note une augmentation brutale des remontées du sol (bradyséismes) depuis un siècle (Rydelek et al., 1992 ; De Lauro et al., 2013 ; Chiodini et al., 2016, 2017 ; Petrosino et al., 2018 ; Tamburello et al., 2019 ; Chiodini et al., 2020 ; Sabbarese et al., 2020 ; Zaccagnino et al., 2020 ; Tramelli et al., 2021). Il apparaît de la synthèse d'études récentes que les marées à longue période (dont la 18,6 ans ou la marée du pôle) pourraient affecter la dynamique lente et à grande échelle du système magmatique profond qui est à l'origine de la recharge du système de surface (dans le cas d'un volcan comme l'Etna) ou des bradyséismes (Champs Phlégréens). Les marées plus courtes (semi-diurnes à annuelles) affecteraient les zones plus proches de la surface en modulant les occurrences des éruptions (fontaines de lave) ou leur volume lors des phases effusives (l'Etna) et les émissions hydrothermales en surface (Champs Phlégréens). Le mécanisme physique reliant marées et (composition du) magma pourrait résider dans l'intrusion périodiquement forcée de volatils (H_2O et CO_2) dans la chambre magmatique profonde et à l'origine des modifications chimique et physique du magma qui sont l'un des premiers chaînons vers l'éruption. L'effet de la décompression sur le taux de dégazage étant fortement non linéaire, une variation de la décompression sur un intervalle relativement court peut induire une réponse rapide du système avec une relaxation rapide des gaz dissous dans le magma et une accélération des signaux géophysiques comme la sismicité, les émissions hydrothermales et la déformation du sol en surface.

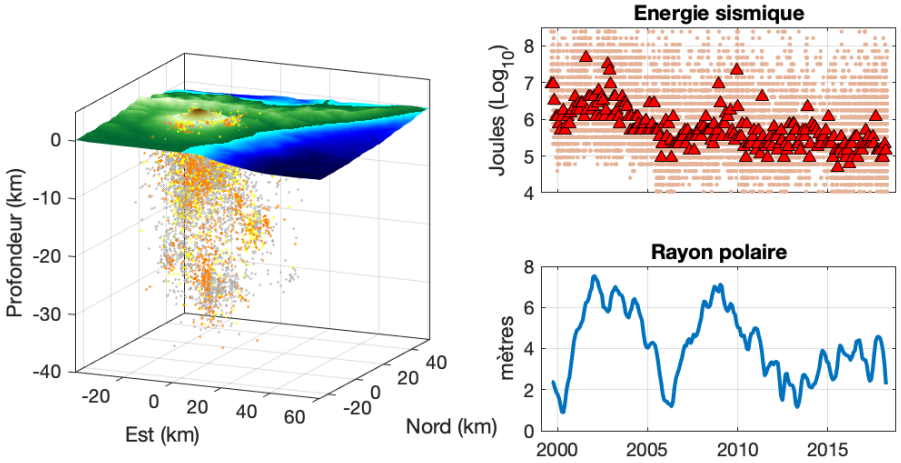


FIGURE 15 – A gauche : l'ensemble des séismes utilisés par Lambert & Sottili (2019). A droite : en haut, l'énergie sismique par fenêtres de un mois et en bas, le rayon du pôle par rapport au pôle moyen dont la variation majeure est due au battement entre mouvement de Chandler et oscillation annuelle.

Services d'observation

Tâche de service principale : IVS

Depuis mon recrutement en tant qu'astronome-adjoint au SYRTE en 2007, j'effectue ma tâche de service principale au centre d'analyse VLBI de l'Observatoire de Paris, composante de l'IVS. Ce travail

constitue environ 80% de ma tâche de service totale. Depuis 2010, je suis responsable de ce service labellisé au sein de l'action nationale d'observation (ANO) 1 (métrologie du temps et de l'espace) de l'INSU.

L'IVS est une structure internationale sous l'égide de l'UAI et de l'IAG permettant d'opérer les observations VLBI à but géodésique et astrométrique, de les analyser et de les disséminer vers les utilisateurs. Les analyses fournissent un certain nombre de paramètres géodésiques comme les positions et vitesse des stations au sol, les positions des radiosources et les paramètres de rotation terrestre. La précision de la technique VLBI est inférieure au centimètre en position et à 0,1 mas en position astrométrique. Ces mesures sont à la base de l'établissement des repères de référence mondiaux : le repère terrestre international (ITRF) et le repère céleste international (ICRF) et des mesures précises de la rotation terrestre (en particulier unique mesure de UT1 et de la nutation). Elles sont à la base de plusieurs avancées scientifiques dont certaines ont échu au SYRTE (première mesure directe de l'aberration galactique, meilleures contraintes au sol sur le paramètre post-newtonien et sur l'invariance de Lorentz, identification des modes de rotation libres associés au noyau liquide et à la graine) et ont un impact sociétal non négligeable aux côtés des autres techniques de géodésie spatiale (ITRF, ICRF). La technique VLBI, par nature d'échelle planétaire, ne peut fonctionner efficacement que si une coordination internationale existe (40 instituts participants, 20 pays, environ 10 centres d'analyse opérationnels dans le monde).

Au niveau national, la France possède deux centres d'analyse de l'IVS : un à Paris et un au laboratoire d'astrophysique de Bordeaux (sous la responsabilité de Patrick Charlot). Si le centre de Paris est consacré, comme on va le voir, à l'analyse opérationnelle à but géodésique et astrométrique, celui de Bordeaux se consacre à l'analyse de la structure de source et complète donc, au niveau national, l'activité VLBI. Il y a donc une forte cohérence sur le plan national entre ces deux centres d'analyse exploitant les deux facettes du VLBI astrogéodésique. L'IVS travaille de plus en cohésion avec un autre service international sous l'égide des mêmes UAI et IAG : l'IERS pour lequel l'Observatoire de Paris héberge plusieurs composantes majeures qui sont le centre de produits des paramètres d'orientation terrestre (IERS EOP-PC), le centre des conventions (IERS Conventions) tous deux sous la responsabilité de Christian Bizouard et le centre de produits du système céleste (IERS ICRS-PC) sous la responsabilité de Jean Souchay. Les quatre composantes mentionnées ci-dessus sont abritées au SYRTE et il est intéressant de constater leur complémentarité, le VLBI étant à la fois fournisseur du repère céleste à l'ICRS-PC et contributeur pour la rotation terrestre à l'EOP-PC. L'ensemble de ces composantes peut être vu comme un service de géodésie fondamentale à lui tout seul fournissant tous les produits géodésiques à l'exception du repère terrestre fabriqué par l'IGN.

Mes activités au sein de l'IVS sont tout d'abord de caractère opérationnel et consistent en l'analyse de sessions VLBI régulières, tous les jours pour les sessions dites *intensives* (mesure du temps universel UT1 en quasi temps réel - moins de 24 heures de latence) et deux fois par semaine pour les sessions dites *rapides* ou *turn-around* R1 et R4 dont le but est la mesure de tous les paramètres d'orientation terrestre, des positions des stations et de celles des radiosources extragalactiques. A ces deux types de sessions s'ajoutent nombre de sessions à but R&D ou relatives à des campagnes particulières, ce qui augmente le nombre de sessions à presque deux par jour. Le travail du centre d'analyse consiste à charger les données issues du corrélateur (retards temporels par ligne de base), à modéliser les retards théoriques et à estimer les écarts aux modèles, c'est-à-dire les paramètres d'orientation terrestre, les positions des sources et des stations et l'ensemble des paramètres dits de *nuisance* qui sont les retards zénithaux humides sur des intervalles courts (quelques minutes), les gradients et les dérives d'horloge. Ensuite, les résultats sont renvoyés vers le centre de stockage de l'IVS à des fins d'utilisation ultérieure. Parmi les utilisations : la combinaison de l'IVS et les activités de l'EOP-PC. Mes résultats opérationnels sont aussi mis à disposition via le site Internet du service et, au format SINEX, via le ftp du centre de données. La modélisation du signal et l'inversion des paramètres est faite au moyen du logiciel Calc/Solve maintenu par le groupe VLBI du Goddard Space Flight Center de la NASA avec qui l'interaction est constante à des fins de contrôle et de développement. Cette partie opérationnelle a été automatisée dès 2010 par mes soins et demande une vérification journalière (effectuée via le site web et la messagerie électronique) et des interventions manuelles environ une à deux fois par mois (ajouts de nouvelles stations, crash causés par des mauvaises observations) et lors des réanalyses annuelles (une semaine de travail à temps complet environ).

A côté de ces activités opérationnelles, il y a des activités ponctuelles comme les campagnes de comparaison de logiciel ou les contributions aux réalisations successives du repère terrestre international (ITRF). Pour ces dernières, les centres d'analyse contributeurs ont pour mission de réanalyser l'ensemble

des observations VLBI en tenant compte de consignes précises émanant du centre de produits ITRF de l'IERS (Zuheir Altamimi) et du coordinateur des analyses de l'IVS (actuellement John Gipson). La contribution aux réalisations des ICRF dont nous avons parlé largement dans la partie recherche de ce mémoire fait également partie de cette catégorie d'activité.

Le centre d'analyse dont je suis responsable existe depuis la création de l'IVS (1998). Toutefois, c'est moi qui l'ai rendu capable de produire une solution opérationnelle et qui lui ai donc donné son statut de centre d'analyse *opérationnel* alors qu'il était centre d'analyse *associé* (c'est-à-dire consacré à des activités de développement ou ponctuelles), étendant par là sa visibilité nationale et internationale. J'ai également proposé l'ouverture du site Internet et réalisé et maintenu ses pages. J'ai enfin automatisé l'analyse afin de répondre à l'exigence de la part de l'IVS d'une réactivité en moins de 24 heures pour contribuer pleinement à la combinaison intra-technique. Par ailleurs, j'ai introduit certains produits non demandés par l'IVS comme les séries temporelles de positions astrométriques des radiosources (voir la figure 16) qui se sont avérées d'une importance cruciale pour la construction des ICRF. Ainsi, sur le site Internet, pour chaque radiosource, on peut visualiser la série temporelle de coordonnées, accéder aux données et aller vers d'autres pages relatives à cette même source dont les cartes de structure de MOJAVE (Lister & Homan, 2005 ; Lister et al., 2019), celles du centre d'analyse de Bordeaux (BVID), les informations centre de données extragalactiques NASA/IPAC et SIMBAD (Wenger et al., 2000) et les images de PanSTARRS-1 (Flewelling et al., 2020). J'ai également développé une page montrant l'ajustement de la nutation libre du noyau (FCN) sur les séries temporelles de nutation disponibles (rassemblées à l'EOP-PC). Une routine FORTRAN est proposée pour modéliser la FCN à n'importe quelle date. Cette routine peut être utilisée librement dans un but prédictif.

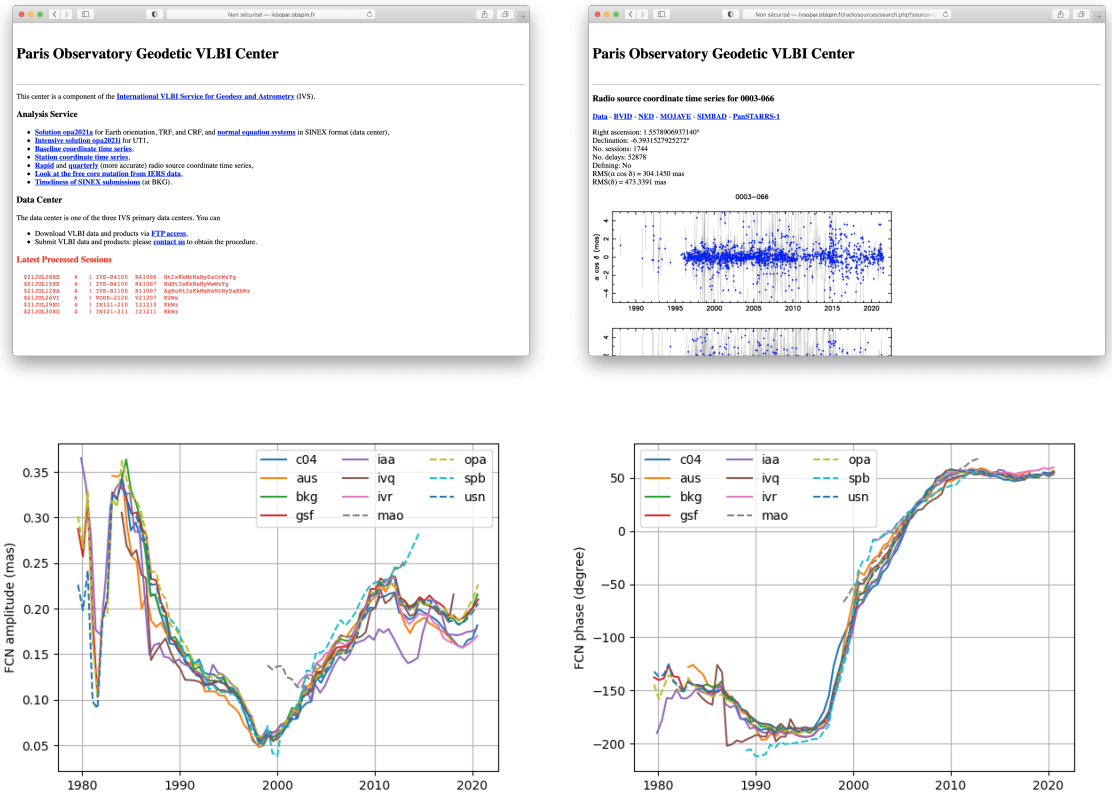


FIGURE 16 – En haut : deux captures d'écran du site Internet du centre d'analyse VLBI (effectuées le 1er août 2021) dont (à droite) un exemple de série temporelle de position astrométrique mise à jour en permanence et automatiquement. En bas, les amplitudes et phases de la FCN ajustées sur les séries VLBI disponibles à l'IVS.

Tâches de service secondaires : ICRS-PC et *Gaia*

Je contribue également aux activités de l'ICRS-PC en assurant, une fois par an, l'analyse des catalogues VLBI qui ont été produits dans l'année précédente par les centres d'analyse de l'IVS (travail en collaboration avec Felicias Arias). Ces travaux sont publiés dans les rapports annuels de l'IERS [8]. Une méthodologie proche est appliquée au sein du DPAC de *Gaia* (CU 9) pour la validation des versions successives (Arenou et al., 2017, 2018 ; Fabricius, C. et al., 2021) des catalogues. Mon rôle est de guider l'ingénieur Christophe Barache (SYRTE) dans l'écriture et les tests des procédures d'estimation des paramètres de rotation et déformation entre le catalogue Gaia et les différents catalogues de référence ainsi que de valider le diagnostic final. Les contributions évoquées dans ce paragraphe constituent environ 20% de ma tâche de service. Elles sont, dans une juste mesure, bien articulées avec la tâche IVS : l'une est consacrée à l'exploitation de la technique, l'autre à l'exploitation d'un de ses produits phares que sont les catalogues de radiosources.

Enseignement

L'essentiel de mon enseignement s'effectue en présentiel au niveau des masters. Depuis 2012, j'ai contribué au M2 de l'Observatoire de Paris, nouvellement *Sciences de l'Univers et Techniques Spatiales*, en dispensant le cours sur les systèmes de référence et la géodésie. Ce cours d'astrogéodésie est actuellement étendu sur 36 heures que je partage avec Pascal Bonnefond (ce qui fait donc pour moi 27 hETD). Je traite les bases de l'astronomie fondamentale (sphère céleste, repères) et de la géodésie moderne (la réalisation des repères de référence terrestre et céleste, la modélisation des observables de géodésie spatiale avec emphase sur le VLBI et le GNSS et la rotation de la Terre du point de vue théorique et observationnel).

Depuis septembre 2019, le master *Géosciences - Sciences de la Terre et des planètes, environnement* de Paris Sciences et Lettres (PSL) a ouvert ses portes (en pratique à l'Ecole Normale Supérieure de Paris) et j'y enseigne le module de géodésie avec Eric Calais (ENS) aux niveaux M1 et M2. Le but du module est la description complète d'une chaîne d'analyse de géodésie spatiale pour un positionnement au millimètre. La technique choisie ici est le GNSS puisque c'est celle qui est le plus utilisée dans les géosciences. J'en assure la moitié du module consacré à la modélisation théorique de l'observable GNSS (soient 24 hETD). Les séances restantes sont dévolues à l'écriture d'un code destiné à réduire les données GNSS au mètre près (avec Eric Calais).

Enfin, je contribue à d'autres formes d'enseignement comme l'enseignement à distance au travers du Diplôme d'Université (DU) *Lumières sur l'univers*, étant tuteur chaque année de trois ou quatre étudiants et le MOOC *Mesurer l'univers*, diffusé en 2019. En termes de formation des professeurs, j'effectue des parrainages de classes, jusqu'à présent des maternelles et primaires. Antérieurement, entre 2010 et 2019, j'ai coordonné le module d'enseignement méthodologique du parcours *Dynamique des systèmes gravitationnels* au master 2 de l'Observatoire de Paris avec Christophe Le Poncin-Lafitte. Outre la coordination, j'ai chaque année assuré l'encadrement d'un ou deux binômes d'étudiants sur des sujets d'astrogéodésie (24 hETD par binôme). Ce module a été interrompu en 2018 suite à la refonte du master.

L'ensemble des enseignements équivalait, en 2020-21, à une modulation sur trois ans de 76 hETD par an (le nombre d'heures dues est de 66 hETD).

Quelques éléments de prospective

En forme de SWOT

Mes recherches dans les domaines du VLBI, des repères de référence célestes et de la géodynamique m'ont amené à avancer dans la précision des repères de référence, dans la compréhension des liens entre rotation, climat et structure de notre planète et des mécanismes à l'origine des positions observées des radiosources. Jongler entre des domaines aussi différents que sont la géodynamique et l'astrométrie constitue un atout sous la forme d'une double compétence représentative des deux équipes dans lesquelles j'évolue au SYRTE, à savoir l'équipe Systèmes de référence célestes et l'équipe Rotation de la terre et géodésie spatiale. Dans la suite, je parlerai donc en termes d'évolution de ces deux équipes.

8. On les trouve également à la page dédiée sur le site de l'ICRS-PC.

On le voit, il s'agit ici d'aborder des domaines très différents du point de vue de la science mais qui sont reliés par une technique d'observation et certains aspects méthodologiques, notamment de la métrologie. Ces aspects définissent le périmètre du laboratoire et une coloration particulière de ses activités de recherche et de service, unique dans un établissement comme l'Observatoire de Paris et relativement rare à l'échelle nationale et internationale. Notre force en ce sens est que nos équipes possèdent des ouvertures sur des domaines larges et diversifiés, ce qui permet, en théorie du moins, une forte visibilité. Le SYRTE est comme le terminal central d'un grand aéroport avec des passerelles vers plusieurs destinations en géosciences et astrophysique. On possède par ailleurs de vraies compétences propres comme l'analyse des techniques de géodésie spatiale, en particulier le VLBI, l'analyse de catalogues astrométriques, les compétences théoriques sur la rotation des corps. Ces compétences, on l'a vu, sont reconnues.

Toutefois, ce qui peut s'avérer une occasion de forte visibilité peut aussi produire une certaine marginalité vis-à-vis des communautés Astronomie-Astrophysique et Terre Solide. La marginalité apparaît rapidement si on ne s'entoure pas des compétences, de facto externes, qui permettent une exploitation scientifique des données que nous manipulons et sur lesquelles nous n'avons pas la complète compétence. C'est le cas pour les géosciences et l'astrophysique. Nos deux équipes ne peuvent donc exister (lire *être visibles*) que dans un réseau comprenant des équipes spécialisées dans la physique des domaines auxquels nous nous connectons grâce à nos données : quasars, géodynamo, climat, etc. Dans un tel réseau, il faut accepter, nous, de ne pas être capables de tout comprendre mais d'être fournisseurs de données (dont nous garantissons la qualité). L'un des objectifs des années à venir est de renforcer fortement ces liens externes.

Par ailleurs, la difficulté des recrutements, qui dépend à la fois d'un faible nombre de postes et d'un vivier de candidats moindre que dans les autres domaines, pose une menace. La technique VLBI au SYRTE repose actuellement entièrement sur mes épaules et j'assume des recherches dans deux directions extrêmement différentes. Mais je pourrais, à termes, être amené à faire un choix exclusif. La formation doit donc rester une priorité des deux équipes : nous devons apparaître fortement dès le master (c'est le cas aujourd'hui en M2) et accroître le nombre de doctorants et post-doctorants, possiblement en co-direction avec d'autres laboratoires dont le cœur de métier est différent.

Voyons maintenant de quoi doit être fait le futur immédiat.

Futur du repère céleste

Côté repères célestes, il faut déjà penser l'ICRF4 en synergie avec *Gaia* et les combinaisons multi-techniques. Nous sommes déjà positionnés sur ces tâches de part notre expérience passée, de part nos collaborations présentes avec les principaux acteurs de l'ICRF (IVS, USNO, Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux...) et la présence dans les groupes de travail qui y sont reliés (groupes de travail *Consistent realization of TRF, CRF and EOP* et *Multi-waveband realisations of International Celestial Reference System* de la division A de l'UAI).

Par ailleurs, je l'ai évoqué plus haut, les nouvelles observations d'astrométrie absolue en multi-longueurs d'onde ouvrent la voie à un décloisonnement des communautés systèmes de référence et astrophysique. Ce que nos études soulignent surtout, pour l'avenir, c'est l'importance de la surveillance régulière des radiosources au moyen de systèmes d'observation pérennes - ou sur du moyen-long terme. Cela englobe autant le programme VLBI géodésique de l'IVS que *Gaia* et l'ensemble des programmes de type MOJAVE (cartographie et suivi des composantes, polarisation radio) dont le récent projet FRAMEx (Fundamental Reference AGN Monitoring Experiment, Dorland et al., 2020, coordonné par l'USNO et le SYRTE) qui propose l'observation coordonnée en radio, proche infrarouge, visible, rayons X pour mieux cerner les mécanismes d'émission dans les différentes bandes et ainsi appréhender le lien entre des repères établis dans ces bandes. Ces suivis doivent aussi inclure les mesures photométriques au sol faisables avec des télescopes robotiques de diamètres modestes (1 m) comme le Deep South Telescope (DST, Zacharias et al., 2020) ou les TAROT (voir p.e. l'étude de Taris et al., 2018) ou encore le projet de télescope sur le site de Saint-Véran (Hautes-Alpes) puisque les variations de magnitudes sont liées au mécanisme d'émission et notamment à la taille de la zone d'émission. Par ailleurs, des produits cruciaux seraient les variations temporelles de position astrométrique mesurées par *Gaia* et permettant, à l'instant de ce que fait le VLBI en radio, de mettre en évidence des changements spatiaux du centroïde optique causés par l'alternance de l'émission optique dominante (par exemple jet-disque). A ces égards, nous démarrons plusieurs colla-

borations entre le SYRTE, le LUTH et l'USNO. L'approche statistique permise par un grand échantillon est une opportunité permettant de mieux cerner les tendances. Le LUTH est un partenaire privilégié puisqu'à l'intérieur de l'établissement, familier avec les hautes énergies et les modèles numériques de jet. La proximité de ce laboratoire permettra rapidement, dans l'hypothèse de l'encadrement d'un doctorant entre les deux laboratoires, d'aborder deux autres objectifs : (i) l'étude des corrélations entre émissions γ et déplacements des centroïdes VLBI qui permettrait de confirmer si l'émission γ est liée à l'apparition d'une nouvelle composante à la base du jet VLBI et (ii) la simulation, grâce aux modèles numériques, de signatures astrométriques afin de permettre à terme d'intégrer les variables astrométriques comme les positions VLBI ou leur variabilité comme contrainte dans les modèles de jet.

Perspectives en géosciences

Côté géosciences, il faut d'une part exploiter les données hydroatmosphériques sur les échelles saisonnières autant que multidécennales et profiter de l'accroissement de la précision des modèles océaniques. La rotation de la Terre dont la mesure est précise et robuste constitue en effet une bonne référence pour en tester la validité. Plus spécifiquement, elle permet d'évaluer la pertinence des modèles de circulation océanique par comparaison du moment cinétique global à celui de la Terre solide. Elle permet aussi de déterminer la réponse dynamique des océans aux fluctuations de la pression atmosphérique ou du potentiel de marée du pôle dans la bande de fréquence allant de quelques heures à une dizaine de jours, pour laquelle l'approximation hydrostatique dite du « baromètre inversé » n'est plus valide. Les collaborations nécessaires pour de telles études sont déjà initiées (Mercator Océans, Toulouse) ou sont à développer (par exemple le LEGOS à l'Observatoire Midi-Pyrénées). Il est également intéressant de noter la multiplication de réanalyses sur l'ensemble du vingtième siècle, comme le NOAA-CIRES 20th Century Reanalysis (Compo et al., 2011) ou le ERA-20C (Poli et al., 2015), ce qui s'avère particulièrement intéressant car les séries de mouvement du pôle ou de longueur du jour couvrent précisément cette période avec une précision satisfaisante pour l'étude des variations multidécennales. Il devient donc possible, aujourd'hui, d'attaquer de front les causes régionales de la variabilité de la rotation terrestre depuis plus de cent ans. La multiplicité des modèles issus de centres indépendants et l'adjonction d'ensembles permettent de tester la robustesse des résultats et donc d'obtenir une erreur externe réaliste.

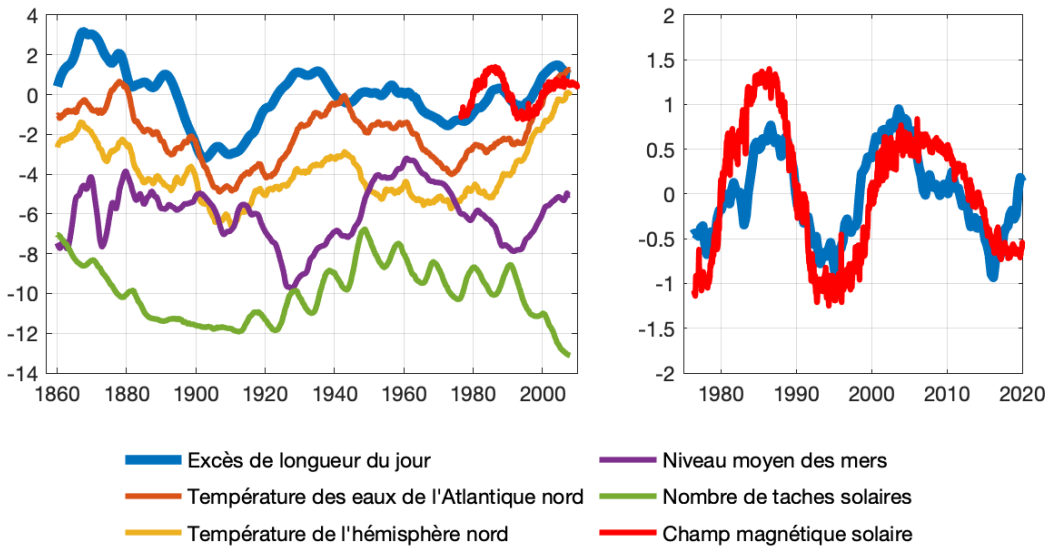


FIGURE 17 – Ces figures illustrent les similarités entre la variation de la longueur du jour et d'autres quantités connectées au climat ou au cycle solaire : la température moyenne des eaux de surface de l'Atlantique nord calculée d'après les grilles de température de surface de la reconstruction ERSST (Extended Reconstructed Sea Surface Temperature) v5 (Huang et al., 2017), le nombre mensuel de tâches solaires issus du Solar Influence Data Center, la température moyenne de l'hémisphère nord, le niveau moyen des mers (Jevrejeva et al., 2008) et le champ magnétique polaire du soleil (données du Wilcox Solar Observatory). L'excès de longueur du jour par rapport à la valeur nominale de 86400 s est en millisecondes. Les autres séries ont été lissées et mises à l'échelle de telle manière que leur écart-type égale celui de la variation de la longueur du jour.

Les fréquences de résonance du noyau et de la graine sont reliées aux valeurs du champ magnétique terrestre aux interfaces (e.g. Buffett et al., 2002 ; Dehant et al., 2017 ; Triana et al., 2021). Ainsi, grâce à l'étude des nutations, Mathews et al. (2002) ont proposé un modèle de couplage électromagnétique à l'interface noyau-manteau. Par ailleurs, la signature en déformation ou en rotation de surface des mouvements du fluide et de ses variations de densité à l'intérieur du noyau peut être recherchée dans d'autres signaux comme la rotation sidérale, les données gravimétriques ou magnétiques. La suite logique des travaux de Nurul Huda et al. (2020) et Ziegler et al. (2020), principalement consacrés aux données et encore trop peu à leur interprétation géophysique, serait donc d'exploiter les résultats en termes de champ magnétique aux interfaces et à sa séparation des couplages topographiques ou visqueux, si possible en incluant dans les observations de rotation terrestre non plus seulement la nutation mais également la longueur du jour.

Il existe à ce jour plusieurs questions non résolues concernant les signatures géodésiques du champ magnétique. A des échelles interannuelles, si les mouvements libres-forcés de Chandler et de la FCN semblent tous les deux principalement excités par les fluides externes, des études suggèrent des liens possibles avec des processus internes comme les sursauts géomagnétiques (Bellanger et al., 2001, 2002 ; Shirai et al., 2005 ; Malkin & Miller, 2010 ; Malkin, 2013, 2016 ; Vondrák & Ron, 2016, 2017 ; Vondrák, 2020). Ces études sont particulièrement intéressantes et statistiquement rigoureuses mais ne lèvent pas l'épineuse question du modèle physique qui relie les sursauts géomagnétiques à la rotation (voir également Holme & de Viron, 2005, 2013, et les études qui y sont citées concernant le terme en 5,9 ans dans la longueur du jour).

Une question qui mériterait une attention particulière dans les années qui viennent, en particulier parce qu'elle met en jeu des mécanismes et des données géophysiques d'horizons différents, est celle de fortes ressemblances entre l'évolution temporelle aux échelles multidécennales de plusieurs quantités géophysiques ou astronomiques lorsqu'on les regarde sur la période allant d'environ 1850 (en deçà, on ne possède que trop peu de données) à nos jours (e.g. Lambeck & Cazenave, 1976 ; Dickey et al., 2011 ; Marcus, 2016). La figure 17 illustre ces diverses ressemblances pour la longueur du jour, les températures de surface et d'autres quantités comme la couverture nuageuse et le niveau moyen des mers. L'évolution multidécennale de la longueur du jour est attribuée au moment angulaire variable du noyau selon les travaux de Hide et al. (2000) (et plus récemment ceux de Gillet et al., 2019, qui montrent un très bon accord entre la longueur du jour observée et celle prévue par la rotation du noyau dérivée de modèles numériques avec assimilation de données géomagnétiques). Le lien longueur du jour-climat serait en fait un lien champ magnétique-climat qui reste flou à l'heure actuelle (voir par exemple une discussion complète par Courtillot et al., 2007, et les nombreuses références). Certaines études suggèrent la modulation du flux de rayons cosmiques par le champ magnétique qui affecte la formation de nuages (Svensmark & Friis-Christensen, 1997 ; Vieira & da Silva, 2006 ; Svensmark et al., 2016), mais en règle générale les mécanismes expliquant l'influence sur la basse atmosphère des processus électromagnétiques qui ont lieu dans la haute atmosphère ne sont pas bien identifiés (Cnossen et al., 2016). Si l'influence astronomique sur l'évolution de la Terre est bien étudiée aux échelles de temps géologiques (Laskar et al., 2004) elle reste partielle sur les échelles multidécennales. Il existe toutefois une littérature intéressante sur les influences astronomiques qui pourraient contrôler la variabilité du soleil à ces échelles (Scafetta, 2010 ; Mörner, 2012 ; Baidolda, 2017) et, par ce biais, contrôler une partie du climat (d'où le terme de *cosmoclimatologie* employé par Svensmark, 2007). Cette idée n'est pas nouvelle mais reste peu exploitée en l'absence de scénario physique solide et se basant essentiellement sur la recherche de corrélations entre séries temporelles et mériterait d'être approfondie car, en fin de compte, une variation principale de la rotation terrestre, la longueur du jour à l'échelle du siècle, reste mal expliquée.

Enfin, mieux comprendre le rôle de la rotation terrestre et de ses déformations dans le déclenchement de catastrophes comme les séismes ou les éruptions volcaniques est une idée excitante autant que de fort enjeu. Là encore, le travail de Lambert & Sottili (2019) reste très préliminaire et il est nécessaire d'interagir avec d'autres communautés comme la géologie, la géochimie et la volcanologie. Mes collaborations dans ce sens sont pour l'instant très limitées (Université de Rome) mais nous discutons en vue d'un élargissement.

Références

Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & Collilieux, X. 2016, Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 121, 6109

Juin 2018, archipel du Svalbard, sur la route de Ny Ålesund pour l'inauguration de la station géodésique fondamentale, un groupe représentatif des activités françaises proposées dans ce mémoire. De gauche à droite, Séverine Rosat (géophysicienne, Institut de Physique du Globe de Strasbourg, spécialiste de sismologie et de gravimétrie), moi-même, Yann Ziegler (docteur en géophysique, ex postdoctorant à l'Observatoire de Paris sous contrat du CNES), César Gattano (docteur en astronomie, ex postdoctorant au laboratoire d'astrophysique de Bordeaux sous contrat du CNES, maintenant postdoctorant à Berne), Patrick Charlot (directeur de recherche au CNRS, laboratoire d'astrophysique de Bordeaux, spécialiste du VLBI et président du groupe de travail ICRF3 de l'UAI), Karine Le Bail (docteur en astronomie de l'Observatoire de Paris, aujourd'hui au Goddard Space Flight Center de la NASA) et enfin Richard Biancale († 2019), ingénieur CNES, l'un des pères de la combinaison multi-technique.

Ambrosino, F., Thinová, L., Briestenský, M., & Sabbarese, C. 2019, Geodesy and Geodynamics

Anderson, J. M. & Xu, M. H. 2018, Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 123, 10,162

Arenou, F., Luri, X., Babusiaux, C., et al. 2018, Astronomy & Astrophysics, 616, A17

Arenou, F., Luri, X., Babusiaux, C., et al. 2017, Astronomy & Astrophysics, 599, A50

Arias, E. F., Charlot, P., Feissel, M., & Lestrade, J.-F. 1995, Astronomy & Astrophysics, 303, 604

Bachmann, S., Thaller, D., Roggenbuck, O., Lösler, M., & Messerschmitt, L. 2016, Journal of Geodesy, 90, 631

Baidolda, F. 2017, Thèse de doctorat, PSL Research University

Bardintzeff, J.-M. 2020, Volcanologie (Dunod)

Barnes, R. T. H., Hide, R., White, A. A., & Wilson, C. A. 1983, Proceedings of the Royal Society of London Series A, 387, 31

Bellanger, E., Gibert, D., & Le Mouël, J.-L. 2002, Geophysical research letters, 29

Bellanger, E., Le Mouël, J.-L., Mandea, M., & Labrosse, S. 2001, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 124, 95

Bizouard, C. 2020, Geophysical modelling of the polar motion (Berlin, Boston : De Gruyter)

Bizouard, C., Brzeziński, A., & Petrov, S. 1998, Journal of Geodesy, 72, 561

Bizouard, C., Lambert, S., Gattano, C., Richard, J.-Y., & Becker, O. 2019, Journal of Geodesy, 93, 621

Bizouard, C., Nurul Huda, I., Ziegler, Y., & Lambert, S. 2019, Geophysical Journal International, 220, 753

Bizouard, C., Remus, F., Lambert, S., Seoane, L., & Gambis, D. 2011, Astronomy & Astrophysics, 526, A106

Blandford, R., Meier, D., & Readhead, A. 2019, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 57, 467

Böckmann, S., Artz, T., Nothnagel, A., & Tesmer, V. 2007, in Proceedings of the 18th European VLBI for geodesy and astrometry working meeting, Vol. 79, 82–87

Brown, A. G. A., Vallenari, A., Prusti, T., et al. 2021, Astronomy & Astrophysics, 649, A1

Brzeziński, A. & Nastula, J. 2002, Advances in Space Research, 30, 195

Bucholc, M. & Steacy, S. 2016, Geophysical Journal International, 205, 681

Buffett, B., Mathews, P., & Herring, T. 2002, Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 107

Capitaine, N., Chapront, J., Lambert, S., & Wallace, P. 2003, Astronomy & Astrophysics, 400, 1145
Chao, B. F. 1984, Geophysical Research Letters, 11, 541
Charlot, P. 1990, Astronomical Journal, 99, 1309
Charlot, P., Jacobs, C. S., Gordon, D., et al. 2020, Astronomy & Astrophysics, 644, A159
Chiodini, G., Cardellini, C., Di Luccio, F., et al. 2020, Science Advances, 6, eabc2938
Chiodini, G., Paonita, A., Aiuppa, A., et al. 2016, Nature Communications, 7, 13712
Chiodini, G., Selva, J., Del Pezzo, E., et al. 2017, Scientific Reports, 7, 4472
Clivati, C., Ambrosini, R., Artz, T., et al. 2017, Scientific Reports, 7, 40992 EP
Cnossen, I., Liu, H., & Lu, H. 2016, Journal of Geophysical Research : Atmospheres, 121, 7781
Cochran, E. S., Vidale, J. E., & Tanaka, S. 2004, Science, 306, 1164
Compo, G. P., Whitaker, J. S., Sardeshmukh, P. D., et al. 2011, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137, 1
Coulot, D., Biancale, R., Bizouard, C., et al. 2017, AGU Fall Meeting Abstracts
Courtillot, V., Gallet, Y., Le Mouël, J.-L., Fluteau, F., & Genevey, A. 2007, Earth and Planetary Science Letters, 253, 328
Dahlen, F. A. 1971, Geophysical Journal International, 25, 157
De Lauro, E., De Martino, S., Falanga, M., & Petrosino, S. 2013, Geochemistry Geophysics Geosystems, 14, 2628
de Viron, O. & Dickey, J. O. 2014, Geophysical Research Letters, 41, 3407
de Viron, O., Marcus, S. L., & Dickey, J. O. 2001, Geophysical Research Letters, 28, 1985
de Viron, O., Schwarzbaum, G., Lott, F., & Dehant, V. 2005, Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 110
Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., et al. 2011, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137, 553
Dehant, V., Feissel-Vernier, M., de Viron, O., et al. 2003, Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 108, n/a, 2275
Dehant, V., Laguerre, R., Rekier, J., et al. 2017, Geodesy and Geodynamics,
Delorey, A. A., van der Elst, N. J., & Johnson, P. A. 2017, Earth and Planetary Science Letters, 460, 164
Dickey, J. O., Marcus, S. L., & de Viron, O. 2011, Journal of Climate, 24, 569
Dobslaw, H. & Dill, R. 2018, Advances in Space Research, 61, 1047
Dorland, B., Secrest, N., Johnson, M., et al. 2020, in Astrometry, Earth Rotation, and Reference Systems in the *Gaia* era, ed. C. Bizouard, 165–171
Dumont, S., Le Mouël, J.-L., Courtillot, V., et al. 2020, Earth and Planetary Science Letters, 536, 116145
Dumont, S., Silveira, G., Custódio, S., et al. 2021, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 312, 106659
Event Horizon Telescope Collaboration. 2019, The Astrophysical Journal Letters, 875, L1
Fabricius, C., Luri, X., Arenou, F., et al. 2021, Astronomy & Astrophysics, 649, A5
Feissel, M. & Mignard, F. 1998, Astronomy & Astrophysics, 331, L33
Feissel-Vernier, M. 2003, Astronomy & Astrophysics, 403, 105
Feissel-Vernier, M., Ma, C., Gontier, A.-M., & Barache, C. 2006, Astronomy & Astrophysics, 452, 1107
Ferrándiz, J., Navarro, J. F., Martínez-Belda, M. C., Escapa, A., & Getino, J. 2018, Astronomy & Astrophysics, 618
Fey, A. L. & Charlot, P. 1997, Astrophysical Journal, 111, 95
Fey, A. L. & Charlot, P. 2000, The Astrophysical Journal Supplement Series, 128, 17
Fey, A. L., Eubanks, M., & Kingham, K. A. 1997, Astronomical Journal, 114, 2284
Fey, A. L., Gordon, D., Jacobs, C. S., et al. 2015, Astronomical Journal, 150, 58
Fey, A. L., Ma, C., Arias, E. F., et al. 2004, The Astronomical Journal, 127, 3587
Flewelling, H. A., Magnier, E. A., Chambers, K. C., et al. 2020, Astrophysical Journal, 251, 7
Gattano, C., Lambert, S. B., & Bizouard, C. 2016, Journal of Geodesy, 91, 849
Gattano, C., Lambert, S. B., & Le Bail, K. 2018, Astronomy & Astrophysics
Gillet, N., Huder, L., & Aubert, J. 2019, Geophysical Journal International, 219, 522
Gipson, J. 2007, in Proc. 18th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting, Vienna, Austria, 12–13
Gross, R. S. 2000, Geophysical Research Letters, 27, 2329

Herring, T. A., Mathews, P. M., & Buffett, B. A. 2002, Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 107, ETG 4
Hide, R., Boggs, D. H., & Dickey, J. O. 2000, Geophysical Journal International, 143, 777
Holme, R. & de Viron, O. 2005, Geophysical Journal International, 160, 435
Holme, R. & de Viron, O. 2013, Nature, 499, 202
Huang, B., Thorne, P. W., Banzon, V. F., et al. 2017, Journal of Climate, 30, 8179
Jevrejeva, S., Moore, J. C., Grinsted, A., & Woodworth, P. L. 2008, Geophysical Research Letters, 35, L08715
Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., et al. 1996, Bulletin of the American meteorological Society, 77, 437
Karbon, M., Heinkelmann, R., Mora-Diaz, J., et al. 2016, Journal of Geodesy
Kilston, S. & Knopoff, L. 1983, Nature, 304, 21
Klioner, S. A., Mignard, F., Lindegren, L., Bastian, U., & McMillan, P. J. 2021, Astronomy & Astrophysics
Klopotek, G., Artz, T., Bellanger, A., et al. 2016, in International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2016 General Meeting Proceedings : "New Horizons with VGOS", ed. D. Behrend, K. D. Baver, & K. L. Armstrong, 203
Koot, L., Rivoldini, A., de Viron, O., & Dehant, V. 2008, Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 113, n/a, b08414
Kovalev, Y. Y., Petrov, L., & Plavin, A. V. 2017, Astronomy & Astrophysics, 598
Kovalev, Y. Y., Zobnina, D. I., Plavin, A. V., & Blinov, D. 2020, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society : Letters, 493, L54
Lambeck, K. & Cazenave, A. 1976, Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 46, 555
Lambert, S. 2006, Astronomy & Astrophysics, 457, 717
Lambert, S. 2014, Astronomy & Astrophysics, 570, A108
Lambert, S. & Bizouard, C. 2002, Astronomy & Astrophysics, 394, 317
Lambert, S. & Capitaine, N. 2004, Astronomy & Astrophysics, 428, 255
Lambert, S. & Dehant, V. 2007, Astronomy & Astrophysics, 469, 777
Lambert, S., Dehant, V., & Gontier, A.-M. 2008, Astronomy & Astrophysics, 481, 535
Lambert, S., Liu, N., Arias, E. F., et al. 2021, Astronomy & Astrophysics, 651, A64
Lambert, S., Marcus, S. L., & de Viron, O. 2017a, Earth System Dynamics, 8, 1009
Lambert, S. & Mathews, P. 2006, Astronomy & Astrophysics, 453, 363
Lambert, S. & Sottili, G. 2019, Geophysical Research Letters, 46
Lambert, S. B. 2003, PhD thesis, Observatoire de Paris
Lambert, S. B. & Gontier, A.-M. 2009, Astronomy & Astrophysics, 493, 317
Lambert, S. B. & Le Poncin-Lafitte, C. 2009, Astronomy & Astrophysics, 499, 331
Lambert, S. B. & Le Poncin-Lafitte, C. 2011, Astronomy & Astrophysics, 529, A70
Lambert, S. B., Richard, J. Y., Bizouard, C., & Becker, O. 2017b, AGU Fall Meeting Abstracts
Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., et al. 2004, Astronomy & Astrophysics, 428, 261
Le Poncin-Lafitte, C., Hees, A., & Lambert, S. 2016, Phys. Rev. D, 94, 125030
Lister, M. L. & Homan, D. C. 2005, 130, 1389
Lister, M. L., Homan, D. C., Hovatta, T., et al. 2019, Astrophysical Journal, 874, 43
Liu, N., Lambert, S., Charlot, P., et al. 2021, Astronomy & Astrophysics, 652, A87
Liu, N., Lambert, S. B., & Zhu, Z. 2018, Astronomy & Astrophysics, 620
Liu, N., Lambert, S. B., Zhu, Z., & Liu, J. C. 2020, A&A, 634
Ma, C., Arias, E., Eubanks, T., et al. 1998, The Astronomical Journal, 116, 516
Ma, C., Arias, E. F., Bianco, G., et al. 2009, IERS Technical Note 35 : The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry, Tech. rep., Bundesamts für Kartographie und Geodäsie
MacMillan, D. S., Fey, A. L., Gipson, J., et al. 2019, Astronomy & Astrophysics
MacMillan, D. S. & Ma, C. 2007, Journal of Geodesy, 81, 443
Malkin, Z. 2013, Astronomy & Astrophysics, 558, A29
Malkin, Z. 2016, arXiv preprint arXiv :1603.03176
Malkin, Z. & Miller, N. 2010, Earth, Planets and Space, 62, 943
Marcus, S. L. 2016, Earth Interactions, 20, 1

Mathews, P. M., Herring, T. A., & Buffett, B. A. 2002, Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 107, ETG 3
Mathews, P. M. & Lambert, S. B. 2009, Astronomy & Astrophysics, 493, 325
Mayer, D., Boehm, J., Krasna, H., & Landskron, D. 2017, Astronomy & Astrophysics, 606, A143
Métivier, L., de Viron, O., Conrad, C. P., et al. 2009, Earth and Planetary Science Letters, 278, 370
Moncayo, G. A., Monsalve, G., & Zuluaga, J. I. 2019, Tectonophysics, 762, 61
Mörner, N.-A. 2012, Solar Wind : Emission, Technologies and Impacts, 47
Neuberg, J. 2000, Geophysical Journal International, 142, 232
Nothnagel, A., Alef, W., Amagai, J., et al. 2015, in GFZ Data Services, Helmoltz Centre, Potsdam, Germany
Nothnagel, A., Artz, T., Behrend, D., & Malkin, Z. 2017, Journal of Geodesy, 91, 711
Nurul Huda, I., Bizouard, C., Allain, D., & Lambert, S. 2021, Geophysical Journal International, in press
Nurul Huda, I., Lambert, S., Bizouard, C., & Ziegler, Y. 2020, Geophysical Journal International, 220, 759
Palladino, D. M. & Sottili, G. 2012, Geophysical Research Letters, 39
Palladino, D. M. & Sottili, G. 2014, Terra Nova, 26, 78
Petit, G. & Luzum, B. 2010, IERS Technical Note 36 : IERS Conventions 2010, Tech. rep., Bundesamts für Kartographie und Geodäsie
Petrachenko, B., Niell, A., Behrend, D., et al. 2009, Design Aspects of the VLBI2010 System, Tech. rep., IVS
Petrosino, S., Cusano, P., & Madonia, P. 2018, Scientific Reports, 8, 13808
Petrov, L. 2007, in Proceedings of the 18th European VLBI for Geodesy and Astrometry Work Meeting, ed. J. Böhm, A. Pany, & H. Schuh, 141
Petrov, L. & Kovalev, Y. Y. 2017, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society : Letters, 467, L71
Petrov, L., Kovalev, Y. Y., Fomalont, E. B., & Gordon, D. 2008, Astronomical Journal, 136, 580
Petrov, L., Kovalev, Y. Y., & Plavin, A. V. 2018, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 482, 3023
Plag, H.-P. 1997, Lecture Notes in Earth Sciences, Berlin Springer Verlag, 66, 183
Plank, L., Böhm, J., & Schuh, H. 2010, in Sixth International VLBI Service for Geodesy and Astronomy. Proceedings from the 2010 General Meeting, "VLBI2010 : From Vision to Reality", ed. S. Rogstad, C. E. Goodhart, & J. E. Clark, 217
Plank, L., Lovell, J., McCallum, J., et al. 2015, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 455, 343
Plavin, A. V., Kovalev, Y. Y., & Petrov, L. Y. 2019, The Astrophysical Journal, 871, 143
Poli, P., Hersbach, H., Berrisford, P., & other authors. 2015, ERA-20C Deterministic, Tech. Rep. 20, ECMWF, Shinfield Park, Reading
Ponte, R. M. & Rosen, R. D. 1999, Journal of Atmospheric Sciences, 56, 3457
Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., Brown, A. G. A., et al. 2016, Astronomy & Astrophysics, 595, A1
Ray, J., Kouba, J., & Altamimi, Z. 2005, Journal of Geodesy, 79, 505
Richard, J.-Y., Bizouard, C., Lambert, S., Karbon, M., & Becker, O. 2021, Journal of Geodesy
Rochester, M. G. & Smylie, D. E. 1965, Geophysical Journal International, 10, 289
Roland, J., Britzen, S., Caproni, A., et al. 2013, Astronomy & Astrophysics, 557, A85
Roland, J., Britzen, S., Kun, E., et al. 2015, Astronomy & Astrophysics, 578, A86
Roland, J., Gattano, C., Lambert, S. B., & Taris, F. 2020, A&A, 634, A101
Romero-Wolf, A., Jacobs, C. S., & Ratcliff, J. T. 2012, in International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) General Meeting, ed. D. Behrend & K. D. Baver, 231–235
Rosat, S., Lambert, S., Gattano, C., & Calvo, M. 2017, Geophysical Journal International, 208, 211
Rosen, R. D., Salstein, D. A., Eubanks, T. M., Dickey, J. O., & Steppe, J. A. 1984, Science, 225, 411
Rydelek, P. A., Sacks, I. S., & Scarpa, R. 1992, Geophysical Journal International, 109, 125
Sabbarese, C., Ambrosino, F., Chiodini, G., et al. 2020, Scientific Reports, 10, 9551
Scafetta, N. 2010, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 72, 951
Schaap, R. G., Shabala, S. S., Ellingsen, S. P., Titov, O. A., & Lovell, J. E. J. 2013, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 434, 585
Scholz, C. H., Tan, Y. J., & Albino, F. 2019, Nature Communications, 10, 2526

Shabala, S. S., Plank, L., Schaap, R. G., et al. 2017, in REFAG 2014, ed. T. van Dam (Cham : Springer International Publishing), 191–199
Shepherd, M. C. 1997, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 125, Astronomical Data Analysis Software and Systems VI, ed. G. Hunt & H. Payne, 77
Shirai, T., Fukushima, T., & Malkin, Z. 2005, Earth, planets and space, 57, 151
Soja, B., Gross, R., Jacobs, C., et al. 2017, in EGU General Assembly Conference Abstracts, Vol. 19, EGU General Assembly Conference Abstracts, 11080
Sottili, G., Martino, S., Palladino, D. M., Paciello, A., & F., B. 2007, Geophysical Research Letters, 34
Sottili, G. & Palladino, D. M. 2012, Terra Nova, 24, 233
Sottili, G., Palladino, D. M., Cuffaro, M., & Doglioni, C. 2015, Earth, Planets and Space, 67, 1
Stroup, D. F., Bohnenstiehl, D. R., Tolstoy, M., Waldhauser, F., & Weekly, R. T. 2007, Geophysical Research Letters, 34, n/a, l15301
Svensmark, H. 2007, Astronomy and Geophysics, 48, 1.18
Svensmark, H. & Friis-Christensen, E. 1997, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 59, 1225
Svensmark, J., Enghoff, M. B., Shaviv, N. J., & Svensmark, H. 2016, Journal of Geophysical Research : Space Physics, 121, 8152
Tamburello, G., Caliro, S., Chiodini, G., et al. 2019, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 384, 151
Taris, F., Damljanovic, G., Andrei, A., et al. 2018, A&A, 611
Titov, O., Girdiuk, A., & Lambert, S. 2018, Astronomy & Astrophysics
Titov, O. & Lambert, S. 2013, Astronomy & Astrophysics, 559, A95
Titov, O., Lambert, S. B., & Gontier, A.-M. 2011, Astronomy & Astrophysics, 529, A91
Tolstoy, M. 2015, Geophysical Research Letters, 42, 1346, 2014GL063015
Tramelli, A., Godano, C., Ricciolino, P., et al. 2021, Scientific Reports, 11, 7211
Triana, S. A., Trinh, A., Rekier, J., Zhu, P., & Dehant, V. 2021, Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 126, e2020JB021042
van der Elst, N. J., Delorey, A. A., Shelly, D. R., & Johnson, P. A. 2016, Proceedings of the National Academy of Sciences, 113, 8601
Varga, P. & Grafarend, E. 2018, Pure and Applied Geophysics, 175, 1649
Vieira, L. E. A. & da Silva, L. A. 2006, Geophysical Research Letters, 33, n/a, l14802
Vondrák, J. 2020, Acta Geodynamics et Geomaterialia, 17(2), 205
Vondrák, J. & Ron, C. 2016, Acta Geodynamics et Geomaterialia, 13, 241
Vondrák, J. & Ron, C. 2017, A&A, 604, A56
Wenger, M., Ochsenbein, F., Egret, D., et al. 2000, Astronomy & Astrophysics, 143, 9
Xu, M. H., Anderson, J. M., Heinkelmann, R., et al. 2019, The Astrophysical Journal Supplement Series, 242, 5
Xu, M. H., Heinkelmann, R., Anderson, J. M., et al. 2017, Journal of Geodesy, 91, 767
Xu, M. H., Heinkelmann, R., Anderson, J. M., et al. 2016, Astronomical Journal, 152, 151
Xu, M. H., Wang, G. L., & Zhao, M. 2012, Astronomy & Astrophysics, 544
Yseboodt, M., de Viron, O., Chin, T. M., & Dehant, V. 2002, Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 107
Zaccagnino, D., Vespe, F., & Doglioni, C. 2020, Earth-Science Reviews, 103179
Zacharias, N., Finch, C., Dorland, B., Secrest, N., & Johnson, M. 2020, in Astrometry, Earth Rotation, and Reference Systems in the *Gaia* era, ed. C. Bizouard, 179–182
Ziegler, Y., Lambert, S. B., Nurul Huda, I., Bizouard, C., & Rosat, S. 2020, Geophysical Journal International, 222, 845

Annexes

Curriculum vitae

Sébastien Bernard Lambert

Né le 18 novembre 1977 à Nice, Alpes-Maritimes, France
Marié, deux enfants
Demeurant au lieu-dit Boyère à Saint-Hilaire-le-Châtel, Orne, France

Domaines de recherche

— Rotation de la Terre et lien avec sa structure interne et son climat
— Repères globaux et leurs réalisations par géodésie spatiale
— Interférométrie radio à très longue base (VLBI) et applications aux géosciences et à l'astrométrie

Postes occupés

— 2000-2003 : doctorant à l'Observatoire de Paris (SYRTE) sous la direction de Nicole Capitaine et Christian Bizouard et intitulée *Analyse et modélisation de haute précision pour la rotation de la Terre*
— 2004-2005 : postdoctorant à l'Observatoire Naval des Etats-Unis, Washington, District de Columbia (contrat NVI, Inc., sous la direction de William Wooden et Thomas Johnson)
— 2006-2007 : postdoctorant à l'Observatoire Royal de Belgique, Bruxelles, Belgique (contrat BELSPO Action 1, sous la direction de Véronique Dehant)
— Depuis 2007 : astronome-adjoint à l'Observatoire de Paris (SYRTE)

Responsabilités en cours - *passées*

— Responsable de l'équipe Systèmes de Référence Célestes du SYRTE (2017-)
— Responsable du centre d'analyse VLBI de l'Observatoire de Paris auprès de l'IVS (2010-)
— Membre du consortium de la mission spatiale *Gaia* de l'ESA (2016-)
— Membre du conseil du laboratoire SYRTE de l'Observatoire de Paris
— Membre du conseil scientifique du Domaine d'Intérêt Majeur (DIM) Astrophysique et Conditions d'Apparition de la Vie de la région Ile-de-France (2012-)
— Membre du conseil scientifique du Groupe de Recherches en Géodésie Spatiale (GRGS, 2015-)
— Membre du comité de coordination du service national d'observation AA-ANO-1 du CNRS (2015-)
— Membre du GDT *Consistent realization of TRF, CRF, and EOP* de l'UAI (2020-)
— *Membre du conseil scientifique de l'Observatoire de Paris (2014-2019)*
— *Membre du GDT Second Realization of the International Celestial Reference Frame de l'IVS et de l'IERS (2006-2009)*
— *Membre du GDT Third Realization of the International Celestial Reference Frame de l'UAI (2012-2015 et 2015-2018)*
— *Membre du GDT Multi-waveband Realizations of International Celestial Reference System de l'UAI (2015-2018)*
— *Membre du GDT Galactic aberration de l'IVS (2015-2018)*

Distinctions

— 2011 : fellow de l'Association Internationale de Géodésie (AIG)
— 2014 : médaille du bronze du CNRS

Jury de thèses

— 2015 : examinateur de la thèse de Romuald Bouffet, université de Bordeaux, direction Patrick Charlot
— 2019 : rapporteur de la thèse de David Mayer, université technique de Vienne, direction Johannes Böhm

Encadrement de stagiaires

— 2015 : Ibnu Nurul Huda (M2, co-direction avec Christian Bizouard)
— 2016 : Esther Tremblay (M2, co-direction avec Christian Bizouard)
— 2019 : Louise Delzescaux et Hippolyte Mouhanna (L3)
— 2019 : Sylvain Cezar (M2, co-direction avec François Taris)
— 2021 : Antonin Pierron (M2, co-direction avec Hélène Sol)

Encadrement de thèses

— 2013-2016 : César Gattano (co-direction avec Christian Bizouard)
— 2016-2019 : Ibnu Nurul Huda (co-direction avec Christian Bizouard)
— 2017-2018 : Niu Liu (année collaborative dans le cadre d'une co-tutelle avec l'université de Nankin, prof. Zi Zhu)
— 2020-2023 : Yu-Ting Cheng (co-direction avec Christian Bizouard)

Encadrement de post-doctorants

— 2016-2018 : Yann Ziegler (contrat CNES)
— 2019-2021 : Maria Karbon (contrat PSL)

Publications

Publications à comité de lecture

1. Liu N, **Lambert S**, Charlot P, Zhu Z, Liu JC, Jian N, Wan XS, Ding CY **2021**, Comparison of multifrequency positions of extragalactic sources from global geodetic VLBI monitoring program and *Gaia* EDR3, **Astronomy and Astrophysics**, 652, 87
2. Nurul Huda I, Hidayat T, Dermawan B, **Lambert S**, Liu, N, Leon S, Fujisawa K, Yonekura Y, Sugiyama K, Hirota T, Premadi PW, Breton R, Minh YC, Jaroenjittichai P, Wijaya D, Pradipta D, Putri N, Ramadhan S, Puspitarini L, Wulandari H, Hafieduddin M **2021**, Measuring the impact of Indonesian antennas to global geodetic VLBI network, **Experimental Astronomy**, doi : 10.1007/s10686-021-09773-1
3. **Lambert S**, Liu N, Arias EF, Barache C, Souchay J, Taris F, Liu JC, Zhu Z **2021**, Parsec-scale alignments of radio-optical offsets with jets in AGNs from multifrequency geodetic VLBI, *Gaia* EDR3 and the MOJAVE program, **Astronomy and Astrophysics**, 651, 64
4. Nurul Huda I, Bizouard C, **Lambert S**, Allain D **2021**, Polar motion resonance in the prograde diurnal band, **Geophysical Journal International**, 226, 610
5. *Gaia* **Collaboration**, Antoja T et al **2020**, *Gaia* Early Data Release 3 - The Galactic anticentre, **Astronomy and Astrophysics**, 649, 8
6. *Gaia* **Collaboration**, Smart RL et al **2020**, *Gaia* Early Data Release 3 - The *Gaia* catalogue of nearby stars, **Astronomy and Astrophysics**, 649, 6

7. *Gaia* **Collaboration**, Luri X et al **2020**, *Gaia* Early Data Release 3 - Structure and properties of the Magellanic Clouds, **Astronomy and Astrophysics**, 649, 7
8. *Gaia* **Collaboration**, Klioner SA et al **2020**, *Gaia* Early Data Release 3 - Acceleration of the solar system from *Gaia* astrometry, **Astronomy and Astrophysics**, 649, 9
9. *Gaia* **Collaboration**, Brown AGA et al **2020**, *Gaia* Early Data Release 3 - Summary of the contents and survey properties, **Astronomy and Astrophysics**, 649, 1
10. Fabricius C, Luri X, Arenou F, Babusiaux C, Helmi A, Muraveva T, Reylé C, Spoto F, Vallenari A, Antoja T, Balbinot E, Barache C, Bauchet N, Bragaglia A, Busonero D, Cantat-Gaudin T, Carrasco JM, Diakité S, Fabrizio M, Figueras F, Garcia-Gutierrez A, Garofalo A, Jordi C, Kervella P, Khanna S, Leclerc N, Licata E, **Lambert S**, Marrese PM, Masip A, Ramos P, Robichon N, Robin AC, Romero-Gómez M, Rubele S, Weiler M **2020**, *Gaia* Early Data Release 3 - Catalogue validation, **Astronomy and Astrophysics**, 649, 25
11. Charlot P, Jacobs CS, Gordon D, **Lambert S**, Böhm J, de Witt A, Fey AL, Heinkelmann R, Skurikhina E, Titov O, Arias EF, Bolotin S, Bourda G, Ma C, Malkin Z, Nothnagel A, Gaume RA, Mayer D, MacMillan DS **2020**, The third realization of the International Celestial Reference Frame by very long baseline interferometry, **Astronomy and Astrophysics**, 644, 159
12. Ziegler Y, **Lambert S**, Nurul Huda I, Bizouard C **2020**, Contribution of a joint Bayesian inversion of VLBI and gravimetric data to the estimation of the Free Inner Core and Outer Core Nutation resonance parameters, **Geophysical Journal International**, 222, 845
13. Roland J, Gattano C, **Lambert S**, Taris F **2020**, Multiple black hole system in 4C31.61 (2201+315), **Astronomy and Astrophysics**, 634, 101
14. Liu N, **Lambert S**, Zhu Z, Liu JC **2019**, Systematics and accuracy of VLBI astrometry : a comparison with *Gaia* Data Release 2, **Astronomy and Astrophysics**, 634, 28
15. Nurul Huda I, **Lambert S**, Bizouard C, Ziegler Y **2019**, Nutation terms adjustment and implication for the Earth rotation resonance parameters, **Geophysical Journal International**, 220, 759
16. Bizouard C, Nurul Huda I, Ziegler Y, **Lambert S** **2019**, Frequency dependence of polar motion resonance, **Geophysical Journal International**, 220, 753
17. **Lambert S**, Sottili G **2019**, Is there an influence of polar motion on volcanism ? Insights from Mount Etna recent activity, **Geophysical Research Letters**, 46, 85525
18. MacMillan DS, Fey A, Gipson JM, Gordon D, Jacobs CS, Krásná H, **Lambert S**, Malkin Z, Titov O, Wang G, Xu MH **2019**, Galactocentric acceleration in VLBI analysis - Findings of IVS WG8, **Astronomy and Astrophysics**, 630, 93
19. Bizouard C, **Lambert S**, Gattano C, Becker O, Richard JY **2018**, The IERS EOP 14C04 solution for Earth orientation parameters consistent with ITRF 2014, **Journal of Geodesy**, 93, 621
20. *Gaia* **Collaboration**, Eyer L, Rimoldini L, Audard M et al **2018**, *Gaia* Data Release 2 - Variable stars in the colour-absolute magnitude diagram, **Astronomy and Astrophysics**, 623, 110
21. Liu N, **Lambert S**, Zhu Z **2018**, On determining the accuracy of VLBI radio source catalogs, **Astronomy and Astrophysics** 620, 160
22. Gattano C, **Lambert S**, Le Bail K **2018**, Extragalactic radio source stability and VLBI celestial reference frame : insights from the Allan standard deviation, **Astronomy and Astrophysics**, 618, 80
23. Titov O, Girdiuk A, **Lambert S**, Lovell J, McCallum J, Shabala S, McCallum L, Mayer D, Schartner M, de Witt A, Shu F, Melnikov A, Ivanov D, Mikhailov A, Yi S, Soja B, Xia B, Jiang T **2018**, Testing general relativity with geodetic VLBI : what a single, specially designed experiment can teach us, **Astronomy and Astrophysics**, 618, 8
24. *Gaia* **Collaboration**, Brown AG, Vallenari A, Prusti T et al **2018**, *Gaia* Data Release 2 - Summary of the contents and survey properties, **Astronomy and Astrophysics** 616, 1
25. *Gaia* **Collaboration**, Babusiaux C, van Leeuwen F, Barstwo MA et al **2018**, *Gaia* Data Release 2 - Observational Hertzsprung-Russell diagrams, **Astronomy and Astrophysics** 616, 10

26. *Gaia* **Collaboration**, Katz D, Antoja T, Romero-Gómez M et al **2018**, *Gaia* Data Release 2 - Mapping the Milky Way disc kinematics, **Astronomy and Astrophysics** 616, 11

27. *Gaia* **Collaboration**, Helmi A, van Leeuwen F, McMillan PJ et al **2018**, *Gaia* Data Release 2 - Kinematics of globular clusters and dwarf galaxies around the Milky Way, **Astronomy and Astrophysics** 616, 12

28. *Gaia* **Collaboration**, Spoto F, Tanga P, Mignard F et al **2018**, *Gaia* Data Release 2 - Observations of solar system objects, **Astronomy and Astrophysics** 616, 13

29. Mignard F, Klioner SA, Lindegren L, Herná J, Bastian U, Bombrun A, Hobbs D, Lammers U, Michalik D, Ramos-Lerate M, Biermann M, Ferná J, Geyer R, Hilger T, Siddiqui HI, Steidelmüller H, Babusiaux C, Barache C, **Lambert S** et al **2018**, *Gaia* Data Release 2 - The celestial reference frame (*Gaia*-CRF2), **Astronomy and Astrophysics** 616, 14

30. Arenou F, Luri X, Babusiaux C, Fabricius C, Helmi A, Muraveva T, Robin AC, Spoto F, Vallenari A, Antoja T, Cantat-Gaudin T, Jordi C, Leclerc N, Reylé C, Romero-Gómez M, Shih IC, Soria S, Barache C, Bossini D, Bragaglia A, Breddels MA, Fabrizio M, **Lambert S**, Marrese PM, Massari D, Moitinho A, Robichon N, Ruiz-Dern L, Sordo R, Veljanoski J, Eyer L, Jasniewicz G, Pancino E, Soubiran C, Spagna A, Tanga P, Turon C, Zurbach C **2018**, *Gaia* Data Release 2 - Catalogue validation, **Astronomy and Astrophysics** 616, 17

31. **Lambert S**, Marcus SL, de Viron O **2017**, Atmospheric torques and Earth's rotation : what drove the millisecond-level length-of-day response to the 2015-16 El Niño ? **Earth System Dynamics**, 8, 1009

32. Gattano C, **Lambert S**, Bizouard C **2017**, Observation of the Earth's nutation by the VLBI : how accurate is the geophysical signal, **Journal of Geodesy** 91, 849

33. Arenou F, Luri X, Babusiaux C, Fabricius C, Helmi A, Robin AC, Vallenari A, Blanco-Cuaresma S, Cantat-Gaudin T, Findeisen K, Reylé C, Ruiz-Dern L, Sordo R, Turon C, Walton NA, Shih IC, Antiche E, Barache C, Barros M, Breddels M, Carrasco JM, Costigan G, Diakité S, Eyer L, Figueras F, Gallucio L, Heu J, Jordi C, Krone-Martins A, Lallement R, **Lambert S**, Leclerc N, Marrese PM, Moitinho A, Mor R, Romero-Gómez M, Sartoretti P, Soria S, Soubiran C, Souchay J, Veljanoski J, Ziaeepour H, Giuffrida G, Pancino E, Bargaglia A **2017**, *Gaia* Data Release 1 - Catalogue validation, **Astronomy and Astrophysics** 599, 50

34. Rosat S, **Lambert S**, Gattano C, Calvo M **2017**, Earth's core and inner core resonances from analysis of VLBI nutation and superconducting gravimeter data, **Geophysical Journal International** 208, 211

35. Le Poncin-Lafitte C, Hees A, **Lambert S** **2016**, Lorentz symmetry and very long baseline interferometry, **Physical Review D** 94, 125030

36. Fey AL, Gordon D, Jacobs CS, Ma C, Gaume RA, Arias EF, Bianco G, Boboltz DA, Böckmann S, Böhm J, Bolotin S, Charlot P, Collioud A, Engelhardt G, Gipson J, Gontier AM, Heinkelmann R, Kurdubov S, **Lambert S**, Lytvyn S, MacMillan DS, Malkin Z, Nothnagel A, Ojha R, Skurikhina E, Sokolova J, Souchay J, Sovers OJ, Tesmer V, Titov O, Wang G, Zharov V **2015**, The second realization of the International Celestial Reference Frame by very long baseline interferometry, **Astronomical Journal** 150, 58

37. Roland J, Britzen S, Kun E, Henri G, **Lambert S**, Zensus A **2015**, Structure of the nucleus of 1928+738, **Astronomy and Astrophysics** 578, 86

38. **Lambert S** **2014**, Comparison of VLBI radio source catalogs, **Astronomy and Astrophysics** 570, 108

39. Titov O, **Lambert S** **2013**, Improved VLBI measurement of the solar system acceleration, **Astronomy and Astrophysics** 559, 95

40. **Lambert S** **2013**, Time stability of the ICRF2 axes, **Astronomy and Astrophysics** 553, 122

41. Taris F, Andrei AH, Klotz A, Vachier F, Côte R, Bouquillon S, Souchay J, **Lambert S**, Anton S, Bourda G, Coward D **2013**, Optical monitoring of extragalactic sources for the link between the ICRF and the future *Gaia* celestial reference frame, **Astronomy and Astrophysics** 552, 98

42. Liu JC, Capitaine N, **Lambert S**, Malkin Z, Zhu Z **2012**, Systematic effect of the Galactic aberration on the ICRS realization and the Earth orientation parameters, **Astronomy and Astrophysics** 548, 50
43. Karatekin O, de Viron O, **Lambert S**, Dehant V, Rosenblatt P, Van Hoolst T, Le Maistre S **2011**, Atmospheric angular momentum variations of Earth, Mars, and Venus at seasonal time scales, **Planetary and Space Science** 59, 923
44. Gambis D, Salstein DA, **Lambert S 2011**, Use of atmospheric angular momentum forecasts for UT1 predictions : analyses over CONT08, **Journal of Geodesy** 85, 435
45. Moór A, Frey S, **Lambert S**, Titov O, Bakos J **2011**, On the connection of the apparent proper motion and the VLBI structure of compact radio sources, **Astronomical Journal** 141, 178
46. Titov O, **Lambert S**, Gontier AM **2011**, VLBI measurement of the secular aberration drift, **Astronomy and Astrophysics** 529, 91
47. **Lambert S**, Le Poncin-Lafitte C **2011**, Improved determination of ? by VLBI, **Astronomy and Astrophysics** 529, 70
48. Bizouard C, Remus F, **Lambert S**, Seoane L, Gambis D **2011**, The Earth's variable Chandler wobble, **Astronomy and Astrophysics** 526, 106
49. Taris F, Souchay J, Andrei AH, Bernard M, Salabert M, Bouquillon S, Anton S, **Lambert S**, Gontier AM, Barache C **2011**, Astrophotometric variability of CFHT-LS Deep 2 QSOs, **Astronomy and Astrophysics** 526, 25
50. Rosat S, **Lambert S 2009**, FCN resonance parameters from VLBI and superconducting gravimeter data, **Astronomy and Astrophysics** 503, 287
51. **Lambert S**, Le Poncin-Lafitte C **2009**, Determining the relativistic parameter ? using very long baseline interferometry, **Astronomy and Astrophysics** 499, 331
52. Souchay J, Andrei AH, Barache C, Bouquillon S, Gontier AM, **Lambert S**, Le Poncin-Lafitte C, Taris F, Arias EF, Suchet D, Baudin M **2009**, The construction of the Large Quasar Astrometric Catalogue (LQAC), **Astronomy and Astrophysics** 494, 799
53. Capitaine N, Mathews PM, Dehant V, Wallace PT, **Lambert S 2009**, On the IAU 2000/2006 precession-nutation and comparison with other models and VLBI observations, **Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy** 103, 179
54. Mathews PM, **Lambert S 2009**, Effect of mantle and ocean tides on the Earth's rotation rate, **Astronomy and Astrophysics** 493, 325
55. **Lambert S**, Gontier AM **2009**, On radio source selection to define a stable celestial frame, **Astronomy and Astrophysics** 493, 317
56. Souchay J, **Lambert S**, Andrei AH, Bouquillon S, Barache C, Le Poncin-Lafitte C **2008**, Astrometric comparisons of quasar catalogues, **Astronomy and Astrophysics** 485, 299
57. **Lambert S**, Mathews PM **2008**, Erratum : Second-order torque on the tidal redistribution and the Earth's rotation, **Astronomy and Astrophysics** 481, 883
58. **Lambert S**, Dehant V, Gontier AM **2008**, Celestial frame instability in VLBI analysis and its impact on geophysics, **Astronomy and Astrophysics** 481, 535
59. Souchay J, **Lambert S**, Le Poncin-Lafitte C **2007**, A comparative study of rigid Earth, non rigid Earth nutation theories and observational data, **Astronomy and Astrophysics** 472, 681
60. Folgueira M, Dehant V, **Lambert S**, Rambaux N **2007**, Impact of tidal Poisson terms to non-rigid Earth rotation, **Astronomy and Astrophysics** 469, 1197
61. **Lambert S**, Dehant V **2007**, The Earth's core parameters as seen by the VLBI, **Astronomy and Astrophysics** 469, 777
62. Le Poncin-Lafitte C, **Lambert S 2007**, Numerical study of relativistic frequency shift for cold-atom clock experiments in space, **Classical and Quantum Gravity** 24, 801
63. **Lambert S 2006**, Atmospheric excitation of the Earth's free core nutation, **Astronomy and Astrophysics** 457, 717

64. **Lambert S**, Bizouard C, Dehant V **2006**, Rapid variations in polar motion during the 2005-2006 winter season, **Geophysical Research Letters** 33, 13303
65. **Lambert S**, Mathews PM **2006**, Second-order torque on the tidal redistribution and the Earth's rotation, **Astronomy and Astrophysics** 453, 363
66. **Lambert S**, Capitaine N **2004**, Effects of zonal deformations and the Earth's rotation rate variations on precession-nutation, **Astronomy and Astrophysics** 428, 255
67. Capitaine N, Chapront J, **Lambert S**, Wallace PT **2003**, Expressions for the Celestial Intermediate Pole and the Celestial Ephemeris Origin consistent with the IAU 2000A precession-nutation model, **Astronomy and Astrophysics** 400, 1145
68. **Lambert S**, Bizouard C **2002**, Positioning the Terrestrial Ephemeris Origin in the International Terrestrial Reference Frame, **Astronomy and Astrophysics** 394, 317
69. Bizouard C, **Lambert S 2002**, Lunisolar torque on the atmosphere and Earth's rotation, **Planetary and Space Science** 50, 323

Autres publications

— Co-auteur de la Connaissance des Temps, EDP Sciences (2005-)
— Co-auteur de l'Introduction aux éphémérides astronomiques, EDP Sciences (2020)
— Co-auteur du livre blanc VLBI20-30 : a scientific roadmap for the next decade - The future of the European VLBI Network (2020)
— Co-éditeur/auteur du livre blanc SKA-France (2017)
— Environ 90 publications dans des actes de colloques
— Environ 90 communications dans des colloques sans publication d'actes
— Publication régulière dans les rapports annuels de l'IERS et de l'IVS