

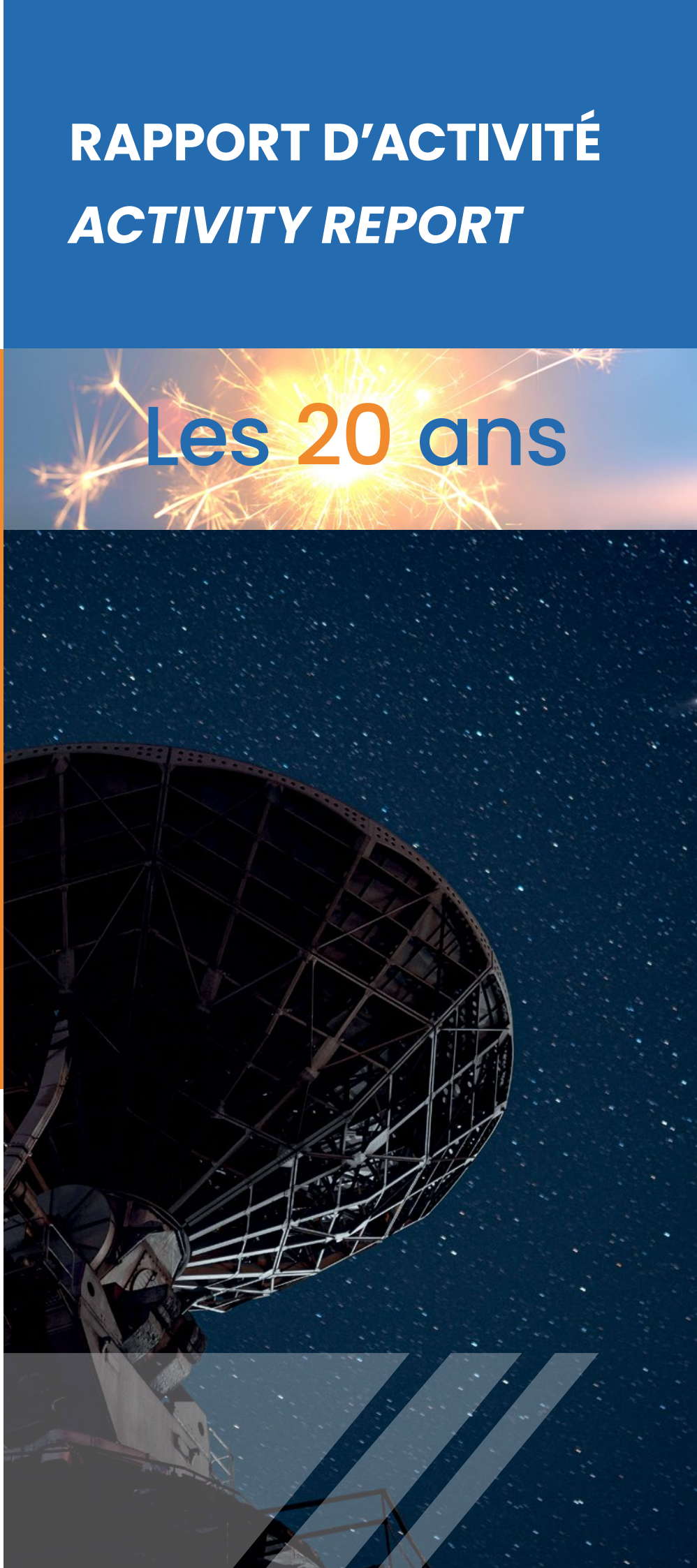


RAPPORT D'ACTIVITÉ *ACTIVITY REPORT*

Les 20 ans

2023
2024

www.tesa.prd.fr





Avant-propos

TéSA est un laboratoire original dans le paysage aéronautique et spatial : il rassemble, le temps d'une étude ou d'une thèse, les meilleurs enseignants-chercheurs en télécommunications et disciplines associées pour répondre aux besoins du CNES et de l'industrie.

TéSA montre combien l'innovation naît lorsque talents confirmés et jeunes chercheurs se rencontrent, échangent et travaillent dans une ambiance à la fois décontractée et productive au cœur de Toulouse.

Le conseil scientifique y joue un rôle essentiel : il stimule les échanges internes en organisant journées scientifiques et séminaires, et ouvre TéSA sur l'extérieur en invitant des chercheurs reconnus pour une présentation ou un séjour.

La recherche est l'objectif de TéSA, la formation son moteur. Chaque année, 5 à 6 thèses sont encadrées par des professeurs d'écoles partenaires, des industriels et des experts du CNES. TéSA, ce sont avant tout des hommes et des femmes animés par le goût de l'excellence et passionnés par l'aéronautique et le spatial.

Le domaine des télécommunications exige sans cesse plus de performances en traitement du signal et des images, en communications numériques et en réseaux. Il intègre aussi de nouvelles dimensions système, avec l'essor des constellations et l'exploitation de l'orbite très basse. Fort de ses compétences développées depuis vingt ans, TéSA relève aujourd'hui ces défis. Il contribue aussi à la localisation, à la navigation et à l'observation de la Terre, domaines stratégiques pour l'indépendance française et européenne.

Ce rapport d'activité reflète cette richesse : structuré par domaines avec un résumé de chaque axe, il présente ensuite projets, thèses soutenues, publications et brevets.

Merci aux auteurs et bonne lecture !



Foreword

TéSA is a distinctive laboratory within the aerospace sector. For the duration of a study or doctoral thesis, it brings together leading academics in telecommunications and related disciplines to meet the needs of CNES and industry.

TéSA shows how innovation emerges when experienced experts and young researchers exchange ideas and work together in a relaxed and productive environment, in the heart of Toulouse.

The Scientific Committee plays a key role: it fosters internal exchanges through scientific days and seminars, while also opening TéSA to the outside world by inviting renowned researchers for presentations or residencies.

Research is TéSA's core mission, with training as its driving force. Each year, five to six PhD theses are supervised by professors from partner institutions, industry specialists, and CNES experts. Above all, TéSA is a community guided by a commitment to excellence and a passion for aerospace.

The telecommunications domain constantly demands advances in signal and image processing, digital communications, and networking. It also opens new system dimensions, with the rise of constellations and very low Earth orbits. Building on two decades of expertise, TéSA addresses these challenges while contributing to positioning, navigation, and Earth observation—strategic areas for French and European independence.

This activity report reflects that diversity. Organised by domain, with a summary of each focus, it presents ongoing projects, theses that have been defended, publications, and patents.

So, our thanks to the authors – now settle down for a good read!

**Thierry Floriant,
Président de TéSA**





Sommaire

5 PARTIE 1 TéSA fête ses 20 ans

9 PARTIE 2 Activités scientifiques

- 9 1. LOCALISATION ET NAVIGATION
- 17 2. TRAITEMENT DES INTERFÉRENCES
- 19 3. TRAITEMENT STATISTIQUE DU SIGNAL
- 23 4. TéSA.IA : DU TRAITEMENT STATISTIQUE À L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE
- 29 5. INTERNET DES OBJETS
- 31 6. ESSAIS DE NANOSATELLITES

37 PARTIE 3 Vie du laboratoire

- 37 1. CHERCHEURS INVITÉS
- 39 2. LES SÉMINAIRES TéSA
- 42 3. LES TTT
- 43 4. LES JOURNÉES SCIENTIFIQUES TéSA
- 45 5. RAYONNEMENT DE TéSA
- 48 6. TéSA AIME SES DOCTORANTS

49 PARTIE 4 Tendances et Perspectives

- 50 1. LOCALISATION ET NAVIGATION : VERS UN POSITIONNEMENT ROBUSTE, INTELLIGENT ET INTÉGRÉ
- 55 2. OBSERVATION DE LA TERRE : EXTRAIRE DE LA VALEUR DANS UN MONDE INCERTAIN
- 58 3. SYSTÈMES DE COMMUNICATION PAR SATELLITE : VERS DES RÉSEAUX DISTRIBUÉS, INTELLIGENTS ET SOUVERAINS

63 PARTIE 5 Conclusion

64 ANNEXE

- 64 1. LISTE DES PUBLICATIONS
 - 64 1.1. ARTICLES DE JOURNAUX
 - 65 1.2. ARTICLES DE CONFÉRENCES
 - 67 1.3. BREVETS
 - 67 1.4. THÈSES DE DOCTORAT
- 68 2. LISTE DES ÉTUDES



Summary

5 PART 1 TéSA turns 20

9 PART 2 Scientific activities

- 9 1. POSITIONING AND NAVIGATION
- 17 2. INTERFERENCE PROCESSING
- 19 3. STATISTICAL SIGNAL-PROCESSING
- 23 4. TéSA.IA: FROM STATISTICAL PROCESSING TO ARTIFICIAL INTELLIGENCE
- 29 5. INTERNET OF THINGS
- 31 6. NANOSATELLITE SWARMS

37 PART 3 Life in the laboratory

- 37 1. GUEST RESEARCHERS
- 39 2. TéSA SEMINARS
- 42 3. THE TTTs
- 43 4. TéSA SCIENCE DAYS
- 45 5. TéSA OUTREACH
- 48 6. TéSA LOVES ITS PHD STUDENTS

49 PART 4 Trends and perspectives

- 50 1. POSITIONING AND NAVIGATION: TOWARDS ROBUST, SMART AND INTEGRATED POSITIONING
- 55 2. EARTH OBSERVATION: EXTRACTING VALUE IN AN UNCERTAIN WORLD
- 58 3. SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS: TOWARDS DISTRIBUTED, SMART AND SOVEREIGN NETWORKS

63 PART 5 Conclusion

64 APPENDIX

- 64 1. PUBLICATION LIST
 - 64 1.1. JOURNAL PAPERS
 - 65 1.2. CONFERENCE PAPERS
 - 67 1.3. PATENTS
 - 67 1.4. PHD THESES
- 68 2. RESEARCH STUDY LIST



PARTIE 1

PART 1

TéSA fête ses 20 ans

TéSA turns 20

En novembre 2004 naissait TéSA, association à but non lucratif dédiée à la recherche en télécommunications spatiales et aéronautiques. Vingt ans déjà ! Et il suffit de jeter un regard en arrière pour mesurer le chemin parcouru.

À l'époque, la 3G faisait tout juste son apparition. Les téléphones n'avaient pas d'écran tactile, prenaient des photos moyennes et filmaient quelques secondes de vidéo. Les applications mobiles étaient quasi inexistantes, la fibre optique grand public en était à ses débuts et le téléphone fixe régnait encore dans les foyers.

Dans l'espace, les satellites géostationnaires assuraient l'essentiel des communications, mais avec une mobilité réduite. Iridium et Globalstar tentaient d'ouvrir la voie à des constellations en orbite basse, malgré des coûts élevés et des débuts difficiles. D'autres projets, comme Teledesic ou Skybridge, n'avaient pas trouvé d'investisseurs. Mais déjà, la recherche visait plus haut : davantage de mobilité, des débits plus rapides, une meilleure qualité de service et des coûts réduits. La bande Ka faisait rêver, et certains osaient même imaginer les bandes Q et V.

Comme toujours, l'espace inventait des usages qui, un jour, deviendraient indispensables : communications internationales, télévision directe, observation précise de la Terre (météo incluse), navigation par satellites, et désormais Internet haut débit accessible partout.

Galileo, à l'époque, n'était encore qu'un projet destiné à offrir à l'Europe son indépendance vis-à-vis du GPS américain. Hélios 2 venait d'être lancé, Pléiades était encore en développement. Ariane 4 s'apprêtait à tirer sa révérence après 116 succès, Ariane 5 montait en puissance, et une toute jeune société américaine, SpaceX, travaillait sur son premier lanceur, le Falcon 1.

À Toulouse, une communauté de professeurs, chercheurs et ingénieurs se mobilisait déjà autour des télécoms spatiales. Le programme Stentor avait ouvert des coopérations, mais beaucoup travaillaient encore chacun de leur côté. L'idée s'imposa : unir ces forces dans une structure commune, plus efficace, plus visible. Ce fut TéSA.

In November 2004, TéSA was born—a non-profit association dedicated to research in space and aeronautical telecommunications. Twenty years already! And just a quick look back is enough to see how far we've come.

At that time, 3G was only just emerging. Phones had no touchscreens, took average-quality photos, and recorded just a few seconds of video. Mobile applications were nearly non-existent, consumer fiber optics was in its infancy, and the landline still reigned in most households.

In space, geostationary satellites carried most communications, but with limited mobility. Iridium and Globalstar were attempting to pave the way for low-Earth orbit constellations, despite high costs and rocky beginnings. Other projects, like Teledesic or Skybridge, had failed to find investors. Yet research was already aiming higher: greater mobility, faster data rates, better quality of service, and lower costs. The Ka band was the stuff of dreams, and some even dared to imagine Q and V bands.

As always, space was inventing uses that would one day become indispensable: international communications, direct-to-home television, accurate Earth observation (including weather), satellite navigation, and now, broadband Internet accessible everywhere.

Galileo, at the time, was still just a project aimed at giving Europe independence from the American GPS. Hélios 2 had just been launched, Pléiades was still under development. Ariane 4 was preparing to bow out after 116 successes, Ariane 5 was gaining momentum, and a very young American company, SpaceX, was working on its first launcher, the Falcon 1.

In Toulouse, a community of professors, researchers, and engineers was already rallying around space telecommunications. The Stentor programme had opened the way for cooperation, but many still worked separately. The idea emerged to unite these forces within a common structure—more efficient, more visible, and so TéSA was created.

Les 20 ans de TéSA

Le projet n'allait pas de soi : diversité des partenaires, contraintes contractuelles, confidentialité... autant d'obstacles qui semblaient insurmontables. Mais réunion après réunion – souvent animées, le mercredi soir à l'ENSEEIH – la volonté d'avancer l'a emporté. Les statuts furent déposés, un règlement intérieur établi, et le premier trio de gouvernance prit ses fonctions : David Assémat (CNES) comme président, Éric Lansard (Alcatel Space) comme trésorier et Pierre Roumagnac (Rockwell Collins) comme secrétaire. Francis Castanié (ENSEEIH) devint le premier directeur.

Peu auraient parié sur la longévité de ce modèle, né dans les compromis et les difficultés. Pourtant, TéSA a trouvé sa place. En vingt ans, il a encadré des doctorants sur des sujets pluridisciplinaires, permis de répondre d'une seule voix aux appels d'offres nationaux et européens, et fédéré des compétences complémentaires au service de l'innovation.

Le bilan parle de lui-même :

- 86 thèses soutenues,
- plus de 300 études R&D pour le CNES, Thales Alenia Space, Collins Aerospace et bien d'autres,
- plus de 300 articles de revues internationales à comité de lecture,
- plus de 550 communications en conférences internationales,
- 22 brevets,

et, bien sûr, des litres de café et de thé, des kilos de croissants et de chocolatinas partagés à chaque occasion : anniversaires, publications acceptées, soutenances réussies...

En 2024, l'Europe lance Iris2, son futur réseau Internet par satellite pour assurer des communications sécurisées et autonomes. Un nouveau terrain de jeu pour TéSA ?

The project was not easy, given the diversity of partners, contractual constraints, confidentiality issues, so many obstacles that seemed insurmountable. But meeting after meeting – often lively ones, held on Wednesday evenings at ENSEEIH – the will to move forward prevailed. The statutes were filed, internal rules drafted, and the first leadership team took office: David Assémat (CNES) as President, Éric Lansard (Alcatel Space) as Treasurer, and Pierre Roumagnac (Rockwell Collins) as Secretary. Francis Castanié (ENSEEIH) became the first Director.

Few would have bet on the longevity of this model, born out of compromises and difficulties. And yet, TéSA found its place. Over twenty years, it has supervised PhD students on multidisciplinary topics, enabled collective responses to national and European calls for proposals, and brought together complementary expertise in the service of innovation.

The record speaks for itself:

- 86 PhD theses defended
- more than 300 R&D studies for CNES, Thales Alenia Space, Collins Aerospace, and many others
- more than 300 peer-reviewed international journal articles
- more than 550 international conference papers
- 22 patents

and, of course, countless litres of coffee and tea, kilos of croissants and chocolatinas shared on every occasion—anniversaries, accepted publications, successful thesis defenses...

In 2024, Europe is launching Iris2, its future satellite Internet network designed to provide secure and autonomous communications. Will this be a new playground for TéSA?

En décembre dernier, nous avons fêté ensemble les 20 ans du laboratoire. Les plus anciens y ont retrouvé, avec émotion, l'énergie et la passion des plus jeunes, et se sont réjouis de constater que le langage des télécoms spatiales se transmet naturellement de génération en génération.

Vingt ans, c'est un bel âge... Merci à toutes celles et ceux qui ont rendu cela possible, et bon vent à TéSA pour la suite de l'aventure !

David Assemat, 1er Président de TéSA de 2004 à mi-2008 et Franck Durand-Carrier, Président de TéSA de fin 2011 à fin 2022.

Last December, we celebrated the laboratory's 20th anniversary together. The long-standing members, with emotion, rediscovered the energy and enthusiasm of the younger ones, and were delighted to see that the language of space telecommunications naturally carries on from one generation to the next.

Twenty years is a fine milestone... Thank you to all those who made it possible, and fair winds to TéSA for the journey ahead!

David Assémat, first President of TéSA (2004–mid-2008), and Franck Durand-Carrier, President of TéSA (late 2011–late 2022).



>> De gauche à droite : Franck Durand-Carrier, Corinne Mailhes et David Assémat.
From left to right: Franck Durand-Carrier, Corinne Mailhes and David Assémat.

PARTIE 2

PART 2

Activités scientifiques

Scientific activities

Depuis sa création, TéSA s'est imposé comme un acteur clé dans le traitement du signal et des images, domaines qui constituent le cœur de son expertise. Mais l'évolution rapide des technologies et des besoins sociétaux a conduit TéSA à élargir ses champs d'action, en intégrant des approches innovantes, depuis les fondements du traitement statistique jusqu'aux applications les plus avancées de l'intelligence artificielle.

Parallèlement, TéSA explore et développe des solutions dans les systèmes de télécommunications, avec un accent particulier sur les défis posés par l'Internet des Objets, notamment dans le contexte spatial, où la gestion des ressources et la robustesse des communications sont cruciales. Enfin, TéSA s'engage dans l'avenir des systèmes satellitaires avec l'étude approfondie des nanosatellites et de leurs essais, ouvrant la voie à de nouvelles applications disruptives dans l'observation, la communication et la localisation spatiale.

La suite de cette partie détaille ces différents axes de recherche.



1. LOCALISATION ET NAVIGATION

La localisation et la navigation constituent des enjeux technologiques majeurs, que TéSA aborde avec une expertise affirmée dans les systèmes de positionnement par satellite, tout en explorant de nouvelles pistes pour renforcer la précision et la fiabilité de ces technologies. Des GNSS (Global Navigation Satellite Systems) aux signaux UWB (Ultra Wide Band), en passant par l'exploitation des signaux 5G ou les liaisons inter-satellites, le laboratoire déploie une recherche approfondie et innovante. Notons que des enseignants-chercheurs membres de TéSA ont organisé l'édition spéciale du journal EURASIP JASP [J.20] sur les tendances émergentes dans le traitement du signal et l'apprentissage automatique pour le positionnement, la navigation et la datation. Cela témoigne non seulement de l'expertise de TéSA dans le domaine, mais aussi de son intégration active dans la communauté internationale.

Since its creation, TéSA has established itself as a key player in signal and image processing, its sphere of expertise. But the rapid evolution of technologies and societal needs has led it to broaden its scope, incorporating innovative approaches ranging from the fundamentals of statistical processing to the most advanced applications of artificial intelligence.

Concomitantly, TéSA is exploring and developing solutions in telecommunications systems, with a particular focus on the challenges posed by the Internet of Things, especially in the Space context, where resource management and robust communications are crucial. Finally, TéSA is committed to the future of satellite systems with its in-depth study of nanosatellites and their swarms, paving the way for disruptive new applications in space observation, communication and positioning.

The remainder of this section details these different research fields.



1. POSITIONING AND NAVIGATION

Positioning and navigation are major technological challenges, on which TéSA is bringing to bear its authoritative expertise on satellite positioning systems, while exploring new ways of enhancing the accuracy and reliability of these technologies. From GNSS (Global Navigation Satellite Systems) and UWB (Ultra Wide Band) signals to the use of 5G signals and inter-satellite links, the laboratory is conducting in-depth, innovative research. TéSA lecturer-researchers organised a Special Issue of the EURASIP journal JASP [J.20] on emerging trends in signal processing and machine learning for positioning, navigation and time-tagging. This demonstrates not only TéSA's expertise in the field, but also its active role in the international community.

Cette section présente ainsi les avancées significatives réalisées en 2023-2024, notamment en matière de réduction des erreurs de multitrajets, d'amélioration de l'intégrité et de la robustesse des estimations GNSS, et d'intégration de techniques d'apprentissage statistique. Au-delà des GNSS, TéSA a également exploré des solutions alternatives pour des environnements où les signaux satellitaires sont inaccessibles, ouvrant la voie à des systèmes de navigation toujours plus résilients et performants.

Un premier enjeu a concerné la réduction des erreurs affectant la précision des mesures de positionnement, notamment celles induites par les trajets multiples [E.15]. Une approche innovante a ainsi été développée pour identifier et corriger ces erreurs en exploitant la signature des trajets multiples sur les canaux de corrélation en quadrature. Cette méthode permet une meilleure estimation de la phase des signaux GNSS et ouvre la voie à un positionnement d'une précision sub-centimétrique, un progrès particulièrement significatif pour les applications nécessitant une haute exactitude, telles que la navigation autonome et l'atterrissage assisté.

This section presents the significant advances made in 2023-2024, particularly in terms of reducing multipath errors, improving the integrity and robustness of GNSS estimates, and integrating statistical learning techniques. In addition to GNSS, TéSA has also explored alternative solutions for environments in which satellite signals are inaccessible, paving the way for ever more resilient and high-performance navigation systems.

The first challenge was to reduce the errors affecting the accuracy of positioning measurements, particularly those caused by multipath trajectories [E.15]. An innovative approach has therefore been developed to identify and correct these errors by exploiting the multipath signature on quadrature-correlation channels. This method enables better estimation of the phase of GNSS signals and paves the way for sub-centimetre positioning precision, a particularly significant advance for applications requiring high accuracy, such as autonomous navigation and assisted landing.



>> L'équipe TéSA en 2023.
The TéSA team in 2023.

Au-delà des erreurs de mesure, l'intégrité des systèmes GNSS constitue un autre défi clé. Dans ce cadre, les recherches ont porté sur l'amélioration du calcul des volumes de protection en aéronautique, via l'expression analytique du facteur d'échelle K (K -factor) paramétrant ce volume dans le cas d'erreurs de mesures gaussiennes, un paramètre essentiel pour garantir la sécurité et la fiabilité des positions estimées. Une majoration de ce facteur dans le cas d'erreur de mesures non gaussiennes a également été proposée, offrant ainsi une approche adaptable aux applications critiques, notamment dans les domaines ferroviaire et aéronautique [C.5], [E.3].

Par ailleurs, l'estimation des paramètres GNSS en conditions adverses a fait l'objet de plusieurs études approfondies. Dans des environnements dynamiques, les erreurs de positionnement sont amplifiées à cause des multitrajets ou des variations rapides de dynamique, par exemple. Pour évaluer ces impacts, des travaux ont permis d'établir des bornes de Cramér-Rao mal-spécifiées, qui mettent en évidence les biais et erreurs résiduelles des estimateurs conventionnels dans de telles conditions. Ces analyses ont notamment montré que sous certains régimes dynamiques, les erreurs de modèle peuvent paradoxalement améliorer certaines performances d'estimation, un phénomène qui mérite d'être pris en compte dans la conception de nouveaux récepteurs GNSS comme proposé dans [T.2], [J.2], [J.4], [J.5], [J.11]. L'étude des performances des boucles de poursuite GNSS a aussi permis d'établir des expressions analytiques de la variance d'estimation en présence de dynamique élevée, ce qui contribue à mieux comprendre les limites des architectures de réception actuelles [C.6].

Un autre défi identifié concerne la robustesse des estimateurs GNSS lorsque les hypothèses statistiques classiques ne sont pas respectées. L'impact des distributions non gaussiennes du bruit a été étudié afin de quantifier la perte de performance des estimateurs dans des scénarios réels où le modèle statistique du bruit diffère des hypothèses nominales. Ces travaux montrent que la prise en compte explicite de ces distributions permet d'améliorer la précision des estimations, notamment dans les environnements où les signaux GNSS sont dégradés par des perturbations électromagnétiques [J.21], [C.27]. Une approche complémentaire a exploré l'estimation du retard et de la fréquence Doppler dans des contextes dynamiques complexes, mettant en évidence l'importance de modèles d'estimation plus flexibles et adaptatifs [C.37].

Beyond measurement errors, the integrity of GNSS systems is another key challenge. In this context, research has focused on improving the calculation of flight-safety envelopes in aeronautics, via the analytical expression of the scale factor K (K -factor) parametrising this volume in the case of Gaussian measurement errors, an essential parameter for guaranteeing the safety and reliability of estimated positions. An increase in this factor in the case of non-Gaussian measurement errors has also been proposed, thus offering an approach that can be adapted to critical applications, particularly in the railway and aeronautical fields [C.5], [E.3].

Moreover, the estimation of GNSS parameters under adverse conditions has been the subject of several in-depth studies. In dynamic environments, positioning errors are exacerbated by multipaths or, for example, rapid variations in dynamics. To assess these impacts, work has been done to establish misspecified Cramér-Rao bounds, which highlight the biases and residual errors of conventional estimators under such conditions. In particular, these analyses have shown that under certain dynamic regimes, model errors can paradoxically improve some estimation performances, a phenomenon that deserves to be taken into account in the design of new GNSS receivers as proposed in [T.2], [J.2], [J.4], [J.5], [J.11]. The study of the performance of GNSS tracking loops has also made it possible to establish analytical expressions for the estimation variance with high dynamics, which contributes to a better understanding of the limitations of current receiving-system architectures [C.6].

Another challenge identified concerns the robustness of GNSS estimators when conventional statistical assumptions are not respected. The impact of non-Gaussian noise distributions was studied in order to quantify the loss of estimator performance in real scenarios where the statistical model of the noise differs from the nominal assumptions. This work shows that explicitly taking these distributions into account can improve the accuracy of estimates, particularly in environments where GNSS signals are degraded by electromagnetic interference [J.21], [C.27]. A complementary approach explored the estimation of delay and Doppler frequency shift in complex dynamic contexts, thus revealing the importance of more flexible and adaptive estimation models [C.37].

Ces travaux ont permis d'apporter des avancées significatives en matière de précision, de fiabilité et de résilience des systèmes GNSS. Les méthodes développées pour corriger les erreurs de multi-trajet et améliorer l'intégrité des signaux ouvrent la voie à des solutions plus robustes, tandis que l'étude des performances sous conditions adverses permet de mieux comprendre les limites des estimateurs classiques et d'orienter le développement de nouvelles stratégies d'estimation adaptées aux environnements complexes.

Un autre enjeu actuel dans lequel TéSA est impliqué est la sensibilité des systèmes GNSS aux interférences. L'un des défis majeurs réside dans la caractérisation de la dégradation des performances des récepteurs GNSS lorsqu'ils sont soumis à des interférences intentionnelles ou accidentelles. Des travaux ont ainsi permis d'analyser l'impact des brouillages sur les estimations des paramètres GNSS et d'établir des bornes de Cramér-Rao mal-spécifiées prenant en compte ces effets. Ces études ont notamment mis en évidence les biais introduits par les interférences sur les estimations des paramètres de synchronisation GNSS et ont permis de quantifier la perte de précision associée [T.2], [J.8], [C.7].

This work has led to significant advances in the accuracy, reliability and resilience of GNSS systems. The methods developed to correct multipath errors and improve signal integrity pave the way for more robust solutions, while the study of performance under adverse conditions provides a better understanding of the limitations of conventional estimators and guides the development of new estimation strategies adapted to complex environments.

Another current issue in which TéSA is involved is the sensitivity of GNSS systems to interference. One of the major challenges lies in characterising the performance degradation of GNSS receivers when subjected to intentional or accidental interference. Work has therefore been done to analyse the impact of jamming on GNSS parameter estimates and to establish misspecified Cramér-Rao bounds that take these effects into account. In particular, these studies have highlighted the biases introduced by interference on estimates of GNSS synchronisation parameters and have made it possible to quantify the corresponding loss of accuracy [T.2], [J.8], [C.7].

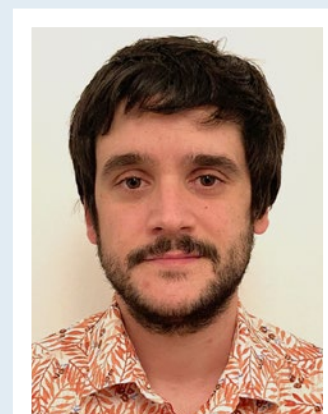
Julien Lesouple

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

Après sa thèse de doctorat soutenue en 2019, Julien a travaillé 6 mois dans une équipe de R&D navigation chez Airbus Defence & Space. Il décide alors de quitter le monde industriel et retourne à TéSA pour effectuer un post-doc de 18 mois (cofinancement TéSA/Thales Alenia Space) sur de la détection d'anomalies avec retour utilisateur. Il enchaîne avec un second post-doctorat de 6 mois à l'ISAE Supaéro sur du calcul de bornes d'estimation. Depuis octobre 2021, il est enseignant chercheur (équivalent maître de conférences) à l'ENAC au sein de l'axe de recherche SIGNAV (traitement du signal pour la navigation).

WHERE ARE THEY NOW?

After defending his doctoral thesis in 2019, Julien worked for six months in a navigation R&D team at Airbus Defence & Space. He then decided to leave the industrial sector and returned to TéSA for a 18-month post-doctoral fellowship (co-funded by TéSA and Thales Alenia Space) on anomaly detection with user feedback. He worked at ISAE-Supaero during a second six-month post-doctoral position on the computation of estimation bounds. Since October 2021, he has been a teacher-researcher (equivalent to an assistant professor) at ENAC within the SIGNAV research group (signal processing for navigation).

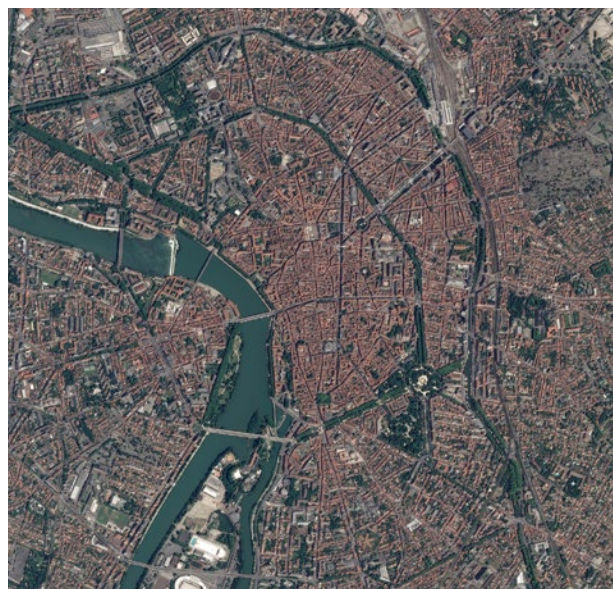


Dans cette continuité, une approche bayésienne a été développée pour estimer les paramètres GNSS en présence d'interférences à module constant, comme les signaux de type chirp, qui posent un problème majeur dans les applications de navigation. L'algorithme proposé repose sur une estimation par maximum de vraisemblance utilisant l'algorithme d'espérance-maximisation (EM), ce qui permet d'améliorer la robustesse des estimations tout en limitant l'impact des interférences sur la mesure du temps de propagation et du décalage Doppler [J.14], [C.19].

Au-delà de l'atténuation des interférences, la détection des anomalies GNSS constitue un autre enjeu essentiel pour garantir la fiabilité des systèmes de navigation. En effet, les pannes GNSS peuvent résulter de diverses causes, telles que des défaillances de satellites, des perturbations intentionnelles (brouillage et leurrage) ou des erreurs au niveau du récepteur. Une étude récente [E.7] a ainsi proposé un cadre analytique permettant d'identifier en temps réel les comportements GNSS anormaux en analysant des métriques de surveillance spécifiques. L'approche développée repose sur l'examen des signatures statistiques des anomalies et sur l'utilisation de nouveaux indicateurs pour détecter rapidement les signaux corrompus et éviter leur exploitation par les récepteurs GNSS.

L'ensemble de ces travaux contribue à renforcer la résilience des systèmes GNSS en leur permettant de mieux caractériser les impacts des interférences, de proposer des approches avancées pour les atténuer et de développer des méthodes robustes pour la détection des anomalies. Ces avancées sont essentielles pour améliorer la fiabilité des applications critiques reposant sur la navigation par satellites, notamment dans les domaines du transport aérien, terrestre et maritime.

L'amélioration de la robustesse des estimations GNSS et l'intégration de techniques d'apprentissage statistique constituent des axes de recherche majeurs pour renforcer la fiabilité des systèmes de navigation. Une première approche a consisté à développer des méthodes de filtrage robustes pour l'estimation de l'attitude, en exploitant les propriétés des groupes de Lie. En effet, les estimateurs conventionnels, notamment les filtres de Kalman, sont connus pour leur fragilité face aux erreurs de modélisation et aux observations bruitées. Pour pallier ces limitations, une approche basée sur des filtres à erreur d'état robustes a été proposée, intégrant des statistiques M-robustes pour mieux gérer les valeurs aberrantes dans les mesures. Ces nouveaux filtres ont été spécifiquement conçus pour des états évoluant sur des



Following on from this, a Bayesian approach has been developed to estimate GNSS parameters in the presence of constant modulus interference, such as chirp signals, which pose a major problem in navigation applications. The proposed algorithm is based on maximum likelihood estimation using the EM or Expectation-Maximisation algorithm, which improves the robustness of the estimates while limiting the impact of interference on the measurement of propagation time and Doppler shift [J.14], [C.19].

As well as attenuating interference, GNSS anomaly detection is another key factor in guaranteeing the reliability of navigation systems. GNSS failures can have a variety of causes, such as satellite failures, intentional interference (jamming and decoying) or receiver errors. A recent study [E.7] therefore proposed an analytical framework for identifying abnormal GNSS behaviour in real time by analysing specific monitoring metrics. The approach developed is based on examining the statistical signatures of anomalies and using new indicators to detect corrupted signals quickly and prevent them from being exploited by GNSS receivers.

All of this work is making GNSS systems more resilient by enabling them to better characterise the impact of interference, propose advanced methods for mitigating it and develop robust methods for detecting anomalies. These advances are essential for improving the reliability of critical applications based on satellite navigation, particularly in the air, land and maritime transport sectors.

Improving the robustness of GNSS estimates and integrating statistical learning techniques are major areas of research for enhancing the reliability of navigation systems. The first approach was to develop robust filtering methods for attitude esti-

variétés géométriques, comme les quaternions normalisés utilisés pour l'estimation d'attitude, ce qui permet d'améliorer leur stabilité numérique et leur précision même en présence de perturbations [J.17], [C.17].

Une autre avancée dans ce domaine concerne l'analyse théorique des bornes d'estimation sur les groupes de Lie, qui permet de quantifier la meilleure précision théoriquement atteignable dans un cadre où les paramètres d'intérêt sont intrinsèquement liés à une structure géométrique non Euclidienne. En particulier, une extension de la borne de Cramér-Rao a été formulée pour le cas des paramètres définis sur des groupes de Lie, ce qui fournit un outil fondamental pour évaluer la qualité des estimateurs d'attitude robustes et optimiser leur conception [J.22], [C.21]. Dans le même esprit, un cadre plus général de bornes modifiées de Cramér-Rao adaptées aux groupes de Lie a été développé, permettant d'évaluer les

mation, by exploiting the properties of Lie groups. Conventional estimators, in particular Kalman filters, are notoriously vulnerable to modelling errors and noisy observations. To compensate for these limitations, an approach based on robust error-state filters has been proposed, incorporating M-robust statistics to better manage outliers in the measurements. These new filters have been specifically designed for states which are a function of geometric manifolds, such as the normalised quaternions used for attitude estimation, which improves their numerical stability and accuracy even in the presence of disturbances [J.17], [C.17].

Another advance in this area concerns the theoretical analysis of estimation bounds on Lie groups, which makes it possible to quantify the best theoretically achievable accuracy in a framework where the parameters of interest are intrinsically linked to a non-Euclidean geometric

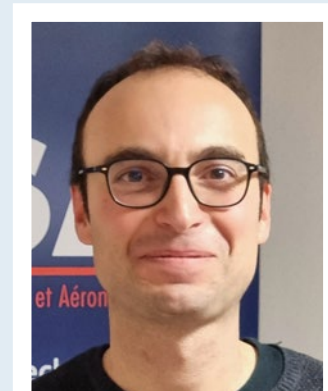
Stefano Fortunati

CHERCHEUR INVITÉ

Stefano Fortunati a obtenu son diplôme et son doctorat à l'Université de Pise, en Italie, respectivement en 2008 et 2012. En 2012, il a rejoint le Département d'Ingénierie de l'Information de l'Université de Pise, où il a travaillé comme chercheur avec un poste de post-doc jusqu'en septembre 2019. D'octobre 2019 à septembre 2024, il a travaillé au Laboratoire des Signaux et Systèmes (L2S) de l'Université Paris-Saclay, du CNRS et de CentraleSupélec, et a été maître de conférences à l'IPSA Paris, en France. Depuis septembre 2024, il est Maître de Conférences (professeur associé) à Télécom SudParis (IP Paris) et membre du laboratoire SAMOVAR. L'expertise professionnelle de Stefano Fortunati couvre différents domaines des statistiques appliquées et du traitement statistique du signal, avec un accent particulier sur les limites de performance, la théorie des erreurs de spécification, les statistiques robustes et semi-paramétriques et la théorie de l'apprentissage statistique.

VISITING RESEARCHER

Stefano Fortunati graduated and received the PhD at the University of Pisa, Italy, in 2008 and 2012 respectively. In 2012, he joined the Department of "Ingegneria dell'Informazione" of the University of Pisa, where he worked as researcher with a post-doc position until Sept. 2019. From Oct. 2019 to Sept. 2024, he was with the Laboratoire des Signaux et Systèmes (L2S) at Université Paris-Saclay, CNRS, CentraleSupélec, and senior lecturer at IPSA Paris, France. Since Sept. 2024 he is Maître de Conférences (associate professor) at Télécom SudParis (IP Paris) and a member of the SAMOVAR laboratory. Stefano Fortunati's professional expertise encompasses different areas of applied statistics and statistical signal processing, with particular focus on performance bounds, misspecification theory, robust and semiparametric statistics and statistical learning theory.



performances d'estimateurs dans des contextes où des paramètres parasites, comme des bruits de mesure mal modélisés, viennent perturber l'estimation principale [C.33].

En parallèle, des avancées ont été réalisées pour améliorer la performance des récepteurs GNSS grâce à l'apprentissage statistique. Une approche fondée sur l'utilisation de réseaux neuronaux récurrents a été développée pour modéliser les processus de suivi GNSS en exploitant les propriétés des espaces Riemanniens de matrices symétriques définies positives. Cette modélisation permet d'améliorer les performances des filtres utilisés pour le suivi des signaux GNSS en optimisant l'estimation des matrices de covariance associées aux erreurs de mesure, ce qui se traduit par une meilleure précision en présence de perturbations [C.46].

Une autre problématique essentielle concerne la fusion et la corrélation de données hétérogènes provenant de différentes sources de mesure. Dans cette optique, plusieurs méthodes ont été développées pour optimiser l'intégration de données GNSS, inertielle et radar en exploitant des algorithmes avancés d'association de pistes et de réduction d'incertitude. L'utilisation d'algorithmes inspirés de la dérive cohérente de points (*Coherent Point Drift*) a permis d'améliorer l'association des données issues de différents capteurs, en prenant en compte les biais potentiels des capteurs et en estimant simultanément les incertitudes associées aux mesures [C.43].

En complément, une approche par forêts d'isolation fonctionnelles a été proposée pour détecter des anomalies dans les trajectoires de navires à partir de données AIS (*Automatic Identification System*) et radar. Cette technique, couplée à des mesures de similarité temporelle basées sur le *Dynamic Time Warping*, permet d'identifier efficacement des comportements atypiques dans les mouvements des navires, une avancée significative pour la surveillance maritime et la détection de menaces potentielles, comme détaillé dans la section « 4. TéSA.IA : du traitement statistique à l'intelligence artificielle », page 23 [C.42].

Dans le cadre plus large de la détection d'anomalies, une méthode exploitant l'analyse de séries temporelles multidimensionnelles a été développée en utilisant les signatures intégrales de moments d'ordre varié. Cette approche permet de caractériser et d'identifier les comportements anormaux au sein de données complexes, en exploitant des techniques avancées de segmentation et de classification. L'intégration de cette méthode dans les processus de navigation pourrait permettre d'améliorer la robustesse des

structure. In particular, an extension of the Cramér-Rao bound has been formulated for the case of parameters defined on Lie groups, which provides a fundamental tool for assessing the quality of robust attitude estimators and optimising their design [J.22], [C.21]. With the same approach, a more general framework of modified Cramér-Rao bounds adapted to Lie groups has been developed, making it possible to evaluate the performance of estimators in contexts where spurious parameters, such as poorly modelled measurement noise, interfere with the main estimate [C.33].

At the same time, advances have been made in statistical learning to improve the performance of GNSS receivers. An approach based on the use of recurrent neural networks has been developed to model GNSS tracking processes by exploiting the properties of Riemannian spaces of symmetric positive definite matrices. This modelling improves the performance of the filters used to track GNSS signals by optimising the estimation of the covariance matrices associated with the measurement errors, which results in better accuracy in the presence of disturbances [C.46].

Another key issue concerns the fusion and correlation of heterogeneous data from different measurement sources. With this in mind, several methods have been developed to optimise the integration of GNSS, inertial and radar data by exploiting advanced path planning and uncertainty reduction algorithms. The use of algorithms inspired by Coherent Point Drift has made it possible to improve the association of data from different sensors, by taking into account the potential biases of the sensors and simultaneously estimating the uncertainties associated with the measurements [C.43].

In addition, a Functional Isolation Forest approach has been proposed to detect anomalies in ship trajectories based on AIS (*Automatic Identification System*) and radar data. This technique, coupled with temporal similarity measurements based on Dynamic Time Warping, makes it possible to efficiently identify atypical behaviours in ship movements, a significant advance for maritime surveillance and the detection of potential threats, as detailed in the section "4. TéSA.IA: from statistical processing to artificial intelligence", page 23 [C.42].

In the broader context of anomaly detection, a method exploiting multidimensional time series analysis has been developed using the integral signatures of moments of varying order. This approach makes it possible to characterise and identify abnormal behaviour in complex data,

systèmes GNSS face aux variations soudaines des conditions d'environnement ou aux erreurs imprévues de mesure [C.44].

L'ensemble de ces travaux contribue à renforcer la robustesse des algorithmes de navigation et d'estimation, en intégrant des approches issues des statistiques robustes, de l'apprentissage automatique et de la fusion de données multisources. Ces avancées sont essentielles pour améliorer la fiabilité et la précision des systèmes GNSS dans des environnements contraints, notamment en présence d'interférences, de conditions de réception dégradées ou d'erreurs de modélisation.

Dans certaines applications spatiales nécessitant une mesure de position relative entre deux ou plusieurs satellites, l'information GNSS n'est pas disponible, que ce soit intentionnel, accidentel ou ... factuel comme dans le cas d'essaims de nanosatellites autour de la Lune. Il est alors nécessaire de recourir à d'autres moyens de mesure, tels que le radar. La solution envisagée repose sur une liaison inter-satellites (*Inter-Satellite Link*, ISL) qui remplit un double rôle : acheminer les données scientifiques et permettre des mesures de pseudodistance destinées au positionnement et à la synchronisation, ce qui, sans GNSS, amène de nombreux verrous. Plusieurs thèses et études ont été et sont encore consacrées à ce sujet : le lecteur est invité à lire toute la section « **6. Essaims de nanosatellites** », page 31, dédiée à cette thématique.

Un dernier projet [E.16] a été mené sur l'exploitation potentielle du signal de référence pour le positionnement de la norme 5G dans un environnement non terrestre (NTN - *Non-Terrestrial Network*). En l'absence de GNSS, la norme 5G terrestre propose un mécanisme de positionnement basé sur le PRS émis par les stations de base, permettant aux terminaux de déterminer leur position. Ce travail a permis d'évaluer la faisabilité d'adapter ce signal à des constellations de satellites en orbites basses et moyennes (LEO/MEO) dotées de charges utiles régénératives. L'un des principaux défis était que le signal PRS avait été initialement conçu pour des utilisateurs terrestres, et que son intégration dans un réseau NTN n'était pas encore prise en compte par les standards de normalisation des télécommunications mobiles. L'étude a analysé les défis techniques et a évalué les performances potentielles du 5G PRS dans un cadre satellitaire, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles alternatives au GNSS pour le positionnement global.

using advanced segmentation and classification techniques. Integrating this method into navigation processes could improve the robustness of GNSS systems to deal with sudden variations in environmental conditions or unexpected measurement errors [C.44].

All this work is helping to improve the robustness of navigation and estimation algorithms, by integrating approaches from robust statistics, machine learning and multi-source data fusion. These advances are essential for improving the reliability and accuracy of GNSS systems in constrained environments, particularly in the presence of interference, degraded reception conditions or modelling errors.

*In some Space applications requiring a measurement of relative position between two or more satellites, GNSS information is not available, whether intentional, accidental or indeed factual, as in the case of swarms of nanosatellites around the Moon. It is then necessary to use other measurement instruments, such as radar. The proposed solution is based on an ISL (*Inter-Satellite Link*), which fulfils a dual role: it carries scientific data and enables pseudo-range measurements to be taken for positioning and synchronisation, which, without GNSS, leads to numerous obstacles. A number of theses and studies have been and are still being devoted to this subject: readers are invited to read the entire section "6. Nanosatellite swarms", page 31, devoted to this topic.*

*A final project [E.16] was carried out on the potential use of the reference signal for positioning by means of the 5G standard in a non-terrestrial environment (NTN - *Non-Terrestrial Network*). In the absence of GNSS, the terrestrial 5G standard offers a positioning mechanism based on the PRS (*Positioning Reference Signal*) emitted by base stations, enabling terminals to determine their position. This work has enabled us to assess the feasibility of adapting this signal to constellations of satellites with regenerative payloads, in LEO/MEO orbits (low and medium earth orbits). One of the main challenges was that the PRS signal had initially been designed for terrestrial users, and its integration into an NTN network had not yet been covered by mobile telecommunications standards. The study analysed the technical challenges and assessed the potential performance of 5G PRS within a satellite framework, paving the way for new alternatives to GNSS for global positioning.*



2. TRAITEMENT DES INTERFÉRENCES

Les systèmes de localisation et de navigation ne sont pas les seuls systèmes à être perturbés par des interférences. L'utilisation de plus en plus soutenue du spectre électromagnétique, en particulier dans les nouvelles bandes attribuées aux télécommunications mobiles et à l'Internet des Objets (IoT - *Internet of Things*) entraîne une congestion et des interférences entre systèmes ou même à l'intérieur d'un système.

Dans le cas de l'AIS (*Automatic Identification System*), on essaie de recevoir des signaux émis par des bateaux pour faire de la surveillance maritime et du suivi de navires, à l'échelle mondiale, à travers une réception par satellite, donc dans des conditions qui n'ont pas été prévues lors de la spécification et de la conception des équipements. Cette réception longue distance entraîne un rapport signal à bruit défavorable et l'apparition de collisions entre les messages, ce qui engendre des verrous à lever dans les algorithmes de réception. Une étude [E.2] a permis d'optimiser les algorithmes proposés dans des études précédentes notamment en sélectionnant automatiquement les paramètres du récepteur en fonction des propriétés du système de réception. De nouvelles stratégies de démodulation ont été développées par TéSA et l'objectif pour le CNES à travers cette étude est d'en poursuivre le développement.



2. INTERFERENCE PROCESSING

Positioning and navigation systems are not the only systems to be affected by interference. Increasing use of the electromagnetic spectrum, particularly in the new bands allocated to mobile telecommunications and the IoT (Internet of Things), is leading to congestion and interference between systems or even within a system.

In the case of the AIS (Automatic Identification System), signals emitted by ships and relayed by satellites are used for maritime surveillance and ship tracking, on a global scale, under conditions that were not foreseen when the equipment was specified and designed. This long-distance reception results in an unfavourable signal-to-noise ratio and collisions between messages, which create obstacles that reception algorithms have to overcome. A study [E.2] has optimised the algorithms proposed in previous studies, in particular by automatically selecting the receiver parameters according to the properties of the receiving system. New demodulation strategies have been developed by TéSA, and CNES's objective in this study is to continue developing them.

Passive non-linearities generate PIMs (Passive Intermodulation Products) in satellite payloads and limit receiver sensitivity and payload capacity or increase mass and cost by requiring the use of separate equipment or different antennas for transmission and reception. A study was



>> Novembre 2023 : quatre nouveaux doctorants à TéSA.
November 2023: four new PhD students at TéSA.

Les non-linéarités passives génèrent des produits d'intermodulation (PIM) passifs dans les charges utiles de satellites et limitent la sensibilité des récepteurs, la capacité des charges utiles ou augmentent la masse et le coût en obligeant à utiliser des équipements séparés ou des antennes différentes pour l'émission et la réception. Une étude a été menée [E.10] afin d'obtenir un modèle physique de contact fractal, de définir des éprouvettes, de les faire réaliser par un laboratoire en micro ou nano-fabrication classique ou additive et de le tester afin de valider le modèle proposé. Cette étude permettra des validations qui conduiront éventuellement au dépôt d'un brevet et/ou à la soumission d'un article dans une conférence internationale. Au moment de la rédaction de ce rapport d'activité, l'étude n'est pas terminée, la réalisation des éprouvettes est en cours.

Dans le cadre des futures missions humaines d'exploration de la Lune, le CNES en collaboration avec l'ESA, la NASA et la JAXA étudie les interférences potentielles entre d'une part les liaisons surfaciques lunaires de télécommunication (WIFI et téléphonie mobile) et d'autre part les liaisons liées à la localisation (de type GNSS). L'objectif est d'allouer les fréquences relatives à ces usages de manière à éviter toute interférence. Ceci est rendu

carried out [E.10] to obtain a physical fractal contact model, define test specimens, have them produced by a laboratory using conventional or additive micro or nano-fabrication and test them in order to validate the proposed model. This study will enable validations that will eventually lead to the filing of a patent and/or the submission of an article for an international conference. At the time of writing, the study has not yet been completed, and the test specimens are still being produced.

In the context of future human missions to explore the Moon, CNES, in collaboration with ESA, NASA and JAXA, is studying the potential interference between lunar surface telecommunications links (WIFI and mobile telephony) and positioning links (GNSS type). The aim is to allocate frequencies for these uses in such a way as to avoid any interference. This is complicated by the joint decision to avoid all transmissions at frequencies below 2 GHz on the far side of the Moon, in order to avoid interference to future observations of outer Space by interferometric radio telescopes. The first possible band for the satellite positioning system on the Moon would be between the WIFI bands (below 2.480 GHz) and the 5G standard telecommunications bands (above 2.5 GHz). This 20 MHz band would be just wide enough for operation, but there

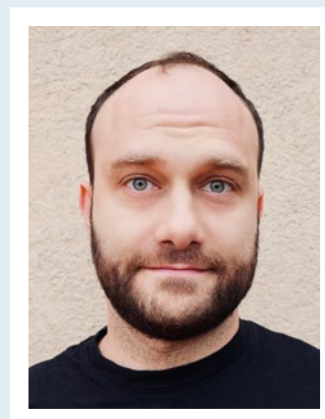
Simone Urbano

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

Après avoir soutenu sa thèse de doctorat en 2019 avec TéSA, Simone a rejoint Airbus Operations pour soutenir le développement, V&V, certification et R&T des lois de contrôle de vol du programme A350XWB et du démonstrateur « Dragonfly » d'Airbus UpNext. En 2022, il a rejoint Airbus Defense and Space pour soutenir les activités liées au système de contrôle d'attitude et d'orbite (AOCS) pour les constellations en orbite basse (LEO). En 2024, Simone a rejoint le groupe Starion France pour piloter et soutenir la conception et le développement d'un simulateur de système spatial pour les activités de R&D en cybersécurité et intelligence artificielle dans le cadre du projet CSS dirigé par l'IRT Saint-Exupéry à Toulouse.

WHERE ARE THEY NOW?

After defending his PhD thesis at TéSA in 2019, Simone joined Airbus Operations to support Flight Control Laws Development, V&V, Certification and R&T on the A350XWB programme and Airbus UpNext Demonstrator "Dragonfly". In 2022, He joined Airbus Defense and Space to support Attitude and Orbit Control System (AOCS) activities for Low-Earth Orbit (LEO) Constellations. In 2024, Simone joined Starion Group France to drive and support the design and development of a space system simulator for cybersecurity and Artificial Intelligence R&D activities in the framework of the CSS project led by IRT Saint-Exupery in Toulouse.



complexe par la décision commune d'éviter toute émission à des fréquences inférieures à 2 GHz sur la face cachée de la Lune afin de préserver des interférences les futures observation de l'espace profond par des radiotélescopes interférométriques. La première bande possible pour le système de localisation par satellite sur la Lune serait comprise entre les bandes WIFI (en-dessous de 2,480 GHz) et les bandes télécommunications au standard 5G (au-dessus de 2,5 GHz). Cette bande de 20 MHz serait juste suffisante pour le fonctionnement mais il se pose un gros problème d'interférences provenant des émetteurs WIFI et 5G dans les bandes de fréquences proches. L'objectif de l'étude [E.13] confiée par le CNES à TéSA était de disposer de tous les éléments techniques permettant de fixer les limites de puissance de ces émetteurs dans la bande du récepteur de localisation pour que son fonctionnement ne soit pas dégradé de plus de 0,5 dB (10 %). Les résultats de cette étude ont été présentés par le CNES sous forme de communications et de propositions de standardisation vers le groupe international de coordination des fréquences dans l'espace (SFCG). Basée sur ces travaux, une proposition de réglementation a été rédigée et proposée à l'UIT, ainsi qu'un article qui sera présenté à ION GNSS+ 2025 [C.53].



3. TRAITEMENT STATISTIQUE DU SIGNAL

Les axes de recherche présentés précédemment sur la localisation, la navigation et le traitement des interférences partagent un dénominateur commun : l'expertise de TéSA dans le traitement statistique du signal. Mais cette compétence ne se limite pas à ces domaines. Des thématiques « historiques » de TéSA mobilisent également ce savoir-faire, notamment dans le filtrage, l'analyse spectrale et le radar. Ces domaines, qu'ils soient dédiés à des applications spatiales, aéronautiques ou connexes, continuent de bénéficier de l'expérience et de l'expertise de TéSA.

Dans la thématique filtrage, TéSA a été sollicité pour son expertise dans l'étude CNES [E.9] dédiée à la communication inter satellites, thématique commune à nombre de systèmes orbitaux et intégrée au programme de Recherche et Technologies (R&T). Plus particulièrement, cette étude s'est intéressée aux bancs de filtres numériques utilisés dans les chaînes de communication numérique. Le problème posé était celui de la reconstruction parfaite (sans erreur) en sortie d'un banc de plusieurs filtres numériques à partir d'une



is a major problem of interference from WIFI and 5G transmitters in nearby frequency bands. The aim of the study [E.13] entrusted to TéSA by CNES was to obtain all the technical information needed to set the power limits of these transmitters in the positioning-receiver band so that its operation would not be degraded by more than 0.5 dB (10%). The results of this study were presented by CNES in the form of papers and standardisation proposals to the SFCG (international Space Frequency Coordination Group). Based on this work, a regulatory proposal has been drafted and submitted to the ITU, along with a paper that will be presented at ION GNSS+ 2025 [C.53].



3. STATISTICAL SIGNAL-PROCESSING

The areas of research presented above on positioning, navigation and interference processing share a common denominator: TéSA's expertise in statistical signal processing. But this expertise is not limited to these areas. TéSA's long-standing themes also draw on it, particularly in filtering, spectral analysis and radar. These areas, whether dedicated to aerospace or related applications, continue to benefit from TéSA's experience and expertise.

With respect to filtering, TéSA has been called upon for its expertise in the CNES study [E.9] dedicated to inter-satellite communication, a theme common to many orbital systems and included in the Research and Technology (R&T) programme. More specifically, this study looked at digital filter banks used in digital communication systems. The problem posed was how to reconstruct perfect (error-free) output from a bank of several digital filters from part of the available sub-bands, whether adjacent or not. The state of the art holds that perfect reconstruction from signals coming from a filter bank is only possible by using all the

partie des sous-bandes disponibles, adjacentes ou pas. L'état de l'art précise qu'une reconstruction parfaite à partir de signaux issus d'un banc de filtres n'est possible qu'en utilisant toutes les sous-bandes, avec des filtres spécifiques et un facteur de décimation égal à l'échantillonnage critique. L'état de l'art ne fournissant pas de solution de reconstruction parfaite lorsque seule une partie des sous-bandes est disponible, le TéSA a proposé une approche différente. Cette approche repose sur l'utilisation d'un facteur de décimation inférieur à l'échantillonnage critique, c'est-à-dire, inférieur au nombre de sous-bandes, pour relâcher les contraintes sur les filtres, associée à un banc de filtres à réponse impulsionnelle infinie basé sur une structure dite WOLA (*Weighted Overlap and Add*) permettant de réduire le coût calculatoire. Les résultats obtenus à la fin de l'étude sont résolument novateurs et devraient permettre une publication ou le dépôt de brevet.

L'expertise du TéSA sur le filtrage et l'analyse spectrale a permis d'aider la société Rubisoft à faire évoluer son système d'analyse spectrale. Rubisoft développe un système d'analyse spectrale « large bande » permettant d'analyser l'environnement électromagnétique d'une antenne. Une étude [E.5] a été confiée à TéSA pour intégrer de nouveaux algorithmes d'analyse spectrale qui permettront d'enrichir et automatiser l'utilisation de leur système. Bien que non appliquée à un contexte spatial, on retrouve une problématique proche de celle de la surveillance du spectre électromagnétique faite à partir de satellites, consistant à détecter l'émission de signaux « parasites » [E.11]. Le but de l'étude [E.5] confiée à TéSA était de repérer automatiquement les zones pertinentes du spectre, c'est-à-dire associées à des signaux impulsionnels (de support temporel fini), puis après filtrage et transformation dans le domaine temporel, de détecter le début et la fin des impulsions qui pourraient s'y trouver. L'identification des zones pertinentes du spectre a requis l'estimation du spectre de bruit par un double filtre médian (deux filtres en parallèle de longueurs différentes, un court-terme et un long-terme), permettant de positionner un seuil de détection des pics du spectre du signal d'intérêt. Une fois les pics détectés, ils sont agrégés en classes (*clustering*) caractérisés par une liste d'attributs (fréquence du pic, largeur de bande, rapport signal à bruit local en dB...) permettant de mettre en œuvre une procédure itérative d'estimation des instants de départ et de fin de l'impulsion, ainsi que toutes les caractéristiques souhaitées de l'impulsion détectée. Afin d'être robuste au niveau de bruit, à chaque itération, la détection des impulsions dans le signal I/Q est réalisée en combinant une analyse temporelle et une analyse spectrale du signal mesuré. L'approche proposée a été validée

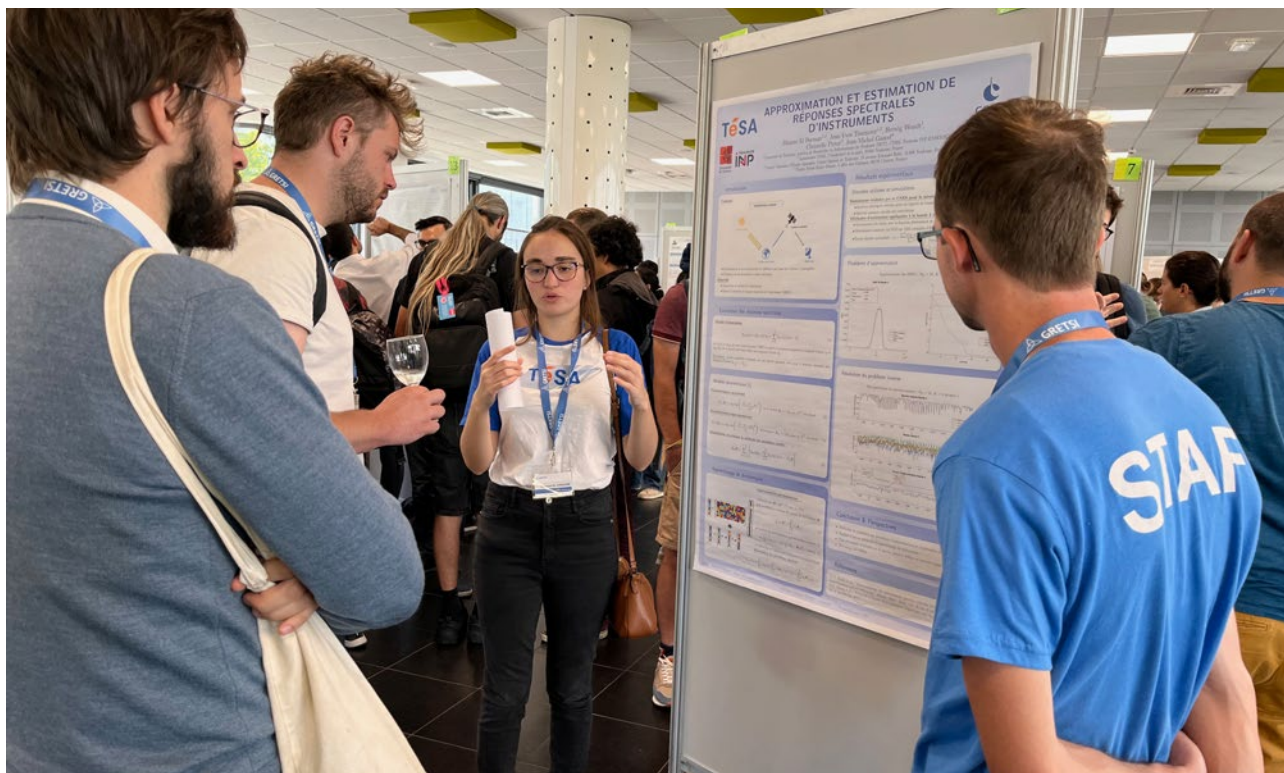
sub-bands, with specific filters and a decimation factor equal to the critical sampling. Since the state of the art does not provide a perfect reconstruction solution when only part of the sub-bands is available, TéSA has proposed a different approach. This approach is based on the use of a decimation factor lower than the critical sampling, i.e. lower than the number of sub-bands, to relax the constraints on the filters, combined with an infinite impulse response filter bank based on a structure known as WOLA (Weighted Overlap Add) to reduce the computational cost. The results obtained at the end of the study are clearly an innovation and should lead to publication or patenting.

TéSA's expertise in filtering and spectral analysis has helped Rubisoft upgrade its spectral analysis system. Rubisoft is developing a broadband spectral analysis system for analysing an antenna's electromagnetic environment. TéSA has been entrusted with a study [E.5] to integrate new spectral analysis algorithms that will enhance and automate the use of their system. Although not applied to a Space context, the problem is similar to that of monitoring the electromagnetic spectrum from satellites, which involves detecting the emission of "spurious" signals [E.11]. The aim of the study [E.5] entrusted to TéSA was to automatically identify the relevant areas of the spectrum, i.e. those associated with pulsed signals (of finite time support), and then, after filtering and transformation into the time domain, to detect the start and end of any pulses that might be present. In order to identify the relevant areas of the spectrum, the noise spectrum was estimated using a double median filter (two parallel filters of different lengths, one short term and one long term), which was used to set a detection threshold for the peaks in the spectrum of the signal of interest. Once the peaks have been detected, they are aggregated into classes (clustering) characterised by a list of attributes (peak frequency, bandwidth, local signal-to-noise ratio in dB, etc.) enabling an iterative procedure to be implemented to estimate the start and end times of the pulse, as well as all the desired characteristics of the detected pulse. In order to be robust in spite of the noise level, at each iteration, the pulses in the I/Q signal are detected by combining a temporal analysis and a spectral analysis of the measured signal. The proposed approach was validated and refined using a set of measured spectra and I/Q signals supplied by Rubisoft.

et affinée en utilisant une banque de spectres mesurés et de signaux I/Q fournis par Rubisoft.

Dans la thématique radar, le TêSA a mené deux études [E.6], [E.12] pour la société Vitesco. La première étude [E.6] portait sur l'analyse du potentiel des systèmes de contrôle d'accès de véhicules par Ultra-Wide Band (UWB) en termes de détection de geste. A terme, l'objectif est de distinguer différents gestes effectués par un utilisateur en vue d'ouvrir son véhicule de manière sélective (une seule porte, le coffre...). Si une étude précédente était basée sur une analyse distance-Doppler associée à un seul récepteur, cette nouvelle étude s'est intéressée à l'exploitation d'une architecture à deux récepteurs permettant d'analyser l'évolution de la main de l'utilisateur en distance, mais aussi en angle. Plus précisément, le but était d'évaluer les performances du capteur envisagé par Vitesco en termes de précision angulaire et de proposer des solutions algorithmiques adaptées. Une modélisation logicielle de la chaîne de traitement des signaux prenant en compte les défauts standards décrits dans la littérature a permis d'évaluer de manière fine la performance accessible en fonction des conditions d'utilisation (distance...) pour un réseau de capteurs réels proche du modèle virtuel. Une comparaison des performances obtenues avec des mesures sur le système réel a permis de proposer des pistes d'amélioration du réseau de capteurs réels.

In the radar field, TêSA has carried out two studies [E.6], [E.12] for Vitesco. The first study [E.6] analysed the potential of UWB (Ultra-Wide Band) vehicle access control systems in terms of gesture detection. Ultimately, the aim is to distinguish between different gestures made by a user to selectively open a vehicle (a single door, the boot, etc.). While a previous study was based on a range-Doppler analysis associated with a single receiver, this new study looked at the use of a two-receiver architecture to analyse the movements of the user's hand in terms of distance as well as angle. More specifically, the aim was to assess the performance of the sensor envisaged by Vitesco in terms of angular accuracy and to propose suitable algorithmic solutions. Software modelling of the signal processing chain, taking into account the standard faults described in the literature, has enabled a detailed assessment of the performance that can be achieved, as a function of the conditions of use (distance, etc.) for a network of real sensors similar to those of the virtual model. A comparison of the performance obtained with measurements on the real system has led to suggestions for improving the real sensor network.



>> Jihanne El Haouari présente ses travaux au GRETSI 2023 à Grenoble.
Jihanne El Haouari presents her work at GRETSI 2023 in Grenoble.

La seconde étude [E.12] a analysé la faisabilité d'un système radar de détection d'obstacles pour prévenir d'éventuelles collisions lors de l'ouverture automatique du coffre de certains véhicules. Plus précisément, l'objectif était d'étudier une solution bas-coût basée sur l'utilisation d'une forme d'onde radar simplifiée, i.e., une forme d'onde utilisant 2 fréquences, dite FSK (*Frequency-Shift-Keying*). Si la forme d'onde radar envisagée était déjà utilisée dans certaines applications, son exploitation dans le cadre de la détection d'obstacles de proximité avec une faible vitesse de déplacement n'était pas connue. L'étude a consisté en une analyse fine du fonctionnement de la forme d'onde FSK, ainsi que de ses performances optimales en termes de précision, d'ambiguïtés et de pouvoir de détection. De nouveau, une modélisation logicielle d'un dispositif radar envisagé par Vitesco, mise en œuvre pour des scénarii typiques pour l'application visée, a permis de valider les prévisions théoriques et d'affiner les performances et limitations associées. Une fois encore, bien que non appliqué à un contexte spatial, on retrouve des dispositifs radar manipulant des formes d'onde pouvant être mises en œuvre dans un contexte de rendez-vous spatial où le compromis entre la sobriété énergétique et la précision de mesure est un critère fondamental.

*The second study [E.12] analysed the feasibility of an obstacle detection radar system to prevent possible collisions when the boot of certain vehicles is opened automatically. More specifically, the aim was to study a low-cost solution based on the use of a simplified radar waveform, i.e. a waveform using 2 frequencies, known as FSK (*Frequency-Shift-Keying*). Although the radar waveform envisaged was already being used in certain applications, it was not known how it could be used to detect nearby obstacles at low speed. The study involved a detailed analysis of how the FSK waveform works, and its optimum performance in terms of accuracy, ambiguity and detection power. Once again, software modelling of a radar device envisaged by Vitesco, implemented for typical scenarios for the target application, has enabled the theoretical predictions to be validated and the corresponding performance and limitations to be refined. Once again, although not applied to a Space context, we find radar devices manipulating waveforms that can be implemented in a Space rendezvous context where the trade-off between energy efficiency and measurement accuracy is a fundamental criterion.*



>> Échanges lors de la journée des doctorants en 2023 à l'occasion de la venue des chercheurs invités.
Discussions during the PhD Students' Day in 2023 on the occasion of the visit of invited researchers.

En ce qui concerne les activités en traitement du signal, le TéSA a acquis durant ces dernières années une expertise (thèses et études) sur la conception, le développement et la validation d'algorithmes de détection d'anomalies. Cette expertise combinée à l'activité de TéSA en traitement des images et fusion de données, notamment le recalage d'images (« *image registration* »), a permis de répondre à une étude [E.1] proposée par la société eV-Technologies. Le credo de cette société est la corrélation, à savoir l'utilisation de différents capteurs permettant de mesurer la même information « sous des angles différents ». Dans cette étude, il s'agissait d'une « dual-caméra », une caméra dans le visible et une caméra dans l'infrarouge, ayant pour finalité de présenter en surimpression les images visuelle et infrarouge, en particulier pour des utilisations de santé ou environnementales. Dans cette perspective, le premier objectif a été de proposer une méthode permettant de combiner les flux de vidéos visuelle et thermique pour les « superposer » (« *registration* »), en prenant en compte les contraintes matérielles (différences de résolutions et de taille d'image, différences de rendu...), problème non documenté dans la littérature ouverte pour une combinaison visible/thermique. Le second objectif a été d'analyser l'ensemble des techniques de compression et de détection de changements/anomalies sur les différents types de flux de données pour minimiser le transfert des données et ne transmettre que lorsque l'image a suffisamment changé. L'étude a permis de proposer des solutions adaptées à ces deux flux vidéo hybrides.



4. TéSA.IA : DU TRAITEMENT STATISTIQUE À L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Depuis vingt ans (et même avant !), TéSA s'illustre dans le domaine de l'apprentissage statistique (*machine learning*), notamment pour les communications spatiales et aéronautiques. Cette expertise s'est concrétisée à travers de nombreux projets, études et thèses.

L'année 2024 a vu la soutenance de la thèse de Gastón de Boni Rovella [T.7] sur la proposition de solutions d'apprentissage statistique pour le décodage canal des communications M2M (*Machine to Machine*), pour lesquelles des communications ultra-fiables à faible latence sont essentielles. Le principal problème réside dans la croissance exponentielle de la complexité du décodeur à mesure que la taille des paquets

In terms of signal processing activities, TéSA has acquired expertise in recent years (theses and studies) in the design, development and validation of anomaly detection algorithms. This expertise, combined with TéSA's activities in image processing and data fusion, in particular image registration, enabled us to respond to a request for a study [E.1] by eV-Technologies. The company's credo is correlation, i.e. the use of different sensors to measure the same information "from different angles". In this study, we used a "dual-camera", a camera in the visible range and a camera in the infrared range, with the aim of superimposing visual and infrared images, in particular for health or environmental applications. With this in mind, the first objective was to propose a method for combining visual and thermal video streams to 'superimpose' them ('registration'), taking into account hardware constraints (differences in image resolution and size, differences in rendering, etc.), a problem that had not been documented in the open literature for a visible/thermal combination. The second objective was to analyse all the compression and change/anomaly detection techniques for the different types of data stream to minimise data transfer and only transmit when the image has changed sufficiently. The study proposed solutions adapted to these two hybrid video streams.



4. TéSA.IA: FROM STATISTICAL PROCESSING TO ARTIFICIAL INTELLIGENCE

For the last twenty years (and even before that!), TéSA has been making its mark in the field of statistical learning (machine learning), particularly for aerospace communications. This expertise led to a number of projects, studies and theses.

The year 2024 saw Gastón de Boni Rovella defend his thesis [T.7] on the proposal of statistical learning solutions for the channel decoding of M2M (Machine to Machine) communications, for which ultra-reliable, low-latency communications are essential. The main problem lies in the exponential growth in decoder complexity as packet size increases. This plague of dimensionality manifests itself in three ways: i) the number of correctable noise patterns, ii) the space of code words to

augmente. Ce fléau de la dimensionnalité se manifeste sous trois aspects : i) le nombre de motifs de bruit corrigibles, ii) l'espace de mots de code à explorer et iii) le nombre de paramètres entraînaables dans les modèles. Pour remédier à la première limitation, des solutions ont été proposées, basées sur un algorithme de type machine à vecteurs support (SVM – *Support Vector Machine*). Une approche SVM bit à bit permet ainsi de réduire considérablement la complexité des solutions SVM existantes. Pour remédier à la seconde limitation, les décodeurs neuronaux basés sur les syndromes ont été envisagés et un nouveau décodeur orienté message a été introduit et a permis d'améliorer les schémas existants, tant au niveau de l'architecture du décodeur que du choix de la matrice de contrôle de parité. Concernant la taille du réseau neuronal, une version récurrente d'un décodeur basé sur un transformateur a été développée afin de réduire le nombre de paramètres tout en conservant son efficacité par rapport aux solutions neuronales précédentes. Enfin, le décodeur proposé a été étendu pour prendre en charge les modulations d'ordre supérieur via les modulations codées entrelacées et génériques, facilitant ainsi son application dans des environnements de communication plus réalistes.



be explored and iii) the number of trainable parameters in the models. To overcome the first limitation, solutions based on an SVM (Support Vector Machine) algorithm were proposed. A bit-by-bit SVM approach thus considerably reduced the complexity of existing SVM solutions. To overcome the second limitation, neural decoders based on syndromes were considered and a new message-oriented decoder was introduced that improved existing schemes, both in terms of the decoder architecture and the choice of parity-check matrix. With regard to the size of the neural network, a recurrent version of a transformer-based decoder was developed in order to reduce the number of parameters while maintaining its efficiency compared with

Lorenzo Ortega Espluga

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

Après avoir soutenu sa thèse de doctorat à TéSA en 2019, Lorenzo a réalisé un post-doctorat cofinancé par TéSA et l'ISAE-Supaero dans le domaine de l'estimation robuste pour la navigation. Fin 2021, il a rejoint l'IPSA en tant qu'enseignant-chercheur et a intégré TéSA comme laboratoire de recherche. Début 2025, il obtient son titre d'HDR à l'Université Toulouse III – Paul Sabatier. Ses principaux domaines d'intérêt incluent le traitement statistique du signal et les communications numériques, avec des applications aux communications satellitaires, à la localisation, à la navigation et à la télédétection.

WHERE ARE THEY NOW?

After defending his doctoral thesis at TéSA in 2019, Lorenzo completed a post-doctoral fellowship co-funded by TéSA and ISAE-Supaero in the field of robust statistics for navigation. At the end of 2021, he joined IPSA as a teacher-researcher and integrated the research laboratory TéSA. In early 2025, he obtained his HDR (Research Habilitation Degree) from the University of Toulouse III – Paul Sabatier. His main areas of interest include statistical signal processing and digital communications, with applications to satellite communications, positioning, navigation, and remote sensing.



Dans ce domaine de l'intelligence artificielle, TéSA apporte sa brique à l'évolution des techniques neuronales et reste un acteur reconnu dans le développement de méthodes d'apprentissage statistique basées sur la théorie de l'information. En particulier, la détection d'anomalies est un axe de forte expertise de TéSA que l'on met au service de diverses applications. Ainsi, TéSA a participé au dépôt d'un projet ANR ASTRID en partenariat avec Hensold-Nexeya et Toulouse INP pour la détection de trajectoires anormales de bateaux dans la surveillance maritime [E.17]. A la faveur des discussions entre les partenaires, au vu des problématiques à adresser, un sujet de thèse, mêlant l'expertise TéSA en détection d'anomalies mais aussi en fusion de données, a été déposé pour un financement CIFRE AID par Hensold-Nexeya, impliquant les mêmes acteurs. Les deux demandes ont été validées par l'ANR et le projet baptisé « PIRANIA-MMV » s'est déroulé en 2023 et 2024, tandis que la thèse devrait se soutenir fin 2025. L'objectif des deux était de développer des modèles et des algorithmes capables de traiter et de fusionner les données issues de radars et du système d'identification automatique (AIS) des navires. Le défi consiste à détecter de manière fiable et en temps réel des trajectoires anormales de navires (anomalies), en identifiant leurs comportements suspects ou inattendus : par exemple, un bateau de pêche qui se met à tourner en rond dans une zone parce qu'il a trouvé un banc de poissons mais qui « oublie » de mettre son AIS en marche pour ne pas donner l'information à ses concurrents. Autre cas d'anomalies possibles, le cas de bateaux pirates qui faussent intentionnellement leur AIS pour donner une fausse position, qui pourra être corrigée avec les données du radar. Pour répondre à ce besoin de détection d'anomalies par fusion de trajectoires, les verrous à lever ont été nombreux. Une trajectoire, par définition, correspond à un ensemble de points dont la taille peut varier. Or, les algorithmes de « *machine learning* » nécessitent des vecteurs de taille fixe. Le principal problème réside donc dans la transformation d'un ensemble de données de taille variable en un ensemble de vecteurs de taille fixe, de manière à optimiser la détection d'anomalies sur ce type de données. L'état de l'art en matière de détection d'anomalies sur les données AIS indique que la plupart des méthodes considèrent les trajectoires dans leur intégralité et utilisent une modélisation des trajectoires à l'aide de modèles paramétriques comme des polynômes. TéSA a montré qu'un découpage judicieux des trajectoires en segments permet de détecter et de localiser les anomalies en indiquant les zones présentant des comportements anormaux, sans avoir à acquérir la trajectoire globale, ce qui pourrait rendre l'intervention trop tardive. Enfin, il est essentiel de pouvoir définir une mesure

previous neural solutions. Finally, the proposed decoder was extended to support higher-order modulations via interleaved and generic coded modulations, thus facilitating its application in more realistic communication environments.

In this field of artificial intelligence, TéSA is making a significant contribution to the evolution of neural techniques and remains a recognised player in the development of statistical learning methods based on information theory. In particular, anomaly detection is one of TéSA's key areas of expertise, which we bring to bear on a wide range of applications. For example, TéSA participated in the submission of an ANR ASTRID project in partnership with Hensold-Nexeya and Toulouse INP for the detection of abnormal ship trajectories in maritime surveillance [E.17]. As a result of discussions between the partners, and given the issues to be addressed, a thesis combining TéSA's expertise in anomaly detection and data fusion was submitted for CIFRE AID funding by Hensold-Nexeya, involving the same stakeholders. Both applications were approved by the ANR, and the project, called PIRANIA-MMV, was carried out in 2023 and 2024, while the thesis is due to be defended at the end of 2025. The aim of both was to develop models and algorithms capable of processing and merging data from radars and ships' AIS devices (Automatic Identification Systems). The challenge is to detect abnormal vessel trajectories (anomalies) reliably and in real time, by identifying suspicious or unexpected behaviour: for example, a fishing boat that starts circling in an area because it has found a shoal of fish but 'forgets' to switch on its AIS so as not to give the information to its competitors. Another possible anomaly is the case of pirate ships that intentionally falsify their AIS to give a false position, which can then be corrected using radar data. To meet this need for anomaly detection by trajectory fusion, a number of obstacles had to be overcome. A trajectory, by definition, corresponds to a set of points whose size can vary. However, Machine Learning algorithms require vectors of a fixed size. The main problem therefore lies in transforming a set of data of variable size into a set of vectors of fixed size, so as to optimise anomaly detection on this type of data. The state of the art in anomaly detection on AIS data indicates that most methods consider trajectories in their entirety and use trajectory modelling based on parametric models such as polynomials. TéSA has shown that a judicious division of trajectories into segments enables anomalies to be detected and located by indicating the areas showing abnormal behaviour, without having to acquire the overall trajectory, which could mean it would be too late to intervene. Finally, it is essential to be able to define a confidence level for detecting

de confiance pour la détection des anomalies. Cette fonctionnalité implique la mise en place d'un score de détection d'anomalies et d'un seuil ajustable, permettant de répondre aux besoins spécifiques de l'utilisateur et de l'application visée. Une première approche a été étudiée, utilisant les trajectoires brutes avec une mesure de similarité capable de comparer des vecteurs de tailles différentes, notamment à l'aide de la méthode *Dynamic Time Warping*. Nous avons proposé une solution innovante permettant de calculer une mesure de similarité entre des vecteurs de tailles variables et intégrer cette mesure dans des algorithmes de détection d'anomalies comme *one-class SVM* ou *isolation forest*. Les résultats de cette approche sont détaillés dans [C.40], [C.41]. Une autre approche a été développée pour les navires évoluant dans des zones maritimes spécifiques. Cette méthode repose sur la transformation des trajectoires en boîtes englobantes dont la taille fixe permet d'appliquer des distances comme la distance euclidienne. Nous avons également proposé une solution permettant de détecter les navires qui sortent de leurs zones de navigation, avec une application ciblée sur les activités de pêche. Une troisième approche a été explorée pour les navires circulant sur des routes maritimes prédéfinies, ou « rails ». Cette méthode transforme les trajectoires en une séquence de segments, permettant ainsi l'utilisation d'une distance euclidienne grâce à la dimension fixe de ces segments. Nous avons développé une méthode originale pour détecter de manière efficace, par apprentissage, les navires de type cargo ou tanker qui s'écartent de leurs rails maritimes. Enfin, une dernière approche basée sur la théorie des graphes a été proposée [C.39]. Elle permet de représenter les trajectoires sous la forme d'une succession de nœuds et d'arêtes et d'utiliser des méthodes de similarité adaptées à la théorie des graphes. La thèse associée à cette étude PIRANIA-MMV devant se soutenir fin 2025, le prochain rapport d'activité en présentera toutes les contributions.

Le retour utilisateur, visant à incorporer les corrections effectuées par un opérateur humain dans le processus d'apprentissage a aussi été mis en oeuvre et une classification d'activité a été rajoutée, permettant de classer les trajectoires maritimes en fonction des activités des bateaux (pêche, croisière, plaisance etc.). La réussite de ce projet ANR ASTRID a conduit les acteurs impliqués (TéSA, Hensold-Nexeya, Toulouse INP) à proposer une suite dans un ANR ASTRID Maturation... Rendez-vous au prochain rapport d'activité !

En parallèle de la surveillance maritime, TéSA s'est aussi intéressé à la surveillance du spectre pour là aussi détecter de potentielles anomalies. Dans le cadre de ses activités de surveillance

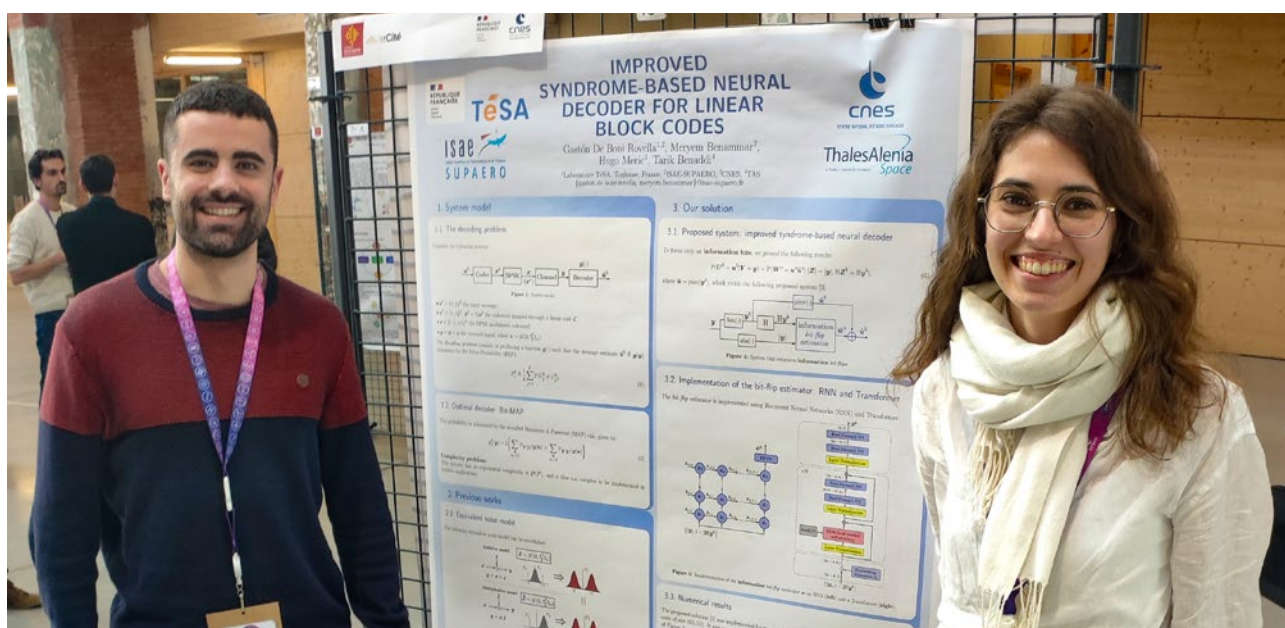


anomalies. This functionality involves setting up an anomaly detection score and an adjustable threshold, to meet the specific needs of the user and the target application. A first approach was studied, using raw trajectories with a similarity measurement capable of comparing vectors of different sizes, in particular using the Dynamic Time Warping method. We proposed an innovative solution for calculating a similarity measurement between vectors of varying sizes and integrating this measurement into anomaly detection algorithms such as one-class SVM or 'isolation forest'. The results of this approach are detailed in [C-40], [C-41]. Another approach was developed for ships operating in specific sea zones. This method is based on the transformation of trajectories into bounding boxes whose fixed size allows distances such as the Euclidean distance to be applied. We also proposed a solution for detecting ships leaving their navigation zones, with an application for monitoring fishing activities. A third approach was explored for ships travelling on predefined sea routes, or «rails». This method transforms the trajectories into a sequence of segments, allowing the use of a Euclidean distance thanks to the fixed dimension of these segments. We developed an original method for efficiently detecting, by machine learning, cargo ships or tankers that deviate from their shipping lanes. Finally, a last approach based on graph theory was proposed [C.39]. It allows trajectories to be represented in the form of a succession of vertices and edges, using similarity methods adapted from graph theory. As the thesis associated with this PIRANIA-MMV study is due to be defended at the end of 2025, the next Activity Report will present all its contributions.

User feedback, aimed at incorporating corrections made by a human operator into the learning process, was also implemented and an activity classification added, enabling ship trajectories to be classified according to boat activities (fishing, cruising, pleasure boating, etc.). The success of this ANR ASTRID project has led the stakeholders involved (TéSA, Hensold-Nexeya, Toulouse INP) to propose a follow-up in an ANR ASTRID Maturation project, to be covered in the next Activity Report!

du spectre depuis l'espace, le CNES développe des méthodes de détection automatique de signaux « parasites » (interférences volontaires ou involontaires) appelées *Radio Frequency Interference* (RFI). Cette surveillance s'effectue l'aide de spectrogrammes calculés à bord des satellites et la méthode actuellement utilisée par le CNES utilise un test statistique à hypothèses binaires : la valeur du spectrogramme contenue dans chaque case (appelée aussi pixel) temps-fréquence est comparée à un seuil, calculé en fonction d'hypothèses sur la distribution du bruit affectant le spectrogramme. Si la valeur du spectrogramme est au-dessus du seuil fixé, la présence d'un RFI est détectée. Une étude précédente a permis d'améliorer les performances de la détection en introduisant une méthode « multi-résolution », utilisant de manière analytique et rigoureuse un test de détection appliqué à plusieurs pixels du spectrogramme, le long des lignes et le long des colonnes. Cette méthode a donné des résultats intéressants mais elle s'accompagne d'un coût calculatoire très important. L'étude [E.11] menée en 2024 a proposé d'explorer l'intérêt de l'apprentissage de dictionnaire (*Dictionary Learning*) pour la détection des RFIs. Le *Dictionary Learning* est majoritairement utilisé pour le débruitage et la classification mais également pour la détection d'anomalies : il a été au cœur de la thèse TéSA de Barbara Pilastre, soutenue en 2020, pour la détection des anomalies dans la télémesure satellite. Une analyse des différentes méthodes de la littérature pour construire le dictionnaire et pour coder de manière parcimonieuse les données comme des combinaisons linéaires des éléments du dictionnaire a été effectuée pour l'application visée. Une comparaison des

Alongside maritime surveillance, TéSA is also looking at spectrum monitoring as a way of detecting potential anomalies. As part of its Space-based spectrum monitoring activities, CNES is developing methods for the automatic detection of «spurious» signals (intentional or unintentional interference) known as RFI (Radio Frequency Interference). This monitoring is carried out using spectrograms calculated on board satellites, and the method currently used by CNES uses a statistical test with binary hypotheses: the value of the spectrogram contained in each time-frequency cell (also called a pixel) is compared with a threshold, calculated according to hypotheses about the distribution of the noise affecting the spectrogram. If the value of the spectrogram is above the set threshold, then RFI is detected. A previous study improved detection performance by introducing a “multi-resolution” method, using a rigorous analytical detection test applied to several pixels in the spectrogram, along rows and columns. This method has produced some interesting results, but it comes at a very high computational cost. The study [E.11] carried out in 2024 proposed exploring the potential usefulness of Dictionary Learning for the detection of RFIs. Dictionary Learning is mainly used for denoising and classification, but also for anomaly detection: it was the focus of Barbara Pilastre’s TéSA thesis, defended in 2020, for detecting anomalies in satellite telemetry. An analysis of the various methods in the literature for constructing the dictionary and parsimoniously encoding the data as linear combinations of the dictionary elements, was carried out for the intended application. The advantages and disadvantages of these methods for detecting RFIs in spectrogram images were also compared. Based



>> Présentation des travaux de Gastón De Boni Rovella et Léa Dubreil, doctorants de TéSA, au forum UTIAS² 2024.
Presentation of the work of Gastón De Boni Rovella and Léa Dubreil, PhD students at TéSA, at the UTIAS² 2024 forum.

avantages et inconvénients de ces méthodes pour la détection de RFI dans les images de spectrogramme a également été effectuée. A partir de cette analyse, nous avons déterminé les méthodes applicables pour la détection de RFI dans les images de spectrogramme : deux types de méthodes d'apprentissage basées sur des algorithmes de clustering (K-SVD - *K-Singular Value Decomposition*) et des algorithmes de relaxation convexe (ADMM - *Alternating Direction Method of Multipliers*) ainsi que deux types de méthodes de codage : les méthodes « *greedy* » (basées sur l'algorithme OMP - *Orthogonal Matching Pursuit*) et les méthodes de relaxation convexe (Douglas-Rachford). Ces différentes méthodes ont été testées et deux métriques de détection ont été définies et évaluées sur des éléments d'un spectrogramme traités comme des images. Une méthode pour en tirer une information sur chaque pixel (c'est-à-dire, case temps-fréquence) a également été proposée. Les performances ont été évaluées sur des spectrogrammes réels fournis par le CNES et comparées à la méthode classiquement utilisée, démontrant le potentiel des méthodes à base de décomposition dans un dictionnaire pour ce type d'application. Il serait sans aucun doute intéressant de poursuivre cette étude en s'intéressant aux méthodes d'apprentissage de dictionnaire et de codage parcimonieux dites convolutionnelles (*Convolutional Dictionary Learning*) pour obtenir une invariance par des opérations géométriques simples, ce qui conduirait à simplifier les dictionnaires pour ce type d'images. La suite dans le prochain rapport d'activité ?

on this analysis, we determined the methods that can be used to detect RFI in spectrogram images: two types of learning methods based on clustering algorithms (K-SVD - K-Singular Value Decomposition) and convex relaxation algorithms (ADMM - Alternating Direction Method of Multipliers), as well as two types of coding methods: 'greedy' methods (based on the OMP - Orthogonal Matching Pursuit) and convex relaxation methods (Douglas-Rachford). These different methods were tested and two detection metrics were defined and evaluated on spectrogram elements treated as images. A method for extracting information about each pixel (i.e. a time-frequency bin) was also proposed. Performance was evaluated on real spectrograms supplied by CNES and compared with the conventional method, demonstrating the potential of dictionary decomposition methods for this type of application. It would undoubtedly be worthwhile to continue this study by looking at the parsimonious coding method known as 'Convolutional' Dictionary Learning to obtain invariance by simple geometric operations, which would lead to simpler dictionaries for this type of image. To be followed up in the next Activity Report?

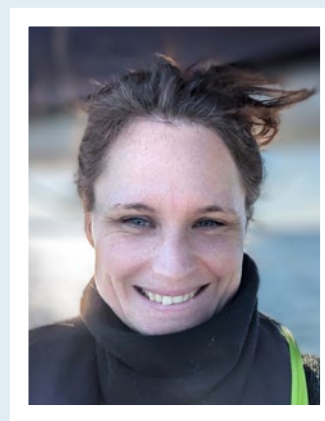
Barbara Pilastre

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

Diplômée en 2020, Barbara a mené à TêSA une thèse sur la surveillance de la télémétrie satellite en exploitation à l'aide de méthode d'apprentissage automatique. Elle a ensuite rejoint la Direction Général de l'Armement (DGA) et plus récemment l'Agence Ministérielle de l'Intelligence Artificielle de Défense (AMIAD) en tant qu'ingénieur en intelligence artificielle. Une partie de son temps étant dédié à la recherche, elle a récemment intégré l'équipe MALT de l'INRIA de Rennes.

WHERE ARE THEY NOW?

Barbara undertook a PhD thesis at TêSA laboratory on the monitoring of satellite telemetry using machine learning methods that was defended in 2020. She then joined the French Defence Procurement Agency (DGA) and, more recently, the Ministry of Defence's Artificial Intelligence Agency (AMIAD) as an artificial intelligence engineer. Since part of her time is dedicated to research, she recently joined the MALT team at INRIA in Rennes.





5. INTERNET DES OBJETS

Les axes de recherche présentés jusqu'ici sont issus de l'ADN de TéSA : le traitement du signal et des images. Mais TéSA c'est aussi une forte orientation vers les systèmes de télécommunications, allant des couches basses aux plus hautes couches. Dans les verrous amenés par les systèmes de télécommunication d'aujourd'hui, l'Internet des Objets (IoT - *Internet of Things*) est de plus en plus présent dans le spatial et TéSA a été sollicité pour contribuer à lever des verrous.

Tout d'abord, TéSA a été contacté par la société SYNTONY : elle fabrique un « *tracker* » d'objets pour l'internet des objets qui permet de calculer la position de son porteur et de la mettre à disposition sur le réseau. Dans le cadre d'une étude R&T CNES, SYNTONY souhaite modifier son *tracker* pour le faire fonctionner dans l'espace et en équiper des satellites, afin de pouvoir connaître leur position tout au long de leur vie et spécialement en fin de vie, pour la gestion des déchets spatiaux. SYNTONY a demandé à TéSA de déterminer le moyen le plus adapté pour établir un lien de télécommunications entre ce *tracker* de positionnement porté par un satellite et un réseau sol [E.4]. TéSA a ainsi pu évaluer les différents moyens envisageables en fonction de critères techniques et réglementaires, et proposer le plan de développement du moyen de communication.

TéSA a aussi été impliqué dans un plus long projet, le projet ELLIOT [E.14], piloté par l'Institut de Recherche Technologique « Aéronautique, Espace et Systèmes Embarqués » de Toulouse (IRT Saint-Exupéry) et validé par l'ANRT. Ce projet vise à lever les verrous technologiques qui permettent un service d'IoT à large couverture géographique à partir de satellites bas-coût (nanosatellites). Le premier objectif du projet ELLIOT était d'étudier les modifications envisageables des technologies existantes de télécommunication IoT, notamment LoRa (*Long-Range*) et NB-IoT (*Narrow-Band IoT*) ou de proposer une alternative qui permettraient de tenir les objectifs fixés de coût et de qualité de service. Ainsi, les verrous technologiques liés à ces technologies préexistantes ont été listés et il restait à trouver des solutions qui devaient notamment passer par des modifications des protocoles. Cependant, la nature de certaines des limitations repérées dans LoRa et NB-IoT pouvant laisser craindre une trop grande complexité de leurs solutions ou des altérations trop importantes des technologies de base a amené les intervenants à privilégier l'objectif de proposer une alternative à ces technologies.



5. INTERNET OF THINGS

The areas of research presented so far are part of TéSA's DNA: signal and image processing. But TéSA is also heavily involved in research on telecommunications systems, from the lowest to the highest layers. The Internet of Things (IoT) is increasingly present in the Space sector, and TéSA has been asked to help remove some of the barriers posed by today's telecommunications systems.

First of all, TéSA was contacted by SYNTONY, a company that manufactures an object tracker for the Internet of Things, which calculates the position of its carrier and makes it available on the network. As part of a CNES R&T study, SYNTONY wants to modify its tracker so that it can operate in Space and be installed on satellites, to track their position throughout their life and especially at the end, for Space waste management. SYNTONY asked TéSA to determine the most suitable way of establishing a telecommunications link between this satellite-borne positioning tracker and a ground network [E.4]. TéSA was able to assess the various possible methods based on technical and regulatory criteria, and to propose a development plan for the communication device.

TéSA has also been involved in a longer project, the ELLIOT project [E.14], led by the Toulouse-based IRT Saint Exupéry (Institut de Recherche Technologique «Aéronautique, Espace et Systèmes Embarqués») and validated by the ANRT. The aim of this project is to remove the technological barriers and thus enable an IoT service with wide geographical coverage to be provided from low-cost satellites (nanosatellites). The first objective of the ELLIOT project was to study possible modifications to existing IoT telecommunication technologies, in particular LoRa (Long-Range) and NB-IoT (Narrow-Band IoT), or to propose an alternative that would meet the cost and quality-of-service targets set. The technological hurdles associated with these pre-existing technologies were listed, and solutions still had to be found, which would likely involve changing the protocols. However, since the nature of some of the limitations identified in LoRa and NB-IoT could lead to fears that their solutions would be too complex or that the basic technologies would be altered too significantly, the researchers decided to focus rather on offering an alternative to these technologies.

TéSA a développé un nouveau protocole, baptisé « Ping-Pong », construit au-dessus de la couche physique de NB-IoT afin de permettre la réutilisation des terminaux existants. Ce nouveau protocole réutilise certains principes efficaces présents dans NB-IoT tout en les simplifiant au maximum (premier accès aléatoire puis allocation des ressources pour les échanges de données, authentification...) et propose des mécanismes nouveaux comme le réveil programmé des terminaux basé sur la prédictibilité des passages de satellites. L'innovation principale consiste à minimiser l'empreinte environnementale de ce nouveau service et à réutiliser au mieux les technologies existantes développées pour les réseaux sol, tout en proposant de nouvelles solutions si cela s'avère nécessaire. Un simulateur réaliste du système a été développé afin d'évaluer ce nouveau protocole. Celui-ci prend en compte le système global depuis les satellites avec leur orbite et les terminaux et descend jusqu'au niveau physique puisque le signal réel ainsi que les effets des canaux sont simulés. Les bons résultats obtenus ont conduit au dépôt de deux demandes de brevet [B.1], [B.2].

TéSA has developed a new protocol, called 'Ping-Pong', built on top of the NB-IoT physical layer to enable existing terminals to be reused. This new protocol reuses some of the effective principles of NB-IoT, while simplifying them as much as possible (first random access, then allocation of resources for data exchanges, authentication, etc.) and proposes new mechanisms such as the programmed wake-up of terminals based on the predictability of satellite passes. The main innovation is to minimise the environmental footprint of this new service and make the best possible use of existing technologies developed for ground networks, while proposing new solutions if this were to prove necessary. A realistic system simulator was developed to evaluate the new protocol. It takes account of the overall system, from the satellites with their orbits and terminals, right down to the physical level, since the real signal and the effects of the channels are simulated. Good results were obtained, which led to the filing of two patent applications [B.1], [B.2].



>> Le rayonnement de TéSA : à gauche, Hamish Mc Phee, doctorant TéSA gagne le prix du meilleur poster à la conférence EFTF 2024 et à droite, Marta Bottani (tout à droite) et Jihanne El Haouari, doctorantes TéSA ont gagné respectivement le 1er et 3e prix du meilleur papier étudiant à la conférence IEEE IGARSS 2024.

TéSA's outreach: on the left, Hamish Mc Phee, TéSA PhD student, won the Best Poster Award at the EFTF 2024 conference; on the right, Marta Bottani (far right) and Jihanne El Haouari, TéSA PhD students, won the 1st and 3rd Student Paper Awards respectively at the IEEE IGARSS 2024 conference.



6. ESSAIMS DE NANOSATELLITES

Si l'Internet des objets est devenu une application d'ampleur pour les systèmes de télécommunications, les nanosatellites en sont le support émergeant ces quinze dernières années pour l'introduction de nouveaux concepts. L'étude et le développement des nanoconstellations, ou essais de nanosatellites, représentent une avancée majeure dans la technologie spatiale et suscitent un vif intérêt tant industriel qu'académique. Ces nanoconstellations offrent de nombreux avantages : amélioration des capacités de communication, missions d'observation ou de mesures à moindre coût, et allocation plus efficace des ressources. Équipés de capteurs avancés, ces satellites miniatures peuvent collaborer pour fournir des données en temps réel ou des images haute résolution, tout en réduisant significativement les coûts et la complexité des systèmes satellitaires traditionnels.

Leur fonctionnement en essais permet également une redondance accrue et une meilleure résilience, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications telles que la réponse aux catastrophes, la surveillance climatique ou encore la connectivité pour l'Internet des objets. Alors que la demande mondiale en connectivité et en prise de décision fondée sur les données ne cesse de croître, la recherche sur les nanoconstellations ouvre la voie à des avancées transformatrices dans de nombreux domaines... et contribue, osons le dire, à un monde plus connecté et mieux informé.

Le précédent rapport d'activité avait déjà mis en lumière cette thématique de TéSA sur laquelle nous travaillons depuis quelques années. Tout a démarré avec le projet NOIRE (Nanosatellites pour un Observatoire Interférométrique Radio dans l'Espace), porté par le CNES. Ce projet vise à concevoir un instrument d'observation des signaux radioélectriques basses fréquences de l'univers à l'aide d'un essaim de nanosatellites placés en orbite lunaire, destiné à fonctionner comme un télescope spatial distribué. Cette configuration permet d'atteindre les dimensions requises pour obtenir une résolution suffisante, tout en bénéficiant de la protection offerte par la face cachée de la Lune contre les émissions radioélectriques terrestres. Pour assurer le bon fonctionnement de l'instrument, l'essaim de satellites doit être équipé d'un système de positionnement et de synchronisation relatif, à la fois autonome et hautement performant. En effet, la mission scientifique impose une précision de positionnement au centimètre près et une synchronisation à l'échelle



6. NANOSATELLITE SWARMS

While the Internet of Things has become a major application for telecommunications systems, nanosatellites have become increasingly important over the last fifteen years, for introducing new concepts. The study and development of nano constellations, or swarms of nanosatellites, represent a major advance in Space technology and are attracting keen interest from both industry and academia. These nano constellations offer a number of advantages: improved communication capabilities, lower-cost observation or measurement missions, and more efficient allocation of resources. Equipped with advanced sensors, these miniature satellites can work together to provide real-time data or high-resolution images, while significantly reducing the cost and complexity of traditional satellite systems.

Their swarm operation also provides greater redundancy and resilience, making them particularly well-suited to applications such as disaster response, climate monitoring and connectivity for the Internet of Things. As the global demand for connectivity and data-driven decision-making continues to grow, nano constellation research is paving the way for disruptive breakthroughs in many areas – and, dare we say it, contributing to a more connected and better-informed world.

The previous Activity Report already highlighted this TéSA theme, on which we have been working for a number of years. It all started with the NOIRE project (Nanosatellites for a Radio Interferometric Observatory in Space), supported by CNES. The aim of the project is to design an instrument for observing low-frequency radio signals from the universe using a swarm of nanosatellites placed in lunar orbit, designed to operate as a distributed Space telescope. This configuration makes it possible to achieve the dimensions required to obtain sufficient resolution, while benefiting from the protection offered by the far side of the Moon against terrestrial radio emissions. To ensure that the instrument works properly, the satellite swarm must be equipped with a relative positioning and synchronisation system that is both autonomous and highly efficient. The scientific mission requires positioning accuracy to the nearest centimetre and synchronisation on a nanosecond scale. The proposed solution based on an ISL (Inter-Satellite Link) fulfils a dual role: it conveys scientific data and enables pseudo-range measurements to be taken for positioning and synchronisation purposes. However, around the Moon, there is no longer any GNSS information available, so we have to come up with a new telecommunications

de la nanoseconde. La solution envisagée repose sur une liaison inter-satellites (ISL - *Inter-Satellite Link*) qui remplit un double rôle : acheminer les données scientifiques et permettre des mesures de pseudodistance destinées au positionnement et à la synchronisation. Or, autour de la Lune, il n'y a plus d'information GNSS accessible et il faut donc proposer un nouveau système de télécommunication. Remarquons que les verrous posés par le projet NOIRE se retrouvent aussi dans le cas d'utilisation d'un essaim de nanosatellites autour de la Terre qui serait confronté à une perte de l'information GNSS, qu'elle soit intentionnelle ou accidentelle.

Durant la période 2023-2024, deux thèses se sont soutenues autour de ce sujet, une autre a démarré, ainsi que plusieurs études R&T CNES.

Dans ce cadre, la thèse de doctorat d'Evelyne Akopyan soutenue en 2024 [T.5] a eu pour objectif de proposer des solutions assurant la fiabilité de la transmission d'informations au sein d'un réseau de télécommunication constitué par un essaim de nanosatellites, même en cas de défaillance de certains d'entre eux. En effet, pour garantir le bon fonctionnement du télescope distribué du projet NOIRE, il est indispensable que les nanosatellites puissent échanger des informations de manière fiable, même en cas de perte de certains nœuds du réseau. La résilience devient donc un élément central de l'architecture de communication. À cette fin, une solution élégante et efficace a été proposée [C.8], [C.9], [C.28].

Forte de cette réussite, une étude R&T CNES a été lancée fin 2024 pour explorer la mise en application concrète d'une partie de ces résultats, notamment le déploiement d'un protocole de communication et de routage adapté aux nano-constellations. Cette étude [E.18] associe l'équipe encadrante de la thèse et la société VIVERIS, qui travaillent ensemble à définir des solutions protocolaires en vue de concrétiser la mission lunaire évoquée. Les premiers résultats sont attendus au cours de l'année 2025.



system. It should be noted that the barriers raised by the NOIRE project also apply to the use of a swarm of nanosatellites around the Earth, if it were faced with a loss of GNSS information, whether intentional or accidental.

During the 2023-2024 period, two theses were defended on this subject, and another was started, as well as several CNES R&T studies.

In this context, the aim of Evelyne Akopyan's doctoral thesis, defended in 2024 [T.5], was to propose solutions to ensure the reliability of information transmission within a telecommunications network made up of a swarm of nanosatellites, even if some of them failed. To ensure that the NOIRE project's distributed telescope works properly, it is essential that the nanosatellites be able to exchange information reliably, even if some of the network nodes are lost. Resilience therefore becomes a central element of communications architecture. To this end, an elegant and efficient solution has been proposed [C.8], [C.9], [C.28].

Building on this success, a CNES R&T study was launched at the end of 2024 to explore the practical application of some of these results, in particular the deployment of a communication and routing protocol adapted to nano constellations. This study [E.18] involves the thesis supervising team and VIVERIS, who are working together to define protocol solutions with a view to making the lunar mission a reality. The first results are expected in 2025.

Hamish McPhee's thesis [T.6] focuses on the development of an autonomous time scale, robust to clock errors, designed for satellite swarms. It introduces a new time synchronisation algorithm called ATST (Autonomous Time Scale using the Student's T-distribution), which has been validated using simulated data [J.19]. Originally designed for nanosatellite constellations, the ATST algorithm takes into account various types of anomalies such as phase jumps, frequency jumps, excessive measurement noise and data loss. By exploiting a Student distribution, the ATST algorithm reduces the influence of outliers without requiring explicit anomaly detection, while achieving performance comparable to that of an ideal algorithm capable of perfectly identifying these errors.

In addition, the thesis presents an LS (Least Squares) estimator [C.31], which improves measurement quality by reducing noise and replacing missing values. It also involves an in-depth analysis of the estimation of the parameters of heavy-tailed distributions, in particular for Student's t-distribution and a mixture of Gaussian distributions. This work contributes to a more ro-

La thèse de Hamish McPhee [T.6] porte sur le développement d'une échelle de temps autonome et robuste aux erreurs d'horloge, conçue pour les essais de satellites. Elle introduit un nouvel algorithme de synchronisation temporelle baptisé ATST (*Autonomous Time Scale using the Student's T-distribution*), qui a été validé à partir de données simulées [J.19]. Conçu à l'origine pour des constellations de nanosatellites, l'algorithme ATST prend en compte divers types d'anomalies tels que les sauts de phase, les sauts de fréquence, le bruit de mesure excessif ou encore les pertes de données. En exploitant une distribution de Student, l'algorithme ATST réduit l'influence des mesures aberrantes sans nécessiter de détection explicite des anomalies, tout en atteignant des performances comparables à celles d'un algorithme idéal capable d'identifier parfaitement ces erreurs.

En complément, la thèse présente un estimateur des moindres carrés (LS) [C.31], permettant d'améliorer la qualité des mesures en réduisant le bruit et en remplaçant les valeurs manquantes. Une analyse approfondie de l'estimation des paramètres de lois à queues lourdes, notamment pour la loi de Student et un mélange de lois gaussiennes, est également menée. Ces travaux contribuent à une estimation plus robuste des paramètres statistiques [C.1]. L'étude démontre, à l'aide des bornes de Cramér-Rao mal-spécifiée, que ces lois offrent une meilleure estimation de la moyenne en présence de valeurs aberrantes [C.47]. De plus, il est établi qu'au moins 25 horloges sont nécessaires pour obtenir une estimation proche de la borne mal-spécifiée, assurant ainsi l'efficacité asymptotique de l'estimateur.

Enfin, la thèse explore plusieurs perspectives d'amélioration, notamment l'intégration de méthodes d'apprentissage statistique pour affiner la pondération des résidus et l'élaboration de techniques avancées de traitement des anomalies transitoires qui représentent encore une limitation pour l'algorithme ATST. Si ce nouvel algorithme se distingue par sa robustesse naturelle face aux erreurs, il suppose des horloges homogènes, requiert un nombre encore important d'horloges, augmente la complexité computationnelle et ne permet pas de reconnaître le type d'anomalies affectant les horloges des nanosatellites. Des solutions pour remédier à ces limites seront explorées dans un post-doc, cofinancé par TESA et Thales Alenia Space en 2025 et 2026.

Fin 2022, une autre thèse a démarré, portant sur l'évaluation de la précision de l'estimation du temps de propagation dans le cadre de la localisation relative d'un essaim de nanosatellites.



bust estimation of statistical parameters [C.1]. The study demonstrates, with the help of misspecified Cramér-Rao bounds, that these distributions offer a better estimate of the mean in the presence of outliers [C.47]. In addition, it has been determined that at least 25 clocks are required to obtain an estimate close to the misspecified bound, thus ensuring the asymptotic efficiency of the estimator.

Finally, the thesis explores a number of possible improvements, including the integration of statistical learning methods to refine the weighting of residuals, and the development of advanced techniques for dealing with transient anomalies, which are still a limitation of the ATST algorithm. While this new algorithm is distinguished by its natural robustness against errors, it assumes homogeneous clocks, still requires a large number of clocks, increases computational complexity and does not recognise the type of anomalies that affect nanosatellite clocks. Solutions to overcome these limitations will be explored in a post-doctoral thesis, co-funded by TESA and Thales Alenia Space in 2025 and 2026.

At the end of 2022, another thesis was started on evaluating the accuracy of propagation time estimation in the context of the relative positioning of a swarm of nanosatellites. Estimating the time lag and Doppler shift is an essential step in ensuring that the satellites are synchronised and positioned accurately, which is fundamental to the smooth running of the scientific mission.

This work goes beyond conventional assumptions by incorporating an additional term in the carrier phase, which is usually neglected because of the introduction of an unknown phase during transmission. Assuming that this phase can be inferred and compensated for, a new estimator is developed and compared with the theoretical bounds obtained from the Cramér-Rao bound [J.16], [C.24], [C.40]. These results help to refine our understanding of the performance of time lag estimation applied to satellite navigation.

L'estimation du retard temporel et du Doppler est une étape essentielle pour assurer la synchronisation et le positionnement précis des satellites, éléments fondamentaux au bon fonctionnement de la mission scientifique.

Ce travail dépasse les hypothèses classiques en intégrant un terme additionnel dans la phase de la porteuse, généralement négligé en raison de l'introduction d'une phase inconnue lors de la transmission. En supposant que cette phase peut être inférée et compensée, un nouvel estimateur est développé et comparé aux limites théoriques obtenues à partir de la borne de Cramér-Rao [J.16], [C.24], [C.40]. Ces résultats permettent d'affiner la compréhension des performances de l'estimation du retard temporel appliquée à la navigation par satellites.

En complément, d'autres études ont analysé un scénario plus réaliste, où l'information de phase n'est pas parfaitement connue, mais résulte d'un système de calibration imparfait, constituant ainsi une observation supplémentaire du système [C.35]. L'impact de cette incertitude sur la précision de l'estimation a été évalué dans le contexte du positionnement et de la synchronisation des nanosatellites, afin de mieux cerner les limites pratiques des techniques d'estimation du retard temporel et d'améliorer leur robustesse pour garantir la performance du système de localisation de l'essaim.

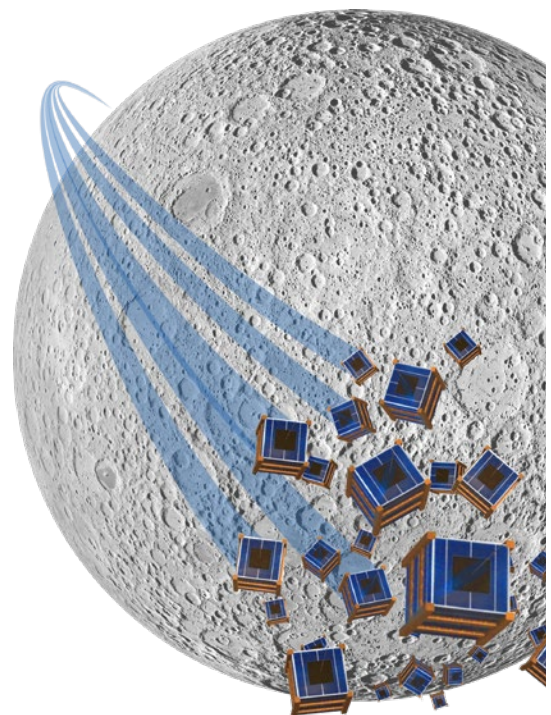
En parallèle à cette thèse qui se soutiendra fin 2025, une étude dédiée à l'estimation conjointe de la position et du biais d'horloge des satellites d'un essaim a été menée [E.8]. Ce travail s'inscrit dans le cadre du développement d'un système de localisation basé sur les mesures de pseudodistance inter-satellites et vise à établir les performances théoriques atteignables pour cette estimation.

Deux contributions majeures ont été apportées dans cette étude. Tout d'abord, une borne théorique sur l'erreur quadratique moyenne atteignable asymptotiquement par l'estimateur du maximum de vraisemblance (EMV) a été dérivée, permettant d'évaluer les limites de précision du système. Ensuite, une implémentation pratique de l'EMV a été développée pour estimer la position et le biais d'horloge, en tenant compte de scénarios où les mesures de pseudodistance sont soit entièrement disponibles, soit partiellement disponibles de manière aléatoire. Notons que ces résultats sont transposables aux signaux UWB (*Ultra-Wide Band*), et par conséquent à la localisation *Indoor*, voire à la gestion de la transition *Outdoor/Indoor*.

In addition, other studies have analysed a more realistic scenario, where the phase information is not perfectly known, but results from an imperfect calibration system, thus constituting an additional observation of the system [C.35]. The impact of this uncertainty on the accuracy of the estimate was assessed in the context of nanosatellite positioning and synchronisation, in order to better identify the practical limitations of time lag estimation techniques and improve their robustness to guarantee the performance of the swarm positioning system.

Concomitantly with this thesis, which will be defended at the end of 2025, a study dedicated to the joint estimation of the position and clock bias of satellites in a swarm has been carried out [E.8]. This work is part of the development of a positioning system based on inter-satellite pseudo-range measurements and aims to establish the achievable theoretical performances for this estimation.

Two major contributions were made in this study. Firstly, a theoretical bound on the mean squared error asymptotically achievable by the MLE (Maximum Likelihood Estimation) was derived, enabling the accuracy limits of the system to be assessed. Next, a practical implementation of MLE was developed to estimate position and clock bias, taking into account scenarios where pseudo-range measurements are either fully available or partially available at random. It should be noted that these results can be transposed to UWB (Ultra-Wide Band) signals, and consequently to indoor positioning, and even to management of the outdoor/indoor transition.



Les 20 ans de TéSA

DE LA 3G AUX CONSTELLATIONS : TéSA A GRANDI, MAIS GARDE LA MÊME ÉNERGIE

Vingt ans... et tant de chemin parcouru depuis 2004 !

À l'époque, la 3G faisait ses débuts, les téléphones n'avaient pas d'écran tactile et l'espace vivait encore au rythme des satellites géostationnaires et d'Ariane 4.

C'est dans ce contexte qu'est né TéSA, avec une idée simple mais ambitieuse : rassembler chercheurs, industriels et institutions pour innover ensemble en télécommunications spatiales. Les débuts n'ont pas été faciles, mais la volonté commune a tout rendu possible.

Le résultat ?

86 thèses soutenues, **300+** études R&D,
800+ publications internationales, **22** brevets

et d'innombrables cafés, croissants et chocolatines partagés.

En décembre 2024, nous avons fêté ces 20 ans. Une belle occasion de constater que la passion des télécoms spatiales traverse les générations et que TéSA a encore de beaux défis devant lui.

Bon vent pour les 20 prochaines années !

FROM 3G TO CONSTELLATIONS: TéSA HAS GROWN, BUT KEPT THE SAME ENERGY

Twenty years... and such a long road since 2004!

Back then, 3G was just beginning, phones had no touchscreens, and space was still paced by geostationary satellites and Ariane 4.

It was in that context that TéSA was born, with a simple yet ambitious idea: bringing together researchers, industry, and institutions to innovate together in space telecommunications. The early days weren't easy, but a shared determination made everything possible.

The result?

86 PhD theses defended, **300+** R&D studies,
800+ international publications, **22** patents

and countless coffees, croissants, and chocolatines shared.

In December 2024, we celebrated these 20 years. A wonderful opportunity to see that the passion for space telecommunications spans generations—and that TéSA still has exciting challenges ahead.

Here's to the next 20 years!

PARTIE 3

PART 3

Vie du laboratoire

Life in the laboratory

La vie du laboratoire TéSA est rythmée par les séminaires, les journées scientifiques, la venue de chercheurs invités, le tout animé par le Conseil Scientifique, renforçant ainsi les collaborations et le rayonnement de TéSA.

Chaque semaine, des discussions scientifiques sont menées autour de la présentation d'un doctorant de ses activités actuelles de recherche et des problèmes qu'il rencontre. Ces discussions se font au sein des « TeSA Topic Tuesday » qui ont permis de nombreuses collaborations entre doctorants, par exemple sur des sujets liés au transport optimal, aux représentations parcimonieuses, à l'estimation statistique...

La suite de cette section détaille tous ces temps forts de TéSA.



1. CHERCHEURS INVITÉS

En février 2019, le Conseil de l'Association TéSA a proposé au Conseil Scientifique de mettre à disposition un financement afin de promouvoir les collaborations nationales et internationales, au profit de l'ensemble des partenaires (académiques ou industriels) et des thèses en cours. Cette proposition a donné naissance à l'appel à chercheurs invités, lequel propose une aide financière à la visite de courte durée (2 à 4 semaines) de chercheurs et chercheuses.

Co-rédigé par les membres du Conseil Scientifique, cet appel définit des critères d'éligibilité. Tout d'abord, le chercheur invité industriel ou académique doit mener des activités de recherche couvrant un des domaines dans lesquels TéSA a déjà une activité reconnue ou, au contraire, permettant le développement de nouveaux domaines pour TéSA.

Les différentes contributions attendues de la part du chercheur invité sont de diverses natures : implication dans les travaux de certains doctorants, organisation d'au moins un séminaire et/ou

The life of the TéSA laboratory is punctuated by seminars, science day events and visits from guest researchers, all organised by the Scientific Committee, thereby strengthening TéSA's collaborative work and reputation.

Each week, scientific discussions are held around a presentation by a doctoral student on their current research activities and the problems they face. These discussions take place during «TeSA Topic Tuesdays», which have led to numerous collaborations between doctoral students, for example on subjects related to optimal transport, parsimonious representations, statistical estimation, etc.

The rest of this section details all of these TéSA events.



1. GUEST RESEARCHERS

In February 2019, the Board of Directors of the TéSA Association suggested that the Scientific Committee make funding available to promote national and international collaboration, for the benefit of all partners (academic or industrial) and ongoing theses. This proposal gave rise to the call for guest researchers, including financial support for short-term visits (of 2-4 weeks) by female and male researchers.

The call, drafted jointly by the members of the Scientific Committee, defined the eligibility criteria. First of all, the industrial or academic guest researcher must carry out research that covers one of the fields for which TéSA is already recognised or, alternatively, that enable the development of new fields for TéSA.

In addition, the visiting researcher is expected to make various kinds of contributions: involvement in the work of certain PhD students, organisation of at least one scientific seminar and/or scientific mini-course for the TéSA community, and also participation in PhD student day(s) and/or partner

mini-cours scientifique pour la communauté TéSA, journée(s) doctorants et/ou journée(s) partenaires pour un échange scientifique sur des thèmes d'intérêt pour la communauté TéSA. Chaque candidature doit être adressée au Conseil Scientifique qui statue sur la pertinence de la candidature.

Après la venue de Pau Closas de l'Université Northeastern de Boston (USA), en 2019 et celle de Steve McLaughlin, professeur de l'Université Heriot-Watt d'Édimbourg (Écosse) en 2022, TéSA a accueilli trois nouveaux chercheurs en 2023 et 2024.

Tout d'abord, Stefano Fortunati qui était alors enseignant-chercheur à l'IPSA Paris, affilié au laboratoire CNRS du L2S de Paris Saclay est venu de mi-juin à mi-juillet 2023 à TéSA. Ses activités de recherche couvrent différents domaines des statistiques appliquées et du traitement du signal, avec un accent particulier sur la théorie de l'estimation et de la détection, les limites de performance, la théorie des erreurs de spécification, les statistiques robustes et semi-paramétriques et la théorie de l'apprentissage statistique, thématiques qui résonnent fortement dans le laboratoire TéSA. Durant son passage à TéSA, il a collaboré avec plusieurs enseignants-chercheurs et doctorants et a donné un séminaire (voir section suivante). Ces collaborations se sont concrétisées en donnant lieu à plusieurs publications [J.21], [C.27], [C.37].

day(s) for scientific discussions on themes of interest to the TéSA community. All applications must be submitted to the Scientific Committee, which will decide whether they are suitable.

Following the stay of Pau Closas from Northeastern University in Boston (USA) in 2019 and Professor Steve McLaughlin from Heriot-Watt University in Edinburgh (Scotland) in 2022, TéSA welcomed three new researchers in 2023 and 2024.

Firstly, Stefano Fortunati, who was then a teacher-researcher at IPSA Paris, affiliated to the CNRS L2S laboratory at Paris Saclay, came to TéSA from mid-June to mid-July 2023. His research activities cover various areas of applied statistics and signal processing, with a particular focus on the theory of estimation and detection, performance limits, the theory of specification errors, robust and semi-parametric statistics and the theory of statistical learning, themes of immediate interest to the TéSA laboratory. During his time at TéSA, he worked with several lecturer-researchers and doctoral students and gave a seminar (see next section). This collaboration led to several publications [J.21], [C.27], [C.37].



» L'équipe TéSA à la conférence EUSIPCO 2024 à Lyon.
The TéSA team at the EUSIPCO 2024 conference in Lyon.

En 2024, nous avons d'abord invité Daniel Medina, chercheur au DLR (Allemagne) qui est venu de mi-juin à mi-juillet à TéSA. Ses thématiques de recherche sont directement liées à celles de plusieurs enseignants-chercheurs et doctorants de TéSA : positionnement intègre, estimation et filtrage robustes, fusion de capteurs, traitement d'antennes, pour n'en citer que quelques-unes. Il a donné deux séminaires (voir section suivante) et a travaillé avec plusieurs doctorants et chercheurs de TéSA, ce qui a donné lieu à plusieurs publications [J.17], [C.17]. Cette collaboration se poursuit puisqu'en 2025, il accueillera un des doctorants pour un séjour d'un mois dans son laboratoire !

Enfin, en novembre 2024, Petar Djurić, professeur à l'Université de Stony Brook aux USA, est venu partager son expertise et son enthousiasme durant un mois à TéSA. Fellow des sociétés IEEE et EURASIP, il a une connaissance très vaste du traitement du signal et des images. À ce titre, il a pu interagir avec la grande majorité des doctorants travaillant dans ces domaines. Il a donné deux séminaires autour des processus gaussiens qui ont initié plusieurs idées aux doctorants et les collaborations se poursuivent encore aujourd'hui !



2. LES SÉMINAIRES TéSA

Les séminaires TéSA sont un outil de dialogue scientifique et de partage. Organisés par les représentant(e)s des doctorants au conseil scientifique, ils réunissent régulièrement la communauté TéSA pendant quelques heures. Souvent deux présentations portant sur des domaines de recherche différents se succèdent et engendrent de nombreuses questions de l'auditoire. Ainsi, ces séminaires sont des tutoriels pluridisciplinaires dont l'objectif premier est de mettre en lumière les activités de recherche de nos doctorants et doctorantes. Cependant, ils peuvent également être l'occasion pour des membres plus « expérimentés » de TéSA, ou pour des invités de passage, de présenter leurs activités de recherche. En 2023 et 2024, TéSA a eu l'occasion d'accueillir beaucoup de chercheurs invités, ce qui a engendré un nombre important de séminaires : onze séminaires ont été organisés !

In 2024, we first invited Daniel Medina, a researcher at DLR (Germany), who came to TéSA from mid-June to mid-July. His research themes are directly related to those of several TéSA lecturer-researchers and doctoral students: integrated positioning, robust estimation and filtering, sensor-data fusion, antenna processing, to name but a few. He has given two seminars (see next section) and worked with several TéSA doctoral students and researchers, which led to several publications [J.17], [C.17]. This collaboration is continuing, and in 2025 he will be hosting one of the doctoral students for a month's stay in his laboratory!

Finally, in November 2024, Petar Djurić, professor at Stony Brook University in the USA, came to TéSA for a month to share his expertise and enthusiasm. A Fellow of the IEEE and EURASIP societies, he has extensive knowledge of signal and image processing. As such, he was able to interact with the vast majority of doctoral students working in these fields. He gave two seminars on Gaussian processes, which sparked off a number of ideas for doctoral students, and the collaboration continues to this day!



2. TéSA SEMINARS

TéSA seminars are a forum for scientific dialogue and sharing. Organised by the PhD students' representatives on the Scientific Committee, they bring the TéSA community together for sessions lasting a few hours. Often, two presentations on different areas of research are given, one after the other, leading to a large number of questions from the audience. The seminars are thus multidisciplinary tutorials whose primary objective is to highlight the research activities of our PhD students. However, they can also be an opportunity for more "experienced" members of TéSA, or for visiting guests, to present their research activities. In 2023 and 2024, TéSA had the opportunity to welcome many guest researchers, which resulted in a large number of seminars being organised, eleven in all!

TéSA SEMINAR

May 2023



Abderrahim Halimi

Statistical-based Robust and Scalable Computational Methods For Extreme 3D Lidar Imaging.

Abderrahim Halimi, professor at Heriot Watt University, Edinburgh, Scotland, came to spend a few days at TéSA and he took the opportunity to present his work to us.

TéSA SEMINAR

June 2023



Sinan Yildirim

Hidden Markov Models and Bayesian Inference.

Sinan Yildirim, professor at Sabanci University in Turkey, invited professor at UPS Toulouse, came in TéSA to discuss with some PhD students and present a seminar.

TéSA SEMINAR

June 2023



Stefano Fortunati

Massive MIMO Radar for Target Detection.

Stefano Fortunati, IPSA professor and researcher at L2S in Paris Saclay, was invited for one month at TéSA by the Scientific Committee.

TéSA SEMINAR

November 2023



Jean-Christophe Deneuville

Introduction to post-quantum cryptography.



Jérôme Lacan

Introduction to blockchains and their applications.

The TéSA Scientific Committee reached out to J.-C. Deneuville, prof. at ENAC, and J. Lacan, prof. at ISAE-SUPAERO, to introduce the TéSA community to post-quantum processing.

TéSA SEMINAR

February 2024



Alexandre Gondran

Quantum computing: Holy Graal of optimization or mirage of power?

Alexandre Gondran, professor at ENAC, continued TéSA's training on post-quantum processing.

TéSA SEMINAR

April 2024



Sarah El Bouch

Hybrid and Modified Lower bounds for Discrete-time Markovian Dynamic systems.

Sarah El Boulch, post-doctoral researcher at ISAE-SUPAERO came to share with us the results of her work.

TéSA SEMINAR

July 2024



Daniel Medina

High-Precision Satellite-based Navigation.

Robust Multi Sensor Fusion for State Estimation.

Daniel Medina, researcher at DLR (Germany) was invited to spend a month at TéSA and gave two talks.

TéSA SEMINAR

November 2024



Kareth León-López

Graph Laplacian-based Regularization Approach for Detecting Abnormal Ship Behavior on Trajectories.

Kareth León-López presented her post-doctoral work in the PIRANIA-MMV project, an ANR ASTRID project conducted at TéSA in collaboration with Toulouse INP and NEXEYA HENSOLDT.

TéSA SEMINAR

November 2024



Petar M. Djurić

Bayesian optimization of time-varying functions.

Explainable learning with Gaussian processes.

As part of his “visiting researchers” programme, Petar M. Djurić, professor at Stony Brook University, USA, came to TéSA for a month and gave two talks.





3. LES TTT

Que sont les TTT ? Ce sont les doctorants de TéSA qui ont eu cette brillante idée ! Les « TéSA Topic Tuesday » (ou « TéSA Topic Thursday », selon les années) ont été lancés à l'initiative d'Evelyne Akopyan, alors représentante des doctorants. Son objectif ? Créer des séminaires internes informels où chacun puisse présenter son sujet de thèse et partager ses préoccupations du moment.

Pour optimiser la participation, on a choisi de les organiser entre midi et deux... et pour motiver les troupes, TéSA offre le repas aux participants ! Ces rendez-vous sont bien plus qu'un simple tour de table : ils permettent à tous de découvrir les recherches des autres, de provoquer des collaborations inattendues (notamment quand deux doctorants réalisent qu'ils butent sur le même problème !), et ont même permis de faire émerger des idées de R&T à proposer aux partenaires industriels.

Au fil du temps, ces TTT ont pris une ampleur inespérée : toujours conviviaux, certes, mais aussi très structurés, avec des présentations pédagogiques soignées. Un grand bravo à toutes et tous pour faire vivre ces échanges si enrichissants !



3. THE TTTs

What are TTTs? TéSA doctoral students came up with this brilliant idea! The "TéSA Topic Tuesday" (or "TéSA Topic Thursday", depending on the year) was launched on the initiative of Evelyne Akopyan, the doctoral students' representative at the time. The aim was to create informal internal seminars where everyone could present their thesis topic and share their current concerns.

To maximise participation, we decided to organise them between noon and 2 p.m. and to motivate the troops, TéSA pays for the participants' lunch! These meetings are much more than a simple round table discussion: they allow the participants to find out about each other's research, they stimulate unexpected collaboration (particularly when two doctoral students realise they've come up against the same problem!), and have even helped to generate R&T ideas to propose to industrial partners.

Over time, these TTTs have taken on an unexpected breadth: always informal, of course, but also highly structured, with carefully thought-out educational presentations. Well done to all those who have contributed to these enriching discussions!



» Les présidents du Conseil scientifique de TéSA en 2023, Riadh Dhaou (à gauche) et Antoine Blais (au centre) et en 2024, Riadh Dhaou poursuit avec Laurent Ferro-Famil (à droite).

The presidents of the TéSA Scientific Committee in 2023, Riadh Dhaou (left) and Antoine Blais (center), and in 2024, Riadh Dhaou continues with Laurent Ferro-Famil (right).



4. LES JOURNÉES SCIENTIFIQUES TESA

Depuis 2016, TESA organise chaque année une ou deux journées scientifiques appelées « JS TESA ».

En 2023, nous nous sommes retrouvés le 23 juin, à l'hôtel Initial, dans la banlieue toulousaine pour une journée bien remplie. La matinée a été l'occasion de présenter à la quarantaine de participants des sujets en étroit lien avec les préoccupations de TESA :

- Clément Dudal, chef du service Transmissions, Collecte de données, Radio Logicielle et Propagation au CNES et aussi membre du Conseil Scientifique de TESA, nous a parlé des menaces potentielles liées à l'environnement des satellites et en conséquence, des besoins de développements R&D relatifs à ces problèmes,
- Nicolas Chuberre, Responsable de la thématique 6G-NTN chez TAS, a présenté les enjeux et les questions posés par la 5G non terrestre (NTN - *Non Terrestrial Network*), avec une ouverture vers la 6G et les verrous qui devront être levés,
- Elias Bitar, Expert Avionique Technologie Avancées chez Collins Aerospace, nous a fait un tour d'horizon des exigences auxquelles il faudra répondre pour construire l'avion de demain, dégagant de nombreux axes de recherche en particulier liés aux télécommunications et traitement du signal et des images.

Tous les participants ont grandement apprécié ces trois présentations de qualité faites par nos trois membres partenaires, chacune révélant des problématiques qui ont servi d'initialisation à la désormais rituelle séance de brainstorming de l'après-midi.

En 2024, nous nous sommes réunis les 6 et 7 juin à Saint-Lary-Soulan, dans les Hautes-Pyrénées, comme nous le faisons depuis 2016, tous les deux ans. Les journées scientifiques de TESA sont l'occasion de s'ouvrir à la richesse des sujets de recherche traités par les doctorants de TESA et aux enjeux du domaine spatial, mais elles sont

>> Remise des prix aux JS 2024.
JS 2024 Awards Ceremony.



4. TESA SCIENCE DAYS

Since 2016, TESA has organised one or two science days each year, known as "JS TESA" (Journées Scientifiques).

In 2023, we met again on 23 June at the Initial hotel in the suburbs of Toulouse, for a busy day. The morning was an opportunity to present to the forty or so participants topics closely related to TESA's concerns:

- *Clément Dudal, Head of the Transmissions, Data Collection, Software Radio and Propagation Department at CNES and also a member of the TESA Scientific Committee, spoke to us about the potential threats posed by the satellite environment and, consequently, the R&D development needs relating to these problems;*
- *Nicolas Chuberre, 6G NTN (Non-Terrestrial Network) Technical Manager at TAS, presented the issues and questions raised by 5G NTN, with an introduction to 6G and the obstacles that will have to be overcome;*
- *Elias Bitar, Technical Fellow in Advanced Technology at Collins Aerospace, gave us an overview of the requirements that will have to be met to build the aircraft of tomorrow, highlighting a number of areas of research, particularly in telecommunications and signal and image processing.*

All the participants greatly appreciated the three high-quality presentations given by our three partner members, each raising issues that served as the starting point for the now ritual brainstorming session in the afternoon.



surtout un temps précieux pour faire émerger de nouvelles idées et préparer le futur. Ces JS 2024 n'ont pas manqué leur objectif : les deux journées ont été entrecoupées

- de présentations faites par Emmanuel Lourme du CNES sur l'observatoire des signaux GNSS de nouvelle génération et par Gwendoline Blanchet, chef de service Qualité Image au CNES, sur le traitement des images satellitaires et les verrous liés à ce traitement,
- de sessions « ma thèse au TéSA en 3 minutes » et des présentations poster associées,
- et d'un « TéSAthon » : *brainstorming* par équipe pour réfléchir à de nouveaux sujets de thèses de doctorat,

le tout dans une ambiance conviviale, propice aux échanges et à l'envie de poursuivre les discussions...

Ces rendez-vous désormais traditionnels des JS réunissent la communauté TéSA : les ingénieurs de recherche, les doctorants, les post-docs, les enseignants-chercheurs ainsi que les ingénieurs CNES, TAS et Collins Aerospace. Ils sont l'occasion de partager ensemble un moment, de présenter et de discuter des travaux de recherche actuels du TéSA et aussi de réfléchir aux verrous à adresser dans les mois ou les années à venir.

In 2024, we met on 6 and 7 June in St Lary, in the Hautes Pyrénées, as we have done every two years since 2016. TéSA's Science Days are an opportunity to explore the wealth of research topics covered by TéSA's doctoral students and the challenges facing the Space industry. Above all, they are a valuable opportunity to generate new ideas and prepare for the future. These 2024 JSs achieved their goal: the two days were interspersed

- *with presentations by Emmanuel Lourme from CNES on the new-generation GNSS signals observatory and by Gwendoline Blanchet, head of the Image Quality department at CNES, on satellite image processing and the challenges involved,*
- *with sessions entitled "my thesis at TéSA in 3 minutes" and associated poster presentations,*
- *and a "TéSAthon": team brainstorming to come up with new topics for doctoral theses,*

all in a convivial atmosphere, conducive to exchanges and the desire to pursue discussions.

These now traditional JS events bring together the TéSA community: research engineers, doctoral students, post-docs, lecturer-researchers as well as CNES, TAS and Collins Aerospace engineers. They are an opportunity to share a moment together, to present and discuss TéSA's current research work and also to reflect on the challenges to be addressed in the months or years to come.

Anne-Marie Tobie

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

Après avoir soutenu sa thèse de doctorat en 2021 sur le thème du positionnement urbain hybride 5G-GNSS, Anne-Marie a intégré le service signal et dissémination du domaine navigation France de Thales Alenia Space. Elle y mène des activités de R&D sur des sujets de positionnement multi capteurs hybridé précis et intègre pour différents utilisateurs finaux, comme les drones, voitures autonomes, trains, etc.

WHERE ARE THEY NOW?

After defending her PhD thesis in 2021 on urban positioning using hybrid 5G-GNSS solutions, Anne-Marie joined the French navigation-domain signals and dissemination at Thales Alenia Space. She is working on diverse R&D studies whose main focus is the provision of a precise navigation solution using hybridization with multi sensors for a whole set of users: UAV, autonomous cars, rail, etc.



5. RAYONNEMENT DE TéSA

Le rayonnement d'un laboratoire de recherche se mesure en premier lieu sur la qualité des articles publiés. Les activités de TéSA sont largement diffusées au travers des articles de conférences ou de journaux avec comité de lecture, énumérées dans ce rapport.

Au total sur les 2 années, 21 articles ont été publiés dans des journaux internationaux reconnus, 52 articles dans des conférences internationales et 2 demandes de brevet ont été déposées, preuves de l'activité et du niveau scientifique de TéSA.

Parmi les publications, certaines ont été distinguées par des prix : Hamish Mc Phee et Marta Bottani, deux doctorants TéSA, ont chacun gagné un « *best poster award* », le premier au European Frequency and Time Forum [C.29] et la deuxième à l'ESA-NRCC Dragon symposium [C.30]. De plus, la conférence internationale IEEE IGARSS 2024 a vu le sacre de TéSA : après avoir été sélectionnées parmi les 375 soumissions pour le « *best student paper award* », faisant ainsi partie des 10 finalistes, Marta Bottani et Jihanne El Haouari ont gagné respectivement le 1er et le 3ème prix [C.32], [C.34] ! Une autre fierté aussi à noter pour EUSIPCO 2024 : 12 articles signés TéSA ont été acceptés et présentés à la conférence, un beau résultat dépassant les taux d'acceptation habituels de cette conférence...

Les thèses sont aussi récompensées :

- Corentin Lubeigt, qui a soutenu en février 2023, sur du traitement du signal pour la réflectométrie GNSS, a reçu le prix de la fondation ISAE-SUPAERO : <https://www.youtube.com/watch?v=CNCKSicVGGE>.
- Comme chaque année, nos doctorants cofinancés par le CNES ont participé aux Journées Jeunes Chercheurs (JC2) du CNES : une occasion pour eux de présenter leur sujet de thèse et d'échanger autour de sujets d'intérêt du spatial. Ainsi, sur la centaine de présentations faites, TéSA a reçu un des 8 prix distribués chaque année pour les meilleures présentations : en 2023, c'est Hamish Mc Phee qui l'a remporté et en 2024, Jihanne El Haouari. Espérons que 2025 et 2026 continueront à voir TéSA briller aux yeux du CNES...

Une autre façon de rayonner est de participer activement à l'écosystème de la recherche. Ainsi, TéSA est très fier d'avoir sponsorisé les premières journées thématiques sur les réseaux non



5. TéSA OUTREACH

The influence of a research laboratory is measured first and foremost by the quality of the articles it publishes. TéSA activities are widely disseminated via the peer-reviewed journal articles or conference presentations listed in this Report.

In total over the two years, 21 articles were published in renowned international journals, 52 articles were presented at international conferences and 2 patents were filed, proof of the productivity and level of TéSA's scientific activities.

Some of our publications have won awards: Hamish McPhee and Marta Bottani, two TéSA doctoral students, each won a "best poster award", the first at the European Frequency and Time Forum [C.29] and the second at the ESA-NRCC Dragon symposium [C.30]. In addition, the IEEE IGARSS 2024 international conference was the crowning glory for TéSA: Marta Bottani and Jihanne El Haouari were selected from 375 submissions for the "best student paper award" and were among the 10 finalists, winning 1st and 3rd prize respectively [C32], [C34]! Another source of pride, for EUSIPCO 2024: 12 papers signed by TéSA were accepted and presented at the conference, a fine result that exceeded the usual acceptance rates for this conference.

Theses were also rewarded:

- Corentin Lubeigt, who defended his thesis in February 2023 on signal processing for GNSS reflectometry, was awarded the Fondation ISAE-SUPAERO prize: <https://www.youtube.com/watch?v=CNCKSicVGGE>.
- As every year, our PhD students cofunded by CNES took part in the CNES young researcher days or JC2 (Journées Jeunes Chercheurs): an opportunity for them to present their thesis topics and discuss Space issues of interest. Of the hundred or so presentations made, TéSA received one of the 8 prizes awarded each year for the best presentations: in 2023, Hamish McPhee won one and in 2024, Jihanne El Haouari. Let's hope that 2025 and 2026 will see TéSA impress CNES again.

Another way of enhancing our reputation is to play an active part in the research ecosystem. TéSA is very proud to have sponsored the first thematic days on NTN (Non-Terrestrial Networks), co-organised by the RSD (distributed networks and systems) and ISIS research groups (GdRs) in Toulouse

terrestres (NTN), co-organisées par les GdR RSD et ISIS en octobre 2023 à Toulouse. Ces journées, qui se sont tenues les 19 et 20 octobre à l'ENSEEIH, ont réuni 105 participants (dont 85 en présentiel) venus de nombreux horizons : agences spatiales (CNES, DLR), grands groupes industriels (Airbus, Thales, Ericsson, Safran...), laboratoires de recherche (IRIT, ONERA, INRIA, IRT Saint-Exupéry...), et établissements académiques (France, Allemagne, Espagne, Canada).

Avec 26 orateurs répartis sur cinq sessions scientifiques couvrant l'ensemble de la chaîne des communications NTN – des couches physiques à l'internet des objets par satellite – cet événement a été un véritable carrefour d'échanges entre chercheurs, doctorants et industriels. Le succès de cette première édition a suscité un fort engouement au sein de la communauté, conduisant naturellement à l'organisation d'une deuxième édition à Grenoble en 2024.

Nous sommes heureux d'annoncer que, forte de ce succès, la troisième édition des journées NTN se tiendra à nouveau à Toulouse, en octobre 2025, confirmant ainsi la place centrale de notre écosystème dans ce domaine en pleine expansion.

En tant que partenaire de longue date de la recherche dans le domaine spatial, TéSA se réjouit d'avoir contribué à faire émerger ce rendez-vous scientifique désormais incontournable, en phase avec ses axes historiques et ses ambitions futures.

in October 2023. The conference, held on 19 and 20 October at ENSEEIH, brought together 105 participants (85 of them in person) from a wide range of backgrounds: Space agencies (CNES, DLR), major industrial groups (Airbus, Thales, Ericsson, Safran, etc.), research laboratories (IRIT, ONERA, INRIA, IRT Saint Exupéry, etc.) and academic establishments (France, Germany, Spain, Canada).

With 26 speakers in five scientific sessions covering the entire NTN communications chain – from the physical layers to the Internet of Things via satellite – this event was a real crossroads for discussions between researchers, doctoral students and industry. The success of this first edition generated a great deal of enthusiasm within the community, which led naturally to the organisation of a second edition in Grenoble in 2024.

We are delighted to announce that, building on this success, the third edition of the NTN Days will be held, once again in Toulouse, in October 2025, confirming the central role of our ecosystem in this rapidly expanding field.

As a long-standing partner of Space research, TéSA is delighted to have contributed to the emergence of this now "not-to-be-missed" scientific event, in line with its traditional objectives and future ambitions.



>> Les primés des JC2 en 2023.
The JC2 award winners in 2023.

Un autre temps fort pour TéSA : son intronisation au Club Galaxie en avril 2023, sous le parrainage d'Éric Luvisutto (SatConseil). Créé en 2001, le Club Galaxie est un acteur incontournable de la filière spatiale française. Depuis plus de 20 ans, il contribue activement au développement et au rayonnement du secteur spatial en France, en cultivant un écosystème propice à l'innovation, aux synergies intersectorielles et à l'entrepreneuriat. Il rassemble aujourd'hui plus de 130 dirigeants d'entreprises de la région Occitanie, allant des start-ups aux grands groupes, en passant par les services associés à la filière spatiale.

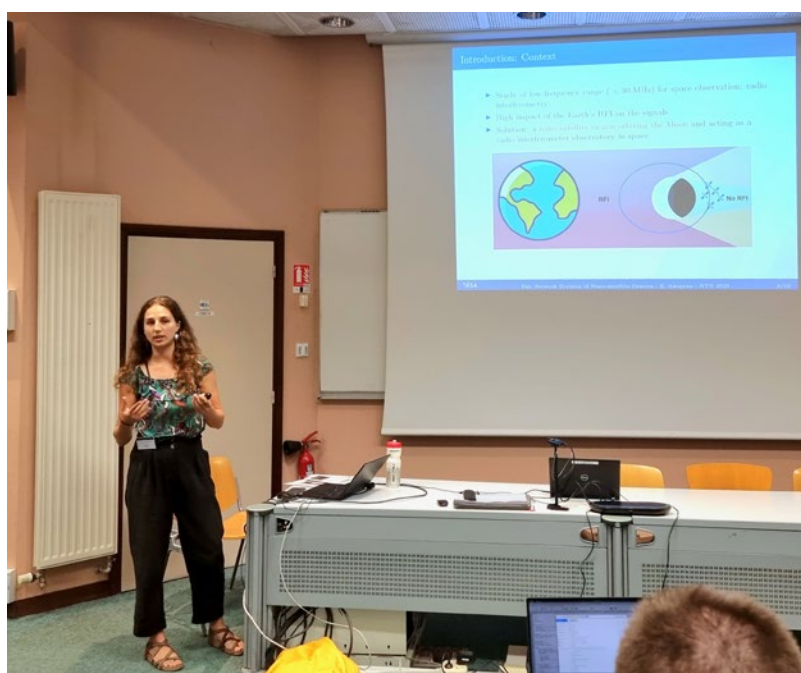
L'une des forces du Club réside dans sa capacité à créer du lien : petits-déjeuners thématiques, déjeuners conviviaux, soirées-débats... Autant d'occasions d'échanger, de croiser les expertises et, parfois, de faire germer de nouvelles idées. C'est ainsi qu'est née la collaboration entre TéSA et Syntony [E.4], à l'occasion d'un de ces déjeuners mensuels du premier vendredi du mois. Comme quoi, un bon déjeuner peut aussi être le point de départ d'un beau projet !

Enfin, TéSA, c'est aussi une équipe soudée qui sait conjuguer excellence scientifique et esprit d'équipe... jusque sur la ligne de départ ! En novembre 2024, plusieurs membres du laboratoire ont troqué leurs équations pour des baskets et ont fièrement porté les couleurs de TéSA lors des 10 km de la *Toulouse Métropole Run Experience*. Une belle foulée collective, un souffle partagé, et – bonne nouvelle – personne ne s'est perdu en route, même sans GNSS ! Cerise sur le dossard : chacun est reparti avec une médaille (et quelques courbatures) en souvenir d'une expérience aussi sportive que conviviale.

Another highlight for TéSA was its induction into Club Galaxie in April 2023, under the patronage of Éric Luvisutto (SatConseil). Founded in 2001, Club Galaxie is a key actor in the French Space industry. For more than 20 years, it has been actively contributing to the development and reputation of the Space sector in France, by cultivating an ecosystem conducive to innovation, cross-sector synergy and entrepreneurship. Today, it brings together more than 130 business leaders from the Occitanie region, ranging from start-ups to major groups, and including services associated with the Space industry.

One of the Club's strengths lies in its ability to create links: themed breakfasts, relaxed lunches, evening debates – all opportunities to exchange thoughts, cross-fertilise expertise and, sometimes, inspire new ideas. This is how the collaboration between TéSA and Syntony [E.4] came about, during one of these monthly lunches on the first Friday of the month. Which just goes to show that a good lunch can also be the starting point for a great project!

Finally, TéSA is also a close-knit team that combines scientific excellence with team spirit – right up to the starting line! In November 2024, several members of the lab swapped their equations for trainers and proudly wore the TéSA colours in the 10 km Toulouse Métropole Run Experience. A great collective event, a shared effort, and – good news – nobody got lost along the way, even without GNSS! The icing on the cake: everyone went home with a medal (and a few aches and pains) as a souvenir of an experience that was both sporting and friendly.



>> Evelyn Akopyan, doctorante TéSA, présentant ses travaux aux journées NTN 2023.
Evelyn Akopyan, TéSA PhD student, presenting her work at the NTN 2023 workshop.



6. TÉSA AIME SES DOCTORANTS

Faire une thèse à TéSA, c'est une belle expérience mêlant les défis scientifiques, les discussions entre académiques et acteurs industriels du spatial et de l'aéronautique, les présentations exaltantes dans des conférences internationales... mais après ?

Que fait-on après une thèse ?

Vers où se diriger et surtout, comment se préparer à « l'après thèse » ?

Afin d'accompagner les doctorants dans leur projet professionnel, TéSA a mis en place depuis 3 ans maintenant un programme intensif de préparation aux entretiens d'embauche. Ce programme est assuré par Xavier Barichard (<https://www.xbcoaching.fr/>), ancien directeur de la recherche et de l'innovation chez Collins AeroSpace ; il connaît bien TéSA, le monde industriel et intervient régulièrement auprès des jeunes diplômés.

Les doctorants en 3e année bénéficient d'une réflexion approfondie sur leur parcours, leur identité et leurs atouts, d'une simulation réaliste d'entretien avec *feedback* personnalisé, ainsi que d'un accompagnement ciblé pour optimiser leurs outils de candidature tels que le CV et LinkedIn.

L'accent est mis sur l'identification et la présentation de leurs soft skills et la valorisation des qualités personnelles, indispensables pour convaincre les recruteurs.

Ces ateliers, étalés sur trois mois, donnent aux participants les clés pour aborder sereinement leurs futures démarches d'embauche et illustrent l'engagement de TéSA à soutenir activement leur réussite. Les retours de tous les participants sont unanimes !



6. TÉSA LOVES ITS PHD STUDENTS

Doing a PhD at TéSA is a rewarding experience—blending scientific challenges, discussions between academics and industrial partners in the space and aeronautics sectors, and exciting presentations at international conferences... But what comes next?

What happens after a PhD?

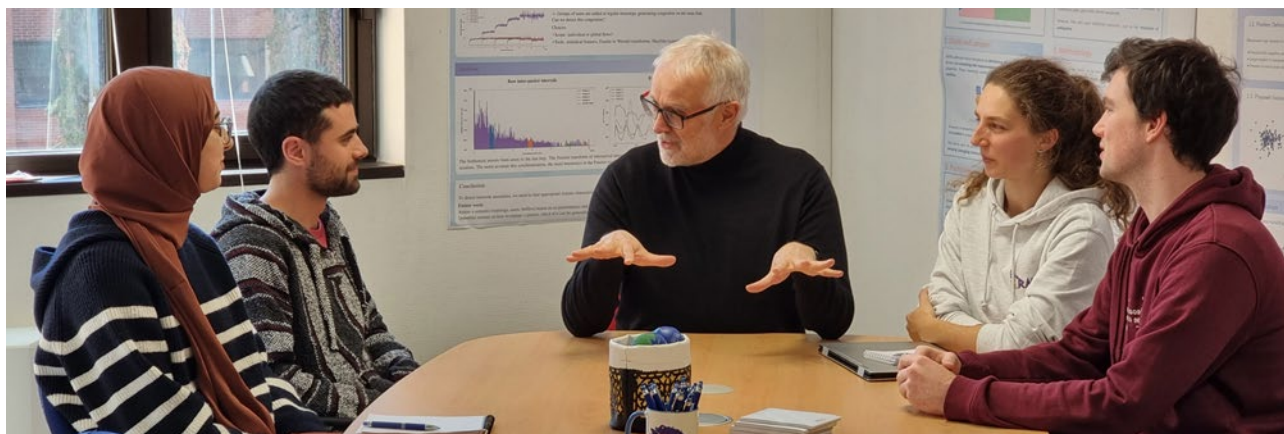
Which path should one follow—and above all, how can one best prepare for “life after the PhD”?

To support PhD students in their career development, TéSA set up, three years ago, an intensive job interview preparation programme. This programme is led by Xavier Barichard (<https://www.xbcoaching.fr/>), former Director of Research and Innovation at Collins Aerospace; he knows TéSA well, has deep insight into the industrial world, and regularly works with young graduates.

PhD candidates in their third-year benefit from in-depth reflection on their career path, identity, and strengths; a realistic mock interview with personalized feedback; and tailored guidance to optimize their application tools, such as their CV and LinkedIn profile.

Particular emphasis is placed on identifying and showcasing their soft skills, as well as highlighting personal qualities that are essential to convincing recruiters.

Spread over three months, these workshops give participants the keys to approach their job search with confidence and demonstrate TéSA's strong commitment to actively supporting their success. The feedback from all participants is unanimous!



>> Séance de travail avec Xavier Barichard.
Working session with Xavier Barichard.



PARTIE 4

PART 4

Tendances et Perspectives

Trends and perspectives

Dans un monde toujours plus connecté et dépendant de la donnée, les besoins en observation, localisation, navigation et en communication fiables, précises et continues ne cessent de s'amplifier. Qu'il s'agisse de transports intelligents, de systèmes critiques, d'objets connectés ou de missions spatiales, la robustesse du positionnement et la résilience des réseaux deviennent des enjeux technologiques majeurs. Cette évolution s'inscrit dans un mouvement plus large de convergence entre les télécommunications, la géolocalisation et l'intelligence artificielle, qui transforme en profondeur les approches traditionnelles. L'avènement de nombreuses missions de télédétection spatiale génère d'importants besoins en termes de traitement du signal mesuré et de l'estimation de paramètres géophysiques.

Le laboratoire TESA s'inscrit pleinement dans cette dynamique d'innovation. Grâce à son expertise reconnue en télécommunications spatiales et aéronautiques, il développe des solutions avancées répondant aux défis de la synchronisation, de la fusion de capteurs, de l'optimisation des architectures embarquées, ou encore de l'intégration navigation-communication. Ces travaux s'appuient sur une forte activité de recherche partenariale et se concrétisent à travers plusieurs thèses et projets de recherche.

Cette section dresse un panorama des grandes thématiques que va porter TESA dans les années à venir, dans ce contexte en pleine évolution. Il met en lumière les travaux qui seront menés dans le domaine de la localisation et de la navigation, de l'observation de la Terre et des systèmes de communication par satellite, en soulignant les verrous scientifiques, les dynamiques technologiques, et les perspectives d'application à court et moyen terme.

In an increasingly connected and data-dependent world, the need for reliable, accurate and continuous observation, positioning, navigation and communication is growing all the time. Whether for smart transport, critical systems, connected objects or Space missions, robust positioning and network resilience are becoming major technological challenges. This development is part of a wider trend towards convergence between telecommunications, geopositioning and artificial intelligence, which is profoundly transforming traditional approaches. The advent of numerous Space-based remote sensing missions is generating major needs for processing measured signals and estimating geophysical parameters.

The TESA laboratory is fully committed to this dynamic of innovation. Thanks to its recognised expertise in aerospace telecommunications, it is developing advanced solutions to meet the challenges of synchronisation, sensor-data fusion, optimisation of on-board architectures and navigation-communications integration. This work is underpinned by a strong research partnership and takes the form of several theses and research projects.

This section provides an overview of the major themes that TESA will be addressing in the coming years, in this rapidly changing context. It highlights the work that will be carried out in the fields of positioning and navigation, Earth observation and satellite communication systems, highlighting the scientific obstacles, the technological dynamics and the prospects for applications in the short and medium term.



1. LOCALISATION ET NAVIGATION : VERS UN POSITIONNEMENT ROBUSTE, INTELLIGENT ET INTÉGRÉ

Les systèmes de localisation et de navigation sont devenus essentiels à une grande variété d'applications : transports intelligents, robotique, villes connectées, gestion de flottes, drones, ou encore missions spatiales. Leur rôle est d'autant plus crucial que la précision, la résilience et la disponibilité du positionnement conditionnent la fiabilité de nombreux services critiques.

Le GNSS (système mondial de navigation par satellite) constitue aujourd'hui la technologie de référence pour fournir des informations de localisation à l'échelle globale. Toutefois, ses performances se dégradent en environnements complexes : zones urbaines denses, intérieurs



1. POSITIONING AND NAVIGATION: TOWARDS ROBUST, SMART AND INTEGRATED POSITIONING

Positioning and navigation systems have become essential for a wide range of applications, including smart transport, robotics, connected cities, fleet management, drones and Space missions. Their role is all the more crucial as the accuracy, resilience and availability of positioning systems determine the reliability of many critical services.

GNSS (the Global Navigation Satellite System) is today the reference technology for providing positioning information around the world. However, its performance deteriorates in complex environments: dense urban areas, building interiors, tunnels and mountainous environments. Phenomena

Daniel Medina



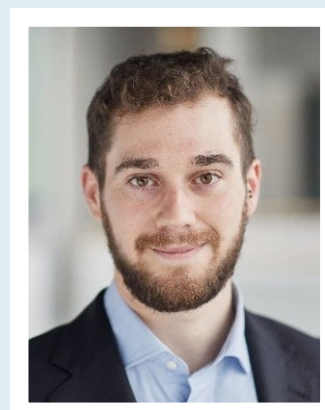
CHERCHEUR INVITÉ

Daniel Medina a obtenu une licence en génie électrique à l'Université de Malaga en 2014, ainsi qu'un master et un doctorat à l'Université Carlos III de Madrid (UC3M) en 2016 et 2022, respectivement. Il est actuellement chercheur à l'Institut des communications et de la navigation du Centre aérospatial allemand (DLR), où il dirige le groupe de recherche « Systèmes multi-capteurs », dédié à la fourniture de solutions de perception et de navigation avec des applications pour le transport intelligent et les systèmes autonomes. Ses recherches portent sur le traitement du signal, le filtrage robuste et la théorie de l'estimation, avec des applications à la navigation par satellite et au SLAM. Il est rédacteur associé des Transactions IEEE sur les systèmes de transport intelligents et préside actuellement le chapitre allemand de l'IEEE ITSS.



VISITING RESEARCHER

Daniel Medina received his B.Eng. degree in the field of Electrical Engineering from the University of Malaga in 2014, and then an M.Sc. and PhD from the University Carlos III in Madrid (UC3M) in 2016 and 2022, respectively. He is currently a research fellow at the Institute of Communications and Navigation of the German Aerospace Center (DLR), where he leads the Multi Sensor Systems research group, dedicated to the provision of perception and navigation solutions with applications to intelligent transport and autonomous systems. His research interests include signal processing, robust filtering and estimation theory with applications to satellite-based navigation and SLAM. He is an Associate Editor for the IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems and currently serves as the elected Chair for the IEEE ITSS German Chapter.



de bâtiments, tunnels, milieux montagneux. Des phénomènes comme les trajets multiples, les interférences ou le spoofing limitent fortement la robustesse du positionnement.

Face à ces défis, les recherches s'orientent vers des solutions hybrides et adaptatives. L'exploitation de méta-signaux GNSS, la fusion GNSS/INS, les boucles vectorielles, les filtres de Kalman augmentés par des réseaux neuronaux, ou encore les approches bayésiennes de détection d'anomalies font partie des pistes explorées dans plusieurs thèses démarrées à TESA.

En particulier, les « méta-signaux » que l'on peut voir comme la combinaison de plusieurs signaux GNSS offrent ainsi une plus grande largeur de bande et une meilleure résilience aux interférences et aux conditions de propagation difficiles. Par ailleurs, l'évolution des architectures des récepteurs GNSS est un levier clé pour améliorer la robustesse du positionnement. Le développement de récepteurs capables d'exploiter les méta-signaux de manière optimale, en intégrant des stratégies avancées de traitement du signal et de synchronisation, constitue une voie prometteuse pour améliorer la précision et la fiabilité du positionnement dans des environnements contraints. Cet axe est l'objet d'une thèse tout juste démarrée en novembre 2024, cofinancée par le CNES et par TAS.

Les nouvelles approches basées sur l'intelligence artificielle ouvrent également des perspectives inédites pour le positionnement hybride. Une stratégie particulièrement prometteuse consiste à hybrider le GNSS avec une centrale inertielle (INS). Dans ce cadre, l'intégration de réseaux neuronaux profonds au sein du filtrage de Kalman représente une avancée innovante. Ces réseaux peuvent être utilisés pour estimer de manière dynamique les matrices de covariance du filtre, en tenant compte des variations des conditions du canal et des incertitudes du modèle. Cette approche, qui est étudiée dans une thèse cofinancée par TAS et IPSA, démarrée fin 2023, devrait permettre d'améliorer l'adaptabilité et la précision du positionnement, en optimisant en temps réel la fusion des informations issues des capteurs inertiels et des signaux GNSS.

L'intelligence artificielle peut également être exploitée pour détecter et atténuer les interférences, compenser les effets des trajets multiples ou encore identifier les altérations des signaux GNSS causées par le spoofing. Parallèlement, de nouvelles approches basées sur des méthodes bayésiennes sont également étudiées pour la détection et la mitigation des interférences. Ces méthodes permettent d'atténuer l'impact d'inter-

such as multipaths, interference and spoofing severely limit the robustness of positioning.

Faced with these challenges, research is focusing on hybrid and adaptive solutions. The exploitation of GNSS meta-signals, GNSS/INS fusion, vector loops, Kalman filters augmented by neural networks, and Bayesian approaches to anomaly detection are among the avenues explored in several theses undertaken at TESA.

In particular, "meta-signals", which can be seen as the combination of several GNSS signals, offer greater bandwidth and greater resilience to interference and difficult propagation conditions. In addition, the development of GNSS receiver architectures is a key lever for improving the robustness of positioning. The development of receivers capable of making optimum use of meta-signals, by integrating advanced signal processing and synchronisation strategies, is a promising way of improving the accuracy and reliability of positioning in constrained environments. This area is the subject of a thesis that began recently in November 2024, co-financed by CNES and TAS.

New approaches based on artificial intelligence are also opening up unprecedented prospects for hybrid positioning. One particularly promising strategy is to combine GNSS with an INS (Inertial Navigation System). In this context, the integration of deep neural networks within Kalman filtering represents an innovative breakthrough. These networks can be used to dynamically estimate the filter covariance matrices, taking into account variations in channel conditions and model uncertainties. This approach, which is being studied for a thesis co-funded by TAS and IPSA, which started at the end of 2023, should make it possible to improve the adaptability and accuracy of positioning, by optimising the real-time fusion of information from inertial sensors and GNSS signals.



férences caractérisées par certaines propriétés spécifiques, comme une enveloppe constante. Toutefois, lorsque les interférences présentent des variations plus complexes de leurs paramètres caractéristiques, l'utilisation de méthodes de *machine learning* devient essentielle pour concevoir des techniques de mitigation plus robustes et adaptatives. Ces approches, explorées dans une thèse démarrée fin 2024, financée par FONISEN (Fédération ONERA-ISAE-ENAC), permettent de s'adapter dynamiquement aux variations du canal et aux perturbations, offrant ainsi une meilleure résilience aux scénarios d'interférence les plus difficiles à traiter.

Enfin, l'exploitation des mesures de phase est un élément fondamental pour atteindre une précision centimétrique. Cependant, ces mesures restent sensibles aux ambiguïtés de cycle et aux erreurs induites par des conditions de propagation complexes. Le développement de nouvelles techniques de traitement du signal GNSS est donc essentiel pour améliorer la robustesse et la précision du positionnement, en particulier dans des applications émergentes nécessitant une précision extrême. C'est notamment le cas de la localisation d'un essaim de nanosatellites, où la synchronisation fine et la gestion des erreurs de mesure sont critiques pour garantir le bon fonctionnement de la formation satellitaire. Cet axe de recherche est la ligne directrice d'une thèse cofinancée par le CNES et l'ISAE-SUPAERO, démarrée fin 2023.

Par ailleurs, la convergence entre les télécommunications et la navigation ouvre de nouvelles perspectives, notamment via l'intégration « communication - navigation » dans les constellations de satellites ou les réseaux 5G. L'amélioration de la synchronisation temporelle, la virtualisation des fonctions de localisation, ou encore la navigation dans l'espace profond (Terre-Lune, orbites LEO) nécessitent le développement de récepteurs et d'architectures spécifiques. Des études R&T pour le CNES vont démarrer autour de cette thématique.

TéSA est activement engagé dans ces enjeux : robustesse du traitement GNSS, hybridation intelligente des sources d'information, positionnement coopératif dans des environnements contraints, ou encore synchronisation distribuée dans des essaims satellitaires. L'objectif est de proposer des solutions de navigation fiables, résilientes et intelligentes, adaptées aux contraintes croissantes des applications modernes.

Des synergies entre les systèmes de navigation et de communication mobile peuvent être exploitées aussi bien au niveau des signaux que dans l'intégration entre GNSS et les solutions de positionnement à très faible consommation, adaptées

Artificial intelligence can also be used to detect and mitigate interference, compensate for multipath effects or identify spoofing of GNSS signals. In parallel, new approaches based on Bayesian methods are also being studied for interference detection and mitigation. These methods make it possible to attenuate the impact of interference characterised by certain specific properties, such as a constant envelope. However, when interferences exhibit more complex variations in their characteristic parameters, the use of machine learning methods becomes essential to design more robust and adaptive mitigation techniques. These approaches, explored in a thesis undertaken at the end of 2024, funded by FONISEN (ONERA-ISAE-ENAC Federation), enable dynamic adaptation to channel variations and disturbances, thus offering greater resilience to the most difficult interference scenarios.

Finally, the use of phase measurements is a fundamental element in achieving centimetre accuracy. However, these measurements remain sensitive to cycle ambiguities and errors induced by complex propagation conditions. The development of new GNSS signal processing techniques is therefore essential to improve the robustness and accuracy of positioning, particularly in emerging applications requiring extreme precision. This is particularly the case when it comes to positioning a swarm of nanosatellites, where fine synchronisation and the management of measurement errors are critical to guaranteeing the smooth operation of the satellite formation. This is the guideline for a thesis co-financed by CNES and ISAE-SUPAERO, which began at the end of 2023.

In addition, the convergence of telecommunications and navigation is opening up new prospects, notably through the integration of "communication - navigation" in satellite constellations or 5G networks. Improving time synchronisation, virtualising positioning functions, and navigation in outer Space (Earth-Moon, LEO orbits) all require the development of specific receivers and architectures. R&T studies on this theme will be undertaken for CNES.

TéSA is actively involved in these issues: robust GNSS processing, intelligent hybridisation of information sources, cooperative positioning in constrained environments, and distributed synchronisation in satellite swarms. The aim is to offer reliable, resilient and intelligent navigation solutions adapted to the growing constraints of modern applications.

aux objets connectés IoT opérant en bande étroite. Par ailleurs, l'amélioration des performances des mesures de distance grâce à la correction ionosphérique bifréquence constitue un levier essentiel, bien que nécessitant des études approfondies pour optimiser son efficacité.

Avec l'essor des objets communicants, la gestion des réseaux de communication mondiaux devient un défi croissant. La diffusion d'une référence de temps précise via les GNSS constitue une solution clé pour assurer la synchronisation efficace de ces réseaux à grande échelle. Par ailleurs, l'imbrication des systèmes de communication et de radionavigation/localisation ne cesse de s'intensifier, aussi bien pour les infrastructures satellitaires que pour les réseaux terrestres. Cette convergence est particulièrement visible avec le développement des réseaux 5G, qui intègrent des techniques avancées de positionnement exploitant leurs formes d'onde et leurs capacités de synchronisation accrues. Ces avancées ouvrent la voie à une nouvelle génération de services où la communication et la navigation sont pleinement intégrées, améliorant ainsi la résilience et la précision des systèmes globaux.

Synergy between navigation and mobile communication systems can be exploited both at signal level and in the integration between GNSS and very low-power positioning solutions, suitable for IoT connected objects operating in narrow frequency bands. In addition, improving the performance of range measurements using dual-frequency ionospheric correction is an essential lever, although in-depth studies are needed to optimise its effectiveness.

With the rise of communicating objects, managing the world's communication networks is becoming a growing challenge. The dissemination of an accurate time reference via GNSS is a key solution for ensuring the effective synchronisation of these large-scale networks. In addition, the interweaving of communication and radionavigation/positioning systems continues to intensify, for both satellite infrastructures and terrestrial networks. This convergence is particularly visible with the development of 5G networks, which incorporate advanced positioning techniques exploiting their waveforms and increased synchronisation capabilities. These advances pave the way for a new generation of services for which communication and navigation are fully integrated, improving the resilience and accuracy of global systems.



>> L'équipe TésA aux 10 km de Toulouse Métropole.
The TésA team at the 10 km of Toulouse Métropole.

L'hybridation entre communication et navigation au niveau des systèmes satellitaires, ainsi que l'augmentation du nombre de satellites, constituent des pistes prometteuses pour renforcer la résilience des systèmes de radionavigation par satellite. Dans ce cadre, la conception de nouvelles formes d'ondes et de nouveaux schémas de transmission résistants aux interférences intra-système est essentielle pour permettre un positionnement précis tout en garantissant une communication à haut débit. Cette approche est particulièrement pertinente pour les essais de satellites dédiés aux nouvelles missions scientifiques, notamment en interférométrie, où un positionnement coopératif précis est indispensable. En complément, nous nous intéressons également au développement d'échelles de temps autonomes, robustes aux erreurs d'horloge, pour assurer la synchronisation fiable de ces constellations de satellites et garantir des performances optimales dans les environnements les plus exigeants. C'est l'objet du post-doc cofinancé par TESA et TAS, à la suite de la thèse d'Hamish McPhee [T.6].

Enfin, l'intérêt croissant pour le positionnement dans l'espace ouvre de nouvelles perspectives. Parmi les exemples notables, on peut citer l'utilisation de récepteurs GNSS embarqués à bord de satellites LEO, ainsi que le développement de techniques de positionnement exploitant directement les constellations LEO, en tant qu'alternative aux systèmes GNSS traditionnels basés sur des

The hybridisation of communication and navigation in satellite systems, and the increase in the number of satellites, are promising ways of strengthening the resilience of satellite radio-navigation systems. In this context, the design of new waveforms and new transmission schemes resistant to intra-system interference is essential to enable accurate positioning while guaranteeing high-speed communication. This approach is particularly relevant for satellite swarms dedicated to new scientific missions, especially in interferometry, where precise cooperative positioning is essential. In addition, we are also interested in the development of autonomous time scales, robust to clock errors, to ensure the reliable synchronisation of these satellite constellations and guarantee optimum performance in the most demanding environments. This is the aim of the post-doctoral research co-funded by TESA and TAS, following on from Hamish McPhee's thesis [T.6].

Finally, the growing interest in positioning in Space is opening up new perspectives. Notable examples include the use of GNSS receivers on-board LEO satellites, and the development of positioning techniques that directly exploit LEO constellations as an alternative to traditional GNSS systems based on MEO satellites. At the same time, the

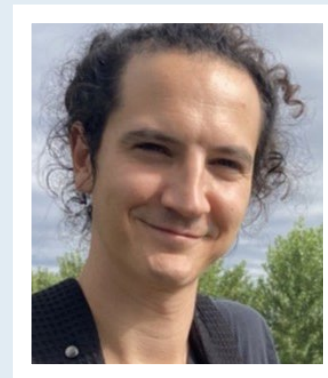
Sylvain Cluzel

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

Sylvain a soutenu sa thèse en 2019 et a immédiatement rejoint Polestar, une entreprise toulousaine spécialisée dans la localisation « *in-door* ». Durant plusieurs années, il a exercé des activités d'ingénieur R&D, se spécialisant en algorithmique pour améliorer la précision de la localisation et optimiser la consommation de ressources. En 2022, il a opéré un changement de cap en se tournant vers l'Internet des Objets (IoT), toujours au sein de la même entreprise. Il a pris la tête de l'équipe micro-électronique, pour l'innovation et le développement de logiciels embarqués.

WHERE ARE THEY NOW?

Sylvain defended his thesis in 2019 and immediately joined Polestar, a Toulouse company specialized in indoor localization. For several years, he worked as an R&D engineer, on algorithms to improve localization accuracy and optimize resource consumption. In 2022, he moved into new activities dedicated to the Internet of Things (IoT), still within the same company. He is currently leading the microelectronics team, for innovation and embedded software development.



satellites MEO. En parallèle, la conception de récepteurs spatiaux dédiés à la navigation Terre-Lune représente un enjeu stratégique pour les futures missions d'exploration et les infrastructures de navigation interplanétaire.

Le laboratoire TéSA est parfaitement positionné pour poursuivre ses contributions à ces enjeux en apportant son expertise et ses compétences dans le domaine des télécommunications spatiales et aéronautiques, ainsi qu'en radionavigation et localisation. Ces compétences seront mises en avant dans le cadre d'études approfondies sur ces systèmes, en collaborant activement pour faire progresser la conception d'applications et de systèmes prometteurs. Parmi ces applications, on peut citer l'aviation civile, la gestion de flottes de véhicules ou de drones, les systèmes de surveillance, la navigation pour hélicoptères, ainsi que la navigation pour les missions spatiales. Grâce à cette collaboration continue, TéSA participe activement au développement de technologies qui auront un impact majeur sur l'avenir de ces secteurs stratégiques.



2. OBSERVATION DE LA TERRE : EXTRAIRE DE LA VALEUR DANS UN MONDE INCERTAIN

L'observation de la Terre suscite actuellement un intérêt considérable de la part de la communauté scientifique, d'acteurs institutionnels et nationaux, et de groupes industriels de toute taille, en raison de ses capacités d'analyse quantitative de l'évolution climatique globale, du rôle qu'elle joue dans la compréhension de phénomènes naturels ou anthropiques, dans la gestion des ressources ou bien dans la cartographie de milieux à grande échelle.

En observation de la Terre, on distingue généralement quatre grands champs thématiques, qui sont : Terre solide, océans, surfaces continentales et atmosphère. Le programme Copernicus de l'Union Européenne, qui propose des services liés à l'observation de Terre par satellite et à un ensemble de données in situ a joué un rôle considérable dans le récent essor de la mesure de la Terre par satellite pour chacun de ces axes thématiques. Les nombreux capteurs Sentinel, qui proposent des mesures systématiques, pérennes, planifiées, libres d'accès, multiphysiques et fréquentes de la Terre, ont clairement montré l'intérêt de séries temporelles denses et de la fusion multicapteurs, portant la télédétection à l'ère des traitements de données de masse et du

design of Space receivers dedicated to Earth-Moon navigation represents a strategic challenge for future exploration missions and interplanetary navigation infrastructures.

The TéSA laboratory is perfectly placed to continue helping to meet these challenges by bringing to bear its expertise and skills in the field of aerospace telecommunications, as well as radio navigation and positioning. These skills will be put to good use in in-depth studies of these systems, working actively with other institutions to advance the design of promising applications and systems. These applications include civil aviation, fleet management for vehicles or drones, surveillance systems, helicopter navigation and navigation for Space missions. Thanks to this ongoing collaboration, TéSA is actively involved in developing technologies that will have a major impact on the future of these strategic sectors.



2. EARTH OBSERVATION: EXTRACTING VALUE IN AN UNCERTAIN WORLD

Earth observation is currently attracting considerable interest from the scientific community, institutional and national stakeholders, and industrial groups of all sizes, because of its capacity for quantitative analysis of global climate change, the role it plays in understanding natural and man-made phenomena, in resource management and in mapping large-scale environments.

In Earth observation, there are generally four main thematic fields: Solid Earth, Ocean, Continental Surfaces and Atmosphere. The European Union's Copernicus programme, which offers services linked to satellite-based Earth observation and a set of in-situ data, has played a considerable role in the recent boom in satellite-based Earth measurements in each of these thematic areas. The many Sentinel sensors, which provide systematic, long-term, planned, freely accessible, multi-physical and frequent measurements of the Earth, have clearly demonstrated the benefits of dense time series and multi-sensor-data fusion, bringing remote sensing into the era of mass data processing and high-level information processing such as machine learning. The free access to data sources that are incomparable in terms of diversity and quantity has given rise to a wide range of

traitement de l'information de haut niveau de type apprentissage statistique (*machine learning*). La mise à disposition à titre gratuit de sources de données incomparables en termes de diversité et de quantité a suscité de très nombreuses applications, activités industrielles, ou services institutionnels et a facilité l'émergence d'un nombre croissant d'initiatives se basant sur des mini-capteurs spécialisés, pour des applications bien ciblées. Si cette pratique est largement diffusée depuis plusieurs décennies dans le domaine optique, elle tend à se généraliser à des capteurs SAR (*Synthetic Aperture Radar*) plus complexes, ou bien embarquant différents instruments à bas-coût. On note aussi les programmes des différents acteurs institutionnels, comme le CNES, qui permettent l'avènement de missions clés très novatrices, comme SWOT (altimétrie CNES/JPL), Trishna (Infrarouge thermique, CNES/ISRO), CO3D (constellation optique, CNES/ADS).

TéSA contribue activement à l'effervescence actuelle du domaine de l'observation de la Terre par satellite, en développant des techniques avancées de traitement du signal. Ces travaux visent aussi bien à valoriser les données issues de capteurs satellitaires qu'à améliorer leur qualification pour des usages scientifiques ou opérationnels. Plusieurs de nos chercheurs participent ainsi à la préparation de missions spatiales d'envergure, notamment à travers trois thèses en cours, qui illustrent la diversité et la complémentarité des approches mises en œuvre.

La première, débutée fin 2022 et cofinancée par le CNES et Thales Alenia Space, porte sur la calibration de l'instrument embarqué à bord du satellite MicroCarb, dont le lancement est prévu en 2025. Cet instrument vise à mesurer les concentrations de dioxyde de carbone à la surface de la Terre afin de mieux évaluer l'empreinte carbone humaine. Pour garantir la précision de ces mesures, il est essentiel de connaître très finement la réponse spectrale du spectromètre embarqué. Les travaux menés dans cette thèse s'appuient sur des méthodes innovantes d'estimation parcimonieuse, reposant sur des modèles à base de dictionnaires, pour résoudre un problème de déconvolution. Ces techniques ont également été adaptées à la détection et à la correction de défauts radiométriques et spectraux de l'instrument. La soutenance est prévue pour fin 2025, et une seconde thèse, cofinancée par le CNES et Thales Services Numériques, prendra le relais pour explorer l'apport du *machine learning* à ces problématiques d'estimation en contexte dégradé.

La deuxième thèse, également entamée fin 2022, est cofinancée par le CNES et l'ISAE-SUPAERO. Elle s'inscrit dans le cadre de la mission BIOMASS et



applications, industrial activities and institutional services, and has facilitated the emergence of a growing number of initiatives based on specialised mini-sensors for well-targeted applications. While this practice has been widespread in the optical sector for several decades, it is now being extended to more complex SAR (Synthetic Aperture Radar) sensors, or those incorporating a range of low-cost instruments. We should also mention the programmes of various institutional stakeholders, such as CNES, which have enabled the advent of highly innovative key missions, such as SWOT (altimetry, CNES/JPL), Trishna (thermal infrared, CNES/ISRO) and CO3D (optical constellation, CNES/ADS).

TéSA is actively contributing to the current boom in satellite-based Earth observation, by developing advanced signal processing techniques. The aim of this work is both to enhance the value of data from satellite sensors and to improve their qualification for scientific or operational use. Several of our researchers are involved in preparing major Space missions, notably through three current theses, which illustrate the diversity and complementarity of the approaches used.

The first, starting at the end of 2022 and co-financed by CNES and Thales Alenia Space, involves calibrating the instrument on board the MicroCarb satellite, scheduled for launch in 2025. This instrument aims to measure carbon dioxide concentrations at the Earth's surface in order to better assess the human carbon footprint. To guarantee the accuracy of these measurements, it is essential to have very detailed knowledge of the spectral response of the on-board spectrometer. The work carried out in this thesis uses innovative parsimonious estimation methods, based on dictionary models, to solve a deconvolution problem. These techniques have also been adapted to detect and correct radiometric and spectral faults in the instrument. The thesis is due to be defended at the end of 2025, and a second thesis, co-financed by CNES and Thales Services Numériques, will take over to explore the contribution of machine learning to these estimation problems in a degraded context.

aborde la détection de la déforestation dans les régions tropicales, à partir de séries temporelles issues des satellites Sentinel-1 (radar) et Sentinel-2 (optique). Une approche adaptative, reposant sur un détecteur bayésien en ligne, a été développée et démontre des performances supérieures aux méthodes actuellement utilisées, notamment dans les zones sous-tropicales, souvent complexes à analyser du fait de la forte variabilité de leur signature temporelle. L'originalité de ces travaux réside également dans l'utilisation complémentaire des deux canaux de polarisation de Sentinel-1 et dans une méthode de fusion innovante de données asynchrones et multi-physiques issues des deux capteurs. Là encore, une poursuite des travaux est envisagée à travers une seconde thèse, en partenariat avec le CNES et le CESBIO.

Enfin, une troisième thèse CIFRE, financée par CGI, explore une autre facette du monitoring environnemental, en s'intéressant à la cartographie de la bathymétrie des petits lacs métropolitains à l'aide de données satellitaires multi-spectrales. Ces informations sont cruciales pour la gestion des ressources en eau, la prévention des risques ou encore la connaissance de milieux aquatiques peu étudiés. Une première approche de régression multivariée non paramétrique a été proposée pour relier les réflectances satellitaires à la profondeur d'eau. À terme, des représentations avancées basées sur la théorie des noyaux reproduisant ou les processus gaussiens devraient permettre une modélisation fine et évolutive de ces profondeurs au fil du temps.

The second thesis, also undertaken at the end of 2022, is being co-financed by CNES and ISAE-SUPAERO. It is part of the BIOMASS mission and deals with the detection of deforestation in tropical regions, using time series from the Sentinel-1 (radar) and Sentinel-2 (optical) satellites. An adaptive approach, based on an on-line Bayesian detector, has been developed and has demonstrated superior performance to the methods currently used, particularly in sub-tropical zones, which are often complex to analyse because of the high variability of their temporal signature. The originality of this work also lies in the complementary use of Sentinel-1's two polarisation channels and in an innovative method for merging asynchronous and multi-physical data from the two sensors. Here again, a second thesis is planned, in partnership with CNES and CESBIO.

Finally, a third CIFRE thesis, funded by CGI, is exploring another facet of environmental monitoring, looking at the mapping of the bathymetry of small lakes in mainland France using multi-spectral satellite data. This information is crucial for water resource management, risk prevention and understanding little-studied aquatic environments. An initial non-parametric multivariate regression approach was proposed to link satellite reflectance to water depth. Eventually, advanced representations based on the theory of reproducing kernels or Gaussian processes should enable these depths to be modelled finely and the technique to improve over time.



>> TESA au dîner de gala d'EUSIPCO 2024 à Lyon.
TESA at the EUSIPCO 2024 gala dinner in Lyon.



3. SYSTÈMES DE COMMUNICATION PAR SATELLITE : VERS DES RÉSEAUX DISTRIBUÉS, INTELLIGENTS ET SOUVERAINS

Les systèmes de télécommunication par satellite connaissent une véritable révolution depuis quelques années, qui a profondément modifié le marché et l'écosystème spatial. En effet, les constellations de satellites de télécommunication connaissent une véritable explosion, avec des systèmes couvrants des services et des marchés extrêmement variés, qui vont des services *broadband* fixes ou mobiles mais également du *Direct-to-Device* pour les communications mobiles avec un smartphone. Ces systèmes sont portés aussi bien par des acteurs classiques du



3. SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS: TOWARDS DISTRIBUTED, SMART AND SOVEREIGN NETWORKS

Satellite telecommunications systems have undergone a significant revolution in recent years, which has profoundly changed the Space market and ecosystem. Telecommunications satellite constellations are booming, with systems covering a wide range of services and markets, from fixed and mobile broadband services to Direct-to-Device smartphone communications. These systems are purveyed by both traditional Space and government stakeholders, as well as a large number of new players (commonly referred to as NewSpace), whether start-ups or from the GAFAs. There are already established systems such as Iridium, O3B or OneWeb and numerous

Petar M. Djurić



CHERCHEUR INVITÉ

Petar M. Djurić est Fellow de l'IEEE et de l'EURASIP. Il est actuellement professeur émérite SUNY à l'université Stony Brook (États-Unis) et titulaire de la chaire Savitri Devi Bangaru en intelligence artificielle, la plus haute distinction professionnelle. Ses recherches portent principalement sur les fondamentaux de l'apprentissage automatique et du traitement du signal et de l'information, avec des intérêts variés, notamment la théorie de l'inférence causale, la fusion d'informations, l'optimisation bayésienne, les méthodes de Monte Carlo, le traitement distribué du signal, les agents autonomes, la reconnaissance du monde ouvert, la modélisation du signal, ainsi que la détection et l'estimation. Il a publié ses travaux dans plus de 150 articles de revues et plus de 350 communications de conférences. Il figure parmi les 2 % des meilleurs scientifiques mondiaux toutes disciplines confondues selon l'université de Stanford.



VISITING RESEARCHER

Petar M. Djurić is an IEEE Fellow, an EURASIP Fellow and currently holds the position of SUNY Distinguished Professor at Stony Brook University (USA) and serves as the Savitri Devi Bangaru Professor in Artificial Intelligence, the highest career distinction. His research has primarily focused on investigating the fundamentals of machine learning and signal and information processing with a diverse range of interests within them including causal inference theory, information fusion, Bayesian optimization, Monte Carlo methods, distributed signal processing, autonomous agents, open world recognition, signal modeling, as well as detection and estimation. He has published his work in more than 150 journal articles and more than 350 conference papers. He has been listed among the top 2% of scientists worldwide across all disciplines by Stanford University.



spatial que par des acteurs étatiques ou de très nombreux nouveaux entrants (communément regroupés sous le vocable de *NewSpace*), que ce soient des startups ou bien des acteurs issus des GAFAs. On trouve ainsi des systèmes déjà établis tel qu'Iridium, O3B ou OneWeb et de nombreuses initiatives autour des nano/micro satellites. Mais le fait majeur est l'irruption des méga-constellations avec principalement Starlink qui a radicalement transformé ce marché. En parallèle du système de SpaceX, il faut également citer les initiatives de Telesat avec le projet LightSpeed, d'Amazon avec le projet Kuiper, ou des projets étatiques comme en Europe avec IRIS2.

Ces systèmes, composés d'un très grand nombre de satellites (jusqu'à 12 000 dans le cas Starlink), certains en orbite très basse (jusqu'à 340 km), permettent d'atteindre des capacités totales extrêmement élevées de l'ordre de plusieurs téra-bits/s avec une couverture globale et des latences très faibles. Pour ce faire, ces types de système s'appuient sur l'ensemble des dernières avancées dans le domaine des télécommunications spatiales : antennes actives, régénération et traitement bord, liens inter-satellites optiques, flexibilité, virtualisation qui s'appuie sur des plateformes très capacitives... On notera enfin que plusieurs initiatives venant des principaux opérateurs satellites voient le jour autour de constellations de satellites MEO, vu comme un compromis entre le nombre de satellites, la couverture et la latence.

Malgré le développement rapide des constellations, les satellites de télécommunication géostationnaires continuent à offrir une solution adaptée principalement articulée autour de 3 marchés :

- le renouvellement des satellites de *broadcast* (qui voient leur part de marché diminuer),
- les satellites flexibles (*Software Defined Satellite - SDS*) qui permettent une adaptation complète aux besoins des opérateurs et de leurs clients, que ce soit en débit ou en couverture. Ces solutions s'appuient principalement sur des processeurs numériques transparents et sur des antennes actives, et qui se sont imposés sur les marchés *broadband*
- les satellites militaires, avec des besoins très spécifiques.

Par ailleurs, deux tendances de fond traversent l'ensemble de ces systèmes. La première concerne les opportunités offertes par la 5G avec une question de plus en plus prégnante de basculer du DVB (*Digital Video Broadcasting*) à la 5G ; la seconde tendance est celle des approches multi constellations avec la possibilité pour les terminaux satellite



initiatives around nano/micro satellites. But the major development has been the emergence of mega-constellations, most notably SpaceX's Starlink system, which have radically transformed this market. We can also mention initiatives by Telesat with the LightSpeed project, Amazon with the Kuiper project, and government projects such as Europe's IRIS2.

These systems, made up of a very large number of satellites (up to 12,000 in the case of Starlink), some in very low orbit (no higher than 340 km), make it possible to achieve extremely high total throughput of the order of several terabits/s with global coverage and very low latencies. To achieve this, these types of system draw on all the latest advances in the field of Space telecommunications: active antennas, on-board regeneration and processing, optical inter-satellite links, flexibility, virtualisation based on high-capacity platforms, etc. Finally, it should be noted that several initiatives from the main satellite operators are emerging around MEO satellite constellations, seen as a compromise between the number of satellites, coverage and latency.

Despite the rapid development of constellations, geostationary telecommunication satellites continue to offer an appropriate solution, based mainly on three markets:

- *the renewal of broadcasting satellites (whose market share is declining),*
- *flexible satellites or SDS (Software Defined Satellites) that can be fully adapted to the needs of operators and their customers, in terms of both bandwidth and coverage. These solutions are based mainly on transparent digital processors and active antennas, and have become established in the broadband markets.*
- *military satellites, with very specific requirements.*

de se connecter de façon efficace à des systèmes GEO ou LEO/MEO.

Dans ce contexte de mutation rapide des télécommunications spatiales, plusieurs thèses co-encadrées avec des partenaires industriels viennent nourrir les axes de recherche structurants, à différents niveaux du système satellitaire.

Une thèse cofinancée par le CNES et VIVERIS démarrera fin 2025 : elle vise à concevoir des protocoles autonomes et auto-adaptatifs, intégrant de l'apprentissage par renforcement, pour les communications inter-satellites. En prolongement de la thèse d'Evelyne Akopyan, soutenue en octobre 2024 (voir la section « [6. Essais de nanosatellites](#) », page 31), cette nouvelle thèse ambitionne de répondre aux besoins de missions futures autour de la Lune ou d'observation coopérative de la Terre, en explorant la résilience et l'adaptabilité des communications dans des réseaux de nanosatellites en essaim, dans un contexte marqué par la miniaturisation, la prolifération des plateformes autonomes, et l'exploitation de l'intelligence artificielle embarquée. L'objectif est de permettre aux satellites de s'auto-organiser, d'optimiser les liens et de gérer les ressources en fonction des conditions réseau en s'appuyant sur l'intelligence artificielle.

Une thèse cofinancée par TAS et TéSA, démarrée en mars 2025, porte sur l'orchestration du calcul distribué embarqué (*Space Edge Computing*) dans les constellations satellites. Avec la montée en puissance des ressources de traitement à bord et l'émergence des paradigmes de type « *Cloud in Space* », de nouveaux services deviennent envisageables (télécoms, réseau de diffusion de contenus, IoT, imagerie). Des stratégies d'allocation, de placement et de migration des fonctions logicielles embarquées seront explorées, en lien avec les contraintes de connectivité, de coût et de sécurité. L'approche associera modélisation, prototypage en environnement émulé, et validation sur des scénarios réalistes (réseaux 5G NTN, diffusion de contenu, fusion de données).

Enfin, un nouveau projet à venir s'attachera à l'interopérabilité multi-orbite et à la cohabitation GEO/LEO, en lien avec les standards 5G et les approches basées sur un contrôle centralisé du réseau via logiciel (SDN - *Software Defined Networking*) et une virtualisation des fonctions réseau (NFV - *Network Function Virtualization*).

S'intéressant aux couches basses des systèmes de télécommunication satellitaire, une thèse a démarré fin 2024 avec pour but de proposer des formes d'onde et des algorithmes de traitement du signal avancé permettant l'utilisation de liens

In addition, two fundamental trends run through all these systems. The first concerns the opportunities offered by 5G, with the increasingly important question of switching from DVB (Digital Video Broadcasting) to 5G. The second trend is that of multi-constellation approaches, with the possibility for satellite terminals to connect efficiently to GEO or LEO/MEO systems.

Against this backdrop of rapid change in Space-based telecommunications, a number of theses co-supervised with industrial partners are feeding into the strategic lines of research, at different levels of the satellite system.

A thesis co-financed by CNES and VIVERIS will start at the end of 2025: it aims to design autonomous and self-adaptive protocols, incorporating reinforcement learning, for inter-satellite communications. Following on from Evelyne Akopyan's thesis, defended in October 2024 (see the section "6. Nanosatellite swarms", page 31), this new thesis aims to meet the needs of future missions around the Moon or cooperative observation of the Earth, by exploring the resilience and adaptability of communications in networks of nanosatellite swarms, in a context marked by miniaturisation, the proliferation of autonomous platforms and the exploitation of on-board artificial intelligence. The aim is to enable satellites to use artificial intelligence to organise themselves, optimise links and manage resources according to network conditions.

*A thesis co-financed by TAS and TéSA, which started in March 2025, focuses on the orchestration of on-board distributed computing (*Space Edge Computing*) in satellite constellations. With the increase in on-board processing resources and the emergence of "Cloud in Space" paradigms, new services are becoming possible (telecoms, content distribution networks, IoT, imaging). Strategies for allocating, placing and migrating embedded software functions will be explored, in relation to connectivity, cost and security constraints. The approach will combine modelling, prototyping in an emulated environment, and validation on realistic scenarios (NTN 5G networks, content distribution, data fusion).*

*Finally, a new forthcoming project will focus on multi-orbit interoperability and GEO/LEO cohabitation, in connection with 5G standards and approaches based on centralised control of the network via software (SDN - *Software Defined Networking*) and virtualisation of network functions (NFV - *Network Function Virtualisation*).*

optiques entre des satellites géostationnaires et des stations de base terrestre. En effet, pour répondre à la demande croissante de bande passante mondiale, le passage aux liaisons optiques en espace libre apparaît comme une solution naturelle, d'autant plus que des débits de l'ordre du téraoctet par seconde sont aujourd'hui atteints dans les réseaux terrestres fibrés. Bien que cette technologie soit mature en transport fibré, son déploiement spatial se heurte à des verrous tels que l'atténuation ponctuelle due à la turbulence atmosphérique, un rapport signal-sur-bruit très inférieur à celui de la fibre, et des non-linéarités induites par des amplificateurs optiques de très forte puissance. Il est donc nécessaire de proposer des formes d'onde et des algorithmes de traitement du signal avancés, exploitant la diversité spatiale, temporelle et de polarisation par des approches inspirées par exemple des systèmes radiofréquences multi-antennes, tout en garantissant la faisabilité d'une implémentation numérique embarquée en temps réel.

Ces travaux illustrent la diversité des verrous scientifiques et technologiques associés aux systèmes de télécommunication spatiaux de nouvelle génération, et traduisent la volonté de construire des solutions intelligentes, distribuées et robustes face aux exigences croissantes de connectivité, de résilience et de réactivité en orbite.

Focusing on the lower layers of satellite telecommunications systems, a thesis was started at the end of 2024 with the aim of proposing waveforms and advanced signal processing algorithms enabling the use of optical links between geostationary satellites and terrestrial base stations. Indeed, to meet the growing demand for bandwidth worldwide, the move to free-space optical links seems a natural solution, especially as throughputs of the order of terabits per second are now being achieved in terrestrial fibre networks. Although this technology is mature for fibre networks, its deployment in Space comes up against obstacles such as intermittent attenuation due to atmospheric turbulence, a signal-to-noise ratio that is much lower than that of fibre, and non-linearities induced by very high-power optical amplifiers. It is therefore necessary to propose advanced waveforms and signal processing algorithms, by exploiting spatial, temporal and polarisation diversity using approaches inspired, for example, by multi-antenna radio frequency systems, while guaranteeing the feasibility of real-time on-board digital implementation.

This list illustrates the wide range of scientific and technological challenges associated with new-generation Space-based telecommunications systems, and reflects the desire to build smart, distributed and robust solutions to meet the growing demands for connectivity, resilience and responsiveness in orbit.



>> L'équipe TESA en 2024.
The TESA team in 2024.

Les 20 ans de TéSA

DE LA 3G AUX CONSTELLATIONS : TéSA A GRANDI, MAIS GARDE LA MÊME ÉNERGIE

Vingt ans... et tant de chemin parcouru depuis 2004 !

À l'époque, la 3G faisait ses débuts, les téléphones n'avaient pas d'écran tactile et l'espace vivait encore au rythme des satellites géostationnaires et d'Ariane 4.

C'est dans ce contexte qu'est né TéSA, avec une idée simple mais ambitieuse : rassembler chercheurs, industriels et institutions pour innover ensemble en télécommunications spatiales. Les débuts n'ont pas été faciles, mais la volonté commune a tout rendu possible.

Le résultat ?

86 thèses soutenues, **300+** études R&D,
800+ publications internationales, **22** brevets

et d'innombrables cafés, croissants et chocolatines partagés.

En décembre 2024, nous avons fêté ces 20 ans. Une belle occasion de constater que la passion des télécoms spatiales traverse les générations et que TéSA a encore de beaux défis devant lui.

Bon vent pour les 20 prochaines années !

FROM 3G TO CONSTELLATIONS: TéSA HAS GROWN, BUT KEPT THE SAME ENERGY

Twenty years... and such a long road since 2004!

Back then, 3G was just beginning, phones had no touchscreens, and space was still paced by geostationary satellites and Ariane 4.

It was in that context that TéSA was born, with a simple yet ambitious idea: bringing together researchers, industry, and institutions to innovate together in space telecommunications. The early days weren't easy, but a shared determination made everything possible.

The result?

86 PhD theses defended, **300+** R&D studies,
800+ international publications, **22** patents

and countless coffees, croissants, and chocolatines shared.

In December 2024, we celebrated these 20 years. A wonderful opportunity to see that the passion for space telecommunications spans generations—and that TéSA still has exciting challenges ahead.

Here's to the next 20 years!



PARTIE 5 PART 5

Conclusion

Ce rapport d'activité dresse le panorama des travaux de recherche et d'expertise menés au sein de TéSA sur les années 2023 et 2024. Laboratoire de recherche privé sous statut associatif (loi 1901) depuis plus de 20 ans, TéSA continue de rassembler des compétences pluridisciplinaires issues du traitement du signal et des images, des communications numériques et des réseaux, au service de la recherche en télécommunications spatiales et aéronautiques. Cette dynamique collaborative, au cœur de notre ADN, favorise l'émergence de solutions innovantes pour répondre aux enjeux technologiques de nos partenaires industriels et institutionnels.

Les dernières années ont été marquées par une intensification des activités scientifiques et une dynamique collective toujours plus forte. Le Conseil Scientifique joue pleinement son rôle d'orientation, les chercheurs et enseignants-chercheurs s'investissent dans la conduite de projets innovants, les doctorants et post-doctorants contribuent avec enthousiasme à l'avancement des travaux, et les partenaires – industriels comme institutionnels – renouvellent leur engagement à travers des collaborations toujours plus structurantes.

Cette synergie, essentielle au bon fonctionnement de TéSA, ne serait pas possible sans l'implication quotidienne de toutes et tous – y compris du personnel administratif, pilier discret mais indispensable de l'association.

Un grand merci à l'ensemble des contributeurs de TéSA pour leur engagement et leur enthousiasme. Grâce à vous, l'élan de TéSA se poursuit, plus vivant que jamais, pour continuer à faire avancer la recherche en télécommunications spatiales et aéronautiques.

This Activity Report provides an overview of the research and expert appraisal carried out by TéSA in 2023 and 2024. TéSA has been a non-profit, private research laboratory association (Act of 1901) for over 20 years, and continues to bring together scientists with multi-disciplinary skills in signal and image processing, digital communications and networks, to support research into aerospace telecommunications. This collaborative effort, key to our DNA, encourages the emergence of innovative solutions to meet the technological challenges of our industrial and institutional partners.

The last few years have seen an intensification of scientific activities and an increasingly strong collective dynamic. The Scientific Committee is playing its role to the full, researchers and lecturer-researchers are committed to leading innovative projects, doctoral and post-doctoral students are enthusiastically contributing to progress, and partners – both industrial and institutional – are renewing their commitment through ever more strategically defined collaboration.

This synergy, which is essential to the smooth running of TéSA, would not be possible without the daily involvement of everyone – including the administrative staff, who act behind the scene, but are indispensable to the association.

Many thanks to all our contributors for their commitment and enthusiasm, which enables TéSA, more vibrant than ever, to continue driving research in aerospace telecoms.



Annexe



1. LISTE DES PUBLICATIONS

La liste des publications ne se limite pas strictement aux publications faites en 2023 et 2024 mais comprend aussi quelques publications en dehors de cette période, relatives aux publications des thèses et post-docs décrits dans le rapport.

1.1. ARTICLES DE JOURNAUX

- [J.1] Jerbi Anouar, Amis Karine, Guilloud Frédéric and Benaddi Tarik, *Delay Optimization of Conventional Non-Coherent Differential CPM Detection*, IEEE Communications Letters, vol. 27, issue 1, pp. 234–238, January, 2023.
- [J.2] Mc Phee Hamish Scott, Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi and Chaumette Eric, *Accounting for Acceleration – Signal Parameters Estimation Performance Limits in High Dynamics Applications*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol 59, Issue 1, pp 610–622, February 2023.
- [J.3] Lubeigt Corentin, Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi and Chaumette Eric, *Band-limited impulse response estimation performance*, Signal Processing, vol. 208, Art. no 108998, July, 2023.
- [J.4] Mc Phee Hamish Scott, Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi and Chaumette Eric, *On the accuracy limits of misspecified delay-Doppler estimation*, Signal Processing, article 108872, vol. 205, April, 2023.
- [J.5] Lubeigt Corentin, Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi and Chaumette Eric, *Untangling first and second order statistics contributions in multipath scenarios*, Signal Processing, vol. 205, Art. no 108868, April, 2023.
- [J.6] Mouret Florian, Hippert-Ferrer Alexandre, Pascal Frédéric and Tournet Jean-Yves, *A Robust and Flexible EM Algorithm for Mixtures of Elliptical Distributions with Missing Data*, IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 71, pp. 1669–1682, April, 2023.
- [J.7] Lacaze Bernard, *Acoustic Absorption by the Atmosphere Explained by Random Propagation Times*, Waves in Random and Complex Media, June, 2023.
- [J.8] Ortega Espluga Lorenzo, Lubeigt Corentin, Vilà-Valls Jordi and Chaumette Eric, *On GNSS Synchronization Performance Degradation under Interference Scenarios: Bias and Misspecified Cramér-Rao Bounds*, Navigation: Journal of the Institute of Navigation, vol. 70 (4), pp. navi.606, July, 2023.
- [J.9] Finzi Anaïs, Perrier Victor, Frances Fabrice and Lochin Emmanuel, *Priority Switching Scheduler*, International Journal of Satellite Communications and Networking, vol. 41, Issue 6, pp. 617–633, November–December, 2023.
- [J.10] Ortega Espluga Lorenzo and Poulliat Charly, *GNSS Channel Coding Structures for Fast Acquisition Signals in Harsh Environment Conditions*, Navigation: Journal of the Institute of Navigation, doi: 10.33012/navi.585, September, 2023.
- [J.11] Lubeigt Corentin, Vincent François, Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi and Chaumette Eric, *Approximate Maximum Likelihood Time-Delay Estimation for Two Closely Spaced Sources*, Signal processing, vol. 210, 109056, September, 2023.
- [J.12] Labsir Samy, Renaux Alexandre, Vilà-Valls Jordi and Chaumette Eric, *Barankin, McAulay–Seidman and Cramér–Rao bounds on matrix Lie groups*, Automatica, vol. 156, pp. 111–199, October 2023.
- [J.13] Leon Arencibia Lorena, Wendt Herwig and Tournet Jean-Yves, *Bounds for the Estimation of Matrix-Valued Parameters of a Gaussian Random Process*, Signal Processing, vol. 211, art. 109106, October, 2023.
- [J.14] Lesouple Julien and Ortega Espluga Lorenzo, *Bayesian EM Approach for GNSS Parameters of Interest Estimation under Constant Modulus Interference*, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, vol. 2024, art. 32, Open Access, Mars, 2024.
- [J.15] Grislain Paul, Auddino Alexia, Barraqué Anna, Lamothe François, Hotescu Oana, Lacan Jérôme, Radzik José and Lochin Emmanuel, *Rethinking LEO Constellations Routing*, International Journal of Satellite Communications and Networking, March, 2024.
- [J.16] Bernabeu Frias Joan Miguel, Ortega Espluga Lorenzo, Blais Antoine, Gregoire Yoan and Chaumette Eric, *On the asymptotic performance of time-delay and Doppler estimation with a carrier modulated by a band-limited signal*, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, vol. 2024 (1), pp. 47, Open Access, April, 2024.
- [J.17] Bellés Andrea, Medina Daniel, Chauchat Paul, Labsir Samy and Vilà-Valls Jordi, *Robust error-state Kalman-type filters for attitude estimation*, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, vol. 2024, art. 75, Open Access, July, 2024.
- [J.18] Allietta Clémence, Condomines Jean-Philippe, Tournet Jean-Yves and Lochin Emmanuel, *HLoP—Hyperbolic 2-Space Local Outlier Probabilities*, IEEE Access, vol. 12, pp. 128509–128518, September, 2024, <https://ieeexplore.ieee.org/document/10666675>.



Appendix



1. PUBLICATION LIST

The list of publications is not strictly limited to publications made in 2023 and 2024 but includes also some publications outside this period, relating to publications of PhDs and post-docs described in the report.

1.1. JOURNAL PAPERS

- [J.19] Mc Phee Hamish Scott, Tournet Jean-Yves, Valat David, Delporte Jérôme, Gregoire Yoan and Paimblanc Philippe, *A Robust Time Scale for Space Applications Using the Student's t -distribution*, Metrologia, vol. 61, number 5, pp. 055010, September, 2024.
- [J.20] Closas Pau, Ortega Espluga Lorenzo, Lesouple Julien and Djurić Petar M., *Emerging Trends in Signal Processing and Machine Learning for Positioning, Navigation and Timing Information: Special Issue Editorial*, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Open Access, September 2024.
- [J.21] Fortunati Stefano and Ortega Espluga Lorenzo, *On the Efficiency of Misspecified Gaussian Inference in Nonlinear Regression: Application to Time-Delay and Doppler Estimation*, Signal processing, vol. 225, December 2024.

1.2. ARTICLES DE CONFÉRENCES

1.2. CONFERENCE PAPERS

- [C.1] Mc Phee Hamish Scott, Tournet Jean-Yves, Valat David, Paimblanc Philippe, Delporte Jérôme and Gregoire Yoan, *A Robust Time Scale Based on Maximum Likelihood Estimation*, In Proc. Institute of Navigation Precise Time and Time Interval Systems and Applications (PTTI), Long Beach, California-USA, January 23-26, 2023.
- [C.2] Sombrin Jacques B., *RF Telecommunication Systems Characterization and Optimization*, In Proc. Indo-French Workshop on Microwave and Photonic Technologies (WS ITM), Madras, India, February 20-22, 2023.
- [C.3] El Haouari Jihane, Picard Gauthier, Pralet Cédric and Roussel Stéphanie, *Planification de tâches d'observation de la Terre sous incertitudes météorologiques*, In Proc. 24ème congrès annuel de la Recherche opérationnelle et aide à la décision en France (ROADEF), Rennes, France, February 20-23, 2023.
- [C.4] Baron Audric, Lambert Pierre-Baptiste, Delande Pauline, Tournet Jean-Yves, Lesouple Julien and Fabre Serge, *Improving AI Monitoring of Early Life Satellites Using Transfer Learning*, In Proc. 17th International Conference on Space Operations (SpaceOps), Dubai, United Arab Emirates, March 6-10, 2023.
- [C.5] Mimouni Kin, Maliet Odile and Antic Julie, *A simple and robust K-factor computation method for GNSS integrity needs*, In Proc. 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), pp. 399-407, Monterey, CA, USA, 24-27 April 2023.
- [C.6] Labsir Samy, Pages Gaël, Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi and Chaumette Eric, *Theoretical Performance Analysis of GNSS Tracking Loops*, In Proc. IEEE/Institute of Navigation (ION) Positioning, Location, and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, California-USA. April 24-28, 2023.
- [C.7] Ortega Espluga Lorenzo, Lubeigt Corentin, Vilà-Valls Jordi and Chaumette Eric, *GNSS L5/E5 Maximum Likelihood Synchronization Performance Degradation under DME Interferences*, In Proc. IEEE/Institute of Navigation (ION) Positioning, Location, and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, California-USA. April 24-28, 2023.
- [C.8] Labsir Samy, Renaux Alexandre, Vilà-Valls Jordi and Chaumette Eric, *Cramér-Rao Bound on Lie Groups with Observations on Lie Groups: Application to SE(2)*, In Proc. 48th IEEE International Conference on Acoustics, Speech, & Signal Processing (ICASSP), Rhodes Island, Greece, June 4-9, 2023.
- [C.9] Zhou Zheng, Accettura Nicola, Prévost Raoul and Berthou Pascal, *Lightweight synchronization to NB-IoT enabled LEO Satellites through Doppler prediction*, In Proc. The 19th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (IEEE WiMob 2023), Montreal, Canada, Canada, 21-23 June 2023.
- [C.10] Akopyan Evelyn, Dhaou Riadh, Lochin Emmanuel, Pontet Bernard and Sombrin Jacques B., *Fair Network Division of Nano-satellite Swarms*, In Proc. IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Florence, Italy, June 2023.
- [C.11] Akopyan Evelyn, Dhaou Riadh, Lochin Emmanuel, Pontet Bernard and Sombrin Jacques B., *On the Network Characterization of Nano-Satellite Swarms09*, In Proc. 28th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2023), Tunis, Tunisia, 9-12 July, 2023.
- [C.12] El Haouari Jihane, Tournet Jean-Yves, Wendt Herwig, Pittet Christelle and Gaucel Jean-Michel, *Approximation et Estimation de Réponses Spectrales d'Instruments*, In Proc. XXIXème Colloque Francophone de Traitement du Signal et des Images (GRETSI), Grenoble, France, August 28-September 1, 2023.
- [C.13] Mangé Valérien, Tournet Jean-Yves, Vincent François, Mirambell Laurent, Manzoni Vieira Fábio and Pilastre Barbara, *Détection de Comportements Anormaux dans des Trajectoires de Navires avec One-Class SVM et Dynamic Time Warping*, In Proc. XXIXème Colloque Francophone de Traitement du Signal et des Images (GRETSI), Grenoble, France, August 28-September 1, 2023.
- [C.14] De Boni Rovella Gastón, Benammar Meryem, Gourmel Delphine and Djelloul Mehdi, *SVM pour la démodulation et le codage conjoints*, In Proc. XXIXème Colloque Francophone de Traitement du Signal et des Images (GRETSI 2023), Grenoble, France, August 28-September 1, 2023.
- [C.15] Labsir Samy, Renaux Alexandre, Vilà-Valls Jordi and Chaumette Eric, *Borne de Cramér-Rao sur groupe de Lie avec observations sur groupe de Lie : application à SO(2)*, In Proc. XXIXème Colloque Francophone de Traitement du Signal et des Images (GRETSI), Grenoble, France, August 28-September 1, 2023.
- [C.16] El Bennoui Youssra, El Mansouri Oumaima, Vidal Fabien, Basarab Adrian and Tournet Jean-Yves, *Recalage et fusion d'images échographiques et par résonance magnétique au service de la chirurgie de l'endométriose*, In Proc. XXIXème Colloque Francophone de Traitement du Signal et des Images (GRETSI 2023), Grenoble, France, August 28-September 1, 2023.
- [C.17] Bellés Andrea, Medina Daniel, Chauchat Paul, Labsir Samy and Vilà-Valls Jordi, *Robust M-Type Error-State Kalman Filters for Attitude Estimation*, In Proc. 2023 31st European Signal Processing Conference (EUSIPCO), pp. 840-844, Helsinki, Finland, 4-8 Sept. 2023.
- [C.18] El Bennoui Youssra, Vidal Fabien, Basarab Adrian and Tournet Jean-Yves, *Joint Registration and Fusion of 3D Magnetic Resonance and 2D Ultrasound Images for Endometriosis Surgery*, In Proc. 31st European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2023), Helsinki, Finland, September 4-8, 2023.
- [C.19] Lesouple Julien and Ortega Espluga Lorenzo, *An EM Approach for GNSS Parameters of Interest Estimation Under Constant Modulus Interference*, In Proc. 31st European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2023), Helsinki, Finland, September 4-8, 2023.

- [C.20] Leon Arencibia Lorena, Wendt Herwig, Tourneret Jean-Yves and Abry Patrice, *A robust model and its EM algorithm for the estimation of the multifractality parameter*, In Proc. 31st European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Helsinki, Finland, September 4-8, 2023.
- [C.21] Labsir Samy, Renaux Alexandre, Vilà-Valls Jordi and Chaumette Eric, *Intrinsic Slepian-Bangs Type Formula for Parameters on LGs with Unknown Measurement Noise Variance*, In Proc. 2023 57th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, pp. 887-891, Pacific Grove, CA, USA, 29 Oct.-1 Nov. 2023.
- [C.22] Bottani Marta, Ferro-Famil Laurent, Mermoz Stéphane, Doblas Juan, Bouvet Alexandre and Koleck Thierry, *New Near Real-Time Deforestation Monitoring Technique Based on Bayesian Inference*, In Proc. 8th International Workshop on Retrieval of Bio & Geo-physical Parameters from SAR Data for Land Applications, Rome, Italy, November 15-17, 2023.
- [C.23] De Boni Rovella Gastón and Benammar Meryem, *Improved Syndrome-based Neural Decoder for Linear Block Codes*, In Proc. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2023), pp. 5689-5694, Kuala Lumpur, Malaysia, December 4-8, 2023.
- [C.24] Bernabeu Frias Joan Miguel, Ortega Espluga Lorenzo, Blais Antoine, Gregoire Yoan and Chaumette Eric, *Time-Delay and Doppler Estimation with a Carrier Modulated by a Band-Limited Signal*, In Proc. IEEE International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP), Los Sueños, Costa Rica, December 10-13, 2023.
- [C.25] El Bennioui Youssra, Bruguier Alexandre, Vidal Fabien, Basarab Adrian and Tourneret Jean-Yves, *Fusion of Ultrasound and Magnetic Resonance Images for Endometriosis Diagnosis: a Non-Parametric Approach*, In Proc. IEEE International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP), Los Sueños, Costa Rica, December 10-13, 2023.
- [C.26] Sombrin Jacques B., Ros Benjamin and Chaumet Aurélien, *Discrimination between Noise and Distortion in EVM Measurements*, In Proc. 2024 102nd ARFTG Microwave Measurement Conference (ARFTG), pp. 1-4, San Antonio, TX, USA, 21-24 Jan. 2024.
- [C.27] Ortega Espluga Lorenzo and Fortunati Stefano, *Misspecified Time-Delay and Doppler Estimation over Non Gaussian Scenarios*, In Proc. ICASSP 2024 - 2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp. 9346-9350, Seoul, Korea, Republic of, 14-19 April 2024.
- [C.28] De Boni Rovella Gastón, Benammar Meryem, Benaddi Tarik and Meric Hugo, *Scalable Syndrome-based Neural Decoders for Bit-Interleaved Coded Modulations*, In Proc. IEEE International Conference on Machine Learning for Communication and Networking (ICMLCN 2024), pp. 341-346, Stockholm, Sweden, May 5-8, 2024.
- [C.29] De Boni Rovella Gastón, Benammar Meryem, Meric Hugo and Benaddi Tarik, *On the Optimality of Support Vector Machines for Channel Decoding*, In Proc. European Conference on Networks and Communications (EuCNC/6G Summit), pp. 463-468, Antwerp, Belgium, June 3-6, 2024.
- [C.30] Akopyan Evelyne, Dhaou Riadh, Lochin Emmanuel, Pontet Bernard and Sombrin Jacques B., *Division Réseau Equitable dans les Essaims de Nanosatellites*, In Proc. Aspects Algorithmiques des Télécommunications et Conception de Protocoles, l'Evaluation de Performance et l'Expérimentation des Réseaux de Communication (AlgoTel-CoRes), Saint-Briac-sur-Mer, France, May 27-31, 2024.
- [C.31] Mc Phee Hamish Scott, Tourneret Jean-Yves, Valat David, Delporte Jérôme, Gregoire Yoan and Paimblanc Philippe, *Exploiting Redundant Measurements for Time Scale Generation in a Swarm of Nanosatellites*, In Proc. European Frequency and Time Forum (EFTF), Neuchâtel, Switzerland, June 25-27, 2024.
- [C.32] Bottani Marta, Ferro-Famil Laurent, Doblas Juan, Mermoz Stéphane, Bouvet Alexandre and Koleck Thierry, *Novel Bayesian Approach Based on Infinite State Markov Chains for Prompt Detection of Forest Loss Using Sentinel-1 Time Series*, In Proc. ESA Dragon Symposium, Lisbon, Portugal, June 24-28, 2024, Best poster (Ecosystems Track).
- [C.33] El Bouch Sara, Labsir Samy, Renaux Alexandre, Vilà-Valls Jordi and Chaumette Eric, *An Intrinsic Modified Cramér-Rao Bound on Lie Groups*, In Proc. 2024 27th International Conference on Information Fusion (FUSION), Venice, Italy, July 7-11, 2024.
- [C.34] Bottani Marta, Ferro-Famil Laurent, Mermoz Stéphane, Doblas Juan, Bouvet Alexandre and Koleck Thierry, *A Statistical Method for Near Real-Time Deforestation Monitoring using Time Series of Sentinel-1 Images*, In Proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Athens, Greece, July 7-12, 2024, Best Student Paper Award (1st price).
- [C.35] Bernabeu Frias Joan Miguel, Ortega Espluga Lorenzo, Blais Antoine, Gregoire Yoan and Chaumette Eric, *On Time-Delay Estimation Accuracy Limit Under Phase Uncertainty*, In Proc. 27th International Conference on Information Fusion, Venice, Italia, July 7-11, 2024.
- [C.36] El Haouari Jihanne, Gaucel Jean-Michel, Pittet Christelle, Tourneret Jean-Yves and Wendt Herwig, *Estimation OF Instrument Spectral Response Functions using Sparse Representations in a Dictionary*, In Proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Athens, Greece, July 7-12, 2024, 3rd price of the Best Student Paper Award.
- [C.37] Ortega Espluga Lorenzo and Fortunati Stefano, *Misspecified Time-Delay and Doppler Estimation Over High Dynamics Non-Gaussian Scenarios*, In Proc. 32nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Lyon, France, August 26-30, 2024.
- [C.38] Boutiyarzyst Younès, Lesouple Julien and Tourneret Jean-Yves, *Robust Hypersphere Fitting from Noisy Data Using Gibbs Sampling*, In Proc. 32nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Lyon, France, August 26-30, 2024.
- [C.39] Cheng Cheng, Yildirim Sinan and Tourneret Jean-Yves, *Auxiliary Particle Filtering with Variational Inference for Jump Markov Systems with Unknown Measurement Noise Covariance*, In Proc. 32nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Lyon, France, August 26-30, 2024.
- [C.40] Bernabeu Frias Joan Miguel, Ortega Espluga Lorenzo, Blais Antoine, Gregoire Yoan and Chaumette Eric, *Delay Estimation with a Carrier Modulated by a Band-Limited Signal*, In Proc. 32nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Lyon, France, August 26-30, 2024.
- [C.41] León-López Kareth, Fabre Serge, Manzoni Vieira Fábio and Tourneret Jean-Yves, *A Multiscale Anomaly Detection Framework for AIS Trajectories via Heat Graph Laplacian Diffusion*, In Proc. 32nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2024), Lyon, France, August 26-30, 2024.
- [C.42] Mangé Valérian, Anezin Yoann, Tourneret Jean-Yves, Vincent François, Mirambell Laurent and Manzoni Vieira Fábio, *Detecting Abnormal Ship Trajectories using Functional Isolation Forests and Dynamic Time Warping*, In Proc. 32nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Lyon, France, August 26-30, 2024.

- [C.43] Mangé Valérien, Tournet Jean-Yves, Vincent François, Mirambell Laurent and Manzoni Vieira Fábio, *Track-to-Track AIS / Radar Association and Uncertainty Estimation by Coherent Point Drift*, In Proc. 32nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Lyon, France, August 26-30, 2024.
- [C.44] Mignot Raphaël, Mangé Valérien, Usevich Konstantin, Clausel Marianne, Tournet Jean-Yves and Vincent François, *Anomaly Detection Using Multiscale Signatures*, In Proc. 32nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Lyon, France, August 26-30, 2024.
- [C.45] El Bennoui Youssra, Halimi Abderrahim, Basarab Adrian and Tournet Jean-Yves, *Fusion of Magnetic Resonance and Ultrasound Images using Guided Filtering: Application to Endometriosis Surgery*, In Proc. 32nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Lyon, France, August 26-30, 2024.
- [C.46] El Haouari Jihane, Tournet Jean-Yves, Wendt Herwig, Gaucel Jean-Michel and Pittet Christelle, *Estimation of Instrument Spectral Response Functions in Presence of Radiometric Errors*, In Proc. 32nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Lyon, France, August 26-30, 2024.
- [C.47] Mc Phee Hamish Scott, Tournet Jean-Yves, Valat David, Delporte Jérôme, Gregoire Yoan and Paimblanc Philippe, *Misspecified Cramer-Rao Bounds for Anomalous Clock Data in Satellite Constellations*, In Proc. 32nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Lyon, France, August 26-30, 2024.
- [C.48] Dubreil Léa, Labsir Samy, Rouanet-Labé Etienne and Pages Gaël, *Recurrent Neural Networks Modelling based on Riemannian Symmetric Positive Definite Manifold*, In Proc. 32nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Lyon, France, August 26-30, 2024.
- [C.49] Bottani Marta, Ferro-Famil Laurent, Mermoz Stéphane, Doblas Juan, Bouvet Alexandre and Koleck Thierry, *New Unsupervised Bayesian Methodology for Timely Detection of Forest Loss in the Brazilian Amazon and Cerrado Woodland Savanna Using Sentinel-1 Time Series Data*, In Proc. Association for Forest Spatial Analysis Technologies (ForestSAT), Rotorua, New Zealand, September 9-13, 2024.
- [C.50] El Haouari Jihane, Gaucel Jean-Michel, Pittet Christelle, Tournet Jean-Yves and Wendt Herwig, *On-Ground and In-Flight Estimation of Instrument Spectral Responses in the Presence of Measurement Errors*, In Proc. International Conference on Space Optics (ICSO), Antibes, France, October 21-25, 2024.
- [C.51] El Bouch Sara, Labsir Samy, Renaux Alexandre, Vilà-Valls Jordi and Chaumette Eric, *Full Slepian-Bangs Formula for Fisher Information on Lie Groups*, In Proc. Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Monterey, California, USA, October 27-30, 2024.
- [C.52] Bottani Marta, Ferro-Famil Laurent, Doblas Juan, Mermoz Stéphane, Bouvet Alexandre and Koleck Thierry, *Advanced Bayesian Method for Timely Small-Scale Forest Loss Detection in the Brazilian Amazon and Cerrado with Sentinel-1 Time-Series*, In Proc. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), Technical Commission III Symposium, Belém, Brasil, November 4-8, 2024.
- [C.53] Issler Jean-Luc, Sombrin Jacques, Paimblanc Philippe, Pla Jean, Desplats Romain, *Ensuring Lunar and Martian In-situ PNT Coexistence with Surface Wireless by Respecting SFCG Recommendations*, in Proc. ION GNSS+ 2025 Conference, Baltimore, USA, September 8-12, 2025.

1.3. BREVETS

1.3. PATENTS

- [B.1] Prévost Raoul and Petiteau David, *Détection de signal en présence d'effet Doppler*, 2024.
- [B.2] Prévost Raoul, Zhou Zheng, Accettura Nicola and Petiteau David, *Communication IoT via un réseau d'accès satellitaire*, 2024.

1.4. THÈSES DE DOCTORAT

1.4. PHD THESES

- [T.1] Verheyde Thomas, *Precise Cooperative Positioning of Low-Cost Mobiles in an Urban Environment*, PhD Thesis, Defended on February 10, 2023.
- [T.2] [T.2] Lubeigt Corentin, *Signal Processing for GNSS Reflectometry*, PhD Thesis, Defended on February 14, 2023.
- [T.3] [T.3] Jerbi Anouar, *Non-Coherent Detection of Continuous Phase Modulation for Low Earth Orbit Satellite IoT Communications Affected by Doppler Shift*, PhD Thesis, Defended on March 14, 2023.
- [T.4] [T.4] Perrier Victor, *LEO/GEO congestion control mechanism based on the contribution of artificial intelligence*, PhD Thesis, Defended on March 16, 2023.
- [T.5] [T.5] Akopyan Evelynne, *Fiabilité de l'Architecture Réseau des Systèmes Distribués sur Essaims de Nanosatellites*, PhD Thesis, Defended on October 18, 2024.
- [T.6] [T.6] Mc Phee Hamish Scott, *Autonomous and Robust Time Scale Algorithm for a Swarm of Nanosatellites*, PhD Thesis, Defended on November 15, 2024.
- [T.7] [T.7] De Boni Rovella Gastón, *Machine learning-based Solutions for Channel Decoding in M2M-type Communications*, PhD Thesis, Defended on December 13, 2024.



2. LISTE DES ÉTUDES

- [E.1] Traitement du signal pour dual caméra et capteurs
Signal processing for dual cameras and sensors
- [E.2] Optimisation de la démodulation AIS
Optimisation of AIS demodulation
- [E.3] Intégrité pour les récepteurs GNSS de nouvelle génération
Integrity for next-generation GNSS receivers
- [E.4] Communication IoT spatiale
Space IoT communication
- [E.5] Traitement de signaux RF en sortie d'un analyseur de spectres
Processing RF signals output from a spectrum analyser
- [E.6] Performances de mesures angulaires d'un système de contrôle d'accès véhicule
Angular measurement performance of a vehicle access control system
- [E.7] Détection temps-réel de comportements GNSS anormaux
Real-time detection of abnormal GNSS behaviour
- [E.8] Estimation conjointe position-écart-horloge
Joint position-deviation-clock estimation
- [E.9] Canalisation par banc de filtres et reconstruction parfaite de signaux
Channelling using filter banks and perfect signal reconstruction
- [E.10] Caractère fractal des non linéarités passives et pentes non entières des produits d'intermodulation
Fractal nature of passive non-linearities and non-integer slopes of intermodulation products
- [E.11] Détection RFI par dictionary learning
RFI detection using dictionary learning
- [E.12] Analyse de la précision de mesure de distance d'un radar FSK de détection d'obstacle
Analysis of the range-measurement accuracy of an FSK obstacle detection radar
- [E.13] Interférences RF entre le PNT in-situ et les liaisons sans fil surfaciques lunaires
RF interference between in-situ PNT and lunar surface wireless links
- [E.14] ELLIOT 2.0
ELLIOT 2.0
- [E.15] Réduction des multitrajets de phase de porteuse par une méthode innovante
Reduction of carrier phase multipath using an innovative method
- [E.16] Analyse de l'intérêt du 5G PRS pour le positionnement par constellation de satellites LEO
Analysis of the benefits of 5G PRS for positioning by means of an LEO satellite constellation
- [E.17] PIRANIA-MMV (projet AID ASTRID)
PIRANIA-MMV (AID ASTRID project)
- [E.18] Swarm network communication protocol
Swarm network communication protocol



2. RESEARCH STUDY LIST

Merci à tous ceux qui ont contribué

Thanks to all contributors

Cédric Baudoin, Eric Chaumette, Riadh Dhaou, Léa Dubreil,
Clément Dudal, Laurent Ferro-Famil, Thierry Floriant,
Julien Lesouple, Emmanuel Lochin, Corinne Mailhes,
Lorenzo Ortega, Philippe Paimblanc, Raoul Prévost,
Jacques Sombrin, Jean-Yves Tourneret.

Traduction

Translation

Coup de Puce Expansion coupdepuce.com

Conception et réalisation

Design and pre-press

Raoul Prévost
Cécile Spadotto www.creatricegraphique.fr

Copyright des illustrations

Illustration copyright

CNES : pp. 1, 13, 46, 56 et 59.

TéSA : pp. 7, 10, 14, 17, 21, 22, 27, 30, 34, 38, 42, 43, 47, 48, 57 et 61.

RAPPORT D'ACTIVITÉ 2023-2024

ACTIVITY REPORT 2023-2024

www.tesa.prdf.fr

TéSA

