

Rapport d'activité

Activity report

2019-2020





Avant-propos

Foreword

Voici le quatrième rapport d'activité du TESA, couvrant la période 2019-2020. Ce rapport, reflet de notre rayonnement scientifique, permet de faire collégialement un point sur nos activités de recherche afin de mieux préparer l'avenir.

Notre excellence dans les domaines d'expertise des communications numériques, des réseaux et du traitement du signal et des images, est encore une fois démontrée par la richesse de ce rapport. Anticiper sur les besoins futurs est le rôle de notre Conseil Scientifique qui, dans le dernier chapitre, nous éclaire sur les thèmes d'avenir de nos domaines d'applications, la localisation et navigation, l'observation de la Terre et les systèmes de communication par satellite, sans oublier l'intérêt et le potentiel de l'intelligence artificielle pour nos futures recherches.

Ce rapport est aussi l'occasion de souligner l'effort de notre association dans l'autofinancement d'actions de recherche, effort concrétisé par la mise en place de deux post doctorants et l'accueil d'un « chercheur invité » de réputation internationale.

Le bilan de ces deux dernières années peut aussi s'exprimer en chiffres : 7 thèses soutenues, environ 80 articles publiés, 3 brevets déposés, 35 études effectuées, 12 thèses en cours fin 2020, 4 séminaires scientifiques et 2 éditions des Journées Scientifiques.

Enfin je profite de cet avant-propos pour saluer l'arrivée parmi nos membres en 2019 de SpaceAble issu du monde du New Space, et en 2021 de l'Institut Polytechnique des Sciences Avancées (IPSA).

Merci donc à tous, auteurs du rapport et acteurs de ce bilan qui illustre bien le dynamisme, la créativité et la rigueur scientifique de notre association.

Franck Durand-Carrier,
Président de TESA

This is TeSA's fourth report on its activities, covering the period 2019-2020. It enables us to jointly review the state of our research activities to improve our plans for the future, while also highlighting our scientific reputation and influence.

Our expertise in the fields of digital communications, networks and signal and image processing is again demonstrated by the wealth of information in the report. Anticipating future needs is the role of our Scientific Committee, which in the last chapter sheds light on promising technologies for our fields of application: positioning and navigation, Earth observation, and satellite communication systems, with a special focus on the interest and potential of artificial intelligence for our future research.

The report is also an opportunity to underline the efforts of our association to self-finance its research activities. This self-financing has enabled the establishment of two post-doctoral students and the hosting of an internationally renowned "visiting researcher".

The achievements of the last two years can also be expressed in a few figures: 7 theses defended, about 80 articles published, 3 patents filed, 35 studies carried out, 12 theses in progress at the end of 2020, 4 scientific seminars (stopped during the health crisis) and 2 editions of Science Days.

Finally, I would like to take advantage of this foreword to welcome new members: SpaceAble from the world of New Space in 2019, and the *Institut Polytechnique des Sciences Avancées* (IPSA) in 2021.

Thank you to the authors and all those involved in this report, which once again illustrates the dynamism, creativity and scientific rigour of our association.

Franck Durand-Carrier,
President of TeSA

■	Avant-propos	1
	Foreword	
■	Introduction	3
	Introduction	
●	TéSA, c'est quoi ?	3
	What is TeSA?	
●	Comment lire ce rapport.....	4
	How should this report be read?	
●	Cartographie des activités TéSA	5
	Kaleidoscope Map of TeSA activities	
■	Activités scientifiques	9
	Scientific activities	
●	Traitement du signal et des images	9
	Signal and Image processing	
●	Communications numériques	25
	Digital communications	
●	Réseaux	33
	Networking	
●	Vie du laboratoire	42
	Laboratory life	
●	Postdocs TéSA	47
	TeSA Postdocs	
●	Collaborations.....	50
	Collaborations	
●	Rayonnement de TéSA	52
	TeSA outreach	
■	Tendances et perspectives.....	55
	Trends and perspectives	
●	Localisation et navigation	57
	Positioning and navigation	
●	Observation de la Terre.....	60
	Earth observation	
●	Systèmes de communication par satellite	63
	Satellite communications	
●	L'Intelligence artificielle au service de TéSA.....	65
	Artificial Intelligence at the service of TeSA	
■	Conclusion	67
	Conclusion	



Introduction

Introduction

TéSA, c'est quoi ?

Le laboratoire coopératif TéSA a été créé en 2004, sous forme d'une association loi 1901 à but non lucratif, avec pour objectif, inscrit dans ses statuts, de mener des travaux de recherche dans le domaine des télécommunications spatiales et aéronautiques et dans les domaines connexes.

Durant la période 2019-2020, l'association TéSA compte des membres associés académiques comme l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC), l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE-SUPAERO), l'Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse-INP) et l'Institut des Mines Télécom Atlantique (IMT Atlantique) ainsi que des membres partenaires : des industriels comme Thales Alenia Space et Collins Aerospace, la fondation Institut de Recherche Technologique Saint Exupéry (IRT Saint Exupéry), un institutionnel, le Centre National des Études Spatiales (CNES) et une start-up, SpaceAble.

L'association fonctionne comme un laboratoire de recherche, piloté par un Conseil Scientifique et un Conseil d'Administration et accueillant dans ses murs des ingénieurs de recherche ainsi que les enseignants-chercheurs des écoles partenaires qui peuvent venir consacrer une part de leur temps de recherche dans TéSA. De plus, une quinzaine de doctorants et post-doctorants sont rattachés à TéSA et encadrés par les professeurs des écoles partenaires.

Ses domaines d'expertise couvrent à la fois les communications numériques, le traitement du signal et des images, ainsi que les réseaux. Les domaines d'applications des études et des thèses TéSA se retrouvent dans les systèmes de communications spatiales, les systèmes de communications aéronautiques, dans l'observation de la Terre, dans la localisation et la navigation, et dans les domaines apparentés.

What is TeSA?

The TeSA cooperative laboratory was created in 2004 as a non-profit association under the French Act of 1901, with the objective, enshrined in its articles, of conducting research in the field of space and aeronautical telecommunications and related fields.

During the 2019-2020 period, the TeSA association had academic associate members such as the *École Nationale de l'Aviation Civile* (ENAC), the *Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace* (ENAC), the *Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace* (ISAE-SUPAERO), the *Institut National Polytechnique de Toulouse* (Toulouse-INP) and the *Institut des Mines Télécom Atlantique* (IMT Atlantique) as well as partner members: manufacturers such as Thales Alenia Space and Collins Aerospace, the *Institut de Recherche Technologique Saint Exupéry* (IRT Saint Exupéry), which is a foundation, and also the French Space Agency (CNES) and a start-up, SpaceAble.

The association functions as a research laboratory, managed by a Scientific Committee and a Board of Directors, and welcomes research engineers as well as teacher/researchers from the partner schools, who can come and spend part of their research time in TeSA. In addition, some fifteen PhD and post-doctoral students are affiliated with TeSA and supervised by professors from the partner schools.

Its fields of expertise include digital communications, signal and image processing, and networks. The fields in which TeSA studies and theses apply are space communications systems, aeronautical communications systems, Earth observation, positioning and navigation, and related fields.

Plus de détails peuvent être trouvés sur le site www.tesa.prd.fr, en particulier en consultant la cartographie de notre expertise et de nos domaines d'applications, mise à jour régulièrement par le Conseil Scientifique de TéSA, telle que décrite page 5.

Les rapports d'activité précédents de TéSA sont aussi disponibles sur le site de TéSA.

Comment lire ce rapport

Ce rapport d'activités couvre la période 2019-2020 de TéSA et fait suite aux précédents rapports que le lecteur pourra retrouver sur www.tesa.prd.fr. Nous vous recommandons en priorité la lecture de la section suivante apportant une vision générale des activités TéSA. Celle-ci présente au travers d'exemples la structuration de l'activité en domaines d'application et domaines d'expertise, à travers ce que nous appelons « le kaléidoscope des activités TéSA ».

Ensuite, nous avons choisi de présenter les activités scientifiques de TéSA en partant des trois domaines d'expertise « Traitement du signal et image », « Communications numériques » et « Réseaux ». En effet, cette organisation correspond souvent à celle des équipes de recherche associées. Chaque domaine est introduit par un résumé des activités du domaine. La présentation est complétée par une liste des projets, des thèses soutenues ainsi que des publications scientifiques et brevets.

Nouveauté de ce rapport 2019-2020, nous avons introduit une rubrique dont le succès nous rend particulièrement fiers. Pour cette édition nous avons choisi de faire un focus sur les 2 post-docs, financés sur la période par TéSA et un de ses partenaires.

La dernière partie du rapport d'activités résume les tendances actuelles qui constituent autant de défis techniques et scientifiques que TéSA souhaite relever.

Enfin, il est important de mentionner que ce rapport d'activité a été préparé par le Conseil Scientifique de TéSA. Celui-ci est constitué de représentants de tous les acteurs de TéSA : partenaires académiques et industriels, ingénieurs de recherche, doctorants et experts scientifiques. Le conseil scientifique se réunit 5 fois par an et effectue un travail de fond sur des chantiers dits « prioritaires ». Ce rapport d'activité est l'aboutissement d'un de ces chantiers prioritaires.

More details can be found at www.tesa.prd.fr, in particular by consulting the breakdown of our expertise and application areas, which is regularly updated by the TeSA Scientific Committee, as described on page 5.

Previous activity reports are also available on the TéSA website.

How should this report be read?

This report on the activities of the TeSA laboratory covers the period 2019-2020. The previous reports can be found at www.tesa.prd.fr. We recommend that you first read the next section which gives an overview of TeSA activities. Examples illustrate how activities are structured into fields of application and fields of expertise, through what is called a "kaleidoscope map".

After that, we outline the scientific activities of the TeSA laboratory, concerning the three particular fields of expertise: "Image and signal processing", "Digital communications" and "Networking". This breakdown often matches that of the associated research teams. Each field is introduced by a summary of its activities. The presentation concludes with a list of projects and PhDs that have been supported by TeSA, together with scientific publications and patents.

A new feature has been introduced for this 2019-2020 report, a new section whose success is a considerable source of pride. For this edition, we have chosen to focus on the two post-doctoral studies funded over the period by TeSA and one of its partners.

The last section of the report contains a summary of current trends, namely technical and scientific challenges that TeSA would like to take up.

Finally, it is important to note that this activity report was prepared by the TeSA Scientific Committee. This is made up of representatives of academic and industrial partners, the TeSA executive board and affiliated experts. The Scientific Committee meets five times a year for in-depth work on "priority" activities defined by the committee. This activity report is the result of one of these priority activities.

Cartographie des activités TéSA

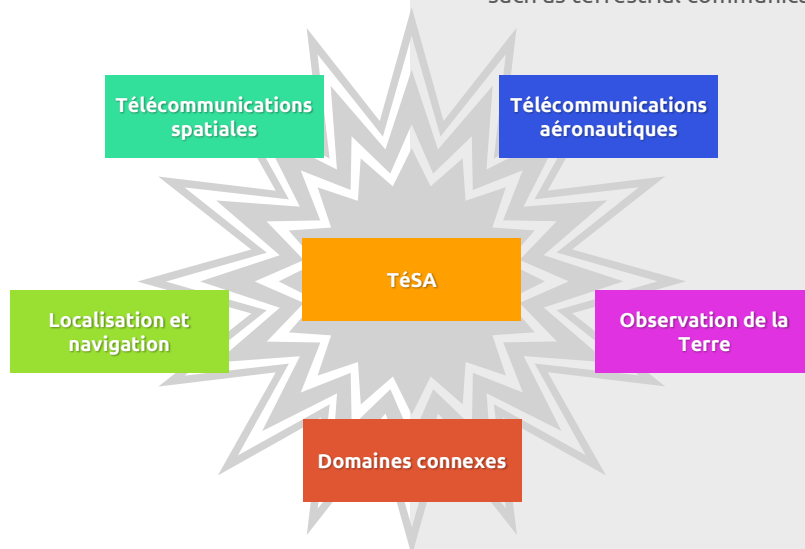
La cartographie des activités de TéSA a été dessinée par le Conseil Scientifique : elle présente les domaines d'application et les domaines d'expertise de TéSA.

Cette cartographie est destinée à être vivante et évolue au fur et à mesure de l'évolution des activités scientifiques de TéSA mais reste organisée en plusieurs niveaux comme expliqué dans les deux sections suivantes.

Domaines d'application

Les domaines d'application de TéSA ont été décrits à l'aide d'une hiérarchie à trois niveaux.

Au premier niveau, on trouve quatre principaux **domaines d'application** qui sont « les systèmes de communications spatiales », « les systèmes de communications aéronautiques », « la localisation et la navigation » et « l'observation de la Terre ». Un cinquième domaine a été rajouté récemment, baptisé « domaines connexes », pour inclure toutes les activités de TéSA menées en parallèle de ses quatre principaux domaines, profitant de l'expertise acquise dans le spatial et l'aéronautique, pour répondre à des besoins dans les communications terrestres par exemple.



Les cinq domaines d'application dans TéSA.
TeSA's five fields of application.

Le deuxième niveau de cette hiérarchie présente les principales **thématiques scientifiques** abordées dans chaque domaine d'application. Par exemple, le deuxième niveau de « l'observation de la Terre » laisse apparaître des thématiques qui ont été abordées dans TéSA, comme l'imagerie

Kaleidoscope Map of TeSA activities

The multi-level map of TeSA activities was drawn up by the Scientific Committee. The Kaleidoscope map below shows TeSA's fields of expertise and application.

It was designed to be dynamic and evolve to keep pace with the changing scientific activities at TeSA but is still broken down into several levels as explained in the following two sections.

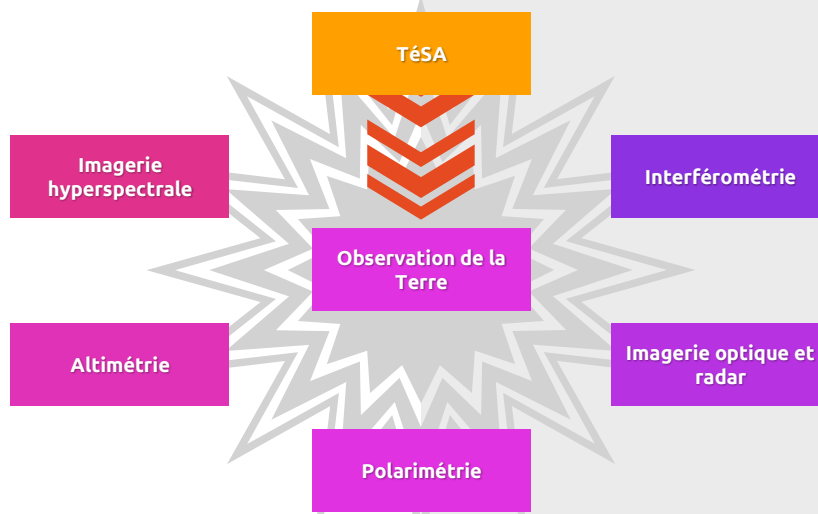
Fields of application

TeSA's fields of application have been ranked according to three levels.

The first level has four primary **fields of application**, "satellite communication systems", "aeronautical communication systems", "positioning and navigation", and "Earth observation". A fifth field has recently been added, named "related fields", to include all activities performed in parallel of the four main areas by taking advantage of satellite and aeronautical expertise to address needs in areas such as terrestrial communications.

The second level in this ranking shows the main **scientific topics** covered in each application field. For instance, the level below "Earth Observation" displays topics that have been addressed at TeSA, namely hyperspectral imaging, altimetry, polarimetry, optical and radar imaging and interferometry, either through PhD theses or industrial studies.

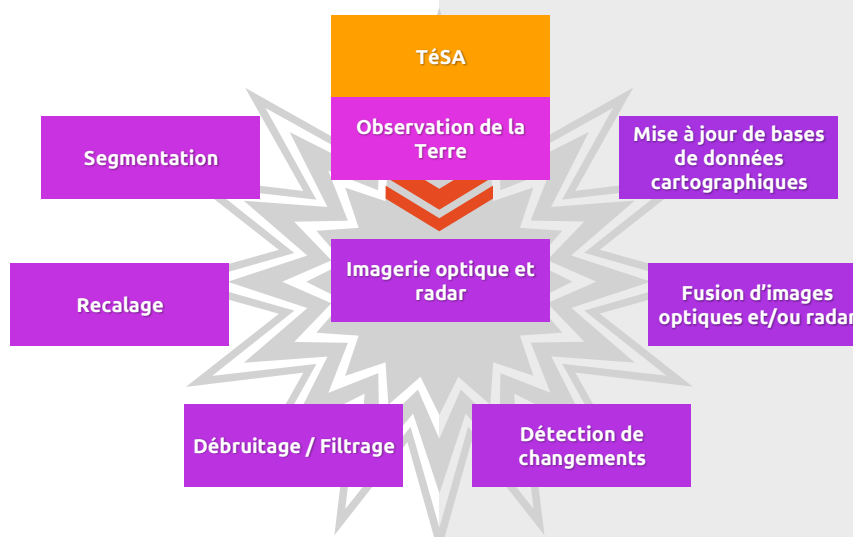
hyperspectrale, l'altimétrie, la polarimétrie, l'imagerie optique et radar et l'interférométrie, que ce soit à travers des thèses ou des études.



Les thématiques scientifiques du domaine observation de la Terre.
Scientific topics in the Earth observation field.

Enfin le troisième niveau présente les **projets** associés à chaque thématique. Toujours à titre d'exemple, dans le domaine de « l'observation de la Terre », sous la thématique « imagerie optique et radar », les projets qui se sont déroulés dans TéSA peuvent se placer sous 6 axes, comme présenté ci-dessous.

Finally, in the third level we present the **projects** associated with each topic. Again, as an example, in the field of "Earth observation", under the "optical and radar imagery" topic, the projects which were undertaken at TeSA can be divided into 6 themes, as shown below.



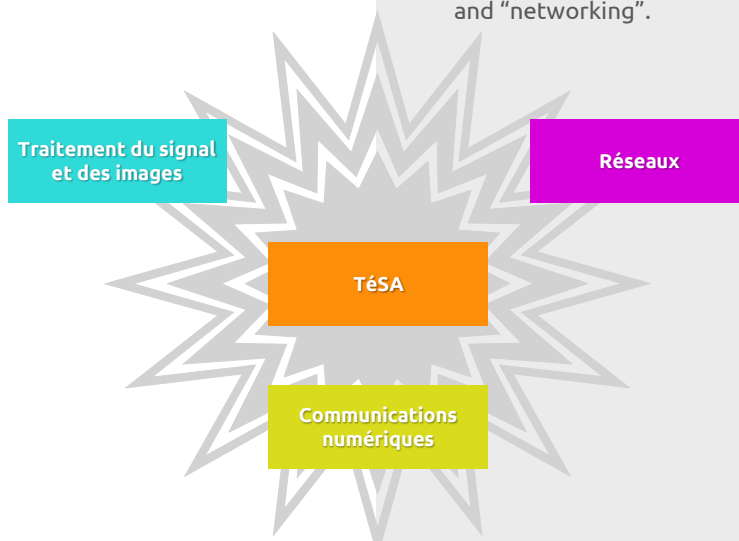
Les projets associés à la thématique imagerie optique et radar.
Projects in the optical and radar imagery topic.

Cette cartographie interactive se retrouve sur le site web de TéSA à l'adresse <http://www.tesa.prd.fr/application-domains-tesa.p4.html>.

This interactive kaleidoscope map may be found on the TeSA website at <http://www.tesa.prd.fr/application-domains-tesa.p4.html>.

Domaines d'expertise

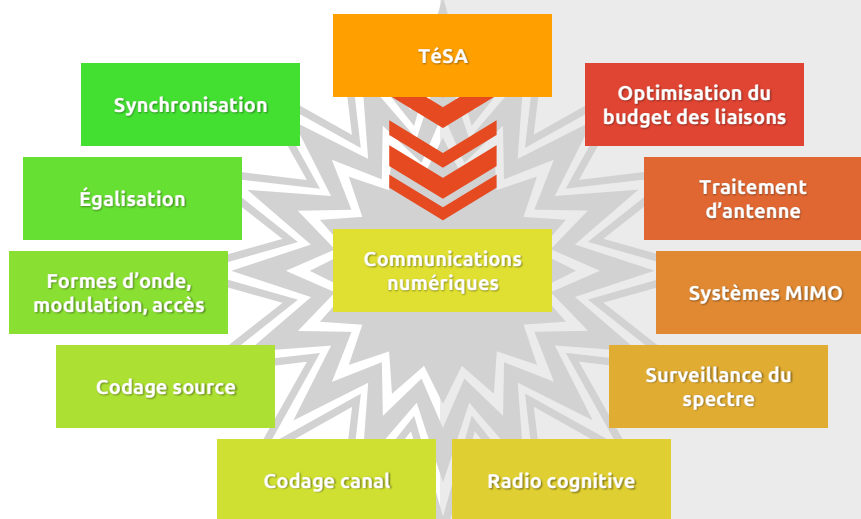
Pour compléter les domaines d'application du laboratoire TéSA, une description de ses domaines d'expertise a également été effectuée. Ces domaines d'expertise sont au nombre de 3 : le « traitement du signal et des images », les « communications numériques » et les « réseaux ».



Les trois domaines d'expertise de TéSA.
TeSA's three fields of expertise.

Une architecture à trois niveaux a également été retenue pour ces domaines d'expertise. Chaque domaine est divisé en **compétences scientifiques** qui regroupent divers **sujets de recherche**.

Ainsi, par exemple, le domaine d'expertise « communications numériques » met en évidence une dizaine de compétences scientifiques telles qu'illustrées ci-dessous.



Les compétences scientifiques du domaine communications numériques.
Scientific skills in the digital communications field.

Fields of expertise

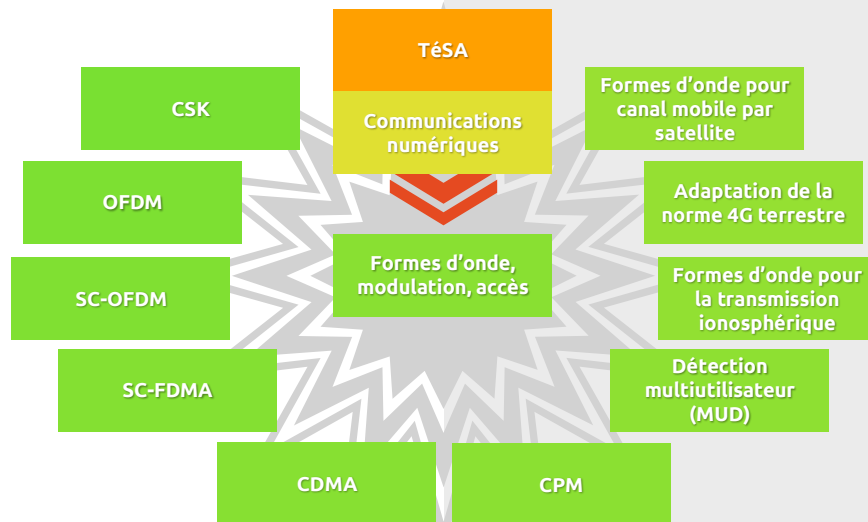
In addition to the fields of application of the TeSA laboratory, its fields of expertise have also been described. These fields of expertise are "image and signal processing", "digital communications" and "networking".

A three-level architecture has also been adopted for these fields of expertise. Each field is split into **scientific skills**, which combine various **research subjects**.

Thus, for example, the field of expertise, "digital communications", highlights ten or so scientific skills as shown below.

Et si on souhaite connaître les sujets de recherche abordés dans la compétence « formes d'onde, modulation, accès » par exemple, on trouve une dizaine de sujets de recherche dans le 3^e niveau de la cartographie, comme présenté ci-après.

Then, if you wish to know which research subjects correspond to the skill "waveforms, modulation, access", for instance, you will find about ten research subjects in the 3rd level of the kaleidoscope map, as shown below.



Les sujets de recherche de la compétence formes d'onde, modulation, accès.
Research subjects in the waveforms, modulation, access scientific skill.

Pour plus d'informations, ne pas hésiter à consulter la page internet
<http://www.tesa.prd.fr/our-expertise-tesa.p5.html>.

Readers may find more information at
<http://www.tesa.prd.fr/our-expertise-tesa.p5.html>.



Activités scientifiques

Scientific activities

Traitement du signal et des images

En 2019-2020, TéSA a mené des activités dans ses thématiques phares présentes depuis la création de TéSA, portant sur la **localisation**, la **navigation** et l'**observation de la Terre**. TéSA a continué également de développer des méthodes de **traitement statistique du signal** pour d'autres applications qui sont décrites dans cette partie. De plus, des activités plus récentes liées à l'apprentissage statistique ou apprentissage automatique (**machine learning**) et à la **détection d'anomalies** ont pris une part de plus en plus importante.

Synthèse des travaux

LOCALISATION ET NAVIGATION

Il existe de nombreuses technologies qui permettent de répondre aux besoins variés en matière de positionnement et de navigation, depuis les centrales inertiels jusqu'aux différents récepteurs de radionavigation aéronautiques en passant par l'Ultra Wide Band utilisé pour la navigation en intérieur. Cependant, du fait de l'affinité de TéSA pour les systèmes spatiaux, c'est sur les systèmes de navigation par satellites (*Global Navigation Satellite Systems – GNSS*) que se sont focalisés les travaux réalisés au sein du laboratoire en matière de navigation.

De fait, le GNSS est désormais disponible au plus grand nombre, via les récepteurs dits « bas coût » installés dans les voitures, les smartphones etc. Toutefois, ces systèmes ne permettent pas d'atteindre la précision et la qualité de service attendue, en particulier dans des environnements contraints, comme les canyons urbains. En effet, en raison des obstructions, dues par exemple à la présence d'immeubles, les multitrajets occasionnés se rajoutent au trajet direct, complexifiant le traitement du signal reçu. Ce problème est encore plus important dans le

Signal and Image processing

During the period 2019-2020, TeSA carried out activities in its core themes, present since the creation of TeSA, relating to **positioning**, **navigation** and **Earth observation**. TeSA also continues to develop **statistical signal-processing** methods for other applications, which are described in this section. In addition, more recent activities related to statistical learning, machine learning and **anomaly detection** are becoming increasingly important.

Summary of work

POSITIONING AND NAVIGATION

There are many technologies available to meet various positioning and navigation needs, from inertial units to aeronautical VOR/DME and Ultra-Wide Band for indoor navigation. However, due to TeSA's affinity for space systems, the focus of the laboratory's work on navigation has been on Global Navigation Satellite Systems (GNSS).

In fact, GNSS is now available to the general public, via so-called "low-cost" receivers installed in cars, smartphones, etc. However, these systems do not provide the desired accuracy and quality of service, especially in constrained environments such as urban canyons. Indeed, because of obstructions, due for example to buildings, the multiple paths caused are added to the direct path, complicating the processing of the received signal. This problem is even more important in the context of autonomous vehicles for which the

contexte des véhicules autonomes où la précision et la fiabilité des mesures de localisation sont des points cruciaux. Ce problème d'actualité a poussé le laboratoire TéSA à définir et proposer un sujet de thèse en vue d'améliorer les performances des systèmes de localisation, en permettant de limiter l'effet des multitrajets sur les mesures GNSS.

Cette thèse, réalisée par Julien Lesouple, a été consacrée au développement de nouvelles méthodes de navigation par satellites exploitant le caractère parcimonieux des multitrajets [J-TSI-4] et [articles publiés en 2018, téléchargeables sur le site de TéSA]. Cette hypothèse de parcimonie est vérifiée lorsqu'il existe un nombre suffisant de signaux GNSS reçus en ligne directe. Elle permet d'utiliser des méthodes d'estimation performantes qui ont donné des résultats très prometteurs pour la navigation par satellites.

Deux autres méthodes de lutte contre les multitrajets ont été évaluées par TéSA au cours de la période considérée, dans le cadre d'études R&T CNES [E-TSI-1], [E-TSI-2]. La première consiste à explorer l'intérêt de la décomposition en ondelettes ou en paquets d'ondelettes du signal GNSS en sortie des corrélateurs. Cette étude a notamment permis de valider l'intérêt d'une décomposition en paquets d'ondelettes non décimées et de proposer une famille génératrice de filtres d'analyse et de synthèse, adaptée à cette décomposition. L'autre méthode proposée est l'utilisation du cepstre, outil connu en traitement du signal, largement utilisé dans la détection d'échos (sonores ou autres) mais très peu utilisé en contexte GNSS. Une méthode originale basée sur le cepstre a été proposée, validée sur des signaux simulés, démontrant des performances intéressantes en termes de

accuracy and reliability of positioning measurements are crucial. This topical problem led the TeSA laboratory to define and propose a thesis topic with a view to improving the performance of positioning systems by limiting the multipath effect on GNSS measurements. The thesis undertaken by Julien Lesouple was devoted to the development of new satellite navigation methods exploiting the parsimonious character of multipaths [J-TSI-4] and [articles published in 2018, downloadable on the TeSA website]. This parsimony assumption is verified when a sufficient number of GNSS signals are received in a direct line of sight. It allows the use of powerful estimation methods that have given very promising results for satellite navigation.

Two other methods of compensating for the multipath effect were evaluated by TeSA during the period under review, in the framework of CNES R&T studies [E-TSI-1], [E-TSI-2]. The first consists in exploring the interest of decomposing the GNSS signal at the output of the correlators into wavelets or wavelet packets. In particular, this study validated the interest of a decomposition into undecimated wavelet packets and proposed a generative range of analysis and synthesis filters, adapted to this decomposition. The other method proposed is the use of the cepstrum, a well-known signal processing tool, widely used for the detection of echoes (sound or other) but very little used in the GNSS context. An original method based on the cepstrum has been

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

WHERE ARE THEY NOW?



Après avoir soutenu sa thèse à TéSA en 2015, et fait un post-doc à l'IRIT, Jorge Prendes travaille pour MathWorks à Cambridge (UK) en tant qu'ingénieur logiciel sénior. Son travail à MathWorks concerne le deep learning dans MATLAB et le lien entre MATLAB et les services du Cloud. Dans son temps libre, Jorge aime contribuer à la communauté open source WebAssembly.

Since his PhD, defended in 2015, and a post-doc at IRIT, Jorge Prendes has been working for MathWorks in Cambridge UK as a Senior Software Engineer. His work at MathWorks includes MATLAB's deep learning capabilities and MATLAB's integration with Cloud services. In his spare time Jorge likes to contribute to the open source WebAssembly community.

JORGE PRENDES

détection des multitrajets à des niveaux de bruit représentatifs de l'application visée.

Si les milieux urbains constituent un environnement de réception plutôt contraignant, on y trouve aussi des signaux d'opportunité qui, hybridés avec le GNSS, permettent d'améliorer la performance globale de positionnement. C'est ainsi qu'Anne-Marie Tobie s'est consacrée, au cours de sa thèse, à l'étude de l'hybridation du GNSS avec les signaux 5G, en cours de déploiement [C-TSI-10], [C-TSI-27]. Pour cela, un modèle de sorties de corrélateur 5G en environnement multitrajets a été développé, des schémas d'hybridation GNSS/5G ont été analysés et différentes techniques d'amélioration pour l'obtention des mesures de pseudo-distance des signaux GNSS et des signaux 5G ont été développées.

Mais les multitrajets ne sont pas les seules sources de perturbation du GNSS, alors que la précision et la fiabilité du positionnement sont aujourd'hui d'une importance capitale dans de nombreuses applications. Aussi une étude post-doctorale, réalisée par Lorenzo Ortega (jeune docteur formé à TéSA) dans le cadre d'un cofinancement TéSA et ISAE-SUPAERO, a cherché à fournir une approche statistique du traitement des signaux pour la conception de systèmes de navigation robustes [E-TSI-13]. Les sources de perturbations prises en compte dans cette étude vont des environnements contraints aux interférences en passant par la scintillation ionosphérique. Aussi, les moyens considérés sont répartis sur les segments spatial et utilisateur du GNSS : d'une part, on cherche à déterminer le couple signal/code qui maximise la performance du système pour un type de perturbation donné, et d'autre part, on intègre les résultats les plus récents en matière d'estimation, détection et filtrage robustes dans la conception du récepteur [J-TSI-19], [J-TSI-20], [J-TSI-21], [J-TSI-24], [C-TSI-23], [C-TSI-25], [C-TSI-31], [C-TSI-32] et [articles publiés après 2020, téléchargeables sur le site de TéSA].

Une autre piste classique d'amélioration des performances de positionnement GNSS est l'utilisation de la phase de la porteuse des signaux. Cette méthode, utilisée dans le domaine du positionnement précis, permet théoriquement d'atteindre une précision centimétrique, mais l'ambiguïté des signaux de phase rend sa mise en œuvre difficile. Une alternative consiste à améliorer la précision des mesures de code en exploitant des codes rapides : cette technique a été exploitée pour la réflectométrie GNSS (GNSS-R), dans le cadre d'une étude R&T du CNES, en partenariat avec M3 Systems [E-TSI-3]. La réflectométrie est une méthode qui utilise la réflexion d'une onde pour en déduire des informations sur le système ou le milieu

proposé et validé sur des signaux simulés et a obtenu de bonnes performances en termes de détection de multipath à des niveaux de bruit représentatifs de l'application visée.

While urban settings offer a rather constrained reception environment, there are signals of opportunity which, when hybridised with GNSS, can improve overall positioning performance. Thus, while reading for her thesis, Anne-Marie Tobie studied the hybridisation of GNSS with 5G signals, which are currently being deployed [C-TSI-10], [C-TSI-27]. For this purpose, a model of 5G correlator outputs in a multipath environment has been developed, GNSS/5G hybridisation schemes have been analysed and different enhancement techniques for obtaining pseudo-range measurements of GNSS and 5G signals have been developed.

But multipaths are not the only source of GNSS interference, while positioning accuracy and reliability are of paramount importance in many applications today. Consequently, a post-doctoral study, carried out by Lorenzo Ortega (a young DSc trained at TeSA) with co-financing by TeSA and ISAE-SUPAERO, aims to provide a statistical approach to signal processing for the design of robust navigation systems [E-TSI-13]. The sources of perturbation considered in this study, range from constrained environments to interference and ionospheric scintillation. Consequently, the means envisaged concern both the space and user segments of GNSS: the signal/code pair that maximizes the system performance for a given type of perturbation must first be determined, and the most recent results in robust estimation, detection and filtering in the receiver design can then be incorporated [J-TSI-19], [J-TSI-20], [J-TSI-21], [J-TSI-24], [C-TSI-23], [C-TSI-25], [C-TSI-31], [C-TSI-32] and [papers published after 2020, downloadable from the TeSA website].

Another classic way of improving GNSS positioning performance is to use the signal carrier phase. This method, used in the field of precise positioning, theoretically allows centimetre accuracy to be achieved, but the ambiguity of the phase signals makes it difficult to implement. An alternative is to improve the accuracy of code measurements by exploiting fast codes: this technique has been used for GNSS reflectometry (GNSS-R), in the framework of a CNES R&T study, in partnership with M3 Systems [E-TSI-3]. Reflectometry is a method which uses the reflection of a wave to deduce information about the system or medium under consideration.

considéré. Elle est ainsi appliquée dans le domaine de l'altimétrie mais aussi pour déterminer la structure de la surface réfléchissante. Plus précisément, la réflectométrie GNSS est basée sur l'observation à la fois des signaux reçus directement au niveau de l'antenne et ceux acquis après réflexion sur la surface de la Terre (surface terrestre ou aquatique).

Enfin, malgré son nom, le GNSS n'est pas disponible partout : une étude réalisée pour le CNES s'intéresse à la problématique posée par une mission future de nanosatellites, destinés à être lancés sous forme d'un « essaim » autour de la Lune, afin de pouvoir observer l'espace (et divers phénomènes), loin de toute pollution terrestre. Une fois lancés, les nanosatellites doivent être capables de se positionner et de se synchroniser en temps les uns par rapport aux autres. Ce type de mission pose le problème de positionnement et de synchronisation des nanosatellites les uns par rapport aux autres car autour de la Lune, aucun système GNSS n'est disponible. Il est donc nécessaire de « réinventer » un système de positionnement et de synchronisation. Cette étude [E-TSI-4], qui a connu des suites aussi bien sous forme de nouvelle étude que de proposition de thèse a apporté des premiers éléments de réponse au problème posé. Ces résultats ont été présentés au cours de la journée innovation 2020 du CNES, consacrée aux essais de nanosatellites.

OBSERVATION DE LA TERRE

L'observation de la Terre nourrit des problématiques du traitement du signal et des images que TéSA explore depuis de nombreuses années.

Côté traitement du signal, plusieurs travaux ont porté sur l'altimétrie conventionnelle. Les données altimétriques issues d'un instrument à bord d'un satellite comme Sentinel 2 permettent d'estimer des signaux d'anomalie du niveau de mer (*Sea Level Anomaly* – SLA) en mesurant la hauteur de mer et en soustrayant le profil moyen. Ces signaux permettent d'étudier divers phénomènes océaniques, à plusieurs échelles, en analysant leur densité spectrale de puissance (DSP) qui a une forme très particulière, concentrée aux très basses fréquences. L'étude menée par TéSA, [E-TSI-5], en continuité des études précédentes effectuées avec le CNES, consiste à améliorer l'estimation des paramètres spectraux caractéristiques de ces signaux par rapport à la technique standard qui estime la DSP par périodogramme. La solution proposée dans cette étude repose sur une revisite de la transformée de Fourier qui concentre son analyse sur le support d'intérêt de la DSP des signaux altimétriques. En parallèle, l'intérêt de la décomposition modale empirique (*empirical modal decomposition* – EMD) a aussi été étudié.

It is thus applied in altimetry but also for determining the structure of the reflecting surface. More precisely, GNSS reflectometry is based on the observation of both signals received directly by the antenna and those acquired after reflection from the Earth's surface (land or water surface).

Finally, despite its name, GNSS is not available everywhere: a study carried out for CNES looks at the problem posed by a future mission of nanosatellites, intended to be launched in the form of a 'swarm' around the Moon, in order to be able to observe space (and various phenomena), far from any earthly pollution. Once launched, the nanosatellites must be able to position and synchronise themselves in time with each other. This type of mission poses the problem of positioning and synchronising the nanosatellites with each other, as no GNSS system is available around the Moon. It is therefore necessary to "re-invent" a positioning and synchronisation system. This study [E-TSI-4], which has been followed up both as a new study and as a thesis proposal, has provided some initial answers to the problem posed. These results were presented at the CNES Innovation Day 2020, dedicated to nanosatellite swarms.

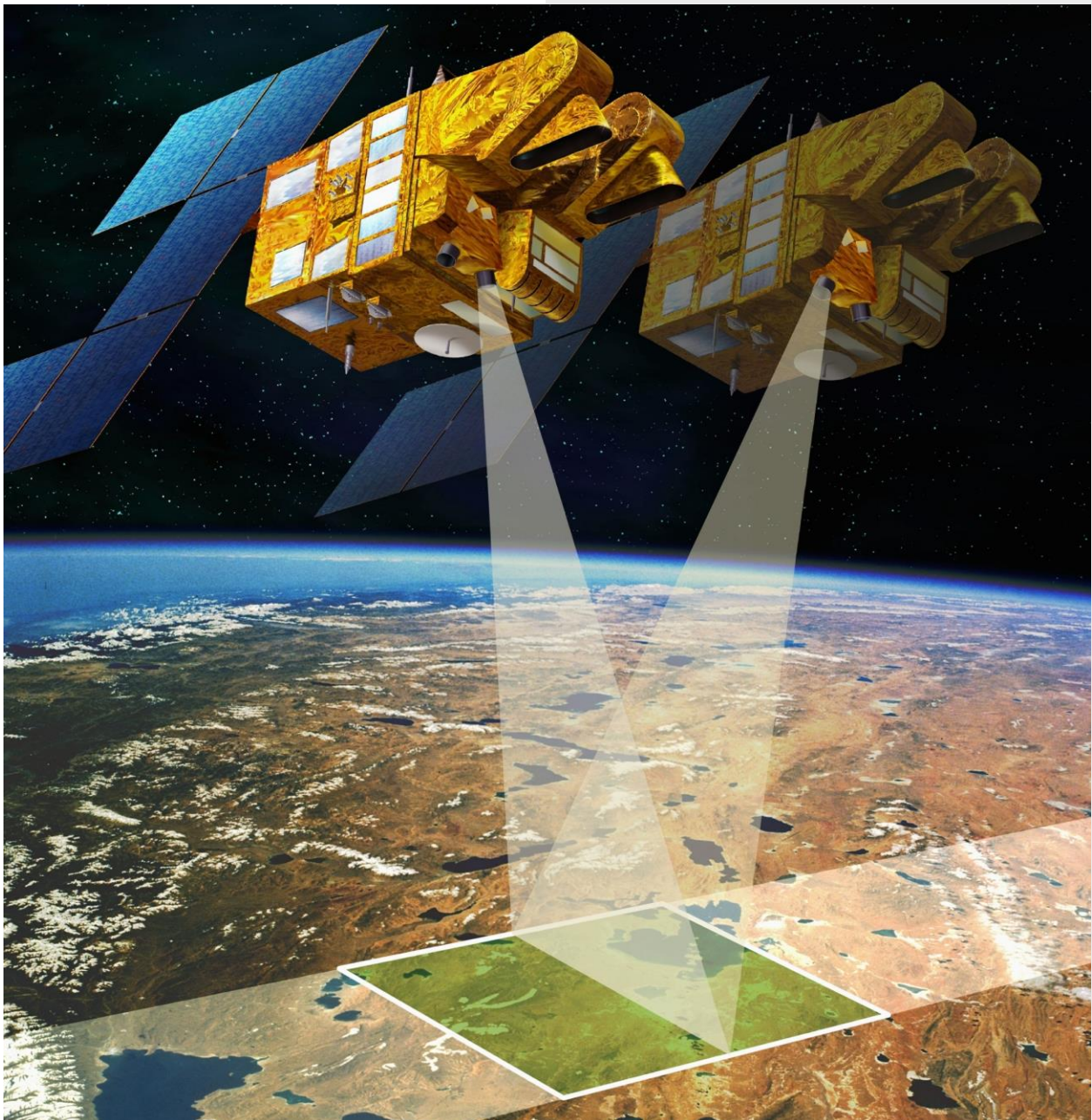
EARTH OBSERVATION

The observation of the Earth raises issues of signal and image processing that TeSA has been exploring for many years.

On the signal processing side, several research projects have been carried out on conventional altimetry. Altimetry data from a satellite instrument such as Sentinel 2 can be used to estimate Sea Level Anomaly (SLA) signals by measuring the sea surface height and subtracting the mean profile. These signals are used to study various ocean phenomena, at several scales, by analysing their power spectral density (PSD), which has a very particular shape, concentrated at very low frequencies. The study carried out by TeSA, [E-TSI-5], furthering previous studies carried out with the CNES, consists in improving the estimation of the characteristic spectral parameters of these signals compared to the standard technique, which involves estimating the PSD by periodogram. The solution proposed in this study is based on a new approach to the Fourier transform which focuses its analysis on the best medium of interest for altimeter signal PSD. Concomitantly, the interest of the empirical modal decomposition (EMD) was also investigated.

Plus proche des problématiques instrumentales à bord des satellites, une autre étude, toujours en collaboration avec le CNES, s'est intéressée à l'estimation de la fonction de réponse spectrale (*Instrumental Spectral Response Function* – ISRF) d'un spectromètre haute-résolution lors des phases de vol [E-TSI-6]. Plusieurs approches ont été considérées, basées sur des modèles paramétriques (gaussien, gaussien généralisé symétrique ou asymétrique), des approximations à base de fonctions *splines* et une décomposition sur un dictionnaire construit à partir d'exemples de réponses spectrales. Cette dernière approche s'est révélée prometteuse et de nombreuses expériences ont montré la capacité des approches proposées à estimer correctement les ISRF dans différents scénarios.

Dealing more with instrument problems on board satellites, another study, again in collaboration with CNES, focused on the estimation of the Instrumental Spectral Response Function (ISRF) of a high-resolution spectrometer during the flight phases [E-TSI-6]. Several approaches were considered, based on parametric models (Gaussian, symmetric or asymmetric generalized Gaussian distribution), approximations based on *spline* functions, and a decomposition using a dictionary constructed from examples of spectral responses. The latter approach has shown promise and many experiments have demonstrated the ability of the proposed approaches to correctly estimate ISRFs in different scenarios.



L'observation de la Terre est aussi très liée au traitement d'images. Dans cette optique, une étude avec le CNES a permis de mettre en œuvre une nouvelle méthode de segmentation d'images basée sur un modèle de lois statistiques asymétriques (lois gaussiennes généralisées asymétriques) [E-TSI-7]. Cette méthode avait donné des résultats très prometteurs pour la segmentation d'images de télédétection mais n'était efficace que sur des images de petites tailles. Une nouvelle étude effectuée pendant la période couverte par ce rapport d'activités a permis de construire une méthode de segmentation d'images « multi-patches » qui découpe l'image d'intérêt en plusieurs patches (tuiles), segmente ces patches (de plus petites tailles que l'image d'origine) à l'aide de l'algorithme existant et regroupe les segmentations au niveau patch pour effectuer une segmentation de l'image d'origine. Cette façon de procéder permet de segmenter des images de très grandes tailles, ce qui est un enjeu majeur en télédétection.

Enfin, en observation de la Terre, la diversité des instruments imageurs génère le besoin de fusionner des images de différentes modalités (optiques, radar, multi-spectrales ou autres...) afin de mieux mettre en évidence les informations recherchées. TéSA a déjà mené des études et thèses dans cette thématique et a poursuivi son activité dans le cadre d'une étude CNES sur la fusion d'images optiques et proche infrarouge pour l'observation de la Terre [E-TSI-8]. Quels que soient les capteurs, cette étape de fusion est nécessaire dès que l'on souhaite reconstruire une scène à haute résolution spatiale et spectrale à partir d'un couple d'images ayant une bonne résolution dans l'un de ces domaines. Cette étude a permis de montrer la supériorité des approches « problèmes inverses » qui se basent sur une modélisation des deux instruments d'observation.

Earth observation is also closely linked to image processing. In this perspective, a study with the CNES has made it possible to implement a new method of image segmentation based on a model of asymmetric statistical distribution (asymmetric generalized Gaussian distribution) [E-TSI-7]. This method had given very promising results for the segmentation of remote sensing images but was only effective on small images. A new study carried out during the period covered by this activity report has resulted in the construction of a "multi-patch" image segmentation method that divides the image of interest into several patches (tiles), segments these patches (smaller than the original image) using the existing algorithm, and aggregates the segmentations at the patch level to segmentate of the original image. This approach allows for the segmentation of very large images, which is a major challenge in remote sensing.

Finally, in Earth observation, due to the diversity of imaging instruments there is a need to merge images acquired by different techniques (optical, radar, multi-spectral or other) in order to better highlight the information sought. TeSA has already carried out studies and produced theses in this field and has continued its activity in the framework of a CNES study on the merging of optical and near infrared images for Earth observation [E-TSI-8]. Whatever the sensor, this merging step is necessary when reconstructing a scene with high spatial and spectral resolution from a pair of images with good resolution in either one of these domains. The study has shown the superiority of "inverse problem" approaches based on modelling of both observation instruments.

Les compétences de TéSA en traitement statistique du signal sont bien souvent mises au service de problématiques très précises et pointues issues de ses domaines d'expertise.

Pendant la période concernée par ce rapport, TéSA a mené une étude pour le CNES sur l'analyse spectrale d'un signal par décomposition en sous-bandes spectrales à travers un banc de filtres [E-TSI-9]. Cette étude avait pour objectif d'analyser deux méthodes visant à réduire le coût calculatoire de méthodes de filtrage : le filtrage polyphase et une approche WOLA (*Weighted OverLap-Add*) qui reste une approche peu documentée dans la littérature. Une description de ces deux méthodes a fait l'objet d'un document de synthèse, ainsi qu'une étude comparative qui permet d'exhiber les avantages et inconvénients de chacune. La mise en œuvre de ces méthodes a permis d'aborder le problème de la reconstruction locale d'un signal sur un nombre de sous-bandes adjacentes et ciblées, par suppression des autres sous-bandes.

Une autre thématique considérée dans la thèse de Simone Urbano était de développer de nouvelles méthodes de détection et de diagnostic d'oscillations pouvant apparaître dans les systèmes de commande de vol d'un avion civil [C-TSI-3], [C-TSI-14], [B-TSI-1]. Ce problème est important car ces oscillations peuvent être inconfortables pour les membres de l'équipage et les passagers. Les vibrations concernées sont toutes de très faible puissance mais leur propagation et leur évolution temporelle peuvent engendrer des désagréments. Il convient donc de les détecter dès leur apparition. Ce problème de détection précoce de vibrations de très faible puissance n'avait pas de solution connue et validée pouvant être intégrée sur les avions civils, ce qui a incité AIRBUS à mettre en place une thèse CIFRE sur le sujet. Cette thèse a apporté plusieurs contributions. La première a été de formuler le problème sous la forme d'un test statistique qui peut se résoudre à l'aide du test du rapport de vraisemblance généralisé permettant de proposer un détecteur des vibrations en temps réel. Une seconde contribution a été d'estimer l'importance de ces oscillations et de détecter le jeu mécanique à l'aide d'une méthode d'identification non paramétrique d'un système de Wiener. Une analyse théorique, puis numérique (sur simulateur) et expérimentale (sur données de vol) a été réalisée pour évaluer les performances des détecteurs proposés et pour identifier leurs limitations et la faisabilité industrielle. Les résultats numériques et expérimentaux obtenus confirment que le détecteur de vibrations proposé est une méthode très efficace pour le diagnostic en termes de performance, robustesse et coût calculatoire.

STATISTICAL SIGNAL PROCESSING

TeSA's skills in statistical signal processing are often used to solve very specific and complex problems in its fields of expertise.

During the period covered by this report, TeSA carried out a study for CNES on the spectral analysis of a signal by decomposition into spectral sub-bands through a filter bank [E-TSI-9]. The objective of this study was to analyse two methods for reducing the computational cost of filtering methods: polyphase filtering and a Weighted OverLap-Add (WOLA) approach for which there is still little documentation in the literature. These two methods have been summarized in a document, as well as being compared in a study which shows the advantages and disadvantages of each. Their implementation has made it possible to address the problem of local reconstruction of a signal over a number of adjacent and targeted sub-bands, by removing the other sub-bands.

Another theme considered in Simone Urbano's thesis was the development of new methods for the detection and diagnosis of oscillations that may occur in the flight control systems of civil aircraft [C-TSI-3], [C-TSI-14], [B-TSI-1]. This is an important issue because these oscillations can be uncomfortable for crew members and passengers. The vibrations concerned are all very slight, but their propagation and evolution over time can cause discomfort. They should therefore be detected as soon as they begin. This problem of early detection of very low power vibrations had no known and validated solution that could be integrated into civil aircraft, which prompted AIRBUS to set up a CIFRE thesis on the subject. This thesis made several contributions. The first was to formulate the problem as a statistical test that can be solved using the generalized likelihood ratio test to propose a real-time vibration detector. A second contribution was to estimate the magnitude of these oscillations and to detect the mechanical play induced using a non-parametric Wiener system identification method. Theoretical analysis, then numerical (on simulator) and experimental (on flight data) analysis was performed to evaluate the performance of the proposed detectors and to determine their limitations and industrial feasibility. The numerical and experimental results obtained confirm that the proposed vibration detector is a very efficient method for diagnosing performance, robustness and computational cost.

Les activités autour de l'apprentissage statistique (*machine learning*) font partie de l'expertise de TéSA depuis de nombreuses années mais cet axe prend désormais une importance croissante. On distingue deux sujets majeurs portant d'une part sur les méthodes de classification supervisées et non-supervisées et d'autre part sur la détection d'anomalies.

La rencontre avec la start-up toulousaine GISAIA a permis de lancer une étude sur la classification de trajectoires de bateaux, avec la difficulté de gérer des séries temporelles échantillonnées irrégulièrement [E-TSI-11]. L'étude avait pour objectif d'analyser l'apport des méthodes d'analyse de données pour la classification de ce type de trajectoires. Elle a montré que l'analyse des trajectoires pouvait se faire à l'aide de méthodes de classification supervisées ou non-supervisées ou à l'aide de méthodes de détection d'anomalies. Cette étude a également montré que la phase d'extraction de paramètres (aussi appelés descripteurs ou caractéristiques) à partir des trajectoires de bateaux est une étape primordiale avant d'effectuer la classification ou la détection d'anomalies.

Ce même type d'analyse a été mené pour AIRBUS afin de détecter des trajectoires d'atterrissage d'avions atypiques [E-TSI-12]. AIRBUS collecte et analyse les données de vols de ses avions lors de leurs atterrissages ainsi que les commentaires des pilotes associés à ces vols, en particulier, lors des atterrissages considérés comme de « mauvaise qualité ». Ces données contiennent divers paramètres tels que l'altitude et l'assiette de l'avion ou encore la vitesse du vent, chacun sous la forme d'une suite de valeurs datées. Étant donné le très grand volume de vols à traiter et de données disponibles pour chaque atterrissage, il est intéressant pour AIRBUS de détecter les atterrissages jugés « non satisfaisants » automatiquement à partir de ces suites de valeurs afin de mieux les analyser ensuite. L'étude a permis d'analyser l'apport d'algorithmes de détection d'anomalies, orientés *machine learning*, appliqués à des paramètres mesurés lors des atterrissages d'avions. Cela a montré que l'introduction de descripteurs « métier » permet d'améliorer la détection de trajectoires atypiques d'avions.

La détection d'anomalies a déjà fait l'objet de plusieurs études menées avec le CNES (voir rapport d'activité 2017-2018). Pour approfondir ce sujet, une thèse a été définie et cofinancée par le CNES et Airbus Defence and Space (ADS). Cette thèse effectuée par Barbara Pilastre a été consacrée à la recherche de nouvelles méthodes de détection d'anomalies permettant d'assurer le suivi de l'état de santé des satellites et de prévenir des pannes ou défauts à venir au travers

MACHINE LEARNING AND ANOMALY DETECTION

Activities related to statistical learning (machine learning) have been part of TeSA's expertise for many years, but this field is now becoming increasingly important. There are two main topics: supervised and unsupervised classification methods on the one hand and anomaly detection on the other.

A meeting with the Toulouse start-up GISAIA led to the undertaking of a study on the classification of ship trajectories, with the difficulty of managing irregularly sampled time series [E-TSI-11]. The aim of the study was to analyse the contribution of data analysis methods to the classification of this type of trajectory. It showed that trajectory analysis can be done using supervised or unsupervised classification methods or anomaly detection methods. The study has also shown that the phase of extracting parameters (also called descriptors or features) from the ship trajectories is a crucial step prior to classification or anomaly detection.

The same type of analysis was conducted for AIRBUS to detect atypical aircraft landing paths [E-TSI-12]. AIRBUS collects and analyses flight data from its aircraft during landings and also pilot comments associated with these flights, in particular in the case of landings that have been considered to be of poor quality. This data contains various parameters such as the altitude and attitude of the aircraft or the wind speed, each in the form of a series of time-tagged values. Given the very large number of flights to be processed and the data available for each landing, it is interesting for AIRBUS to detect landings deemed to have been "unsatisfactory" automatically from these series of values, in order to better analyse them later. The study analysed the contribution of machine-learning-oriented anomaly detection algorithms applied to parameters measured during aircraft landings. This has shown that the introduction of profession-specific descriptors can improve the detection of atypical aircraft trajectories.

Anomaly detection has already been the subject of several studies conducted with CNES (see activity report 2017-2018). To further investigate this subject, a thesis was defined and co-financed by CNES and Airbus Defence and Space (ADS). This thesis by Barbara Pilastre was devoted to the search for new anomaly detection methods to

de la surveillance de la télémesure [J-TSI-18], [C-TSI-7], [C-TSI-13], [C-TSI-18], [C-TSI-22]. La thèse s'est intéressée à l'apport des méthodes de *machine learning* pour cette détection d'anomalies, en prenant en compte plusieurs paramètres issus de la télémesure, de nature variée (indicateurs binaires, mesures continues etc.), à l'aide d'une approche dite mixte multivariée pour laquelle il n'existait pas encore de solution sur étagère. La thèse a exploité un modèle de représentation parcimonieuse, axe de recherche prometteur, qui a été utilisé pour mettre en œuvre une méthode originale de détection d'anomalies dans des données de télémesure mixtes. Les méthodes développées dans cette thèse sont suffisamment génériques pour être réutilisées et adaptées à d'autres contextes.

La détection d'anomalies a aussi été au cœur d'un des deux post-doctorats initiés par TéSA pendant la période couverte par ce rapport d'activités (voir page 47). Ce post-doctorat, co-financé par Thales Alenia Space, a porté sur le développement de nouvelles méthodes de détection d'anomalies « avec retour utilisateur », permettant de prendre en compte au fil de l'eau les données expertisées retournées par l'utilisateur [E-TSI-14]. Certaines anomalies retournées par un algorithme de détection d'anomalies ne sont parfois pas confirmées par l'utilisateur et peuvent alors être qualifiées de fausses alarmes. L'idée a été de modifier l'algorithme de détection d'anomalies de manière qu'il ne détecte plus d'anomalies similaires à ces fausses alarmes. Pour ce faire, des algorithmes de détection d'anomalies non-supervisés ont été modifiés afin de prendre en compte ce retour utilisateur, c'est-à-dire, de prendre en compte un sous ensemble de données labellisées (apprentissage semi-supervisé). Plusieurs méthodes ont été développées pouvant

monitor the health of satellites and prevent future failures or faults through telemetry monitoring [J-TSI-18], [C-TSI-7], [C-TSI-13], [C-TSI-18], [C-TSI-22]. The thesis focused on the contribution of machine learning methods to anomaly detection, taking into account several parameters from the telemetry and of various kinds (binary indicators, continuous measurements, etc.), using a so-called multivariate mixed approach for which there is as yet no off-the-shelf solution. The thesis used a parsimonious representation model, a promising line of research, to implement a novel method for anomaly detection in mixed telemetry data. The methods developed in this thesis are generic enough to be reused and adapted to other contexts.

Anomaly detection was also the focus of one of the two post-doctoral research projects initiated by TeSA during the period covered by this activity report (see page 47). This post-doctorate project, co-financed by Thales Alenia Space, focused on the development of new anomaly detection methods "with user feedback", in order to take into account, on the fly, the expert data returned by the user [E-TSI-14]. Some of the anomalies returned by an anomaly detection algorithm are sometimes not confirmed by the user and can therefore be described as false alarms. The idea was to modify the anomaly detection algorithm so that it no longer detected anomalies similar to these false alarms. For this purpose, unsupervised anomaly detection algorithms have been modified to take into account this user feedback, i.e., to take into account a subset of labelled data (semi-supervised learning). Several methods have been

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

WHERE ARE THEY NOW?



JEAN-ADRIEN VERNHES

Après avoir soutenu sa thèse à TéSA en 2016, Jean-Adrien Vernhes est embauché par Silicom, puis par Airbus Defence and Space à Toulouse. Il travaille en tant qu'ingénieur R&D dans les télécommunications RF et optiques, notamment sur des activités de design de forme d'ondes et de simulation bout-en-bout.

After his PhD defense in 2016, Jean-Adrien Vernhes was hired by Silicom and then by Airbus Defence and Space in Toulouse. He is currently working as an R&D engineer in the RF & optics telecommunication field, notably to design waveforms and to lead end-to-end simulations.

être appliquées aux algorithmes classiques de la littérature comme *Isolation Forest* et *One Class SVM* (*Support Vector Machine*) (voir les articles parus après 2020 téléchargeables sur le site de TéSA).

Les réseaux de neurones et l'apprentissage profond (*deep learning*), qui reçoivent actuellement un intérêt grandissant dans les communautés du traitement du signal et des images, font aussi partie des compétences de TéSA. Deux études ont été menées pendant la période concernée par ce rapport :

- la première, effectuée en interne, autofinancée par TéSA, visait à explorer les performances du *deep learning* pour détecter des nuages dans des images satellitaires [E-TSI-15] ;
- la seconde, pour Collins Aerospace, consistait à étudier l'intérêt des réseaux de neurones pour les liaisons radio air-sol de contrôle de drones [E-TSI-10]. L'idée était d'envisager le remplacement d'algorithmes classiques de démodulation par des algorithmes à base de réseaux de neurones. Ceci permettrait d'utiliser des algorithmes plus adaptés à une implantation sur des réseaux logiques programmables, l'algorithme classique de démodulation utilisé ayant un coût calculatoire élevé.

developed that can be applied to the classical algorithms in the literature such as 'Isolation Forest' and 'One Class Support Vector Machine' (SVM) (see articles published after 2020 that can be downloaded from the TeSA website).

TeSA also has expertise in neural networks and deep learning, which are currently of increasing interest to the signal and image processing communities. Two studies were carried out during the period covered by this report:

- the first, carried out internally and self-financed by TeSA, aimed to explore the performance of deep learning to detect clouds in satellite images [E-TSI-15];
- the second, for Collins Aerospace, consisted in studying the interest of neural networks for air-ground radio links for UAV control [E-TSI-10]. The idea was to consider replacing conventional demodulation algorithms with neural network-based algorithms. This would allow the use of algorithms that are more suitable for implementation with programmable logic networks, as the conventional demodulation algorithm used has a high computational cost.



Barbara Pilastre reçoit un prix pour sa présentation aux journées jeunes chercheurs (JC²) du CNES.
Barbara Pilastre receives an award for her presentation at the CNES young researchers days JC².

Liste des thèses soutenues

List of defended theses

Lesouple Julien, *Estimation parcimonieuse de biais multitrajets pour les systèmes GNSS*, thèse cofinancée par le CNES et M3 Systems, soutenue le 15/03/2019. Après la thèse et un Post-doc à TéSA, enseignant-chercheur à l'ENAC. - *Sparse estimation of multipath biases for GNSS systems*, PhD co-funded by CNES and M3 Systems, defended on 15/03/2019. After his PhD and a TeSA post-doc, associate professor at ENAC.

Urbano Simone, *Détection et diagnostic des oscillations en cycle limite induite par les jeux mécaniques dans le système de commande de vol d'un avion civil*, thèse CIFRE AIRBUS, soutenue le 18/04/2019. Embauché par AIRBUS. - *Detection and diagnostic of freeplay induced limit cycle oscillation in the flight control system of a civil aircraft*, CIFRE AIRBUS PhD, defended on 18/04/2019. Hired by AIRBUS.

Pilastre Barbara, *Estimation parcimonieuse et apprentissage de dictionnaires pour la détection d'anomalies multivariées dans des données mixtes de télémesure satellite*, thèse cofinancée par le CNES et Airbus Defence and Space (ADS), soutenue le 06/11/2020. Embauchée à la DGA. - *Sparse estimation and dictionary learning for multivariate anomaly detection in mixed satellite telemetry data*, PhD co-funded by CNES and Airbus Defence and Space, defended on 06/11/2020. Hired by DGA.

Tobie Anne-Marie, *Hybridation GNSS/5G pour la navigation en milieu urbain*, thèse cofinancée par le CNES et Thales Alenia Space (TAS), soutenue le 25/02/2021. Embauchée par TAS. - *GNSS/5G hybridization for urban navigation*, PhD co-funded by CNES and Thales Alenia Space (TAS), defended on 25/02/2021. Hired by TAS.

Liste des projets

List of projects

CNES

- [E-TSI-1] *Ondelettes et GNSS (R&T RS18-LN-002-042)*. Domaine d'application : Localisation et navigation. - *Wavelets and GNSS (R&T RS18-LN-002-042)*. Field of application: Positioning and Navigation.
- [E-TSI-2] *Le cepstre pour la détection des multi-trajets en GNSS (R&T RS18/LN-002-051)*. Domaine d'application : Localisation et navigation. - *The cepstrum for multipath detection in GNSS (R&T RS18-LN-002-051)*. Field of application: Positioning and Navigation.
- [E-TSI-3] *Usage des codes rapides Galileo E5A et GPS L5 pour la réflectométrie (R&T RS19/LN-0002-057)*. Domaine d'application : Observation de la Terre. - *Use of Galileo E5A and GPS L5 fast codes for reflectometry (R&T RS19/LN-0002-057)*. Field of application: Earth Observation.
- [E-TSI-4] *Définition d'un référentiel spatio-temporel autonome dans une constellation de satellites*. Domaine d'application : Localisation et navigation. - *Definition of an autonomous space-time reference frame in a satellite constellation*. Field of application: Positioning and Navigation.
- [E-TSI-5] *Estimation du paramètre d'échelle des signaux altimétriques de SLA par interpolation spectrale aux très basses fréquences (R&T R-S19/OT-0003-085)*. Domaine d'application : Observation de la Terre. - *Estimation of the scale parameter of SLA altimeter signals by spectral interpolation at very low frequencies (R&T R-S19/OT-0003-085)*. Field of application: Earth Observation.
- [E-TSI-6] *Nouveaux algorithmes pour l'estimation en vol des ISFR (R-S19/OT-0002-102)*. Domaine d'application : Observation de la Terre. - *New algorithms for in-flight estimation of ISFRs (R-S19/OT-0002-102)*. Field of application: Earth Observation.
- [E-TSI-7] *Lois gaussiennes multivariées pour analyse d'images de télédétection (R&T R-S19/DU-0001-006)*. Domaine d'application : Observation de la Terre. - *Multivariate Gaussian Distributions for Remote Sensing Image Analysis (R&T R-S19/DU-0001-006)*. Field of application: Earth Observation.
- [E-TSI-8] *Approches « problèmes inverses » pour le pansharpening et la fusion d'images (R&T R-S17/OT-0004-089)*. Domaine d'application : Observation de la Terre. - *"Inverse problem" approaches for pansharpening and image merging (R&T R-S17/OT-0004-089)*. Field of application: Earth Observation.
- [E-TSI-9] *Banc de filtres et reconstruction partielle*. Domaine d'application : Télécommunications spatiales. - *Filter bank and partial reconstruction*. Field of application: Space telecommunications.

COLLINS AEROSPACE

[E-TSI-10] *Intérêt des réseaux de neurones pour la liaison radio air-sol de contrôle des drones.* Domaine d'application : Télécommunications aéronautiques. - *Interest of neural networks for air-ground radio link for UAV control.* Field of application: Aeronautical telecommunications.

GISAIA

[E-TSI-11] *ARLAS pour le flux maritime.* Domaine d'application : Localisation et navigation. - *ARLAS for maritime traffic flow.* Field of application: Positioning and Navigation.

AIRBUS

[E-TSI-12] *Détection d'anomalies dans les trajectoires FLARE.* Domaine d'application : Télécommunications aéronautiques. - *Detection of anomalies in FLARE trajectories.* Field of application: Aeronautical telecommunications.

ÉTUDES AUTOFINANCÉES TÉSA

[E-TSI-13] *GNSS robuste en environnement contraint.* Domaine d'application : Localisation et navigation. Post-doc TéSA cofinancé par ISAE-SUPAERO. - *Robust GNSS in constrained environments.* Field of application: Positioning and Navigation. TeSA post-doctoral project co-financed by ISAE-SUPAERO.

[E-TSI-14] *Détection d'anomalies avec retour utilisateur dans les données satellite.* Domaine d'application : Télécommunications spatiales. Post-doc TéSA cofinancé par Thales Alenia Space. - *Anomaly detection in satellite data with user feedback.* Field of application: Space telecommunications. TeSA post-doctoral project co-financed by Thales Alenia Space.

[E-TSI-15] *Détection de nuages dans les images satellitaires.* Domaine d'application : Observation de la Terre. - *Cloud detection in satellite images.* Field of application: Earth Observation.

Liste des publications et brevets List of publications and patents

ARTICLES DE REVUES INTERNATIONALES OU NATIONALES AVEC COMITÉ DE LECTURE – INTERNATIONAL OR NATIONAL PEER-REVIEWED JOURNAL PAPERS

- [J-TSI-1] Tachella Julian, Altmann Yoann, Ren Ximing, McCarthy Aongus, S. Buller Gerald, McLaughlin Stephen and Tournet Jean-Yves, *Bayesian 3D Reconstruction of Complex Scenes from Single-Photon Lidar Data*, Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM) Journal on Imaging Sciences, vol. 12, issue 1, pp. 521-550, March 2019.
- [J-TSI-2] Ouzir Nora, Basarab Adrian, Lairez Olivier and Tournet Jean-Yves, *Robust Optical Flow Estimation in Cardiac Ultrasound Images Using a Sparse Representation*, IEEE Transactions on Medical Imaging, vol. 38, issue 3, pp.741-752, March 2019.
- [J-TSI-3] Bacharach Lucien, El Korso Mohammed Nabil, Renaux Alexandre and Tournet Jean-Yves, *A Hybrid Lower Bound for Parameter Estimation of Signals with Multiple Change-Points*, IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 67, issue 5, pp. 1267-1279, March 2019.
- [J-TSI-4] Lesouple Julien, Robert Thierry, Sahmoudi Mohamed, Tournet Jean-Yves and Vigneau Willy, *Multipath Mitigation for GNSS Positioning in an Urban Environment Using Sparse Estimation*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 20, issue 4, pp. 1316-1328, April, 2019.
- [J-TSI-5] Thouvenin Pierre-Antoine, Dobigeon Nicolas and Tournet Jean-Yves, *Partially Asynchronous Distributed Unmixing of Hyperspectral Images*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 57, issue 4, pp. 2009-2021, April 2019.
- [J-TSI-6] Vargas Edwin, Espitia Oscar, Arguello Fuentes Henry and Tournet Jean-Yves, *Spectral Image Fusion From Compressive Measurements*, IEEE Transactions on Image Processing, vol. 28, issue 5, pp. 2271-2282, May 2019.
- [J-TSI-7] Hatvani Jamka, Basarab Adrian, Tournet Jean-Yves, Gyöngy Miklos and Kouamé Denis, *A Tensor Factorization Method for 3D Super-Resolution with Application to Dental CT*, IEEE Transactions on Medical Imaging, vol. 38, issue 6, pp. 1524-1531, June 2019.
- [J-TSI-8] Vargas Edwin, Arguello Fuentes Henry and Tournet Jean-Yves, *Spectral Image Fusion From Compressive Measurements Using Spectral Unmixing and a Sparse Representation of Abundance Maps*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 57, issue 7, pp. 5043-5053, July 2019.
- [J-TSI-9] Chaumette Eric, Priot Benoît, Vincent François, Pages Gaël and Dion Arnaud, *Minimum Variance Distortionless Response Estimators for Linear Discrete State-Space Models*, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 62, issue 4, pp. 2048-2055, August, 2019.
- [J-TSI-10] Chaumette Eric, Vincent François, Priot Benoît, Pages Gaël and Dion Arnaud, *On LMVDR Estimators for LDSS Models: Conditions for Existence and Further Applications*, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 64, issue 6, pp. 2598-2605, August, 2019.
- [J-TSI-11] Cheng Cheng and Tournet Jean-Yves, *An EM-Based Multipath Interference Mitigation in GNSS Receivers*, Elsevier Signal Processing, vol. 162, pp.141-152, September 2019.
- [J-TSI-12] Corbineau Marie-Caroline, Kouamé Denis, Chouzenoux Emilie, Tournet Jean-Yves and Pesquet Jean-Christophe, *Preconditioned P-ULA for Joint Deconvolution-Segmentation of Ultrasound Images*, IEEE Signal Processing Letters, vol. 26, issue 10, pp.1456-1460, October, 2019.
- [J-TSI-13] Tachella Julian, Altmann Yoann, Mellado Nicolas, McCarthy Aongus, Tobin Rachael, S. Buller Gerald, Tournet Jean-Yves and McLaughlin Stephen, *Real-time 3D Reconstruction from Single-photon Lidar Data using Plug-and-play Point Cloud Denoisers*, Nature Communications, vol. 10, art. 4984, November, 2019.
- [J-TSI-14] Tachella Julian, Altmann Yoann, Marquez Miguel, Arguello Fuentes Henry, Tournet Jean-Yves and McLaughlin Stephen, *Bayesian 3D Reconstruction of Subsampled Multispectral Single-photon Lidar Signals*, IEEE Transactions on Computational Imaging, vol. 6, pp.208-220, 2020.
- [J-TSI-15] Vilà-Valls Jordi, Vivet Damien, Chaumette Eric, Vincent François and Closas Pau, *Recursive Linearly Constrained Wiener Filter for Robust Multi-Channel Signal Processing*, Elsevier, vol. 167, February, 2020.

- [J-TSI-16] El Mansouri Oumäïma, Vidal Fabien, Basarab Adrian, Payoux Pierre, Kouamé Denis and Tournet Jean-Yves, *Fusion of Magnetic Resonance and Ultrasound Images for Endometriosis Detection*, IEEE Trans. Image Process., vol. 29, no. 1, pp. 5324-5335, February 28, 2020.
- [J-TSI-17] Cheng Cheng, Tournet Jean-Yves and Lu X.D., *A Rao-Blackwellized Particle Filter with Variational Inference for State Estimation with Measurement Model Uncertainties*, IEEE Access, vol. 8, no. 1, pp. 55665-55675, March 19, 2020.
- [J-TSI-18] Pilastre Barbara, Boussouf Loïc, d'Escrivain Stéphane and Tournet Jean-Yves, *Anomaly Detection in Mixed Telemetry Data Using a Sparse Representation and Dictionary Learning*, Signal Processing, vol. 168, March, 2020.
- [J-TSI-19] Das Priyanka, Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi, Vincent François, Chaumette Eric and Davain Loïc, *Performance Limits of GNSS Code-Based Precise Positioning : GPS, Galileo & Meta-Signals*, MDPI Sensors, vol. 20, issue 8, p. 2196, April, 2020.
- [J-TSI-20] Medina Daniel, Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi, Closas Pau, Vincent François and Chaumette Eric, *A New Compact CRB for Delay, Doppler and Phase Estimation – Application to GNSS SPP and RTK Performance Characterisation*, IET Radar, Sonar & Navigation, June, 2020.
- [J-TSI-21] Ortega Espluga Lorenzo, Medina Daniel, Vilà-Valls Jordi, Vincent François and Chaumette Eric, *Positioning Performance Limits of GNSS Meta-Signals and HO-BOC Signals*, MDPI Sensors, vol. 20, issue 12, p. 3586, June, 2020.
- [J-TSI-22] Laval Xavier, Mailhes Corinne, Martin Nadine, Bellemain Pascal and Pachaud Christian, *Amplitude and Phase Interaction in Hilbert Demodulation of Vibration Signals : Natural Gear Wear Modeling and Time Tracking for Condition Monitoring*, Mechanical Systems and Signal Processing, Elsevier, vol. 150, 2021.
- [J-TSI-23] Ortega Espluga Lorenzo, Poulliat Charly, Boucheret Marie-Laure, Aubault-Roudier Marion and Al Bitar Hanaa, *New multiplexing method to add a new signal in the Galileo E1 band*, IET Radar, Sonar & Navigation, E-First, Print pp.1751-8784, Online pp. 1751-8792, September, 2020.
- [J-TSI-24] Medina Daniel, Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi, Closas Pau, Vincent François and Chaumette Eric, *Compact CRB for delay, Doppler, and phase estimation – application to GNSS SPP and RTK performance characterisation*, IET Radar, Sonar & Navigation, vol. 14, issue 10, pp.1537-1549, October, 2020.
- [J-TSI-25] Rapp Joshua, Saunders Charles, Tachella Julian, Murray-Bruce John, Altmann Yoann, Tournet Jean-Yves, McLaughlin Stephen, Dawson R.M.A., Wong Franco N.C. and Goyal Vivek K., *Seeing around corners with edge-resolved transient imaging*, Nat. Commun., vol. 11, no. 1, pp. 5929, November 23, 2020.
- [J-TSI-26] Lubeigt Corentin, Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi, Lestarquit Laurent and Chaumette Eric, *Joint Delay-Doppler Estimation Performance in a Dual Source Context*, Remote sensing, vol. 12, issue 3, p. 3894, November, 2020.

COMMUNICATIONS AVEC ACTES DANS DES CONGRÈS INTERNATIONAUX OU NATIONAUX À COMITÉ DE LECTURE – INTERNATIONAL OR NATIONAL PEER-REVIEWED CONFERENCE PAPERS

- [C-TSI-1] El Mansouri Oumäïma, Basarab Adrian, Vidal Fabien, Kouamé Denis and Tournet Jean-Yves, *Fusion Of Magnetic Resonance And Ultrasound Images: A Preliminary Study On Simulated Data*, In Proc. IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI), Venice, Italy, April 8-11, 2019.
- [C-TSI-2] Tachella Julian, Altmann Yoann, Tournet Jean-Yves and McLaughlin Stephen, *3D Reconstruction Using Single-photon Lidar Data Exploiting the Widths of the Returns*, In Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Brighton, United Kingdom, May 12-17, 2019.
- [C-TSI-3] Urbano Simone, Chaumette Eric, Goupil Philippe and Tournet Jean-Yves, *On Nonparametric Identification of Wiener Systems with Deterministic Inputs*, In Proc. International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), Brighton, United Kingdom, May 12-17, 2019.
- [C-TSI-4] Sombrin Jacques B., *EVM algorithm proposed to IEEE standard P 1765*, In Proc. International Microwave Symposium (IMS), Boston, Massachusetts, USA, June 2-7, 2019.
- [C-TSI-5] El Mansouri Oumäïma, Basarab Adrian, Vidal Fabien, Kouamé Denis and Tournet Jean-Yves, *Magnetic Resonance and Ultrasound Image Fusion Using a PALM Algorithm*, In Proc. Workshop on Signal Processing with Adaptive Sparse Structured Representations (SPARS), Toulouse, France, July 1-4, 2019 - 4 July 2019.

- [C-TSI-6] Chaumette Eric, Vincent François, Priot Benoît, Pages Gaël and Dion Arnaud, *New Results on LMVDR Estimators for LDSS Models*, In Proc. 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Rome, Italy, September 3-7, 2019.
- [C-TSI-7] Pilastre Barbara, Boussouf Loïc, d'Escrivain Stéphane and Tournet Jean-Yves, *Représentation Parcimonieuse Pondérée pour la Détection d'Anomalies dans des Signaux Multivariés*, In Proc. Groupe d'Etude du Traitement du Signal et des Images (GRETSI), Lille, France, August 26-29, 2019.
- [C-TSI-8] Diaz Nelson Eduardo, Basarab Adrian, Arguello Fuentes Henry and Tournet Jean-Yves, *Cardiac Motion Estimation Using Convolutional Sparse Coding*, In Proc. 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Coruna, Spain, September 2-6, 2019.
- [C-TSI-9] Tachella Julian, Altmann Yoann, McLaughlin Stephen and Tournet Jean-Yves, *Fast Surface Detection in Single-Photon Lidar Waveforms*, In Proc. 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Coruna, Spain, September 2-6, 2019.
- [C-TSI-10] Tobie Anne-Marie, Garcia Pena Axel, Thevenon Paul and Aubault-Roudier Marion, *Processed 5G Signals Mathematical Models for Positioning considering a Non-Constant Propagation Channel*, In Proc. Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Honolulu, Hawaii, USA, September 22-25, 2019.
- [C-TSI-11] Vidal Fabien, El Mansouri Oumaïma, Kouamé Denis and Basarab Adrian, *On the Design of a Pelvic Phantom for Magnetic Resonance and Ultrasound Image Fusion*, In Proc. IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Glasgow, United Kingdom, October 6-9, 2019.
- [C-TSI-12] Ouzir Nora, Basarab Adrian, Bioucas Dias José Manuel and Tournet Jean-Yves, *Robust Cardiac Motion Estimation with Dictionary Learning and Temporal Regularization for Ultrasound Imaging*, In Proc. IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Glasgow, Scotland, October 6-9, 2019.
- [C-TSI-13] Pilastre Barbara, Tournet Jean-Yves, Boussouf Loïc and d'Escrivain Stéphane, *Spacecraft Health Monitoring using a Weighted Sparse Decomposition*, In Proc. World Congress on Condition Monitoring (WCCM), Singapore, December 2-5, 2019.
- [C-TSI-14] Goupil Philippe, Urbano Simone, Tournet Jean-Yves and Chaumette Eric, *When Anomalies Meet Aeroelasticity: An Aerospace Industry Illustration of Fault Detection Challenges*, In Proc. World Congress on Condition Monitoring (WCCM), Marina Bay Sands, Singapore, December 2-5, 2019.
- [C-TSI-15] Laval Xavier, Martin Nadine, Bellemain Pascal and Mailhes Corinne, *Detection and Localization of a Gear Fault using Automatic Continuous Monitoring of the Modulation Functions*, In Proc. World Congress on Condition Monitoring (WCCM), Marina Bay Sands, Singapore, December 2-5, 2019.
- [C-TSI-16] Vincent François and Besson Olivier, *One-step Generalized Likelihood Ratio Test for Subpixel Target Detection in Hyperspectral Imaging*, In Proc. Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (IEEE CAMSAP), Le Gosier, Guadeloupe, France, December 15-18, 2019.
- [C-TSI-17] Vincent François and Besson Olivier, *Subpixel Target Detection in Hyperspectral Imaging*, In Proc. Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (IEEE CAMSAP), Le Gosier, Guadeloupe, France, December 15-18, 2019.
- [C-TSI-18] Pilastre Barbara, Tournet Jean-Yves, d'Escrivain Stéphane and Boussouf Loïc, *Multivariate Anomaly Detection in Mixed Telemetry time-series Using A Sparse Decomposition*, In Proc. Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (IEEE CAMSAP), Le Gosier, Guadeloupe, France, December 15-18, 2019.
- [C-TSI-19] Tachella Julian, Altmann Yoann, McLaughlin Stephen and Tournet Jean-Yves, *Real-time 3D Color Imaging with Single-Photon LIDAR Data*, In Proc. 8th International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP), Guadeloupe, West Indies, December 15-19, 2019.
- [C-TSI-20] Carlsson Marcus, Tournet Jean-Yves and Wendt Herwig, *Unbiased Group-Sparsity Sensing Using Quadratic Envelopes*, In Proc. 8th International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP), Guadeloupe, West Indies, December 15-19, 2019.
- [C-TSI-21] Diaz Nelson Eduardo, Noriega-Wandurraga Camilo, Basarab Adrian, Tournet Jean-Yves and Arguello Fuentes Henry, *Adaptive Coded Aperture Design by Motion Estimation using Convolutional Sparse Coding in Compressive Spectral Video Sensing*, In Proc. 8th International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP), Guadeloupe, West Indies, December 15-19, 2019.
- [C-TSI-22] Pilastre Barbara, Silva Gustavo, Boussouf Loïc, d'Escrivain Stéphane, Rodriguez Paul and Tournet Jean-Yves, *Anomaly Detection on Mixed Time-Series using a Convolutional Sparse Representation with Application to*

Spacecraft Health Monitoring, In Proc. International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Barcelone, Spain, May 4-8, 2020.

- [C-TSI-23] Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi, Chaumette Eric and Vincent François, *On the Time-Delay Estimation Performance Limit of New GNSS Acquisition Codes*, In Proc. International Conference on Localization (ICL-GNSS), Tampere, Finland, June 2-4, 2020.
- [C-TSI-24] Demoulin Quentin, Lefebvre-Albaret François, Basarab Adrian, Kouamé Denis and Tourneret Jean-Yves, *A New Flexible Photogrammetry Instrumentation for Estimating Wing Deformation in Airbus*, In Proc. European Test and Telemetry Conference (ETTC), Nuremberg, Germany, June 23-25, 2020.
- [C-TSI-25] Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi, Chaumette Eric and Vincent François, *On the Time-Delay Estimation Accuracy Limit of GNSS Meta-Signals*, In Proc. Intelligent Transportation Systems Conference (IEEE/ITSC), Rhodes, Greece, September 20-23, 2020.
- [C-TSI-26] Alves de Oliveira Vinicius, Oberlin Thomas, Chabert Marie, Poulliat Charly, Bruno Mickael, Latry Christophe, Carlavan Mikael, Henrot Simon, Falzon Frédéric and Camarero Roberto, *Simplified Entropy Model for Reduced-Complexity End-to-End Variational Autoencoder with Application to On-Board Satellite Image Compression*, In Proc. 7th International Workshop on On-Board Payload Data Compression (OBPDC), Online Event, September 21-23, 2020.
- [C-TSI-27] Tobie Anne-Marie, Garcia Pena Axel, Thevenon Paul, Vezinet Jérémy and Aubault-Roudier Marion, *Hybrid Navigation Filters Performances Between GPS, Galileo and 5G TOA Measurements in Multipath Environment*, In Proc. ION GNSS+, St Louis, Missouri, USA, September 21-25, 2020.
- [C-TSI-28] Mailhes Corinne, Besson Olivier, Guillot Amandine and Le Gac Sophie, *Improving the estimation of the sea level anomaly slope*, in Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS), Hawaiï, USA, 26 September - 2 October 2020.
- [C-TSI-29] Demoulin Quentin, Lefebvre-Albaret François, Basarab Adrian, Kouamé Denis and Tourneret Jean-Yves, *Constrained Bundle Adjustment Applied to Wing 3D Reconstruction with Mechanical Limitations*, In Proc. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Abu Dhabi, United Arab Emirates, October 25-28, 2020.
- [C-TSI-30] El Mansouri Oumäïma, Basarab Adrian, Figueiredo Mario, Kouamé Denis and Tourneret Jean-Yves, *Ultrasound and Magnetic Resonance Image Fusion using a Patch-Wise Polynomial Model*, In Proc. International Conference on Image Processing (ICIP), Abu Dhabi, United Arab Emirates, October 25-58, 2020.
- [C-TSI-31] Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi, Chaumette Eric, Pages Gaël and Vincent François, *Robust Tracking under Measurement Model Mismatch via Linearly Constrained Extended Kalman Filtering*, In Proc. 59th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Jeju Island, Republic of Korea, December 14-18, 2020.
- [C-TSI-32] Ortega Espluga Lorenzo, Medina Daniel, Vilà-Valls Jordi, Vincent François and Chaumette Eric, *A Compact CRB for the Single Source Conditional Signal Model with Application to Delay-Doppler-Phase Estimation of Band-Limited Signals*, In Proc. 59th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Jeju Island, Republic of Korea, December 14-18, 2020.

BREVETS – PATENTS

- [B-TSI-1] Goupil Philippe, Urbano Simone, Tourneret Jean-Yves and Chaumette Eric, *Procédé et Dispositif de Détection et de Diagnostic de Vibrations d'un Aéronef Liées à un Phénomène d'Usure de Pièces Mécaniques dans une Gouverne*, n° FR3074293A1, BOPI 2019-22, May 31, 2019.
- [B-TSI-2] Sombrin Jacques B., Armengaud Vincent, Prigent Gaëtan, Bernal Olivier and Marchal Timothée, *Dispositif de Transposition en Fréquence et Procédé de Transposition en Fréquence Correspondant*, n° FR3083657 A1, January 10, 2020.



Communications numériques

En ce qui concerne les communications numériques, les projets réalisés par TéSA durant cette période trouvent leurs applications aussi bien dans les communications par satellite que dans les techniques de navigation. Les thématiques de ces projets peuvent être classées selon trois grands axes : la navigation, l'accès multiple/canal de propagation et la charge utile des satellites.



Synthèse des travaux

NAVIGATION

Les activités de TéSA en communications numériques concernent notamment les systèmes de positionnement, thématique dans laquelle TéSA a acquis une grande expérience à travers plusieurs projets passés, que ce soit en traitement du signal ou en communications numériques. Durant la période 2019-2020, plusieurs projets sur des problématiques de navigation ont été réalisés.

La thèse de Lorenzo Ortega, financée par le CNES et Thales Alenia Space s'inscrit dans le contexte d'amélioration du système Galileo et la définition de ses futures évolutions [J-CN-1], [J-CN-3], [C-CN-2], [C-CN-3], [C-CN-4]. Plus particulièrement, les travaux se sont focalisés sur la réduction du temps d'acquisition et l'amélioration de la robustesse du système contre les interférences à travers des contributions au niveau de la structure du message de navigation et du codage canal. Les contributions sont multiples : une nouvelle méthode pour faire la co-conception de la structure du message et du codage canal pour la nouvelle génération des signaux Galileo, des codes optimaux permettant de modifier le débit et améliorer le seuil de démodulation. Également, une nouvelle forme d'onde ainsi qu'une méthode pour multiplexer le nouveau signal avec les signaux déjà existants ont été développées. Enfin, les travaux menés dans cette thèse ont permis de proposer de nouvelles méthodes pour la démodulation de données dans différents scénarios (urbain, interférence ou sans connaissance du canal) permettant de récupérer l'information de manière optimale.

Dans une étude réalisée pour le compte du CNES, le TéSA a exploré l'utilisation des signaux AIS (*Automatic Identification System*) pour faire le suivi et la surveillance des navires depuis des satellites [E-CN-1]. Les principaux défis de cette étude venaient d'un rapport signal à bruit très bas et de transmissions non synchronisées. L'équipe



Digital communications

With regard to digital communications, the projects carried out by TeSA during this period have led to applications in satellite communications as well as in navigation techniques. The themes of these projects can be classified into three main areas: navigation, multiple access/propagation channels and satellite payloads.



Summary of work

NAVIGATION

TeSA's activities in digital communications concern in particular positioning systems, a field in which TeSA has acquired extensive experience through several past projects, both in signal processing and in digital communications. During the period 2019-2020, three projects on navigation issues were carried out.

Lorenzo Ortega's thesis, financed by CNES and Thales Alenia Space, is contributing to the improvement of the Galileo system and the definition of its future upgrades [J-CN-1], [J-CN-3], [C-CN-2], [C-CN-3], [C-CN-4]. In particular, the work focused on reducing the acquisition time and improving the robustness of the system against interference through contributions to the navigation message structure and channel coding. There are several contributions: a new method for co-designing the message structure and channel coding for the new generation of Galileo signals, and optimal codes for modifying the data rate and improving the demodulation threshold. Also, a new waveform and a method for multiplexing the new signal with the existing ones were developed. Finally, the work carried out in this thesis has made it possible to propose new methods for the demodulation of data in different scenarios (urban, interference or without knowledge of the channel) for optimal recovery of the information.

In a study carried out for CNES, TeSA explored the use of Automatic Identification System (AIS) signals to track and monitor ships from satellites [E-CN-1]. The main challenges in this study were a very low signal-to-noise ratio and unsynchronised transmissions. The team responsible was able to develop a solution that outperforms state-of-the-art solutions. Finally, a last study carried out for CLS investigated the applicability of the proposed methods in a ground-based solution for increasing

responsable a pu développer une solution dont les performances surpassent les solutions de l'état de l'art. Enfin, une dernière étude réalisée pour CLS a permis de se pencher sur l'applicabilité des méthodes proposées dans une solution terrestre pour l'augmentation de la portée des stations côtières [E-CN-7]. Cette dernière solution a pour but de soulager les récepteurs satellitaires dans les zones denses et proches des côtes. La difficulté de ces études était de concevoir un récepteur pour une forme d'onde prédéfinie et fixe, puisque déjà largement utilisée, capable de faire face aux dégradations impactant ce type de réceptions longues distances et aux collisions des paquets.

ACCÈS ALÉATOIRE / CANAL DE PROPAGATION

L'accès aléatoire sous-entend une absence de coordination entre des utilisateurs transmettant sur un même canal de communication, ce qui peut créer des collisions. Ce type d'accès alternatif à l'accès traditionnel, où l'on alloue à chaque utilisateur une ressource de transmission, permet de répondre aux besoins des réseaux émergents tels que l'Internet of Things (IoT) et le M2M (Machine To Machine) face au nombre croissant d'utilisateurs. Cependant, le nombre de collisions dans ce type d'applications suit, lui aussi, une croissance exponentielle, ce qui rend leur résolution un enjeu crucial.

Dans le cadre d'une thèse, financée par le CNES et Thales Alenia Space, et encadrée conjointement par des enseignants-chercheurs de Toulouse INP et de l'ISAE-SUPAERO, la doctorante Selma Zamoum s'est intéressée à l'accès aléatoire sur la voie retour d'une chaîne de communication par satellite [J-CN-2], [C-CN-6] et [articles publiés avant 2019, téléchargeables sur le site de TéSA]. Le but principal de la thèse était de réduire la complexité des méthodes récemment proposées

the range of coastal stations [E-CN-7]. This last solution is intended to relieve satellite receivers in dense areas and near the coast. The difficulty of these studies is to design a receiver for a predefined and fixed waveform, since it is already widely used, and that would be capable of coping with the degradations that affect this type of long-distance reception and with packet collisions.

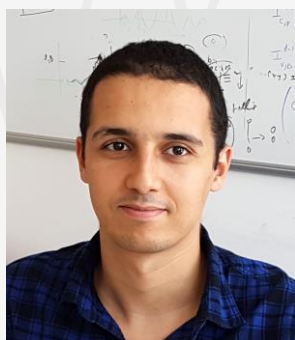
RANDOM ACCESS / PROPAGATION CHANNEL

Random access implies a lack of co-ordination between users transmitting on the same communication channel, which can lead to collisions. This type of alternative access to traditional access, where each user is allocated a transmission resource, makes it possible to meet the needs of emerging networks such as the Internet of Things (IoT) and Machine to Machine (M2M), given the growing number of users. However, the number of collisions in such applications is also growing exponentially, making their resolution a crucial issue.

As a thesis, financed by CNES and Thales Alenia Space, and jointly supervised by teacher-researchers from Toulouse INP and ISAE-SUPAERO, the PhD student Selma Zamoum studied random access on the return channel of a satellite communication system [J-CN-2], [C-CN-6] and [articles published before 2019, downloadable from the TeSA website]. The main goal of the thesis was to reduce the complexity of the recently proposed methods for resolving

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

WHERE ARE THEY NOW?



Après avoir soutenu sa thèse à TéSA en 2015, Tarik Benaddi est embauché à l'ENSEEIH sur un poste d'ATER avant d'obtenir un poste de maître de conférences en communications numériques à l'IMT Atlantique. En 2020, il décide de rejoindre Thales Alenia Space à Toulouse, en tant qu'ingénieur R&D en communications spatiales optiques.

After defending his PhD thesis at TéSA in 2015, Tarik Benaddi was hired at ENSEEIH for an 'ATER' position before becoming an assistant professor in digital communications in IMT Atlantique. In 2020, he decided to join Thales Alenia Space, in Toulouse, as an R&D engineer in space optical communications.

TARIK BENADDI

vis-à-vis de la résolution des collisions à la réception (introduction de satellites régénératifs ou bien d'une passerelle) et diminuer le taux de perte des messages qui a une influence directe sur le débit. Dans un premier temps, deux méthodes en transmission synchrone entre utilisateurs à diversité de préambules et suppression successive des interférences (SIC pour *Successive Interference Cancellation*) ont été proposées. Une étude comparative de complexité a été faite par la suite avec et sans diversité des préambules pour la première méthode par rapport à l'existant, ainsi qu'une extension dynamique et irrégulière de la deuxième méthode. Enfin, une adaptation au cas des transmissions asynchrones a été proposée, couvrant ainsi deux axes principaux des méthodes d'accès aléatoire.

Dans le même contexte, une étude a été faite pour Thales Alenia Space concernant l'implémentation des différentes briques nécessaires à la récupération des messages utiles dans un simulateur d'une chaîne de communication à accès aléatoire [E-CN-4]. La méthode employée est basée sur l'étalement de spectre en S-MIM (*S-band Mobile Interactive Multimedia*). Tout d'abord, la structure de la suppression successive des interférences SIC a été développée et intégrée au simulateur avec une modélisation du trafic des messages en collision. Dans un deuxième temps, les performances du simulateur ont été évaluées et comparées aux performances théoriques et à celles obtenues par l'abstraction de la couche physique. Les simulations ont permis de mettre en évidence la non-optimalité de la méthode de synchronisation envisagée pour le système et d'en proposer des évolutions afin d'atteindre les performances voulues.

collisions on reception (introduction of regenerative satellites or of a gateway) and to reduce the message loss rate which has a direct influence on the throughput. First, two methods for synchronous transmission between users, with preamble diversity and Successive Interference Cancellation (SIC), were proposed. A comparative complexity study was then made with and without preamble diversity for the first method compared to the existing one, as well as a dynamic and irregular extension of the second method. Finally, an adaptation to the case of asynchronous transmissions was proposed, thus covering two main characteristics of random-access methods.

In the same context, a study was carried out for Thales Alenia Space concerning the implementation of the various building blocks necessary for the recovery of useful messages in a simulator of a random-access communication system [E-CN-4]. The implemented method is based on an S-band Mobile Interactive Multimedia (S-MIM) spread spectrum. Firstly, the structure of the successive SIC interference suppression was developed and integrated into the simulator with modelling of the colliding message traffic. In a second step, the performance of the simulator was evaluated and compared to the theoretical performance and to the performance obtained by the abstraction of the physical layer. The simulations highlighted the lack of optimisation of the synchronisation method envisaged for the system and allowed us to propose changes to achieve the desired performance.

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

WHERE ARE THEY NOW?



Après avoir soutenu sa thèse à TeSA en 2016, et fait un post doc de 2 ans à l'ESTEC aux Pays-Bas au sein de la section des technologies télécoms, Karine Zidane a travaillé dans une startup à Amsterdam, en tant qu'ingénieure télécoms de l'internet des objets par satellite. En 2020, elle rejoint Thales Alenia Space, à Toulouse, en tant qu'ingénieure systèmes télécoms.

After defending her PhD thesis at TeSA in 2016 and performing a two-year postdoctoral study at the telecom technologies service of ESTEC in the Netherlands, Karine Zidane worked for a year and a half in a startup in Amsterdam, as a satellite IoT telecom engineer. In 2020, she joined Thales Alenia Space, in Toulouse, as a telecom systems engineer.

KARINE ZIDANE

Dans le cadre des communications d'urgence des avions par satellites, TéSA a réalisé une étude visant à vérifier la validité d'une méthode d'évaluation de la probabilité d'interférence entre le nouveau système de communication Certus développé par Iridium et le système déjà mis en œuvre par Inmarsat [E-CN-8]. L'étude, par le développement d'un simulateur du trafic aérien dans lequel les interférences entre les systèmes de communication sont étudiées, a permis de vérifier la cohérence des résultats obtenus par l'estimateur préalablement proposé. Cette étude a également été l'occasion de proposer un autre critère d'évaluation des interférences, par le calcul de la probabilité pour une communication Inmarsat d'être interférée par le trafic engendré par le nouveau système Certus. D'autre part, dans le cadre d'une étude menée conjointement avec Collins Aerospace, TéSA a développé un modèle de canal de propagation caractérisant un lien de communication entre drone et sol et l'a intégré dans un simulateur préexistant [E-CN-5]. L'objectif de cette modification du simulateur est de permettre de reproduire les détériorations obtenues lors d'une campagne de mesures conduite avec la NASA. Ce simulateur facilitera le développement de solutions à même de contrecarrer les perturbations induites par ce canal de propagation.

CHARGE UTILE

Les activités de TéSA en communications numériques touchent également la charge utile des satellites. Les problématiques sur lesquelles TéSA s'est focalisé concernent les mélangeurs de fréquence ainsi que la non-linéarité du canal satellitaire. Trois études ont été effectuées dans ce cadre.

In the context of emergency satellite communications for aircraft, TeSA carried out a study to verify the validity of a method for assessing the probability of interference between the new Certus communication system developed by Iridium and the system already implemented by Inmarsat [E-CN-8]. The study, by developing an air traffic simulator in which the interference between communication systems was investigated, was able to verify the consistency of the results obtained by the previously proposed estimator. This study also proposed another interference assessment criterion, by calculating the probability of an Inmarsat communication suffering interference from the traffic generated by the new Certus system. Furthermore, as part of a study conducted jointly with Collins Aerospace, TeSA developed a propagation channel model characterising a communication link between a UAV and the ground and integrated it into a pre-existing simulator [E-CN-5]. The aim of this modification of the simulator is to enable the deterioration obtained during a measurement campaign conducted with NASA to be reproduced. This simulator will facilitate the development of solutions capable of counteracting the perturbations induced by this propagation channel.

PAYLOAD

TeSA's digital communications activities also involve satellite payloads. The issues on which TeSA has focused concern frequency mixers and the non-linearity of the satellite channel. Three studies were carried out on this issue.

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

WHERE ARE THEY NOW?



Après avoir soutenu sa thèse à TéSA en 2016, Rami Ali Ahmad est embauché chez M3SYSTEMS, à Toulouse, en tant qu'ingénieur d'études en radionavigation et traitement du signal GNSS.

Since his PhD defense in 2016, Rami Ali Ahmad has been working for M3SYSTEMS in Toulouse, as an R&D engineer in radionavigation and GNSS signal processing.

RAMI ALI AHMAD

La première étude s'est intéressée au concept d'un nouveau type de mélangeur de fréquences à l'entrée d'un processeur numérique transparent (PNT) que les satellites à très haut débit (VHTS - *Very High Throughput Satellite*) utilisent [E-CN-2]. Les PNT sont particulièrement utilisés par les VHTS pour améliorer la flexibilité de répartition entre les utilisateurs et les stations de base. Cette étude, menée en collaboration avec Toulouse INP et le LAAS de Toulouse, avait pour but de rechercher une alternative aux mélangeurs classiques large bande générant des produits parasites qui retombent dans la bande utile. À l'issue de l'étude, un mélangeur n'utilisant pas d'oscillateur local mais reposant sur un double échantillonnage des signaux en entrée et en sortie a été proposé. Une modélisation et une simulation du concept puis une première maquette du circuit ont par la suite été réalisées et ont montré la faisabilité du concept. De plus, un nouveau circuit de génération d'horloge, qui a donné lieu à un brevet, a été proposé.

La deuxième étude, sous forme d'expertise pour la société ACTIA à travers l'IRT Saint Exupéry, avait pour but la conception d'un linéariseur numérique large bande [E-CN-6]. Ce dernier présente une alternative aux linéariseurs analogiques actuels, qui doivent être réglés pour chaque amplificateur et souvent, ne fonctionnent que dans des bandes de fréquences étroites. Dans un premier temps, un banc de mesure des non-linéarités a été défini et monté. Ensuite, un modèle d'amplificateur non linéaire a été étudié puis réalisé et ses performances validées. Le modèle a notamment été inversé dans le but d'obtenir le modèle du linéariseur, dont les performances ont également été validées.

Enfin, dans une R&T CNES, une équipe TéSA a exploré l'impact des non-linéarités non polynomiales sur les pertes causées par les intermodulations [E-CN-3]. En effet, pour des questions de rendement et de consommation, il est important de faire opérer les amplificateurs au voisinage de leur point de saturation. Les solutions logicielles actuelles de modélisation simplifient beaucoup ces distorsions en ne considérant que des non-linéarités polynomiales. Au travers de la réalisation d'un banc de mesure, on a montré qu'une telle simplification est trop optimiste dans certains scénarios.

The first study looked at the concept of a new type of frequency mixer at the input of a digital transparent processor (DTP) used by Very High Throughput Satellites (VHTSs) [E-CN-2]. DTPs are used in particular by VHTSs to improve dispatch flexibility between users and base stations. This study, carried out in collaboration with Toulouse INP and LAAS in Toulouse, aimed to find an alternative to conventional broadband mixers that generate spurious products that are then included in the useful band. As a result of the study, a mixer that does not use a local oscillator but relies on double sampling of the input and output signals, was proposed. The study first modelled and simulated the concept and then developed a first mock-up of the circuit, which demonstrated the feasibility of the concept. In addition, a new clock generation circuit, which was patented, has been proposed.

The second study, in the form of expertise made available for ACTIA by the IRT Saint Exupéry, was aimed at designing a broadband digital linearizer [E-CN-6]. The latter offers an alternative to current analogue linearizers, which have to be adjusted for each amplifier and often only work in narrow frequency bands. In a first step, a bench for measuring non-linearities was defined and set up. Then, a non-linear amplifier model was designed and developed, and its performances validated. In particular, the model was inverted in order to obtain the linearizer model, whose performance was also validated.

Finally, in a CNES R&T project, a TeSA team explored the impact of non-polynomial non-linearities on losses caused by intermodulations [E-CN-3]. For efficiency and power consumption reasons, it is important to operate the amplifiers near their saturation point. Current modelling software solutions greatly simplify these distortions by considering only polynomial non-linearities. By making a measurement bench, it was shown that such a simplification is too optimistic in some scenarios.

Liste des thèses soutenues

List of defended theses

Ortega Lorenzo, *Étude et optimisations des signaux pour les évolutions Galileo*, thèse cofinancée par le CNES et Thales Alenia Space (TAS), soutenue le 25/11/2019. Après la thèse, post-doc TéSA puis poste d'enseignant-chercheur à l'IPSA. - *Study and optimisations of the next generation of Galileo signals*, PhD co-funded by CNES and Thales Alenia Space (TAS), defended on 25/11/2019. After PhD, TeSA post-doc, then permanent position as an associate professor at IPSA.

Zamoum Selma, *Méthodes d'accès aléatoire pour les communications par satellite*, thèse cofinancée par le CNES et Thales Alenia Space (TAS), soutenue le 28/11/2019. Embauchée par SpaceAble. - *Random access methods for satellite communications*, PhD co-funded by CNES and Thales Alenia Space (TAS), defended on 28/11/2019. Hired by SpaceAble.

Liste des projets

List of projects

CNES

[E-CN-1] *Étude de démodulation des signaux AIS*. Domaine d'application : Localisation et navigation. - *Demodulation study of AIS signals*. Field of application: Positioning and Navigation.

[E-CN-2] *Échantillonnage en entrée de PNT (R&T R-S16/TC-0007-100)*. Domaine d'application : Télécommunications spatiales. - *Input sampling of DTPs (PNT) (R&T R-S16/TC-0007-100)*. Field of application: Space telecommunications.

[E-CN-3] *Intermodulations transistors (R&T R-S18/TG-0001-063)*. Domaine d'application : Télécommunications spatiales. - *Intermodulation in transistors (R&T R-S18/G-0001-063)*. Field of application: Space telecommunications.

THALES ALENIA SPACE

[E-CN-4] *Suppression interférences dans S-MIM*. Domaine d'application : Télécommunications spatiales. - *Interference suppression in S-MIM*. Field of application: Space telecommunications.

COLLINS FRANCE

[E-CN-5] *Modélisation du canal CNPC*. Domaine d'application : Télécommunications aéronautiques. - *Modelling of the CNPC channel*. Field of application: Aeronautical telecommunications.

IRT SAINT EXUPÉRY

[E-CN-6] *Non Linéarités du canal satellite*. Domaine d'application : Télécommunications spatiales. - *Satellite channel non-linearities*. Field of application: Space telecommunications.

CLS

[E-CN-7] *Surveillance maritime par AIS satellite*. Domaine d'application : Localisation et navigation - *Maritime surveillance by satellite AIS*. Field of application: Positioning and Navigation.

ATMOSPHERE

[E-CN-8] *Analyse des interférences dans les SATCOM aéronautiques*. Domaine d'application : Télécommunications spatiales. - *Analysis of interference in aeronautical SATCOM*. Field of application: Space telecommunications.

Liste des publications et brevets List of publications and patents

ARTICLES DE REVUES INTERNATIONALES OU NATIONALES AVEC COMITÉ DE LECTURE – INTERNATIONAL OR NATIONAL PEER-REVIEWED JOURNAL PAPERS

- [J-CN-1] Ortega Espluga Lorenzo, Aubault-Roudier Marion, Poulliat Charly, Boucheret Marie-Laure, Al Bitar Hanaa and Closas Pau, *LLR Approximation for Fading Channels Using a Bayesian Approach*, IEEE Communications Letters, vol. 24, issue 6, pp. 1244-1248, June, 2020.
- [J-CN-2] Zamoum Selma, Lacan Jérôme, Boucheret Marie-Laure, Dupé Jean-Baptiste and Gineste Mathieu, *Complexity Analysis for Recent ALOHA Random Access Techniques in Satellite Communications*, International Journal of Satellite Communications and Networking, pp. 1-18, June, 2020.
- [J-CN-3] Ortega Espluga Lorenzo, Poulliat Charly, Boucheret Marie-Laure, Aubault-Roudier Marion and Al Bitar Hanaa, *Optimizing the Co-Design of Message Structure and Channel Coding to Reduce the TTD for a Galileo 2nd Generation Signal*, Journal of the Institute of Navigation, vol. 67, issue 3, pp. 471-492, August, 2020.

COMMUNICATIONS AVEC ACTES DANS DES CONGRÈS INTERNATIONAUX OU NATIONAUX À COMITÉ DE LECTURE – INTERNATIONAL OR NATIONAL PEER-REVIEWED CONFERENCE PAPERS

- [C-CN-1] Soubigou Eric, Sahin Serdar, Cipriano Antonio, Poulliat Charly and Chayot Romain, *Analyse Multicritères des Performances et de la Complexité des Turbo-égaliseurs à Complexité Réduite à base de Treillis et de Filtres*, In Proc. 27ème Colloque du Groupe de Recherche sur le Traitement du Signal et des Images (GRETSI), Villeneuve-d'Ascq, France, August 26-29, 2019.
- [C-CN-2] Ortega Espluga Lorenzo, Closas Pau, Poulliat Charly, Boucheret Marie-Laure, Aubault-Roudier Marion and Al Bitar Hanaa, *Data Decoding Analysis of Next Generation GNSS Signals*, In Proc. ION Global Navigation Satellite Systems (GNSS), Miami, Florida, USA, September 16-20, 2019.
- [C-CN-3] Ortega Espluga Lorenzo, Poulliat Charly, Boucheret Marie-Laure, Aubault-Roudier Marion and Al Bitar Hanaa, *Binary Root Protograph LDPC Codes for CSK Modulation to Increase the Data Rate and Reduce the TTD*, In Proc. ION Global Navigation Satellite Systems (GNSS), Miami, Florida, USA, September 16-20, 2019.
- [C-CN-4] Ortega Espluga Lorenzo, Poulliat Charly, Boucheret Marie-Laure, Aubault-Roudier Marion and Al Bitar Hanaa, *Optimal Channel Coding Structures for Fast Acquisition Signals in Harsh Environment Conditions*, In Proc. ION Global Navigation Satellite Systems (GNSS), Miami, Florida, USA, September 16-20, 2019.

QUE SONT-ILS DEVENUS ? WHERE ARE THEY NOW?



MARION AUBAULT ROUDIER

Après avoir soutenu sa thèse à TéSA en 2015, Marion Aubault Roudier est embauchée par le CNES, à Toulouse, en tant qu'ingénieure spécialiste signaux et équipements GNSS. Ses activités concernent l'amélioration des performances des signaux Galileo de la future génération, l'étude du gain en performance des nouveaux procédés et de leur faisabilité technique, la proposition de nouveaux services pour Galileo et la surveillance du partage du spectre des signaux GNSS.

After her PhD defense in 2015 at TéSA, Marion Aubault Roudier was hired by CNES, in Toulouse as a GNSS signal and equipment specialist engineer. Her activities cover performance improvement of new generation Galileo signals, the study of performance gain and technical feasibility of new processes, the proposal of new Galileo services and monitoring of GNSS signal spectrum sharing.

- [C-CN-5] Verheyde Thomas, Blais Antoine, Macabiau Christophe and Marmet François-Xavier, *Statistical Analysis of Android GNSS Raw Data Measurements in an Urban Environment for Smartphone Collaborative Positioning Methods*, In Proc. International Navigation Conference (INC), Edinburgh, UK, Nov. 18-21, 2019.
- [C-CN-6] Zamoum Selma, Lacan Jérôme, Boucheret Marie-Laure, Dupé Jean-Baptiste and Gineste Mathieu, *Asynchronous Packet Localization with Random SPOTiT in Satellite Communications*, In Proc. Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), Lisbon, Portugal, November 24-27, 2019.
- [C-CN-7] Verheyde Thomas, Blais Antoine, Macabiau Christophe and Marmet François-Xavier, *Analyzing Android GNSS Raw Measurements Flags Detection Mechanisms for Collaborative Positioning in Urban Environment*, In Proc. International Conference on Localization (ICL-GNSS), Tampere, Finland, June 2-4, 2020.
- [C-CN-8] Verheyde Thomas, Blais Antoine, Macabiau Christophe and Marmet François-Xavier, *An Assessment Methodology of Smartphones Positioning Performance for Collaborative Scenarios in Urban Environment*, In Proc. ION GNSS+, St Louis, Missouri, USA, September 21-25, 2020.

BREVETS – PATENTS

- [B-CN-1] Ortega Espluga Lorenzo, Poulliat Charly, Al Bitar Hanaa, Boucheret Marie-Laure and Aubault-Roudier Marion, *Codage LDPC à Protection Différenciée*, n° FR3097388, BOPI 2020-51, December 18, 2020.



Selma Zamoum présente sa thèse à la journée scientifique de TéSA, juin 2019.
Selma Zamoum presenting her thesis at the TeSA scientific day, June 2019.



Réseaux

En 2019 et 2020, les études du monde de la couche transport dominent les travaux réalisés sur cet axe par le TéSA. On peut expliquer cette tendance par l'avènement de nouveaux standards à l'IETF (*Internet Engineering Task Force*) qui ont conduit le CNES à réaliser plusieurs études sur l'impact de ces nouveaux protocoles ou micro-mécanismes de transport au sein de l'architecture des satellites de communication (SATCOM). Toutefois, les thèses et études touchent comme les années passées des thématiques très variées qui vont de la prédiction du trafic à l'internet des objets en passant par les communications aéronautiques, civiles et critiques. Nous proposons donc de décrire les travaux menés sur cette période en les regroupant par thèmes, ce qui permet d'apprécier l'impact des évolutions du monde de l'internet vers les communications aéronautiques et spatiales.



Synthèse des travaux

PRÉDICTION DU TRAFIC

Les systèmes de télécommunications par satellite sont caractérisés par une grande variabilité du trafic transporté, principalement à cause de son hétérogénéité, sa sporadicité, ainsi que de la diversité des protocoles de transport utilisés régulant leurs débits en fonction de la congestion du réseau. À cela s'ajoute la variabilité des plages d'utilisation des différents services réseaux qui provoquent des montées en charge sur certains moments de la journée.

La prédiction de trafic s'avère donc dans un contexte de satellite de SATCOM essentielle si l'on souhaite améliorer la Qualité de Service (QoS) et la Qualité d'Expérience (QoE) des utilisateurs.

Une étude CNES, impliquant à la fois des chercheurs de TéSA, des ingénieurs de Thales Alenia Space et des ingénieurs de Viveris, s'est attachée à développer des algorithmes, provenant du traitement statistique du signal, dans le but de prédire le débit du trafic pour mieux dimensionner et améliorer la gestion du réseau [E-R-1]. Combinant des expérimentations basées sur des simulations numériques réalistes et des traces de mesures de trafic de communications satellite, l'équipe projet a proposé une approche novatrice permettant d'améliorer la puissance de prédiction de façon significative.

TRANSPORT

Cette année les principaux thèmes abordés dans la thématique du transport concernent l'utilisation du multi-chemin, l'analyse de



Networking

In 2019 and 2020, most of TeSA research in this field concerned studies of the transport layer. This trend can be explained by the advent of new standards at the Internet Engineering Task Force (IETF) which led CNES to carry out several studies on the impact of these new protocols or transport micro-mechanisms within the architecture of communication satellites (SATCOM). However, as in previous years, the theses and studies cover a wide range of topics, from traffic prediction to the Internet of Things, including aeronautical, civil and critical communications. We shall thus describe the work carried out during this period according to the themes mentioned above, which sheds light on the way Internet developments are affecting aeronautical and space communications.



Summary of work

TRAFFIC PREDICTION

Satellite communications systems are characterised by a high variability of the traffic carried, mainly due to its heterogeneity, sporadicity and the diversity of the transport protocols used, which regulate their throughput rates according to network congestion. In addition, the varying usage range of the different network services leads to peak loads at certain times of the day.

Traffic prediction is therefore essential in a SATCOM satellite context if one wishes to improve the Quality of Service (QoS) and Quality of Experience (QoE) of users.

A CNES study, involving researchers from TeSA, engineers from Thales Alenia Space and engineers from Viveris, focused on developing algorithms, based on statistical signal processing, to predict traffic flow in order to better size and improve network management [E-R-1]. Combining experiments based on realistic numerical simulations and traces of satellite communications traffic measurements, the project team proposed an innovative approach to significantly improve the predictive power.

TRANSPORTATION

This year, the main topics covered in the transport theme are the use of multipathing, performance analysis of the new Quick User datagram protocol Internet Connections (QUIC) and the improvement of user QoE.

performances du nouveau protocole QUIC (*Quick User datagram protocol Internet Connections*) et l'amélioration de la QoE de l'utilisateur.

Le multi-chemin est une formidable opportunité pour les réseaux SATCOM notamment pour le partage de charge, la résilience ou la performance du transfert. Cependant, le multi-chemin est source de désordonnement des paquets du flot de données, or le protocole TCP (*Transmission Control Protocol*) considère celui-ci comme un signal de congestion. C'est dans ce contexte que l'IETF a conduit la standardisation d'une extension de TCP multi-chemin du nom de MPTCP (*Multipath TCP*). Un autre protocole, poussé par un géant de l'internet, gagne en popularité pour le transport de données multimédia : le protocole QUIC. C'est un protocole de transport applicatif proposé par Google en 2017 permettant une amélioration de la qualité d'expérience de l'utilisateur. Toutefois, QUIC n'intègre pas encore de fonctionnalités multi-chemin, mais une version MPQUIC (*Multipath QUIC*) est en cours de discussion à l'IETF. Il semble donc pertinent d'étudier l'impact de ces protocoles au contexte du satellite par un prototypage et par une analyse fine de sa performance. Ce fut l'enjeu d'une étude CNES menée par une équipe de chercheurs de TESA [E-R-2].

Plusieurs autres études se sont attachées à l'impact de ce nouveau protocole QUIC sur les communications SATCOM. Comme bon nombre de nouveaux protocoles proposés par l'IETF, les performances publiées concernent principalement les réseaux terrestres, ce qui conduit parfois à une conception qui se révèle distante des besoins du monde du satellite. Aujourd'hui, QUIC représente 30 % de la part du trafic mondial et possède la particularité d'utiliser

Multipathing is a great opportunity for SATCOM networks, especially for load balancing, resilience or transfer performance. However, multipathing causes packet disordering in the data stream, and the Transmission Control Protocol (TCP) considers this to be a congestion signal. It is in this context that the IETF has led the standardisation of a multipath TCP extension called MPTCP. Another protocol, pushed by an Internet giant, is gaining popularity for the transport of multimedia data: the QUIC protocol. It is an application transport protocol proposed by Google in 2017 to improve the user's quality of experience. However, QUIC does not yet include multipath functionality, but a Multipath QUIC (MPQUIC) version is under discussion in the IETF. It therefore seems relevant to study the impact of these protocols in the context of satellites by prototyping and by a precise analysis of its performance. This was the focus of a CNES study conducted by a team of TeSA researchers [E-R-2].

Several other studies have focused on the impact of this new QUIC protocol on SATCOM communications. As with many new protocols proposed by the IETF, the published performance is mainly for terrestrial networks, which sometimes leads to a design that is somewhat removed from the needs of the satellite world. Nowadays, QUIC accounts for 30% of the world's traffic and has the particularity of using the User Datagram Protocol (UDP) as opposed to the more standard TCP-based Hypertext Transfer Protocol (HTTP). This application transport protocol

QUE SONT-ILS DEVENUS ? WHERE ARE THEY NOW?



Après avoir soutenu sa thèse à TESA en 2015, Jean-Baptiste Dupé est embauché par le CNES, à Toulouse. Ses activités de recherche concernent le segment sol des systèmes satellites VHTS, en y incluant l'architecture réseaux le dimensionnement système et l'implémentation DVB-S2X/RCS2.

After his PhD defense in 2015, Jean-Baptiste Dupé was hired by CNES, in Toulouse. His research interests focus now on user ground segment design for VHTS satellite systems, including networking architecture, DVB-S2X/RCS2 implementation and system sizing.

JEAN-BAPTISTE DUPÉ

le protocole UDP (*User Datagram Protocol*) contrairement aux piles plus standards HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) basées sur TCP. Cette approche de protocole de transport applicatif permet aux opérateurs d'extrémités de déployer plus facilement des services applicatifs à fortes contraintes temporelles (ce que ne permet pas TCP), et qui ne peuvent se suffire d'un transport UDP classique. Le succès de ce protocole s'explique par l'affranchissement de la limitation historique résultante de la pile protocolaire standard. Cependant, les architectures SATCOM actuelles ont basé l'amélioration de leur performance sur la pile protocolaire historique. Par exemple, l'optimisation du transfert dans les architectures SATCOM est bien souvent réalisée par des proxys (PEP – *Performance Enhancing Proxy*). Or cette optimisation, conçue pour TCP, n'est plus possible avec QUIC qui se base sur UDP. Ne pouvant occulter la progression du protocole QUIC, plusieurs études se sont donc focalisées sur l'impact des mécanismes protocolaires de QUIC, aussi bien sur le trafic global que sur l'architecture SATCOM en elle-même [E-R-3], [E-R-4].

Enfin pour conclure cette partie transport, l'identification des besoins de fiabilisation d'un lien satellitaire afin d'améliorer le service rendu aux utilisateurs reste une thématique de recherche pérenne du TéSA. En effet, à la vue des évolutions protocolaires et architecturales, l'analyse de l'impact des mécanismes de fiabilisation proposés dans le cœur du réseau (au niveau des accès et liaison de données, au niveau d'un tunnel, etc.) sur les performances des protocoles déployés dans les serveurs (transport, session et application) demeure incontournable. C'est dans ce contexte qu'une étude a été mise en place, prolongeant différents travaux entrepris entre le CNES et TéSA concernant la mise en œuvre d'un service fiable sur les architectures de satellite de communication [E-R-5]. Cette étude s'est attachée à l'impact de la mobilité au-dessus d'une architecture de réseaux complète comprenant une liaison satellite (optique et DVB), pour des applications ayant des contraintes temporelles strictes comme il en est le cas pour la diffusion vidéo (temps-réel ou à la demande). Ce travail a permis d'opérer une sélection des protocoles les plus intéressants pour la diffusion vidéo sur le canal satellite mobile en bande K et de mettre en œuvre une plateforme d'émulation afin d'illustrer les gains importants obtenus pour chacun des protocoles.

approach makes it easier for end-user operators to deploy time-sensitive application services (which TCP does not allow), which cannot be handled by conventional UDP transport. The success of this protocol is due to the fact that it overcomes the historical limitation of the standard protocol stack. However, current SATCOM architectures have based their performance improvements on the long-standing protocol stack. For example, transfer optimisation in SATCOM architectures is often achieved by proxies (Performance Enhancing Proxy – PEP). This optimisation, designed for TCP, is no longer possible with QUIC, which is based on UDP. As the increasing adoption of the QUIC protocol cannot be ignored, several studies have focused on the impact of the QUIC protocol mechanisms, both on the global traffic and on the SATCOM architecture itself [E-R-3], [E-R-4].

Finally, to conclude this section on transport, determining the means needed to improve the reliability of a satellite link, in order to improve the service provided to users, remains a permanent TeSA research theme. Indeed, in view of the protocol and architectural developments, it is essential to analyse the impact of the reliability mechanisms proposed in the network core (regarding accessing and linking to data, tunnels, etc.) on the performance of the protocols deployed in the servers (transport, session and application). It is in this context that a study was set up, extending various work undertaken jointly by CNES and TeSA concerning the implementation of a reliable service for communication satellite architectures [E-R-5]. This study focused on the impact of mobility on a complete network architecture including a satellite link (optical and DVB) for applications with strict time constraints, as is the case for video broadcasting (real-time or on-demand). This work made it possible to select the most interesting protocols for video broadcasting over the K-band mobile satellite channel and to implement an emulation platform with which to illustrate the important gains obtained for each of the protocols.

NOUVELLES CONSTELLATIONS

Le renouveau de constellations de satellites a suscité l'intérêt de nombreux acteurs de l'Internet (Google, Facebook...). Si les constellations permettent une amélioration sensible du délai de propagation en comparaison d'un système classique comportant un satellite géostationnaire, ce seul paramètre ne permet en aucun cas de prédire leur succès. De plus, la réduction du délai de propagation ne garantit pas une réduction de la latence de bout-en-bout, tant d'autres composantes de latence, telles que le routage au sein de la constellation, l'accès à la ressource ou la retransmission, à différents niveaux protocolaires, causée par une perte ou à un réordonnement de paquets, peuvent s'avérer être d'importance égale, sinon supérieure. De plus, d'autres critères tels que le débit disponible ou la gigue engendrée peuvent également être importants pour un service donné. Quant aux satellites géostationnaires, ils disposent d'une avance sans équivalent dans de nombreux domaines, fruit des recherches de ces quinze dernières années, assurant la pertinence de leur utilisation pour les systèmes de type haut débit (*broadband*), pour l'accès à Internet, mais aussi pour assurer une diffusion large (*broadcast*).

NEW CONSTELLATIONS

The revival of satellite constellations has aroused the interest of many Internet players (Google, Facebook, etc.). Although constellations enable a significant improvement in propagation time compared to a conventional system with a geostationary satellite, this parameter alone does not mean they will be successful. Furthermore, reducing propagation delay does not guarantee a reduction in end-to-end latency, as other latency components, such as routing within the constellation, resource access or retransmission, at different protocol levels, caused by packet loss or rescheduling, may be of equal or greater importance. In addition, other criteria such as the available throughput or the jitter generated may also be considerable for a given service. As for geostationary satellites, they have an unrivalled lead in many areas, the result of research over the last fifteen years, ensuring that they are suitable for broadband systems, for Internet access, but also for wider broadcasting.



Sylvain Cluzel à sa soutenance de thèse.
Sylvain Cluzel at his thesis defense.

C'est dans ce cadre qu'une étude a été lancée afin d'aborder la nouvelle utilisation des constellations de satellites pour des services haut débit orientés internet, notamment autour de deux grands axes : l'évaluation des performances de TCP au-dessus de ces nouvelles constellations et la gestion dynamique et flexible de la ressource [E-R-6]. En effet, les possibilités offertes par les capacités de calcul accrues des équipements sol, ainsi que par les charges utiles flexibles, permettent aux systèmes géostationnaires d'envisager une grande flexibilité dans la distribution des ressources (temps, fréquence, puissance), et ainsi de l'adapter au mieux à la demande.

SATCOM POUR LA GESTION DE CRISE

La gestion de crise est un scénario souvent mis en avant dans les études du TéSA. L'originalité d'une étude cette année fut d'utiliser une nouvelle technologie réseau, toujours en cours de développement (SDN-*Software Defined Network*) et de l'appliquer dans des scénarios de crise et d'urgence afin de démontrer son gain potentiel [E-R-7]. Plus particulièrement, cette étude a permis d'analyser des solutions permettant de découpler deux phases du déploiement : le déploiement de l'infrastructure physique (alignement des antennes, routage des câbles, fourniture d'électricité) et la configuration des équipements réseaux afin d'assurer la fourniture de services avec la qualité d'expérience souhaitée pour les utilisateurs. La configuration est alors réalisée par un opérateur extérieur à l'opération qui, en utilisant les briques technologiques du SDN couplées à un accès satellite, configure et supervise à distance les équipements en fonction des besoins exprimés. La supervision à distance peut inclure également des changements de configuration afin d'accompagner une montée en puissance de l'opération. Une évaluation des performances de cette architecture sur des scénarios réalistes de communication en cas d'urgence a été menée et en a montré l'intérêt et l'adaptation à ce type de scénario.

COMMUNICATIONS AÉRONAUTIQUES

Le contexte aéronautique a, depuis plusieurs années, mis en évidence le besoin croissant de nouveaux services à bord des avions pour le contrôle aérien et les compagnies dans le cadre des communications ATC (*Air Traffic Control*) ou AOC (*Aeronautical Operational Control*). Le principe de l'avion connecté séduit les compagnies. Elles cherchent donc à connecter leurs avions à leur système d'information, et à tirer profit de cette capacité pour améliorer la sécurité des vols et l'efficacité opérationnelle.

Ces nouveaux besoins se traduisent également par un certain nombre de challenges techniques qu'il est nécessaire de prendre en compte pour pouvoir proposer une solution techniquement

It is in this context that a study was undertaken to address the new use of satellite constellations for Internet-oriented broadband services, notably focussing on two main themes: the evaluation of TCP performance using these new constellations and the dynamic and flexible management of the resource [E-R-6]. Indeed, the potential offered by the increased computing capacities of ground equipment, as well as by flexible payloads, create the possibility of geostationary systems with great flexibility in the distribution of resources (time, frequency, power), and thus adapting them to demand.

SATCOM FOR CRISIS MANAGEMENT

Crisis management is a scenario often referred to in TeSA studies. One original study this year used a new network technology, which is still under development, Software Defined Network (SDN), and applied it in crisis and emergency scenarios to demonstrate its potential gain [E-R-7]. In particular, the study analysed solutions that would allow the decoupling of two deployment phases: the deployment of the physical infrastructure (antenna alignment, cable routing, power supply) and the configuration of the network equipment to ensure the delivery of services with the desired quality of experience for the users. The configuration is then carried out by an outside operator, who, using SDN technological building blocks coupled with satellite access, remotely configures and supervises the equipment according to the needs expressed. Remote monitoring can also include configuration changes to support a ramp-up of the operation. An evaluation of the performance of this architecture on realistic emergency communication scenarios was carried out and concluded that it would be useful to adapt it to this type of scenario.

AERONAUTICAL COMMUNICATIONS

The aeronautical context has, for several years, highlighted the growing need for new services on board aircraft for communications for airlines, Air Traffic control (ATC) and Aeronautical Operational Control (AOC). Airlines are becoming increasingly interested in the principle of the connected aircraft. They would therefore like to connect their aircraft to their information systems, and take advantage of this capability to improve flight safety and operational efficiency.

These new needs also raise a certain number of technical challenges that need to be taken into account in order to be able to propose an innovative technical solution capable of coping with future developments in aeronautical uses.

innovante et capable de faire face aux futures évolutions des usages aéronautiques. En particulier, la thématique de communication multi-lien dans laquelle plusieurs types de communication de niveau liaison (par exemple SATCOM – Satellite de communication, AEROMACS – *Airport Surface Data Link* ou encore VDL mode 2 – *Very high frequency Data Link*) pouvant être utilisées en complément, mais également en parallèle nécessite une analyse approfondie des conséquences sur la définition du système en termes de gestion du réseau et de la qualité du service rendu.

C'est dans ce contexte industriel aéronautique, en collaboration avec Collins Aerospace, qu'Alexandre Tran a mené son travail doctoral sur la définition de systèmes et routeurs embarqués dans le cadre du futur réseau ATN/IPS (*Aeronautical Telecommunication Network basé sur la pile Internet Protocol*). Dans sa thèse, il a notamment mis en évidence la nécessité de définir des mécanismes et des fonctionnalités réseaux pour la mobilité IP et la gestion multi-liens hétérogènes en adéquation avec les contraintes aéronautiques [C-R-2] et [article publié avant 2019, téléchargeable sur le site de TéSA].

INTERNET DES OBJETS

L'Internet des Objets (IoT) regroupe un ensemble de systèmes variés, tant par leurs contraintes que par leurs utilisations. L'une des problématiques actuelles de l'IoT est de fournir un service à un nombre d'objets toujours plus nombreux.

En particulier, dans le cadre de l'IoT, les réseaux sans fil à grande couverture et à faible consommation énergétique, appelés LPWAN (*Low-Power Wide-Area Network*) sont d'une

This is the case in particular for the multi-link communication theme in which several types of link-level communication (e.g., Satellite Communication – SATCOM, Airport Surface Data Link – AEROMACS or Very high frequency Data Link – VDL mode 2) can be used in addition to, but also concomitantly with each other. This requires an in-depth analysis of the consequences on the system definition in terms of network management and quality of service.

It is in this aeronautical industrial context, in collaboration with Collins Aerospace, that Alexandre Tran carried out his doctoral research on the definition of on-board systems and routers for the future Aeronautical Telecommunication Network based on the Internet Protocol stack (ATN/IPS). In his thesis, he highlighted the need to define network mechanisms and functionalities for IP mobility and heterogeneous multi-link management in line with aeronautical constraints [C-R-2] and [paper published before 2019, downloadable from the TeSA website].

INTERNET OF THINGS

The Internet of Things (IoT) brings together a range of systems, both in terms of their constraints and their uses. One of the current challenges of the IoT is to provide a service for an increasing number of objects.

In particular, in the context of the IoT, high-coverage, low-power wireless networks, known as Low-Power Wide-Area Networks (LPWANs) are of

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

WHERE ARE THEY NOW?



Après avoir soutenu sa thèse à TéSA en 2015, Viet Trang est embauché par Iraten Solutions, société qui fournit des solutions de Big Data. Il est responsable de R&D et expert en Java EE et Angular.

After his PhD defense in 2015, Viet Trang was hired by Iraten Solutions; a provider of Big Data solutions. He is responsible for R&D, as well as being a Java EE and Angular expert.

VIET TRANG

grande importance. Ces réseaux ont pour but de connecter des objets qui partagent certaines caractéristiques précises. Parmi celles-ci, ces objets doivent être dimensionnés afin que leur autonomie soit la plus grande possible. De plus, ils doivent avoir de faibles quantités de données à transmettre régulièrement ou de façon sporadique. Enfin, il s'agit de terminaux bas coûts, accessibles au plus grand nombre.

Chaque station sol doit avoir une couverture la plus grande possible pour limiter le nombre de stations, cette couverture pouvant être de l'ordre de plusieurs dizaines de kilomètres. Utiliser des satellites est l'une des solutions qui permet d'augmenter rapidement la couverture de ces réseaux terrestres, mais il faut alors s'assurer qu'une hybridation de ces deux systèmes, basée sur des terminaux à bas coûts, soit possible.

Dans ce cadre innovant, le problème à résoudre est celui du développement d'un système permettant une extension de couverture d'un réseau LPWAN existant, à l'aide d'une constellation de satellites. C'est dans ce contexte que Sylvain Cluzel a mené ses travaux de thèse en apportant une solution au problème des collisions entre les messages venant de plusieurs utilisateurs et en fournissant un modèle du nombre de terminaux qu'un tel système peut supporter [voir les publications faites en 2018, téléchargeables sur le site de TeSA].

great importance. The purpose of these networks is to connect objects that share certain specific characteristics. These objects must be sized so that their autonomy is as great as possible. In addition, they should only have small amounts of data to transmit regularly or sporadically. Finally, they are low-cost terminals, accessible to the greatest number of people.

Each ground station must have the largest possible coverage to limit the number of stations, with a range of the order of several tens of kilometres. Satellite relays are one way of rapidly increasing the coverage of these terrestrial networks, but it is necessary to ensure that a hybrid of these two systems, based on low-cost terminals, is feasible.

In this innovative framework, the problem to be solved is to develop a system to extend the coverage of an existing LPWAN network, using a constellation of satellites. It is in this context that Sylvain Cluzel carried out his thesis research by providing a solution to the problem of collisions between messages coming from several users and by developing a model of the number of terminals that such a system can support [see publications made in 2018, downloadable on the TeSA website].

Liste des thèses soutenues

List of defended theses

Cluzel Sylvain, *Système M2M/IoT par satellite pour l'hybridation d'un réseau NB-IoT via une constellation LEO*, thèse cofinancée par le CNES et Thales Alenia Space (TAS), soutenue le 07/03/2019. Embauché par Pole Star. - *M2M/IoT system for NB-IoT hybridization via a LEO constellation*, PhD co-funded by CNES and Thales Alenia Space (TAS), defended on 07/03/2019. After PhD, Hired by Pole Star.

Tran Nguyen Alexandre, *Routeur embarqué pour les communications critiques aéronautiques en environnement multi liens*, thèse financée par Collins Aerospace, soutenue le 20/01/2021. - *Embedded router for critical aeronautical communications in a multi-links environment*, PhD funded by Collins Aerospace, defended on 20/01/2021.

Liste des projets

List of projects

CNES

- [E-R-1] *Techniques de prédiction de trafic réseau (R&T-R-S17/TC-0008-031)*. Domaine d'application : Télécommunications spatiales. - *Network traffic prediction techniques (R&T-R-S17/TC-0008-031)*. Field of application: Space telecommunications.
- [E-R-2] *Réseaux multi-liens et transport (R&T R-S18/TC-0008-035)*. Domaine d'application : Télécommunications spatiales. - *Multi-link networks and transport (R&T R-S18/TC-0008-035)*. Field of application: Space telecommunications.
- [E-R-3] *Harmonisation des timers*. Domaine d'application : Télécommunications spatiales. - *Harmonisation of timers*. Field of application: Space telecommunications.
- [E-R-4] *Optimisation de standard de diffusion vidéo sur internet sur le canal mobile en bande Ka (R&T RS18/TC-0006-041)*. Domaine d'application : Télécommunications spatiales. - *Optimisation of internet video-broadcasting standard over the Ka-band mobile channel (R&T RS18/TC-0006-041)*. Field of application: Space telecommunications.
- [E-R-5] *Service fiable par satellite (R&T R-S19/TC-0008-039)*. Domaine d'application : Télécommunications spatiales. - *Reliable satellite service (R&T R-S19/TC-0008-039)*. Field of application: Space telecommunications.
- [E-R-6] *Gestion des ressources et transport dans les constellations (R&T R-S16/TC-0008-027 et R-S16/TC-0006-034)*. Domaine d'application : Télécommunications spatiales. - *Resource management and transport in constellations (R&T R-S16/TC-0008-027 and R-S16/TC-0006-034)*. Field of application: Space telecommunications.
- [E-R-7] *Réseaux d'urgence SDN (R&T R-S17/TC-0006-037)*. Domaine d'application : Télécommunications spatiales. - *Emergency SDN (R&T R-S17/TC-0006-037)*. Field of application: Space telecommunications.

Liste des publications et brevets List of publications and patents

ARTICLES DE REVUES INTERNATIONALES OU NATIONALES AVEC COMITÉ DE LECTURE – INTERNATIONAL OR NATIONAL PEER-REVIEWED JOURNAL PAPERS

- [J-R-1] Tauran Bastien, Lochin Emmanuel, Lacan Jérôme, Arnal Fabrice, Gineste Mathieu and Kuhn Nicolas, *Scheduling flows over LEO constellations on LMS channels*, International Journal of Satellite Communications and Networking ISSN 1542-0981, online, February, 2020.

COMMUNICATIONS AVEC ACTES DANS DES CONGRÈS INTERNATIONAUX OU NATIONAUX À COMITÉ DE LECTURE – INTERNATIONAL OR NATIONAL PEER-REVIEWED CONFERENCE PAPERS

- [C-R-1] Auger Antoine, Lochin Emmanuel and Kuhn Nicolas, *Making Trustable Satellite Experiments an Application to a VoIP Scenario*, IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Kuala Lumpur, Malaysia, April 28– May 1st, 2019.
- [C-R-2] Tran N'Guyen Hoang Alexandre, Pirovano Alain and Larrieu Nicolas, *Managing Aircraft Mobility in a Context of the ATN/IPS Network*, In Proc. 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC), San Diego, California, September 8-12, 2019.
- [C-R-3] Thibaud Adrien, Fasson Julien, Arnal Fabrice, Sallantin Renaud, Dubois Emmanuel and Chaput Emmanuel, *An analysis of NDN Congestion Control challenges*, In Proc. Hot Information-Centric Networking (HotICN), Chongqing, China, December 13-15, 2019.
- [C-R-4] Thibaud Adrien, Fasson Julien, Arnal Fabrice, Sallantin Renaud, Dubois Emmanuel and Chaput Emmanuel, *Cooperative Congestion Control in NDN*, In Proc. IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC), Dublin, Ireland, June 7-11, 2020.
- [C-R-5] Boubaker Amal, Chaput Emmanuel, Kuhn Nicolas, Dupé Jean-Baptiste, Sallantin Renaud, Baudoin Cédric and Beylot André-Luc, *On the Impact of Intrinsic Delay Variation Sources on Iridium LEO Constellation*, In Proc. Wireless and Satellite Systems (WiSATS), Nanjing City, China, September 17-18, 2020.
- [C-R-6] Thibaud Adrien, Fasson Julien, Arnal Fabrice, Sallantin Renaud, Dubois Emmanuel and Chaput Emmanuel, *Cooperative Congestion Control dans NDN*, In Proc. 5ème Rencontres Francophones sur la Conception de Protocoles, l'Evaluation de Performance et l'Expérimentation des Réseaux de Communication (CoRes), Lyon, France, September 28 - October 2, 2020.
- [C-R-7] Kuhn Nicolas, Michel François, Thomas Ludovic, Dubois Emmanuel and Lochin Emmanuel, *QUIC: Opportunities and threats in SATCOM*, In Proc. Advanced Satellite Multimedia Systems (ASMS), Graz, Austria, October 20-21, 2020.
- [C-R-8] Thibaud Adrien, Fasson Julien, Arnal Fabrice, Sallantin Renaud, Dubois Emmanuel and Chaput Emmanuel, *Reactivity Enhancement of Cooperative Congestion Control for Satellite Networks*, In Proc. Hot Information-Centric Networking (HotICN), Hefei, Anhui, China, December 12-14, 2020.

Vie du laboratoire

La vie du laboratoire TéSA est rythmée par les séminaires et les journées scientifiques, le tout animé par le Conseil Scientifique. En 2019-2020, une nouveauté est apparue avec le premier appel à chercheurs invités lancé par TéSA. Cette section détaille tous ces temps forts de TéSA.

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. Corédigé par les membres du Conseil Scientifique, cet appel définit des critères d'éligibilité. Tout d'abord, le chercheur invité 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. De plus, les différentes contributions attendues de la part du chercheur invité sont de diverses natures :

Laboratory life

The life of the TeSA laboratory is punctuated by seminars and scientific days, all led by the Scientific Committee. In 2019-2020, TeSA introduced a novelty, with its first call for visiting researchers. This section details all of these TeSA highlights.

Guest researchers

In February 2019, the Board of Directors of the TeSA 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 visiting 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, defines the eligibility criteria. First of all, the guest researcher must carry out research activities that cover one of the fields in which TeSA is already working or, alternatively, that enable the development of new fields for TeSA. In addition, the visiting researcher is expected to make various kinds of contributions: involvement



Journée d'échange entre les doctorants TéSA et le chercheur invité, Pau Closas (à droite).
Exchange day between TeSA PhD students and the guest researcher, Pau Closas (on the right).

implication dans les travaux de certains doctorants, organisation d'au moins un séminaire et/ou 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 portée par au moins un chercheur de la communauté TéSA et adressée au Conseil Scientifique qui statue sur la pertinence de la candidature.

La première candidature fut celle de **PAU CLOSAS** portée par Jordi Vilà-Valls et Éric Chaumette, enseignants-chercheurs à l'ISAE. Pau Closas est enseignant-chercheur à l'Université Northeastern de Boston, USA ; c'est un expert reconnu internationalement dans le domaine du traitement du signal pour la navigation (plus de 50 articles de revue). Notamment, il a reçu le prix de thèse EURASIP en 2014, et un « *Early Achievement Award* » de l'*Institute of Navigation* (ION) pour « *mathematically profound contributions to the design of advanced navigation receivers and for efforts in disseminating GNSS technology* ». Après avoir été chercheur au centre technique de télécommunication de Catalogne (CTTC) à Barcelone, Pau Closas a entamé depuis 2017 une carrière académique à l'université de Northeastern. Lors de son séjour de 3 semaines au TéSA en Juillet 2019, Pau Closas a animé une journée thématique « *Robust GNSS Day @TeSA_Recherche* » à laquelle il a convié **DANIEL MEDINA**, chercheur au DLR, comme orateur. Le programme de la journée a été riche :

- *GNSS technology and signal processing basics* (Pau Closas),
- *GNSS interferences and overview of detection/mitigation strategies* (Pau Closas),
- *Robust Statistics for GNSS Precise Positioning* (Daniel Medina).

Outre, cette journée qui fut une belle réussite, toutes les places disponibles étant occupées, Pau Closas a également animé une journée d'échange avec les doctorants, et divers échanges techniques avec les membres de TéSA, certains d'entre eux aboutissant à des publications scientifiques communes :

- Daniel Medina, Jordi Vilà-Valls, Éric Chaumette, François Vincent et Pau Closas, *Cramér-Rao Bound for a Mixture of Real- and Integer-valued Parameter Vectors and its Application to the Linear Regression Model*, Signal Processing (Elsevier), 179, 2021.
- Daniel Medina, Lorenzo Ortega, Jordi Vilà-Valls, Pau Closas, François Vincent et Éric Chaumette, *Compact CRB for delay, Doppler, and phase estimation - application to GNSS SPP and RTK performance characterization*, IET Proc. RSN, 14(10): 1537-1549, 2020.

in the work of certain PhD students, organisation of at least one scientific seminar and/or mini-course for the TeSA community, and also participation in PhD student day(s) and/or partner day(s) for scientific discussions on themes of interest to the TeSA community. Each application must be supported by at least one researcher of the TeSA community before the Scientific Committee, which then decides whether the application is relevant.

The first application was that of **PAU CLOSAS**, supported by Jordi Vilà-Valls and Éric Chaumette, teacher-researchers at ISAE. Pau Closas is an Assistant Professor, in Electrical and Computer Engineering, at Northeastern University, Boston, USA; he is an internationally recognised expert in the field of signal processing for navigation (with over 50 journal articles published). Notably, he received the EURASIP thesis award in 2014, and an "Early Achievement Award" from the Institute of Navigation (ION) for "*mathematically profound contributions to the design of advanced navigation receivers and for efforts in disseminating GNSS technology*". After a spell as a researcher at the Technical Telecommunications Centre of Catalonia (CTTC) in Barcelona, Pau Closas began an academic career at Northeastern University in 2017. During his 3-week stay at TeSA in July 2019, Pau Closas hosted a "Robust GNSS Day @TeSA_Research" thematic day with **DANIEL MEDINA**, a researcher at DLR, as guest speaker. The day's programme was extremely interesting, including:

- *GNSS technology and signal processing basics* (Pau Closas),
- *GNSS interferences and overview of detection/mitigation strategies* (Pau Closas),
- *Robust Statistics for GNSS Precise Positioning* (Daniel Medina).

In addition to this day, which was a great success, with a full house, Pau Closas also led a day of discussions with the PhD students, and various technical discussions with the members of TeSA, some of which resulted in joint scientific publications:

- Daniel Medina, Jordi Vilà-Valls, Éric Chaumette, François Vincent and Pau Closas, *Cramér-Rao Bound for a Mixture of Real- and Integer-valued Parameter Vectors and its Application to the Linear Regression Model*, Signal Processing (Elsevier), 179, 2021.
- Daniel Medina, Lorenzo Ortega, Jordi Vilà-Valls, Pau Closas, François Vincent and Éric Chaumette, *Compact CRB for delay, Doppler, and phase estimation - application to GNSS SPP and RTK performance characterisation*, IET Proc. RSN, 14(10): 1537-1549, 2020.

- Jordi Vilà-Valls, Damien Vivet, Éric Chaumette, François Vincent et Pau Closas, *Recursive Linearly Constrained Wiener Filter for Robust Multi-Channel Signal Processing*, Signal Processing (Elsevier), 167, 2020.

En 2020, une nouvelle candidature de chercheur invité portée par SpaceAble a été validée par le Conseil Scientifique. Il s'agit de **GELU NITA**, chercheur en traitement du signal pour l'astrophysique, à l'observatoire OVSA de l'université du New Jersey. Son accueil a été reporté à la fin des mesures sanitaires liées à la COVID-19.

Les séminaires TéSA

Les séminaires TéSA sont un outil de dialogue scientifique et de partage. Organisés par les représentants des doctorants au conseil scientifique, ils réunissent régulièrement la communauté TéSA pour deux heures. Deux présentations portant sur des domaines de recherche différents se succèdent entre les nombreuses questions de l'auditoire. Ainsi, ces séminaires sont des tutoriels pluridisciplinaires 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. Durant la période 2019-2020, quatre séminaires ont été organisés :

- Mars 2019
 - **LORENZO ORTEGA** (doctorant au TéSA) : *Conception jointe de la structure de signal et des messages GNSS pour Galileo de la deuxième génération*,
 - **NELSON EDUARDO DIAZ** (Doctorant à Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombie) : *Méthode d'estimation de mouvements du cœur à l'aide d'un dictionnaire convolutif et d'un modèle de représentation parcimonieuse*.
- Juin 2019
 - **SELMA ZAMOUM** (doctorante au TéSA) : *Méthodes d'accès aléatoire pour les communications par satellite*,
 - **LUC LAPIERRE** (chercheur au CNES) : *Traitement d'image appliqué à l'archéologie pour la détection de voies romaines*.
- Novembre 2019
 - **ADRIEN THIBAUD** (doctorant au TéSA) : *Répartition équitable des flux dans les NDN (Named Data Networking)*,
 - **ANNE-MARIE TOBIE** (doctorante au TéSA) : *Hybridation GNSS/5G pour de la navigation en milieu urbain*.

- Jordi Vilà-Valls, Damien Vivet, Éric Chaumette, François Vincent et Pau Closas, *Recursive Linearly Constrained Wiener Filter for Robust Multi-Channel Signal Processing*, Signal Processing (Elsevier), 167, 2020.

In 2020, a new application for a visiting researcher, supported by SpaceAble, was validated by the Scientific Committee. This was for **GELU NITA**, a researcher in signal processing for astrophysics at the University of New Jersey's OVSA observatory. His visit has been postponed until the end of the Covid-19 health measures.

TeSA seminars

TeSA seminars are a forum for scientific dialogue and sharing. Organised by the PhD students' representatives on the Scientific Committee, they bring the TeSA community together for two hours. They include two presentations on different areas of research with time for many 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 TeSA, or for visiting guests, to present their research activities. During the period 2019-2020, four seminars were organised:

- March 2019
 - **LORENZO ORTEGA** (PhD student at TeSA): *Joint design of the signal structure and GNSS messages for second generation Galileo*,
 - **NELSON EDUARDO DIAZ** (PhD student at the Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia): *Cardiac Motion Estimation by Using Convolutional Sparse Coding*.
- June 2019
 - **SELMA ZAMOUM** (PhD student at TeSA): *Random access methods for satellite communications*,
 - **LUC LAPIERRE** (researcher at CNES): *Image processing applied to archaeology for the detection of Roman roads*.
- November 2019
 - **ADRIEN THIBAUD** (PhD student at TeSA): *Fair distribution of flows in Named Data Networking (NDN)*,
 - **ANNE-MARIE TOBIE** (PhD student at TeSA): *GNSS/5G hybrid for urban navigation*.

■ Mars 2020

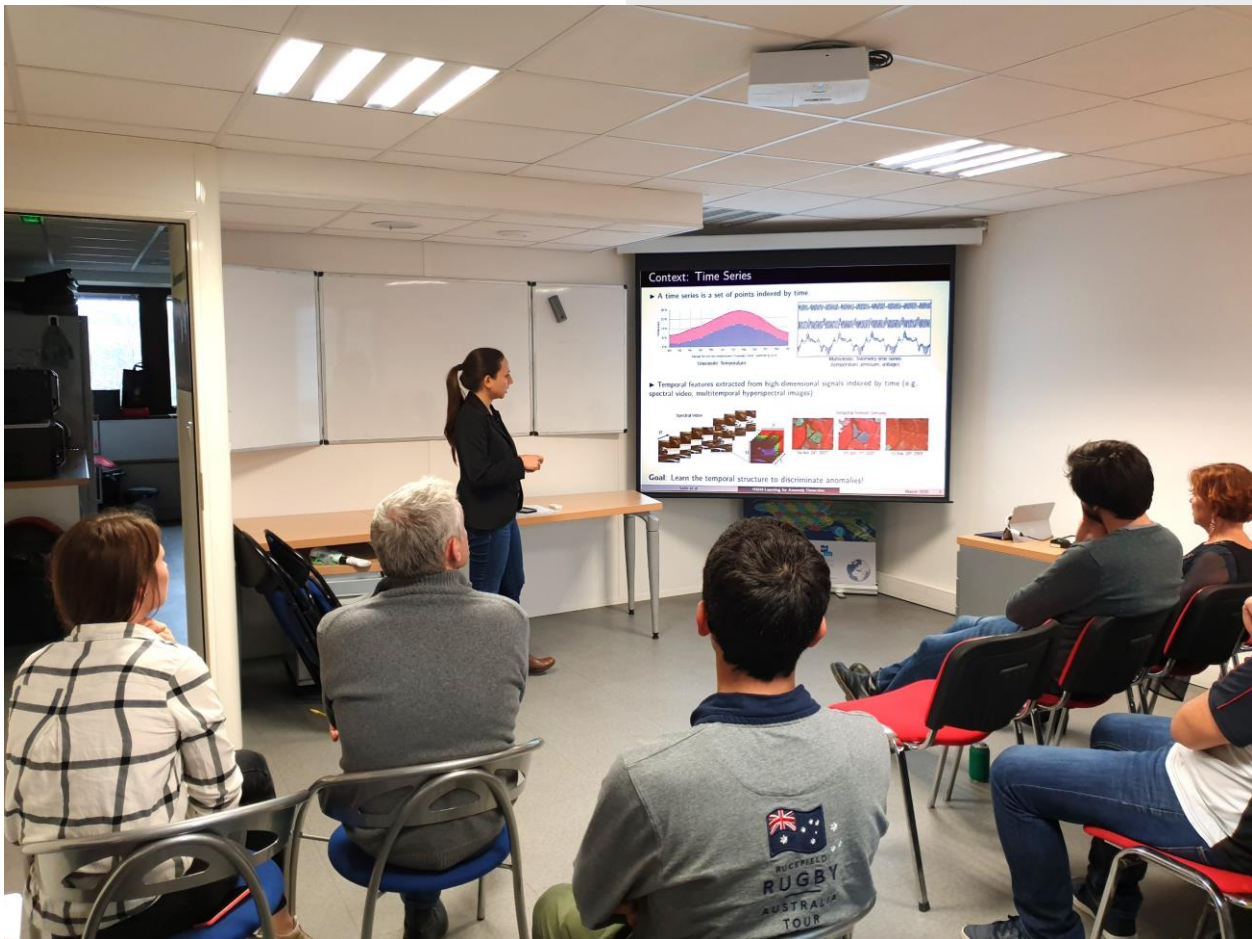
- **AMAL BOUBAKER** (doctorante au TéSA) : *Sur l'impact des sources de variation de retard intrinsèque pour la constellation Iridium LEO (Low Earth Orbit),*
- **KARETH LÉON** (Doctorante à *Universitat Industrial of Santander*, Bucaramanga, Colombie) : *Apprentissage de modèles de Markov cachés pour la détection d'anomalies dans des séries chronologiques.*

Les supports utilisés lors de ces présentations sont accessibles sur le site web de TéSA, que ce soit dans l'onglet « Production scientifique » ou dans la rubrique « Kiosque ».

■ March 2020

- **AMAL BOUBAKER** (PhD student at TeSA): *On the impact of intrinsic delay variation sources for the Iridium Low Earth Orbit (LEO) constellation,*
- **KARETH LÉON** (PhD student at the *Universidad Industrial de Santander*, Bucaramanga, Colombia): *Learning by hidden Markov models for anomaly detection in time series.*

The materials used in these presentations are available on the TeSA website, either via the "Scientific production" tab or in the "Kiosk" section.



Présentation de Kareth Léon lors du séminaire TéSA en mars 2020.
Presentation by Kareth Léon during the TeSA seminar in March 2020.

Les journées scientifiques

À l'instar des séminaires, les journées scientifiques constituent un autre outil de dialogue scientifique et de partage. L'objectif de ces journées (initiées en 2016) est de rassembler chaque année la communauté TéSA (doctorants, ingénieurs de recherche, universitaires, partenaires industriels) en dehors de ses locaux habituels afin de favoriser des échanges scientifiques, dans une ambiance amicale autour d'un thème fédérateur.

L'édition 2019 s'est tenue le 7 juin au musée Aéroscopia de Blagnac. **LIONEL CORDESSES**, Directeur Technologies Intelligentes, IRT, a ouvert la journée en nous faisant partager une analyse visant à expliquer « *Pourquoi ça marche à la Silicon Valley ?* », analyse basée sur son expérience professionnelle passée à Renault Innovation Silicon Valley. Une présentation enthousiaste et riche d'enseignements, très appréciée par la communauté TéSA !

The Science Days

Like the seminars, the science days are another way of promoting scientific dialogue and sharing. The aim of these days (initiated in 2016) is to bring together each year the TeSA community (PhD students, research engineers, academics, industrialist partners) outside its usual premises in order to promote scientific discussions, in a friendly setting, around a unifying theme.

The 2019 edition was held on 7 June at the Aéroscopia museum in Blagnac. **LIONEL CORDESSES**, Director of Intelligent Technologies, IRT, opened the day by sharing with us an analysis exploring "*Why it works in Silicon Valley?*", based on his past professional experience at Renault Innovation Silicon Valley. His enthusiastic and informative presentation was much appreciated by the TeSA community!



TéSA aux journées scientifiques à Aéroscopia en juin 2019.
TeSA at the scientific days at Aéroscopia in June 2019.

Puis ce sont les doctorants et doctorantes qui ont été mis à l'honneur : ils et elles ont présenté leurs travaux de recherche, et ce, en relevant brillamment le challenge du format imposé : ma thèse en 3 minutes ! L'après-midi fut ludique puisqu'elle était consacrée à la visite du musée Aeroscopia, puis à la remise des prix (des jouets cette année) récompensant les meilleures présentations de thèse.

En 2020, la pandémie a quelque peu modifié le format initialement prévu pour les journées scientifiques, à savoir deux jours « au vert » dans un établissement hors métropole toulousaine. Ces deux journées ont été converties en une journée, le 26 juin, hybride présentiel-distanciel par visioconférence.

Cette journée avait pour objectif d'initier la rédaction de sujets de thèse à soumettre à l'appel 2020 du CNES. Le thème retenu était celui des essaims de nanosatellites. Elle a débuté par un exposé d'**ANDRÉ LAURENS** (CNES) sur les essaims, « *Un concept de mesure original pour de futures missions spatiales* », puis s'est poursuivie par un exposé de **SELMA ZAMOUM** et **BENJAMIN GIGLEUX** (SpaceAble), sur « *les solutions pour contenir l'effet Kessler en orbite basse dans le paradigme du NewSpace et des Mégaconstellations* ». Une activité de *brainstorming* en sous-groupes s'en est suivie. La journée s'est terminée par une courte présentation des sujets de thèse issus du travail de chaque sous-groupe. Trois ont été déposés par TéSA lors de l'appel 2020 du CNES et finalement deux ont été retenues et démarreront en octobre 2021. Une bien belle réussite dans un contexte adverse !

Then it was the doctoral students who were in the spotlight: they presented their research work, while brilliantly rising to the challenge of limiting their presentations to the imposed format of 3 minutes per thesis! The afternoon was fun-filled with a visit to the Aeroscopia museum, followed by the awarding of prizes (toys, this year!) for the thesis presentations.

In 2020, the pandemic somewhat modified the format initially planned for the science days, i.e., two days in the countryside in an establishment outside the Toulouse metropolitan area. These two days were replaced by a hybrid face-to-face/teleconference day on 26 June.

The aim of the day was to encourage the writing of thesis topics to be submitted in response to the CNES 2020 call. The theme chosen was nanosatellite swarms. The session started with a presentation by **ANDRÉ LAURENS** (CNES) on swarms, "*An original measurement concept for future space missions*", followed by a presentation by **SELMA ZAMOUM** and **BENJAMIN GIGLEUX** (SpaceAble), on "*Solutions to contain the Kessler effect in low orbit in the NewSpace and Megaconstellation paradigm*". This was followed by a brainstorming in sub-groups. The day ended with a short presentation of the thesis topics resulting from the work of each sub-group, three of which were submitted by TeSA in response to the CNES 2020 call, of which two were finally selected to start in October 2021. A great success in a difficult context!

Postdocs TéSA

Fin 2018, le bilan fait par le cabinet comptable de TéSA mit en évidence la possibilité de réinvestir une partie des fonds disponibles dans la recherche. Le Conseil de l'Association TéSA décida alors de soutenir la recherche des enseignants-chercheurs et des membres partenaires en proposant de participer au financement de postdocs. Un *appel à postdocs* fut donc lancé en février 2019 avec pour objectif de financer au cours de l'année 2019 trois postdocs. Les critères d'éligibilité des dossiers de candidature concernent aussi bien le sujet que le ou la postdoctorant(e) (qualité de la recherche antérieure et adéquation avec le sujet), chaque dossier étant examiné par un groupe d'experts nommés par le Conseil d'Association du TéSA. Le sujet doit être en ligne avec la *roadmap* TéSA (voir la cartographie), en accord avec des thématiques déjà abordées dans TéSA, ou sur des domaines applicatifs prometteurs pour le développement de TéSA, en faisant apparaître les verrous à lever

TeSA Postdocs

At the end of 2018, the balance sheet drawn up by TeSA's chartered accountants showed that it would be possible to reinvest some of the available funds in research. The Board of Directors of TeSA thus decided to support the research of teacher-researchers and partner members by participating in the financing of post-doctoral research. A call for post-doctoral research was therefore issued in February 2019 with the aim of funding three such projects in 2019. The eligibility criteria for applications concern both the subject and the post-doctoral researcher (quality of previous research and its relevance for the subject), with each application being examined by a group of experts appointed by the TeSA Scientific Committee. The topic must be in line with the TeSA roadmap (see the breakdown of research fields), in accordance with the themes already addressed in TeSA, or be in promising application fields for the development of TeSA, by showing the obstacles to be overcome and the expected benefits for TeSA and its members.

et les retombées attendues pour le TéSA et ses membres.

À la suite de cet appel, deux candidatures de postdocs furent avalisées :

- **JULIEN LESOUPLE** (cofinancement de Thales Alenia Space), ancien doctorant TéSA, suivi par Jean-Yves Tournet, sur le thème « *Développement de méthodes de détection d'anomalies avec retour utilisateur pour l'analyse de signaux satellitaires* »,
- **LORENZO ORTEGA** (cofinancement de l'ISAE-SUPAERO), ancien doctorant TéSA, suivi par Jordi Vilà-Valls et Éric Chaumette, sur le thème « *GNSS robuste en environnement contraint* ».

Ces deux post-docs ont donné lieu à des publications dans des revues, listées ci-dessous, dont le nombre et la qualité illustrent le bien-fondé de cette initiative. En 2020, l'appel à postdoc a été mis en sommeil durant la période d'incertitude traversée mais cet appel sera relancé en 2021.

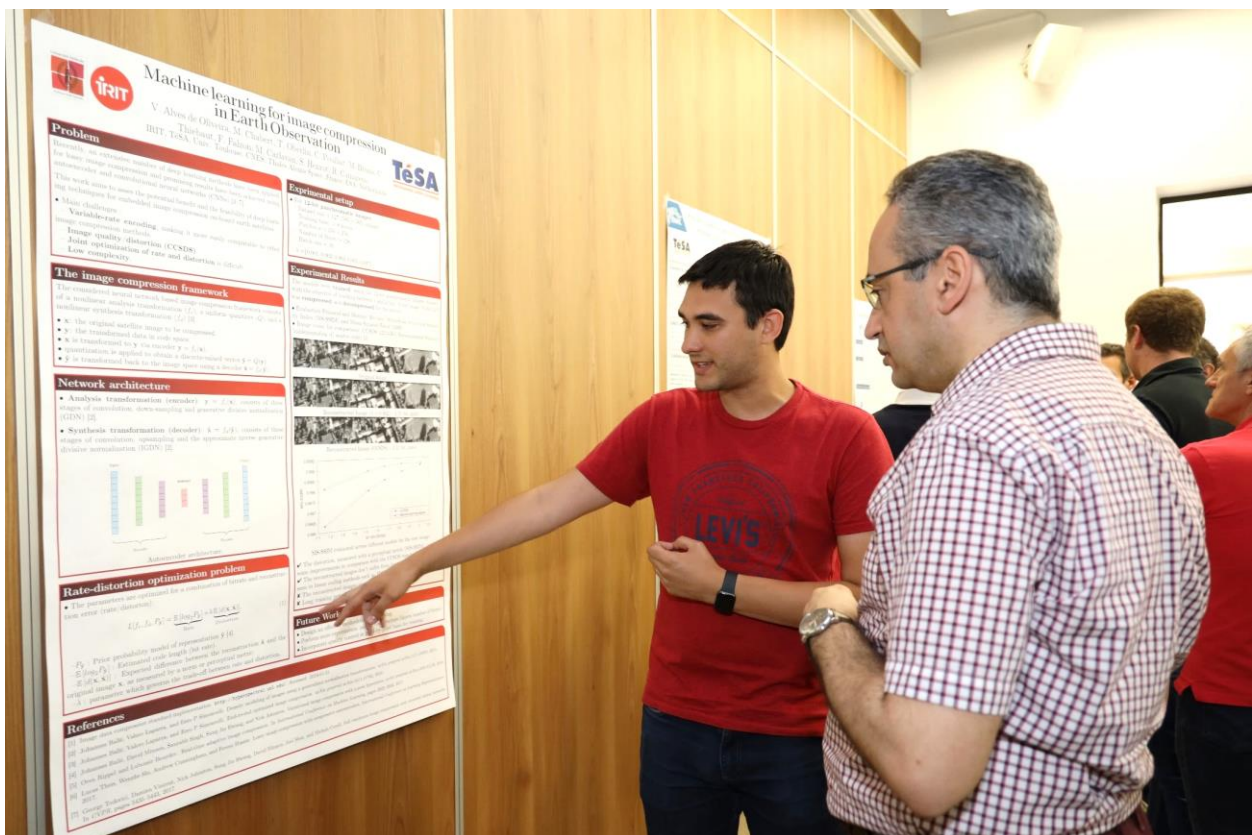
Following this call, two post-doctoral applications were accepted:

- **JULIEN LESOUPLE** (co-funded by Thales Alenia Space), former TeSA PhD student, supervised by Jean-Yves Tournet, on the topic "*Development of anomaly detection methods with user feedback for satellite signal analysis*",
- **LORENZO ORTEGA** (co-funded by ISAE-SUPAERO), former TeSA PhD student, supervised by Jordi Vilà-Valls, and Éric Chaumette, on the topic "*Robust GNSS in a constrained environment*".

These two post-doctoral projects resulted in journal publications, as can be seen after, whose number and quality illustrate the merits of this initiative. In 2020, the call for post-doctoral research projects was put on hold during the period of uncertainty, but will be repeated in 2021.

- Daniel Medina, Lorenzo Ortega, Jordi Vilà-Valls, Pau Closas, François Vincent et Éric Chaumette, *Compact CRB for delay, Doppler, and phase estimation - application to GNSS SPP and RTK performance characterization*, IET Proc. RSN, 14(10): 1537-1549, 2020,
- Lorenzo Ortega, Daniel Medina, Jordi Vilà-Valls, François Vincent et Éric Chaumette, *Positioning Performance Limits of GNSS Meta-Signals and HO-BOC Signals*, Sensors, vol. 20, no. 12, 2020,
- Priyanka Das, Lorenzo Ortega, Jordi Vilà-Valls, François Vincent, Éric Chaumette et Loïc Davain, *Performance Limits of GNSS Code-Based Precise Positioning : GPS, Galileo & Meta-Signals*, Sensors, vol. 20, no. 8, 2020,
- Corentin Lubeigt, Lorenzo Ortega, Jordi Vilà-Valls, Laurent Lestarquit et Éric Chaumette, *Joint Delay-Doppler Estimation Performance in a Dual Source Context*, Remote Sensing, vol. 20, no. 12, 2020,
- Lorenzo Ortega, Jordi Vilà-Valls, Charly Poulliat et Pau Closas, *GNSS Data Demodulation over Fading Environments: Antipodal and M-ary CSK Modulations*, IET Radar, Sonar & Navigation, Jan. 2021,
- Corentin Lubeigt, Lorenzo Ortega, Jordi Vilà-Valls, Laurent Lestarquit et Éric Chaumette, *On the Impact and Mitigation of Signal Crosstalk in Ground-Based and Low Altitude Airborne GNSS-R*, Remote Sensing, vol. 13, no. 6, 2021,
- Julien Lesouple, Barbara Pilastre, Yoann Altmann et Jean-Yves Tournet, *Hypersphere Fitting from Noisy Data Using an EM Algorithm*, IEEE Signal Processing Letters, vol. 28, pp. 314-318, January, 2021,
- Lorenzo Ortega, Jordi Vilà-Valls et Éric Chaumette, *Insights on the Estimation Performance of GNSS-R Coherent and Non-Coherent Processing Schemes*, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, May, 2021,
- Julien Lesouple, Cédric Baudoin, Marc Spigai et Jean-Yves Tournet, *How to Introduce Expert Feedback in One-Class Support Vector Machines for Anomaly Detection?*, Signal Processing, vol. 188, November, 2021,
- Julien Lesouple, Cédric Baudoin, Marc Spigai et Jean-Yves Tournet, *Generalized Isolation Forest for Anomaly Detection*, Pattern Recognition Letters, vol. 149, pp. 109-119, September, 2021,

Les publications dans des revues liées aux post-docs TéSA.
Journal publications related to TeSA postdocs.



Vinicius Oliveira présente sa thèse à la journée scientifique de TeSA, juin 2019.
 Vinicius Oliveira presenting his thesis at the TeSA scientific day, June 2019.

Collaborations

Depuis sa création, le TéSA mène ses activités scientifiques majoritairement pour ses membres partenaires qui sont le CNES, Thales Alenia Space, Collins Aerospace, l'Institut de Recherche Technologique (IRT) Saint-Exupéry et, depuis 2019, la start-up SpaceAble.

Ces activités offrent un cadre de collaboration privilégié pour les membres associés académiques (Toulouse INP, ISAE- SUPAERO, ENAC et IMT Atlantique). Cette collaboration se traduit particulièrement dans les directions académiques des thèses : à titre d'exemple, les thèses de Julien Lesouple, Simone Urbano et Selma Zamoum, soutenues en 2019, sont l'illustration de ces binômes de codirections de thèse, facilités et encouragés dans TéSA, permettant d'associer deux enseignants-chercheurs de deux entités académiques différentes (et de ministères de tutelle différents !), ici Toulouse INP et l'ISAE-SUPAERO.

TéSA insuffle ainsi de la collaboration entre ses membres partenaires et académiques mais aussi se nourrit de la richesse des échanges avec d'autres entités, non membres de TéSA. En particulier, les collaborations avec des start-up de la Région Occitanie comme GISAIA ou des PME comme Atmosphère sont autant d'occasions de s'intéresser à des problématiques nouvelles dans les télécommunications spatiales et aéronautiques. Les liens tissés de longue date se poursuivent dans des études conjointes avec Silicom, Viveris ou CLS, tandis que 2019 nous a permis de mener une étude pour l'acteur toulousain de l'aéronautique – AIRBUS.

Cette volonté de collaboration qui est dans l'ADN de TéSA s'est matérialisée par la soutenance de thèse de Julian Tachella, en janvier 2020, finalisation d'une collaboration de trois années, riches en échanges. Même si les règles de l'Université Heriot-Watt ne prévoient qu'une soutenance « privée », limitée aux seuls membres du jury qui s'enferment avec le doctorant le temps nécessaire pour poser toutes les questions souhaitées et recueillir les réponses (et cela peut durer une journée entière !), Julian et son équipe encadrante, composée d'enseignants-chercheurs de l'université écossaise et de Toulouse INP, ont souhaité faire une deuxième soutenance, publique, « à la française », qui a permis à tous d'apprécier les travaux menés durant cette thèse.

Les collaborations académiques s'étendent aussi au-delà de l'Europe avec le premier appel à chercheurs invités piloté par le Conseil Scientifique de TéSA. C'est ainsi que nous avons eu le plaisir de recevoir durant 3 semaines, en

Collaborations

Since its creation, TeSA has conducted its scientific activities mainly for its partner members, CNES, Thales Alenia Space, Collins Aerospace, the *Institut de Recherche Technologique* (IRT) Saint-Exupéry and, since 2019 the start-up SpaceAble.

These activities offer a privileged collaboration framework for the academic associate members (Toulouse INP, ISAE-SUPAERO, ENAC and IMT Atlantique). This collaboration is particularly evident in the academic supervision of theses: for example, the theses of Julien Lesouple, Simone Urbano and Selma Zamoum, defended in 2019, are an illustration of this co-supervision of theses, facilitated and encouraged in TeSA, allowing the cooperation of two teacher-researchers from two different academic entities (and different supervisory ministries!), in this case Toulouse INP and ISAE-SUPAERO.

TeSA thus fosters collaboration between its partner and academic members, but also benefits from the wealth of exchanges with other entities that are not members of TeSA. In particular, collaborations with start-ups in the Occitanie region, such as GISAIA or SMEs such as Atmosphere offer the opportunity of addressing new issues in space and aeronautical telecommunications. The long-standing ties we have forged continue in joint studies with Silicom, Viveris and CLS, while in 2019 we conducted a study for the Toulouse-based aeronautics player, AIRBUS.

This willingness to collaborate, a predominant aspect of TeSA's DNA, was materialised by Julian Tachella's thesis viva session, which stimulated lively discussion, in January 2020, following his three-year collaboration. Even though the rules of Heriot-Watt University only allow for a "private" thesis viva session, limited to the members of the jury who seclude themselves with the doctoral student for the time necessary to ask all the questions and collect the answers (and this can last a whole day!), Julian and his supervisory team, made up of teacher-researchers from the Scottish university and Toulouse INP, wanted to hold a second, public, "French-style" viva session, which allowed everyone to appreciate the work he had done for his thesis.

Academic collaboration also extends beyond Europe with the first call for guest researchers led by the TeSA Scientific Committee. Thus, we had the pleasure of welcoming Pau Closas, a researcher at Boston University, USA, for three

juillet 2019, Pau Closas, chercheur à l'Université de Boston, USA. Sa première des préoccupations a été de partager des moments d'écoute et de « *brainstorming* » avec tous les acteurs de TéSA : les ingénieurs de recherche, les enseignants-chercheurs, les industriels et institutionnels et en particulier les doctorants à qui il a consacré une journée. Cet accueil du premier chercheur invité à TéSA a été un réel succès : une journée de séminaire, suivie par une trentaine de participants, des articles de conférence et de journaux soumis et acceptés à la suite des diverses collaborations engagées...

Les échanges avec la Colombie et le Pérou, initiés en 2017 et 2018, se sont intensifiés avec la venue de deux doctorants de l'Université Santander de Bucaramanga (Colombie), Nelson Eduardo Diaz et Kareth Leon qui ont profité de leurs séjours pour présenter leurs travaux dans le cadre des séminaires TéSA. Côté TéSA, c'est la doctorante Barbara Pilastre qui est partie séjourner à Lima, au Pérou, pour poursuivre la collaboration et corédiger un article pour ICASSP 2020.

Malheureusement, la pandémie a quelque peu freiné toutes ces collaborations depuis mars 2020 mais nous sommes prêts pour de nouvelles aventures dès que nous le pourrons avec l'accueil de deux chercheurs invités à venir (un Américain et un Écossais) et la reprise des collaborations avec la Colombie et le Pérou.

weeks in July 2019. His first concern was to share moments of discussion and brainstorming with all the players at TeSA: research engineers, teacher-researchers, industrialists and institutions and in particular the PhD students, to whom he devoted a whole day. This first stay of a guest researcher at TeSA was a real success, including a one-day seminar, attended by about thirty participants, as well as conference and journal articles submitted and accepted as a result of the various collaborations undertaken.

Exchanges with Colombia and Peru, initiated in 2017 and 2018, were intensified with the visit of two PhD students from the Santander Industrial University of Bucaramanga (Colombia), Nelson Eduardo Diaz and Kareth Leon, who took advantage of their stay to present their work at the TeSA seminars. On the TeSA side, Barbara Pilastre, a PhD student, went to Lima, Peru, to continue the collaboration and co-author an article for ICASSP 2020.

Unfortunately, the pandemic has somewhat slowed down all this collaboration since March 2020, but we are ready for new adventures as soon as we can with two visiting researchers (one American and one Scottish) and the resumption of collaboration with Colombia and Peru.



Journée scientifique de TéSA, juin 2019.
TeSA scientific day, June 2019.

Rayonnement de TéSA

Les activités de TéSA sont bien sûr diffusées au travers des articles de conférences ou de journaux avec comité de lecture, listés précédemment dans ce rapport. Le tableau suivant permet de retrouver les revues dans lesquelles TéSA publie en 2019 et 2020, avec leur « *impact factor* » et leur « *quartile score* », qui sont des mesures du rayonnement. En particulier, « l'*impact factor* » (IF) est la moyenne des nombres de citations des articles publiés dans ces journaux durant les deux années précédentes, tandis que le quartile score permet de classer les revues en 4 catégories, une revue étant classée Q1 si elle se situe dans les top 25 % des revues du domaine qui ont les « *impact factors* » les plus élevés ou Q2 si elle se situe dans les 25 % à 50 % (Q3 et Q4 étant relatifs à la seconde moitié de ces revues). Au total sur les 2 années, 27 articles publiés dans des journaux internationaux reconnus, 48 articles dans des conférences internationales et 3 brevets, preuves de l'activité et du niveau scientifique de TéSA.

TeSA outreach

TeSA activities are, of course, widely disseminated via the peer-reviewed journal articles or conference presentations, listed above in this report. The following table shows the journals in which TeSA published in 2019 and 2020, with their impact factor and quartile score, which are measures of influence. In particular, the impact factor (IF) is the average of the number of citations of articles published in these journals during the previous two years, while the quartile score is used to classify journals into 4 categories, a journal being classified as Q1 if it is in the top 25% of journals in the field with the highest impact factors or Q2 if it is in the 25%-50% range (Q3 and Q4 being reserved for journals in the remaining lower half). In total over the two years, the 27 articles published in recognised international journals, 48 articles presented at international conferences and 3 patents filed are proof of TeSA's scientific activity and level.

REVUE	NOMBRE	IF	Q
Nature Communications	2	12.12	Q1
IEEE Trans. Image Processing	2	9.34	Q1
IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems	1	8.41	Q1
IEEE Trans. Signal Processing	1	7.53	Q1
IEEE Trans. Automatic Control	2	7.41	Q1
IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing	2	6.87	Q1
IEEE Access	1	6.74	Q1
Remote sensing	1	4.51	Q1
Signal Processing Elsevier	3	4.39	Q1
SIAM Journal on Imaging Sciences	1	4.18	Q1
IEEE Transactions on Computational Imaging	1	4.01	Q1
IEEE Communications Letters	1	3.42	Q1
MDPI Sensors	2	3.27	Q2
IEEE Signal Processing Letters	1	3.10	Q1
IET Radar, Sonar and Navigation	3	1.91	Q2
Journal of the Institute of Navigation	1	1.70	Q1
International Journal of Satellite Communications and Networking	2	1.65	Q2
ARTICLES DANS DES JOURNAUX INTERNATIONAUX	27		
ARTICLES DANS DES CONFÉRENCES INTERNATIONALES	48		
BREVETS	3		

Les publications de TéSA en 2019 et 2020 avec leur impact factor (IF) et leur quartile score (Q).
TeSA publications during 2019 and 2020, with their impact factor (IF) and quartile score (Q).

La pandémie et l'arrêt brutal de tous les déplacements dans les conférences nationales et internationales ont transformé les conférences en des forums vidéo où chaque auteur doit préparer une vidéo de présentation de son article. Afin que ces vidéos restent en lumière, le site web de TéSA permet de les retrouver dans son kiosque (et dans sa chaîne YouTube), mais aussi associées aux articles correspondants dans l'onglet « Production scientifique ». Bien sûr, cela ne remplace pas toutes les discussions et interactions que l'on pouvait avoir au moment de ces conférences mais cela laisse une trace de cette période particulière où nous avons tous appris de nouveaux modes de communication.

Parmi toutes ces publications dans des conférences internationales, on peut retenir le rayonnement des doctorants de TéSA avec le « *best paper award* » obtenu par la doctorante Barbara Pilastre, à la *World Conference on Condition Monitoring* en 2019. Les doctorants TéSA se frottent aussi à l'exercice désormais médiatisé de « ma thèse en 180 secondes » et Julian Tachella, doctorant coencadré par un professeur de TéSA / Toulouse INP et par des enseignants chercheurs de l'Université d'Heriot-Watt à Edimbourg en Ecosse, a remporté le troisième prix du « *3 minute thesis* » de la conférence EUSIPCO en 2019.

Les doctorants publient dans des journaux et conférences internationales mais ils participent aussi aux dépôts de brevets : 3 brevets déposés dans la période et 4 doctorants et un chercheur associé récompensés aux Lauriers INP'Innov en 2019.

En 2020, le prix Leopold Escande de Toulouse INP, récompensant chaque année les meilleures thèses, a été attribué à 2 docteurs de TéSA : Barbara Pilastre et Lorenzo Ortega Espluga.

Un autre événement phare auquel participe, chaque année, une grande partie des doctorants TéSA sont les Journées CNES Jeunes Chercheurs (JC²). C'est l'occasion pour les doctorants cofinancés par le CNES de se retrouver pour assister à des conférences plénières toujours palpitantes, et pour présenter leurs travaux en cours, avec des prix à la clef. En 2019, Barbara Pilastre, doctorante TéSA, a remporté le prix de la meilleure présentation de sa session avec une grande joie... même si elle regrettera toujours de ne pas avoir été là aux JC² 2018 qui avaient eu la surprise d'accueillir Thomas Pesquet !

L'autre événement CNES à ne pas rater chaque année est la sortie du « livre bleu » des R&T CNES, qui a lieu généralement fin janvier – début février. Outre la découverte de toutes les idées R&T soumises et retenues, c'est aussi l'occasion pour toute la communauté R&D du spatial de se retrouver à Toulouse, autour de présentations et

The pandemic and the sudden stopping of all travel to national and international conferences have turned conferences into video forums where authors have to prepare a video presentation of their paper. In order to keep these videos in the spotlight, you can find them in the kiosk on TeSA's website (and in its YouTube feed), but also associated with the corresponding articles via the "Scientific production" tab. Of course, this does not replace all the discussions and interactions that could have been had during these conferences but it leaves a trace of this particular period during which we all learned new ways of communicating.

Among all these publications in international conferences, we can highlight the influence of TeSA PhD students with the "best paper award" obtained by the PhD student Barbara Pilastre, at the World Conference on Condition Monitoring in 2019. TeSA PhD students are also taking part in the now popular "my thesis in 180 seconds" exercise and Julian Tachella, a PhD student co-supervised by a TeSA/Toulouse INP professor and teacher-researchers from Heriot-Watt University in Edinburgh, Scotland, won third prize in the "3-minute thesis" competition at the EUSIPCO conference in 2019.

PhD students publish in international journals and conferences, but they also participate in patent applications: 3 patents were filed during the period and 4 PhD students and one associate researcher were honoured at the INP'Innov Awards in 2019.

In 2020, the Toulouse INP Leopold Escande Prize, awarded each year for the best theses, was given to two TeSA PhDs: Barbara Pilastre and Lorenzo Ortega Espluga.

Another key event in which a large number of TeSA doctoral students take part each year is the CNES Young Researchers' Days (*Journées CNES Jeunes Chercheurs – JC²*). This is an opportunity for PhD students co-funded by CNES to come together to attend the always exciting plenary lectures and to present their work in progress, with prizes at stake. In 2019, Barbara Pilastre, a TeSA doctoral student, was overjoyed when she won the prize for the best presentation of her session – even though she will always regret not having been at the JC² 2018 with the surprise visit of Thomas Pesquet!

The other not-to-be-missed CNES event each year is the release of the CNES R&T 'blue book', which usually takes place at the end of January/beginning of February. In addition to discovering all the R&T ideas submitted and selected, it is also an opportunity for the whole space R&D community to meet in Toulouse, for

tables rondes intéressantes. En 2019, le CNES a souhaité mettre en avant toutes les activités autour des essaims de nanosatellites et, TéSA travaillant sur le sujet (voir le détail des activités en traitement du signal et des images) a été convié à la table ronde, animée par André Laurens, ingénieur CNES, responsable du programme NOIRE.

Enfin, on ne peut pas terminer cette section sur le rayonnement de TéSA sans reparler du succès de son premier appel à chercheurs invités, avec la venue de Pau Closas, enseignant-chercheur de *Northeastern University* de Boston, USA, chercheur reconnu en GNSS et qui a fait bénéficier toute la communauté TéSA de son expertise... et de sa gentillesse !

interesting presentations and round table discussions. In 2019, CNES wanted to highlight all the activities around nanosatellite swarms and, since TeSA was working on the subject (see details of activities in the signal and image processing section), we were invited to the round table session, moderated by André Laurens, CNES engineer, in charge of the NOIRE programme.

Finally, we cannot end this section on TeSA's outreach without mentioning the success of its first call for guest researchers, with the arrival of Pau Closas, a professor at Northeastern University in Boston, USA, a recognized researcher in GNSS, who kindly gave the entire TeSA community the benefit of his expertise.



Barbara Pilastre remporte le prix du meilleur article au World Congress on Condition Monitoring.
Barbara Pilastre wins the best paper award at the World Congress on Condition Monitoring.



Tendances et perspectives

Trends and perspectives

Les tendances et perspectives au cœur des compétences de TESA, décrites dans les précédents rapports, sont en lien étroit avec les activités R&D menées avec ses partenaires. Elles reflètent à la fois les besoins de nos partenaires mais aussi les innovations suscitées par les enseignants-chercheurs, acteurs de l'innovation.

- L'utilisateur d'un système de positionnement et de navigation exige désormais non seulement une position précise, mais aussi fiable et disponible en tout temps et en tout lieu. Une première réponse à cette attente est l'hybridation d'un nombre toujours plus grand de constellations et de signaux GNSS (GPS, GLONASS, Beidou, ...), de capteurs (accéléromètre, magnétomètre, caméra, ...) et même de signaux d'opportunité (LTE, Wi-Fi, GLOBALSTAR, IRIDIUM, 5G, ...). Une autre voie est l'approche coopérative dans laquelle chaque utilisateur tire bénéfice des mesures réalisées par la communauté. La multiplication des objets communicants (IoT) rend cette option chaque jour plus attractive.
- Les déploiements concomitants de moyens de diffusion des données spatiales (Copernicus, mégaconstellations, ...) et de constellations de 100 ou plus satellites en *Low Earth Orbit* (LEO) dédiées à l'observation de la terre, permettent d'envisager des revisites plurijournalières avec une résolution inférieure au mètre. Ces données pourront être fusionnées avec celles fournies par des essaims de drones ou des capteurs à bas coût au sol, sur aéronef ou en mer, grâce au développement de l'IoT associé aux réseaux de communication basse consommation. Cela permettra l'amélioration des services existants et l'émergence de nouveaux services basés sur l'analyse et la fusion des données, notamment via l'Intelligence Artificielle.
- Les télécommunications par satellite amorcent plusieurs évolutions technologiques structurantes : le très haut débit (*Very High Throughput Satellite* visant le Terabit/s), les satellites entièrement flexibles

The trends and perspectives at the heart of TeSA's expertise, described in previous reports, are closely linked to the R&D activities carried out with its partners. They reflect both the needs of our partners and the innovations brought about by our innovative teacher-researchers.

- Users of positioning and navigation systems now demand not only an accurate position, but also one that is reliable and available at all times and in all places. A first response to this expectation is the hybridization of an ever-increasing number of constellations and GNSS signals (GPS, GLONASS, BeiDou, etc.), sensors (accelerometer, magnetometer, camera, etc.) and even signals of opportunity (LTE, Wi-Fi, GLOBALSTAR, IRIDIUM, 5G, etc.). Another approach is that of cooperation through which each user benefits from the measurements made by the community. The increasing number of communicating objects (IoT) makes this option more attractive every day.
- The concomitant deployment of satellite data dissemination resources (Copernicus, mega-constellations, etc.) and constellations of 100 or more satellites in Low Earth Orbit (LEO) dedicated to earth observation, raise the possibility of revisits faster than every 24 hours with sub-metre resolution. This data could be merged with data provided by swarms of drones or low-cost sensors on the ground, on aircraft or at sea, thanks to the development of the IoT associated with low-power communication networks. This will allow the improvement of existing services and the emergence of new services based on the analysis and merging of data, notably via Artificial Intelligence.
- Satellite telecommunications are undergoing several strategic technological changes: very high speed (Very High Throughput Satellite aimed at a Terabit/s), fully flexible satellites (Software Defined Satellite) and satellite constellations led by numerous new players

(*Software Defined Satellite*) et les constellations de satellites portées par de nombreux nouveaux entrants (*NewSpace*) visant à offrir des services et des marchés extrêmement variés. On notera également une tendance de certains de ces systèmes à quitter le monde DVB (*Digital Video Broadcasting*) pour rejoindre l'écosystème mobile avec l'intégration dans l'architecture 5G.

- Les algorithmes de *Machine Learning* ont récemment fait irruption dans le champ scientifique du traitement du signal et des images, en affichant des résultats souvent intéressants. Nul doute que c'est un mouvement de fond qui vient non pas concurrencer, mais compléter les méthodes classiques. En particulier, l'apprentissage automatique est incontournable dans les cas où aucun modèle satisfaisant n'est disponible pour une approche analytique. Les communications aéronautiques et spatiales découvrent ce potentiel et TeSA est parfaitement placé pour accompagner cette innovation dans ce secteur situé au cœur de son activité.

(*NewSpace*) aimed at offering extremely varied services and markets. There is also a trend for some of these systems to move out of the Digital Video Broadcasting (DVB) world and into the mobile ecosystem with integration into the 5G architecture.

- Machine Learning algorithms have recently entered the scientific field of signal and image processing, often with promising results. There is no doubt that this is a fundamental technological trend that does not compete with, but complements, traditional methods. In particular, machine learning is indispensable in cases where no satisfactory model is available for an analytical approach. Aeronautical and space communications are discovering this potential and TeSA is perfectly placed to accompany innovation in this sector, which is at the heart of its activity.



L'équipe TéSA en 2019.
TeSA Team in 2019.



Localisation et navigation

Il est communément dit que les systèmes de navigation sont partout, une déclaration quelque peu exagérée, mais dont le dessein est de faire référence à la grande variété d'applications grand public, civiles et militaires, dans une pléthore de domaines techniques, où l'information de *position*, *vitesse* et *temps* a une importance primordiale. Plus précisément, cela concerne directement les systèmes de transport intelligents, la robotique et les villes intelligentes, pour n'en nommer que quelques-uns. Il est clair que les véhicules de plus en plus autonomes auront un impact dans la voiture personnelle, les transports collectifs ou l'agriculture, en passant par les systèmes autonomes sans pilote (aériens, terrestres ou maritimes).

Un des verrous à adresser pour améliorer ces systèmes passe par l'amélioration de la *précision*, *disponibilité*, *fiabilité* et *robustesse* de positionnement. Ces quatre points guideront les futures recherches sur les systèmes de localisation et navigation. Il faut remarquer que seuls les GNSS permettent un positionnement absolu en tous points de la surface du globe non masqué. Hélas, les GNSS ont été conçus à l'origine pour fonctionner en environnement libre, c'est-à-dire extérieur et dégagé, ce qui fait que leurs performances se dégradent nettement dans des environnements dits contraints, par exemple lors d'une propagation avec trajets multiples, et/ou en présence de perturbations ionosphériques, ou encore pour des scénarios à dynamiques élevées et/ou à signaux faibles. Enfin, dans des scénarios critiques pour la sécurité, cette dégradation de performance peut être intentionnellement provoquée par la génération d'interférences (brouilleurs) et/ou des attaques par *spoofing*, avec un impact non négligeable sur les systèmes de navigation. Par conséquent, il existe un réel besoin de concevoir des systèmes de navigation précis et robustes en environnement contraint. Nous pouvons distinguer deux axes :

- l'amélioration des performances des récepteurs GNSS (mono-agent ou multi-agents coopératifs), ou
- l'exploitation d'architectures hybrides (fusion de données multi-capteurs).

Pour combattre les effets limitants indiqués ci-dessus, il faut une amélioration du traitement du signal actuel : réseaux d'antennes, *vector tracking loops*, estimation de la position au sens du maximum de vraisemblance appelée *direct position estimation*, temps d'intégration longs, filtres adaptatifs, traitements poussés de la



Positioning and navigation

It is commonly said that navigation systems are everywhere, a somewhat exaggerated statement, but one that is intended to refer to the wide variety of consumer, civilian and military applications in a plethora of technical fields where *position*, *velocity* and *time* information is of primary importance. Specifically, this directly concerns intelligent transport systems, robotics and smart cities, to name but a few. It is clear that increasingly autonomous vehicles will have an impact on personal cars, public transport or agriculture, including autonomous unmanned systems (on air, land or at sea).

One of the key issues to be addressed in order to improve these systems is to improve the *accuracy*, *availability*, *reliability* and *robustness* of positioning. These four points will guide future research on positioning and navigation systems. It should be noted that only GNSS allows for absolute positioning at any point on the surface of the globe with some satellites in line of sight at all times. Unfortunately, the GNSS satellites were originally designed to operate in a free environment, i.e., outdoors and unobstructed, so their performance degrades significantly in so-called constrained environments, e.g., during multipath propagation, and/or in the presence of ionospheric disturbances, or for scenarios with high dynamics and/or weak signals. Finally, in safety-critical scenarios, this performance degradation can be intentionally caused by interference generation (jammers) and/or spoofing attacks, with a significant impact on navigation systems. Consequently, there is a real need to design accurate and robust navigation systems for constrained environments. We can distinguish two main strategies:

- improving the performance of GNSS receivers (single-agent or cooperative multi-agent), or
- exploiting hybrid architectures (merging of multi-sensor data).

To counter the above-mentioned limiting effects, current signal processing must be improved: by means of antenna arrays, vector tracking loops, maximum likelihood estimation known as 'direct position estimation', long integration times, adaptive filtering, advanced processing of the phase of received pseudo-random or carrier codes, processing of new GNSS signals using

phase des codes pseudo-aléatoires ou porteuses reçus, traitement des nouveaux signaux GNSS utilisant des signaux large bande, etc. Il est aussi intéressant d'exploiter des sources d'information complémentaires, par exemple l'exploitation conjointe de plusieurs constellations, l'exploitation simultanée des différentes fréquences porteuses émises (correction ionosphérique, méta signaux GNSS, levée d'ambiguïté de phase, etc.), et le filtrage des erreurs par les dynamiques Doppler accrues telles que l'apportent les constellations en orbite basse. TéSA est positionné pour développer des nouvelles techniques de traitement du signal GNSS qui permettront de résoudre les problèmes mentionnés ci-dessus.

L'infrastructure de navigation par satellite européenne est désormais pleinement opérationnelle, et sujette au développement de nouvelles applications et de nouveaux traitements des signaux et de mesures brutes. Aussi, dans un proche avenir, le *Galileo High Accuracy Service* (HAS), le *Commercial Authentication Service* (CAS) et l'*Open Service Navigation Message Authentication* (OSNMA) seront disponibles. De nouveaux signaux GNSS continuent d'apparaître, tels que les signaux en bande S d'IRNSS, de BEIDOU-3, et même de GLOBALSTAR qui se déclare lui-même système GNSS avec ses signaux pilotes en spectre étalé et son projet de nouveau service de positionnement précis (PPP). Le système régional Korean Positioning System (KPS) prévoit aussi l'utilisation de la bande S en plus de la bande L. La bande S en question est aussi la seule bande descendante réglementairement autorisée pour les communications mobiles (MSS) par satellite et les systèmes de radio détermination (RDSS) tels que GNSS. Des synergies entre systèmes de navigation et de communication mobile peuvent ainsi être trouvées au niveau des signaux, tout comme pour les liens possibles entre GNSS et positionnement à très faible consommation et donc faible bande des objets de l'IoT. Une fois la correction ionosphérique bifréquence faite, l'augmentation des performances de mesure de type distance est également l'une des clefs des études nécessaires. Le TéSA est positionné pour poursuivre ses contributions à l'étude de tous ces nouveaux signaux GNSS et de leurs performances, ainsi qu'à leur conception. De plus, les applications scientifiques du GNSS requièrent généralement une précision maximum des mesures, par conséquent, des techniques avancées de traitement du signal et de nouveaux signaux sont nécessaires. Enfin, il convient de mentionner l'intérêt croissant pour les récepteurs GNSS à bord de satellites LEO, ainsi que les techniques de positionnement basées sur des satellites LEO (comme approches alternatives au positionnement GNSS classique basé sur satellites

broadband signals, etc. It is also worthwhile to exploit complementary sources of information, for example the joint exploitation of several constellations, the simultaneous exploitation of the different transmitted carrier frequencies (ionospheric correction, GNSS meta-signals, phase ambiguity removal, etc.), and the filtering of errors by increased Doppler dynamics such as is provided by low-earth orbit constellations. TeSA is in a good position to develop new GNSS signal processing techniques that will solve the aforementioned problems.

The European satellite navigation infrastructure is now fully operational, and awaiting the development of new applications and new processing of raw signals and measurement data. Also, in the near future, the *Galileo High Accuracy Service* (HAS), the *Commercial Authentication Service* (CAS) and the *Open Service Navigation Message Authentication* (OSNMA) will be available. New GNSS signals continue to emerge, such as the S-band signals of IRNSS, BEIDOU-3, and even GLOBALSTAR, which has declared itself to be a GNSS system, with its spread spectrum pilot signals and its project for a new Precise Point Positioning service (PPP). The Korean Positioning System (KPS) also intends to use the S-band in addition to the L-band. The S-band in question is also the only downlink band authorised for Mobile Satellite Service (MSS) communications and Radio Determination Satellite Systems (RDSS) such as GNSS. Synergism between navigation and mobile communication systems can thus be found at the signal level, as well as for the possible links between GNSS and very low-power and therefore low-bandwidth positioning of IoT objects. The increase in range-type measurement performance, once the dual-frequency ionospheric correction has been made, is also crucial for the further studies needed. TeSA is ready to continue contributing to the study of all these new GNSS signals and their performance, as well as their design. In addition, scientific applications of GNSS generally require maximum measurement accuracy, therefore advanced signal processing techniques and new signals are needed. Finally, it is worth mentioning the growing interest in GNSS receivers on board LEO satellites, as well as positioning techniques based on LEO satellites (as alternative approaches to classical GNSS positioning based on MEO satellites), and the development of space-based receivers for Earth-Moon navigation.

MEO), et le développement de récepteurs spatiaux pour la navigation Terre-Lune.

La précision de positionnement GNSS peut être améliorée grâce à la fusion avec d'autres capteurs. Dans ce cadre, on distingue les techniques à l'estime (*dead reckoning*) exploitant classiquement une centrale inertielle ou un odomètre (pouvant être étendues à des caméras ou des altimètres) des techniques exploitant des sources d'opportunités (LTE cells, Wi-Fi, GLOBALSTAR, IRIDIUM, émetteur GNSS au sol ou dans les immeubles, pseudolites, liaisons 5G, liaisons IoT...). Ces techniques sont basées sur une cartographie a priori mais elles peuvent être étendues au cas où l'environnement n'est que partiellement connu (*Simultaneous Localization And Mapping*, SLAM). Une autre approche entrant dans cette thématique de la fusion de capteurs consiste à faire du positionnement coopératif ou collaboratif au sein d'un parc de récepteurs qui partagent alors leurs informations. Cette amélioration de la précision de positionnement va de pair avec le perfectionnement des techniques de détermination de l'intégrité et de l'authentification de cette information. En effet, dans de nombreuses applications, la confiance que l'on peut avoir dans l'information de position est aussi importante que sa valeur (aviation civile, gestion de flottes de véhicules ou de drones, péages automatiques...).

Enfin avec le prochain essor des objets communicants, il va être difficile d'administrer simplement les réseaux de communication mondiaux. La diffusion d'une référence de temps précise par les GNSS doit offrir une solution à ce problème. Les systèmes de communication et de radionavigation/localisation devraient d'ailleurs être de plus en plus imbriqués, que cela soit pour les réseaux satellitaires ou au sol. Les réseaux de communication 5G seront d'ailleurs pourvus de techniques de positionnement améliorées utilisant leurs formes d'onde et capacités de synchronisation à performances accrues. L'hybridation Communication – Navigation (COM-NAV) au niveau des systèmes satellitaires, ou l'augmentation du nombre de satellites, constituent des pistes étudiées pour augmenter la résilience des systèmes de radionavigation par satellite. Les compétences de TESA en télécommunications spatiales et aéronautiques, et en radionavigation/localisation, seront mises en avant pour des études dans ces domaines système, interface-air et réseaux. Pour finir, on peut remarquer que les dernières évolutions en termes de processeurs embarqués et de radio logicielle (*software defined GNSS receiver*) et de récepteurs RF intégrés (SoC) apportent une plus grande flexibilité et évolutivité pour les solutions envisagées.

GNSS positioning accuracy can be improved by merging data from other sensors. In this context, a distinction is made between dead reckoning techniques using a conventional inertial unit or odometer (which can be extended to cameras or altimeters) and techniques using opportunity sources (LTE cells, Wi-Fi, GLOBALSTAR, IRIDIUM, GNSS transmitters on the ground or in buildings, pseudolites, 5G links, IoT links, etc.). These techniques are based on *a priori* mapping but can be extended to the case where the environment is only partially known (Simultaneous Localization And Mapping – SLAM). Another approach in this field of sensor data merging consists in cooperative or collaborative positioning within a fleet of receivers which then share their information. This improvement in positioning accuracy goes hand in hand with improvements in techniques for determining the integrity and authentication of the information. Indeed, in many applications, the reliability of the position information is as important as its accuracy (civil aviation, management of fleets of vehicles or drones, automatic tolls, etc.).

Finally, with the coming expansion of communicating objects, it will be no simple task to administer global communication networks. The dissemination of an accurate time reference by GNSS should provide a solution to this problem. Communication and radio navigation/positioning systems should also be increasingly intertwined, whether for satellite or terrestrial networks. Furthermore, 5G communication networks will also employ improved positioning techniques, using their waveforms and synchronisation capabilities with increased performance. Communication-Navigation Hybridisation (COM-NAV) at the level of satellite systems, or the increase in the number of satellites, are possible ways of increasing the resilience of satellite radionavigation systems and are thus being investigated. TeSA's expertise in space and aeronautical telecommunications, and radio navigation/positioning, will be offered for studies in these system, air-interface and network fields. Finally, it should be noted that the latest developments in terms of on-board processors and software-defined GNSS receivers and integrated RF receivers (with System on Chip – SoCs) bring greater flexibility and scalability to the solutions envisaged.

Observation de la Terre

Le déploiement des moyens de diffusion des données spatiales (Copernicus, mégaconstellations « *New Space* » d'observation...) permet de multiplier les applications innovantes basées sur l'analyse et la fusion des données. La tendance à court et moyen terme est le déploiement de constellations de 100 satellites ou plus en LEO, avec une résolution inférieure au mètre. Des constellations plus petites sont déployées avec une résolution de l'ordre de 30 cm, et l'on peut s'attendre à ce qu'une constellation de l'ordre de 100 satellites d'observation optique et/ou radar avec une telle résolution puisse voir le jour à terme. Le chiffre de 100 satellites correspond à peu près à un renouvellement de l'imagerie de la Terre entière chaque 24 heures. Cela permettra l'émergence de nouveaux services de « *tracking* » d'objets divers à dynamique faible (navires, traces de pollutions...) et de suivi d'évolution précise de zones, et des plus grandes possibilités d'utilisation de la fusion de données et d'Intelligence Artificielle, comme évoqué ci-après. Cela pourrait permettre aussi l'émergence plus facile d'un ou plusieurs services alternatifs de type « *Google Earth* ». Ces services étendus seront aussi possibles grâce aux revisites plurijournalières, qui seront aussi permises du fait des capacités de pointage des satellites au sein de ces constellations.

Il en est de même pour les observations de type similaire provenant de drones volants, ou d'essaims de drones à maillages serrés ou larges. Il s'agit ici, pour ces domaines spatiaux et aériens de tirer profit de la complémentarité d'informations acquises par des capteurs différents tels que des capteurs optiques, hyper spectraux, radar à synthèse d'ouverture, radiométrie, radiofréquence au sens large...

TéSA a une forte expérience dans ce domaine dont il pourra faire bénéficier de futurs projets.

L'exploitation de données issues de sources d'information plus originales est également intéressante. On évoque par exemple de plus en plus la possibilité d'interpréter des données d'observation spatiale avec des images partagées sur les réseaux sociaux (géo-intelligence) ou d'utiliser les signaux de télécommunications pour l'identification d'utilisateurs. Enfin, le déploiement des satellites Sentinel 2, qui fourniront gratuitement des images d'une zone d'intérêt avec une répétitivité importante (tous les 5 jours), révolutionne la communauté du traitement d'images d'observation de la Terre qui intensifie ses travaux concernant l'analyse d'images multi temporelles. TéSA s'investit naturellement dans ce domaine.

Earth observation

The deployment of space data dissemination resources (Copernicus, "New Space" observation mega-constellations, etc.) has led to an increase in innovative applications based on data analysis and merging. The short to medium term trend is to deploy constellations of 100 or more satellites in LEO, with sub-metre resolution. Smaller constellations are being deployed with a resolution of the order of 30 cm, and a constellation of the order of 100 optical and/or radar observation satellites with such a resolution can be expected in the future. The figure of 100 satellites corresponds roughly to the capacity to renew imagery for the entire Earth every 24 hours (e.g., Google Earth is updated daily). This will allow the emergence of new services for tracking various objects with low dynamics (ships, traces of pollution, etc.) and for accurate monitoring of the evolution of areas, and greater possibilities for using merged data and Artificial Intelligence, as discussed below. This could also facilitate the emergence of one or more alternative services to Google Earth. These extended services will also be possible because of the faster than 24-hour revisits, which will themselves be enabled by the pointing capabilities of the satellites within these constellations.

The same is true for similar types of observations from flying drones, or from swarms of drones with tight or wide meshes. The aim here is to take advantage of the complementarity of information acquired by different sensors such as optical, hyper spectral, synthetic aperture radar, radiometry, radio frequency in the broad sense, etc.

TeSA has a great deal of experience in this field which it will be able to share with future projects.

The use of data from more original sources of information is also interesting. For example, there is increasing talk of interpreting satellite observation data with images acquired with the help of social networks (geo-intelligence) or using telecommunication signals for user identification. Finally, the deployment of the Sentinel 2 satellites, which will provide free images of an area of interest with a high revisit rate (every 5 days), is revolutionising the Earth observation image processing community, which is stepping up its work on the analysis of multi-temporal images. TeSA is naturally involved in this field.

L'Internet des objets (IoT) associé aux réseaux de communication basse consommation est à l'origine d'une multiplication des capteurs de grandeurs physiques et chimiques non accessibles par l'observation satellitaire. Les données de ces capteurs sont actuellement recueillies par des réseaux radio terrestres mais de récentes expérimentations ont permis de confirmer que la réception par des satellites en orbite basse est réalisable. Les données spatiales vont donc s'enrichir de celles fournies par un grand nombre de capteurs à bas coût au sol, sur aéronef ou en mer, que les objets porteurs soient pilotés par l'homme ou pas, améliorant ainsi la surveillance et l'évolution des paramètres, environnementaux notamment. Dans ce contexte émergent, TéSA a un savoir-faire clairement démontré.

Il y a par ailleurs une forte croissance des activités liées au *big data*. Suite à ses nombreux travaux dans le domaine, TéSA a été naturellement positionné dans la cartographie des laboratoires concernés en région Occitanie. Il envisage donc de poursuivre ses activités relatives à l'analyse de données en grande dimension.

The Internet of Things (IoT), combined with low-power communication networks, has led to an increase in the number of sensors for physical and chemical quantities that are not accessible by satellite observation. Data from these sensors is currently collected by terrestrial radio networks, but recent experiments have confirmed that reception by low-earth orbit satellites is feasible. Satellite data will therefore be enriched by the data provided by a large number of low-cost sensors on the ground, on aircraft or at sea, whether or not the carrier objects are piloted by people, thus improving the monitoring and evolution of parameters, particularly environmental ones. In this emerging context, TeSA has clearly recognised know-how.

Big data activities are also growing rapidly. As a result of its extensive research in this field, TeSA was naturally positioned in the list of the laboratories concerned in the Occitanie region. It therefore plans to continue its activities in the field of big-data analysis.



Le domaine de l'observation optique ou radar de la Terre par satellite ou aéronef inclut par ailleurs la chaîne image bord, qui concerne aussi la radiométrie ou les observations radiofréquence au sens large. Cette chaîne image comporte notamment la mémoire de masse, et la chaîne de transmission radiofréquence ou optique. L'avenir de la diffusion massive directe vers la Terre de données d'observation de la Terre par satellite se répartit notamment entre les utilisations de la bande X et de la bande Ka. À la suite de ses travaux dans ce domaine, le TéSA reste positionné sur les études et simulations de systèmes de transmission de données, pour lequel la synergie est croissante avec les systèmes de télécommunication spatiale, sur le plan des fréquences, modulations, synchronisations et codage. Par exemple, les modulations et codages de type DVB-S2 sont déjà beaucoup utilisés pour les satellites d'observation de la terre « *New Space* » et des satellites d'agences spatiales, et le DVB-S2x est en passe de l'être. D'autres modulations et codages issus du marché de masse des télécommunications spatiales et aéronautiques sont envisageables pour ce type d'applications, par exemple pour les drones. Cela rejoint là encore un domaine d'excellence de TéSA.

The field of optical or radar observation of the Earth by satellite or aircraft further includes on-board image systems, which also concerns radiometry or radio frequency observations in the broad meaning of the term. This image system includes in particular mass memory, and the radio frequency or optical transmission systems. The future of massive direct-to-Earth dissemination of Earth observation satellite data is divided between the X-band and Ka-band. Following its work in this field, TeSA remains involved in studies and simulations of data transmission systems, for which synergy with space telecommunication systems is increasing in terms of frequencies, modulation, synchronisations and coding. For example, DVB-S2 modulations and encodings are already widely used for NewSpace Earth observation satellites and space agency satellites, and DVB-S2x is about to be used. Other modulations and coding from the consumer market for satellite and aeronautical telecommunications could be envisaged for this type of application, for example for UAVs. This is another sphere in which TeSA excels.



L'équipe TéSA en 2020.
TeSA Team in 2020.



Systèmes de communication par satellite

Les télécommunications par satellite connaissent actuellement une véritable révolution avec l'introduction de nombreuses techniques permettant d'accroître les débits supportés tout en diminuant les coûts d'acquisition et d'opération. Ces systèmes VHTS (*Very High Throughput Satellite*) visent maintenant des capacités de plusieurs centaines de Gigabits/s avec des couvertures de plusieurs centaines de spots pour les satellites géostationnaires. Pour satisfaire ces besoins toujours plus importants en bande, l'utilisation de la bande Q/V est au cœur des évolutions prochaines et les bandes plus hautes (W, optique) commencent à être envisagées. Ces bandes hautes étant caractérisées par de fortes atténuations, elles nécessitent la mise en œuvre de solutions de diversité spatiale ainsi que la planification associée. Sur la voie retour, les techniques de lutte coordonnée contre les interférences nécessitent des adaptations au contexte particulier du satellite. La prochaine génération de ces systèmes vise à accroître encore la capacité pour atteindre le Terabit/s.

La seconde tendance majeure concerne la flexibilité de ces systèmes, avec l'irruption des satellites entièrement 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. Ces solutions peuvent être complétées par des techniques de multiplexage temporel de la ressource (*beam hopping*) qui permettent d'offrir une flexibilité très forte et d'adapter ainsi les ressources offertes par ces systèmes aux demandes des utilisateurs sur la couverture. En effet, la variabilité des trafics incite à une allocation la plus dynamique possible des ressources, par exemple par le biais de techniques de partage en temps ou en fréquence.

Enfin, les constellations de satellites de télécommunication connaissent une véritable explosion, avec des systèmes couvrant des services et des marchés extrêmement variés. Ces systèmes sont portés aussi bien par des acteurs classiques du 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 GAFAMs. 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



Satellite communications

Satellite communications are currently undergoing a real revolution with the introduction of numerous techniques that increase the data rates supported while reducing acquisition and operating costs. These Very High Throughput Satellite (VHTS) systems are now aiming at capacities of several hundred Gigabits/s with coverage of several hundred spots for geostationary satellites. To meet these ever-increasing bandwidth requirements, the use of the Q/V band is at the heart of future developments and higher bands (W, optical) are beginning to be considered. As these high bands are characterised by high attenuation, they require the implementation of various spatial diversity solutions and corresponding planning. On the return channel, coordinated interference control techniques need to be adapted to the specific satellite context. The next generation of these systems aims to further increase throughput to a Terabit/s.

The second major trend concerns the flexibility of these systems, with the advent of fully flexible satellites (Software Defined Satellite – SDS) which allow complete adaptation to the needs of operators and their customers, whether in terms of throughput or coverage. These solutions are mainly based on transparent digital processors and active antennas. These solutions can be complemented by 'beam hopping' techniques, which offer a high degree of flexibility and allow the resources offered by these systems to be adapted to the demands of users in terms of coverage. Indeed, the variability of traffic encourages the most dynamic possible alpositioning of resources, for example through time or frequency sharing techniques.

Finally, there has been an explosion in telecommunications satellite constellations, with systems covering a wide range of services and markets. These systems are purveyed by both traditional space players and state players, as well as a large number of new players (commonly referred to as *NewSpace*), whether start-ups or players from the GAFAMs. There are already established systems such as Iridium, O3B or OneWeb and numerous initiatives around nano/micro satellites. But the major fact is the emergence of megaconstellations such as Telesat with the LightSpeed project, Amazon with the Kuiper project, SpaceX with Starlink, or state projects (mainly in Europe and in China), which are profoundly modifying the satellite telecommunications market. Indeed, these

l'irruption des méga-constellations avec les initiatives de Telesat avec le projet LightSpeed, d'Amazon avec le projet Kuiper, de SpaceX avec Starlink, ou des projets étatiques (principalement en Europe et en Chine), qui modifie profondément le marché des télécommunications par satellite. En effet, 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), permettront d'atteindre des capacités totales extrêmement élevées de l'ordre de plusieurs téraoctets/s avec une couverture globale et des latences très faibles. Pour ce faire, ces types de systèmes 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... On notera également une tendance de certains de ces systèmes à quitter le monde DVB pour rejoindre l'écosystème mobile avec l'intégration dans l'architecture 5G.

Pour compléter ce panorama, on peut citer des systèmes de niche, tels que les plateformes stratosphériques qui peuvent être vues comme un complément aux systèmes satellites, que ce soit en termes de relai ou d'extension/densification de couverture. Il convient également de noter que ces évolutions impactent aussi le segment sol avec une tendance forte à la virtualisation du segment utilisateur et à l'amélioration de la convergence avec les réseaux terrestres, notamment dans le cadre de la 5G.

Pour finir, au niveau applicatif, de nouveaux marchés sont au cœur des interrogations des acteurs du domaine, avec en particulier les plateformes mobiles (avions, bateaux...) et le *Machine Type Communication*. Ce dernier présente en effet des caractéristiques très marquées, que ce soit en termes de trafic généré, du nombre d'équipements envisagés ainsi que de leurs contraintes énergétiques. Enfin, l'hybridation des systèmes de télécommunication spatiales pour les mobiles et des systèmes de radionavigation et positionnement à des fins d'augmentation de performance, de résilience, est un domaine d'avenir dans lequel le TESA est bien positionné, que cela soit pour les constellations de radiocommunication en orbite basse ou moyenne, et les satellites géostationnaires.

systems, consisting of a very large number of satellites (up to 12,000 in the case of Starlink), some in very low orbit (up to an altitude of 340 km), will make it possible to achieve extremely high total throughput capabilities of the order of several Terabits/s with global coverage and very low latencies. To do this, these types of systems rely on all the latest advances in the field of space telecommunications: active antennas, on-board regeneration and processing, optical inter-satellite links and flexibility, virtualisation, etc. There is also a trend for some of these systems to move out of the DVB world and into the mobile phone ecosystem with integration into the 5G architecture.

To complete the picture, we should mention niche systems, such as stratospheric platforms, which can be seen as a complement to satellite systems, either in terms of relay or coverage extension/densification. It should also be noted that these developments also impact the ground segment with a strong trend towards virtualisation of the user segment and improved convergence with terrestrial networks, particularly in the context of 5G.

Finally, at the application level, new markets are the main preoccupation of the questions raised by players in the field, in particular mobile platforms (aircraft, ships, etc.) and Machine-Type Communication. The latter has very marked characteristics, whether in terms of the traffic generated or the number of facilities envisaged and their energy constraints. Finally, the hybridisation of satellite telecommunications systems for mobiles and radio navigation and positioning systems, to increase performance and resilience, is a promising field in which TeSA is well positioned, both for low and medium-orbit radio communication constellations and geostationary satellites.

L'Intelligence artificielle au service de TéSA

Le laboratoire de recherche TéSA a une expertise qui date de plusieurs décennies dans le domaine de l'apprentissage statistique (*machine learning*) pour les communications spatiales et aéronautiques. Cette expertise de TéSA est présente dans sa cartographie depuis longtemps, dans la branche « Traitement du Signal et des Images » (<https://www.tesa.prd.fr/our-expertise-tesa.p5.html>) et a été utilisée dans de nombreux projets.

Dans ses récentes études et thèses, TéSA s'est impliqué dans les domaines de la classification supervisée et non-supervisée ou de la détection d'anomalies. Il s'agit par exemple d'effectuer une reconnaissance de cibles mobiles dans des systèmes de détection d'intrusion, ou de détecter des comportements anormaux dans des images radar et multispectrales ou dans la télémétrie satellite. Un post-doctorat a d'ailleurs été co-financé par TéSA et Thales Alenia Space dans ce dernier domaine (octobre 2019 – avril 2021) portant sur l'étude de méthodes innovantes de détection d'anomalies permettant de prendre en compte le retour utilisateur.

Le lecteur intéressé trouvera plus de détails dans la synthèse des travaux en traitement du signal et des images, page 16 et dans la partie dédiée aux post-docs lancés en 2019, page 47.

Devant l'augmentation d'intérêt pour les méthodes d'apprentissage statistique, le laboratoire TéSA souhaite intensifier ses activités dans ce domaine de l'intelligence artificielle.

Dans le futur proche, il envisage de débiter deux thèses effectuées en collaboration avec le CNES concernant l'utilisation de méthodes de *machine learning* pour l'estimation d'une échelle de temps dans des constellations de nanosatellites, ou pour les communications M2M (*machine to machine*) dans le contexte satellitaire. Le laboratoire envisage également d'étendre son expertise aux méthodes d'apprentissage profond (*deep learning*) et de diversifier ses domaines d'applications avec des travaux issus de la vision par ordinateur pour l'analyse de déformations des ailes d'avion par photogrammétrie ou la détection d'objets dans des images de recyclage.

Le laboratoire TéSA est donc en mesure de proposer à ses partenaires et collaborateurs externes son expertise acquise dans le domaine novateur de l'intelligence artificielle appliquée au traitement du signal et des images.

Artificial Intelligence at the service of TeSA

The TeSA research laboratory has decades of expertise in the field of statistical learning (machine learning) for space and aeronautical communications. This expertise has been developed in TeSA's research activities for a long time, in the "Signal and Image Processing" branch (<https://www.tesa.prd.fr/our-expertise-tesa.p5.html>) and has been used in many projects.

In its recent studies and theses, TeSA has been involved in the fields of supervised and unsupervised classification or anomaly detection. Examples include moving target recognition in intrusion detection systems, or detecting anomalous behaviour in radar and multispectral images or satellite telemetry. A post-doctorate project has been co-financed by TeSA and Thales Alenia Space in this field (October 2019 – April 2021) on the study of innovative methods of anomaly detection that take user feedback into account.

The interested reader will find more details in the summary of the research done in signal and image processing, page 16, and in the section dedicated to the post-doctoral research projects launched in 2019, page 47.

Given the increasing interest in statistical learning methods, the TeSA laboratory wishes to intensify its activities in this field of artificial intelligence.

In the near future, it plans to start two theses in collaboration with CNES on the use of machine learning methods for time scale estimation in nano-satellite constellations, or for machine to machine (M2M) communications in the satellite context. The laboratory also plans to extend its expertise to include deep learning methods and to diversify its fields of application with work based on computer vision for the analysis of aircraft wing deformations using photogrammetry or the detection of objects in recycled images.

The TeSA laboratory is therefore able to offer its partners and external collaborators its expertise acquired in the innovative field of artificial intelligence applied to signal and image processing.



Séminaires scientifiques de TéSA.
TeSA Scientific Seminars.



Conclusion

Conclusion

Ce rapport d'activité a permis de présenter la synthèse des activités de recherche et d'expertise menées dans TéSA en 2019 et 2020.

TéSA est un laboratoire de recherche privé, existant sous forme d'une association loi 1901 depuis plus de 16 ans, fédérant la recherche en télécoms spatiales et aéronautiques, permettant à des chercheurs de diverses entités de recherche de travailler ensemble, en s'enrichissant des compétences de tous pour mieux répondre aux besoins des industriels et institutionnels demandeurs d'une R&D de qualité.

Ces dernières années ont vu un essor de TéSA, un déploiement de ses forces, autour d'un Conseil Scientifique actif, des doctorants motivés et enthousiastes, des chercheurs impliqués et initiateurs de propositions, des membres partenaires industriels et institutionnels s'engageant dans des projets de recherche toujours plus intéressants et novateurs.

Encore merci à tous les acteurs de TéSA, chercheurs, doctorants et post-doctorants, industriels, institutionnels et à toute l'équipe Développement Scientifique de TéSA, sans oublier le personnel administratif qui fait fonctionner l'association au quotidien.

L'aventure continue pour toujours mieux servir la recherche en télécoms spatiales et aéronautiques !

This report is a summary of the research and applied expertise activities carried out by TeSA in 2019 and 2020.

TeSA is a private research laboratory, founded more than 16 years ago as an association under the French Act of 1901, combining research in both space and aeronautical telecommunications, allowing researchers from various research organisations to work together, enriching each other's skills to better meet the needs of industrial and institutional users of quality R&D.

The last few years have seen TeSA grow and develop its strengths, with an active Scientific Committee, motivated and enthusiastic PhD students, involved researchers and initiators of proposals, and industrial and institutional partner members involved in increasingly interesting and innovative research projects.

Our thanks once again to all TeSA participants and partners, researchers, PhD and post-doctoral students, industrialists, institutions and to the entire TeSA Scientific Development team, not forgetting the administrative staff who run the association on a daily basis.

Our adventure continues in order to better serve space and aeronautical telecommunications research!

Chefs de projet TéSA / TeSA Editors-in-chief : Antoine Blais, Éric Chaumette.

Principaux contributeurs / Main contributors : Cédric Baudoin, Tarik Benaddi, Antoine Blais, Éric Chaumette, Franck Durand-Carrier, Jean-Luc Issler, François Lamothe, Emmanuel Lochin, Corinne Mailhes, Jean-Yves Tourneret, Jordi Vilà-Valls, François Vincent, Selma Zamoum.

Illustrations / Illustrations : les illustrations sont sous copyright TéSA sauf celles des pages 13, 18 et 61 qui sont sous copyright CNES. / Illustrations are under TeSA copyright except those on pages 13, 18 and 61 which are under CNES copyright.

Traduction / Translation : Coup de Puce Expansion.

Conception et réalisation / Design and pre-press : Corinne Mailhes, Philippe Paimblanc, Raoul Prévost.



Le TéSA est un laboratoire collaboratif de recherche, créé sous forme d'une association loi 1901 en 2004, impliquant des acteurs locaux de Midi-Pyrénées comme de grands organismes industriels (CNES, Thales Alenia Space, Collins Aerospace, SpaceAble), des laboratoires de recherche publics appartenant à des écoles d'ingénieurs (Toulouse-INP, ISAE, ENAC, IMT Atlantique, IPSA) sur le thème des Télécommunications Spatiales et Aéronautiques.

L'expertise de TéSA est centrée autour :

- des communications numériques,
- du réseau,
- du traitement du signal et des images.

Les recherches à TéSA concernent les domaines d'applications suivants :

- les systèmes de communication spatiaux et aéronautiques,
 - la localisation et la navigation,
 - l'observation de la terre,
- ainsi que des domaines connexes.



TeSA is a joint research laboratory, created as a non-profit organization in 2004, including public institutions, major companies (CNES, Thales Alenia Space, Collins Aerospace, SpaceAble) and research public laboratories associated with engineering schools (Toulouse-INP, ISAE, ENAC, IMT Atlantique, IPSA) of the Midi-Pyrenees region, in the field of Telecommunications for Space and Aeronautics.

TeSA expertise lies in

- Digital Communications,
- Networking,
- Signal and Image processing.

Research conducted in TeSA focuses on the following key areas:

- Space and Aeronautical communication systems,
 - Positioning and Navigation,
 - Earth Observation,
- and related domains.

TéSA

Télécommunications Spatiales et Aéronautiques

7 boulevard de la Gare
31500 Toulouse (France)
+33 5 61 24 73 60
www.tesa.prd.fr



SPACEABLE

