

Rapport d'activité

Activity report

2017-2018





Avant-propos

Foreword

Dans ce rapport d'activité de TéSA, si la cartographie des activités reste fidèle à la description matricielle en « domaines d'expertise » et « domaines d'application », on y voit apparaître des activités où les compétences de TéSA sont tournées vers des « domaines connexes », comme les télécommunications terrestres ou les hyperfréquences. Au-delà du bilan, cette édition propose des « tendances et perspectives », preuve que notre Conseil Scientifique réfléchit toujours avec une « longueur d'avance ». Pour cela, il a mis en place des processus d'autofinancement de la recherche tels que des appels à sujets d'études et de postdoctorant ou invitations de chercheurs étrangers. Il organise également des séminaires scientifiques, ainsi que des journées scientifiques, très appréciés de tous.

Le bilan scientifique 2017-2018 de TéSA peut s'exprimer en quelques chiffres : 9 thèses soutenues, soit 60 thèses soutenues dans TéSA depuis sa création, environ 90 articles de journaux et conférences internationales, 3 brevets déposés récompensés par les Lauriers de l'INP Toulouse, 35 études effectuées, 14 thèses en cours fin 2018, 7 séminaires scientifiques, 2 éditions des journées scientifiques réunissant à chaque fois une quarantaine de doctorants, chercheurs et ingénieurs de TéSA et de ses membres.

Un événement remarquable en 2018 fut la visite dans nos locaux de Nadia Pellefigue, Vice-Présidente de la région Occitanie, montrant l'intérêt que porte la Région pour notre recherche.

Merci donc aux auteurs et à tous les acteurs de ce bilan qui illustre encore une fois le dynamisme, la créativité et la rigueur scientifique de notre association.

Franck Durand-Carrier,
Président de TéSA

While the breakdown of activities into "fields of expertise" and "fields of application" remains the same in this new TeSA activity report, some new activities are emerging from the reapplication of TeSA skills to "related fields", such as terrestrial telecommunications or microwave technologies. Moreover, this edition sketches out "trends and perspectives" in our fields of application, which proves that our Scientific Committee is always projecting "one step ahead". To keep this "head start", it has also set up self-financing processes for research such as calls for study and post-doctoral subjects or invitations to foreign researchers. It also organises scientific seminars, as well as scientific days, that are highly appreciated by all.

The 2017-2018 scientific achievements of TeSA can be expressed in a few figures: 9 theses defended (bringing to 60 the number of theses defended in TéSA since its creation at the end of 2004), about 90 articles, either published in journals or presented at international conferences, 3 patents filed and rewarded by the *Lauriers de l'INP Toulouse*, 35 studies carried out, 14 theses in progress at the end of 2018, 7 scientific seminars, 2 editions of scientific days, each time bringing together about forty doctoral students, researchers and engineers from TeSA and its members.

A noteworthy event in 2018 was the visit to our offices of Nadia Pellefigue, Vice-President of the Occitanie Region, which showed the Region's interest in our research.

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	
●	Comment lire ce rapport.....	3
	How should this report be read?	
●	Cartographie des activités TéSA.....	4
	Kaleidoscope map of TeSA activities	
■	Activités scientifiques	9
	Scientific activities	
●	Traitement du signal et des images	9
	Signal and Image processing	
●	Communications numériques.....	24
	Digital communications	
●	Réseaux.....	34
	Networking	
●	Vie du laboratoire	45
	Laboratory life	
●	Collaborations	47
	Collaborations	
●	Rayonnement de TéSA	49
	TeSA outreach	
■	Tendances et perspectives.....	51
	Trends and perspectives	
●	Localisation et navigation	52
	Positioning and navigation	
●	Observation de la Terre.....	54
	Earth observation	
●	Systèmes de communication par satellite	56
	Satellite communications	
●	Systèmes de communication aéronautiques	57
	Aircraft communications	
■	Conclusion	63
	Conclusion	



Introduction

Introduction



Comment lire ce rapport

Ce rapport d'activités couvre la période 2017-2018 de TéSA et fait suite aux précédents rapports 2013-2014 et 2015-2016 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 des images », « 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.

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.



How should this report be read?

This report on the activities of the TeSA laboratory covers the period 2017-2018 following the previous reports for 2013-2016, which can be found in 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.

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

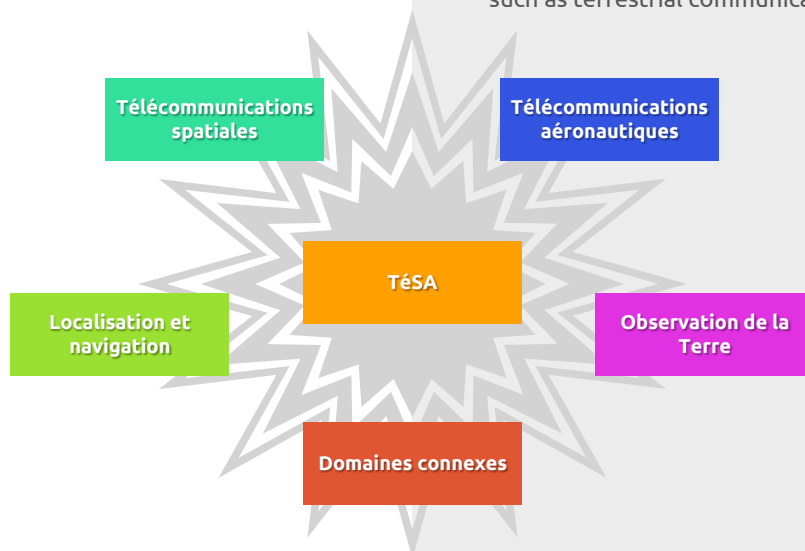
La cartographie des activités de TéSA a été dessinée par le Conseil Scientifique : elle présente les domaines d'application et les domaines d'expertise de TéSA.

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.

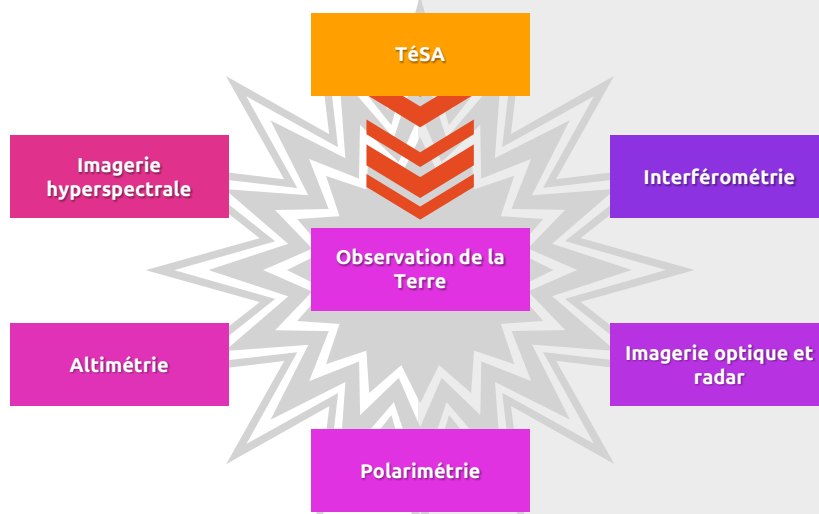
Fields of application

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 been recently 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.

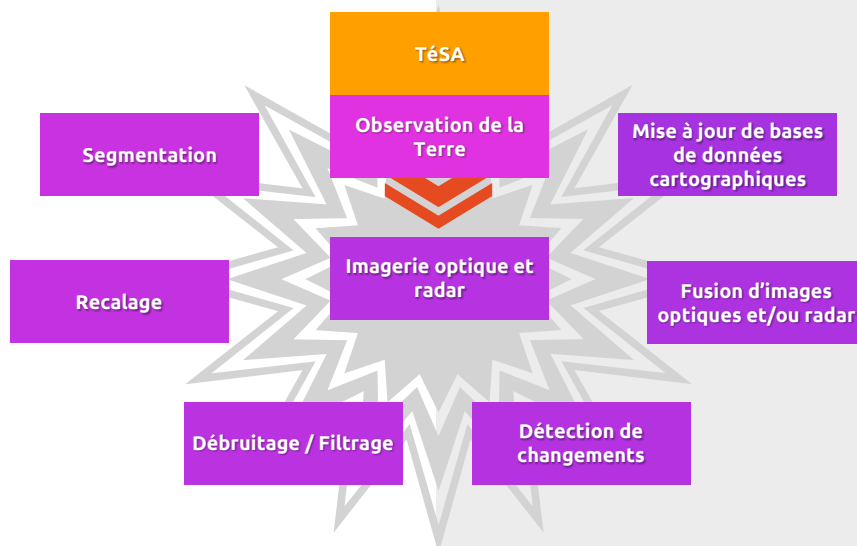
hyperspectrale, l'altimétrie, la polarimétrie, l'imagerie optique et radar et l'interférométrie, que ce soit à travers des thèses ou des études.



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.



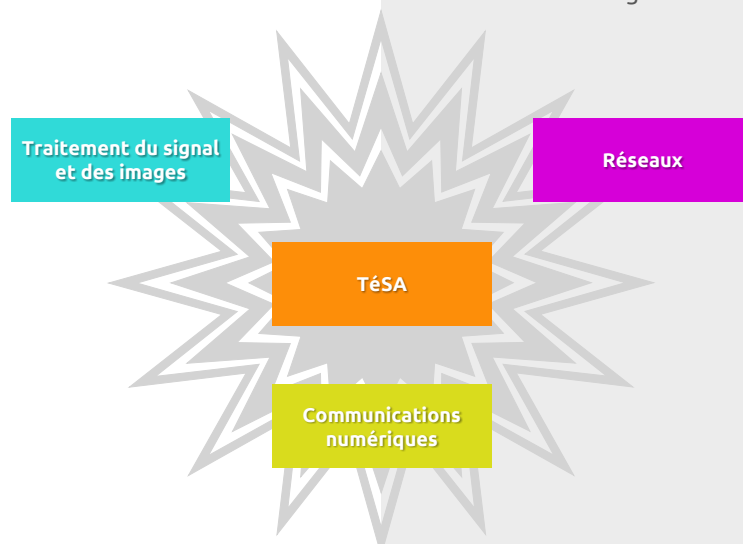
Les projets associés à la thématique imagerie optique et radar.
Projects in the optical and radar imagery topic.

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

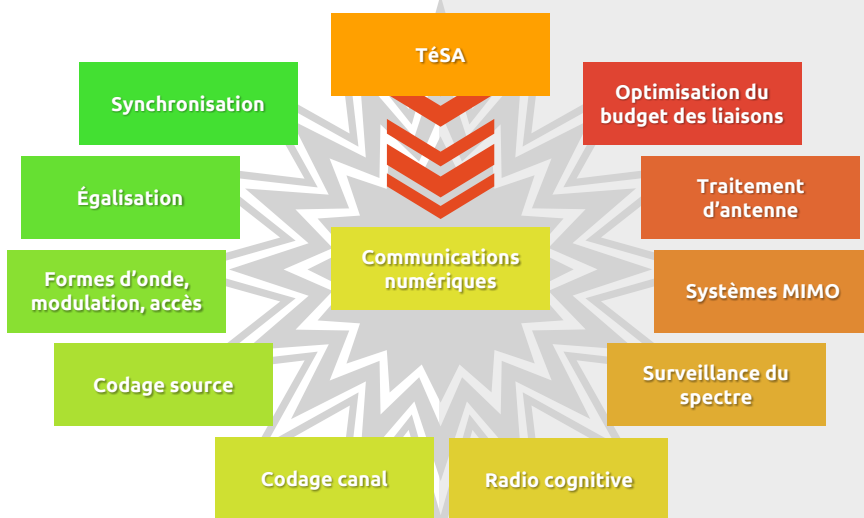
Pour compléter les domaines d'application du laboratoire TéSA, une description de ses domaines d'expertise a également été effectuée. Ces domaines d'expertise sont au nombre de 3 : le « traitement du signal et des images », les « communications numériques » et les « réseaux ».



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

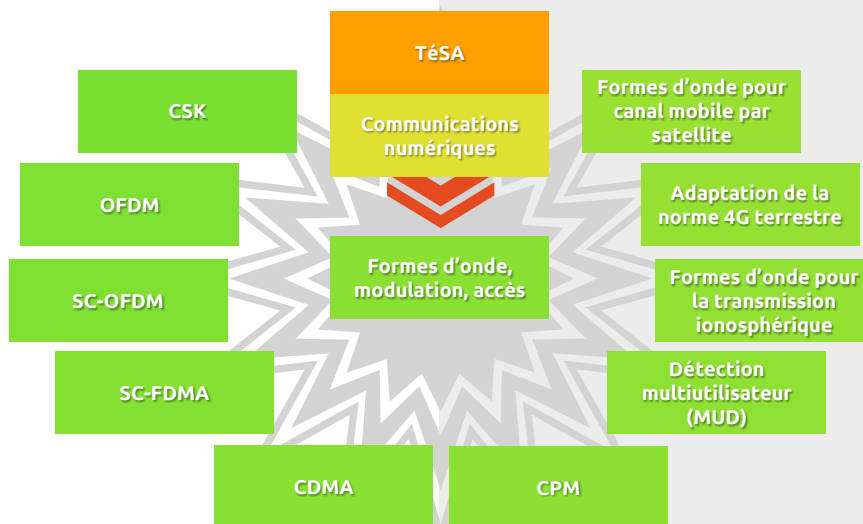
In addition to the fields of application of the TeSA laboratory, its fields of expertise have also been described. These fields of expertise are "image and signal processing", "digital communications" and "networking".

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 on the internet page <http://www.tesa.prd.fr/our-expertise-tesa.p5.html>.



Activités scientifiques

Scientific activities

Traitement du signal et des images

Deux thématiques principales se dégagent des différents projets menés au sein de TéSA. Il s'agit de l'amélioration des **systèmes de localisation et navigation**, principalement par satellites, d'une part, et le traitement du signal **radar**, d'autre part. Outre ces deux axes de développement, de nouvelles thématiques font leur apparition et seront présentées lors d'une troisième partie.

Synthèse des travaux

TRAITEMENT DU SIGNAL RADAR

Les activités liées au radar peuvent être divisées en 2 sous-groupes, correspondant à 2 domaines d'application différents de TéSA ; à savoir « localisation et navigation » et « observation de la Terre ».

Un premier groupe de projets s'est focalisé sur le premier aspect et plus précisément sur la détection d'intrusion dans une zone prédéfinie. En effet, ces 3 projets ont eu pour but d'améliorer les performances d'un système radar de surveillance de site développé par Collins Aerospace, le PSR500. Ce système est déployé de manière expérimentale dans divers sites militaires (bases militaires) ou civils (centrales nucléaires) et vise à détecter toute intrusion non désirée.

Chronologiquement, la première étude s'est focalisée sur la problématique des cibles lentement mobiles, telles qu'une personne rampant par terre. En effet, ce type de cible n'est, en général, pas détectée par les systèmes radar standard qui n'analysent que l'effet Doppler. L'exploitation conjointe de la diversité d'antenne et d'un temps d'intégration plus long a permis d'améliorer les performances en détection pour ce type de cible.

Signal and Image processing

Two main themes emerge from the different projects undertaken at TeSA. These are the improvement of **positioning and navigation systems**, mainly by satellite, on the one hand, and **radar signal processing**, on the other. In addition to these two development orientations, new themes are emerging and will be presented in a third section.

Summary of work

RADAR SIGNAL PROCESSING

Radar activities can be divided into 2 subgroups, corresponding to 2 different fields of application at TeSA; namely "positioning and navigation" and "Earth observation".

A first group of projects falling under "positioning and navigation", focused more precisely on intrusion detection in a predefined area. These 3 projects aimed to improve the performance of a site-surveillance radar system developed by Collins Aerospace, the PSR500. This system is being deployed on an experimental basis at various sites, both military (military bases) and civilian (nuclear power plants) and aims to detect any unwanted intrusion.

Chronologically, the first study focused on the problem of slowly moving targets, such as a person crawling on the ground. This type of target is, in general, not detected by standard radar systems that only analyse the Doppler effect. The combined use of antenna diversity and longer integration time has improved detection performance for this type of target.

De plus, un premier retour sur expérience du PSR500 a permis d'identifier un fort niveau de fausses alarmes lié à la présence d'animaux sauvages (biches, sangliers, oiseaux) à proximité des radars. Une deuxième étude a donc été lancée visant à réduire ces fausses alertes. La solution proposée est un système de reconnaissance et classification des objets détectés permettant de lever une alerte reliée à certaines catégories de cibles prédéfinies. À partir d'une base de données de signaux réels et d'une analyse fine, quelques paramètres discriminants ont pu être identifiés. Divers algorithmes de classification ont été testés et ont montré la pertinence de l'approche.

Enfin, dans le but de développer un nouveau système de surveillance radar plus grand public que le PSR500 et moins coûteux, Collins Aerospace a mandaté TéSA pour étudier les performances d'un kit de développement radar à 24 GHz de chez Analog Device. Le but de cette étude a été d'évaluer les performances du kit en conditions réelles, d'analyser les possibilités de configuration (forme d'onde, traitement du signal) de manière à adapter un traitement proche de celui du PSR500.

Le deuxième type de projets concerne les radars embarqués à bord des satellites pour des missions d'observation de la terre. Une première étude s'est penchée sur l'analyse de signaux radar altimétriques dont le but est de mesurer la hauteur locale des océans pour en déduire certains phénomènes physiques. En effet, certaines caractéristiques de la forme de la densité spectrale de puissance (DSP) des signaux altimétriques (telles que la pente de la décroissance en fonction de la fréquence) sont informatives pour les physiciens. Le but de cette étude, menée en collaboration avec le CNES, a été

In addition, the first experimental feedback on the PSR500 has made it possible to identify a high proportion of false alarms triggered by wild animals (deer, wild boars, birds) near the radars. A second study was thus undertaken to reduce the number of false alarms. The proposed solution is a system for recognizing and classifying detected objects that triggers alerts according to certain predefined target categories. By combining a database of real signals and a detailed, it was possible to identify some discriminating parameters. Various classification algorithms were tested and confirmed the relevance of the approach.

Finally, in order to develop a new radar surveillance system which is more suitable for general users (consumer market) than the PSR500 and less expensive, Collins Aerospace commissioned TeSA to study the performance of a 24 GHz radar development kit from Analog Device. The purpose of this study was to evaluate the kit's performance under real conditions and to analyse the configuration possibilities (waveform, signal processing) in order to derive processing similar to that of the PSR500.

The second type of project concerned radars carried on satellites for Earth observation missions. A first study analysed altimeter radar signals to measure the local height of the oceans in order to infer certain physical phenomena. Indeed, some characteristics of the power spectral density (PSD) shape of altimeter signals (such as the slope of decrease as a function of frequency) are informative for physicists. The aim of this study, carried out in collaboration with CNES,

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

WHERE ARE THEY NOW?



Après avoir soutenu sa thèse à TéSA en 2013, Florian Cazes est embauché chez Airbus, à Toulouse. Il est désormais en charge des programmes de test des commandes de vol et du pilote automatique pour la famille des avions A330, Beluga XL etc.

After his PhD defence in 2013, Florian Cazes was hired by Airbus, in Toulouse. He is now the head of the flight controls and autopilot testing programs for the A330 family, Beluga XL, etc.

FLORIAN CAZES

d'améliorer l'estimation de ces paramètres caractéristiques par rapport à la technique standard consistant à estimer la DSP par un simple périodogramme. Plusieurs techniques paramétriques ont été élaborées et les performances d'estimation (Bornes de Cramer Rao) ont été étudiées.

Une seconde étude, toujours pour le CNES, s'est focalisée sur l'indexation d'images provenant de sources hétérogènes. En effet, plusieurs sources d'information de natures différentes (radar, multispectral, hyperspectral) sont, en général, disponibles pour analyser et segmenter une scène. Les méthodes d'indexation classiques sont très souvent complexes à mettre en œuvre, du fait de leur flexibilité. Le but de cette étude a été d'étudier une famille de lois - les lois gaussiennes généralisées multivariées - permettant de réduire cette complexité tout en conservant une certaine flexibilité dans la représentativité des objets contenus dans une image.

Enfin la thèse de Fábio Manzoni Vieira, financée par Thales Alenia Space et Thales Brazil de São Bernardo do Campo au Brésil, s'est intéressée à la fusion de données radar et de données issues de l'*Automatic Identification System* (AIS) par satellite pour une surveillance maritime plus performante,

was to improve the estimation of these characteristic parameters compared to the standard technique of estimating the PSD by a simple periodogram. Several parametric techniques have been developed and estimation performances (Cramer Rao bounds) have been studied.

A second study, again for CNES, focused on the indexing of images from heterogeneous sources. Indeed, several different sources of information (radar, multispectral, hyperspectral) are generally available for analysing and segmenting a scene. The implementation of traditional indexing methods is often a very complex process, due to their flexibility. The aim of this study was to study a family of distribution functions - the multivariate generalized Gaussian distributions - that would reduce this complexity while maintaining a certain flexibility in the representativeness of the objects contained in an image.

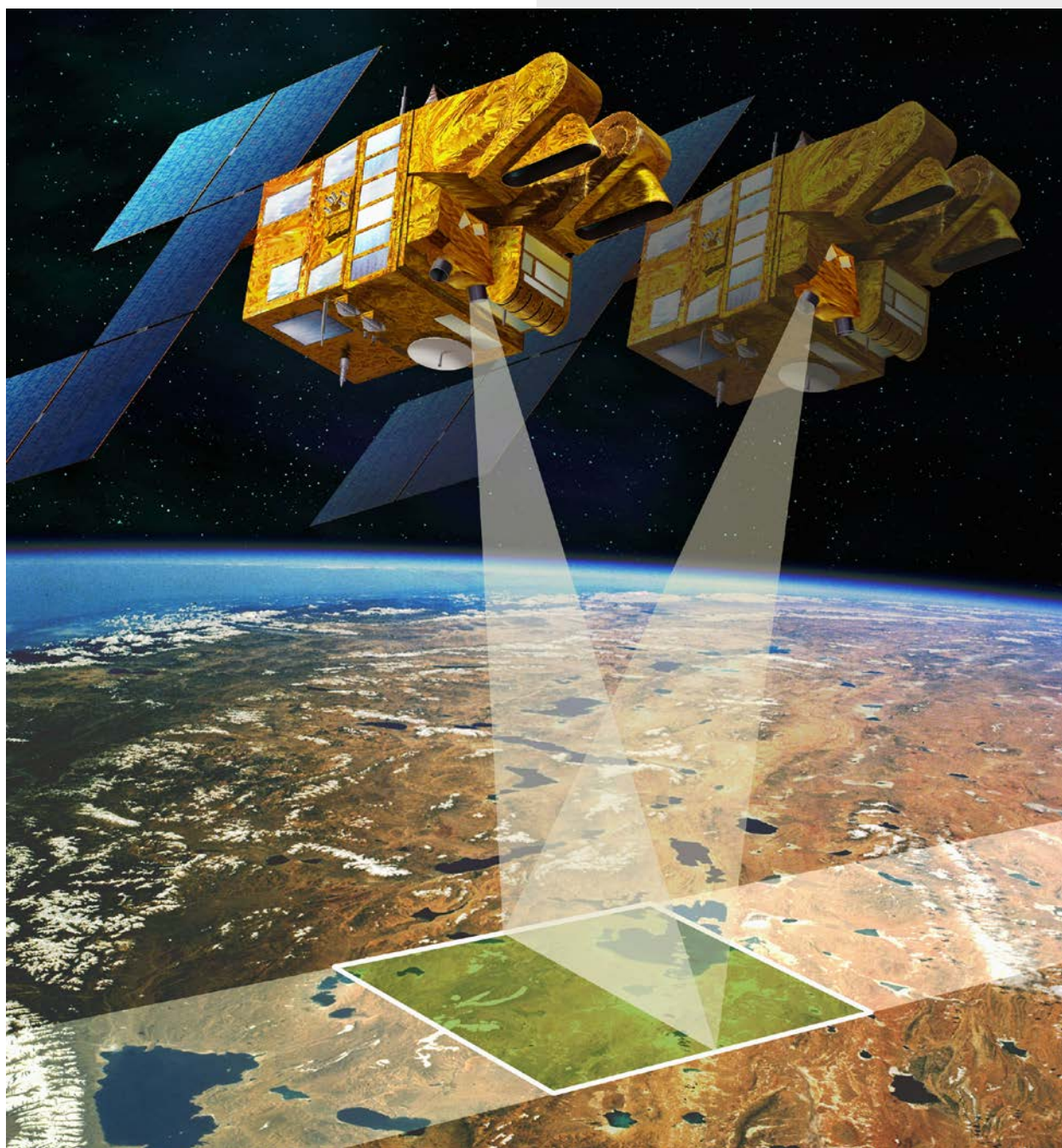
Finally, the thesis of Fábio Manzoni Vieira, funded by Thales Alenia Space and Thales Brazil of São Bernardo do Campo, Brazil, investigated the fusion of radar and Automatic Identification System (AIS) satellite data for more efficient maritime



Journée scientifique de TéSA, en juin 2017.
Scientific Day of TeSA, June 2017.

permettant de prendre en compte les avantages des deux systèmes et de pallier leurs inconvénients respectifs. En effet, l'information AIS n'est pas toujours disponible dans tous les océans et mers et parfois cachée intentionnellement. Quant aux radars satellitaires, ces systèmes ne sont pas dédiés à la surveillance maritime et leur qualité dépend de divers paramètres d'état de la mer. Dès lors, en plus des cas classiques de détection par les deux systèmes, on peut identifier les cas où seul l'un des systèmes détecte un objet, ce qui peut se formaliser par deux tests d'hypothèses binaires successifs. Ce processus permet d'une part de fusionner de manière naturelle les informations AIS et radar, mais permet également d'améliorer la performance en détection du radar.

surveillance, for taking into account the advantages of the two systems and compensating for their respective disadvantages. Indeed, AIS information is not always available in all oceans and seas and is sometimes intentionally hidden. As for satellite radars, these systems are not dedicated to maritime surveillance and their quality depends on various sea state parameters. Therefore, in addition to the traditional cases of detection by both systems, we can identify cases where only one of the systems detects an object, which can be formalised by two successive binary hypothesis tests. This process allows, on the one hand, the fusion of AIS and radar information in a normal way, but also the improvement of radar detection performance.



LOCALISATION ET NAVIGATION

Les activités de TéSA concernent également le développement de méthodes de traitement du signal avancées pour la localisation et la navigation à l'aide des signaux issus du système de positionnement par satellites (*Global Navigation Satellite System - GNSS*).

Une première étude pour le CNES a eu comme objectif l'évaluation des déformations nominales des signaux GNSS et leur impact sur l'estimation d'une solution en termes de position, vitesse, temps (PVT). Ces déformations nominales sont présentes constamment sur tous les signaux transmis par les satellites GNSS. Il est donc nécessaire de considérer l'existence des erreurs induites par ces déformations dans les systèmes différentiels pour des applications particulières. Ce projet a étudié les biais nominaux affectant les signaux GNSS et leur impact dans le positionnement précis pour l'Aviation Civile, domaine d'application où l'intégrité des mesures est un critère prépondérant. Un modèle de biais nominaux affectant les pseudo-distances estimées à partir de signaux GPS L1 C/A a été proposé, et une comparaison des performances des méthodes de positionnement précis sur signaux simulés a été réalisée.

Une deuxième étude, avec la PME toulousaine M3 SYSTEMS et dans le cadre d'une R&T CNES, a porté sur la caractérisation des techniques de la résolution de l'ambiguïté pour signaux Galileo, ce qui est un point clé des méthodes de positionnement précis. Une méthode de détection des sauts de cycles (variations brutales de la mesure de pseudo-distance de phase) a été proposée, ce qui permet de maintenir les ambiguïtés constantes tant que l'algorithme ne détecte pas de saut sur la mesure de phase, et de recalculer les ambiguïtés seulement si un saut est détecté. Le fonctionnement a été validé sur données simulées. Cette étude a été complétée par une étude autofinancée par TéSA, pour rechercher de nouveaux algorithmes de détection de sauts de cycle ; ce qui a permis d'améliorer les performances obtenues dans la phase précédente et de publier les résultats à la conférence ION [C.2018.2].

En GNSS, l'un des verrous qui restent encore à lever est le problème des multitrajets auquel TéSA s'est intéressé autour de plusieurs études.

Tout d'abord, la thèse de Nabil Kbayer, financée par le CNES, s'est intéressée à l'amélioration de la précision de positionnement en milieu urbain où deux perturbations majeures apparaissent, à savoir l'absence de certains trajets directs et/ou la présence de multitrajets. La présence de l'une ou de ces deux perturbations génère un biais dans la mesure de certaines pseudo-distances (produites par des filtres adaptés retard/vitesse) qui induit

POSITIONING AND NAVIGATION

TeSA's activities also include the development of advanced signal processing methods for location and navigation using signals from the Global Navigation Satellite System (GNSS).

A first study for CNES aimed at evaluating the nominal distortions of GNSS signals and their impact on the estimation of a Position, Velocity, Time (PVT) solution. These nominal distortions are always found in signals transmitted by GNSS satellites. It is therefore necessary to consider the existence of errors induced by these distortions in differential systems for particular applications. This project studied the nominal biases affecting GNSS signals and their impact on precise positioning for Civil Aviation, a field of application where measurement integrity is a key criterion. A model of nominal biases affecting pseudoranges estimated from L1 C/A GPS signals was proposed, and the performance of accurate positioning methods on simulated signals was compared.

A second study, with the Toulouse-based SME M3 Systems, as part of a CNES Research and Technology (R&T) project, focused on the characterisation of ambiguity resolution techniques for Galileo signals, which is a key point in precise positioning methods. A method for detecting cycle slips (jumps in the carrier phase measurements) was proposed; it enables keeping ambiguities constant as long as the algorithm does not detect a jump in the carrier phase measurement, and recalculating ambiguities only if a cycle slip is detected. The operation was validated on simulated data. This study was completed by a study financed by TeSA itself, to search for new algorithms for detecting cycle slips; this made it possible to improve the performances obtained in the previous phase and to publish the results at the ION conference [C.2018.2].

In GNSS, one of the obstacles that still needs to be overcome is the multipath problem which TeSA has been investigating through several studies.

First of all, the thesis of Nabil Kbayer, funded by the CNES, focused on improving positioning accuracy in urban areas where two major perturbations occur, namely the lack of certain direct paths and/or the presence of multipaths. The presence of one or both of these perturbations generates a bias in the measurement of certain pseudoranges (produced by adapted delay/velocity filters) which induces a bias on the position measurement, a bias whose value can make location/navigation with GNSS systems alone unreliable. This study sought to characterise the potential for reducing bias by

un biais sur la mesure de la position, biais dont la valeur peut rendre inopérante une localisation/navigation avec systèmes GNSS seuls. Cette étude a cherché à caractériser les possibilités de réduction du biais accessible par l'exploitation d'un modèle 3D (électromagnétique) de l'environnement urbain en intégrant une prédiction du biais dans l'établissement de la mesure de position. Elle a permis de montrer que l'efficacité de ce type de méthode (incluant le « shadow matching ») est très fortement dépendante de la qualité du modèle 3D, et que les outils actuellement disponibles n'ont pas encore la qualité requise pour pouvoir améliorer de façon significative (et intégrer) les performances.

Dans la même thématique, une autre étude CNES a concerné le traitement des signaux GNSS à l'aide de la transformée en ondelettes avec pour objectif l'estimation des trajets multiples et l'amélioration de la localisation. Les techniques classiques d'estimation des multitrajets reposent sur la corrélation d'un motif de référence avec le signal (filtre adapté retard/vitesse). Par rapport à ces méthodes, les décompositions sur paquets d'ondelettes non décimées ont donné des résultats très prometteurs. Le caractère innovant de la démarche repose sur le choix du type de décomposition, de la base de projection, de la méthode d'estimation, de l'apparition du trajet direct (*Line of Sight* – LOS) mais aussi sur l'exploration des informations dans les autres sous-bandes. Une suite est d'ores et déjà actée.

Enfin, toujours dans le contexte de trajets multiples et pour le CNES en collaboration avec la PME SILICOM, une préétude a évalué l'intérêt de l'application de la méthode du cepstre aux signaux GNSS afin d'identifier et d'atténuer les

means of a 3D (electromagnetic) model of the urban environment by integrating a bias prediction when producing the position measurement. It has shown that the effectiveness of this type of method (including 'shadow matching') depends greatly on the quality of the 3D model, and that the tools currently available are not yet effective enough to significantly and reliably improve performance.

In the same field of research, another study by TeSA for CNES concerned the processing of GNSS signals using wavelet transforms with the objective of estimating multiple paths and improving location performance. Traditional multipath estimation techniques are based on the correlation of a reference pattern with the signal (adapted delay/velocity filter). Compared to these methods, decompositions on undecimated wavelet packets have given very promising results. The innovative nature of the approach is due to the choice of the type of decomposition, the projection basis, the estimation method, the presence of the Line of Sight (LOS) signal, but also on the exploration of information in the other sub-bands. A follow-up project has already been decided upon.

Finally, again in the context of multiple paths and for CNES in collaboration with the SME SILICOM, a preliminary study assessed the interest of applying the cepstrum method to GNSS signals in order to identify and mitigate multiple paths. SILICOM made a prototype, under the scientific and technical supervision of TeSA.

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

WHERE ARE THEY NOW?



Après avoir soutenu sa thèse à TéSA en 2013, Aude Bourdeau a d'abord été responsable R&D, chez Greentropism, à Toulouse, en charge des modèles de prédiction pour la spectroscopie proche infra-rouge. Puis, à partir de 2017, elle est responsable du développement et du maintien du simulateur de MicroCarb au CNES, pour ALTEN. Depuis 2019, elle est en support au développement de PDAP JASON-CS (Sentinel 6) à CLS, toujours pour Alten.

After her PhD defence in 2013, Aude Bourdeau was first R&D leader in Greentropism, in Toulouse, responsible for prediction models for near infra-red spectroscopy. Then, as of 2017, she is responsible for the development and support of the CNES MicroCarb simulator, for ALTEN. Since 2019, she works in support of the development of PDAP JASON-CS (Sentinel 6) at CLS, still for Alten.

AUDE BOURDEAU

multitrajets. La réalisation d'un prototype a été faite par SILICOM, sous la direction scientifique et technique de TéSA.

Cette collaboration avec SILICOM dans le cadre de la localisation/navigation n'est pas la seule : TéSA a contribué, en partenariat avec SILICOM, à l'analyse de *Navys Next Generation*, un simulateur de signal GNSS en bande RF destiné à fournir un service équivalent aux appareils *Spirent*, mais dans une version beaucoup plus ouverte. La contribution de TéSA a porté sur la définition du plan de tests et l'analyse statistique des résultats.

Outre la navigation exploitant les satellites GNSS, TéSA a également exploré la faisabilité d'une idée de brevet déposée par le CNES visant à déterminer la distance et le dénivelé parcourus par un piéton. Ces informations sont déterminées par l'exploitation d'un modèle de marche liant la vitesse à la pente subie par un piéton, alimenté par les données d'accélération linéaires et de vitesses angulaires provenant d'une centrale inertielle bas coût, ainsi que la pression et la température provenant d'un baromètre/thermomètre bas coût. Une étude théorique sur la formulation des équations utilisées dans l'hybridation ainsi qu'un prototype ont été réalisés, et complétés par des campagnes de mesure validant le fonctionnement du prototype.

ACTIVITÉS CONNEXES

Certaines activités permettent d'utiliser l'expertise de TéSA dans des domaines connexes, en répondant à des sollicitations ponctuelles relatives à des problématiques influant sur les performances globales de systèmes de mesures à base de traitement du signal ou de l'image.

Par exemple, TéSA, en collaboration avec COBHAM et l'ONERA, a été chargé par le CNES de contribuer à la caractérisation de l'effet *multipactor*, c'est-à-dire le phénomène de génération de produits d'intermodulation passifs par les dispositifs microondes ferromagnétiques (circulateurs et isolateurs), employés notamment en télécommunications. Il s'agissait de comprendre et de modéliser les effets des fortes puissances dans les dispositifs ferromagnétiques afin de s'en affranchir si possible et sinon de spécifier au plus juste la puissance maximale que ces dispositifs peuvent supporter sans risques de distorsion du signal ou de dégradation de l'équipement.

Toujours dans le domaine des télécommunications, plus particulièrement par satellite, ACTIA a demandé un support d'expertise à l'IRT Saint Exupéry (membre partenaire de TéSA) sur l'étude des méthodes de compensation des distorsions de canal linéaires et non linéaires ainsi qu'au traitement des interférences canal. En effet,

This is not the only collaboration with SILICOM within the field of positioning and navigation: TeSA contributed, in partnership with SILICOM, to the analysis of *Navys Next Generation*, an RF-band Global Navigation Satellite System (GNSS) signal simulator designed to provide an equivalent service to *Spirent* devices, but in a much more open version. TeSA's contribution concerned the definition of the test plan and the statistical analysis of the results.

In addition to navigation using GNSS satellites, TeSA also explored the feasibility of an idea for which CNES had filed a patent for determining the distance and difference in elevation covered by a pedestrian. This information is determined by using a walking model linking the speed to the slope encountered by a pedestrian, fed by linear acceleration and angular velocity data from a low-cost inertial unit, as well as pressure and temperature data respectively from a low-cost barometer or thermometer. A theoretical study was carried out on the formulation of the equations used in hybridisation and a prototype was made; this was completed by measurement campaigns that validated the functioning of the prototype.

RELATED ACTIVITIES

Some activities enable TeSA to apply its expertise in related fields, by responding to specific requests concerning issues affecting the overall performance of measurement systems based on signal or image processing.

For example, TeSA, in collaboration with COBHAM and ONERA, was commissioned by CNES to contribute to the characterisation of the multipactor effect, i.e. the generation of passive intermodulation products by ferromagnetic microwave devices (circulators and insulators), used in telecommunications in particular. The aim was to understand and model the effects of high power in ferromagnetic devices in order to overcome them if possible and otherwise specify as precisely as possible the maximum power that these devices can bear without risk of signal distortion or equipment degradation.

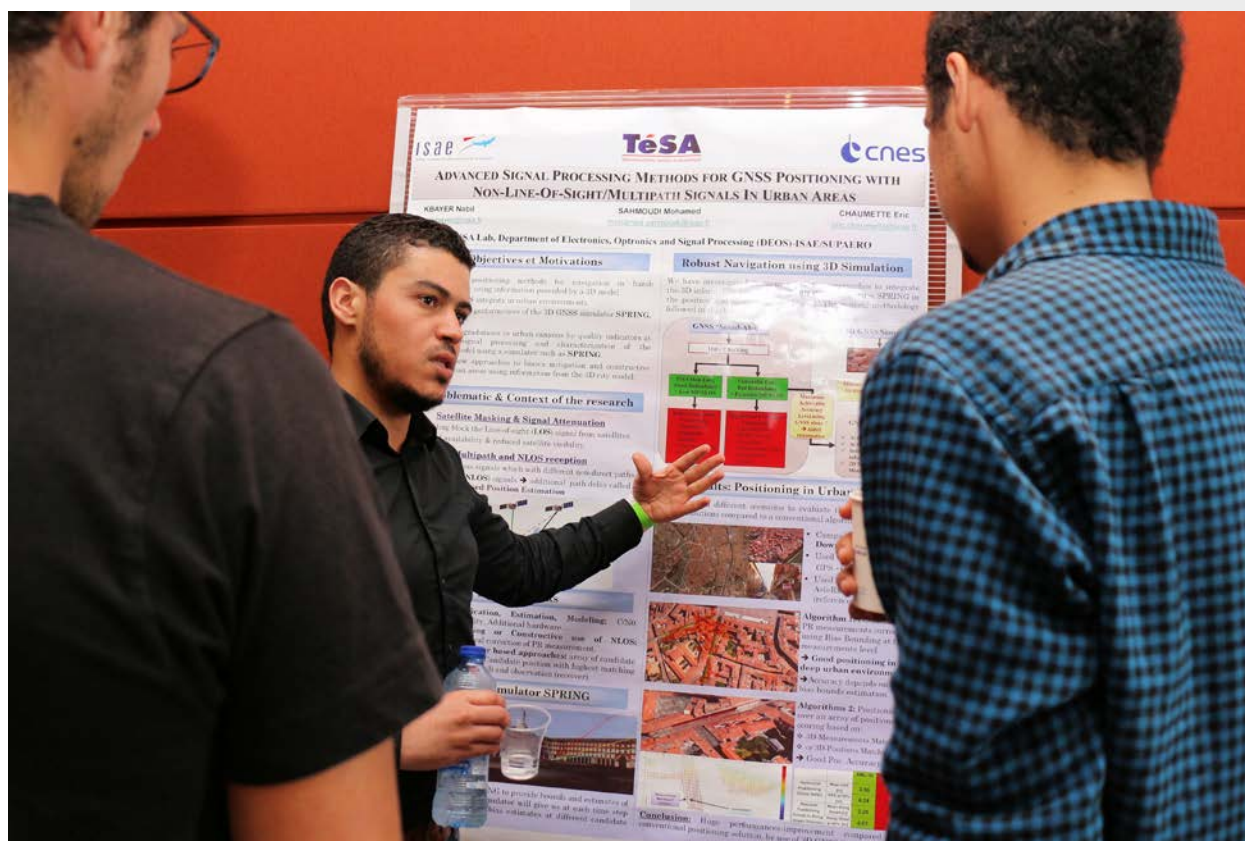
Again in the field of telecommunications, more particularly via satellite, ACTIA requested expert support from the IRT Saint Exupéry (a partner member of TeSA) for investigating methods for compensating linear and non-linear channel distortions as well as the processing of channel interference. Indeed, ACTIA wants to replace analogue linearizers with broadband digital linearizers that are easier to adjust for each amplifier. The IRT Saint-Exupéry then asked TeSA to help define and optimise non-linear models

ACTIA veut remplacer les linéariseurs analogiques par des linéariseurs large bande en technologie numérique afin qu'ils soient plus faciles à régler pour chaque amplificateur. L'IRT Saint-Exupéry a alors sollicité TéSA pour participer à la définition et l'optimisation de modèles de non-linéarités à mémoire, adaptés à la modélisation des linéariseurs large bande en technologie numérique, ainsi que la définition d'un banc de mesure adapté.

Enfin, dans le cadre de ses activités de recherche autofinancées, TéSA s'est intéressé à l'échantillonnage non uniforme dans le cas des fonctions déterministes ou des processus aléatoires. De nouvelles méthodes, applicables aux signaux de télécommunications, ont été étudiées permettant d'effectuer une reconstruction exacte du signal avec une meilleure vitesse de convergence en termes de nombre d'échantillons et un filtrage linéaire directement à partir des échantillons non uniformes. Les résultats de cette étude ont été publiés dans [J.2018.1].

with memory, suitable for modelling broadband linearizers with digital technology, as well as a suitable measurement bench.

Finally, as part of its self-funded research activities, TeSA investigated non-uniform sampling for deterministic functions or random processes. New methods, applicable to telecommunications signals, were studied to accurately reconstruct the signal with a better convergence rate in terms of number of samples and linear filtering directly from non-uniform samples. Results of this study have been published in [J.2018.1].



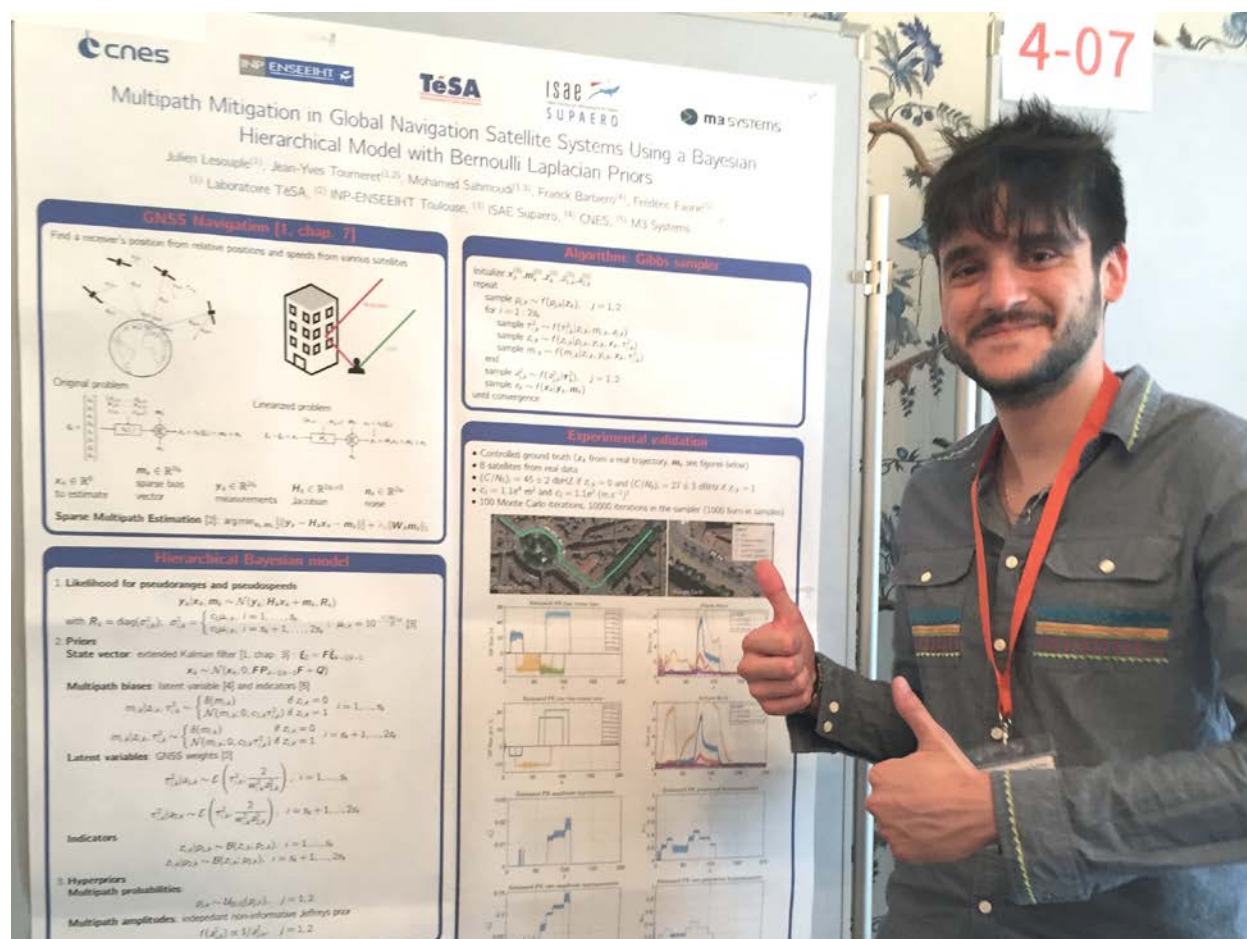
Nabil Kbayer présente sa thèse à la journée scientifique de TéSA, juin 2017.
Nabil Kbayer presenting his thesis at the TeSA scientific day, June 2017.

Liste des thèses soutenues

List of defended theses

Manzoni Vieira Fábio, *Fusion de données AIS et Radar pour la surveillance maritime*, thèse financée par TAS, soutenue le 30/11/2017 - *Fusion of AIS and Radar Data for Maritime Surveillance*, thesis sponsored by TAS, defended on 30/11/2017. Embauché par TAS.

Kbayer Nabil, *Méthodes avancées de traitement du signal pour le positionnement GNSS en cas de multitrajets*, thèse financée par le CNES, soutenue le 09/10/2018 - *Advanced Signal Processing Methods for GNSS Positioning with NLOS/Multipath Signals*, thesis sponsored by CNES, defended on 09/10/2018. Embauché par Continental.



Julien Lesouple présentant son article à la conférence SSP, juin 2018.

Julien Lesouple presenting his paper at the SSP conference, June 2018.

Liste des projets

CNES

Support à l'utilisation du simulateur de constellation NAVYS NG,
type d'étude : étude métier CNES,
domaine d'application : localisation et navigation, avec SILICOM.

Multipactor et PIM sur dispositifs passifs,
type d'étude : R&T CNES,
domaine d'application : télécommunications spatiales et aéronautiques, avec COBHAM.

Déformation des signaux GNSS dans un modèle performance utilisateur,
type d'étude : étude métier CNES,
domaine d'application : localisation et navigation.

Techniques de levée d'ambiguïté de phase, robustes multifréquences,
type d'étude : étude métier CNES,
Domaine d'application : localisation et navigation.

Débruitage d'images hyperspectrales,
type d'étude : R&T CNES,
domaine d'application : observation de la Terre.

Revisite des méthodes d'analyse spectrale pour les signaux altimétriques,
type d'étude : étude métier CNES,
domaine d'application : observation de la Terre.

Lois gaussiennes généralisées multivariées pour l'indexation d'images,
type d'étude : R&T CNES,
domaine d'application : observation de la Terre.

Traitement du signal GNSS par ondelettes,
type d'étude : R&T CNES,
domaine d'application : localisation et navigation, avec M3 SYSTEMS.

Concept du brevet B1706,
type d'étude : étude métier CNES,
domaine d'application : localisation et navigation.

Le cepstre en navigation,
type d'étude : étude métier CNES,
domaine d'application : localisation et navigation, avec SILICOM.

COLLINS AEROSPACE

Étude radar PSR-500,
type d'étude : recherche appliquée,
domaine d'application : localisation et navigation.

Classification de cibles sur PSR-500,
type d'étude : recherche appliquée,
domaine d'application : localisation et navigation.

List of projects

CNES

Support for the use of constellation simulator NAVYS NG,
type of study: specific study,
application field: positioning and navigation, with SILICOM.

Multipactor and PIM on passive systems,
type of study: CNES R&T,
application field: space and aeronautical telecommunications, with COBHAM.

GNSS warping for user performance,
type of study: specific study,
application field: positioning and navigation.

Phase ambiguity resolution solutions robust for multifrequency context,
type of study: specific study,
application field: positioning and navigation.

Hyperspectral image denoising,
type of study: CNES R&T,
application field: Earth observation.

Spectral analysis methods for altimetric signals,
type of study: specific study,
application field: Earth observation.

Multivariate generalized Gaussian for image indexation,
type of study: CNES R&T,
application field: Earth observation.

GNSS signal processing using wavelets,
type of study: CNES R&T,
application field: positioning and navigation, with M3 SYSTEMS.

Patent B1706 study,
type of study: specific study,
application field: positioning and navigation.

Using cepstrum concept in navigation,
type of study: specific study,
application field: positioning and navigation, with SILICOM.

COLLINS AEROSPACE

PSR-500 radar study,
type of study: applied research,
application field: positioning and navigation.

Target classification for PSR-500,
type of study: applied research,
application field: positioning and navigation.

IRT

Expertise non-linéarités du canal satellite,
type d'étude : expertise,
domaine d'application : télécommunications
spatiales et aéronautiques.

ÉTUDES AUTOFINANCÉES TESA

Échantillonnage non uniforme,
type d'étude : recherche appliquée,
domaine d'application : télécommunications
spatiales et aéronautiques.

Détection des sauts de cycle,
type d'étude : recherche appliquée,
domaine d'application : localisation et navigation.

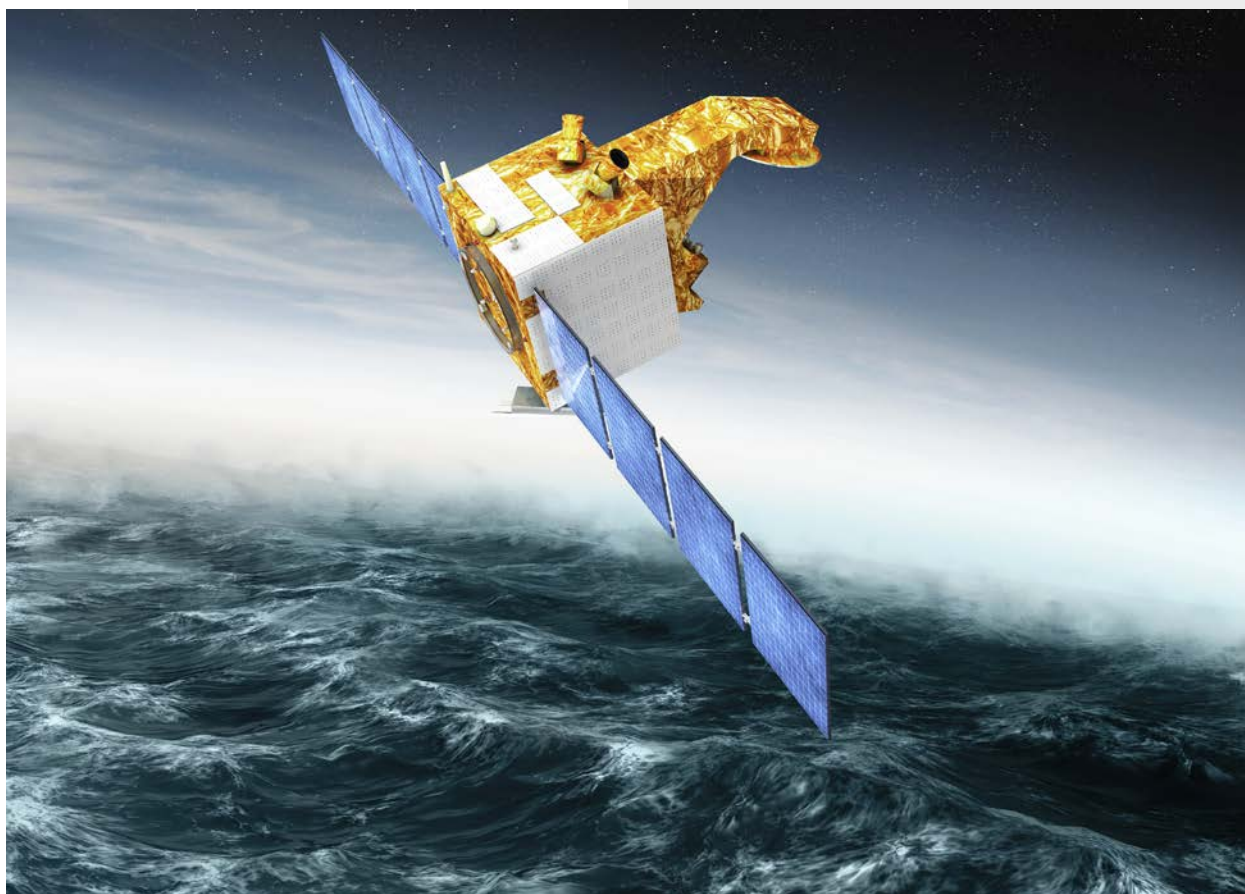
IRT

Expertise on non-linearities in satellite channels,
type of study: expertise,
application field: space and aeronautical
telecommunications.

SELF-FINANCED TESA STUDIES

Non-uniform sampling,
type of study: applied research,
application field: space and aeronautical
telecommunications.

Cycle slip detection,
type of study: applied research,
application field: positioning and navigation.



Liste des publications et brevets Publication and patent list

ANNÉE 2018 – YEAR 2018

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

- [J.2018.1] Bonacci David and Lacaze Bernard, *New CO₂ Concentration Predictions and Spectral Estimation Applied to the Vostok Ice Core*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 56, issue 1, pp. 145-151, January, 2018.
- [J.2018.2] Imbiriba Tales, Bermudez José, Tournet Jean-Yves and Bershad Neil, *A New Decision-Theory-Based Framework for Echo Canceler Control*, IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 66, issue 16, pp. 4304-4314, August 2018.
- [J.2018.3] Wendt Herwig, Combrexelles Sébastien, Altmann Yoann, Tournet Jean-Yves, Mclaughlin Stephen and Abry Patrice, *Multifractal Analysis of Multivariate Images using Gamma Markov Random Field Priors*, SIAM Journal on Imaging Sciences, vol. 11, issue 2, pp. 1294-1316, 2018.
- [J.2018.4] Kbayer Nabil and Sahmoudi Mohamed, *Performances Analysis of GNSS NLOS Bias Correction in Urban Environment Using a 3D City Model and GNSS Simulator*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, PP(99):1-1, 2016.
- [J.2018.5] Thouvenin Pierre-Antoine, Dobigeon Nicolas and Tournet Jean-Yves, *A Hierarchical Bayesian Model Accounting for Endmember Variability and Abrupt Spectral Changes to Unmix Multitemporal Hyperspectral Images*, IEEE Transactions on Computational Imaging, vol. 4, issue 1, pp. 32-45, January 2018.
- [J.2018.6] Ouzir Nora, Basarab Adrian, Liebgott Hervé, Harbaoui Brahim and Tournet Jean-Yves, *Motion Estimation in Echocardiography Using Sparse Representation and Dictionary Learning*, IEEE Transactions on Image Processing, vol. 27, issue 1, pp. 64-77, January 2018.
- [J.2018.7] Martin Nadine and Mailhes Corinne, *Automatic Data-Driven Spectral Analysis Based on a Multi-Estimator Approach*, Elsevier, Signal Processing, vol. 146, pp. 112-125, January, 2018.

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

- [C.2018.1] Ouzir Nora, Chiril Patricia, Basarab Adrian and Tournet Jean-Yves, *Cardiac Motion Estimation with Dictionary Learning and Robust Sparse Coding in Ultrasound Imaging*, In Proc. IEEE International Ultrasonics Symposium, Kobe, Japan, October 22-25, 2018.
- [C.2018.2] Paimblanc Philippe, Jardak Nabil, Bouilhac Margaux, Junique Thomas and Robert Thierry, *Cycle Slip Detection in Galileo Widelane Signals Tracking*, In Proc. 31st International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+), Miami, Florida, USA, September 24 - 28, 2018.
- [C.2018.3] Lesouple Julien, Barbiero Franck, Faurie Frédéric, Sahmoudi Mohamed and Tournet Jean-Yves, *Robust Covariance Matrix Estimation and Sparse Bias Estimation for Multipath Mitigation*, In Proc. ION GNSS+, Miami, Florida, USA, September 24-28, 2018.
- [C.2018.4] Laval Xavier, Martin Nadine, Bellemain Pascal, Li Zhong-Yang, Mailhes Corinne and Pachaud Christian, *Vibration response demodulation, shock model and time tracking*, CM2018 and MFPT2018, Nottingham, U.K.
- [C.2018.5] Urbano Simone, Chaumette Eric, Goupil Philippe and Tournet Jean-Yves, *Aircraft Vibration Detection and Diagnosis for Predictive Maintenance using a GLR Test*, In Proc. IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS), Warshaw, Poland, August 29-31, 2018.
- [C.2018.6] Lesouple Julien, Barbiero Franck, Faurie Frédéric, Sahmoudi Mohamed and Tournet Jean-Yves, *Smooth Bias Estimation for Multipath Mitigation Using Sparse Estimation*, In Proc. 21st International Conference on Information Fusion (FUSION), Cambridge, England, July 10-13, 2018.
- [C.2018.7] Lesouple Julien, Tournet Jean-Yves, Sahmoudi Mohamed, Barbiero Franck and Faurie Frédéric, *Multipath Mitigation in Global Navigation Satellite Systems using a Bayesian Hierarchical Model with Bernoulli Laplacian Priors*, In Proc. IEEE Workshop on Statistical Signal Processing (SSP), Freiburg Im Breisgau, Germany, June 10-13, 2018.

[C.2018.8] Urbano Simone, Chaumette Eric, Goupil Philippe and Tournet Jean-Yves, *On the High-Snr Receiver Operating Characteristic of Glt for The Conditional Signal Model*, In Proc. IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing (ICASSP), Calgary, Canada, April 15-20, 2018.

[C.2018.9] Hourani Mohamad, Basarab Adrian, Kouamé Denis, Girault Jean-Marc and Tournet Jean-Yves, *Restoration of Ultrasonic Images using Non-linear System Identification and Deconvolution*, In Proc. IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI), Washington DC, USA, April 4-7, 2018.

ANNÉE 2017 – YEAR 2017

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

[J.2017.1] Halimi Abdelghafour, Batatia Hadj, Le Digabel Jimmy, Josse Gwendal and Tournet Jean-Yves, *Wavelet-based Statistical Classification of Skin Images Acquired with Reflectance Confocal Microscopy*, Biomedical Optics Express, vol. 8, issue 12, pp. 5450-5467, December, 2017.

[J.2017.2] Wei Qi, Chen Marcus, Tournet Jean-Yves and Godsill Simon, *Unsupervised Nonlinear Spectral Unmixing Based on a Multilinear Mixing Model*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 55, issue 8, pp. 4534-4544, August, 2017.

[J.2017.3] Urbano Simone, Chaumette Eric, Goupil Philippe and Tournet Jean-Yves, *A Data-Driven Approach For Actuator Servo Loop Failure Detection*, IFAC-PapersOnLine, vol. 50, Issue 1, pp. 13544-13549, July, 2017.

[J.2017.4] Albughdadi Mohamad Y.S., Chaari Lotfi, Tournet Jean-Yves, Forbes Florence and Ciuciu Philippe, *A Bayesian Non-Parametric Hidden Markov Random Model for Hemodynamic Brain Parcellation*, Signal Processing EURASIP, vol. 135, pp. 132-146, June, 2017.

[J.2017.5] Bonacci David, Vincent François and Gignoux Benjamin, *Robust DoA Estimation in Case of Multipath Environment for a Sense and Avoid Airborne Radar*, IET Radar, Sonar & Navigation, vol. 11, issue 5, pp. 797-801, May, 2017.

[J.2017.6] Costa Facundo, Batatia Hadj, Oberlin Thomas and Tournet Jean-Yves, *Skull Conductivity Estimation for EEG Source Localization*, IEEE Signal Processing Letters, vol. 24, issue 4, pp. 422-426, April, 2017.

[J.2017.7] Kbayer Nabil, Galy Jérôme, Chaumette Eric, Vincent François, Renaux Alexandre and Larzabal Pascal, *On Lower Bounds for Nonstandard Deterministic Estimation*, IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 65, n° 6, pp. 1538-1553, March, 2017.

[J.2017.8] Chen Peng, Nelson James and Tournet Jean-Yves, *Towards a Sparse Bayesian Markov Random Field Approach to Hyperspectral Unmixing and Classification*, IEEE Transactions on Image Processing, vol. 26, issue 1, pp. 426-438, January, 2017.

[J.2017.9] Costa Facundo, Batatia Hadj, Oberlin Thomas, D'Giano Carlos and Tournet Jean-Yves, *Bayesian EEG Source Localization Using a Structured Sparsity Prior*, NeuroImage, Elsevier, vol. 144, Part. A, pp. 142-152, January, 2017.

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

[C.2017.1] Urbano Simone, Goupil Philippe and Chaumette Eric, *Early and Robust Detection of Oscillatory Failure Cases (OFC) in the Flight Control System : A Data Driven Technique*, In Proc. 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Grapevine, Texas, USA, January 9-13, 2017.

[C.2017.2] Ouzir Nora, Basarab Adrian and Tournet Jean-Yves, *Optical Flow Estimation in Ultrasound Images Using a Sparse Representation*, In Proc. IEEE 7th International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP), Curaçao, Dutch Antilles, December 10-13, 2017.

[C.2017.3] Vargas Edwin, Arguello Henry and Tournet Jean-Yves, *Spectral Image Fusion from Compressive Measurements Using Spectral Unmixing*, In Proc. IEEE 7th International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP), Curaçao, Dutch Antilles, December 10-13, 2017.

[C.2017.4] Halimi Abdelghafour, Batatia Hadj, Le Digabel Jimmy, Josse Gwendal and Tournet Jean-Yves, *Statistical Modeling and Classification of Reflectance Confocal Microscopy Images*, In Proc. IEEE 7th International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP), Curaçao, Dutch Antilles, December 10-13, 2017.

- [C.2017.5] Wei Qi, Chouzenoux Emilie, Pesquet Jean-Christophe and Tournet Jean-Yves, *A Fast Algorithm Based on a Sylvester-like Equation for LS Regression with GMRF Prior*, In Proc. IEEE 7th International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP), Curaçao, Dutch Antilles, December 10-13, 2017.
- [C.2017.6] Kbayer Nabil, Sahmoudi Mohamed, Ortega Gonzàlez Héctor and Rouch Cédric, *Position Matching Estimation for GNSS Positioning in Multipath/Non-Line-Of-Sight Environments*, In Proc. International Technical Symposium on Navigation Timing (ITSNT), Toulouse, France, November, 2017.
- [C.2017.7] Mailhes Corinne, Bonacci David, Guillot Amandine, Le Gac Sophie, Steunou Nathalie, Cheymol Cécile, Picot Nicolas and Dibarboure Gérald, *A Promising Parametric Spectral Analysis Method Applied to Sea Level Anomaly Signals*, In Proc. Ocean Surface Topography Science Team Meeting (OSTST), Miami, USA, Oct. 23 - 27, 2017.
- [C.2017.8] Kbayer Nabil, Sahmoudi Mohamed, Ortega Gonzàlez Héctor and Rouch Cédric, *Approximate Maximum Likelihood Estimation Using a 3D GNSS Simulator for Positioning in MP/NLOS Conditions*, In Proc. Institute of Navigation Global Navigation Satellite Systems (ION GNSS), Portland, USA, September 25-29, 2017.
- [C.2017.9] Espita Oscar, Arguello Henry and Tournet Jean-Yves, *High-Resolution Spectral Image Reconstruction based on Compressed Data Fusion*, In Proc. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Beijing, China, September 17-20, 2017.
- [C.2017.10] Ouzir Nora, Basarab Adrian and Tournet Jean-Yves, *Cardiac Motion Estimation in Ultrasound Images using Spatial and Sparse Regularizations*, In Proc. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Beijing, China, September 17-20, 2017.
- [C.2017.11] Bonacci David and Lacaze Bernard, *Un algorithme de reconstruction dans le cas d'un échantillonnage non ponctuel, périodique ou non*, In Proc. Groupement de Recherche en Traitement du Signal et des Images (GRETSI), Juan-Les-Pins, France, September 5-8, 2017.
- [C.2017.12] Ouzir Nora, Lairez Olivier, Basarab Adrian and Tournet Jean-Yves, *Tissue Motion Estimation using Dictionary Learning : Application to Cardiac Amyloidosis*, In Proc. IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Washington, September 6-9, 2017.
- [C.2017.13] Thouvenin Pierre-Antoine, Dobigeon Nicolas and Tournet Jean-Yves, *Une approche distribuée asynchrone pour la factorisation en matrices non-négatives - Application au démelange hyperspectral*, In Proc. 26eme Colloque sur le Traitement du Signal et des Images (GRETSI), Juan-les-Pins, France, September 5-8, 2017.
- [C.2017.14] Chaari Lotfi, Batatia Hadj and Tournet Jean-Yves, *A General Non-Smooth Hamiltonian Monte Carlo Scheme Using Bayesian Proximity Operator Calculation*, In Proc. European Signal and Image Processing Conference (EUSIPCO), Kos Islands, Greece, August 28-September 2, 2017.
- [C.2017.15] Cheng Cheng, Zhou J. and Tournet Jean-Yves, *Kernel Density-Based Particle Filter Algorithm for State and Time-Varying Parameter Estimation in Nonlinear State-Space Model*, In Proc. European Signal and Image Processing Conference (EUSIPCO), Kos Islands, Greece, August 28-September 2, 2017.
- [C.2017.16] Thouvenin Pierre-Antoine, Dobigeon Nicolas and Tournet Jean-Yves, *Unmixing multitemporal hyperspectral images accounting for smooth and abrupt variations*, In Proc. European Signal and Image Processing Conference (EUSIPCO), Kos Islands, Greece, August 28-September 2, 2017.
- [C.2017.17] Halimi Abdelghafour, Batatia Hadj, Le Digabel Jimmy, Josse Gwendal and Tournet Jean-Yves, *An Unsupervised Bayesian Approach for the Joint Reconstruction and Classification of Cutaneous Reflectance Confocal Microscopy Images*, In Proc. European Signal and Image Processing Conference (EUSIPCO), Kos Islands, Greece, August 28-September 2, 2017.
- [C.2017.18] Albughdadi Mohanad Y.S., Kouamé Denis, Rieu Guillaume and Tournet Jean-Yves, *Missing Data Reconstruction and Anomaly Detection in Crop Development using Agronomic Indicators Derived from Multispectral Satellite Images*, In Proc. IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium (IGARSS), Fort Worth, Texas, USA, July 23-28, 2017.
- [C.2017.19] Le Goff Matthieu, Tournet Jean-Yves, Wendt Herwig, Ortner Mathias and Spigai Marc, *Deep learning for cloud detection*, In Proc. International Conference of Pattern Recognition Systems (ICPRS), Madrid, Spain, July 11-13, 2017.
- [C.2017.20] Urbano Simone, Chaumette Eric, Goupil Philippe and Tournet Jean-Yves, *A Data-Driven Approach For Actuator Servo Loop Failure Detection*, In Proc. International Federation of Automatic Control (IFAC), Toulouse, France, July 9-14, 2017.

- [C.2017.21] Bonacci David and Lacaze Bernard, *Shape Effects on Sampling of Stationary Processes*, In Proc. Sampling Theory and Applications (SampTA), 12th International Conference, Tallinn, ESTONIA, July 3-7, 2017.
- [C.2017.22] Manzoni Vieira Fábio, Vincent François, Tournet Jean-Yves, Bonacci David, Spigai Marc, Ansart Marie and Richard Jacques, *Improving Synthetic Aperture Radar Detection using the Automatic Identification System*, In Proc. 18th International Radar Symposium (IRS), Prague, Czech Republic, June 28-30, 2017.
- [C.2017.23] Kbayer Nabil and Sahmoudi Mohamed, *Regularized Estimation for GNSS Positioning in Multipath/Non-Line-Of-Sight Environments*, In Proc. European Navigation Conference (ENC), Lausanne, Switzerland, May 9-12, 2017.
- [C.2017.24] Basarab Adrian, Rohrbach Daniel, Zhao Ningning, Tournet Jean-Yves, Kouamé Denis and Mamou Jonathan, *Enhancement of 250-MHz Quantitative Acoustic-Microscopy Data using a Single-Image Super-Resolution Method*, In Proc. IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI), Melbourne, Australia, April 18-21, 2017.
- [C.2017.25] Kbayer Nabil, Galy Jérôme, Chaumette Eric, Vincent François, Renaux Alexandre and Larzabal Pascal, *Estimation Accuracy of Non-Standard Maximum Likelihood Estimators*, In Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech and Signal Proces. (ICASSP), La Nouvelle-Orléans, Louisiane-USA, March 5-9, 2017.
- [C.2017.26] Bacharach Lucien, El Korso Mohammed Nabil, Renaux Alexandre and Tournet Jean-Yves, *A Bayesian Lower Bound for Parameter Estimation of Poisson Data Including Multiple Changes*, In Proc. IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing (ICASSP), New-Orleans, USA, March 5-9, 2017.
- [C.2017.27] Mejia Yuri, Costa Facundo, Arguello Henry, Tournet Jean-Yves and Batatia Hadj, *Bayesian Reconstruction of Hyperspectral Images using Compressed Sensing Measurements and a Local Structured Prior*, In Proc. IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing (ICASSP), New-Orleans, USA, March 5-9, 2017.
- [C.2017.28] Draskovic G., Pascal Frédéric, Breloy A. and Tournet Jean-Yves, *New Asymptotic Properties for the Robust ANMF*, In Proc. IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing (ICASSP), New-Orleans, USA, March 5-9, 2017.
- [C.2017.29] Kbayer Nabil and Sahmoudi Mohamed, *Constructive Use of MP/NLOS Bias of GNSS Pseudoranges : Performance Analysis by Type of Environment*, In Proc. Institute of Navigation International Technical Meeting (ION ITM), Monterey, USA, January 30-February 2, 2017.

BREVETS – PATENTS

- [B.2017.1] Marmet François-Xavier, Vigneau Willy, Sahmoudi Mohamed, Lesouple Julien and Tournet Jean-Yves, *Procede de positionnement par GNSS*, N° 17 53907 FR 3 066 027 03-05-2017 May, 2017.

Communications numériques

En ce qui concerne les communications numériques, les projets réalisés par TéSA durant cette période trouvent leur application aussi bien dans les communications par satellite que les communications aéronautiques et les techniques de navigation. Les thématiques de ces projets peuvent être classées selon quatre grands axes : les communications optiques, les modulations à enveloppe constante, la navigation et la conception de systèmes.

Synthèse des travaux

COMMUNICATIONS OPTIQUES

Dans un projet réalisé pour le CNES, TéSA a étudié la couche physique des transmissions optiques par satellite. Dans un premier temps, un simulateur a été développé qui prend en compte aussi bien des aspects émetteur/récepteur (laser, forme d'onde, (dé)modulation et amplification), que le canal de propagation (séries temporelles). Sur la base de ce simulateur, une analyse a été conduite pour évaluer l'effet de différents entrelaceurs sur les performances globales du système.

Dans le cadre d'une thèse financée par Airbus Defence and Space, Thales Alenia Space et le CNES, le doctorant Lucien Canuet a étudié la fiabilisation des transmissions optiques satellite-sol. La première partie de son travail s'est intéressée d'abord à la caractérisation de ces liens via des outils de simulations, puis à la modélisation analytique du flux couplé dans une fibre optique monomode en prenant en compte diverses distorsions (correction par optique adaptative, scintillation, distorsions de phase ...). En se basant sur ces modèles, la deuxième partie de cette thèse a exploré différentes techniques de compensation au niveau physique (optique adaptative) et au niveau numérique (entrelaceurs, codes correcteurs d'erreur). Un simulateur dédié, baptisé *DREAM*, a été développé.

MODULATIONS À ENVELOPPE CONSTANTE

Une activité forte de TéSA dans le domaine des communications par satellite concerne les formes d'onde. La modulation à phase continue (*Continuous Phase Modulation* – CPM) est une forme d'onde très intéressante pour les communications par satellite car elle est robuste face aux non-linéarités induites par les amplificateurs de puissance (à bord des satellites ou des terminaux). Aussi, la continuité de la phase tout au long du signal transmis lui confère une

Digital communications

With regard to digital communications, the projects carried out by TeSA during this period lead to applications in satellite communications as well as in aeronautical communications and navigation techniques. The themes of these projects can be classified into four main fields: optical communications, constant-envelope modulations, navigation and system design.

Summary of work

OPTICAL COMMUNICATIONS

In a project carried out for CNES, TeSA studied the physical layer of optical satellite transmissions. First, a simulator was developed that takes into account both transmitter/receiver aspects (laser, waveform, (de)modulation and amplification) and the propagation channel (time series). On the basis of this simulator, an analysis was conducted to evaluate the effect of different interleavers on the overall performance of the system.

As part of a thesis funded by Airbus Defence and Space, Thales Alenia Space and CNES, a doctoral student, Lucien Canuet studied the reliability of satellite-to-ground optical transmissions. The first part of his work concerned the characterisation of these links using simulation tools, then the analytical modelling of the coupled efficiency in a singlemode optical fibre by taking into account various distortions (adaptive optics correction, scintillation, phase distortions, etc.). Based on these models, the second part of his thesis explored different mitigation techniques at the physical level (adaptive optics) and at the digital level (interleavers, error correction codes). A dedicated simulator, called *DREAM*, has been developed.

CONSTANT ENVELOPE MODULATIONS

One of TeSA's important activities in the field of satellite communications concerns waveforms. Continuous Phase Modulation (CPM) is a very interesting waveform for satellite communications because it withstands non-linearities induced by power amplifiers (on board satellites or terminals). Also, the continuity of the phase throughout the transmitted signal gives it a better spectral efficiency compared to linear modulations.

meilleure occupation spectrale en comparaison aux modulations linéaires.

La thèse de Romain Chayot, financée par le CNES et Thales Alenia Space, s'est intéressée à la transmission des CPM sur des canaux sélectifs et/ou doublement sélectifs comme le cas du canal aéronautique drone-satellite. Tout d'abord, une procédure d'égalisation et d'estimation du canal à faible complexité a été proposée. Ensuite, ces résultats ont pu être généralisés dans le cadre des canaux doublement sélectifs (dispersifs en temps et en fréquence).

En parallèle de cette thèse, le doctorant Charles-Ugo Piat-Durozoi, financé par le CNES et l'INP Toulouse, quant à lui, a proposé d'optimiser les codes à contrôle de parité de faible densité (*Low Density Parity Check* – LDPC) pour des CPM non cohérentes dans le contexte de contrôle et de télémesure des lanceurs. Jusque-là était traditionnellement utilisée une modulation de fréquence à phase continue (*Continuous-phase frequency-shift keying* – CPFSK), concaténée à un code correcteur d'erreur de type Reed-Solomon à décodage dur. Cette thèse a introduit un récepteur CPM non cohérent à sortie souple. Des schémas de précodage efficaces et une analyse asymptotique ont été proposés pour aider à la convergence des récepteurs itératifs. Enfin, l'optimisation de codes LDPC pour ce cas non cohérent a été réalisée.

Romain Chayot's thesis, funded by CNES and Thales Alenia Space, focused on the transmission of CPMs on selective and/or doubly selective channels such as the aeronautical drone (UAV)-satellite channel. First, a procedure for equalising and estimating the low complexity channel was proposed. The results were then generalised within the framework of doubly selective channels (time and frequency dispersive).

In parallel with this thesis, a doctoral student, Charles-Ugo Piat-Durozoi, funded by CNES and INP Toulouse, proposed the optimisation of Low Density Parity Check codes (LDPC) for non-coherent CPMs in the context of launcher control and telemetry. Until then, continuous phase, frequency-shift keying (CPFSK) was traditionally used, concatenated with a Reed-Solomon error correction code with hard decoding. This thesis introduced a non-coherent CPM receiver with a flexible output. Effective precoding schemes and an asymptotic analysis were proposed to facilitate the convergence of iterative receivers. Finally, the LDPC codes for this non-coherent case were optimised.



Romain Chayot et Charles-Ugo Piat-Durozoi lors de leur soutenance de thèse.
Romain Chayot and Charles-Ugo Piat-Durozoi during their PhD defence.

Toujours dans le même contexte de la future génération des lanceurs, une étude réalisée pour le CNES s'est focalisée sur la définition de formes d'onde à enveloppe constante pour le lien de télémesure des futurs lanceurs. Une chaîne de référence, incluant la modulation, le codage, l'entrelacement et l'embrouillage, a été développée afin d'évaluer les performances de telles modulations en termes de synchronisation, de reconstruction du signal et d'estimation canal.

Enfin, une étude pour Collins Aerospace a eu comme objectif d'implémenter et d'évaluer des récepteurs basés sur des modulations à déplacement minimum gaussien (*Gaussian minimum-shift keying* – GMSK, une sous-famille des CPM) dans un contexte de communications drone-satellite (détection, estimation de paramètres).

NAVIGATION

Les activités de TéSA en communications numériques concernent également 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 (voir partie précédente) ou en communications numériques. Durant la période 2017-2018, trois projets sur des problématiques de navigation ont été réalisés.

Deux premières études se sont focalisées sur des aspects formes d'onde concernant les signaux AIS. Initialement introduits pour les communications entre bateaux, ces derniers sont aujourd'hui utilisés pour faire de la surveillance et du suivi des navires.

La première étude, financée par le CNES, a eu pour objectif de développer un modèle statistique des collisions de ce type de messages dans divers environnements et de les valider sur une base de signaux réels.

Still in the same context of the future generation of launchers, a study carried out for CNES focused on the definition of constant envelope waveforms for the telemetry link with future launchers. A reference chain, including modulation, coding, interleaving and scrambling, was developed to evaluate the performance of such modulations in terms of synchronisation, signal reconstruction and channel estimation.

Finally, a study for Collins Aerospace aimed to implement and evaluate Gaussian minimum-shift keying (GMSK) receivers (a subfamily of CPMs) in a context of UAV-satellite communications (detection, parameter estimation).

NAVIGATION

TeSA's activities in digital communications also concern positioning systems, a field in which TéSA has acquired extensive experience through several past projects, both in signal processing (see previous section) and in digital communications. During the period 2017-2018, three projects on navigation issues were carried out.

Two first studies focused on waveform aspects of AIS signals. Initially introduced for inter-ship communications, they are now used for ship surveillance and tracking.

The first study, funded by CNES, aimed to develop a statistical model of collisions of this type of message in various environments and to validate it on a real signal database.

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

WHERE ARE THEY NOW?



Après avoir soutenu sa thèse à TéSA en 2014, Victor Bissoli Nicolau est embauché chez ELTA / ECA pour le développement d'algorithmes de traitement du signal pour des applications en télécommunications spatiales.

Since his PhD defence in 2014, Victor Bissoli Nicolau has been working for ELTA / ECA Group, in Toulouse, to develop signal processing algorithms for telecommunication and space applications.

VICTOR BISSOLI NICOLAU

La deuxième étude a exploré la possibilité d'utiliser ces mêmes signaux par des satellites, drones ou avions afin d'obtenir une carte en temps réel du trafic maritime. Cette forme d'onde étant originalement introduite pour des communications à courte distance (inférieures à 70km), l'objectif de cette étude a été de considérer de nouveaux récepteurs qui prennent en compte les artefacts induits par ce nouveau paradigme (faible puissance du signal reçu au niveau du satellite, effet Doppler, temps réel).

Enfin, une troisième étude s'inscrivant dans le cadre du système de positionnement européen Galileo et réalisée pour Thales Alenia Space, a exploré dans un premier temps la bande de fréquence optimale et l'effet des interférences sur un signal robuste de structure simple, utilisé pour améliorer le temps nécessaire à partir du démarrage du GNSS pour fournir une position valide (*Time To First Fix – TTFF*). Puis dans un deuxième temps, la définition d'un schéma de code correcteur d'erreur et de modulation associée a été proposée et validée pour les signaux dits de performance, utilisés pour améliorer la précision du positionnement.

The second study explored the possibility of using these same signals by satellites, drones or aircraft to obtain a real-time map of maritime traffic. As this waveform was initially introduced for short-range communications (less than 70 km), the aim of this study was to consider new receivers that take into account the artefacts induced by this new paradigm (low signal power received at the satellite level, Doppler effect, real time).

Finally, a third study, part of the European Galileo positioning system, carried out for Thales Alenia Space, first explored the optimal frequency band and the effect of interference on a robust signal with a simple structure, used to improve the Time To First Fix (TTFF), the time from the start of the GNSS to provide a valid position. Then, in a second step, the definition of an error-correcting code scheme and associated modulation was proposed and validated for the so-called high-performance signals, used for improving positioning accuracy.



Charles-Ugo Piat-Durozoi (à gauche) et Romain Chayot (à droite) ont présenté leurs travaux à l'ICASSP, encouragés par Corinne Mailhes (au centre), mars 2017.

Charles-Ugo Piat-Durozoi (left) and Romain Chayot (right) presented papers at ICASSP, supported by Corinne Mailhes (centre), March 2017.

CONCEPTION DE SYSTÈMES

Fort du large spectre de ses compétences, TéSA a apporté son expertise sur des problématiques système très diverses. Avec son partenaire l'IRT Saint Exupéry, TéSA a apporté son expertise en modulations pour évaluer et améliorer la forme d'onde SC-OFDM (*Single-Carrier – Orthogonal Frequency Division Modulation*) dans le cadre du projet *Accès Large Bande par Satellite* (ALBS). Pour ce faire, TéSA a proposé l'amélioration d'algorithmes de réception en termes de complexité d'implémentation, d'estimation du canal et de débit utile atteint.

Une étude proposée par le CNES s'est intéressée au dimensionnement d'un lien satellite comportant un grand nombre de faisceaux et devant servir un grand nombre de terminaux. Ce travail a donné lieu à un outil de simulation qui permet d'optimiser le coût énergétique par bit transmis, en prenant en compte plusieurs paramètres (bande de fréquence, modulation, codage, interférences, gains des amplificateurs).

Dans le cadre de la coopération franco-chinoise *Space Variable Objects Monitor* (SVOM) visant la détection de sursauts gamma émanant de certains phénomènes cosmologiques, TéSA a étudié, lors d'une collaboration avec la PME toulousaine INGSPACE, des algorithmes de réception des signaux provenant du satellite SVOM. L'étude a permis d'implémenter ces algorithmes sur un récepteur très haute fréquence (*Very High Frequency* - VHF). Ce dernier a été validé par le CNES et l'agence spatiale chinoise.

Un autre projet, dans le cadre d'une R&T CNES portée par Thales Alenia Space, a exploré le rôle que joueront les satellites dans le contexte de la 5G (haut débit, faible latence, basse consommation). En particulier, cette étude a fait une revue des formes d'ondes candidates de ce futur standard et a évalué leur pertinence dans un contexte satellitaire. Toujours avec ces deux collaborateurs, CNES et Thales Alenia Space, une étude menée par le TéSA a comparé la faisabilité de différentes méthodes d'accès aléatoires pour des terminaux bas débit sur la voie retour.

Enfin, toujours dans le cadre d'une R&T CNES, TéSA a développé un classifieur d'apprentissage machine (machine learning) de type Random Forests afin d'améliorer les qualités de service et d'expérience (*Quality of service / Quality of experience – QoS/QoE*) d'une communication sécurisée par satellite. Cette étude a montré que ce type de classifieurs surpasse plusieurs autres familles de classifieurs explorées aussi dans ce projet.

SYSTEM DESIGN

Thanks to his large spectrum of skills, TeSA has contributed its expertise on a wide range of system issues. With its partner IRT Saint Exupéry, TeSA has contributed its expertise in modulations to evaluate and improve the Single-Carrier – Orthogonal Frequency Division Modulation (SC-OFDM) waveform proposed as part of the Broadband Satellite Access (ALBS – *Accès Large Bande par Satellite*) project. To do this, TeSA proposed improving reception algorithms in terms of the complexity of implementation, channel estimation and useful throughput achieved.

A study proposed by CNES focused on the sizing of a satellite link with a large number of beams, intended to serve a large number of terminals. This work led to the development of a simulation tool that optimises the energy cost per bit transmitted, taking into account several parameters (frequency band, modulation, coding, interference, amplifier gains).

As part of the Franco-Chinese cooperation for the Space Variable Objects Monitor (SVOM) aimed at detecting gamma-ray bursts emanating from certain cosmological phenomena, TeSA studied, in collaboration with the Toulouse-based SME INGSPACE, algorithms for receiving signals from the SVOM satellite. The study made it possible to implement these algorithms on a Very High Frequency (VHF) receiver. The latter has been validated by CNES and the Chinese Space Agency.

Another project, part of a CNES R&T project led by Thales Alenia Space, explored the role that satellites will play in the context of 5G (high-speed, low latency, low power consumption). In particular, this study reviewed the candidate waveforms for the future standard and assessed their relevance in a satellite context. Also, with these two collaborators, CNES and Thales Alenia Space, a study conducted by TeSA compared the feasibility of different random-access methods for low speed terminals on the return channel.

Finally, still as part of a CNES R&T study, TeSA developed a Random Forest type, machine learning classifier to improve the Quality of service/Quality of experience (QoS/QoE) of secure satellite communication. The study showed that this type of classifier outperforms several other classifier families also explored in this project.

Liste des thèses soutenues List of defended theses

Canuet Lucien, *Fiabilisation des transmissions optiques satellite-sol*, thèse cofinancée par CNES, TAS et ADS, soutenue le 16/04/2018 - *Reliability of Satellite-to-Ground Optical Communication*, thesis sponsored by CNES, TAS and ADS, defended on 16/04/2018. Embauché par TAS.

Chayot Romain, *Synchronisation, détection et égalisation de modulation à phase continue dans des canaux sélectifs en temps et en fréquence*, thèse cofinancée par CNES et TAS, soutenue le 15/01/2019 - *Synchronisation, detection and equalisation of continuous phase modulation in time and frequency selective channels*, thesis sponsored by CNES and TAS, defended on 15/01/2019. Embauché par Thalès Com.

Piat-Durozoi Charles-Ugo, *Nouvelle forme d'onde et récepteur avancé pour la télémesure des futurs lanceurs*, thèse cofinancée par CNES et INPT, soutenue le 27/11/2018 - *New waveform and advanced receiver for future launcher telemetry*, thesis sponsored by CNES and INPT, defended on 27/11/2018. Embauché par Silicom.



Lorenzo Ortega, doctorant TéSA, était invité par Pau Closas (à gauche) à l'université Northeastern, juin 2018.
Lorenzo Ortega, TeSA PhD, invited by Pau Closas (left) at Northeastern University, June 2018.

Liste des projets

CNES

Statistique des collisions AIS,
type d'étude : étude métier CNES,
domaine d'application : télécommunications spatiales et aéronautiques.

Optimisation du coût du bit transmis dans les liaisons de télécommunication par satellite,
type d'étude : R&T CNES,
domaine d'application : télécommunications spatiales et aéronautiques.

Chaîne de référence pour la télémesure des futurs lanceurs,
type d'étude : étude métier CNES,
domaine d'application : télécommunications spatiales et aéronautiques.

Simulateur couche physique optique et simulations CCSDS,
type d'étude : étude métier CNES,
domaine d'application : télécommunications spatiales et aéronautiques.

Optimisation des signaux pour GALILEO,
type d'étude : R&T CNES,
domaine d'application : télécommunications spatiales et aéronautiques, avec TAS.

Optimisation des communications sécurisées,
type d'étude : R&T CNES,
domaine d'application : télécommunications spatiales et aéronautiques, avec TAS.

Développement et fourniture des stations VHF pour SVOM,
type d'étude : étude métier CNES,
domaine d'application : télécommunications spatiales et aéronautiques, avec INGSPACE.

THALES ALENIA SPACE

Formes d'onde 5G,
type d'étude : expertise,
domaine d'application : télécommunications spatiales et aéronautiques.

Méthodes d'accès aléatoires,
type d'étude : recherche appliquée,
domaine d'application : télécommunications spatiales et aéronautiques.

COLLINS AEROSPACE

Acquisition et démodulation GMSK,
type d'étude : expertise,
Domaine d'application : télécommunications spatiales et aéronautiques.

List of projects

CNES

AIS collision statistics,
type of study: specific study,
application field: spatial and aeronautical telecommunications.

Optimisation of bit transmission cost in satellite links,
type of study: CNES R&T,
application field: spatial and aeronautical telecommunications.

Channel communication for future launcher telemetry,
type of study: specific study,
application field: spatial and aeronautical telecommunications.

Simulator of optical physical layer and CCSDS simulations,
type of study: specific study,
application field: spatial and aeronautical telecommunications.

GALILEO signal optimisation,
type of study: CNES R&T,
application field: spatial and aeronautical telecommunications, with TAS.

Secure telecommunication optimisation,
type of study: CNES R&T,
application field: spatial and aeronautical telecommunications, with TAS.

Development and design of VHF stations for SVOM,
type of study: specific study,
application field: spatial and aeronautical telecommunications, with INGSPACE.

THALES ALENIA SPACE

5G waveforms,
type of study: expertise,
application field: spatial and aeronautical telecommunications.

Random access methods,
type of study: applied research,
application field: spatial and aeronautical telecommunications.

COLLINS AEROSPACE

GMSK acquisition and demodulation,
type of study: expertise,
application field: spatial and aeronautical telecommunications.

IRT

EW-SC-OFDM,
type d'étude : expertise,
domaine d'application : télécommunications
spatiales et aéronautiques.

ÉTUDES EXTERNES (POUR DES NON-MEMBRES DE TéSA)

Expertise AIS satellite,
type d'étude : expertise
domaine d'application : télécommunications
spatiales et aéronautiques,
avec CLS.

ÉTUDES AUTOFINANCÉES TéSA

Traitement des signaux AIS,
type d'étude : recherche appliquée,
domaine d'application : télécommunications
spatiales et aéronautiques.

IRT

EW-SC-OFDM,
type of study: expertise,
application field: spatial and aeronautical
telecommunications.

EXTERNAL STUDIES (FOR NON-MEMBERS OF TeSA)

AIS satellite expertise,
type of study: expertise,
application field: spatial and aeronautical
telecommunications,
with CLS.

SELF-FINANCED TeSA STUDIES

AIS signal processing,
type of study: applied research,
application field: spatial and aeronautical
telecommunications.



Bienvenue à TéSA en 2017.
Welcome to TeSA in 2017.

Liste des publications et brevets Publication and patent list

ANNÉE 2018 – YEAR 2018

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

[J.2018.1] Chayot Romain, Thomas Nathalie, Poulliat Charly, Boucheret Marie-Laure, Lesthievant Guy and Van Wambeke Nicolas, *A New Exact Low-Complexity MMSE Equalizer for Continuous Phase Modulation*, IEEE Communications Letters, vol. 22, issue 11, pp. 2218-2221, September, 2018.

[J.2018.2] Piat-Durozoi Charles-Ugo, Poulliat Charly, Thomas Nathalie, Boucheret Marie-Laure, Lesthievant Guy and Bouisson Emmanuel, *Minimal State Non-Coherent Symbol MAP Detection of Continuous-Phase Modulations*, IEEE Communications Letters, vol. 22, issue 10, pp. 2008-2011, July, 2018.

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

[C.2018.1] Zamoum Selma, Lacan Jérôme, Boucheret Marie-Laure, Gineste Mathieu and Dupé Jean-Baptiste, *Deterministic Distribution of Replicas Positions for Multiuser Random Transmissions in Satcoms*, In Proc. IEEE Global Communications Conference, Abu Dhabi, UAE, December 9-13, 2018.

[C.2018.2] Ortega Espluga Lorenzo, Poulliat Charly, Boucheret Marie-Laure, Aubault Marion and Al Bitar Hanaa, *Advanced Co-Design of Message Structure and Channel Coding Scheme to Reduce the Time to CED and to Improve the Resilience for a Galileo 2nd Generation New Signal*, In Proc. ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), Noordwijk, The Netherlands, December 5-7, 2018.

[C.2018.3] Cluzel Sylvain, Dervin Mathieu, Radzik José, Cazalens Sonia, Baudoin Cédric and Dragomirescu Daniela, *Physical Layer Abstraction for Performance Evaluation of LEO Satellite Systems for IoT using Time-Frequency Aloha Scheme*, In Proc. 6th IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP), Anaheim, California, USA, November 26-29, 2018.

[C.2018.4] Chayot Romain, Thomas Nathalie, Poulliat Charly, Boucheret Marie-Laure, Van Wambeke Nicolas and Lesthievant Guy, *Doubly-Selective Channel Estimation for Continuous Phase Modulation*, In Proc. 37th premier international conference for military communications (MILCOM), Los Angeles, USA, October 29-31, 2018.

[C.2018.5] Piat-Durozoi Charles-Ugo, Poulliat Charly, Thomas Nathalie, Boucheret Marie-Laure, Lesthievant Guy and Bouisson Emmanuel, *Precoding for Non-coherent detection of continuous phase modulations*, In Proc. 37th premier international conference for military communications (MILCOM), Los Angeles, USA, October 29-31, 2018.

[C.2018.6] Ortega Espluga Lorenzo, Poulliat Charly, Boucheret Marie-Laure, Aubault Marion and Al Bitar Hanaa, *Co-Design of Message Structure and Channel Coding Scheme to Reduce the Time to CED for a Galileo 2nd Generation New Signal*, In Proc. Institute of Navigation (ION GNSS+), Miami, Florida, USA, September 24-28, 2018.

[C.2018.7] Zamoum Selma, Lacan Jérôme, Boucheret Marie-Laure, Dupé Jean-Baptiste and Gineste Mathieu, *Shared Position Technique for Interfered Random Transmissions in Satellite Communication*, In Proc. 9th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS), Berlin, Germany, September 10-12, 2018.

[C.2018.8] Chayot Romain, Thomas Nathalie, Poulliat Charly and Boucheret Marie-Laure, *A Frequency-Domain Band-MMSE Equalizer for Continuous Phase Modulation over Frequency-Selective Time-Varying Channels*, In Proc. European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Rome, Italy, September 3-7, 2018.

[C.2018.9] Cluzel Sylvain, Franck Laurent, Radzik José, Cazalens Sonia, Dervin Mathieu, Baudoin Cédric and Dragomirescu Daniela, *3GPP NB-IoT Coverage Extension using LEO Satellites*, In Proc. IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC-Spring), Porto, Portugal, June 3-6, 2018.

[C.2018.10] Ortega Espluga Lorenzo, Poulliat Charly, Boucheret Marie-Laure, Aubault Marion and Al Bitar Hanaa, *New Solutions to Reduce the Time-To-CED and to Improve the CED Robustness of the Galileo I/NAV Message*, In Proc. Institute of Navigation, Position Location And Navigation Symposium (ION PLANS), Monterey, California, USA, April 23-26, 2018.

[C.2018.11] Ortega Espluga Lorenzo, Poulliat Charly, Boucheret Marie-Laure, Aubault Marion and Al Bitar Hanaa, *New Solutions on the Design of a Galileo Acquisition-Aiding Signal to Improve the TTFF and the Sensitivity*, In

Proc. Institute of Navigation International Technical Meeting & Trade Show (ION ITM), Reston, USA, January 29-February 1, 2018.

BREVETS – PATENTS

[B.2018.1] Zamoum Selma, Gineste Mathieu, Lacan Jérôme, Boucheret Marie-Laure and Dupé Jean-Baptiste, *PROCÉDÉ ET SYSTÈME DE TRANSMISSION DE PAQUETS DE DONNÉES À TRAVERS UN CANAL DE TRANSMISSION (RA) À ACCÈS ALÉATOIRE*, n° 071277 FR RQDLV 14-05-18 YTA-LRE, May 2018.

ANNÉE 2017 – YEAR 2017

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

[J.2017.1] Thomas Nathalie, Tourneret Jean-Yves and Bourret Emmanuel, *Blind Roll-off Estimation for Digital Transmissions*, Signal Processing EURASIP, vol. 135, pp. 87-95, June, 2017.

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

[C.2017.1] Chayot Romain, Thomas Nathalie, Poulliat Charly, Boucheret Marie-Laure, Van Wambeke Nicolas and Lesthievant Guy, *Channel Estimation and Equalization for CPM with Application for Aeronautical Communications via a Satellite Link*, In Proc. Military Communications (MILCOM), Baltimore, USA, October 23-25, 2017.

[C.2017.2] Chayot Romain, Thomas Nathalie, Poulliat Charly, Boucheret Marie-Laure, Van Wambeke Nicolas and Lesthievant Guy, *Sur l'égalisation fréquentielle des modulations à phase continue*, In Proc. Groupement de Recherche en Traitement du Signal et des Images (GRETSI), Juan-Les-Pins, France, September 5-8, 2017.

[C.2017.3] Piat-Durozoi Charles-Ugo, Poulliat Charly, Thomas Nathalie, Boucheret Marie-Laure and Lesthievant Guy, *On Sparse Graph Coding for Coherent and Noncoherent Demodulation*, In Proc. International Symposium on Information Theory (ISIT), Aachen, Germany, June 25-30, 2017.

[C.2017.4] Piat-Durozoi Charles-Ugo, Poulliat Charly, Boucheret Marie-Laure, Thomas Nathalie, Bouisson Emmanuel and Lesthievant Guy, *Multisymbol with Memory Noncoherent Detection of CPFSK*, In Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech and Signal Proces. (ICASSP), La Nouvelle-Orléans, Louisiane-USA, March 5-9, 2017.

[C.2017.5] Chayot Romain, Boucheret Marie-Laure, Poulliat Charly, Thomas Nathalie, Van Wambeke Nicolas and Lesthievant Guy, *Joint Channel and Carrier Frequency Estimation for M-ARY CPM over Frequency-Selective Channel using PAM Decomposition*, In Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech and Signal Proces. (ICASSP), La Nouvelle-Orléans, Louisiane-USA, March 5-9, 2017.

[C.2017.6] Canuet Lucien, Vedrenne Nicolas, Conan Jean-Marc, Artaud Géraldine, Rissons Angélique and Lacan Jérôme, *Evaluation of Communication Performance For Adaptive Optics Corrected Geo-To-Ground Laser Links*, In Proc. International Conference on Space Optics (ICSO 2016), Biarritz, France, October 18-21, 2017.

Réseaux

L'utilisation du lien satellite pour les communications en mode paquet reste un thème phare des études et thèses développées au TéSA. Nous pouvons cependant noter certaines évolutions, déjà pressenties dans l'édition précédente, vers la distribution de contenu, l'accélération du trafic IP et la prise en compte des aspects sécurité des communications... évolutions évidentes à la vue des nouveaux protocoles de communication et des nouveaux standards du monde de l'internet qui se diffusent de plus en plus rapidement au sein du monde des communications via satellite. Outre ces aspects, on peut également noter l'avènement d'études sur les réseaux embarqués avioniques. Cette nouvelle thématique s'explique par l'objectif de réduction de coût des équipementiers du secteur qui cherchent à étudier la possibilité de remplacer les systèmes de communications filaires historiques par des systèmes sans-fil.

Synthèse des travaux

Nous proposons donc de décrire les travaux menés sur cette période en fonction des thématiques que nous venons d'évoquer, ce qui permet d'apprécier l'impact des évolutions du monde de l'internet vers les communications aéronautiques et spatiales.

GESTION DE RESSOURCES

La gestion des ressources reste une composante incontournable des études réalisées au TéSA et s'articule comme pour la précédente édition, selon deux axes que sont les méthodes d'accès et l'ordonnancement.

Networking

The use of satellite links for packet-switching communications remains a key theme of the studies and theses undertaken at TeSA. However, we can note some developments, already anticipated in the previous edition, concerning content distribution, the acceleration of IP traffic and the consideration of communication security aspects... obvious developments in the light of new communication protocols and new standards in the Internet world that are spreading ever more rapidly within the world of satellite communications. In addition to these aspects, we can also note the advent of studies on onboard avionics networks. This new theme has emerged due to the objective of reducing costs for equipment manufacturers in the sector who are considering the possibility of replacing traditional wired communications systems with wireless systems.

Summary of work

We shall thus describe the work carried out during this period according to the themes mentioned above, which sheds light on the way developments in the Internet world are affecting aeronautical and space communications.

RESOURCE MANAGEMENT

Resource management remains an essential part of the studies carried out at TeSA and is broken down, as for the previous edition, into two categories: access methods and scheduling.

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

WHERE ARE THEY NOW?



Après avoir soutenu sa thèse à TéSA en 2014, et un post-doc à l'Université de Lyon et à l'INRIA, Patrice Raveneau a obtenu un poste de maître de conférences en réseaux à l'IUT de La Rochelle et est maintenant ingénieur au CNES.

After his PhD defence in 2014 and a post-doc in Lyon University and INRIA, Patrice Raveneau is now an assistant professor in networking with the "IUT" of La Rochelle and is now engineer at CNES.

PATRICE RAVENEAU

L'optimisation de l'utilisation des liens satellites est un enjeu majeur pour la rentabilité des systèmes satellites. Dans ce cadre, l'augmentation de la réutilisation des fréquences est une approche des plus prometteuses. En effet, cette réutilisation permet de transmettre plus d'informations sur une même fréquence, pour peu que les interférences entre les deux signaux ne soient pas trop importantes. Il est donc capital de contrôler l'impact de ces interférences, que ce soit via l'utilisation de schémas de réutilisation de fréquences, ou encore via des techniques de coordination dynamique des interférences où la sélection des utilisateurs qui peuvent transmettre sur les mêmes fréquences est faite en prenant les interférences en compte.

Ce sont à tous ces aspects que s'est attachée la thèse de Yoann Couble en proposant et évaluant différents mécanismes d'allocation de ressources. La densification de l'utilisation des fréquences introduit de nouvelles sources d'interférences qui deviennent prédominantes. Afin d'en limiter l'impact, cette thèse a proposé un schéma de coordination entre les différentes entités en charge de l'allocation des ressources avec pour objectif final de rendre viable et profitable un plan de fréquence très agressif permettant ainsi de doubler le spectre disponible.

Dans le domaine de l'ordonnancement et de la gestion du trafic pour les liaisons satellitaires géostationnaires, une étude pour le CNES s'est penchée sur l'analyse de la performance d'une sélection de mécanismes d'ordonnancement expérimentaux (dont un proposé en standardisation à l'*Internet Engineering Task Force* (IETF) afin d'améliorer la gestion de l'accès au lien satellite. La nouveauté était de garantir à la fois une utilisation complète du lien satellite et la satisfaction des besoins en performance des utilisateurs en explorant de nouvelles techniques de gestion de trafic qui pourraient amener à faire évoluer les techniques actuelles couramment déployées. Un des défis fut de déterminer quel ordonnanceur trafic permettrait d'obtenir une garantie de partage sachant que le trafic des utilisateurs est difficilement modélisable, émis en rafale et non pas de façon constante et périodique, ce qui nécessita une étude statistique basée sur des mesures obtenues par expérimentations réelles.

TRANSPORT

Les protocoles de transport terrestres voient leurs performances sensiblement dégradées dans un environnement satellite, du fait de leur dépendance forte au temps d'aller-retour. TeSA mène dans ce domaine des travaux depuis plusieurs années, et son expertise en ce domaine est reconnue.

Optimising the use of satellite links is a major challenge for ensuring the profitability of satellite systems. In this context, one of the most promising approaches is to increase the reuse of frequencies. This is because reuse makes it possible to transmit more information on the same frequency, as long as there is not too much interference between the two signals. It is therefore essential to limit the impact of this interference, whether by means of frequency reuse schemes or through dynamic interference-coordination techniques whereby the users who can transmit on the same frequencies are selected while taking the interferences into account.

Yoann Couble's thesis focused on all these aspects by proposing and evaluating different resource allocation mechanisms. The optimised use of frequencies introduces new sources of interference that are becoming predominant. In order to limit the impact of interference, this thesis proposed a scheme to coordinate the various entities in charge of allocating resources with the ultimate objective of making a very aggressive frequency plan viable and profitable, thus doubling the available spectrum.

In the field of traffic scheduling and management for geostationary satellite links, a study for CNES analysed the performance of a selection of experimental scheduling mechanisms (including one proposed for standardisation by the Internet Engineering Task Force (IETF) to improve the management of access to the satellite link. The novelty was to both fully use the satellite link and meet user performance needs by exploring new traffic management techniques that could lead to the upgrading of current techniques that are often used. One of the challenges was to determine which traffic scheduler would make it possible to guarantee sharing knowing that it is very difficult to model user traffic and that it is transmitted in bursts and not in a constant and periodic manner, which required a statistical study based on measurements obtained with real experiments.

TRANSPORT

The performance of terrestrial transport protocols in a satellite environment is significantly degraded due to their high dependence on the round-trip time. TeSA has been working in this field for several years, and its expertise is widely recognized.

Le projet de collaboration avec Thales Alenia Space (TAS) sur l'optimisation du protocole de transmission (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol* – TCP/IP) s'intègre dans le cadre du développement de la ligne de produit *Space Gate* TAS, une fonctionnalité du proxy associé (*Performance-Enhancing Proxy* – PEP-TCP). Un PEP est un élément actif permettant l'accélération des flux TCP de bout en bout entre les serveurs et clients (utilisateurs la plupart du temps) afin d'améliorer les performances à la fois du lien satellite et de l'utilisateur. L'objectif de ce projet fut de déterminer des seuils de remplissage des buffers qui permettent une réaction adéquate et stable aux phénomènes de congestion. Le choix du pourcentage de paquets à marquer et la stratégie du marquage (*Explicit Congestion Notification* – ECN) furent également étudiés dans le souci d'assurer une réponse adéquate à la congestion et un traitement équitable pour les utilisateurs en fonction des seuils de remplissage définis.

En particulier, cette étude a identifié les paramètres de configuration les plus critiques de la pile TCP GNU/Linux qui ont une influence directe sur les performances du protocole en environnement satellite géostationnaire (*Geostationary Earth Orbit* - GEO). La détermination de ces paramètres permet ainsi de mieux configurer les deux entités PEP côté réseau, et côté utilisateurs.

The collaboration project with Thales Alenia Space (TAS) on optimisation of the Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP) stack is part of the development of the TAS Space Gate product line, a Performance-Enhancing Proxy (PEP-TCP) feature. A PEP is an active element that accelerates end-to-end TCP streams between servers and clients (users most of the time) to improve the performance of both the satellite link and the end user. The aim of this project was to determine buffer-filling thresholds that allow an adequate and stable response to congestion phenomena. The choice of the percentage of packets to be marked and the strategy of Explicit Congestion Notification (ECN) marking were also studied in order to ensure an adequate response to congestion and fair treatment for users according to the defined filling thresholds.

In particular, this study identified the most critical configuration parameters of the GNU/Linux TCP stack that have a direct effect on the performance of the protocol in a Geostationary Earth Orbit (GEO) satellite environment. The identification of these parameters thus makes it possible to fine-tune the configuration of the two PEP entities, respectively on the network side and on the user side.



Une pluie de lauriers pour TésA en 2019.
Plenty of laurels for TeSA in 2019.

Dans le cadre de systèmes satellite dédiés aux services mobiles ou d'autres services émergeant faisant intervenir des niveaux d'interférence intersystème élevés (accès faible coût), des moyens de fiabilisation sont fréquemment intégrés sur le segment des satellites de communication (*Satellite Communications – SATCOM*) au niveau accès ou physique. Cette fiabilisation peut être faite par des mécanismes de code correcteur et/ou de retransmission de divers types : *Forward Error Correction (FEC)*, *Automatic Repeat Request (ARQ)*, *Hybrid ARQ (H-ARQ)*, ou *Adaptive HARQ* issues d'une précédente thèse effectuée au TéSA. Cette fiabilisation se justifie par des types de canaux de transmission très différents des canaux terrestres et pour lesquels seule une solution spécifique est applicable. Toutefois, afin de maintenir une transparence vis-à-vis des applications, il est très difficile de ne pas recourir à la pile TCP/IP qui n'est pas consciente de la présence d'un lien SATCOM de cette nature. Le sujet de la thèse de Bastien Tauran s'est donc articulé autour de l'interaction entre TCP et les mécanismes de fiabilisation, afin de parvenir à une optimisation conjointe. Les résultats de cette thèse ont pour application un cadre système assez large et notamment dans des contextes tels que la voiture connectée, la constellation type IRIDIUM NEXT, l'internet des objets (*Internet of Things – IoT*) ou les communications aéronautiques.

RÉSEAUX IP

Les travaux décrits ici se caractérisent par une potentielle application dans un contexte réseau général. Bien évidemment, le cadre d'application de ces études intègre un lien satellite, mais l'essentiel de ces travaux peut être transposé dans un cadre internet plus général. Ainsi le CNES continue de mener des études sur les réseaux de diffusion de contenu (*Content Delivery Networks – CDN*) dans un souci d'étudier la pertinence d'une intégration dans un réseau satellite conjointement avec les techniques de cache traditionnellement utilisées dans les CDNs.

L'augmentation et le renforcement des usages d'internet rendent nécessaire l'évolution des réseaux existants. Cependant, on constate de fortes inégalités au profit des zones urbaines, bien desservies et qui concentrent à elles seules l'essentiel des investissements au détriment des zones rurales. Face à cette situation, les utilisateurs de ces zones mal desservies se tournent vers d'autres moyens d'accès, et notamment vers les accès internet par satellite. Cependant, ces accès souffrent d'une contrainte de délai forte relative au temps de propagation du signal entre la terre et l'orbite géostationnaire. La thèse d'Élie Bouttier s'est donc intéressée à l'utilisation simultanée d'un réseau d'accès terrestre, caractérisé par un faible débit et un

In satellite systems dedicated to mobile services or other emerging services involving high levels of inter-system interference (low-cost access), the means for ensuring reliability are frequently integrated on the Satellite Communications (*SATCOM*) segment at the access or physical level. This reliability can be ensured by error-correcting code and/or retransmission mechanisms such as Forward Error Correction (FEC), Automatic Repeat Request (ARQ), HybridARQ (H-ARQ), or Adaptive HARQ developed for a previous thesis written at TeSA. This reliability is justified by the fact that the types of transmission channels are very different from terrestrial channels for which only a specific solution is applicable. However, in order to maintain application transparency, it is very difficult to avoid using the TCP/IP stack, which does not take into account the presence of such a SATCOM link. The subject of Bastien Tauran's thesis therefore focused on the interaction between TCP and reliability mechanisms, in order to achieve joint optimisation. The results of this thesis can be applied in a fairly broad system framework, particularly in contexts such as the connected car, the IRIDIUM NEXT constellation, the Internet of Things (IoT) or aeronautical communications.

IP NETWORKS

The work described here has potential for application in a general network context. Of course, the framework for these studies includes a satellite link, but most of this work can be transposed into a more general Internet framework. CNES continues to conduct studies on Content Delivery Networks (CDNs) in order to study the relevance of integration into a satellite network in conjunction with the caching techniques traditionally used in CDNs.

The increasing use of Internet means that existing networks have to evolve. However, there are significant inequalities in favour of urban areas, which are well covered and which alone concentrate the bulk of investment to the detriment of rural areas. In response to this situation, users in these poorly served areas are turning to other means of access, including satellite Internet access. However, these links suffer from a strong time constraint due to the signal propagation time between the ground and the satellite in geostationary orbit. Élie Bouttier's thesis thus focused on the simultaneous use of a terrestrial access network, characterised by a low throughput and a short delay, and a satellite access network, characterised by high latency and a higher throughput. In addition, he studied the relevance of including CDNs, consisting of a large number of cache servers, that provide a response

faible délai, et d'un réseau d'accès satellite, caractérisé par une forte latence et un débit plus important. De plus, il a étudié la pertinence de l'inclusion de CDN, constitués d'un grand nombre de serveurs de cache, qui offrent une réponse à l'augmentation du trafic et des besoins en latence et débit. Bien que localisés dans les réseaux de cœur, les caches restent cependant éloignés des utilisateurs finaux et n'atteignent pas les réseaux d'accès. C'est la raison pour laquelle les fournisseurs d'accès internet se sont intéressés au déploiement de ces serveurs au sein de leur propre réseau, que l'on appelle alors TelCo CDN. La diffusion de contenu nécessite idéalement l'interconnexion des opérateurs CDN avec les TelCo CDNs, permettant ainsi la délégation de la diffusion à ces derniers. Ils sont alors en mesure d'optimiser la diffusion des contenus sur leur réseau dont ils ont une meilleure connaissance. La thèse a donc proposé une optimisation efficace de la livraison de ces contenus sur un réseau hybride satellite/terrestre intégré à une chaîne de livraison CDN.

Toujours dans un souci de délivrance de contenu, une étude s'est également proposée, au regard des différents travaux connus de la communauté scientifique ainsi que ceux issus des recherches communes TAS/CNES/TéSA, à l'évaluation précise de l'écart encore existant entre les solutions applicatives bout-en-bout (HTTP 1.1 et HTTP 2.0) et les solutions avec accélérateurs PEPs. Celle-ci a permis l'identification de nouvelles pistes visant l'amélioration de la QoE en environnement satellite en tenant notamment compte des avantages et inconvénients engendrés par les récentes évolutions des protocoles applicatifs, mais également des résultats obtenus dans le cadre de recherches communes TAS/CNES.

to increased traffic and latency and throughput requirements. Although located in the core networks, caches remain distant from the end users and are not present inside the access networks. This is why Internet service providers have taken an interest in deploying these servers within their own networks, which are then called TelCo CDNs. Content delivery ideally requires the interconnection of CDN operators with TelCo CDNs, thus allowing the delegation of delivery to the latter. They are then able to optimise the distribution of content on their networks, of which they have more knowledge. The thesis therefore proposed an efficient optimisation of the delivery of this content on a hybrid satellite/terrestrial network integrated into a CDN delivery chain.

Still with a view to content delivery, a study was also proposed, in the light of the various works known to the scientific community as well as those resulting from joint TAS/CNES/TeSA research, to accurately assess the gap that still exists between end-to-end application solutions (HTTP 1.1 and HTTP 2.0) and solutions with PEP accelerators. This has made it possible to identify new ways of improving QoE in a satellite environment, taking into account in particular the advantages and disadvantages generated by recent developments in application protocols, but also the results obtained in the context of joint TAS/CNES research.

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

WHERE ARE THEY NOW?



Après avoir soutenu sa thèse à TéSA en 2014, Renaud Sallantin est embauché chez Thales Alenia Space, à Toulouse et fait de la R&D en ingénierie système des communications satellitaires.

Since his PhD defence in 2014, Renaud Sallantin has been working for Thales Alenia Space in Toulouse, as an R&D system engineer in satellite communications.

RENAUD SALLANTIN

Enfin, et toujours dans un souci d'offrir un meilleur service aux utilisateurs de liens satellite, une étude a cherché à caractériser et évaluer la QoE pour des utilisateurs de services applicatifs dans plusieurs configurations satellites différentes. Tout d'abord, elle s'est attachée à identifier les services applicatifs ayant le plus d'intérêt, que ce soit de par leur popularité et/ou de leur adéquation vis-à-vis de la technologie satellite. Ensuite et pour chaque service, les métriques les plus représentatives de la QoE ressentie par un utilisateur du service donné ont été sélectionnées. Enfin, la QoE de différents services ont été évaluées dans le cas d'un accès via satellite géostationnaire dans un premier temps et via l'émulation d'une constellation de satellites en orbite basse (*Low Earth Orbit* – LEO), dans un deuxième temps.

SÉCURITÉ POUR LES SYSTÈMES EMBARQUÉS AÉRONAUTIQUES ET SPATIAUX

De par leur complexité toujours plus croissante, les systèmes embarqués avioniques récents sont exposés à des menaces externes dont le potentiel de nuisance peut être préoccupant vis-à-vis des enjeux opérationnels. Auparavant restreints à un monde avionique bien délimité et très spécifique, on assiste de plus en plus à une augmentation des capacités de connectivité de ces systèmes et à des possibilités d'intégration avec des technologies du monde ouvert de l'internet, par exemple pour interagir avec des équipements passagers. L'accroissement de l'intégration de composants sur étagère (*Commercial Off-The Shelf* – COTS) dans les systèmes avioniques contribue également à augmenter l'exposition de ces systèmes à de nouvelles menaces. De manière générale, une attention croissante est maintenant portée sur la sécurité des systèmes embarqués par les acteurs du monde de la cyber sécurité (aussi bien les chercheurs que les hackers). Dans ce contexte, les autorités et les industriels concernés s'attachent à prendre en compte au plus tôt les typologies de menaces informatiques pouvant impacter la sécurité et la sûreté opérationnelle des avions. Chaque sous-système est donc conçu pour répondre à des exigences de sécurité bien définies ; toutefois, il n'existe pas actuellement de solution capable de réaliser de manière fiable et intelligente la détection et la prévention d'intrusion informatique pour les systèmes embarqués.

C'est dans ce contexte qu'Eric Asselin a réalisé sa thèse, notamment en définissant les contraintes et les propriétés qu'une solution de détection d'intrusion devrait respecter, et de la forme qu'elle devrait adopter pour s'intégrer au mieux dans les systèmes cible. L'idée sous-jacente était de profiter de la maturité et l'expérience des technologies de l'information (*Information Technology* – IT) pour définir et modéliser les

Finally, and still with a view to providing a better service to satellite link users, a study sought to characterise and evaluate the QoE for application service users in several different satellite configurations. First, it focused on identifying the application services of most interest, either because of their popularity and/or their suitability for satellite technology. Then, for each service, the most representative metrics of the QoE experienced by a user of the given service, were selected. Finally, the QoE of different services was first evaluated in the case of access via geostationary satellite and then in the case of the emulation of a constellation of low Earth orbit (LEO) satellites.

SECURITY OF EMBEDDED AIRBORNE AND SPACEBORNE SYSTEMS

Due to their ever-increasing complexity, recent embedded avionics systems are exposed to external threats whose potential for harm may be of concern with regard to the operational stakes involved. Previously restricted to a well-defined and very specific avionics world, the connectivity capacities of these systems are increasing rapidly as are opportunities for integration with technologies from the open world of the Internet, for example to interact with passenger equipment. The increased integration of Commercial Off-The Shelf (COTS) components into avionics systems also increases the exposure of these systems to new threats. In general, increasing attention is now being paid to the security of embedded systems by cyber-security stakeholders (both researchers and hackers). In this context, the authorities and the manufacturers concerned are endeavouring to take into account as soon as possible the types of IT threats that may affect the safety and operational security of aircraft. Each subsystem is therefore designed to meet well-defined security requirements; however, there is currently no solution that can reliably and intelligently detect computer intrusion and protect embedded systems against it.

It is in this context that Eric Asselin wrote his thesis, in particular by defining the constraints that an intrusion detection solution should comply with and the properties that it should have, as well as the form it should adopt to best integrate it into the target systems. The underlying idea is to take advantage of the maturity and experience of information technologies (IT) to define and model intrusion detection technologies applicable to the embedded avionics architectures at risk. Particular emphasis was placed on exploring the theoretical methods most likely to maximise the levels of reliability and relevance (true positive/false positive) of the events that would be detected by

technologies de détection d'intrusion applicables aux architectures avioniques embarquées exposées. Un accent particulier a été mis sur l'exploration des méthodes théoriques les plus à même de maximiser les niveaux de fiabilité et de pertinence (vrais positifs/faux positifs) des événements qui seraient détectés par la solution. D'autre part, les problématiques de classification des anomalies remontées (précision, taxonomie) et des modes de réaction possibles ont également été l'objet d'une analyse approfondie qui a mené à un prototypage d'une solution possible.

Dans un contexte de protection des communications bord/sol, une étude a été réalisée sur l'adéquation des moyens de cryptographie symétrique et notamment la problématique du partage du secret. En effet, la compromission d'une clé (c.-à-d., le secret) entraîne la perte de toute la sécurité des communications. Même si des mécanismes permettent le changement sécurisé des clés en vol, le problème à résoudre est celui du partage de la première clé : celle-ci doit être présente dans le satellite dès le tir, afin de pouvoir établir la première communication. En conséquence cette dernière se doit d'être injectée dans l'équipement de sécurité du satellite juste avant le tir. Cependant, l'injection de la première clé est une opération délicate car ceci suppose une protection du lien physique entre l'injecteur et l'équipement de sécurité afin d'éviter toute compromission.

Aussi, des méthodes de cryptographie asymétrique, dite aussi à clé publique (*Public Key Infrastructure* - PKI) permettent de résoudre ce problème et sont utilisées depuis de nombreuses années pour l'échange de clés dans les communications bancaires et le e-commerce. C'est dans ce contexte que cette étude a démontré l'application possible de ces méthodes au domaine spatial.

SYSTÈMES EMBARQUÉS AVIONIQUES

Enfin et comme souligné en introduction, on peut noter l'apparition d'études sur les systèmes embarqués avioniques au travers de deux projets d'études financés par AIRBUS en partenariat avec TeSA.

Le premier projet visait à analyser et valider une nouvelle architecture de communication basée sur la technologie *Avionic Full Duplex* (AFDX), en vue de son intégration à bord des aéronefs futurs. Le réseau de communication avionique actuel n'est pas optimal en termes de câblages et consommation électrique. Ces limitations induisent des coûts d'implémentation et d'utilisation très élevés. Cette étude a eu pour objectif la réduction de ces coûts prohibitifs grâce à une solution innovante basée sur une

the solution. Furthermore, the problems of classifying the anomalies reported (accuracy, taxonomy) and possible reaction modes were also the subject of an in-depth analysis that led to the prototyping of a possible solution.

In a context of protecting on-board and ground communications, a study was carried out on the adequacy of symmetrical cryptography systems and in particular the problem of sharing secrecy. Indeed, the divulgation of a key (i.e. breaching secrecy) leads to the loss of all communication security. Even though there are mechanisms enabling the secure changing of keys in flight, the problem to be solved is the sharing of the first key, which must be present in the satellite as soon as it has been launched, in order to establish the first communication. Consequently, the latter must be injected into the satellite's security equipment just before the launch. However, the injection of the first key is a delicate operation because this requires protecting the physical link between the injector and the security equipment in order to avoid any breach of security.

Also, asymmetric cryptographic methods, also known as public key infrastructure (PKI), can solve this problem and have been used for many years, for exchanging keys in banking and e-commerce communications. It is in this context that the study has demonstrated the possible application of these methods to the space domain.

EMBEDDED AVIONICS SYSTEMS

Finally, and as emphasised in the introduction, we may note the emergence of studies on embedded avionics systems through two study projects financed by AIRBUS in partnership with TeSA.

The first project aimed to analyse and validate a new communication architecture based on Avionic Full Duplex (AFDX) technology, with a view to its integration on future aircraft. The current avionics communication network is not optimal in terms of wiring and power consumption. These limitations lead to very high implementation and operating costs. The purpose of this study was to reduce these prohibitive costs through an innovative solution based on wireless technology while keeping long-term evolution in mind.

technologie sans-fil tout en visant à répondre à des objectifs d'évolution sur le long terme.

Le langage de programmation appelé *Programming Protocol-independent Packet Processor* (P4) permet de spécifier à un haut niveau le comportement d'un élément actif (par exemple un commutateur) lorsqu'il reçoit une trame. Cela permet d'avoir un commutateur dont le comportement est facilement modifiable, et donc indépendant du protocole de communication sous-jacent. Ce second projet cherchait à évaluer la pertinence de ce langage de programmation dans le cadre d'un réseau Ethernet commuté avion. L'idée serait de pouvoir disposer d'un commutateur AFDX, fondé sur un commutateur sur étagère, programmable avec le langage P4. En outre, un des objectifs de ce projet fut d'évaluer jusqu'à quel point ce commutateur programmable serait en mesure d'intégrer les mécanismes de qualité de service envisagés dans le cadre de l'évolution de l'AFDX. Enfin, un tel commutateur permettrait la mise en œuvre simple et bon marché de plateformes de test.

Programming Protocol-independent Packet Processor (P4) is a programming language used to specify at a high level the behaviour of an active element (e.g. a switch) when it receives a frame. This makes it possible to have a switch whose behaviour is easily modifiable, and which is therefore independent of the underlying communication protocol. This second project sought to evaluate the relevance of this programming language in the context of an avionics switched Ethernet network. The idea would be to have an AFDX switch, based on an off-the-shelf switch, which can be programmed with the P4 language. In addition, one of the aims of this project was to evaluate the extent to which this programmable switch would be able to integrate the service quality mechanisms envisaged as part of the AFDX's evolution. Finally, such a switch would allow simple and inexpensive implementation of test platforms.



TéSA aux JC2 du CNES en 2017.

TeSA at the CNES young researcher days in 2017.

Liste des thèses soutenues

List of defended theses

Asselin Eric, *Systèmes de détection et de prévention d'intrusion adaptés au monde aéronautique embarqué*, thèse financée par RCF, soutenue le 28/06/2017 – *Intrusion detection for embedded aeronautical systems*, thesis sponsored by RCF, defended on 28/06/2017. Embauché par RCF (Collins Aerospace).

Bouttier Élie, *Systèmes de distribution de contenu hybride terrestre / satellite*, thèse cofinancée par CNES et TAS, soutenue le 05/07/2018 – *Content based routing schemes in hybrid satellite / terrestrial networks*, thesis sponsored by CNES and TAS, defended on 05/07/2018. Embauché par TAS.

Couble Yoann, *Optimisation de la gestion des ressources voie retour*, thèse cofinancée par CNES et TAS, soutenue le 03/09/2018 – *Optimisation for the return link of a multi-beam satellite*, thesis sponsored by CNES and TAS, defended on 03/09/2018. Embauché par ForCity.

Tauran Bastien, *Sur l'interaction entre protocoles de transport et fiabilisation couche liaison pour services mobile satellite*, thèse cofinancée par CNES et TAS, soutenue le 06/12/2018 – *On the interaction between transport protocols and link-layer reliability schemes for satellite mobile services*, thesis sponsored by CNES and TAS, defended on 06/12/2018. Embauché par Viveris.

Liste des projets

CNES

Démonstrateur PKI pour injection sécurisée de clés satellite,
type d'étude : R&T CNES,
domaine d'application : télécommunications spatiales et aéronautiques, avec TAS.

Gestion de bursts de trafic dans un segment sol-satellite,
type d'étude : étude métier CNES,
domaine d'application : télécommunications spatiales et aéronautiques.

Partage de charge et reroutage dynamique,
type d'étude : R&T CNES,
domaine d'application : télécommunications spatiales et aéronautiques.

Partage de charge et interactions satellites GEO et constellation LEO,
type d'étude : R&T CNES,
domaine d'application : télécommunications spatiales et aéronautiques.

THALES ALENIA SPACE

Optimisation de pile TCP pour PEP,
type d'étude : recherche appliquée,
domaine d'application : télécommunications spatiales et aéronautiques.

ÉTUDES EXTERNES (POUR DES NON-MEMBRES DE TÉSA)

SATNEX IV – WIS – Impact of Future ICN Traffic on Multiple Access Schemes,
type d'étude : expertise,
domaine d'application : télécommunications spatiales et aéronautiques, avec l'ESA.

List of projects

CNES

PKI demonstrator for secure injection of satellite keys,
type of study: CNES R&T,
application field: spatial and aeronautical telecommunications, with TAS.

Traffic burst management in ground-satellite link,
type of study: specific study,
application field: spatial and aeronautical telecommunications.

Load sharing and dynamic rerouting,
type of study: CNES R&T,
application field: spatial and aeronautical telecommunications.

GEO and LEO satellite load sharing and interactions,
type of study: CNES R&T,
application field: spatial and aeronautical telecommunications.

THALES ALENIA SPACE

Optimisation of TCP stack for PEP,
type of study: applied research,
application field: spatial and aeronautical telecommunications.

EXTERNAL STUDIES (FOR NON-MEMBERS OF TESA)

SATNEX IV – WIS – Impact of Future ICN Traffic on Multiple Access Schemes,
type of study: expertise,
application field: spatial and aeronautical telecommunications, with ESA.

Dimensionnement de réseaux avion,
type d'étude : recherche appliquée,
domaine d'application : télécommunications
spatiales et aéronautiques,
avec AIRBUS.

Évaluation de P4 pour réseaux embarqués avions,
type d'étude : recherche appliquée,
domaine d'application : télécommunications
spatiales et aéronautiques,
avec AIRBUS.

ATN transport layer comparison,
type d'étude : expertise,
domaine d'application : télécommunications
spatiales et aéronautiques,
avec EUROCAE.

Avionic network design,
type of study: applied research,
application field: spatial and aeronautical
telecommunications,
with AIRBUS.

P4 performance for embedded avionic networks,
type of study: applied research,
application field: spatial and aeronautical
telecommunications,
with AIRBUS.

ATN transport layer comparison,
type of study: expertise,
application field: spatial and aeronautical
telecommunications,
with EUROCAE.

Liste des publications et brevets Publication and patent list

ANNÉE 2018 – YEAR 2018

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

[J.2018.1] Tauran Bastien, Lochin Emmanuel, Lacan Jérôme, Arnal Fabrice, Gineste Mathieu and Kuhn Nicolas, *Impact of Delayed Acknowledgments on Transport Layer Performance over Low Orbit Constellations*, Journal of Spacecraft and Rockets, special issue, December, 2018.

[J.2018.2] Thibaud Adrien, Fasson Julien, Arnal Fabrice, Pradas David, Dubois Emmanuel and Chaput Emmanuel, *QoE enhancements on Satellite Networks through the Use of Caches*, International Journal of Satellite Communications and Networking, pp. 1-13, June, 2018.

[J.2018.3] Couble Yoann, Rosenberg Catherine, Chaput Emmanuel, Dupé Jean-Baptiste, Baudoin Cédric and Beylot André-Luc, *Two-Color Scheme for a Multi-Beam Satellite Return Link : Impact of Interference Coordination*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 36, pp. 993-1003, May 2018.

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

[C.2018.1] Tauran Bastien, Lochin Emmanuel, Lacan Jérôme, Arnal Fabrice, Gineste Mathieu and Kuhn Nicolas, *Controlled Delay Scheduler for VoIP over LEO constellations on LMS channels*, In Proc. 9th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS), Berlin, Germany, September 10-12, 2018.

[C.2018.2] Thibaud Adrien, Fasson Julien, Arnal Fabrice, Pradas David, Dubois Emmanuel and Chaput Emmanuel, *Evaluation de l'impact de caches pour de la video adaptative par satellite*, In Proc. CORES, Roscoff, France, May 28-29, 2018.

[C.2018.3] Tran N'Guyen Hoang Alexandre, Pirovano Alain, Larrieu Nicolas, Pelleschi Stéphane and Brossard Alain, *IP Mobility in Aeronautical Communications*, In Proc. 13th International Workshop on Communication Technologies for Vehicles, Madrid, Spain, May 17-18, 2018.

BREVETS – PATENTS

[B.2018.1] Baudoin Cédric, Couble Yoann, Deleu Thibault, Dupé Jean-Baptiste and Chaput Emmanuel, *PROCÉDÉ D'ALLOCATION DE FRÉQUENCES DANS UN SYSTÈME DE RADIOCOMMUNICATION SATELLITAIRE MULTIFAISCEAUX, ET SYSTÈME ASSOCIÉ*, n° 071015 FR RQDLV 26-02-18 BRU-AMA, February 2018.

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

[C.2017.1] Bouttier Élie, Dhaou Riadh, Arnal Fabrice, Baudoin Cédric, Dubois Emmanuel and Beylot André-Luc, *Analysis of content size based routing schemes in hybrid satellite / terrestrial networks*, In Proc. IEE Globecom, Washington, USA, December 4-8, 2017.

[C.2017.2] Tauran Bastien, Lochin Emmanuel, Lacan Jérôme, Arnal Fabrice, Gineste Mathieu and Kuhn Nicolas, *Impact of Delayed Acknowledgment on TCP Performance over LEO Satellite Constellations*, In Proc. Fifth Federated and Fractionated Satellite Systems Workshop, Toulouse, France, November 2-3, 2017.

[C.2017.3] Tauran Bastien, Lochin Emmanuel, Lacan Jérôme, Arnal Fabrice, Gineste Mathieu, Clarac Laurence and Kuhn Nicolas, *Making H-ARQ Suitable for a Mobile TCP Receiver over LEO Satellite Constellations*, In Proc. 9th EAI International Conference on Wireless and Satellite Systems (PSATS), Oxford, United Kingdom, September 14-15, 2017.

[C.2017.4] Couble Yoann, Chaput Emmanuel, Deleu Thibault, Baudoin Cédric, Dupé Jean-Baptiste, Bès Caroline and Beylot André-Luc, *De la coordination optimale d'interférence sur le lien montant*, In Proc. Rencontres Francophones sur la Conception de Protocoles, l'Évaluation de Performance et l'Expérimentation des Réseaux de Communication, Quiberon, France, May 29-June 02, 2017.

[C.2017.5] Couble Yoann, Chaput Emmanuel, Deleu Thibault, Baudoin Cédric, Dupé Jean-Baptiste, Bès Caroline and Beylot André-Luc, *Interference-Aware Frame Optimization for the Return Link of a Multi-Beam Satellite*, In Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, France, May 21-25, 2017.



Selma Zamoum présente sa thèse aux JC2 du CNES en 2018.

Selma Zamoum presenting her thesis at the CNES young researcher days in 2018.

Vie du laboratoire

Les séminaires TéSA

Les séminaires TéSA sont un outil de dialogue scientifique et de partage. Organisés par la représentante ou le représentant des doctorants au conseil scientifique, ils réunissent de façon trimestrielle la communauté TéSA pendant deux heures. Deux présentations se succèdent sur des domaines de recherche différents et les nombreuses questions montrent l'intérêt que suscitent ces exposés.

Ces séminaires sont donc des tutoriels pluridisciplinaires et leur objectif premier est de mettre en lumière les activités de recherche de nos doctorants et doctorantes. Mais ils peuvent également être l'occasion pour des membres plus « expérimentés » de TéSA, ou pour des invités de passage dans nos murs, de présenter leurs activités de recherche.

Durant la période 2017-2018, cinq séminaires « réguliers » ont été organisés :

- Avril 2017
 - **ÉLIE BOUTTIER** (doctorant TéSA) : Livraison de contenu sur un réseau hybride satellite-terrestre.
 - **ROMAIN CHAILLOT** et **CHARLES-UGO PIAT-DUROZOI** (doctorants TéSA) : Introduction aux Modulations à Phase Continue (CPM).
- Octobre 2017
 - **JULIEN LESOUPLE** (doctorant TéSA) : Estimation parcimonieuse et navigation par satellites.
 - **BASTIEN TAURAN** (doctorant TéSA) : Interaction protocoles de transport/fiabilisation MAC pour des services mobiles par satellite.
- Décembre 2017
 - **JACQUES SOMBRIN** (expert scientifique TéSA) : Modèles comportementaux non linéaires et produits d'intermodulation.
 - **YOAN COUBLE** (doctorant TéSA) : Répartition des fréquences dans un système satellite multifaisceau.
- Mars 2018
 - **ANTOINE AUGER** (postdoctorant TéSA) : Qualité des observations pour les systèmes Sensor Webs.
 - **SYLVAIN CLUZEL** (doctorant TéSA) : L'internet des objets (IoT) par satellite.

Laboratory life

The TeSA seminars

TeSA seminars are a forum for scientific dialogue and sharing. Organised by the doctoral students' representative on the Scientific Committee, they bring the TeSA community together for two hours, on a quarterly basis. Two presentations are successively made on different fields of research and always stimulate a high interest and a lot of questions.

The seminars are thus multidisciplinary tutorials whose primary objective is to highlight the research activities of our doctoral students. But they can also be an opportunity for more "experienced" members of TeSA, or for guests visiting our offices, to present their research activities.

During the period 2017-2018, five "regular" seminars were organised:

- April 2017
 - **ÉLIE BOUTTIER** (TeSA doctoral student): Content delivery over a hybrid satellite-terrestrial network.
 - **ROMAIN CHAILLOT** and **CHARLES-UGO PIAT-DUROZOI** (TeSA doctoral students): Introduction to Continuous Phase Modulations (CPM).
- October 2017
 - **JULIEN LESOUPLE** (TeSA doctoral student): Sparse estimation and satellite-based navigation.
 - **BASTIEN TAURAN** (TeSA doctoral student): Interaction of MAC transport/reliability protocols for mobile satellite services.
- December 2017
 - **JACQUES SOMBRIN** (TeSA scientific expert): Non-linear behavioural models and intermodulation products.
 - **YOAN COUBLE** (TeSA doctoral student): Frequency distribution in a multibeam satellite system.
- March 2018
 - **ANTOINE AUGER** (TeSA postdoctoral student): Quality of observations for Sensor Webs systems.
 - **SYLVAIN CLUZEL** (TeSA doctoral student): Internet of Things (IoT) by satellite.

■ Septembre 2018

- **SIMONE URBANO** (doctorant TéSA) : Les diagnostics et prédictions des vibrations sur les structures des avions.
- **MERYEM BENAMMAR** (enseignante-chercheuse à l'ISAE-SupAéro) : La « magie » des codes polaires.

En plus de ces séminaires, deux conférences ont été données :

- **JOSIANE ZERUBIA**, directrice de recherche INRIA Nice Sophia Antipolis et IEEE distinguished lecturer, a présenté en février 2017 un exposé intitulé « *Marked Point Processes for object detection and tracking in high resolution images : applications to remote sensing and biology* »
- et **José BIOUSCAS**, professeur de l'Université de Lisbonne, Portugal, un an plus tard, en février 2018 nous a parlé de « *Patch-based regularization in multiband imaging inverse problems* ».

Les supports utilisés lors de ces présentations sont accessibles sur le site Web de TéSA.

/// Les journées scientifiques

Le Conseil Scientifique de TéSA a pour vocation de favoriser le développement et l'épanouissement d'une vie de laboratoire de recherche dans la communauté TéSA. Les séminaires, qui permettent en particulier aux doctorants d'échanger sur leurs travaux et de s'ouvrir aux recherches des autres sont un élément important dans cette dynamique. Les journées scientifiques sont un autre élément.

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 2017 s'est tenue le 26 juin 2017 à la Cité de l'Espace. Ce sont d'abord les doctorant·e·s qui ont été mis·e·s à l'honneur : ils et elles nous ont présenté leurs travaux de recherche, et ce en relevant brillamment les quelques « contraintes artistiques » que nous leur avions imposées !

Jean-Claude Souyris, sous-directeur valorisation et technologies à la direction de l'innovation, des applications et de la science au CNES, nous a ensuite fait part de sa vision des activités spatiales actuelles et à venir. Une présentation particulièrement appréciée par la communauté TéSA !

■ September 2018

- **SIMONE URBANO** (TeSA doctoral student): Diagnostics and predictions of vibrations on aircraft structures.
- **MERYEM BENAMMAR** (teacher-researcher at ISAE-SupAero): The "magic" of polar codes.

In addition to these quarterly seminars, two talks have been given:

- **JOSIANE ZERUBIA**, research director at INRIA Nice, Sophia Antipolis and an IEEE distinguished lecturer, presented a paper in February 2017 entitled "Marked Point Processes for object detection and tracking in high resolution images: applications to remote sensing and biology"
- and **José BIOUSCAS**, professor at the University of Lisbon, Portugal, a year later, in February 2018, spoke to us about "Patch-based regularization in multiband imaging inverse problems".

The materials used in these presentations are available on the TeSA website.

/// The scientific days

The purpose of the TeSA Scientific Committee is to promote the development and growth of research laboratory life in the TeSA community. Seminars, which allow doctoral students in particular to discuss their work and to discover the research of others, are an important part of this process. The scientific days are another event to facilitate discussion.

The aim of these days (initiated in 2016) is to bring together each year the TeSA community (doctoral students, research engineers, academics, industrial partners) outside its usual premises in order to promote scientific discussions, in a friendly setting, around a unifying theme.

The 2017 edition was held in the Cité de l'Espace in Toulouse on 26 June 2017. First, it was the doctoral students who were honoured: they presented their research work to us, while brilliantly highlighting the few "artistic constraints" we had imposed on them!

Jean-Claude Souyris, valorisation and technology sub-director at the directorate for innovation, applications and science at CNES, then shared with us his vision of current and future space activities. His presentation was much appreciated by the TeSA community.

L'après-midi fut un peu ludique puisque nous avons improvisé de petites scénettes, par équipes mêlant doctorants, industriels et académiques. Un excellent moyen pour « briser la glace » et faciliter les échanges futurs !

En 2018, ces journées scientifiques se sont tenues sur 2 jours, comme en 2016, les 7 et 8 juin. Nous avons une fois encore ouvert ces journées par une présentation des doctorant·e·s avec lesquels nous avons ensuite pu discuter autour de posters résumant leurs travaux. Plus tard, nous avons comparé nos connaissances à l'occasion d'un « space burger ». Après ces échauffements intellectuels, nous avons assisté à une présentation de Clément Dudal, ingénieur CNES dans la sous-direction Radio-Fréquence qui nous a décrit l'aventure de la sonde Rosetta et tous les challenges qu'elle a dû relever. Cette présentation a été le point de départ d'une réflexion par équipe dont le but était de proposer des réponses à des questions soulevées par cette présentation et encore en suspens. Chaque équipe a présenté les résultats de ses réflexions comme une réponse à un appel à idées CNES. Deux d'entre elles ont été sélectionnées par C. Dudal et ses collègues du CNES pour les fusionner et les soumettre à l'appel à idées CNES suivant.

Ces deux nouvelles éditions des journées scientifiques de TéSA ont été deux réels succès. Elles nous prouvent une fois de plus qu'une ambiance sympathique est parfaitement compatible, et même propice, à des échanges scientifiques constructifs. Elles devraient donc se poursuivre dans les années à venir, probablement en respectant ce rythme d'une journée unique les années impaires alternant avec une édition plus longue les années paires.

The afternoon was quite entertaining since we improvised small scenes, with teams mixing doctoral students, industrial partners and academics. It was an excellent way to "break the ice" and facilitate future exchanges!

In 2018, the scientific days event lasted 2 days, as in 2016, on 7 and 8 June. We once again opened these days by introducing the doctoral students, with whom we were then able to discuss, in front of posters summarising their work. Later, we compared our knowledge over a 'space burger'. After this intellectual warm-up session, we attended a presentation by Clément Dudal, a CNES engineer in the Radio-Frequency sub-directorate, who described the adventure of the Rosetta probe and all the challenges that had to be met. This presentation was the starting point for dividing up into teams to suggest answers to questions that had been raised during the presentation and that were still pending. Each team presented the results of its reflections as a response to a CNES call for ideas. Two of them were selected by C. Dudal and his colleagues at CNES in order to merge and submit them to the next CNES official call for ideas.

These two new editions of the TeSA scientific days were both a success. They proved once again that a relaxed and friendly setting is perfectly compatible, and even conducive, to constructive scientific exchanges. They should therefore be continued in the coming years, probably with only one single day in odd years alternating with a longer edition in even years.

Collaborations

Depuis sa création, le TéSA mène ses activités scientifiques majoritairement pour ses membres partenaires qui sont le CNES, Thales Alenia Space, Collins Aerospace et depuis 2016, l'Institut de Recherche Technologique (IRT) Saint-Exupéry.

Ces activités offrent un cadre de collaboration pour les membres associés académiques (INPT, ISAE-Supaéro, ENAC et IMT Atlantique), comme dans l'étude *R-S16-TC-0008-029- Partage de charge et interactions satellite GEO et constellation LEO* qui a permis à deux équipes de chercheurs en réseaux de l'INPT et de l'ISAE-Supaéro de mutualiser leurs expertises. Dans le même esprit de mutualisation des compétences, l'étude *R-S17-TC-0008-031-Techniques de prédiction de trafic réseau* (en cours de finalisation) a conduit une équipe traitement du signal à proposer et développer des algorithmes répondant au

Collaborations

Since its creation, TeSA has conducted its scientific activities mainly for its partner members, CNES, Thales Alenia Space, Collins Aerospace and, since 2016, the *Institut de Recherche Technologique* (IRT) Saint-Exupéry.

These activities provide a collaborative framework for affiliated academic members (INPT, ISAE-Supaéro, ENAC and IMT Atlantique), as in study *R-S16-TC-0008-029- GEO and LEO satellite load sharing and interactions*, which enabled two teams of network researchers from INPT and ISAE-Supaéro to share their expertise. In the same spirit of pooling skills, the *R-S17-TC-0008-031- Techniques of network traffic prediction* study (currently being finalised) led a signal processing team to propose and develop algorithms to address the problem posed by the study, while a network team undertook to validate and calculate performances for scenarios adapted to the context.

problème posé par l'étude, tandis qu'une équipe réseau s'est chargée de la validation et du calcul des performances sous des scénarios adaptés au contexte.

La collaboration est au cœur même de TéSA, toujours partant pour de nouvelles problématiques recherche avec ses partenaires mais aussi avec d'autres entités, non membres de TéSA.

Ainsi, les collaborations avec des PME de la région Occitanie se poursuivent, avec M3 SYSTEMS et SILICOM autour d'activités dans la localisation et la navigation, ainsi qu'avec INGESPAC dont l'expertise permet de mettre en œuvre, en temps réel, les algorithmes développés au TéSA. De plus, les activités autour de l'AIS ont permis de consolider les liens établis avec CLS.

La dimension européenne est présente aussi au travers d'une étude pour EUROCAE et nos collaborations avec COBHAM. Les liens avec des universitaires européens sont aussi largement développés à TéSA, par exemple avec l'Université d'Heriot-Watt à Édimbourg, donnant lieu à de nombreux échanges : dans ce cadre, Julian

Collaboration is what TeSA is all about, as it is always willing to tackle new research issues with its partners but also with other organisations that are not members of TeSA.

It thus continues to work with SMEs in the Occitanie region, with M3 SYSTEMS and SILICOM on activities in positioning and navigation, as well as with INGESPAC, whose expertise allows the algorithms developed at TeSA to be run in real time. In addition, TeSA has consolidated its relationship with CLS through activities around the AIS.

TeSA also has a European dimension through a study for EUROCAE and our collaborations with COBHAM. Links with European academics have also been widely developed at TeSA, for example with the University of Heriot-Watt in Edinburgh, which has led to numerous exchanges: in this context, Julian Tachella, a doctoral student co-supervised by Yoann Altmann (Univ. Heriot-Watt)



Visite dans nos locaux de Nadia Pellefigue, Vice-Présidente de la région Occitanie, février 2018.
Visit to our offices of Nadia Pellefigue, Vice-President of the Occitanie Region, February 2018.

Tachella, doctorant co-encadré par Yoann Altmann (Univ. Heriot-Watt), Stephen Mc Laughlin (Univ. Heriot-Watt) et Jean-Yves Tournet (INPT) a fait plusieurs séjours à TéSA.

Les doctorants TéSA peuvent aussi développer des collaborations internationales : Lorenzo Ortega, doctorant TéSA, a développé plusieurs collaborations dans le cadre de sa thèse et a ainsi été invité à passer un mois à l'Université Northeastern de Boston pour travailler avec Pau Closas, professeur dans cette université. De la même façon, Yoann Couble a passé un mois à l'université de Waterloo, accueilli par la professeur Catherine Rosenberg (titulaire de la *Canada Research Chair in the Future Internet*). Cette collaboration a en particulier donné lieu à une publication dans *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*.

Enfin, 2017 et 2018 auront été l'occasion pour TéSA de nouer des liens avec la Colombie et le Pérou. Dans le cadre d'un projet commun, Henry Arguello, professeur à l'Université Santander à Bucaramanga en Colombie et Paul Rodriguez, professeur à l'Université PUCP à Lima, au Pérou et Jean-Yves Tournet, professeur à l'INP Toulouse, ont établi une collaboration qui a permis des visites de part et d'autre. Ainsi, Julien Lesouple, doctorant TéSA a fait un séjour de deux semaines en 2017 en Colombie et les équipes colombiennes et péruviennes sont venues passer plusieurs semaines à TéSA, en 2017 et 2018. Au moment de l'écriture de ce rapport, cette collaboration se poursuit et permettra à une autre doctorante TéSA d'aller faire un séjour de quelques semaines à Lima au Pérou. De belles occasions de rencontres enrichissantes, tant sur le plan scientifique qu'humain !

and Stephen Mc Laughlin (Univ. Heriot-Watt) and Jean-Yves Tournet (INPT) has made several visits to TeSA.

TeSA doctoral students can also develop international ties: Lorenzo Ortega, a PhD candidate at TeSA, has collaborated with several people as part of his thesis and has been invited to spend a month in Boston, to work with Pau Closas, a professor at Northeastern University. Similarly, Yoann Couble spent a month at the University of Waterloo, hosted by Professor Catherine Rosenberg (holder of the Canada Research Chair in the Future Internet). This collaboration led to a publication in the *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*.

Finally, in 2017 and 2018 TeSA was able to establish links with Colombia and Peru. As part of a joint project, Henry Arguello, Professor at the University of Santander in Bucaramanga, Colombia, Paul Rodriguez, Professor at the University of PUCP in Lima, Peru, and Jean-Yves Tournet, Professor at the INP Toulouse, made arrangements for collaboration that allowed reciprocal visits. Julien Lesouple, a TeSA doctoral student, spent two weeks in Colombia in 2017 and the Colombian and Peruvian teams spent several weeks in TeSA in 2017 and 2018. At the time of writing this report, they are still collaborating and another TeSA doctoral student will be spending a few weeks in Lima, Peru. Their work together has been the opportunity for enriching encounters, both scientifically speaking and in terms of personal relationships!

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. Mais d'autres événements contribuent aussi au rayonnement de TéSA :

- Les prix de thèse : Yoann Couble, qui a soutenu sa thèse en septembre 2018, sur l'optimisation de la gestion des ressources sur la voie retour, a reçu le Prix Leopold Escande qui récompense chaque année les meilleures thèses de l'INP Toulouse.
- Les récompenses aux Journées CNES jeunes chercheurs (JC2) : chaque année, le CNES réunit ses doctorants entrant dans leur dernière année de thèse : en octobre 2018, Selma Zamoum, doctorante TéSA, a été une des 7 doctorants primés lors de ces journées.

TeSA outreach

TeSA activities are, of course, widely disseminated via the peer-reviewed journal articles or conference presentations listed above in this report. However, other events also contribute to TeSA's reputation.

- Thesis prizes: Yoann Couble, who defended his thesis on the optimisation of resource management on the return path in September 2018, received the Leopold Escande Prize, which each year rewards the best theses from the INP Toulouse.
- The awards at the CNES Young Researchers Days (JC2 *Jeunes Chercheurs*): each year, the CNES brings together its doctoral students entering the final year of their thesis: in October 2018, Selma Zamoum, a TeSA doctoral student, was one of the 7 doctoral students awarded a prize during these days,

- Les brevets : en 2017 et 2018, trois brevets ont été déposés dans le cadre de thèses TéSA. De plus, lors des Lauriers de l'INP Toulouse, les doctorants Julien Lesouple, Yoann Couble, Selma Zamoum et Simone Urbano, ainsi que notre expert scientifique Jacques Sombrin ont obtenu des récompenses.
- La participation à des manifestations scientifiques : en juin 2018, comme en 2016, TéSA était présent au Toulouse Space Show, invité sur le stand du CNES : cela a été l'occasion de rencontres et de présentations de TéSA aux nombreux acteurs du spatial, grands groupes et organismes, PME, étudiants qui passaient sur le stand du CNES, positionné en entrée de l'espace des exposants.
- L'intérêt de la Région pour TéSA : en février 2018, nous avons eu la visite de Nadia Pellefigue, vice-Présidente de la Région Occitanie qui après une discussion autour de la présentation de TéSA, s'est intéressée aux travaux réalisés par les doctorants et ingénieurs de recherche de TéSA.

- Patents: in 2017 and 2018, three patents were filed as part of TeSA theses. Moreover, during the *Lauriers de l'INP Toulouse*, doctoral students Julien Lesouple, Yoann Couble, Selma Zamoum and Simone Urbano, as well as our scientific expert Jacques Sombrin have been rewarded.
- Participation in scientific events: in June 2018, as in 2016, TeSA participated in the Toulouse Space Show, having been invited to share the CNES stand: this was the occasion for meeting and introducing TeSA to the many space stakeholders, large groups and organisations, SMEs and students who visited the CNES stand, located at the entrance to the exhibitors' space.
- The Region's interest in TeSA: in February 2018, Nadia Pellefigue, Vice-President of the Occitanie Region, came to visit us. After a discussion following the presentation of TeSA, she learnt more about the work being done by TeSA's doctoral students and research engineers.



TéSA présent sur le stand du CNES au Toulouse Space Show 2018.
TeSA present on the CNES booth in the Toulouse Space Show 2018.



Tendances et perspectives

Trends and perspectives

Les tendances et perspectives dans les 4 domaines au cœur des compétences de TESA et décrites dans le précédent rapport d'activité restent d'actualité. Il est cependant important d'identifier les ruptures technologiques et les évolutions dans les usages ainsi que les moyens utilisés pour répondre aux nouveaux besoins. À titre d'exemple, on peut citer les axes de recherche suivants

- Développement de l'usage des drones, des robots terrestres ou marins et émergence rapide du véhicule autonome grand public. Pour ces applications, la continuité de service du positionnement précis et la détection d'anomalies en temps réel devient une exigence sécuritaire majeure (très faible latence dans la détection des erreurs, leur analyse et l'acheminement des corrections).
- Développement des besoins d'observation et de surveillance (évolution de l'environnement, surveillance des activités maritimes et aéronautiques, protection du territoire). Les innovations dans ce domaine seront favorisées par l'exploitation des données spatiales (Copernicus, Galileo et constellations GPS diverses).
- Développement des réseaux radio faible débit, basse consommation, adaptés à l'Internet des objets (IoT) mais également de réseaux à très haut débit optimisant les diversités possibles (spatiale, fréquentielle, temporelle). Ces évolutions se feront au travers de l'hybridation de la 5G avec le réseau terrestre.
- Les évolutions des outils de communication aéronautiques, rendues nécessaires par l'accroissement des besoins, incitent à envisager ici aussi la convergence vers des techniques de communication grand public (4G, 5G).
- L'émergence de l'intelligence artificielle et de tous ses outils appelle à conserver la maîtrise des théories sous-jacentes, afin de ne pas en devenir un simple utilisateur et de

The trends and prospects in the four core research fields of TeSA, described in the previous activity report, are still valid. It is however important to identify the technological breakthroughs and evolution in applications as well as the means used to meet new needs. For example, we might mention the following lines of research.

- Development of the use of drones, terrestrial or marine robots and the rapid emergence of driverless vehicles. For these applications, service continuity for precise, real-time positioning and anomaly detection has become a major safety requirement (very short latency for error detection, their analysis and correction transmissions).
- Development in observation and surveillance needs (environmental evolution, surveillance of maritime and aeronautical activities, national defence). Innovations in this domain will benefit from the exploitation of satellite data (Copernicus, Galileo and different satellite constellations).
- Development of low throughput, low power consumption radio networks, suitable for the Internet of Things (IoT) but also of very high throughput networks that optimise all available (spatial, frequential, temporal) diversities. These evolutions will take place through the hybridisation of 5G with terrestrial networks.
- The evolution of aeronautical communication systems, made necessary by the growth of demand, also leads to consider merging with consumer communication means (4G, 5G).
- The emergence of artificial intelligence and all its tools requires to maintain the expertise in underlying theories, to not become a mere user but keep the capacity for analysis and innovation.

conserver une capacité d'analyse et d'innovation.

Les tendances et perspectives analysées à partir des évolutions et des ruptures, qu'elles soient induites par les usages ou les technologies, sont souvent à l'intersection des domaines de compétences de TéSA. Nous détaillons dans ce qui suit plusieurs projets en cours ou qui feront potentiellement l'objet d'études futures, dans les 4 domaines d'application de TéSA.

Localisation et navigation

Beaucoup s'accordent à dire que la prochaine révolution de notre aire sera la révolution robotique. On perçoit les prémices de ce grand changement à travers l'émergence de véhicules de plus en plus autonomes. Les applications de tels véhicules vont de la voiture personnelle (*advanced driver assistance systems* ou véhicules totalement autonomes), aux transports collectifs, à l'agriculture, en passant par les drones aériens, terrestres ou maritimes, civils ou militaires...

Un des verrous à adresser pour améliorer ces systèmes passe par l'amélioration de la précision et de la robustesse de positionnement. Seuls les systèmes de navigation par satellite permettent un positionnement absolu en tous points de la surface du globe non masqué. Cependant, il existe en pratique de nombreuses causes tendant à dégrader cette information. Parmi les plus difficiles à combattre, on peut citer les interférences volontaires ou involontaires (du fait du faible niveau du signal utile) et les multitrajets en environnement contraint (canyon urbain, indoor).

Les pistes proposées pour combattre ces effets limitants passent par une amélioration du traitement du signal actuel (réseaux d'antennes, *vector tracking loops*, temps d'intégration longs, filtres adaptatifs, traitements poussés de la phase des codes pseudo-aléatoires ou porteuses reçus, traitement des nouveaux signaux GNSS utilisant des signaux large bande...) ou par l'exploitation de sources d'information complémentaires. Dans cette dernière catégorie, on peut citer l'exploitation conjointe de plusieurs constellations mondiales (GPS, GALILEO, GLONASS, BEIDOU, ...) ou régionales (NAVIC, MICHIBIKI, EGNOS, WAAS, GAGAN, ...), l'exploitation simultanée des différentes fréquences porteuses émises (correction ionosphérique, méta signaux GNSS, lever d'ambiguïté de phase...), et le filtrage des erreurs par les dynamiques Doppler accrues telles que l'apportent les constellations en orbite basse.

The trends and prospects analysed on the basis of evolutions and breakthroughs, whether these are developed to meet new demands or as spinoffs for new technology, often intersect TeSA's spheres of competence. We shall describe below several projects that are either ongoing or which may be covered by future studies, in TeSA's fields of application.

Positioning and navigation

Many people agree that the next revolution in our era will be robotics. We are beginning to see the first signs of this major change in the emergence of vehicles that are more and more autonomous. Applications for such vehicles include the personal car (*advanced driver assistance systems* or totally autonomous vehicles), public transport, as well as civil or military drones or vehicles used for agriculture.

One of the problems to be overcome for improving these systems is that of positioning accuracy and robustness. Only satellite navigation systems enable absolute positioning at all visible points on the surface of the Earth. However, in practice there are many factors that tend to degrade this information. Among the most difficult to resolve are voluntary or involuntary interferences (for weak signal-to-noise ratios) and multiple paths in constrained environments (urban canyons, indoors).

Ideas that have been proposed for overcoming these limitations include improving current signal processing block (antenna arrays, vector tracking loops, long integration times, advanced processing of the carrier phase received, processing of new GNSS signals using broadband signals, etc.) or by exploiting complementary sources of information. In this latter category, we might mention the joint exploitation of several constellations, either global (GPS, GALILEO, GLONASS, BEIDOU, ...) or regional (NAVIC, MICHIBIKI, EGNOS, WAAS, GAGAN, ...), the simultaneous exploitation of different carrier frequencies transmitted (correction of ionospheric effects, GNSS meta signals, phase ambiguity fixing), and the filtering of errors by high Doppler dynamics brought about by low orbit constellations.

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. 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 depuis quelques mois 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 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. L'augmentation des performances de mesure de type distance une fois la correction ionosphérique bifréquence faite est également l'une des clefs des études nécessaires. Le TESA est positionné pour poursuivre ses contributions à l'étude de tous ces nouveaux signaux GNSS et de leurs performances, ainsi qu'à leur conception.

Les applications scientifiques du GNSS requièrent généralement une précision maximum des mesures. La précision de positionnement 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...).

The European satellite navigation infrastructure is now fully operational, and benefitting from the development of new applications and new processing of signals and raw measurement data. 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 for some months now, with its spread spectrum pilot signals and its project for a new precise positioning service (PPP). The Korean Positioning System (KPS) also provides for the use of S-band in addition to L-band. The S-band in question is also the only downlink band authorised for mobile satellite communications (MSS) and Radio Determination Satellite Systems (RDSS) such as GNSS. Synergies 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 further studies that are needed. TeSA is ready to continue contributing to the study of all these new GNSS signals and their performance, as well as their design.

Scientific GNSS applications generally require maximum measurement accuracy. Positioning accuracy may be improved by fusing measurements acquired by other sensors. In this context, we may distinguish between estimation techniques (*dead reckoning*), which usually exploit an inertial unit or odometer (which may be extended to cameras or altimeters), techniques exploiting opportunity sources (LTE cells, Wi-Fi, Globalstar, Iridium, GNSS transmitter on the ground or in buildings, pseudolites, 5G connections, IoT connections,...). These techniques are based on a priori mapping but they may be extended to the case in which the environment is only partially known (*Simultaneous Localization And Mapping*, SLAM). Another approach which falls into this theme of data fusion, consists in doing cooperative or collaborative positioning with a set of receivers which then share their information. This improvement in positioning accuracy goes hand-in-hand with the perfecting of techniques for determining the integrity of the information and for authenticating it. Indeed, in several applications, the confidence that one may have in the position information is as important as its value (civil aviation, vehicle fleet management, automatic tollbooths, etc.).

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 systèmes de navigation (GPS, GALILEO, ...) 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 TéSA 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.

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. Il en est de même pour les observations du même type provenant de drones volants, ou d'essais 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 bénéficier dans des projets futurs. L'exploitation de données issues de sources d'information plus originales est également intéressante. On évoque par exemple de plus en plus d'interpréter des données d'observation spatiale avec des images acquises à l'aide de réseaux sociaux (géo-intelligence) ou d'utiliser les signaux de télécommunications pour l'identification d'utilisateurs. Enfin, le déploiement des satellites Sentinel, qui fournissent gratuitement des images d'une zone d'intérêt avec une répétitivité importante (tous les 5 jours),

Finally, with the anticipated proliferation of devices capable of communication, it will be difficult to administer the global communications networks in a simple manner. The broadcasting of a very precise time references by navigation systems (GPS, GALILEO, etc.) should offer 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 be equipped with 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 radio navigation 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.

To conclude, we might note that the latest evolutions in terms of on-board processors and software radio (software-defined GNSS receiver) and integrated RF receivers (SoC) will certainly provide more flexibility and open-endedness for the solutions envisaged.

Earth observation

The deployment of systems for broadcasting space data (Copernicus, "New Space" observation mega-constellation) rapidly increases the number of innovative applications based on data analysis and fusion. The same applies for comparable observations provided by aerial drones or drone swarms (either tightly or loosely meshed). The aim in this case, for these space and aeronautical, is to take advantage of the complementarity of information acquired by different sensors such as optical, radar and hyperspectral sensors, synthetic aperture radar, radiometry, broad-sense radiofrequency...; TeSA has a great deal of experience in this field which it could contribute to future projects. The exploitation of data from more diverse sources of information is also interesting. There is more and more talk for instance of interpreting satellite observation data by means of images acquired through social networks (Geo-intelligence) or of using telecommunications signals for identifying users. Finally, the deployment of the Sentinel satellites, which provides free of charge, images for a zone of interest with significant revisit capability (once every five days), revolutionise the remote sensing

révolutionne la communauté du traitement d'images d'observation de la Terre qui intensifie ses travaux concernant l'analyse d'images multitemporelles. TéSA s'investit naturellement dans ce domaine.

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.

Le domaine de l'observation optique ou radar de la terre par satellite ou aéronefs 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 entre les utilisations de la bande X, de la bande Ka et des bandes du marché de masse des fibres optiques. Suite à ses travaux dans ce domaine, le TéSA reste positionné sur les études et simulations de système de transmission de données dans ce domaine, 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. Cela rejoint là encore un domaine d'excellence de TéSA.

and image processing community, thus intensifying their work on multi-temporal image analysis. TeSA is naturally investing in this field.

The Internet of Things (IoT) combined with low-consumption communication networks, has led to an increase in sensors for measuring physical and chemical quantities, that cannot be acquired by satellite observation. The data from these sensors is currently collected by terrestrial radio networks. However recent experiments have made it possible to confirm that low Earth orbit (LEO) satellites will be able to receive this kind of data. Satellite data will thus be enriched with that provided by a large number of low-cost sensors on the ground, in a plane or at sea, carried by vehicles either remotely piloted or not, thus improving the monitoring and evolution of environmental parameters. In this emerging context, TeSA clearly has a role to play.

The field of optical or radar observation of the Earth by satellite or aircraft further includes the on-board image chain, which also concerns radiometry or radio frequency observations in the broad meaning of the term. This image chain includes in particular the mass memory, and the radio frequency or optical transmission chain. The future of massive direct-to-Earth dissemination of Earth observation satellite data is divided between the X-band, Ka-band and fibre optic consumer market bands. Following its work in this field, TeSA remains involved in studies and simulations of data transmission systems in this field, for which synergy with space telecommunication systems is increasing in terms of frequencies, modulations, synchronisations and coding. For example, DVB-S2 modulations and encodings are already widely used for 'new space' 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 are possible for this type of application. This is another sphere in which TeSA excels.

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 visent maintenant des capacités de plusieurs centaines de Gigabit/s jusqu'au Terabit/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 seconde tendance majeure concerne la flexibilité de ces systèmes. L'introduction de processeurs numériques transparents ou de solutions entièrement régénératives ainsi que la mise en œuvre de multiplexage temporel de la ressource (*beam hopping*) vont permettre 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 espace des fréquences.

Enfin, les constellations de satellites connaissent un renouveau important avec des systèmes tels que Iridium ou OneWeb et de nombreuses initiatives autour des nano/micro satellites. L'irruption des mega-constellations avec les initiatives de Telesat, de Amazon avec le projet Kuiper ou de SpaceX avec Starlink 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 télécoms spatiales : antennes actives, régénération et traitement bord, lien inter-

Satellite communications

Satellite telecommunications are currently undergoing a real revolution with the introduction of several techniques that increase throughput while reducing acquisition and operation costs. These systems are now aiming at capabilities of several hundreds of gigabits per second up to Terabits per second with coverage of several hundreds of spots for geostationary satellites. To meet these ever-increasing band needs, use of the Q/V band will be a focus of forthcoming evolutions and higher frequency bands (W, optical) are now being considered. Since these higher frequency bands are characterised by strong attenuation, they require the implementation of a wide range of satellite-based solutions as well as the corresponding scheduling. On the return channel, coordinated techniques for fighting interference require designs adapted to the specific context of satellite communications.

The second major trend concerns the flexibility of these systems. The introduction of transparent digital processors or entirely regenerative solutions as well as the implementation of temporal multiplexing of the resource (*beam hopping*) will enable great flexibility and make it possible to adapt the resources offered by these systems to users' demands for coverage. Indeed, the variability of traffic requires the most dynamic allocation possible of resources, for example by means of time or space frequency-sharing techniques.

Finally, satellite constellations are again becoming widespread with systems such as Iridium or OneWeb and the many initiatives with nano/micro satellites. The emergence of mega-constellations with the initiatives of Telesat, of Amazon with the Kuiper project or of SpaceX with Starlink is profoundly changing the satellite telecommunications market. Indeed, these 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. Furthermore, stratospheric platforms are also considered to be

satellites optiques, flexibilité. En outre, les plateformes stratosphériques sont également vues comme un complément aux systèmes satellites, que ce soit en termes de relai ou d'extension/densification de couverture.

Pour compléter ce panorama, 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 TéSA est bien positionné, que cela soit pour les constellations de radiocommunication en orbite basse ou moyenne, et les satellites géostationnaires. De même, le TéSA est en mesure de réaliser des calculs d'interférences entre les systèmes de télécommunication spatiales (ou terrestres) et les systèmes de radionavigation par satellites.

a complement to satellite systems, whether by acting as a relay or by extending/intensifying coverage.

To complete this overview, we should note that these evolutions also affect the ground segment with a strong trend towards virtualisation of the user segment and towards improving convergence with terrestrial networks, particularly in the context of 5G.

To conclude, as far as applications are concerned, stakeholders in the field are mainly concerned about new markets, within particular mobile platforms (aircraft, ships, etc.) and Machine Type Communication. This latter field has very specific characteristics, whether in terms of traffic generated, the number of devices envisaged or power supply constraints.

Finally, the hybridisation of space 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. Similarly, TeSA is able to calculate interference between satellite (or terrestrial) telecommunication systems and satellite radio navigation systems.

Systèmes de communication aéronautiques

La croissance continue et significative du trafic aérien (supérieure à 5% au niveau mondial), induit des évolutions drastiques du système de gestion du trafic aérien. L'essentiel de ces évolutions touchent à l'usage de meilleures prédictions des trajectoires pour travailler plus de manière stratégique que tactique. La gestion tactique du trafic est très consommatrice au niveau des contrôleurs aériens alors qu'une gestion stratégique permettrait de gérer beaucoup plus d'avions simultanément créant ainsi une augmentation de la capacité du système. Pour répondre à ces objectifs les échanges d'informations entre avion (équipage et systèmes) et systèmes de gestion au sol doivent fortement augmenter.

Par ailleurs l'évolution des technologies en matière de gestion de données a permis le

Aircraft communications

The continuous and significant growth of air traffic (at a rate of more than 5% worldwide) is leading to drastic changes in the air traffic control system. Most of these developments involve the use of better trajectory predictions to work more strategically than tactically. Tactical traffic control is very time-consuming for air traffic controllers, while strategic control would allow many more aircraft to be controlled simultaneously, thus increasing the system's capacity. To meet these objectives, information exchanges between aircraft (crew and systems) and ground-based control systems will have to increase significantly.

In addition, the evolution of data management technologies has enabled the development of

développement de nouvelles fonctions dans le domaine de la gestion des vols pour les compagnies aériennes. On parle aujourd'hui « d'avion connecté » pour illustrer le fait que de nombreuses informations sont échangées entre les avions en vol et le centre de gestion des vols des compagnies aériennes. Outre la nécessité de connaître en temps réel la position des avions d'une même flotte pour faciliter les décisions opérationnelles en cas de problème (déroutement cause météo ou urgence y compris les urgences médicales liées à des passagers), les nouvelles générations d'avions embarquent aujourd'hui de nombreux capteurs permettant de mesurer en temps réel les paramètres essentiels des systèmes embarqués (c.-à-d. une dizaine de milliers sur les dernières générations Airbus). L'exploitation de ces données par les systèmes sol associée à quelques algorithmes d'intelligence artificielle permet aujourd'hui de prédire assez fidèlement les dérives ou défauts de la plupart des systèmes : ceci conduit à une véritable révolution des processus de maintenance et à des gains majeurs de productivité pour les compagnies aériennes.

Pour répondre à ces nouveaux besoins, les systèmes de communication mobile air/sol doivent évoluer et être complétés par de nouveaux moyens. Les exigences de performance de ces systèmes dépendent bien entendu de leur rôle pour la sécurité des vols.

Les communications mobiles aéronautiques sont classées en trois catégories :

- Les communications liées à la gestion du trafic aérien (échanges entre avion et système sol ou entre pilotes et contrôleur aérien au sol), habituellement connues sous le nom de « ATC communications ». Ces communications sont en général associées aux exigences réglementaires les plus contraignantes.
- Les communications liées à la gestion du vol par son opérateur (compagnie aérienne ou société privée), habituellement appelées « AOC communications ». Ces communications sont beaucoup moins contraintes par la réglementation.
- Les communications au bénéfice des passagers aériens (avions commerciaux ou jet privé), habituellement connues comme « APC communications ». Ces communications sont beaucoup moins contraintes par la réglementation.
- Les communications avec les drones, de la défense (OTAN) ou civils, qui seront à l'avenir insérés dans le trafic aéronautique civil.

Les communications de type ATC n'ont pas beaucoup évolué ces dernières années mais une évolution technologique majeure est nécessaire

new functions in the field of flight management for airlines. Today, we refer to "connected aircraft" to illustrate the fact that a lot of information is exchanged between aircraft that are flying and the airlines' flight management centres. In addition to the need to know in real time the position of aircraft in the same fleet in order to facilitate operational decisions in the event of a problem arising (diverting aircraft due to weather or emergencies, including medical emergencies involving passengers), the new generations of aircraft now carry numerous sensors that enable real time measurement of the essential parameters of on-board systems (i.e. around ten thousand for the latest generation Airbus craft). When this data is fed into ground systems and processed with a few artificial intelligence algorithms, it is now possible to predict fairly accurately the deviations or defects of most systems, which has led to a revolution in maintenance processes and major productivity gains for airlines.

To meet these new needs, air/ground mobile communication systems must evolve and be complemented by new means. The performance requirements of these systems are directly related of course to their role in ensuring flight safety.

Aeronautical mobile communications are classified into three categories:

- Air traffic control communications (exchanges between aircraft and ground systems or between pilots and ground-based air traffic controllers), usually known as "ATC communications". These communications are generally associated with the most stringent regulatory requirements.
- Communications related to the management of the flight by its operator (airline or private company), usually called "AOC communications". These communications are much less constrained by regulations.
- Communications for the benefit of aircraft passengers (on commercial aircraft or private jets), usually known as "APC communications". These communications are much less constrained by regulations.
- Communications with drones, for defence (NATO) or civil purposes, which will in future be included in civil air traffic.

The ATC type communications have not changed much over the last few years but a major technological evolution is necessary for improving

pour améliorer la gestion du trafic aérien : la migration des communications vocales entre acteurs humains (contrôleurs et pilotes) vers des échanges de données entre calculateurs embarqués et au sol. Ces échanges à moyen terme devraient permettre une gestion des trajectoires plus stratégique, déchargeant ainsi le contrôleur de ses tâches tactiques très consommatrices d'activités cognitives. Cette évolution technologique est totalement dépendante du déploiement de nouvelles technologies permettant ces échanges de flux de données avec des performances de nature déterministe compatible avec les exigences de sécurité associées à ces échanges. Compte tenu des exigences réglementaires très contraignantes le cycle d'évolution technologique est très lent si on le compare aux autres domaines de communication mobile : il faut en général au minimum 25 ans pour effectuer un changement technologique impliquant les équipements sol et bord simultanément. C'est pourquoi les technologies utilisées pour les besoins ATC ne sont en général pas les plus « modernes ».

Les communications de type AOC, ont connu une très forte croissance durant cette dernière décennie. Ces communications de données couvrent tous les échanges nécessaires à la bonne conduite du vol et à son exploitation optimisée. Avec les dernières générations d'avions commerciaux, des flux continus de données sont apparus permettant de suivre en temps quasi réel le fonctionnement des éléments critiques de l'avion. Le traitement de ces données permet au sol de prendre des décisions sur de meilleures bases de connaissance des problèmes et d'anticiper une intervention sur l'avion au cours de sa prochaine escale. La fourniture d'informations météorologiques en vol se développe également en permettant à l'équipage de prendre de meilleures décisions. La croissance de ces besoins induira de nouveaux besoins en termes de moyens de communication mobile, en particulier les solutions satellitaires devraient jouer un rôle significatif pour ces besoins. Contrairement au domaine ATC très réglementé, ceux de l'AOC ou même de l'APC le sont beaucoup moins. Ceci permet de recourir à des technologies plus récentes et de plus en plus de recourir à des fournisseurs de services de communication mobile non spécifiquement dans le domaine aéronautique. Plusieurs compagnies aériennes ont déjà déployé ces nouveaux moyens sur leur flotte (c.-à-d. LTE ou 5G), pour des raisons à la fois économiques (prix non « aéronautique ») ou de besoin en bande passante.

La mise en œuvre de nouvelles applications mobile utilisant des interfaces homme-machine découplées des éléments du cockpit (Electronic Flight Bag) est en très forte croissance pour offrir aux équipages de nouveaux services de partage

air traffic control, with the shift of vocal communications between humans (air-traffic controllers and pilots) towards exchanges of data between on-board and ground computers. In the medium term, these exchanges should enable more strategic trajectory management, thus freeing the controller of those tasks that require highly intensive cognitive activity. This technological evolution depends completely on the deployment of new technologies enabling the exchange of data flows with determinist performances that are compatible with the safety requirements associated with the exchanges. Given the very stringent regulatory requirements, the technological evolution cycle is very slow compared to other areas of mobile communications: it generally takes at least 25 years to make a technological change involving both ground and on-board equipment simultaneously. This is why the technologies used for ATC requirements are generally not the most "modern".

AOC type communications, on the other hand, have increased tremendously over the last decade. These data communications cover all exchanges needed for proper flight management and optimisation. With the latest generation of commercial aircraft, continuous data flows have emerged to enable almost real-time monitoring of the functioning of critical aircraft elements. Processing of this data enables ground segments to take decisions based on the best possible knowledge of problems and to anticipate maintenance of the aircraft during its next stopover. The provision of weather forecasting information during the flight is also increasing and enabling crews to make the best decisions. The growth of these needs will lead to new needs in terms of mobile communication facilities, in particular satellite solutions that should play a significant role in meeting them. Unlike the highly regulated ATC domain, those of AOC or even APC are much less regulated. This makes it possible to use more recent technologies and increasingly to rely on mobile communication service providers, that do not cater specifically to the aeronautical field. Several airlines have already deployed these new resources on their fleets (i.e. LTE or 5G), for both economic reasons (not "aeronautical" price) or bandwidth needs.

The implementation of new mobile applications using man-machine interfaces decoupled from cockpit elements (Electronic Flight Bags) is growing rapidly to offer crews new flight information sharing services (e.g. pre-processed

d'information en vol (par exemple, une information météo prétraitée pour renseigner l'équipage sur son environnement). Ces applications étant très peu réglementées, elles se développent très rapidement. Ce développement continue ainsi que les besoins d'échange de données associés au concept d'avion connecté conduisent à augmenter régulièrement les capacités de communication air/sol (bande passante) et donc ouvrent la porte à l'utilisation de technologies non aéronautique.

weather information to inform the crew about their environment). As these applications are little hampered by regulations, they are developing very quickly. This continuous development and the data exchange needs associated with the connected aircraft concept have led to a steady increase in air/ground communication capacities (bandwidth) and have thus made it possible to use non-aviation technologies.



Bienvenue à TéSA en 2018.
Welcome to TeSA in 2018.



Séminaires scientifiques de TéSA.
TeSA Scientific Seminars.



Conclusion

Conclusion

Ce rapport d'activité a permis de présenter la synthèse des activités de recherche menées dans TéSA en 2017 et 2018.

TéSA est un laboratoire de recherche privé, existant sous forme d'une association loi 1901 depuis plus de 15 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 télécommunications spatiales et aéronautiques !

This report is a summary of the research activity conducted at TeSA in 2017 and 2018.

TeSA is a private research laboratory, founded in the form of a non-profit association (1901 Act) more than 15 years ago, which federates research on space and aeronautical telecommunications, thus enabling researchers from various research organisations to work together, drawing on the professional skills of all, to better meet the needs of industrialists and institutions requiring quality research and development.

TeSA has expanded rapidly over the last years, with an increased workforce supervised by an active Scientific Committee, with motivated and enthusiastic PhD students, committed researchers that make creative proposals and industrial and institutional member partners who commit to increasingly innovative and interesting research projects.

I should once again like to thank all TeSA employees, researchers, PhD and postdoctoral students, industrial partners, institutions and the whole TeSA Scientific Development team, not forgetting the administrative personnel who run the association on a daily basis. We shall continue striving to improve our contribution to research on space and aeronautical telecommunications!



Chefs de projet TéSA / TeSA Editors-in-chief : Emmanuel Chaput, Éric Chaumette.

Principaux contributeurs / Main contributors : Cédric Baudoin, Tarik Benaddi, Emmanuel Chaput, Éric Chaumette, Luc Deneufchâtel, Franck Durand-Carrier, Jean-Luc Issler, Emmanuel Lochin, Corinne Mailhes, Jordi Vilà-Valls, François Vincent.

Illustrations / Illustrations : les illustrations des pages 1, 10, 11, 16, 17, 25, 27, 31, 38, 41, 48, 60, 61 et 63 sont sous copyright TéSA et celles des pages 12, 19 et 44 sont sous copyright CNES. / Illustrations on pages 1, 10, 11, 16, 17, 25, 27, 31, 38, 41, 48, 60, 61 and 63 are under TeSA copyright and those on pages 12, 19 and 44 are under CNES copyright.

Traduction / Translation : Coup de Puce.

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



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, IRT Saint-Exupéry, la Direction des Services de la Navigation Aérienne), des laboratoires de recherche publics appartenant à des écoles d'ingénieurs (INPT, ISAE, ENAC, IMT Atlantique) 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, IRT Saint-Exupéry, la Direction des Services de la Navigation Aérienne) and research public laboratories associated with engineering schools (INPT, ISAE, ENAC, IMT Atlantique) 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)
Tel. +33 5 61 24 73 60
Fax. +33 5 61 24 73 73
www.tesa.prd.fr

