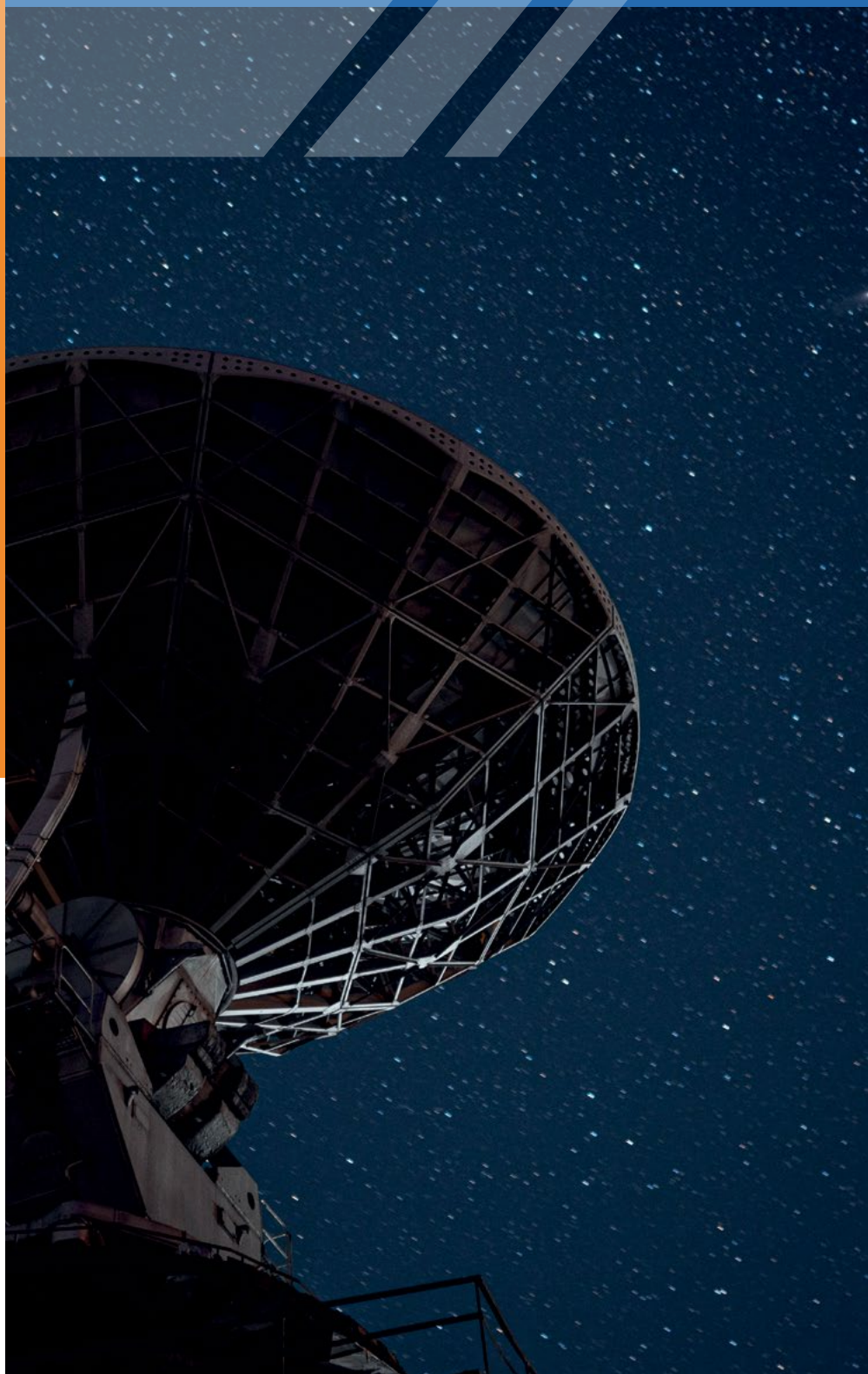
TéSA

RAPPORT D'ACTIVITÉ
ACTIVITY REPORT



2021
2022

www.tesa.prd.fr

Avant-propos

Ce nouveau rapport d'activité pour la période 2021-2022 met en avant la diversité et la qualité des travaux de recherche menés à TéSA. Depuis peu Présidente de cette association, j'ai été frappée par la variété de ses domaines d'expertise, couvrant à la fois les communications numériques, le traitement du signal et des images et le réseau.

Vous trouverez dans ce rapport la cartographie des activités de TéSA, à la fois claire et détaillée, fruit du Conseil Scientifique, puis une présentation des travaux menés pour chacun des domaines d'expertise. Les résultats obtenus montrent sans conteste l'excellence de la recherche conduite à TéSA !

Une analyse des tendances et perspectives de chacun des domaines d'application des études et des thèses de TéSA (localisation et navigation, observation de la Terre, systèmes de communications spatiales et aéronautiques), ainsi qu'une analyse de l'apport de l'intelligence artificielle, enrichissent ce rapport et confirment la pertinence du positionnement de TéSA pour répondre aux enjeux de ces domaines.

Enfin, nous avons choisi dans ce rapport de mettre en lumière l'implication de TéSA dans la problématique des essaims de nanosatellites : avec le CNES, TéSA est partie prenante dans l'aventure via plusieurs études et 3 thèses lancées sur le sujet, actuellement en cours.

Finalement, quelques chiffres valant mieux qu'un long discours, la période 2021-2022 c'est aussi : 11 thèses soutenues, 52 articles publiés, 1 brevet, et, après la pandémie, 9 séminaires scientifiques et 2 fructueuses éditions des Journées Scientifiques.

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

Foreword

This new activity report for the period 2021-2022 highlights the diversity and quality of the research carried out at TéSA. Having recently become President of the association, I was struck by the variety of its areas of expertise, ranging from digital communications to signal and image processing and computer networks.

In this report, you will find a clear, detailed and comprehensive list of TéSA's activities, drawn up by the Scientific Committee, followed by a presentation of the work carried out in each field. The results clearly demonstrate the outstanding research carried out at TéSA!

The report offers an analysis of trends and prospects in each of the spheres of application covered by TéSA's studies and theses (positioning and navigation, Earth observation, space and aeronautical communications systems), as well as an analysis of the contribution of artificial intelligence, and confirms the relevance of TéSA's positioning to meet the challenges in these areas.

Furthermore, we have chosen to highlight TéSA's involvement in the issue of nanosatellite swarms: with CNES, TéSA is a stakeholder in the adventure, via several studies and 3 theses undertaken on the subject and currently in progress.

Finally, as a few figures are better than a long speech, the 2021-2022 period also boasts: 11 theses defended, 52 articles published, 1 patent filed, and, after the Covid pandemic, 9 scientific seminars and 2 successful editions of the Science Days.

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

La Présidente
The President

Clémence
Pierangelo

Sommaire

PARTIE 1 - Introduction

7 1. TéSA, C'EST QUOI ?
8 2. COMMENT LIRE CE RAPPORT
9 3. CARTOGRAPHIE DES ACTIVITÉS TéSA
9 3.1. DOMAINES D'APPLICATION
12 3.2. DOMAINES D'EXPERTISE

PARTIE 2 - Activités scientifiques

15 1. DOMAINE TRAITEMENT DU SIGNAL ET DES IMAGES
15 1.1. LOCALISATION ET NAVIGATION
20 1.2. OBSERVATION DE LA TERRE
23 1.3. TRAITEMENT STATISTIQUE DU SIGNAL
25 1.4. MACHINE LEARNING ET DÉTECTION D'ANOMALIES
29 2. DOMAINE COMMUNICATIONS NUMÉRIQUES
29 2.1. AIS PAR SATELLITE
31 2.2. ACCÈS ALÉATOIRE ET CANAL DE PROPAGATION
34 2.3. CHARGES UTILES
39 3. DOMAINE RÉSEAUX
39 3.1. CONTRÔLE DE CONGESTION
45 3.2. LE PROBLÈME DE FLOT INSÉCABLE
46 3.3. CONVERGENCE BROADCAST-MULTICAST
47 4. TéSA... ON THE DARK SIDE OF THE MOON
49 5. VIE DU LABORATOIRE
49 5.1. CHERCHEURS INVITÉS
51 5.2. LES SÉMINAIRES TéSA
53 5.3. LES JOURNÉES SCIENTIFIQUES
56 6. COLLABORATIONS
58 7. RAYONNEMENT DE TéSA

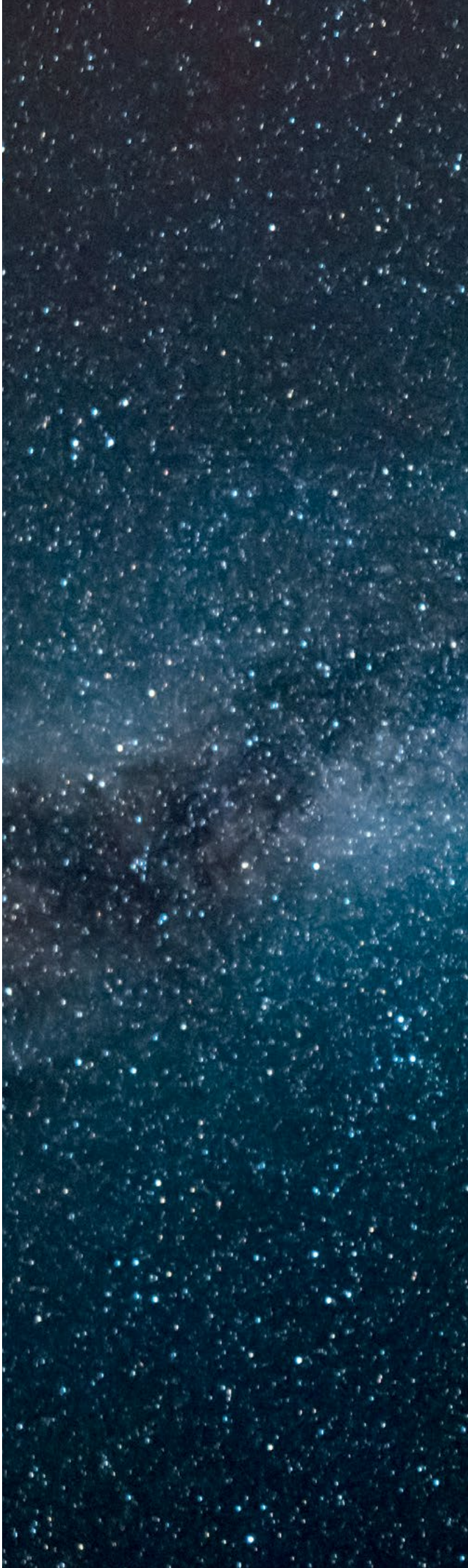
PARTIE 3 - Tendance et perspectives

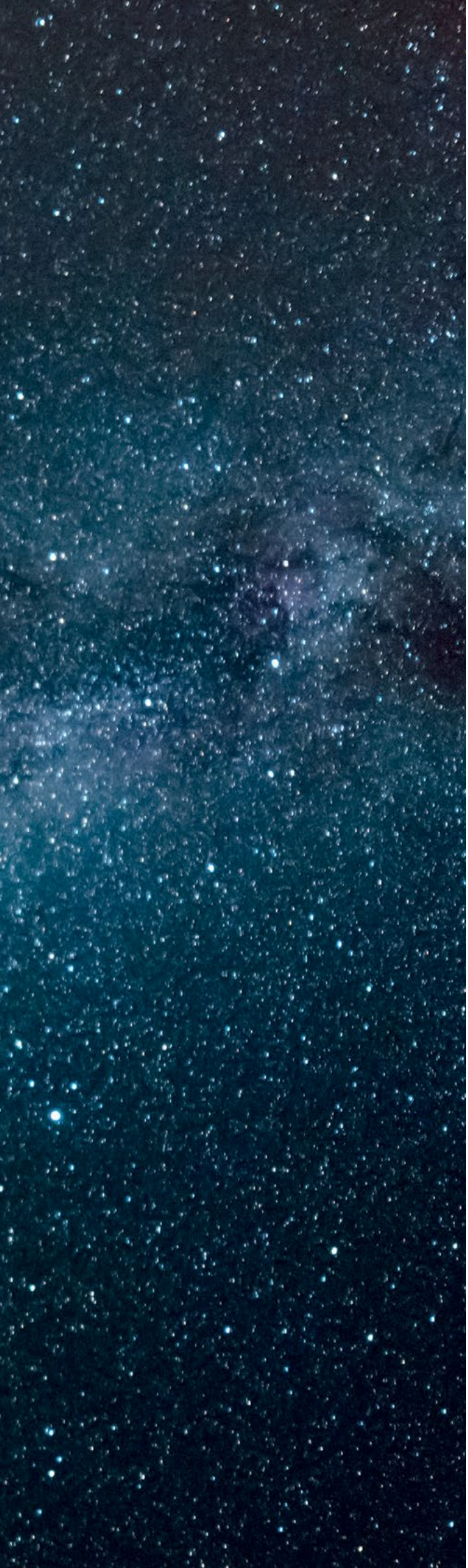
61 1. LOCALISATION ET NAVIGATION
65 2. OBSERVATION DE LA TERRE
68 3. SYSTÈMES DE COMMUNICATION PAR SATELLITE
70 4. L'IA : LE COUTEAU SUISSE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS SPATIALES ET AÉRONAUTIQUES

PARTIE 4 - Conclusion

Annexe

74 1. LISTE DES PUBLICATIONS
74 1.1. ARTICLES DE JOURNAUX
75 1.2. ARTICLES DE CONFÉRENCES
77 1.3. BREVETS
77 1.4. THÈSES DE DOCTORAT
77 2. LISTE DES ÉTUDES





Summary

PART 1 - Introduction

7 1. WHAT IS TéSA?
8 2. HOW TO READ THIS REPORT
9 3. KALEIDOSCOPE MAP OF TéSA ACTIVITIES
9 3.1. FIELDS OF APPLICATION
12 3.2. FIELDS OF EXPERTISE

PART 2 - Scientific activities

15 1. IMAGE AND SIGNAL PROCESSING
15 1.1. POSITIONING AND NAVIGATION
20 1.2. EARTH OBSERVATION
23 1.3. STATISTICAL SIGNAL PROCESSING
25 1.4. MACHINE LEARNING AND ANOMALY DETECTION
29 2. DIGITAL COMMUNICATIONS
29 2.1. SATELLITE AIS
31 2.2. RANDOM ACCESS AND PROPAGATION CHANNEL
34 2.3. PAYLOADS
39 3. COMPUTER NETWORKING
39 3.1. CONGESTION CONTROL
45 3.2. THE UNSPLITTABLE FLOW PROBLEM
46 3.3. BROADCAST-MULTICAST CONVERGENCE
47 4. TéSA... ON THE DARK SIDE OF THE MOON
49 5. LIFE IN THE LABORATORY
49 5.1. GUEST RESEARCHERS
51 5.2. TéSA SEMINARS
53 5.3. THE SCIENCE DAYS
56 6. COLLABORATIONS
58 7. TéSA OUTREACH

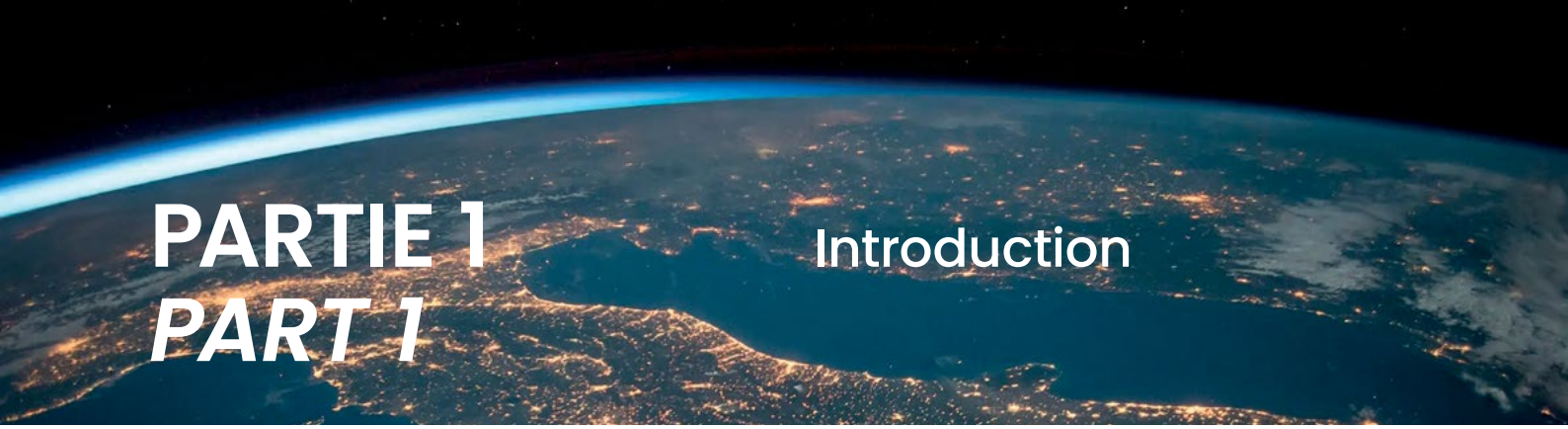
PART 3 - Trends and perspectives

61 1. POSITIONING & NAVIGATION
65 2. EARTH OBSERVATION
68 3. SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS
70 4. AI: THE SWISS ARMY KNIFE OF SPACE AND AERONAUTICS TELECOMMUNICATIONS

PART 4 - Conclusion

Appendix

74 1. PUBLICATION LIST
74 1.1. JOURNAL PAPERS
75 1.2. CONFERENCE PAPERS
77 1.3. PATENTS
77 1.4. PHD THESES
77 2. RESEARCH STUDY LIST



PARTIE 1
PART 1

Introduction

1. TéSA, C'EST QUOI ?

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

L'association TéSA compte des **membres associés académiques** comme, pour la période 2021-2022, l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC), l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE-SUPAERO), l'Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse-INP), l'Institut des Mines Télécom Atlantique (IMT Atlantique) et l'école d'ingénieurs de l'air, de l'espace et de la mobilité durable (IPSA) ainsi que des **membres partenaires** : Thales Alenia Space, Collins Aerospace, le Centre National des Études Spatiales (CNES) et une start-up, SpaceAble.

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

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

Plus de détails peuvent être trouvés sur le site www.tesa.prd.fr, en particulier en consultant la cartographie de nos domaines d'application et expertise, mise à jour régulièrement par le Conseil Scientifique de TéSA, telle que décrite dans la page 9.

1. WHAT IS TéSA?

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

*During the 2021-2022 period, the TéSA association had **academic associate members** such as the École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC), the Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE-SUPAERO), the Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse-INP), the Institut des Mines Télécom Atlantique (IMT Atlantique) and the École d'ingénieurs de l'air, de l'espace et de la mobilité durable (IPSA) as well as **partner members**: manufacturers such as Thales Alenia Space and Collins Aerospace, the French Space Agency (CNES) and a start-up, SpaceAble.*

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

*Its **fields of expertise** include digital communications, signal and image processing, and telecommunication networking. The **fields covered by TéSA studies and theses include** space communication systems, aeronautical communication systems, Earth observation, positioning and navigation, and related fields.*

More details can be found at www.tesa.prd.fr, in particular by consulting the breakdown of our expertise and application areas, which is regularly updated by the TéSA Scientific Committee, as described on page 9.

2. COMMENT LIRE CE RAPPORT

Ce rapport d'activité couvre la période 2021-2022 de TéSA et fait suite aux précédents rapports que le lecteur pourra retrouver sur www.tesa.prd.fr. Nous vous recommandons en priorité la lecture de la section suivante apportant une vision générale des activités TéSA. Celle-ci présente au travers d'exemples **la structuration de l'activité en domaines d'application et domaines d'expertise**, à travers ce que nous appelons la cartographie ou « le kaléidoscope des activités TéSA ».

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

Dans ce rapport, comme dans le précédent, nous avons introduit une rubrique sur des activités dont le succès nous rend parfaitement fiers. Pour cette édition, nous avons choisi de faire un focus sur l'activité de TéSA dans les essaims de nanosatellites.

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, institutionnels 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.

2. HOW TO READ THIS REPORT

This report on the activities of the TéSA laboratory covers the period 2021-2022 following the previous reports, which can be found at www.tesa.prd.fr. We recommend that you first read the next section which gives an overview of TéSA 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 TéSA laboratory, concerning ***the three particular fields of expertise: "Image and signal processing", "Digital communications"*** *and* ***"Telecommunication 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 TéSA, together with scientific publications and patents.*

In this report, as in the previous one, an additional section has been introduced, about projects whose success is a considerable source of pride. For this edition, we have chosen to focus on TéSA activity within the swarms of nanosatellites.

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

Finally, it is important to note that this activity report was prepared by the TéSA Scientific Committee. This comprises representatives from all TéSA members: academic partners, industrial and institutional entities, research engineers, PhD students and scientific 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.

3. 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, suivant les activités scientifiques de TéSA mais reste organisée en plusieurs niveaux comme expliqué dans les deux sections suivantes.

3.1. DOMAINES D'APPLICATION

Les domaines d'application de TéSA sont 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, « domaines connexes », inclut 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.

3. KALEIDOSCOPE MAP OF TéSA ACTIVITIES

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

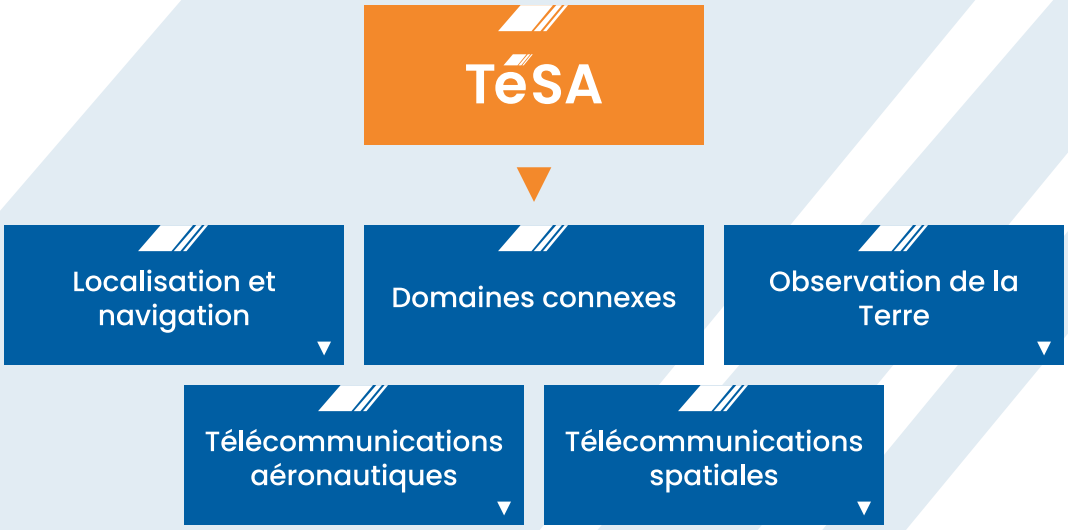
It was designed to be dynamic and evolve to keep pace with the changing scientific activities at TéSA but is still broken down into several levels as explained in the following two sections.

3.1. FIELDS OF APPLICATION

TéSA's fields of application are 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, named "related fields", includes all activities performed in parallel to the four main areas by taking advantage of satellite and aeronautical expertise to address needs in areas such as terrestrial communications.

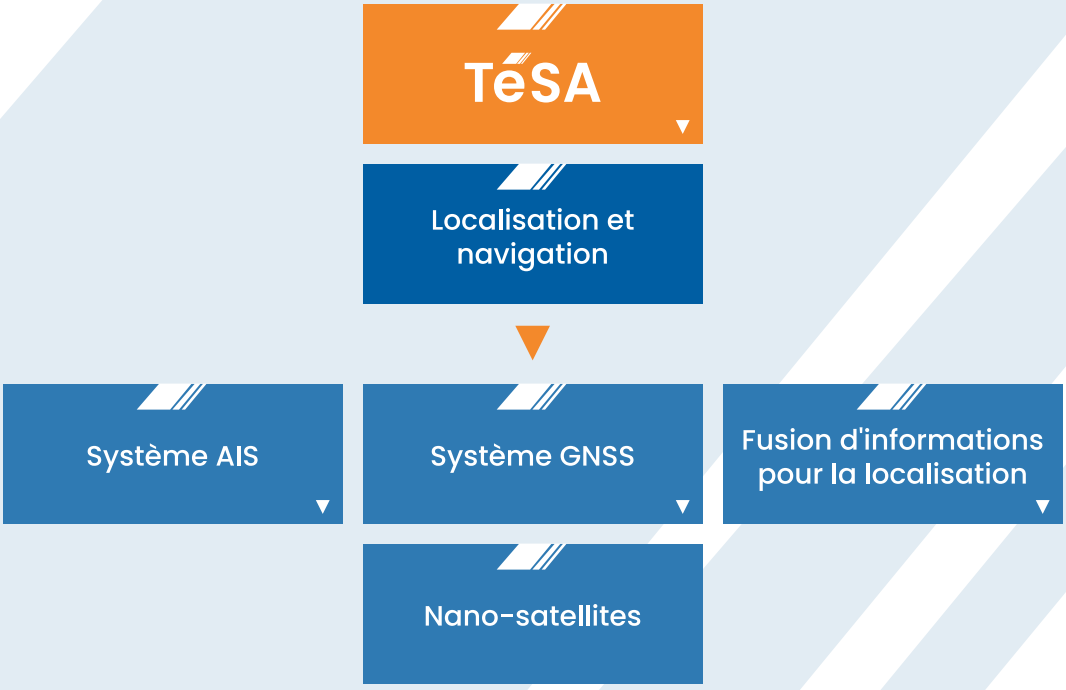


Le deuxième niveau de cette hiérarchie présente les principales **thématiques scientifiques** abordées dans chaque domaine d'application.

Par exemple, le deuxième niveau de « localisation et navigation » laisse apparaître des thématiques qui ont été abordées dans TéSA, comme les systèmes AIS et GNSS, la fusion d'information pour la localisation et les nano-satellites, que ce soit à travers des thèses de doctorat ou des études.

*The second level in this ranking shows the main **scientific topics** covered in each application field.*

For instance, the level below "positioning and navigation" displays topics that have been addressed at TéSA, namely AIS and GNSS systems, fusion of data for positioning and nano-satellites, through either PhD theses or research studies.

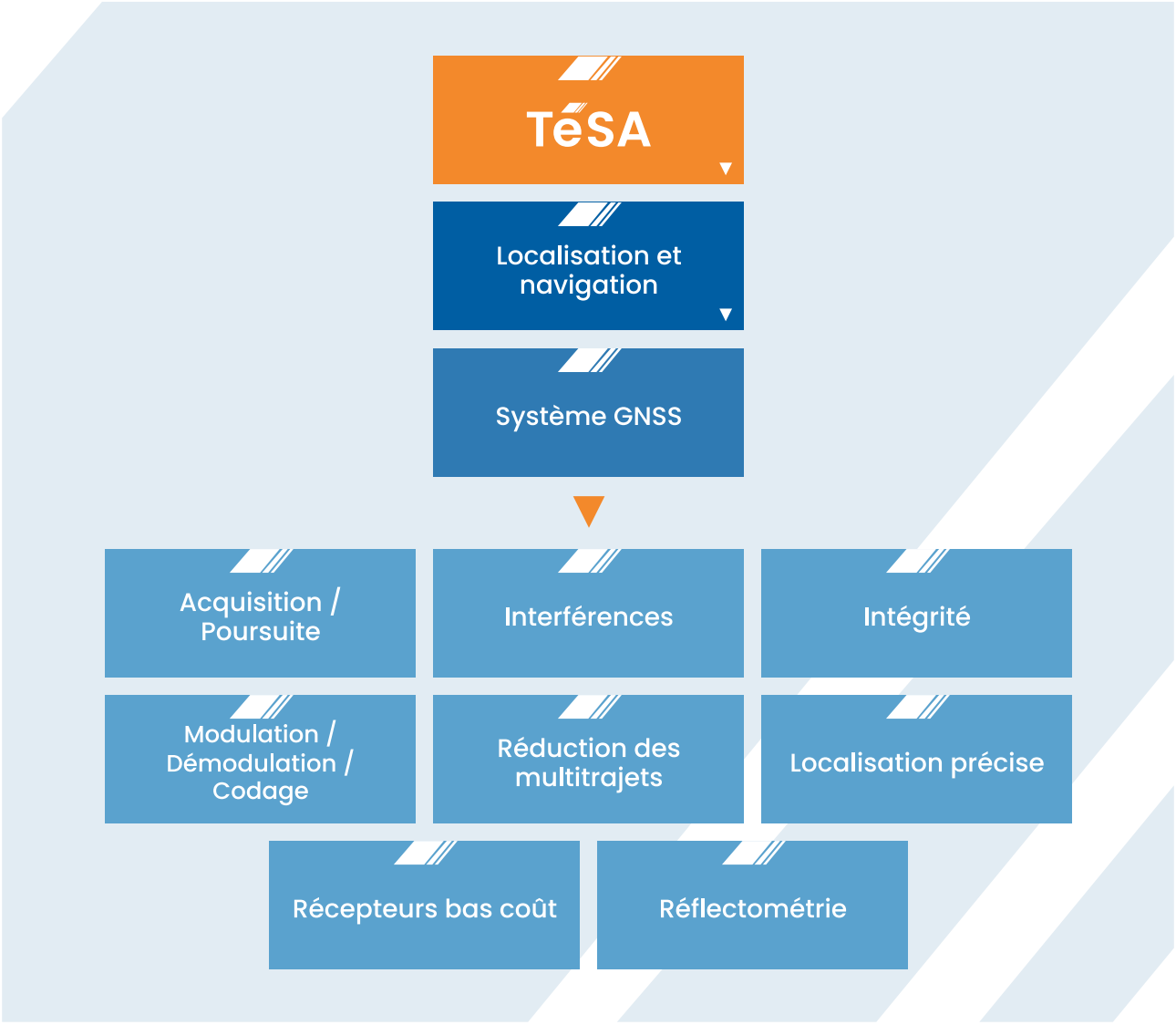


Enfin le troisième niveau présente les **projets** associés à chaque thématique.

Toujours à titre d'exemple, dans le domaine « localisation et navigation », sous la thématique « systèmes GNSS », les projets qui se sont déroulés dans TéSA peuvent se placer sous 8 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 "positioning and navigation", under the "GNSS systems" topic, the projects which were undertaken at TéSA can be divided into 8 themes, as shown below.



Cette cartographie intéractive se retrouve sur le site web de TéSA www.tesa.prd.fr/tesa

This interactive Kaleidoscope map may be found on the TéSA website at www.tesa.prd.fr/en/tesa-lab

3.2. DOMAINES D'EXPERTISE

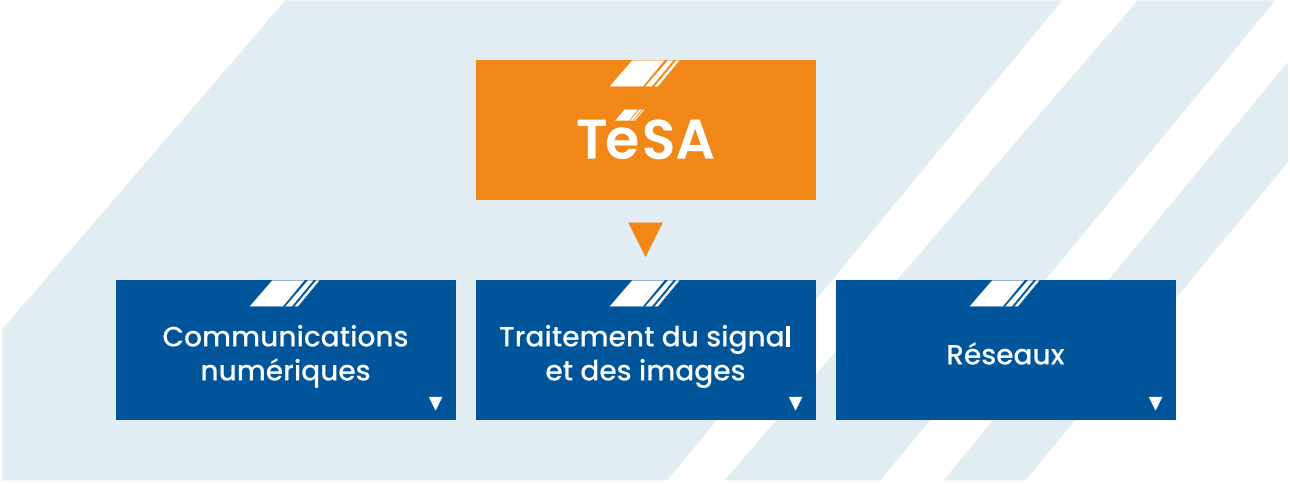
Pour compléter les domaines d'application du laboratoire TéSA, une description de ses **domaines d'expertise** a également été effectuée.

Ces domaines d'expertise sont au nombre de 3 : le « traitement du signal et des images », les « communications numériques » et les « réseaux ».

3.2. FIELDS OF EXPERTISE

*In addition to the fields of application of the TéSA laboratory, its **fields of expertise** have also been described.*

These fields of expertise are "signal and image processing", "digital communications" and "telecommunication networking".

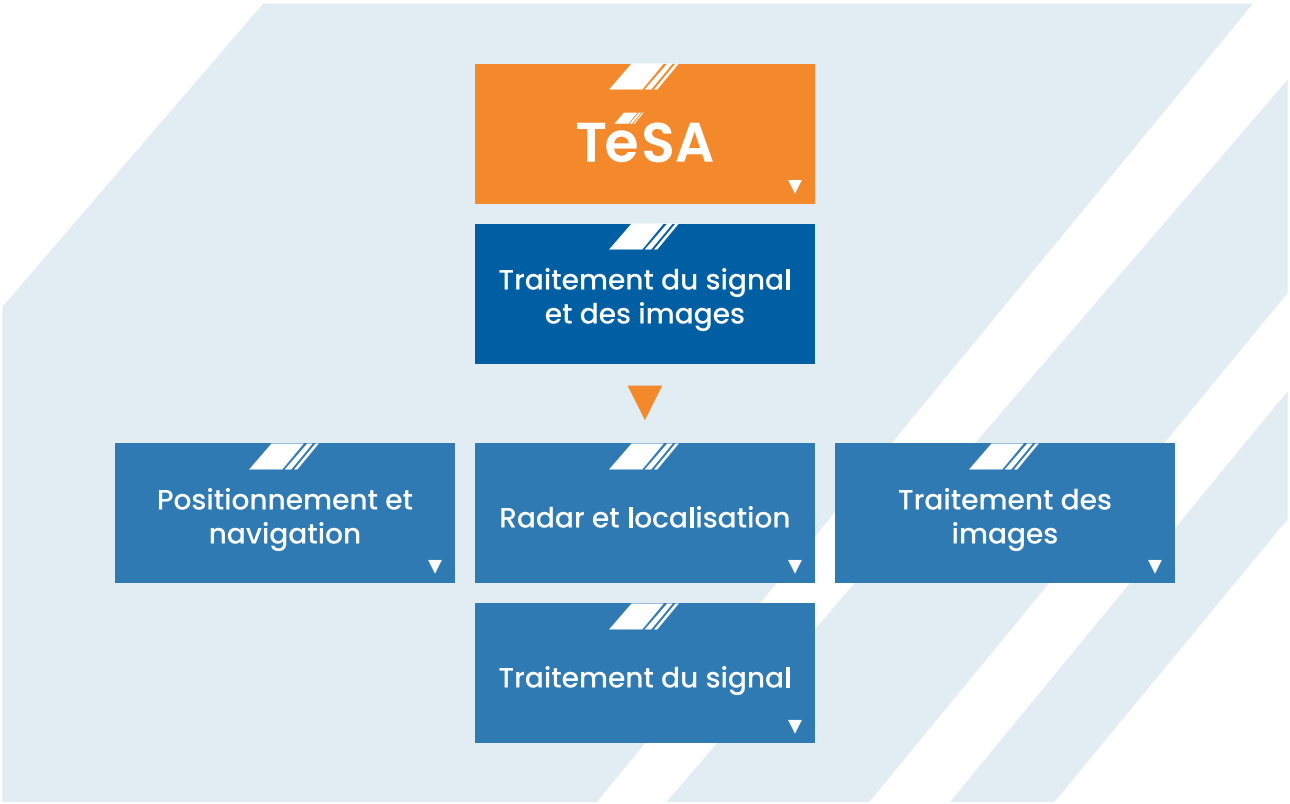


Une architecture à trois niveaux a également été retenue pour ces domaines d'expertise. Chaque domaine est divisé en **compétences scientifiques** qui regroupent divers **sujets de recherche.**

Ainsi, par exemple, le domaine d'expertise « traitement du signal et des images » met en évidence quatre compétences scientifiques principales telles qu'illustrées ci-dessous.

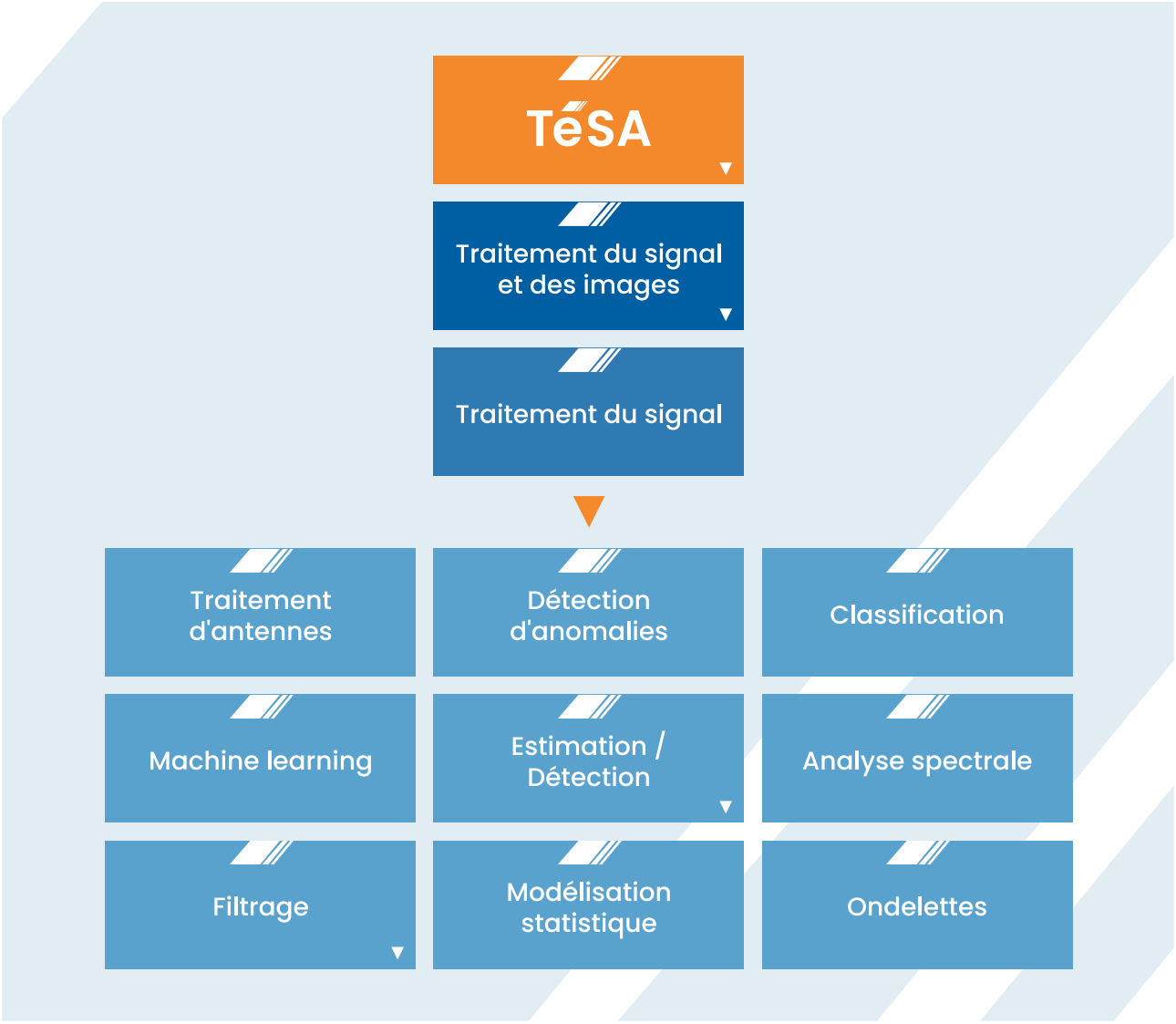
*A three-level architecture has also been adopted for these fields of expertise. Each field is split into **scientific skills**, which combine various **research subjects**.*

Thus, for example, the field of expertise "signal and image processing" highlights four scientific skills as shown below.



Et si on souhaite connaître les sujets de recherche abordés dans la compétence « traitement du signal » par exemple, on trouve neuf sujets de recherche dans le 3e niveau de la cartographie, comme présenté ci-après.

Then, if you wish to know which research subjects correspond to the skill "signal processing", for instance, you will find nine research subjects in the 3rd level of the kaleidoscope map, as shown below.



Pour plus d'informations, ne pas hésiter à consulter la page internet
www.tesa.prd.fr/tesa

Readers may find more information on the internet page
www.tesa.prd.fr/en/tesa-lab

PARTIE 2
PART 2

Activités scientifiques
Scientific activities

1. TRAITEMENT DU SIGNAL ET DES IMAGES

Durant la période 2021-2022, TéSA a mené des activités dans ses thématiques phares présentes depuis la création de TéSA, portant sur la **localisation, la navigation et l'observation de la Terre**.

TéSA continue également de développer des méthodes de **traitement statistique du signal** pour d'autres applications qui sont décrites dans cette partie.

Outre la poursuite d'activités menées depuis de nombreuses années liées à l'apprentissage automatique (***machine learning***) et à la **détection d'anomalies**, le TéSA s'est lancé durant cette période dans l'acquisition d'une expertise en ***deep learning***.

1.1. LOCALISATION ET NAVIGATION

Il existe de nombreuses technologies qui permettent de répondre aux besoins variés en matière de positionnement et de navigation, depuis les centrales inertielles jusqu'aux VOR/DME (*Very high frequency Omnidirectional Range / Distance Measurement Equipment*) aéronautiques en passant par l'*ultra wideband* utilisé pour la navigation en intérieur.

Cependant, du fait de l'affinité de TéSA pour les systèmes spatiaux, c'est sur les systèmes de localisation et navigation par satellite GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), ARGOS (*Advanced Research and Global Observation Satellite*), les instruments de mesure embarqués sur satellite, ou encore les essaims de satellites, que se sont focalisés les travaux réalisés au sein du laboratoire en matière de localisation et de navigation.

1. IMAGE AND SIGNAL PROCESSING

During the period 2021-2022, research was carried out on the themes that have made up its core mission since the founding of TéSA, relating to ***positioning, navigation and Earth observation****.*

TéSA also continues to develop ***statistical signal processing*** *methods for other applications, which are described in this section.*

During this period, in addition to pursuing its long-standing activities in ***machine learning and anomaly detection****, TéSA began to acquire expertise in* ***deep learning****.*

1.1 POSITIONING AND NAVIGATION

There are many technologies available to meet different positioning and navigation needs, from inertial units to aeronautical VOR/DME (Very high frequency Omnidirectional Range / Distance Measurement Equipment) and the use of Ultra-WideBand for indoor navigation.

However, because of TéSA's affinity for space systems, the laboratory's work on positioning and navigation has focused on satellite positioning and navigation systems GNSS (Global Navigation Satellite Systems), ARGOS (Advanced Research and Global Observation Satellite), satellite-based measurement instruments and satellite swarms.

De fait, le GNSS est désormais disponible au plus grand nombre, via les récepteurs dits « bas coût » installés dans les voitures, les smartphones etc. Pour garantir la précision et la qualité de service attendue, le CNES travaille depuis plusieurs années sur l'analyse et la performance des signaux GNSS (hors erreurs dues à la propagation dans l'atmosphère) à travers un projet pluriannuel appelé « Observatoire des signaux ».

L'amélioration de certaines fonctionnalités de l'« Observatoire des signaux » a été confiée à TéSA [E-1] pour lever des verrous liés à des problèmes nécessitant une expertise en traitement du signal, notamment la détermination de l'expression analytique de la fonction de multiplexage des émetteurs (émission de plusieurs signaux sur la même fréquence porteuse) et l'estimation de leur fonction de transfert pour laquelle deux nouvelles méthodes d'identification ont été proposées.

Outre une dégradation de la qualité des signaux GNSS émis, d'autres facteurs peuvent empêcher un récepteur GNSS d'atteindre la précision et la qualité de service attendues, à l'instar des environnements contraints, par exemple les canyons urbains.

En effet, en raison des obstructions, dues par exemple à la présence d'immeubles, les multi-trajets occasionnés se rajoutent au trajet direct, complexifiant le traitement du signal reçu. Ce problème est encore plus important dans le contexte des véhicules autonomes où la précision et la fiabilité des mesures de localisation sont des points cruciaux.

Il est donc souhaitable de pouvoir isoler les multi-trajets, de sorte qu'ils soient éliminés, ou analysés plus en détail.

GNSS is now available to as many people as possible, via so-called 'low-cost' receivers installed in cars, smartphones and so on. To guarantee the expected precision and quality of service, CNES has been working for several years on the analysis and performance of GNSS signals (excluding errors due to propagation in the atmosphere) through a multi-year project called 'Signal Observatory'.

TéSA has been entrusted with improving certain functions of the 'Signal Observatory' [E-1] *to overcome problems requiring expertise in signal processing, in particular determining the analytical expression of the multiplexing function of transmitters (transmission of several signals on the same carrier frequency) and estimating their transfer function for which two new identification methods have been proposed.*

As well as degrading the quality of GNSS signal transmitted, other factors can prevent a GNSS receiver from achieving the expected accuracy and quality of service, such as constrained environments, for example, urban canyons.

Because of obstructions such as buildings, the resulting multipaths are added to the direct path, making it more difficult to process the received signal. This problem is even more important in the context of autonomous vehicles, for which the accuracy and reliability of positioning measurements are crucial.

It is therefore desirable to be able to isolate multipaths, so that they can be eliminated or analysed in greater detail.

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

Après avoir soutenu sa thèse de doctorat à TéSA en 2018, Lucien est embauché chez Thales Alenia Space, à Toulouse et fait de la R&D au sein de la *Telecom Business Line* en ingénierie système et communications optiques par satellites. En 2022 il rejoint l'*European Space Agency* (ESA) à l'ESTEC (Pays-Bas) en tant qu'ingénieur en communications optiques par satellite.

WHERE ARE THEY NOW?

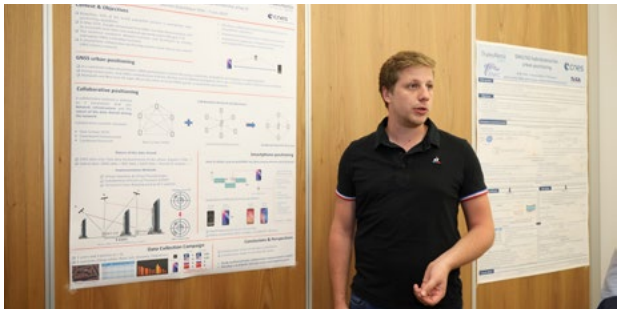
After defending his PhD thesis at TéSA in 2018, Lucien was hired by Thales Alenia Space in Toulouse and worked in R&D in the Telecom Business Line in systems engineering and satellite-based optical communications. In 2022 he joined the European Space Agency (ESA) at ESTEC (in the Netherlands) as an engineer in satellite-based optical communications.

Lucien Canuet

C'est dans cette perspective que TéSA a mené pour le CNES, une étude [E-5] visant à proposer, étudier, valider et comparer, dans le contexte GNSS, deux nouveaux types d'outils d'identification et d'élimination des multi-trajets, fondés sur deux méthodes de traitement du signal : la décomposition en ondelettes d'une part (dépôt de brevet [B-1]) et le cepstre (non ce n'est pas une typo – le cepstre est défini comme la transformée de Fourier inverse du log du spectre ☺) d'autre part.

Une piste alternative pour permettre le positionnement précis de mobiles bas coût en environnement urbain, pédestre ou véhiculaire, est un échange coopératif d'informations liées au positionnement. Plus précisément, l'idée de base est de compléter les mesures et informations nécessaires au positionnement précis d'un mobile qui se trouverait dans des conditions de réception données, par celles de mobiles environnants, qui seraient eux dans d'autres conditions de réception.

Cette idée a été développée dans la thèse de Thomas Verheyde [T-8], co-financée par le CNES et Thales Alenia Space, en étudiant comment une communauté d'utilisateurs connectés peut s'aider dans l'obtention d'un positionnement précis à travers l'échange d'informations (mesures, positions, etc.), chaque membre de la communauté pouvant être considéré comme une potentielle station de référence [C-3], [C-14].



>> Thomas Verheyde présentant ses travaux de thèse lors d'une journée scientifique TéSA.
Thomas Verheyde presenting his PhD work during a TéSA scientific day.

Outre le GNSS, le système ARGOS est un système de positionnement historique, lancé en 1978 par l'alliance CNES/NASA/NOAA, opéré par CLS depuis 1986, puis Kinéis depuis 2019, toujours largement employé pour la localisation de balises terrestres portées par des oiseaux, animaux terrestres et marins, bateaux, humains... L'effet Doppler du signal émis par une balise et reçu par un satellite, s'exprime en fonction de la position et de la vitesse du satellite récepteur (connues a priori), de la fréquence d'émission, de la vitesse de la balise (habituellement considérée comme négligeable) et de la position de la balise, que l'on cherche justement à déterminer.

With this in mind, TéSA has conducted a study [E-5] on behalf of CNES, aimed at proposing, studying, validating and comparing, in the GNSS context, two new types of tool for identifying and eliminating multipaths, based on two signal processing methods: wavelet decomposition (patent application [B-1]) and cepstrum (no, it's not a typo – cepstrum is defined as the inverse Fourier transform of the log of the spectrum ☺).

The cooperative exchange of positioning information is an alternative way of accurately positioning low-cost mobiles in an urban environment, whether on foot or in a vehicle. More specifically, the idea is to supplement the measurements and information needed to accurately determine the position of a mobile phone in given reception conditions using those of surrounding mobile phones in other reception conditions.

This idea was developed in Thomas Verheyde's PhD thesis [T-8], co-funded by CNES and Thales Alenia Space, in which he studied how a community of connected users can help each other to obtain accurate positioning by exchanging information (measurements, positions, etc.), with each member of the community being considered as a potential reference station [C-3], [C-14].

Like GNSS, ARGOS is a historic positioning system, launched in 1978 by the CNES/NASA/NOAA alliance, and operated by CLS since 1986, then by Kinéis since 2019, that is still widely used for positioning terrestrial transmitters worn by birds, land and marine animals, ships, humans, etc. The Doppler effect of the signal transmitted from the surface of the Earth and received by a satellite is expressed as a function of the position and velocity of the receiving satellite (known a priori), the transmission frequency, the velocity of the beacon (usually considered negligible) and the position of the beacon, which is precisely what we are trying to determine.

Responding to a need for a CNES study, Kinéis called on TéSA [E-9] to improve the positioning performance of the ARGOS system.

The aim was to enhance the current algorithm, an iterative extended Kalman filter, in order to include constraints on the state vector (in the form of equalities or inequalities), and to hybridise it with cartographic data; then to evaluate its performance for the current ARGOS constellation, as well as for the future constellation currently being developed by Kinéis.

Dans l'objectif d'améliorer des performances en localisation du système ARGOS, la société Kinéis, en réponse à une étude CNES, a fait appel à TéSA [E-9]. Il s'agissait de faire évoluer l'algorithme actuel, un filtre de Kalman étendu itératif, afin d'y inclure des contraintes sur le vecteur d'état (sous forme d'égalités ou d'inégalités), et de l'hybrider avec des données cartographiques ; puis d'évaluer ses performances pour la constellation ARGOS actuelle, ainsi que pour la future constellation en cours de développement par Kinéis.

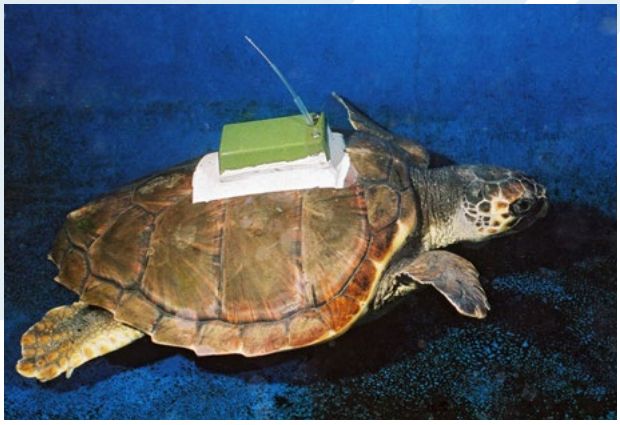
Dans certaines applications spatiales nécessitant une mesure de position relative entre deux ou plusieurs satellites, l'information GNSS n'est pas disponible ; il faut alors avoir recours à d'autres moyens de mesure, comme le radar par exemple.

C'est le cas du démonstrateur cubesat de rendez-vous spatial en cours de développement chez la société SpaceAble. Ce démonstrateur intègre un dispositif de localisation radar novateur utilisé pour la phase finale d'un rendez-vous spatial avec un objet en orbite à inspecter.

Dans ce cadre, SpaceAble a confié à TéSA [E-19] le développement d'un simulateur au premier ordre du radar embarqué sur cubesat, afin de permettre la caractérisation et la qualification des performances attendues du radar et des traitements associés. En particulier, la simulation d'un radar embarqué sur satellite requiert la prise en compte de sa compatibilité électromagnétique avec les observatoires de radio astronomie.

Dans le cas d'un nano-satellite, compte-tenu des contraintes de la plateforme, si la compatibilité nécessite des modifications, elles ne pourront être basées que sur une modification de la forme et du spectre du signal radar et de son traitement. En effet, il est impossible d'appliquer des solutions classiques telles que le filtrage du signal radio fréquence qui entrainent des masses, volumes et pertes trop importantes. Ce problème a donc été étudié [E-20] permettant à SpaceAble de bénéficier de l'expertise du TéSA en systèmes satellitaires. Un calcul de flux a permis de définir un niveau de puissance à ne pas dépasser dans la bande de la radioastronomie la plus proche de la bande du radar.

La mesure de positions relative entre deux objets spatiaux, voire plusieurs objets spatiaux, ne peut pas toujours faire appel à des capteurs embarqués, tels que le radar, le lidar ou des caméras, principalement pour des raisons de coût ou de limitation de la charge utile, comme par exemple dans le cas d'un essaim de nanosatellites (en particulier les plus petits de masse inférieure ou égale à 10 kg). C'est le cas du



In some space applications requiring a measurement of the relative positions of two or more satellites, GNSS information is not available, so other measurement means, such as radar, must be used.

This is the case with the cubesat space rendezvous demonstrator being developed by SpaceAble. This demonstrator incorporates an innovative radar positioning device used in the final phase of a space rendezvous with an orbiting object to be investigated.

In this context, SpaceAble has entrusted TéSA [E-19] *with the development of a first-order simulator for the radar flown on the cubesat, to characterise and qualify the expected performance of the radar and the corresponding processing. In particular, simulation of a satellite-borne radar requires ensuring its electromagnetic compatibility with radio astronomy observatories.*

In the case of a nanosatellite, given the constraints of the platform, if compatibility requires modifications, these can only be based on a modification of the waveform and spectrum of the radar signal and its processing. This is because it is impossible to apply conventional solutions such as filtering the radio-frequency signal, which would lead to excessive mass, volume and losses. The problem was thus studied [E-20]*, enabling SpaceAble to benefit from TéSA's expertise in satellite systems. A flow calculation was used to define a power level that should not be exceeded in the radio astronomy band closest to the radar band.*

It is not always possible to measure the relative positions of two or more space objects using on-board sensors such as radar, lidar or cameras, mainly because of cost or payload limitations, as in the case of a swarm of nanosatellites (particularly the smallest with a mass of 10kg or less). This is the case of the NOIRE project (Nanosatellites pour un Observatoire Interférométrique Radio dans l'Espace), financed by CNES.

projet NOIRE (Nanosatellites pour un Observatoire Interférométrique Radio dans l'Espace) porté par le CNES.

Le projet NOIRE vise à réaliser un instrument d'observation des signaux radioélectriques basses fréquences de l'univers au moyen d'un essaim de nanosatellites placés en orbite lunaire, afin que le système puisse avoir les dimensions requises pour atteindre une résolution suffisante et qu'il soit à l'abri des émissions radioélectriques de la Terre lorsqu'il est du côté de la face cachée de la Lune.

Pour être fonctionnel, cet essaim doit disposer d'un système de positionnement et de synchronisation relatif des nanosatellites, autonome et de haute performance : la mission scientifique exige un positionnement précis au centimètre et une synchronisation précise à la nanoseconde. Le moyen proposé pour cette opération est une connexion inter-satellites (ISL) permettant à la fois d'acheminer les données scientifiques et de réaliser les mesures de pseudodistances destinées au positionnement et à la synchronisation.

Le TéSA a accompagné le CNES dans ce projet à travers deux études. La première [E-2] avait pour but la construction d'une échelle de temps de référence à partir des sorties d'oscillateurs à bas coûts placés dans un environnement hostile avec un besoin de robustesse et de détection d'anomalies dans le comportement de chaque oscillateur. De plus, les positions absolues des nanosatellites doivent être estimées en combinant une modélisation fine du champ gravitationnel en orbite lunaire et les mesures de pseudodistances ISL.

La seconde étude [E-8] avait pour but la caractérisation des performances accessibles pour l'estimation des positions relatives ou absolues des nanosatellites à partir de mesures de pseudodistances ISL, dans le contexte général où certaines mesures sont manquantes : une implémentation de l'estimateur au sens du maximum de vraisemblance a été réalisée avec la formulation des bornes de Cramér-Rao associées.

Notons que ce projet d'essaim de nanosatellites « on the dark side of the Moon » (voir page 47) a aussi engendré le démarrage de trois thèses autour de ce sujet, proposées par TéSA et cofinancées par le CNES : l'une sur les échelles de temps autonome, une autre sur l'architecture d'un réseau résilient et une autre sur l'utilisation de la phase pour le positionnement précis. Rendez-vous au prochain rapport d'activité pour connaître les sorties de ces trois thèses autour des essaims de nanosatellites !

The NOIRE project aims to create an instrument for observing low-frequency radio signals from the universe by means of a swarm of nanosatellites placed in lunar orbit, so that the system can have the dimensions required to achieve sufficient resolution and be shielded from the Earth's radio emissions when it is on the far side of the Moon.

To be functional, this swarm must have an autonomous, high-performance, nanosatellite positioning and synchronisation system: the scientific mission requires centimetre-precise positioning and nanosecond-precise synchronisation. The means proposed for this operation is an ISL (inter-satellite link) that will enable scientific data to be conveyed and pseudo-ranges to be measured for positioning and synchronisation purposes.

TéSA supported CNES in this project through two studies. The aim of the first study [E-2] *was to construct a reference time scale from the outputs of low-cost oscillators placed in a hostile environment, with the need for robustness and the detection of anomalies in the behaviour of each oscillator. Moreover, the absolute positions of nanosatellites have to be estimated by combining fine modelling of the gravitational field in lunar orbit and measurements of ISL pseudo-ranges.*

The second study [E-8] *aimed to characterise the performance that could be achieved for estimating the relative or absolute positions of nanosatellites from ISL pseudo-range measurements, in the general context for which some measurements are missing: a maximum likelihood estimator was developed by formulating the corresponding Cramér-Rao bounds.*

It should be noted that this nanosatellite swarm project "on the dark side of the Moon" (see page 47) has also led to the undertaking of three PhD theses on this subject, on TéSAs initiative and co-financed by CNES: one on autonomous time scales, another on the architecture of a resilient network and a third on the use of phase for precise positioning. Look out for the results of these three PhD theses on nanosatellite swarms in the next activity report!

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

Après avoir soutenu sa thèse de doctorat à TéSA en 2019, Romain a rejoint Thales SIX GTS France à Gennevilliers en qualité d'Ingénieur Accès Radio PHY/MAC ; il travaille sur des projets d'études amont, des projets collaboratifs et en support aux équipes de développement des produits. Ces projets, concernant aussi bien des sujets civils que militaires, couvrent des contextes très différents tels que les communications aéronautiques, les communications tactiques ou encore les communications très longue distance.

Romain Chayot

WHERE ARE THEY NOW?

After defending his PhD thesis at TéSA in 2019, Romain joined Thales SIX GTS France in Gennevilliers as a PHY/MAC Radio Access Engineer; he works on preliminary project studies, in collaborative projects and assists product development teams. These projects, which cover both civil and military subjects, cover very different contexts such as aeronautical communications, tactical communications and very long-range communications.

1.2. OBSERVATION DE LA TERRE

L'observation de la Terre nourrit des problématiques du traitement du signal et des images que TéSA explore depuis de nombreuses années. Pour mémoire, durant les trente dernières années, différentes approches se sont développées en se basant sur les mesures satellites multi-capteurs (optique, microondes actives et passives, lidar, etc.), non seulement pour imager des surfaces, mais également pour estimer leur état, en analysant les caractéristiques de chaque pixel des images mesurées.

Cependant, la question de la répétitivité des mesures et de leur couverture spatiale est restée essentielle pour répondre aux besoins des thématiciens. De ce fait, l'utilisation de nouveaux systèmes d'opportunité pour la géophysique est devenue une importante question scientifique.

Par exemple, les systèmes de positionnement globaux (GPS, Galileo, GLONASS, Beidou, etc.), utilisés en mode bi-statique (GNSS reflectometry – GNSS-R) pour exploiter la réflexion des signaux sur la surface de la Terre, proposent déjà une centaine de satellites en bande L avec pour caractéristiques : 1) une couverture globale continue ; 2) une absence de besoin d'émetteurs radar actifs en plus des satellites GNSS ; 3) une polarisation circulaire, en bande L, permettant une mesure très peu sensible aux conditions météorologiques et fortement sensible aux états des surfaces terrestres.

1.2. EARTH OBSERVATION

The observation of the Earth raises signal and image processing issues that TéSA has been exploring for many years. For the record, over the last thirty years, various approaches have been developed based on multi-sensor satellite measurements (optical, active and passive microwave, lidar, etc.), not only to image surfaces, but also to estimate their state, by analysing the characteristics of each pixel of the measured images.

However, to meet the needs of leading specialists in the field, the repeatability of measurements and the extent of their spatial coverage are still essential factors. Consequently, scientists are investigating the possibility of using new 'opportunity systems' for geophysics.

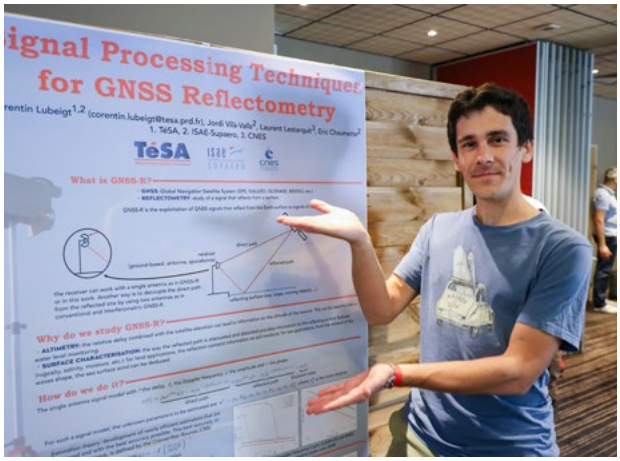
For example, the global positioning systems (GPS, Galileo, GLONASS, Beidou, etc.), used in bi-static mode (GNSS reflectometry – GNSS-R) to exploit the reflection of signals on the Earth's surface, already provide around a hundred L-band satellites with the following characteristics: 1) continuous global coverage; 2) no need for active radar transponders in addition to GNSS satellites; 3) circular polarisation, in L-band, allowing measurements that are relatively insensitive to weather conditions and highly sensitive to the state of the Earth's surface.

D'ailleurs, ces dernières années, un nombre croissant de travaux scientifiques ont montré l'apport potentiel de ces techniques pour estimer différents états des surfaces terrestres : hauteur des vagues, humidité des sols, neige, biomasse du couvert végétal, détection d'objets d'intérêt tels que les bateaux, etc..

Ainsi, la thèse réalisée par Corentin Lubeigt [T-9], cofinancée par le CNES et l'ISAE-SUPAERO, a apporté sa contribution à l'observation de la Terre par GNSS-R. Cette thèse propose une méthodologie théorique pour caractériser les performances de l'estimation des paramètres intrinsèques du trajet réfléchi : pseudo-distance, pseudo-fréquence Doppler, coefficient de réflexion, grandeurs nécessaires à l'élaboration de grandeurs exploitables par les thématiciens.

Moreover, in recent years, an increasing number of scientific publications have demonstrated the potential contribution of these techniques for estimating various surface states of the Earth: wave height, soil moisture, snow cover, biomass of plant cover, detection of targets such as ships, etc.

Thus, the PhD thesis by Corentin Lubeigt [T-9], *co-financed by CNES and ISAE-SUPAERO, made a contribution to Earth observation by GNSS-R. His PhD thesis proposes a theoretical methodology to characterise the performance of the estimation of the reflected path intrinsic parameters: pseudo-range, pseudo-Doppler frequency, reflection coefficient, parameters that are necessary for developing quantities that can be used by leading specialists in the field.*



>> Corentin Lubeigt présentant les travaux de sa thèse durant les journées scientifiques TéSA 2022.
Corentin Lubeigt presenting his PhD work during TéSA science days in 2022.

Cette thèse a permis d'explorer les différentes formulations de l'estimateur du maximum de vraisemblance, ainsi que ses performances à fort rapport signal à bruit à travers la formulation de la borne de Cramér-Rao associée, que ce soit dans un contexte mono ou bi-antenne de réception, ou d'une surface de réflexion spéculaire ou diffuse (réflexion cohérente ou non-cohérente) [J-7], [C-16], [C-18]. À noter que ses travaux sont aussi utilisables pour caractériser l'effet d'un multi-trajet sur le trajet direct, dans un contexte de positionnement [J-27], [J-29], [J-30], [C-24].

Par ailleurs, les signaux GNSS qui permettent de faire de la réflectométrie se trouvent dans une bande de fréquences occupée par les systèmes de localisation des avions (DME *Distance Measuring Equipment* et TACAN *TACtical Air Navigation*), ce qui est problématique lorsqu'ils sont reçus à bord de satellites en orbite basse.Il faut en effet réduire (voire annuler) l'effet de ces interférences pour pouvoir exploiter les signaux GNSS.

Corentin's thesis explored the different formulations of the maximum likelihood estimator, as well as its performance at high signal-to-noise ratios through the formulation of the related Cramér-Rao bound, whether for single- or dual-antenna reception, or for a specular or diffuse reflection surface (coherent or non-coherent reflection) [J-7], [C-16], [C-18]. *Note that his work can also be used to characterise the multipath effect on the direct path, in a positioning context* [J-27], [J-29], [J-30], [C-24].

Furthermore, the GNSS signals used for reflectometry are in a frequency band assigned to aircraft positioning systems (DME Distance Measuring Equipment and TACAN TACtical Air Navigation), which is problematic when they are received on board low-orbit satellites. The effect of this interference must be reduced (or even cancelled out) if GNSS signals are to be used.

Le laboratoire TéSA a contribué à l'étude [E-3] de la réduction de ces interférences en évaluant plusieurs types de méthodes (temporelle, hybride -temporelle et fréquentielle- et par reconstruction) et a proposé de nouveaux algorithmes de détection. Les perturbations résiduelles après réduction des interférences, calculées analytiquement et par simulation, montrent la grande performance des méthodes hybrides utilisant les détecteurs proposés [C-17].

A noter que ces méthodes s'appliquent également à la radio-occultation, c'est-à-dire à l'étude de l'atmosphère de la Terre en exploitant le phénomène de réfraction des signaux provenant de satellites se trouvant juste sous l'horizon du point de vue du récepteur.

Fort de ces résultats, le laboratoire TéSA a été invité, par la société SILICOM, à mettre en œuvre ses méthodes de réduction des interférences pour l'exploitation d'une campagne d'enregistrement de signaux GNSS-R à bord d'un avion effectuée en septembre 2021 par le CNES [E-10].

The TéSA laboratory contributed to the [E-3] *study of interference reduction by evaluating several types of methods (temporal, hybrid -time and frequency- and reconstruction) and proposed new detection algorithms. The residual disturbances after interference reduction, calculated analytically and by simulation, show the high performance of hybrid methods using the proposed detectors* [C-17].

It should be noted that these methods also apply to radio occultation, i.e. the study of the Earth's atmosphere by exploiting the phenomenon of refraction of signals from satellites just below the horizon from the receiver's viewing point.

On the strength of these results, the TéSA laboratory was invited by SILICOM to implement its interference reduction methods for a campaign to record GNSS-R signals on board an aircraft, carried out by CNES [E-10] *in September 2021.*

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

Après une thèse de doctorat soutenue à TéSA en 2018, Yoann a travaillé en tant qu'ingénieur R&D dans plusieurs start-ups (modélisation urbaine, planification industrielle, simulation ferroviaire) sur des problématiques d'optimisation et d'industrialisation. En 2022, il intègre un éditeur du monde du tourisme en montagne pour créer une équipe centrée sur l'innovation au service des clients. Cette nouvelle fonction l'amène à toucher à des problématiques vastes (performances web, compréhension et génération de texte, expérience utilisateur).

WHERE ARE THEY NOW?

After completing his PhD thesis at TéSA in 2018, Yoann worked as an R&D engineer on optimisation and industrialisation issues in several start-ups (in urban modelling, industrial planning, and railway simulation). In 2022, he joined a mountain-tourism publisher to create a team focused on innovation for customers. This new role involved him in a wide range of issues (web performance, text comprehension and generation, user experience).

Yoann Couble

1.3. TRAITEMENT STATISTIQUE DU SIGNAL

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

Pendant la période concernée par ce rapport, TéSA a mené une étude [E-23] pour la société Vitesco sur l'analyse du potentiel de la technologie ultra wideband (UWB) utilisée dans un mode de fonctionnement radar, dans le cadre d'applications automobiles. Il s'agirait de nouvelles fonctions basées sur l'analyse des réflexions des ondes électromagnétiques par l'utilisateur. L'analyse proposée dans cette étude s'est attachée à tester et vérifier les capacités du système à recueillir un signal exploitable et à proposer des pistes de traitement de ce signal.

Une autre thématique considérée dans une étude CNES [E-11] est la détection des interférences radio-fréquences (*radio frequency interference*, RFI). En effet, dans le cadre de ses activités de surveillance du spectre, le CNES développe des méthodes de détection automatique de signaux « parasites » (interférences volontaires ou involontaires) à partir de méthodes temps-fréquence (spectrogrammes). L'objet de cette étude était d'explorer la détection de RFI par une méthode « multi-résolution » dans le plan temps-fréquence, en partant d'un spectrogramme calculé à bord du satellite.

TéSA a proposé un algorithme « multi-résolution » s'appuyant sur l'idée du CNES d'enrichir la détection classiquement faite sur chacun des périodogrammes, par des détections faites sur la même image temps-fréquence après moyennage le long des lignes et/ou le long des colonnes (une façon de favoriser la détection et la maitrise de la fausse alarme globale).

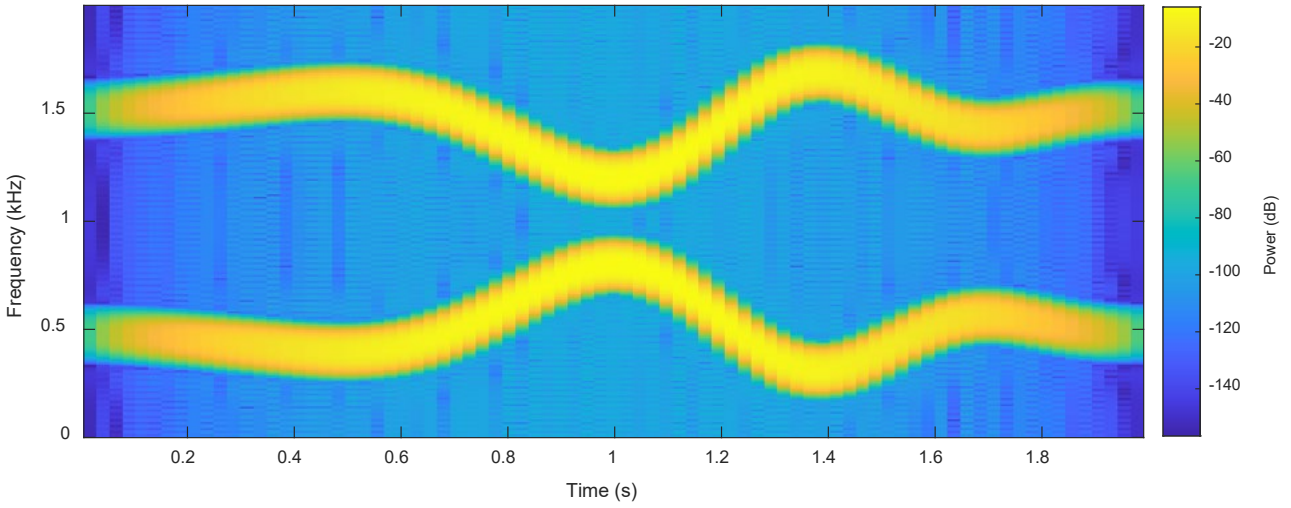
1.3. STATISTICAL SIGNAL PROCESSING

TéSA's know-how in statistical techniques for signal (and image) processing is often used to address very specific and highly-specialised problems in its fields of expertise.

During the period covered by this report, TéSA conducted a study [E-23] *for Vitesco on the analysis of the potential of UWB (ultra wideband) technology used in a radar operating mode for automotive applications. This study aimed to explore new functions based on the analysis of electromagnetic wave reflections by the user. The analysis presented in this study focused on testing and verifying the system's capabilities to capture a usable signal and proposing signal processing approaches.*

Another theme considered in a CNES study [E-11] *is the detection of RFI (radio frequency interference). As part of its spectrum monitoring activities, CNES is developing methods for the automatic detection of 'parasitic' signals (intentional or unintentional interference) using time-frequency methods (spectrograms). The aim of this study was to explore the detection of RFI using a 'multi-resolution' method in the time-frequency plane, based on a spectrogram calculated on board the satellite.*

TéSA proposed a 'multi-resolution' algorithm based on the CNES idea of enhancing conventional detection by means of each of the periodograms with detections performed on the same time-frequency image after averaging along the rows and/or columns (a way of improving detection and control of the overall risk of false alarms).



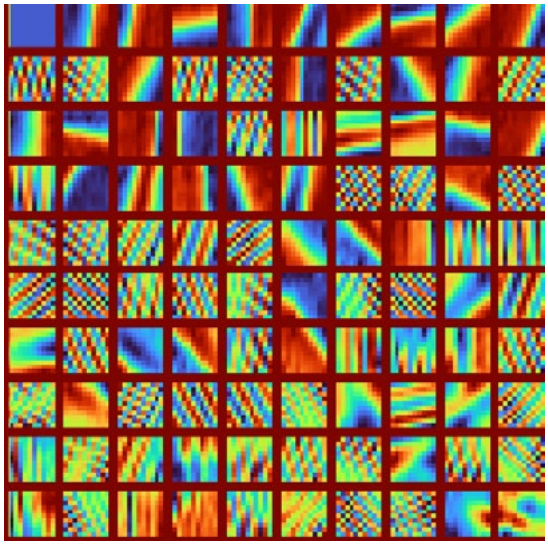
Une thématique commune à nombre d'instruments de télédétection est la nécessité d'une recalibration de l'instrument en cours du vol afin de garantir la précision des mesures fournies.

Il est notamment fondamental de caractériser dynamiquement la fonction de réponse spectrale de l'instrument (*Instrument Spectral Response Function* - ISRF), si l'ISRF en vol varie au cours du temps en fonction de la mécanique, de la thermique ou de la nature de la scène observée. Initiée à la demande du CNES [E-6], TéSA a dans ce contexte, étudié des solutions pour l'estimation de l'ISRF à partir de mesures spectrales sévèrement incomplètes, avec une mesure par fonction.

L'approche proposée a consisté en une modélisation parcimonieuse via une étape d'apprentissage de dictionnaire, une modélisation de la variabilité spectrale, et un algorithme d'estimation parcimonieuse de l'état de l'art qui a été adapté à ce problème. TéSA a également proposé une modélisation bayésienne qui permet de quantifier l'incertitude dans l'estimation, et de fournir des indices de fiabilité dans la reconstruction des réponses spectrales.

Complémentaire à la calibration, le débruitage des signaux reçus, en particulier d'images, est un problème fondamental en traitement d'images qui fait l'objet de nombreux travaux au sein des laboratoires de recherche comme TéSA. Les objectifs de l'étude proposée par le CNES [E-4] étaient de définir de nouvelles méthodes d'étalonnage et de restauration d'images basées sur la résolution d'un problème inverse par des techniques d'inférence Bayésienne.

TéSA a proposé d'utiliser des méthodes MCMC (*Monte Carlo Markov Chains*) récentes s'inspirant de dynamiques de Langevin et de les adapter pour estimer l'image d'intérêt conjointement



One issue common to many remote sensing instruments is the need to recalibrate the instrument during flight to guarantee the accuracy of the measurements provided.

In particular, it is essential to dynamically characterise the instrument's ISRF (Instrument Spectral Response Function), if it varies in flight over time as a function of the mechanics, the thermal conditions or the nature of the scene observed. At the request of CNES [E-6]*, TéSA has studied solutions for estimating the ISRF from severely incomplete spectral measurements, given one measurement per function.*

The proposed approach consisted of parsimonious modelling via a dictionary-learning step, spectral variability modelling, and a state-of-the-art, parsimonious estimation algorithm that was adapted to solve this problem. TéSA also proposed Bayesian modelling to quantify the uncertainty in the estimation and to provide reliability indices for the reconstruction of spectral responses.

As a complement to calibration, the denoising of received signals, particularly images, is a fundamental problem in image processing for which there are many ongoing research projects in laboratories such as TéSA's. The objectives of the study proposed by CNES [E-4]*, were to define new image calibration and restoration methods based on the resolution of an inverse problem using Bayesian inference techniques.*

TéSA proposed using recent MCMC (Monte Carlo Markov Chains) methods inspired by Langevin dynamics and adapting them to estimate the image of interest together with the parameters of a statistical model linking this image to the observed image (regularisation parameters, observation operator). The aim was to develop 'blind' or 'myopic' estimation methods for restoration in cases where the instrument is unknown or poorly known, a situation for which, at the start of this study, CNES had no proven method.

Again in image processing, TéSA has undertaken the study of image processing systems and algorithms for estimating deformations of aircraft structures in flight, through Quentin Demoulin's PhD thesis [T-3] *funded by Airbus.*

avec les paramètres d'un modèle statistique liant cette image à l'image observée (paramètres de régularisation, opérateur d'observation). L'objectif a été de développer des méthodes d'estimation « aveugle » ou « myope » pour la restauration dans le cas où l'instrument n'est pas connu ou est mal connu, situation pour laquelle, au début de cette étude, le CNES ne disposait pas de méthode éprouvée.

Toujours en traitement d'images, TéSA s'est lancé, à travers la thèse de doctorat de Quentin Demoulin [T-3] financée par Airbus, dans l'étude de systèmes et d'algorithmes de traitement d'images pour l'estimation de déformées de structures d'avion en vol.

Dans le cadre de la certification des avions, des mesures de déformations des ailes sont effectuées sous différents cas de charge (poids de l'avion, vitesse, angle d'attaque, etc.) pour valider et améliorer les modèles de déformation des ailes. Avec l'évolution constante de la finesse des procédures de certification, et le raccourcissement des cycles de validation, les méthodes de mesures nécessitent d'évoluer de même.

Après une étude approfondie de l'état de l'art dans le domaine de la reconstruction 3D sans contact, et afin de faire face aux contraintes industrielles d'installation embarquée sur avion, ainsi qu'aux contraintes environnementales en vol, cette thèse a permis d'élaborer une solution embarquée de mesure 3D par photogrammétrie multi-vues, adaptée au besoin d'Airbus.

Cette nouvelle méthode améliore la reconstruction 3D en tirant profit de la connaissance à priori des limites mécaniques d'un avion, injectées sous forme de contraintes de régularisation dans l'approche de photogrammétrie classique [C-5], [C-9], [C-12].

1.4. MACHINE LEARNING ET DÉTECTION D'ANOMALIES

Si TéSA est déjà reconnu pour ses compétences en *machine learning* incluant des méthodes d'analyse de données basées sur du traitement statistique du signal et des images (SVM - *Support Vector Machine*, *Isolation Forest*, *Kmeans*, PCA - *Principal Component Analysis* etc.), l'avènement du *deep learning* et ses performances viennent bousculer ce paysage.

As part of aircraft certification, wing deformation is measured under various stress conditions (aircraft weight, speed, angle of attack, etc.) to validate and improve wing deformation models. As certification procedures continue to evolve and validation cycles shorten, measurement methods need to evolve too.

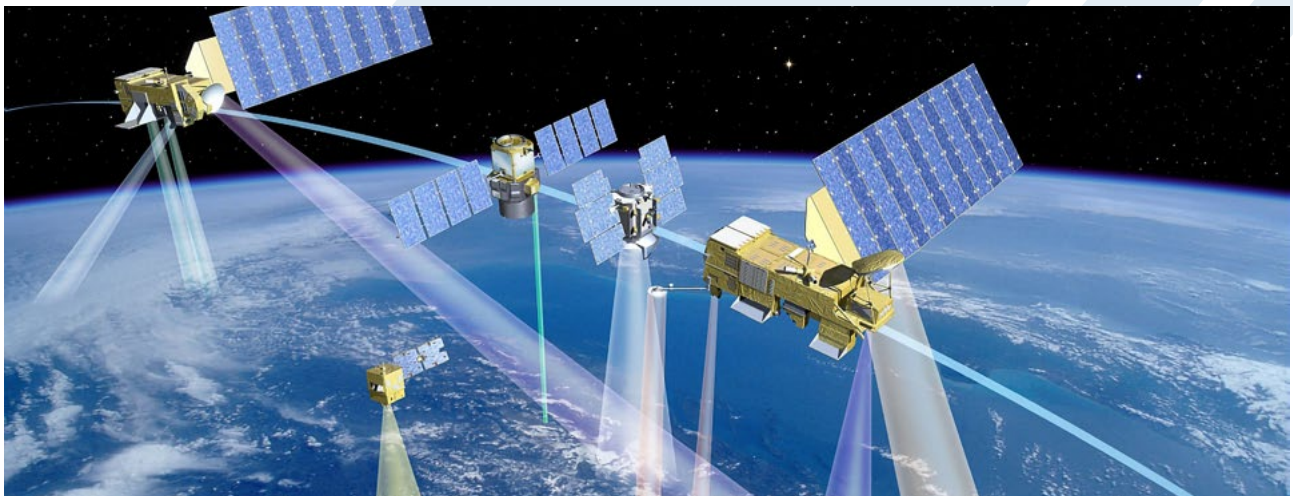
After an in-depth study of the state of the art in the field of non-contact 3D reconstruction, and in order to meet manufacturing constraints with respect to installation of on-board equipment in aircraft, and in-flight environmental constraints, this thesis enabled the development of an on-board 3D measurement solution using multi view photogrammetry, adapted to the needs of Airbus.

This new method improves 3D reconstruction by taking advantage of a priori knowledge of an aircraft's mechanical limits, injected in the form of regularisation constraints into the conventional photogrammetry approach [C-5], [C-9], [C-12].

1.4. MACHINE LEARNING AND ANOMALY DETECTION

While TéSA is already recognised for its expertise in machine learning, including data analysis methods based on statistical signal and image processing (SVM – Support Vector Machine, Isolation Forest, K-means, PCA – Principal Component Analysis, etc.), the advent of deep learning and its performance has changed the landscape.

It is therefore essential that TéSA become proficient in deep learning, to find the best machine learning or deep learning solutions to the problems posed in space and aeronautics. With this in mind, TéSA's activities for the period 2021-2022 will focus on machine learning-based anomaly detection and deep learning-based image processing.



Il est donc essentiel que TéSA gagne aussi une expertise en *deep learning*, pour trouver les meilleures solutions du domaine du *machine learning* ou du *deep learning* aux problèmes qui s'y prêtent dans le spatial et l'aéronautique. Dans cette perspective, les activités de TéSA pour la période 2021-2022 se sont articulées autour de la détection d'anomalies à base de *machine learning*, et de traitement d'image à base de *deep learning*.

En ce qui concerne le *machine learning*, une première étude relative à la détection d'anomalies appliquée aux « TLE » (*Two Line Elements*), une représentation standardisée des paramètres orbitaux des satellites, a été réalisée par le TéSA pour la société SpaceAble [E-21].

Cette étude a permis d'analyser l'apport d'algorithmes de détection et de classification de *machine learning* à cette problématique. Ces algorithmes ont été adaptés pour la détection et la classification automatique des événements anormaux qui peuvent se produire lorsque les satellites sont en orbite. L'étude des anomalies des orbites, c'est-à-dire la définition des types d'anomalies relevées et de leur importance pour le projet, a été également réalisée [E-20] permettant à SpaceAble de bénéficier de l'expertise du TéSA en systèmes satellitaires, notamment son expertise en orbitographie.

L'étude [E-21] a montré que l'utilisation de ces algorithmes appliqués directement sur les « TLE » était efficace pour la détection et la classification d'anomalies, évitant ainsi un calcul lourd de la position et vitesse du satellite sur son orbite.

Une seconde étude relative à la détection d'anomalies appliquée aux télémesures a été réalisée par TéSA pour le CNES [E-7]. En effet, lors des passages des satellites devant les stations terrestres, le CNES récupère les télémesures transmises.

With regard to machine learning, TéSA undertook an initial study for SpaceAble [E-21] *on anomaly detection applied to TLEs (Two-Line Elements), a standardised representation of satellite orbital parameters.*

This study analysed the contribution of machine learning detection and classification algorithms to this issue. These algorithms have been adapted for the automatic detection and classification of anomalous events that can occur when satellites are in orbit. A study of orbit anomalies, i.e. the definition of the types of anomalies detected and their importance for the project, was also carried out [E-20]*, enabling SpaceAble to benefit from TéSA's expertise in satellite systems, in particular its expertise in orbit determination.*

The [E-21] *study showed that the use of these algorithms applied directly to the TLEs was effective in detecting and classifying anomalies, thus avoiding the need for complex calculations of the satellite's position and velocity in orbit.*

TéSA carried out a second study for CNES [E-7] *on anomaly detection applied to telemetry. When satellites pass over ground stations, CNES retrieves the telemetry transmitted.*

These data from various sensors reflect the state of the satellite in question. CNES has set up a procedure for automatically detecting anomalies in this data, based on machine learning techniques.

However, these algorithms require a minimum amount of data in order to be effective, which means they cannot be used at the beginning of a satellite's life. To resolve this problem, TéSA proposed using data from a similar satellite that had already been launched sometime previously, in addition to data from the recently launched satellite, to increase the effectiveness of anomaly detection from the start of its orbit.

Ces données issues de capteurs divers reflètent l'état du satellite en présence. Le CNES a mis en place une procédure de détection automatique d'anomalies sur ces données, basée sur des techniques utilisées dans le domaine du *machine learning*.

Cependant, ces algorithmes nécessitent une quantité de données minimum pour être efficace, ce qui les rend inutilisables en début de vie des satellites.

Pour résoudre ce problème, le TéSA a proposé d'utiliser les données d'un satellite similaire déjà lancé depuis longtemps, en plus des données du satellite récemment lancé, pour renforcer l'efficacité de la détection d'anomalies dès le début de sa mise en orbite. L'étude a montré que ces techniques de transfert d'informations connues sous le nom de « *transfer learning* » permettent d'améliorer significativement la détection d'anomalies dès le début de la vie d'un satellite.

Afin d'explorer le potentiel du « *deep learning* », TéSA a réalisé pour la société Paprec, spécialisée dans la collecte et le tri du recyclage, une étude [E-24] visant à améliorer la détection des erreurs de tri dans la collecte des objets à recycler, laquelle est faite manuellement par les ouvriers chargés de la collecte.

TéSA a répondu favorablement à cette demande, car détecter des objets (bouteilles en verre, caisses en bois, etc.) dans des images « classiques » prises par des caméras RGB est une problématique similaire à celle posée par exemple, en observation de la Terre, pour la détection de débris dans la mer déjà abordée par le TéSA dans le passé.

De plus, cette étude était justement l'occasion pour TéSA de gagner en compétence dans le domaine du *deep learning*, notamment à travers l'étude d'une catégorie particulière de méthode de *deep learning* appelée YOLO (*You Only Look Once*), pour fournir à la société Paprec une solution atteignant des performances satisfaisantes. La solution de proposée par TéSA est actuellement en cours de déploiement dans les camions de collecte de déchets PAPREC.

Si le *deep learning* a largement fait les preuves de son intérêt et de sa puissance dans des tâches de classification automatique, son utilisation pour d'autres tâches, comme par exemple, la compression, fait l'objet de travaux de recherche récents et encourageants.

The study showed that these information transfer techniques, known as transfer learning, can significantly improve the detection of anomalies from the very beginning of a satellite's life.

To explore the potential of deep learning, TéSA carried out a study for Paprec, a company specialising in the collection and sorting of recovered objects. The study, [E-24]*, aims to improve the detection of sorting errors in the collection of objects for recycling, which is carried out manually by the workers in charge of collecting them.*

TéSA responded favourably to this request, because detecting objects (glass bottles, wooden crates, etc.) in 'conventional' images taken by RGB cameras is a similar problem to that posed, for example, in Earth observation, for the detection of debris in the sea, which had already been tackled by TéSA in the past.

What's more, this study gave TéSA the opportunity to gain expertise in the field of deep learning, in particular by investigating a particular category of the deep learning method called YOLO (You Only Look Once), in order to provide Paprec with a satisfactory solution. The solution proposed by TéSA is currently being deployed in PAPREC waste collection trucks.

While deep learning has largely proven its worth and power in automatic classification tasks, its use for other tasks, such as compression, is the subject of recent promising research.

›› Vinicius Alves de Oliveira présentant ses travaux lors d'une journée scientifique TéSA.
Vinicius Alves de Oliveira presenting his PhD work during a TéSA science day.

Dans l'idée de contribuer à cette évaluation, le TéSA s'est lancé, à travers la thèse de Vinicius Alves de Oliveira [T-7] cofinancée par le CNES et Thales Alenia Space, dans l'évaluation, en termes de performances et de complexité, des approches à base de *deep learning* pour la compression embarquée d'images d'observation de la Terre.

Cette thèse a mis en évidence que des réseaux neuronaux simplifiés ad hoc pouvaient montrer un grand potentiel de compression de ces images : leurs performances sont, dans la plupart des cas, supérieures aux algorithmes recommandés par le CCSDS (*Consultative Comitee for Space Data Systems*), avec une réduction de la complexité.

Par ailleurs, des tests préliminaires ont été menés sur une nouvelle méthode capable d'effectuer simultanément le débruitage et la compression, ce qui est très intéressant et prometteur d'un point de vue pratique [J-3], [J-20], [C-7].

Enfin, sur financement interne [E-22], TéSA a initié la création d'un outil interne d'intelligence artificielle, **TéSA.IA** rassemblant toutes les contributions de TéSA sur le sujet : à la fois les algorithmes standards, connus de la littérature, ainsi que les nouvelles méthodes développées dans TéSA, dans le cadre de ses projets de recherche, en particulier une librairie propriétaire basée sur les réseaux de neurones, ainsi que des algorithmes originaux de *transfer learning* et de détection d'anomalies.

With the aim of contributing to this evaluation, TéSA undertook the evaluation, in terms of performance and complexity, of deep learning-based approaches for the on-board compression of Earth observation images, through the PhD thesis of Vinicius Alves de Oliveira [T-7]*, co-funded by CNES and Thales Alenia Space.*

This thesis showed that simplified ad hoc neural networks have great potential for compressing these images: in most cases, their performance is better than the algorithms recommended by the CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems), with a reduction in complexity.

In addition, preliminary tests have been carried out on a new method capable of performing denoising and compression simultaneously, which is very interesting and promising from a practical point of view [J-3], [J-20], [C-7].

Finally, with internal funding [E-22] *TéSA has initiated the creation of an internal artificial intelligence tool* ***TéSA.IA*** *bringing together all of TéSA's contributions on the subject: both standard algorithms, known from the literature, and new methods developed within TéSA as part of its research projects, in particular a proprietary library based on neural networks, as well as original transfer learning and anomaly detection algorithms.*

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

Suite à l'obtention de son diplôme de docteur à TéSA en 2018 sur les récepteurs CPMs (*Continus Phase Modulation*), Charles-Ugo a travaillé un an en sous-traitance chez Silicom auprès d'Airbus DS sur un projet d'IoT par satellite. Puis fin 2019, il est embauché comme ingénieur électronique à Airbus DS pour la conception d'IP de traitement du signal sur cible FPGA.

WHERE ARE THEY NOW?

Following the completion of his PhD in 2018 on CPM (Continuous Phase Modulation) receivers, Charles-Ugo spent a year working as a subcontractor at Silicom with Airbus DS on a satellite-based IoT project. Then, towards the end of 2019, he was hired as electronics engineer by Airbus DS to design IP signal processing on FPGA (Field Programmable Gate Array) targets.

Charles-Ugo Piat

2. COMMUNICATIONS NUMÉRIQUES

Les projets réalisés par TéSA dans le domaine des communications numériques durant la période 2021-2022 trouvent leurs applications aussi bien dans les communications par satellite que dans les techniques de navigation. Les thématiques de ces projets peuvent être classées selon trois grands axes :

- L'AIS (*Automatic Identification System*) par satellite,
- L'accès multiple et le canal de propagation, modulation de signaux NB-IoT (*Narrowband Internet of Things*) et adaptation du protocole entre un terminal sol et un satellite,
- La charge utile, mesure de performances et effets des fortes puissances.

2. DIGITAL COMMUNICATIONS

TéSA's digital communications projects for the period 2021-2022 have applications in both satellite communications and navigation technology. The themes of these projects can be classified under three main headings:

- *Satellite AIS (Automatic Identification System);*
- *Multiple access and the propagation channel, modulation of NB-IoT (Narrowband Internet of Things) signals and adaptation of the protocol for links between a ground terminal and a satellite;*
- *The payload, measuring performance and the effects of high RF power on it.*

2.1. AIS PAR SATELLITE

Les activités de TéSA en communications numériques concernent notamment les systèmes de positionnement, thématique dans laquelle TéSA a acquis une grande expérience à travers plusieurs projets passés, que ce soit en traitement du signal ou en communications numériques.

Durant la période 2021-2022, une étude sur les méthodes de démodulation des signaux AIS a été réalisée [E-13] pour le CNES.

Cette étude fait suite à plusieurs études précédentes. Le TéSA avait en effet exploré l'utilisation des signaux AIS pour faire le suivi et la surveillance des navires depuis des satellites.

2.1. SATELLITE AIS

TéSA's activities in digital communications concern in particular positioning systems, a field in which TéSA has acquired extensive experience through several past projects, both in signal processing and in digital communications.

During the 2021-2022 period, a study on AIS signal demodulation methods was carried out [E-13] *for CNES.*

This study followed on from several previous ones. TéSA had explored the use of AIS signals to track and monitor ships from satellites.

Les principaux défis venaient de l'utilisation non conventionnelle qui était faite de ce système. La réception par satellites de signaux destinés à être échangés entre bateaux au niveau de la mer induit un rapport signal à bruit très défavorable et la perte des propriétés de synchronisation des transmissions à cause des délais de propagation plus élevés.

La thèse de doctorat de Raoul Prévost, soutenue à TéSA en 2012, avait proposé une solution dont les performances surpassaient les solutions de l'état de l'art en tirant notamment parti de la présence d'un CRC dans les messages afin d'aider à en corriger les erreurs.

La recherche autour de la réception des signaux AIS par satellite s'est poursuivie ces dernières années avec des propositions dans la littérature de solutions alternatives et des extensions aux méthodes développées par TéSA. L'étude réalisée en 2021-2022 a permis de mettre à niveau le récepteur CNES en tirant parti de ces propositions et de vérifier que les modifications apportées améliorent effectivement les performances, tout en tenant compte des contraintes liées à l'environnement satellite en termes de puissance de calcul.

En effet, il est souhaité que toutes les étapes de post-traitement puissent être effectuées par le calculateur embarqué dans le satellite, limitant ainsi la quantité de données à transmettre au sol. Un effort particulier d'optimisation des algorithmes est donc nécessaire afin de minimiser les temps de calcul et de se rapprocher autant que possible du temps réel.

The main challenges came from the unconventional use made of this system. Satellite reception of signals intended to be exchanged between ships at sea level results in a very unfavourable signal-to-noise ratio and the loss of transmission synchronisation properties due to higher propagation delays.

The PhD thesis of Raoul Prévost, defended at TéSA in 2012, had proposed a solution that outperformed state-of-the-art solutions by taking advantage of the presence of a CRC (Cyclic Redundancy Check) code in messages to help correct errors.

Research into the reception of AIS signals by satellite has continued in recent years, with proposals in the literature for alternative solutions and extensions to the methods developed by TéSA. The study carried out in 2021-2022 made it possible to upgrade the CNES receiver by taking advantage of these proposals and to check that the modifications made actually improve performance, while taking into account the constraints linked to the satellite environment in terms of computing power.

The aim is for all the post-processing stages to be carried out by the satellite's on-board computer, thereby limiting the amount of data to be transmitted to the ground. A special effort is therefore required to optimise the algorithms to minimise calculation times and get as close as possible to real time.

>> Prix des doctorants des journées scientifiques TéSA 2022.
PhD prizes during the TéSA science days in 2022.

2.2. ACCÈS ALÉATOIRE ET CANAL DE PROPAGATION

L'accès aléatoire sous-entend une absence de coordination entre des utilisateurs transmettant sur un même canal de communication, ce qui peut créer des collisions.

Ce type d'accès, alternatif à l'accès traditionnel où l'on alloue à chaque utilisateur une ressource de transmission, permet de répondre aux besoins des réseaux émergents tels que l'IoT (*Internet of Things*) et le M2M (*Machine To Machine*) face au nombre croissant d'utilisateurs. Cependant, le nombre de collisions dans ce type d'application suit, lui aussi, une croissance exponentielle, ce qui rend leur résolution un enjeu crucial.

2.2. RANDOM ACCESS AND PROPAGATION CHANNEL

Random access implies a lack of coordination between users transmitting on the same communication channel, which can lead to message collisions.

This type of alternative to the traditional access process (whereby each user is allocated a transmission resource) makes it possible to meet the needs of emerging networks such as the IoT (Internet of Things) and M2M (Machine to Machine), given the growing number of users. However, the number of collisions in such applications is also growing exponentially, making their resolution a crucial issue.

>> Corentin Lubeigt (à gauche) et Victor Perrier (à droite) ont présenté leurs travaux de thèse durant un séminaire TéSA.
Corentin Lubeigt (left) et Victor Perrier (right) presented their PhD work during a TéSA seminar.

Le marché de l'IoT, dont la croissance, amorcée il y a quelques années, s'accélère, intéresse aujourd'hui les opérateurs satellites pour pallier le problème de couverture dans certaines zones peu ou pas desservies par les réseaux terrestres, mais accessibles par des satellites.

Les standards tels que Sigfox, LoRa, NB-IoT ont été développés pour des réseaux sans fil terrestres et leur extension aux communications par satellite n'est ni immédiate, ni adaptée. Deux alternatives sont donc possibles : soit une extension des technologies existantes aux spécificités des communications par satellite, soit la définition d'une nouvelle couche physique passant par la conception de nouvelles formes d'ondes adaptées à la fois aux contraintes des applications IoT et aux caractéristiques des communications par satellite.

Actuellement, les systèmes satellitaires grand public ne sont pas standardisés et ceux qui sont sur le point de l'être envisagent de s'appuyer sur une infrastructure onéreuse ou ne permettent pas de réutiliser les terminaux actuellement disponibles pour les réseaux terrestres.

The IoT market, whose growth began a few years ago and is now accelerating, is attracting the interest of satellite operators to compensate for the little or no coverage by terrestrial networks in some areas, which are nevertheless accessible by satellite.

Standards such as Sigfox, LoRa and NB-IoT were developed for terrestrial wireless networks, but they cannot be extended to satellite communications immediately, nor would this be suitable. There are therefore two possible alternatives: either to extend existing technologies to include the specific characteristics of satellite communications, or to define a new physical layer by designing new waveforms adapted to both the constraints of IoT applications and the characteristics of satellite communications.

At present, satellite systems for the general public are not standardised, and those that are about to be standardised are either based on an expensive infrastructure or are incompatible with the terminals currently available for terrestrial networks.

Après la thèse de doctorat de Sylvain Cluzel, sur un système M2M/IoT par satellite pour l'hybridation d'un réseau NB-IoT via une constellation LEO (*Low Earth Orbit*), soutenue en 2019, TéSA a poursuivi ses activités dans le domaine de l'IoT et du M2M, à travers un projet avec l'IRT Saint Exupéry (ELLIOT) et une thèse cofinancée par Thales Alenia Space (TAS) et la région Bretagne, détaillés ci-après.

2.2.1. ELLIOT

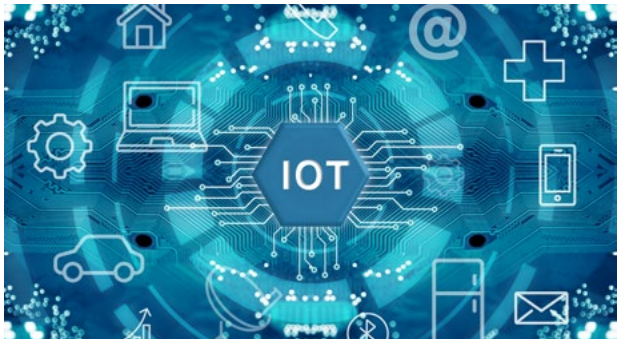
Le projet ELLIOT est piloté par l'Institut de Recherche Technologique « Aéronautique, Espace et Systèmes Embarqués » de Toulouse (IRT Saint Exupéry), validé par l'ANRT, et vise à lever les verrous technologiques qui permettent un service d'IoT à large couverture géographique à partir de satellites bas-coût (nanosatellites).

Le premier objectif du projet ELLIOT est d'étudier les modifications envisageables notamment des technologies LoRa et NB-IoT ainsi que la création d'un nouveau protocole qui permettent de tenir les objectifs fixés de coût et de qualité de service. L'innovation principale consiste à minimiser l'empreinte environnementale de ce nouveau service et à réutiliser au mieux les technologies existantes développées pour les réseaux sol.

L'IRT a souhaité impliquer TéSA [E-25] dans le lot 1 visant l'étude de l'adaptation des protocoles IoT au satellite mais aussi dans les lots suivants qui devront réaliser un démonstrateur démontrant la viabilité de la solution ainsi que des expérimentations en laboratoire et une campagne de test en environnement réel, le projet étant prévu pour 27 mois.

La première étape du projet a permis d'évaluer les technologies ouvertes existantes (principalement LoRa et NB-IoT) et vérifier leur adéquation avec les objectifs du projet ELLIOT (infrastructure à bas coûts et terminaux à bas coûts).

Les verrous technologiques sont listés et des solutions passant notamment par des modifications des protocoles doivent être trouvées pour permettre éventuellement au projet ELLIOT d'utiliser ces technologies comme base technique.



>> Raoul Prévost (à droite), ingénieur de recherche TéSA sur le projet ELLIOT.
Raoul Prévost (right), TéSA research engineer on the ELLIOT project.

Following Sylvain Cluzel's PhD thesis on a satellite-based M2M/IoT system for hybridising an NB-IoT network via a LEO (Low Earth Orbit) constellation, defended in 2019, TéSA has continued its activities in the field of IoT and M2M, through a project with the IRT Saint Exupéry (ELLIOT) and a PhD thesis co-funded by Thales Alenia Space (TAS) and the Brittany region, described in detail below.

2.2.1. ELLIOT

The ELLIOT project is led by the Toulouse-based Institut de Recherche Technologique "Aéronautique, Espace et Systèmes Embarqués" (IRT Saint Exupéry), and has been validated by the French Association for Research and Technology (ANRT - Association nationale de la recherche et de la technologie). Its aim is to overcome the technological barriers to enable an IoT service with wide geographical coverage to be provided from low-cost satellites (nanosatellites).

The first objective of the ELLIOT project is to study possible modifications to LoRa and NB-IoT technologies and to create a new protocol to meet the cost and quality-of-service objectives. The main innovation is to minimise the environmental footprint of this new service and make the best possible use of existing technologies developed for ground networks.

The IRT wanted to involve TéSA [E-25] *in work package 1, which involved studying the adaptation of IoT protocols to the satellite, as well as in subsequent work packages, which would involve producing a laboratory demonstrator to confirm the viability of the solution, as well as laboratory experiments and a test campaign in a real environment. The project is scheduled to last 27 months.*

The first stage of the project assessed existing open technologies (mainly LoRa and NB-IoT) and verified their suitability for the objectives of the ELLIOT project (low-cost infrastructure and low-cost terminals).

L'étude de TéSA a porté sur une large réutilisation des technologies existantes avec peu de modifications. En effet, la nature de certaines des limitations repérées dans LoRa ou NB-IoT peut laisser craindre une trop grande complexité de leurs solutions ou des altérations trop importantes des technologies de base.

TéSA a proposé de développer un nouveau protocole, baptisé « Ping-Pong », construit au-dessus de la couche physique de NB-IoT afin de permettre la réutilisation des terminaux existants. Ce nouveau protocole réutilise certains principes efficaces présents dans NB-IoT tout en les simplifiant au maximum (premier accès aléatoire puis allocation des ressources pour les échanges de données, authentification…) et propose des mécanismes nouveaux comme le réveil programmé des terminaux basé sur la prédictibilité des passages de satellites.

En 2022, le projet n'est pas fini… rendez-vous au prochain rapport d'activité pour découvrir l'intégralité de ses réalisations et avancées.

2.2.2. ACCÈS RADIO POUR LES RÉSEAUX DE CAPTEURS PAR SATELLITE (SAT-IOT)

La thématique de l'IoT est aussi abordée dans une thèse de doctorat réalisée à l'IMT Atlantique, cofinancée par TAS et la région Bretagne. L'objectif de la thèse d'Anouar Jerbi [T-10] est d'évaluer l'intérêt des modulations de phase continue (CPM – *Continuous Phase Modulation*) dans une application d'Internet des Objets par satellite.

Avec les communications IoT par satellite en orbite basse, certains phénomènes de dégradation de la transmission s'accentuent tels que l'effet Doppler non négligeable, des non-linéarités engendrées par des amplificateurs de puissance faible coût ou l'interférence d'accès multiple.

La thèse a proposé des solutions à ces problèmes, adaptées à la CPM, qui en font une alternative aux schémas développés pour les réseaux IoT terrestres [J-28], [C-23], [C-26].

The technological obstacles have been listed and solutions, including changes to the protocols, must be found to enable the ELLIOT project to be based on these technologies.

The TéSA study involved the extensive re-use of existing technologies, with few modifications. Indeed, the nature of some of the limitations identified in LoRa or NB-IoT may mean that their solutions are too complex or that the basic technologies will be altered too significantly.

TéSA has proposed developing a new protocol, called 'Ping-Pong', built on top of the NB-IoT physical layer to enable existing terminals to be reused. This new protocol reuses some of the effective principles of NB-IoT, while simplifying them as much as possible (first random access, then allocation of resources for data exchanges, authentication, etc.) and proposes new mechanisms such as the programmed waking-up of terminals based on the predictability of satellite passes.

At the time of writing, the project has not yet been finished – look out for the next activity report to learn about all its outcomes.

>> Anouar Jerbi présentant les travaux de sa thèse durant les journées scientifiques TéSA 2022.
Anouar Jerbi presenting his PhD work during TéSA science days in 2022.

2.2.2. RADIO ACCESS FOR SATELLITE SENSOR NETWORKS (SAT-IOT)

The IoT theme is also addressed in a PhD thesis being carried out at ITM Atlantique, co-funded by TAS and the Brittany region. The aim of Anouar Jerbi's thesis [T-10] *is to evaluate the benefits of CPM (Continuous Phase Modulation) in a satellite-based Internet of Things application.*

With IoT communications by low-orbit satellites, certain transmission degradation phenomena become more pronounced, such as the non-negligible Doppler effect, non-linearities generated by low-cost power amplifiers and multiple access interference.

The thesis proposed solutions to these problems, adapted to CPM, which make it an alternative to the schemes developed for terrestrial IoT networks [J-28], [C-23], [C-26].

2.3. CHARGES UTILES

Les activités de TéSA en communications numériques touchent également la charge utile des satellites. Les problématiques sur lesquelles TéSA s'est focalisé concernent la mesure et le diagnostic des charges utiles intégrées, les non-linéarités passives et la programmation des études de recherche et développement concernant les mesures de puissance RF dans le cadre de travaux de l'ESA et des agences spatiales européennes. Trois études ont été effectuées.

2.3.1. MESURE EVM POUR LE DIAGNOSTIC

Face à la complexité des charges utiles des satellites de télécommunication à venir, il devient indispensable d'imaginer une méthode de diagnostic rapide qui permette de réduire le nombre de mesures standards pendant l'assemblage, l'intégration et les tests et la recette en vol des satellites. Déjà utilisée par la norme LTE (*Long Term Evolution*) et les standards de télécommunications sol, la mesure de l'EVM (*Error Vector Magnitude*) semble être une mesure adaptée pour la réalisation de tels diagnostics. À partir de simulations de chaines de transmission, puis de mesures d'EVM sur les chaines simulées, cette étude a permis de définir quels sont les pannes et les dysfonctionnements de la chaine de transmission de télécommunications, qui pourront être diagnostiqués.

Cette étude [E-12] a été proposée par le CNES ; TAS, dans la réponse à l'appel d'offre, a souhaité inclure un partenariat avec TéSA. En effet, le TéSA a une forte expertise sur le sujet : des études d'optimisation de liaisons ont déjà été faites pour le CNES dans des études passées, basées sur l'EVM des amplificateurs non-linéaires ; de plus, par le biais de Jacques Sombrin, le TéSA participe depuis 2016 à un groupe de standardisation IEEE P1765 qui vise à standardiser la mesure d'EVM et la calibration des instruments de mesure et à préciser l'incertitude sur cette mesure.

Les premières analyses ont montré que la simple mesure EVM était insuffisante pour remplacer tous les tests standards. Cependant la mesure EVM combinée à des mesures complémentaires notamment basées sur le signal modulé pourrait aboutir à un gain de temps important.

2.3. PAYLOADS

TéSA's digital communications activities also involve satellite payloads. TéSA has focused on the measurement and diagnosis of integrated payloads, passive non-linearities and the programming of research and development studies on RF power measurements as part of projects for ESA and European space agencies. Three studies were carried out.

2.3.1. EVM MEASUREMENT FOR DIAGNOSTICS

Given the complexity of future telecommunications satellite payloads, it has become essential to devise a rapid diagnostic method that reduces the number of standard measurements required during satellite assembly, integration and test and in-flight acceptance. Already used by the LTE (Long Term Evolution) standard and ground telecommunications standards, the EVM (Error Vector Magnitude) measurement seems to be suitable for carrying out such diagnostics. Based on simulations of transmission chains, followed by EVM measurements on the simulated chains, this study makes it possible to define which faults and malfunctions in the telecommunications transmission chain can be identified.

This study [E-12] *was proposed by CNES; TAS, in its response to the call for tenders, wished to include TéSA as a partner. TéSA has a great deal of expertise in this area: link optimisation studies have already been carried out for CNES in previous research, based on the EVM of non-linear amplifiers; moreover, through Jacques Sombrin, TéSA has been participating since 2016 in an IEEE standardisation group P1765 which aims to standardise the measurement of EVM and the calibration of measuring instruments, and to specify the uncertainty of this measurement.*

Initial analyses showed that the EVM measurement alone could not replace all the standard tests. However, EVM measurement combined with complementary measurements, particularly those based on the modulated signal, could result in significant time savings.

Dans le cadre de cette étude, la première tâche a permis de synthétiser le travail de normalisation en cours pour la détermination de l'incertitude de l'EVM et de définir les séquences de tests les plus adaptées aux défauts à identifier. On a optimisé les séquences de tests dans un objectif de réduction des tests de manière à adresser une première approche industrielle dans la logique de gain de planning dans la recette d'un équipement ou d'une charge utile.

La seconde tâche a permis de réaliser un simulateur et de mettre en œuvre les algorithmes définis lors de la première tâche. Ce simulateur prend en entrée une description de chaine de transmission et permet de l'outiller pour la mesure de l'EVM et d'autres paramètres nécessaires à l'analyse de la chaine et des pannes éventuelles qui ont également été simulées [C-29].

As part of this study, the first task was to summarise the standardisation work in progress for determining the uncertainty of the EVM and to define the test sequences best suited to the defects to be identified. We optimised the test sequences with the aim of reducing the number of tests so as to consider a first industrial approach as a strategy for saving time for the formal acceptance of equipment or a payload.

The second task involved creating a simulator and implementing the algorithms defined in the first task. This simulator takes as input a description of the transmission chain and enables it to be equipped to measure the EVM and other parameters needed to analyse the chain and any faults that may occur, which were also simulated [C-29].

2.3.2. ÉTUDE DES PRODUITS D'INTERMODULATION PASSIFS

Les produits d'intermodulation passifs (Passive InterModulation - PIM) sont générés dans les émetteurs de puissance, les antennes d'émission ou l'environnement autour de ces éléments. Les produits d'intermodulation sont très faibles mais ils peuvent générer des fréquences dans les bandes de réception qui vont désensibiliser, brouiller ou même aveugler les récepteurs proches.

Ils posent des problèmes de plus en plus importants sur les satellites, sur les stations de base de téléphonie, sur les avions et sur les bateaux à cause de l'augmentation des puissances émises, des largeurs de bandes passantes utilisées et des nombres de bandes de fréquences, d'émetteurs et d'antennes.

2.3.2. STUDY OF PASSIVE INTERMODULATION PRODUCTS

PIM (Passive InterModulation) products are generated in power transmitters, transmitting antennas or the environment around these elements. Intermodulation products are very weak, but they can generate frequencies in the reception bands that will desensitise, scramble or even blind nearby receivers.

They are causing ever-greater problems for satellites, telephone relay stations, aircraft and ships because of the increase in transmitted power, the bandwidths used and the number of frequency bands, transmitters and antennas.

Cette étude pour le CNES [E-15] fait suite à une étude théorique menée par TéSA précédemment et vise à démontrer le bon accord entre les prédictions théoriques réalisées par TéSA et les mesures réalisées par la société COBHAM, partenaire de l'étude.

Pour cela, on a proposé un modèle basé le plus possible sur la physique du dispositif. L'objectif est de pouvoir prédire, avec un bon niveau de confiance, la puissance des PIM qui seront générés par un isolateur afin de diminuer les marges de conception d'une charge utile de télécommunications par satellite.

L'étude a permis de réaliser de nouvelles mesures plus précises grâce à l'amélioration du banc et la définition de configuration de mesures permettant de mieux quantifier les différences entre les prédictions classiques et celle d'un nouveau modèle comportemental ou physique. Le modèle basé sur l'hystérésis a été modifié afin de prendre en compte un exposant différent de l'exposant 2 classique et a été complété par un filtre permettent d'expliquer la variabilité en fréquence des mesures.

Par ailleurs des mesures complémentaires sur un même type de dispositif mais utilisant un matériau magnétique différent ont été réalisées par la société COBHAM pour vérifier si les mêmes caractéristiques sont présentes afin d'orienter les futures recherches sur le modèle physique [C-28].

This study for CNES [E-15] *follows on from a previous theoretical study carried out by TéSA and aims to demonstrate the good agreement between the theoretical predictions made by TéSA and the measurements made by COBHAM, a partner in the study.*

To do this, we proposed a model based as much as possible on the physical characteristics of the device. The aim was to be able to predict, with a good level of confidence, the power of the PIMs that will be generated by an isolator, in order to reduce the design margins of a satellite telecommunications payload.

The study has enabled new, more accurate measurements to be taken, thanks to improvements to the bench and the definition of measurement configurations that allow the differences between conventional predictions and those of a new behavioural or physical model to be better quantified. The model based on hysteresis was modified to take into account an exponent different from the classic exponent to the power of 2 and was supplemented by a filter to explain the frequency variability of the measurements.

Additional measurements on the same type of device but using a different magnetic material were carried out by COBHAM to check whether the same characteristics are found, in order to guide future research on the physical model [C-28].

>> Gastón de Boni Rovella présentant les travaux de sa thèse durant les journées scientifiques TéSA 2022.
Gastón de Boni Rovella presenting his PhD work during TéSA science days in 2022.

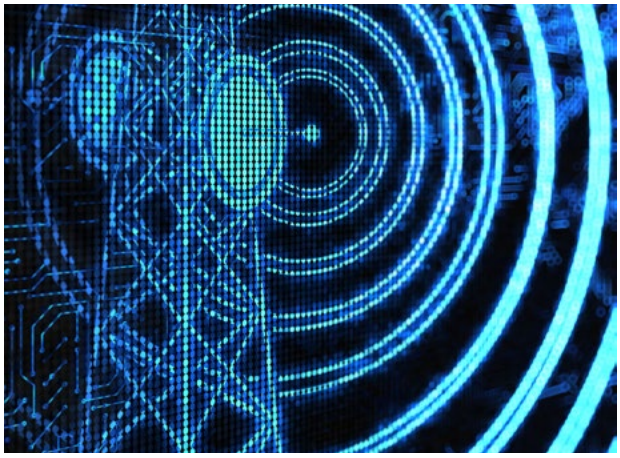
2.3.3. MESURE RF DE PUISSANCE

TéSA a participé à la critique, la rédaction de commentaires et la proposition de parties nouvelles du document d'harmonisation de la R&T spatiale européenne concernant les fortes puissances RF [E-14].

L'objectif des travaux pour le CNES est de définir, en collaboration avec l'ESA (Agence Spatiale Européenne) et les agences des différents pays européens, une feuille de route européenne harmonisée des recherches à réaliser à moyen terme (5 à 10 ans) dans le domaine des mesures d'équipements radiofréquence (RF) de forte puissance et des charges utiles et satellites utilisant ces équipements.

Les phénomènes liés à la forte puissance RF visés par la feuille de route européenne sont ceux qui risquent de dégrader les performances ou l'intégrité des équipements, en particulier :

- L'effet *multipactor*, une avalanche d'électrons accélérés par le champ électromagnétique dans les équipements sous vide pouvant dégrader les performances de l'équipement ;
- L'effet *corona*, un claquage par décharge gazeuse à pression réduite pouvant détruire l'équipement ;
- La génération de produit d'intermodulation passifs (PIM) dans les non-linéarités des équipements d'émission pouvant créer des interférences dans les récepteurs.



2.3.3. RF POWER MEASUREMENTS

TéSA took part in appraising, commenting on and proposing new sections for the European space R&T harmonisation document on high-power RF [E-14].

The aim of TéSA's work for CNES is to define, in collaboration with ESA (European Space Agency) and the space agencies of the various European countries, a harmonised European roadmap for the research to be carried out in the medium term (5 to 10 years) for the measurements of high-power radio frequency (RF) equipment and the payloads and satellites using this equipment.

The phenomena linked to high-power RF targeted for research by the European roadmap are those which risk degrading the performance or integrity of equipment, in particular:

- *the multipactor effect, an avalanche of electrons accelerated by the electromagnetic field in equipment put in a vacuum, that can degrade equipment performance;*
- *the corona effect, a breakdown caused by gas discharge at reduced pressure, which can destroy equipment;*
- *the generation of PIMs (passive intermodulation products) in the non-linearities of transmitting equipment, that can create interference in receivers.*

Le but des recherches proposées dans la feuille de route est de faire avancer l'état de l'art du domaine et de connaître mieux les phénomènes afin de standardiser dans tous les pays européens les méthodes de simulation et de mesures de ces équipements et de spécifier les performances minimales à tenir pour être accepté comme équipement qualifié dans un satellite.

Le but est d'éviter l'apparition de problèmes en orbite tout en ne faisant que les mesures strictement nécessaires afin de ne pas augmenter drastiquement les délais de fabrication et le coût de ces équipements.

On a insisté sur les points pour lesquels l'état de l'art est moins bien connu :

- Les équipements comportant des parties diélectriques ;
- Les phénomènes encore peu étudiés car à la limite entre deux types, par exemple le déclenchement d'un claquage *corona* après un dégazage provoqué par un effet *multipactor* ou bien la génération d'harmoniques et de produits d'intermodulation par l'effet *multipactor* en présence de plusieurs porteuses.

The aim of the research proposed in the roadmap is to advance the state of the art in the field and gain a better understanding of the phenomena involved, in order to standardise simulation and measurement methods for this equipment in all European countries, and to specify the minimum performance required for acceptance as qualified equipment in a satellite.

The objective is to avoid problems occurring in orbit, while taking only those measurements that are strictly necessary to avoid drastically increasing manufacturing times and the cost of this equipment.

Emphasis was placed on points where the state of the art is less well known:

- *Equipment with dielectric parts;*
- *Phenomena that have not yet been studied much because they straddle the boundary between two types, such as the triggering of a corona breakdown after gas discharge caused by a multipactor effect, or the generation of harmonics and intermodulation products by the multipactor effect in the presence of several carriers.*

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

Après avoir soutenu sa thèse de doctorat à TéSA en 2018, Bastien a travaillé 6 mois en tant qu'ingénieur d'études à l'ISAE-SUPAERO au département DISC/RESCOM, dans le but d'optimiser les standards de diffusion vidéo par satellite. Il est aujourd'hui ingénieur chef de projet à Viveris Technologies à Toulouse, où il effectue principalement des études de R&T avec divers clients du domaine des satcoms.... Et parfois avec TéSA.

WHERE ARE THEY NOW?

After defending his PhD thesis at TéSA in 2018, Bastien worked for 6 months as a design engineer at ISAE-SUPAERO in the DISC/RESCOM department, on a project to optimise satellite-based video broadcasting standards. He is now a project engineer at Viveris Technologies in Toulouse, where his main focus is on R&T studies with various satcom customers – and sometimes with TéSA.

Bastien Tauran

3. RÉSEAUX

Les projets réalisés par TéSA dans le domaine des réseaux durant la période 2021-2022 trouvent leurs applications dans les communications par satellite. Les thématiques de ces projets peuvent être classées selon trois grands axes :

- Le transport et le contrôle de congestion,
- Les problèmes de flot et de routage des communications dans les constellations de satellites,
- La convergence *broadcast-multicast*.

3. COMPUTER NETWORKING

TéSA's computer networking projects for the period 2021-2022 have applications in satellite communications. The themes of these projects can be classified under three main headings:

- *Transport and congestion control,*
- *Data flow and routing problems in satellite constellation communications,*
- *Broadcast-multicast convergence.*

3.1. CONTRÔLE DE CONGESTION

Le contrôle de congestion dans les réseaux de communications est un axe de recherche présent dans TéSA depuis sa création et qui ne cesse d'apporter son lot de questions et de problèmes à résoudre.

Depuis 1980, de nombreux algorithmes de contrôle de congestion ont été proposés, comme TCP (*Transmission Control Protocol*). Dans le monde du satellite, plusieurs déclinaisons de TCP ont été développées pour répondre aux différentes contraintes liées à un lien satellite. Toutefois, toutes ces méthodes de contrôle de congestion atteignent leurs limites, même en utilisant les nouvelles évolutions de ces mécanismes, face à des réseaux plus complexes et plus évolutifs, comme ceux rencontrés notamment dans le cadre de liaison LEO (*Low Earth Orbit*).

Il est donc nécessaire de proposer une façon différente de construire le contrôle de congestion, qui soit capable de s'adapter à des réseaux de plus en plus complexes et évolutifs.

3.1. CONGESTION CONTROL

TéSA has been doing research on congestion control in telecommunication networking since its inception, as there are always issues and problems to be solved.

Since 1980, numerous congestion control algorithms have been proposed, such as TCP (Transmission Control Protocol). In the satellite world, several variations of TCP have been developed to meet the range of constraints associated with a satellite link. However, all these congestion control methods have their limits, even when using the latest developments, when faced with more complex and evolving networks, such as those encountered in the context of LEO (Low Earth Orbit) links.

It is therefore necessary to propose a different way of constructing congestion control, one that is capable of adapting to increasingly complex and evolving computer networks.

3.1.1. TRANSPORT POUR LES CONSTELLATIONS DE SATELLITES

Le développement des constellations de satellites en orbites basses assurant des services de télécommunication est un des axes majeurs des télécommunications par satellite. Ces systèmes permettent une couverture mondiale ou sur de larges zones géographiques et fournissent des moyens de connectivités aux zones qui ne sont pas desservies par des moyens terrestres.

Utilisées à des fins de communications de données (donc en mode paquet), elles soulèvent des questions nouvelles. En effet, ces constellations sont caractérisées par d'importantes variations de délais que ce soit en raison du routage au travers de la constellation elle-même dans le cas d'une connectivité inter-satellite via des liaisons radio ou optiques ou dans une moindre mesure à la variation d'élévation du satellite.

Ces phénomènes, ajoutés aux perturbations liées à la couche accès (gestion des ressources et *hand-over*) vont impacter les performances des protocoles de transport comme TCP ou QUIC (*Quick UDP Internet Connections*) qui sous-tendent la majorité des applications actuelles. Les travaux de recherche sur ces sujets bien particuliers ne répondent plus aux besoins actuels des piles protocolaires récentes, d'où l'intérêt de rouvrir le débat et de faire une étude approfondie sur ce sujet. Dans ce contexte, les travaux de thèse de doctorat d'Amal Boubaker [T-6], cofinancée par le CNES et TAS, ont porté sur l'étude des versions modernes de TCP dans des réseaux de type satellitaire.

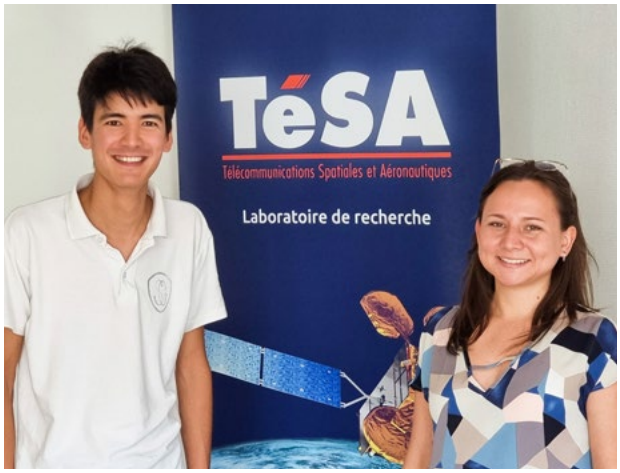
La couche transport étant l'interface entre les applications et le réseau, elle en assure la stabilité. Les réseaux satellitaires présentant un profil atypique en termes de variation de la latence des liens, l'étude des performances de TCP se trouve, de fait, justifiée [C-6].

>> Julian Tachella (à gauche), chercheur CNRS de l'ENS Lyon a donné un séminaire à TéSA.
Julian Tachella (left), CNRS researcher at ENS Lyon, gave a seminar in TéSA.

3.1.1. TRANSPORT LINKS FOR SATELLITE CONSTELLATIONS

The development of low-orbit satellite constellations providing telecommunications services is one of the major thrusts of satellite telecommunications research. These systems provide global or wide-area coverage and provide connectivity to areas that are not served by terrestrial systems.

When used for data communications (i.e. in packet mode), they raise new issues. These constellations are characterised by significant variations in propagation delays, whether due to routing through the constellation itself in the case of inter-satellite connectivity via radio or optical links, or to a lesser extent to variations in a satellite's angle of elevation.



>> Kin Mimouni (à gauche) et Kareth Leon (à droite) ont présenté leurs travaux de thèse avant de démarrer un post-doc à TéSA.
Kin Mimouni (left) and Kareth Leon (right) presented their PhDs before starting a post-doc in TéSA.

These phenomena, added to the disturbances due to the access layer (resource management and hand-over) will affect the performance of transport protocols such as TCP or QUIC (Quick UDP Internet Connections), which underpin the majority of current applications. Research on these very specific subjects no longer addresses the current needs of recent protocol stacks, hence the interest in reopening the debate and carrying out an in-depth study on this subject. In this context, Amal Boubaker's PhD thesis work [T-6]*, co-financed by CNES and TAS, focused on the study of modern versions of TCP in satellite-type networks.*

As the transport layer is the interface between applications and the network, it ensures stability. Since satellite networks have an atypical profile in terms of link latency variation, the study of TCP performance is therefore justified [C-6].

3.1.2. CONTROLE DE CONGESTION LEO/GEO

Un des problèmes à résoudre en matière de communications numériques est la congestion du réseau de communication, phénomène observé lorsqu'il y a trop d'éléments à transmettre ou plus précisément, trop de paquets présents dans le réseau. Si rien n'est fait, on a une accumulation de paquets en attente d'émission dans les nœuds du réseau qui pourrait conduire à une saturation et un arrêt de transmission.

Depuis 1980, de nombreux algorithmes de contrôle de congestion ont été proposés, comme TCP (*Transmission Control Protocol*). Dans le monde du satellite, plusieurs déclinaisons de TCP ont été développées pour répondre aux différentes contraintes liées à un lien satellite. Tous ces algorithmes ont été créés suivant l'expérience préalable des concepteurs de protocole, utilisant des hypothèses particulières sur le réseau. Force est de constater qu'ils fonctionnent plutôt bien dans des réseaux simples, avec un trafic réseau simple et restent bien souvent exclusifs au monde de l'Internet ou au monde du satellite. La fracture existante entre les protocoles de l'Internet terrestre et non terrestre, utilisés notamment dans le cadre de liaison LEO (*Low Earth Orbit*), est d'autant plus forte.

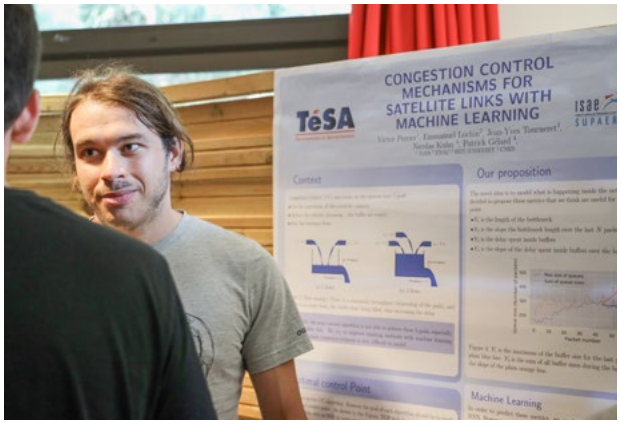
En effet, bien que les délais des architectures LEO autorisent l'utilisation des protocoles du monde Internet sur ces liens, ils restent peu performants dans ce contexte. De plus, Internet évolue sans cesse, traversant les océans et incluant à la fois réseaux de satellites, cellulaires et centres de données ultra rapides. Ce dernier devient donc extrêmement complexe et varié. Si nous ajoutons à cela l'explosion des applications d'où résulte un trafic de plus en plus conséquent, nous ne pouvons qu'observer l'inadéquation des contrôles de congestion traditionnels qui deviennent sous-optimaux et instables.

Que cela soit pour le monde de l'Internet standard ou les spécificités relatives aux réseaux satellitaires, le contrôle de congestion de par son caractère non-adaptatif devient obsolète. L'algorithme s'en trouve limité à l'espace des paramètres avec lequel il a été conçu et ne peut pas répondre avec précision et efficacité à la fluctuation rapide du trafic réseau, à la mobilité et à la variation de la capacité du canal dans le cadre d'une liaison satellitaire. La conception d'un algorithme de contrôle de congestion repose de manière significative sur l'expérience des concepteurs de protocole, forcément non exhaustive et spécifique à un cadre d'utilisation.

3.1.2. LEO/GEO CONGESTION CONTROL

One of the problems to be resolved in digital communications is congestion in the telecommunication networks, a phenomenon that is observed when there are too many elements to be transmitted or, more precisely, too many packets circulating in the network. If nothing is done, there will be an accumulation of packets waiting to be sent in the network nodes, which could lead to saturation and transmission stoppage.

Since 1980, numerous congestion control algorithms have been proposed, such as TCP (Transmission Control Protocol). In the satellite world, several variations of TCP have been developed to meet the range of constraints associated with a satellite link. All these algorithms were based on the prior experience of the protocol designers, using particular assumptions about the network. It is worth noting that they work quite well in simple networks, with simple network traffic, and often remain exclusive to either the Internet or satellite world. The existing divide between terrestrial and non-terrestrial Internet protocols, used in particular for LEO (Low Earth Orbit) links, is all the greater.



>> Victor Perrier présentant les travaux de sa thèse durant les journées scientifiques TéSA 2022.
Victor Perrier presenting his PhD work during TéSA science days in 2022.

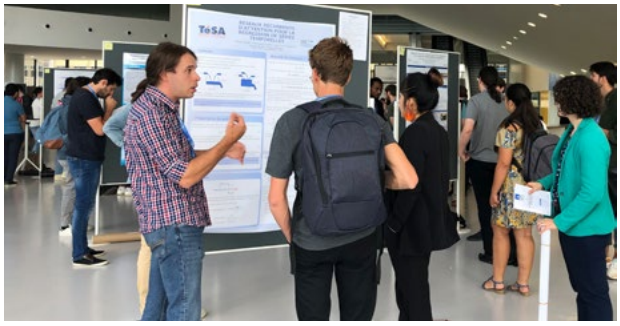
Although delays inherent in LEO architecture allow the use of Internet protocols on these links, they are not very efficient in this context. Moreover, the Internet is constantly evolving, crossing oceans and including satellite networks, cellular networks and ultra-fast data centres. It is therefore becoming extremely complex and varied. If we add to this the explosion of applications resulting in ever greater traffic, then it is obvious that traditional congestion controls are inadequate, as they are becoming sub-optimal and unstable.

Une possibilité serait de concevoir un algorithme de contrôle de congestion utilisant les techniques d'apprentissage automatique (ML - *Machine Learning*). Générés par ordinateur, ces algorithmes obtiennent des capacités de modélisation plus fortes et un espace de stratégie plus complexe comme montré récemment par certaines universités et industriels. Le laboratoire américain du MIT et notamment Keith Winstein, fut l'un des pionniers dans ce domaine avec les propositions de SPROUT qui est un algorithme de prévision stochastique basé sur une marche aléatoire (http://alfalfa.mit.edu/) ou encore Remy CC (http://web.mit.edu/remy/), qui se trouve plus dans la thématique qui nous intéresse et qui s'attache à l'application de certains algorithmes de *machine learning* au monde du transport.

Cependant, ces propositions ne sont qu'une première étape ; il faut encore plus de 24 heures pour atteindre un entraînement optimal de l'algorithme Remy et il y a encore beaucoup de techniques et de défis clés qui doivent être étudiés.

La thèse de doctorat de Victor Perrier [T-11], cofinancée par le CNES et l'ISAE-SUPAERO, a étudié et proposé de nouvelles techniques de *Deep Learning* permettant de comprendre ce qu'il se passe au cœur du réseau lors de l'utilisation d'un mécanisme de contrôle de congestion, afin de permettre à ces derniers de mieux réagir lorsque la congestion se produit. Il a utilisé les techniques statistiques et de *machine learning* les plus récentes pour améliorer le contrôle de congestion.

Il a constaté que ces techniques se concentrent sur l'évolution des délais plutôt que sur la perte de paquets, et utilisent un schéma d'envoi de paquets pour obtenir plus d'informations. Des simulations ont été menées pour étudier l'effet de ces schémas sur les données et des corrélations statistiques ont été établies entre certaines métriques. Il a également montré que l'utilisation de réseaux dits d'attention basés sur le ML peut permettre une estimation précise des niveaux de congestion d'un lien réseau et leur prédiction. Une architecture efficace a été présentée pour mettre en œuvre cette méthode avec des améliorations significatives au niveau de la complexité de l'algorithme de ML [C-19], [C-20], [C-25].



Whether for the standard Internet world or the specific features of satellite networks, the non-adaptive nature of congestion control makes it obsolete. This limits the algorithm to the parameter space with which it was designed, and means that it cannot respond accurately and efficiently to rapidly fluctuating network traffic, mobility and variations in channel capacity in the context of a satellite link. The design of a congestion control algorithm relies heavily on the experience of protocol designers, which is necessarily non-exhaustive and specific to a given context.

One possibility would be to design a congestion control algorithm using ML (Machine Learning) techniques. Generated by computers, these algorithms have stronger modelling capabilities and a more complex strategy space, as shown recently by certain universities and manufacturers. The American laboratory at MIT, led in particular by Keith Winstein, was one of the pioneers in this field with the proposals for SPROUT, which is a stochastic forecasting algorithm based on a 'random walk' (http://alfalfa.mit.edu/), and Remy CC (http://web.mit.edu/remy/), which is more in line with the theme we are interested in and which focuses on the application of certain ML algorithms to the world of transport.

However, these proposals are only a first stage; more than 24 hours are needed to achieve optimal training of the Remy algorithm and there are still many key techniques and challenges that need to be investigated.

Victor Perrier's PhD thesis [T-11]*, co-funded by CNES and ISAE-SUPAERO, studied and proposed new Deep Learning techniques for understanding what happens at the heart of the network when a congestion control mechanism is used, to enable the latter to react more effectively when congestion occurs. He used the latest statistical and ML techniques to improve congestion control.*

He found that these techniques focus on the evolution of delays rather than packet loss, and use a packet forwarding scheme to obtain more information. Simulations were carried out to study the effect of these schemes on the data, and statistical correlations were established between certain metrics. He also showed that the use of ML-based 'attention' networks can enable accurate estimation and prediction of congestion levels in a network link. An efficient architecture was put forward to implement this method with significant improvements in the complexity of the ML algorithm [C-19], [C-20], [C-25].

›› Victor Perrier à la conférence GRETSI 2021.
Victor Perrier at the GRETSI conference in 2021.

3.1.3. TRANSPORT POUR LES ICN DANS UN CONTEXTE SATELLITE

L'architecture d'Internet (IP) a été conçue dans les années 60-70 pour faire communiquer deux machines entre elles. Depuis, dans le monde des réseaux de télécommunications, le nombre d'utilisateurs a énormément augmenté et le type d'utilisation a beaucoup évolué avec l'apparition du "*streaming*" et des exigences de qualité gourmandes en bande passante. Pour pallier ces problèmes, des solutions telles que les *Content Delivery Networks* (CDN) et les réseaux pair-à-pair (P2P) existent. Le concept d'*Information Centric Network* (ICN) propose un changement radical de philosophie d'architecture de l'Internet. Au lieu de considérer un adressage des équipements dans une vision liée à l'emplacement de la donnée pour trouver une information, les ICNs se proposent de considérer seulement le contenu et sa désignation directement dans l'architecture réseau.

La thématique des ICN est un axe de travail de recherche large dans les réseaux terrestres et remet en cause beaucoup de fondements des réseaux actuels.

Les usages de la téléphonie mobile et plus encore de distribution de contenus notamment rendent obsolètes la communication entre un client et un serveur, localisés chacun à un point précis du réseau (i.e., identification par adresses IP). L'approche ICN, qui est donc une des voies explorées pour faire évoluer l'Internet, propose de remplacer le paradigme du lieu (le serveur destination) par le paradigme du quoi (objet/contenu souhaité). Le réseau ne doit plus mettre en correspondance des adresses IP représentatives de lieux mais des noms représentatifs d'un contenu. Dans le réseau ICN, le contenu joue un rôle central. Il brise la dépendance entre emplacement et identité.

La thèse de doctorat d'Adrien Thibaud [T-4], cofinancée par TAS et le CNES, se place dans le contexte de l'ICN pour préparer l'internet du futur. L'objectif est d'obtenir une meilleure Qualité d'Expérience pour les utilisateurs en comparaison aux réseaux IP actuels, notamment lors de l'utilisation de liens satellites. Cette thèse s'est concentrée sur le problème de congestion et de distribution des flux équitables entre les utilisateurs dans ce nouveau type de réseau. La résolution du problème implique une coopération intelligente de tous les nœuds du réseau pour trouver une répartition équitable des flux [J-1], [C-1], [C-2], [C-4], [C-8], [C-10].

3.1.3. TRANSPORT FOR ICNS IN A SATELLITE CONTEXT

The architecture of the Internet (IP) was designed in the 60s and 70s to enable two machines to communicate with each other. Since then, the number of users of telecommunication networks has increased enormously, and the type of use has changed considerably with the emergence of streaming and bandwidth-hungry quality requirements. There are solutions such as CDNs (Content Delivery Networks) and P2P (peer-to-peer) networks for overcoming these problems. The ICN (Information Centric Network) concept proposes a radical change in Internet architecture philosophy. Instead of a strategy of equipment addressing based on using the location of the data to find information, ICNs propose considering only the content and its designation directly in the network architecture.

The theme of ICNs is a broad area of research in terrestrial networking and calls into question many of the foundations of current telecommunication networks.

Mobile telephony and, even more so, content distribution, are rendering obsolete communication between a client and a server, each located at a precise point on the network (i.e. identification by IP address). The ICN approach, which is one of the avenues being explored to develop the Internet, proposes replacing the paradigm of 'place' (the destination server) with the paradigm of 'what' (desired object/content). The network must no longer match IP addresses representing locations, but rather names representing content. Content plays a central role in the ICN network. It breaks the dependency between location and identity.

Adrien Thibaud's PhD thesis [T-4]*, co-financed by TAS and CNES, is being carried out in the context of the ICN to prepare for the Internet of the future. The aim is to achieve a better Quality of Experience for users compared with current IP networks, particularly when using satellite links. The thesis focused on the problem of congestion and the distribution of equitable flows between users in this new type of network. Solving the problem involves intelligent cooperation between all the nodes in the network to find a fair distribution of flows* [J-1], [C-1], [C-2], [C-4], [C-8], [C-10].

3.1.4. BLOCKCHAIN POUR LES OBJETS SPATIAUX

Le traité sur l'espace extra-atmosphérique garantit le libre accès à l'exploration spatiale et interdit à toute entité de revendiquer une quelconque souveraineté sur l'espace extra-atmosphérique ou les corps célestes.

La surveillance de l'espace (SSA) détecte, catalogue et prédit l'orbite des objets autour de la Terre. Elle s'inscrit dans le cadre des efforts visant à éviter les collisions entre les satellites en orbite et les débris, à prévoir les rentrées, à détecter les explosions en orbite, à assister les missions au moment du lancement, du déploiement et de la fin de vie et, d'une manière générale, à contribuer à la sûreté et à la sécurité des activités spatiales. La SSA s'appuie sur des données recueillies par des capteurs tels que des radars, des télescopes et des lasers.

Comme il n'existe pas de système au niveau international pour référencer de manière partagée les positions des objets spatiaux, l'objectif de l'étude menée par TéSA [E-16] est de gérer les positions des objets spatiaux (satellites, débris) dans un système de stockage partagé et immuable qui augmente la confiance dans les variables utilisées pour assurer la sécurité des vols (par exemple, les mesures, les incertitudes, les paramètres orbitaux, les probabilités de collision...), et donc dans les actions prises sur la base de ces variables (par exemple, les manœuvres d'évitement des collisions).

Toutefois, de multiples problèmes apparaissent dans la mise en œuvre de cette solution : énorme quantité de données à stocker, localisation des serveurs de stockage, consensus sur les positions des objets...

Cette étude a permis de décrire un système de stockage des positions des objets spatiaux dans une *blockchain*. Une bibliographie a tout d'abord été réalisée sur l'ensemble des systèmes déjà proposés qui pourraient répondre à cette problématique. Une proposition d'architecture a ensuite été définie en conformité avec les spécificités et les contraintes du CNES. Enfin, une preuve de concept a été réalisée avec l'implémentation des technologies proposées dans les premières phases de l'étude.

3.1.4. BLOCK CHAIN FOR SPACE OBJECTS

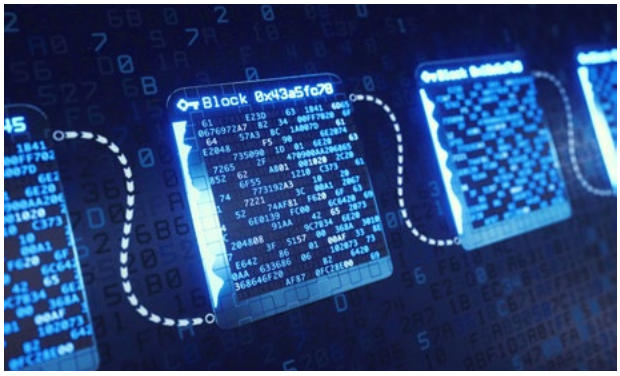
The Outer Space Treaty guarantees free access to space exploration and prohibits any entity from claiming sovereignty over outer space or celestial bodies.

SSA (Space Situational Awareness) detects, catalogues and predicts the orbits of objects around the Earth. It is part of a strategy to avoid collisions between satellites in orbit and debris, to predict re-entry, to detect in-orbit explosions, to assist missions during launch, deployment and end-of-life and, in general, to contribute to the security and safety of spaceactivities. SSA relies on data collected by sensors such as radars, telescopes and lasers.

As there is no international system for shared referencing of the positions of space objects, the aim of the study conducted by TéSA [E-16] *is to manage the positions of space objects (satellites, debris) in a shared and immutable storage system that increases confidence in the variables used to ensure flight safety (e.g. measurements, uncertainties, orbital parameters, collision probabilities, etc.), and therefore in the actions taken on the basis of these variables (e.g. collision avoidance manoeuvres).*

However, the implementation of this solution is fraught with problems, including the huge amount of data to be stored, the location of storage servers, and finding a consensus on the positions of objects.

This study described a system for storing the positions of space objects in a block chain. First of all, a bibliography was compiled of all the systems already proposed that could provide a solution to this problem. An architectural proposal was then defined in line with the specific requirements and constraints of CNES. Finally, a proof-of-concept study was carried out by implementing the technologies proposed in the first phases of the study.



3.2. LE PROBLÈME DE FLOT INSÉCABLE

Thalès Alenia Space (TAS) souhaite développer, en plus des constellations de satellites de communication, des logiciels de contrôle permettant de gérer efficacement les communications de ces satellites. Les constellations de satellites visées sont de taille importante : de l'ordre de 300 satellites, induisant 1400 liens de communication et 150 000 utilisateurs. Cette taille de constellation et toutes les contraintes qui en découlent ne sont pas bien gérées par les algorithmes de contrôle existants. Il est donc important de préparer le futur en apportant une solution au problème posé par ces constellations.

L'objet d'étude de la thèse de doctorat de François Lamothe [T-5] est une constellation de satellites de télécommunication. L'objectif est de modéliser sa gestion sous forme mathématique et de proposer des méthodes de résolution des problèmes ainsi définis. La thèse s'intéresse principalement au sous-problème dit de routage, détaillé ci-après. Dans le problème de routage, des utilisateurs veulent communiquer avec des centres situés au sol. Les liens de communication utilisables sont fixés mais le chemin que chaque utilisateur utilise pour transmettre son débit est à déterminer. Chaque utilisateur n'utilise qu'un seul chemin pour transmettre son débit. De plus, le débit total sur chaque lien est limité. Il faut donc répartir les chemins des utilisateurs sur les liens pour satisfaire leur débit sans dépasser la capacité des liens de communication.

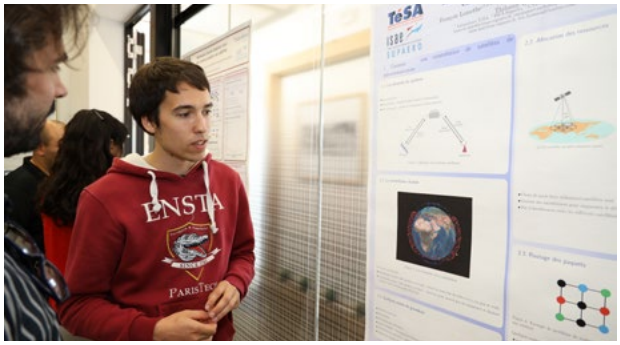
Le problème de routage se formalise sous la forme du « Problème de flot insécable ». Ce problème difficile (dit NP-complet) est étudié dans la littérature principalement à travers 3 axes : méthodes exactes, méta-heuristiques et algorithmes d'approximation. Toutefois, les méthodes exactes et les méta-heuristiques ne parviennent pas à résoudre des instances du problème de la taille souhaitée pour la constellation (en particulier à cause des 150 000 utilisateurs espérés). Il est donc important d'apporter une solution à ce problème en proposant un algorithme capable de donner de bonnes solutions en pratique sur des instances de grande taille.

Par ailleurs, le problème de routage modélise la gestion d'une constellation à un temps donné. Une extension de ce problème est nécessaire afin de prendre en compte le mouvement de la constellation. Ce deuxième problème est très peu étudié dans la littérature et la seule approche proposée n'a pas étudié des instances de la taille envisagée.

3.2. THE UNSPLITTABLE FLOW PROBLEM

In addition to launching its constellations of communication satellites, Thales Alenia Space (TAS) wants to develop control software to efficiently manage communications on these satellites. The satellite constellations targeted are large: around 300 satellites, involving 1,400 communication links and 150,000 users. This constellation size and all the resulting constraints are poorly managed by existing control algorithms. It is therefore important to prepare for the future by providing a solution to the problem posed by such constellations.

The subject of François Lamothe's PhD thesis [T-5] *is a constellation of telecommunication satellites. The aim is to model its management in mathematical form and to propose methods for resolving the problems thus defined. The main focus of the thesis is the routing sub-problem, detailed below. In the routing problem, users want to communicate with centres on the ground. The communication links that can be used are fixed, but the path that each user uses to transmit their data rate has yet to be determined. Each user uses only one path to transmit their data rate. In addition, the total throughput on each link is limited. The user paths must therefore be distributed over the links to satisfy their throughput without exceeding the capacity of the communication links.*



›› François Lamothe présentant les travaux de sa thèse durant les journées scientifiques TéSA.
François Lamothe presenting his PhD work during TéSA science days.

The routing problem is formalised as the 'Unsplittable flow problem'. This difficult problem (known as an 'NP-complete' problem) is studied in the literature mainly using 3 techniques: exact methods, meta-heuristics and approximation algorithms. However, exact methods and meta-heuristics are unable to solve instances of the problem of the desired size for the constellation (in particular because of the 150,000 users expected). It is therefore important to provide a solution to this problem by proposing an algorithm capable of giving good practical solutions on large instances.

Enfin, la plupart des méthodes utilisées pour résoudre le problème de flot insécable et ses variantes utilisent le concept de relaxation linéaire du problème afin de trouver des bornes sur la qualité des solutions accessibles.

Dans cette thèse, des méthodes dites de « décomposition » ont été étudiées permettant d'obtenir une meilleure relaxation du problème et donc des bornes de meilleure qualité [J-14].

3.3. CONVERGENCE BROADCAST-MULTICAST

Le groupe *Digital Video Broadcasting* (DVB) a travaillé sur un document regroupant un ensemble d'exigences pour diffuser du contenu à des utilisateurs connectés à l'Internet IP standard via des liaisons satellites. L'objectif de ce travail est de faire du « tout IP » et d'établir une passerelle entre le monde de l'Internet et les architectures SATCOM (Satellites de communication). Les enjeux derrière ce déploiement « *native-IP* » sont de permettre de combiner les avantages du *broadcast* DVB et du *streaming Over-The-Top* (OTT). Le but est d'optimiser l'utilisation de la ressource et d'offrir une personnalisation facile et multi-écrans, tout en réduisant la latence.

Cependant, le déploiement d'une telle solution pourrait nécessiter des mises à jour sur les *Customer Premises Equipment* (CPE) déployés à ce jour et même des protocoles couramment utilisés. L'étude [E-17] a donc visé à faire un état de l'art des protocoles, équipements et solutions existantes afin de comprendre les enjeux et les mises à jour nécessaires pour réaliser ce type de déploiement. L'objectif est de permettre au monde SATCOM de se connecter au monde des applications de l'IP.

L'étude a conduit à la réalisation de deux contributions distinctes. La première concerne une proposition de solution générique standard du déploiement du *native-IP* dans une architecture SATCOM. La seconde contribution porte sur un état de l'art des solutions émergentes, non encore standardisées ou expérimentales.

Furthermore, the routing problem models the management of a constellation at a given time. This aspect needs to be extended to take account of the constellation's movement. This second problem has received very little attention in the literature, and the only approach proposed has not studied instances of the size envisaged.

Finally, most of the methods used to solve the unsplittable flow problem and its variants use the concept of linear relaxation of the problem in order to find bounds on the quality of the accessible solutions.

In this thesis, so-called 'decomposition' methods were studied to obtain a better relaxation of the problem and therefore better-quality bounds [J-14].

3.3. BROADCAST-MULTICAST CONVERGENCE

The DVB (Digital Video Broadcasting) group has been working on a document containing a set of requirements for broadcasting content to users connected to the standard IP Internet via satellite links. The aim of this work is to go 'all IP' and establish a gateway between the world of the Internet and SATCOM architectures (communication satellites). The challenge behind this 'native-IP' deployment is to combine the advantages of DVB broadcasting and OTT (Over-The-Top) streaming. The aim is to optimise resource use and offer easy, multi-screen customisation, while reducing latency.

However, deploying such a solution could require upgrades to the CPE (Customer Premises Equipment) deployed to date, and even to the protocols currently in use. The aim of the study [E-17] *was therefore to review the state of the art of existing protocols, equipment and solutions in order to understand the challenges and updates required for this type of deployment. The aim is to enable the SATCOM world to connect to the world of IP Internet applications.*

The study led to the production of two separate contributions. The first concerns a proposal for a standard generic solution for deploying native IP in a SATCOM architecture. The second contribution looks at the state of the art of emerging solutions that have not yet been standardised or that are experimental.

4. TéSA… ON THE DARK SIDE OF THE MOON

Dans nos rapports d'activité, en plus des sections « classiques » décrivant nos activités, nous avons décidé de consacrer une section supplémentaire à un axe dont nous sommes particulièrement fiers.

Dans le dernier rapport, nous avions mis en lumière nos deux post-docs, majoritairement autofinancés par TéSA : ils étaient les premiers de ce type et ont particulièrement brillé par leurs travaux et articles publiés. Aujourd'hui, après leur post-doc, tous deux sont enseignants-chercheurs dans des écoles partenaires de TéSA, l'un à l'ENAC, l'autre à l'IPSA et continuent de collaborer avec TéSA.

Pour cette édition du rapport d'activité 2021-2022, c'est un axe de recherche novateur, une aventure, dans laquelle TéSA est embarqué, que nous souhaitons mettre en exergue. Cette aventure, TéSA la vit au départ avec le CNES mais nul doute qu'il pourra la poursuivre avec d'autres acteurs du domaine !

Tout part de l'étude NOIRE (Nanosatellites pour un Observatoire Interférométrique Radio dans l'Espace) menée par le CNES et plusieurs laboratoires de recherche français. Afin d'observer les signaux fossiles des premiers moments de l'univers jusqu'à la formation des premières étoiles, il faut être capable de capter des signaux radioélectriques de basse fréquence inférieure à 100 MHz. La méthode consiste à utiliser des antennes composées d'éléments distants de plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres, dont les mesures sont regroupées et exploitées par des méthodes interférométriques. Mais dans le cas des signaux considérés par NOIRE, deux difficultés s'ajoutent.

Premièrement, les fréquences recherchées sont trop basses pour traverser la ionosphère, ce qui implique de les observer depuis l'espace. Deuxièmement, les émissions radioélectriques de la Terre masquant les signaux, l'instrument de mesure doit être placé en un point où il est protégé de ces émissions.

L'étude NOIRE propose donc de réaliser un instrument d'observation des signaux radioélectriques basse fréquence au moyen d'un essaim de nanosatellites placés en orbite lunaire, afin que le système puisse avoir les dimensions requises pour atteindre une résolution suffisante et qu'il soit à l'abri des émissions radioélectriques de la Terre lorsqu'il est du côté de la face cachée de la Lune.

4. TéSA… ON THE DARK SIDE OF THE MOON

In our activity reports, in addition to the 'traditional' sections describing our activities, we have decided to devote an extra section to an area of which we are particularly proud.

In the last activity report, we highlighted the two post-doctoral students, for whom most of the funding came from TéSA: they were the first of their kind and stood out through their work and published articles. Today, after their post-doctoral work, both are teacher-researchers at TéSA partner schools, one at ENAC and the other at IPSA, and continue to work with TéSA.

For this edition of the 2021-2022 Activity Report, we would like to highlight an innovative line of research, an adventure that TéSA has embarked upon. This was initially undertaken with CNES, but there's no doubt that TéSA will be able to pursue it with other players in the field!

It all started with the NOIRE study (Nanosatellites for a Radio Interferometric Observatory in Space) conducted by CNES and several French research laboratories. In order to observe fossil signals from the earliest moments of the universe up to the formation of the first stars, we need to be able to pick up low-frequency radio signals below 100 MHz. The method to capture low-frequency signals consists in using antennas made up of elements several tens or hundreds of kilometres apart, whose measurements are consolidated and processed using interferometric methods. But in the case of the signals considered by NOIRE, there are two additional difficulties.

The first is that the frequencies sought are too low to pass through the ionosphere, which means that they have to be observed from space. Secondly, since radio emissions from the Earth mask the signals, the measuring instrument must be placed in a location where it is protected from these emissions.

The NOIRE project thus aims to create an instrument for observing low-frequency radio signals from the universe by means of a swarm of nanosatellites placed in lunar orbit, so that the system can have the dimensions required to achieve sufficient resolution and be shielded from the Earth's radio emissions when it is on the far side of the Moon.

Mais alors surgit un immense problème dans cette idée : si l'essaim de nanosatellites doit se configurer en une méga antenne sur la « *dark side of the Moon* », comment fait-il ? Depuis la face cachée de la Lune, il n'y a plus de GNSS accessible… Comment se positionner de manière suffisamment précise ? Comment communiquer entre les différents éléments de l'essaim ? Autant de problèmes à résoudre auxquels TéSA essaie d'apporter des éléments de réponse.

Plusieurs études R&T ont été menées sur le sujet et trois thèses de doctorat ont démarré à TéSA : la première sur l'architecture du réseau dans l'essaim, la deuxième sur la construction de l'échelle de temps nécessaire au positionnement et la troisième sur l'utilisation de la phase dans le positionnement. Ces trois thèses sont toutes cofinancées par le CNES et le cofinanceur complémentaire est TéSA pour les deux premières thèses et l'IPSA pour la troisième. Rendez-vous au prochain rapport d'activité pour avoir les échos des sorties de ces trois thèses !

Au-delà du projet NOIRE, les essaims de nanosatellites offrent des perspectives prometteuses dans plusieurs domaines clés. La précision de positionnement accrue grâce à l'utilisation de mesures de phase permet une coordination précise au sein de l'essaim, favorisant ainsi des missions collaboratives et des tâches complexes. En utilisant des techniques d'interférométrie, les satellites peuvent mesurer les différences de phase entre les signaux émis par les satellites voisins, ce qui permet de déterminer avec précision leurs positions relatives. De plus, l'architecture résiliente fondée sur des connexions inter-satellites, des protocoles de routage ad hoc et des algorithmes de reconfiguration permet de maintenir une communication robuste, même en cas de défaillance partielle du réseau. L'échelle de temps autonome, fondée sur la fusion de données, facilite une synchronisation précise des horloges des nanosatellites, ce qui est essentiel pour des applications nécessitant une coordination temporelle précise.

Ces avancées ouvrent la voie à des missions spatiales plus efficaces, à une meilleure collecte de données et à une coordination accrue entre les nanosatellites. Les essaims de nanosatellites sont donc prometteurs pour des domaines tels que l'observation de la Terre, les communications numériques, la surveillance et l'exploration spatiale, offrant de nouvelles perspectives pour leur avenir.

But there is a huge problem with this idea: if the swarm of nanosatellites has to configure itself as a mega-antenna on the "dark side of the Moon", how does it do that? On the far side of the Moon, there is no GNSS accessible. How then can it position itself accurately enough? How can the different elements of the swarm communicate with each other? These are just some of the problems TéSA is trying to solve.

Several R&T studies have been carried out on the subject and three PhD theses have been started at TéSA: the first on the architecture of the network in the swarm, the second on the construction of the time scale required for positioning and the third on the use of phase in positioning. These three theses are all co-funded by CNES, with TéSA providing additional funding for the first two theses and IPSA for the third. Look out for news of the results of these three theses in the next activity report!

Beyond the NOIRE project, nanosatellite swarms offer promising prospects in several key areas. The increased positioning accuracy provided by phase measurements enables precise coordination within the swarm, facilitating collaborative missions and complex tasks. Using interferometry techniques, satellites can measure the phase differences between the signals emitted by neighbouring satellites, thus enabling their relative positions to be accurately determined. Furthermore, the resilient architecture based on inter-satellite connections, ad hoc routing protocols and reconfiguration algorithms means that communication remains robust, even in the event of partial network failure. The autonomous time scale, based on data fusion, facilitates precise synchronisation of nanosatellite clocks, which is essential for applications requiring precise time coordination.

These advances pave the way for more efficient space missions, better data collection and increased coordination between nanosatellites. Nanosatellite swarms therefore hold great promise for areas such as Earth observation, digital communications, and space surveillance and exploration, offering new prospects for their future.

>> Henry Arguello Fuentes, professeur de l'université de Santander en Colombie a donné un séminaire avec ses deux doctorants.
Henry Arguello Fuentes, professor at the Santander University (Colombia) gave a seminar with his two PhD students.

5. VIE DU LABORATOIRE

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

En 2021-2022, après la période précédente quelque peu « au ralenti », le nombre de séminaires a été multiplié par deux. L'appel à chercheurs invités lancé par TéSA en 2019 (voir rapport précédent) s'est poursuivi, avec la venue de Steve McLaughlin, professeur à l'Université Heriot-Watt d'Edimbourg. Et les journées scientifiques ont repris leur rythme pour la plus grande satisfaction de tous !

Cette section détaille tous ces temps forts de TéSA.

5. LIFE IN THE LABORATORY

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

The number of seminars doubled in 2021-2022, after a somewhat sluggish previous period. The hosting of guest researchers launched by TéSA in 2019 (see previous report) continued, with the arrival of Steve McLaughlin, a Professor at Heriot-Watt University in Edinburgh. Furthermore, the science days have resumed their normal rhythm, to everyone's great satisfaction!

This section details all of these TéSA highlights.

>> l'équipe TéSA en 2022.
TéSA team in 2022.

5.1. CHERCHEURS INVITÉS

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

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

5.1. GUEST RESEARCHERS

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

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

De plus, les différentes contributions attendues de la part du chercheur invité sont de diverses natures : implication dans les travaux de certains doctorants, organisation d'au moins un séminaire et/ou mini-cours scientifique pour la communauté TéSA, journée(s) doctorants et/ou journée(s) partenaires pour un échange scientifique sur des thèmes d'intérêt pour la communauté TéSA. Chaque candidature doit être adressée au Conseil Scientifique qui statue sur la pertinence de la candidature.

Après la venue de Pau Closas de l'Université Northeastern de Boston, USA, en juillet 2019 (voir rapport précédent), TéSA a pu accueillir, en novembre et décembre 2022, Steve McLaughlin, professeur de l'Université Heriot-Watt d'Édimbourg, en Écosse. Ses travaux les plus cités concernent des domaines très variés comme les représentations temps-fréquence (décomposition modale empirique, réallocation temps-fréquence…), l'imagerie hyperspectrale (démélange spectral) ou l'égalisation de canaux en communications numériques. Ils couvrent donc deux des trois domaines d'expertise de TéSA. Durant son passage à TéSA, il a interagi avec plusieurs doctorants et donné deux séminaires (voir section suivante) qui ont intéressé beaucoup de personnes.

In addition, the visiting researcher is expected to make various kinds of contributions: involvement in the work of certain PhD students, organisation of at least one scientific seminar and/or mini-course for the TéSA community, and also participation in PhD student day(s) and/or partner day(s) for scientific discussions on themes of interest to the TéSA community. All applications must be submitted to the Scientific Committee, which will decide on the suitability of the application.

Following the visit of Pau Closas from Northeastern University in Boston, USA, in July 2019 (see previous report), TéSA welcomed Steve McLaughlin, professor at Heriot-Watt University in Edinburgh, Scotland, in November and December 2022. His most-often cited work covers a wide range of fields, including time-frequency representations (empirical modal decomposition, time-frequency reallocation, etc.), hyperspectral imaging (teasing out spectral information) and channel equalisation in digital communications. It therefore covers two of TéSA's three areas of expertise. During his time at TéSA, he interacted with a number of PhD students and gave two seminars (see next section) that attracted a lot of interest.

Steve McLaughlin

Steve McLaughlin est *Fellow IEEE*, *Fellow EURASIP* et un chercheur renommé dans le domaine du traitement statistique du signal. Steve McLaughlin est également membre du *board of directors* d'EURASIP. Il a été responsable de la *School of Engineering and Physical Sciences* de l'université d'Heriot-Watt entre 2011 et 2020 et est actuellement en charge d'animer les activités de recherche et d'innovation au sein de cette université. Il a été éditeur associé de nombreux journaux comme *IEEE Transactions on Signal Processing*, *IEEE Signal Processing Letters* et *IEEE Transactions on Computational Imaging*.

Steve McLaughlin is an IEEE Fellow, an EURASIP Fellow and a leading researcher in the field of statistical signal processing. He is also a member of the EURASIP Board of Directors. He was Head of the School of Engineering and Physical Sciences at Heriot-Watt University between 2011 and 2020 and is currently in charge of leading research and innovation activities at the university. He has been an associate editor of numerous journals, including IEEE Transactions on Signal Processing, IEEE Signal Processing Letters and IEEE Transactions on Computational Imaging.

5.2. LES SÉMINAIRES TéSA

Les séminaires TéSA sont un outil de dialogue scientifique et de partage. Organisés par les représentants des doctorants au conseil scientifique, ils réunissent régulièrement la communauté TéSA pour deux heures. Deux présentations portant sur des domaines de recherche différents se succèdent entre les nombreuses questions de l'auditoire. Ainsi, ces séminaires sont des tutoriels pluridisciplinaires dont l'objectif premier est de mettre en lumière les activités de recherche de nos doctorants et doctorantes. Cependant, ils peuvent également être l'occasion pour des membres plus « expérimentés » de TéSA, ou pour des invités de passage, de présenter leurs activités de recherche.

Durant la période 2021-2022, neuf séminaires ont été organisés, renouant ainsi avec un rythme soutenu que la pandémie avait largement ralenti.

5.2. TéSA SEMINARS

TéSA seminars are a forum for scientific dialogue and sharing. Organised by the PhD students' representatives on the Scientific Committee, they regularly bring the TéSA community together for two-hour sessions. They include two presentations on different areas of research, interspersed with many questions from the audience. The seminars are thus multidisciplinary tutorials whose primary objective is to highlight the research activities of our PhD students. However, they can also be an opportunity for more 'experienced' members of TéSA, or for visiting guests, to present their research activities.

During the 2021-2022 period, nine seminars were organised, thus resuming the sustained pace that the pandemic had largely slowed down.

TéSA SEMINAR — ***March 2021***

Thomas Verheyde
SmartCoop Algorithm: Improving Smartphone Position Accuracy and Reliability via Collaborative Positioning.

François Lamothe
Optimisation of internet throughput in constellations of satellites.

Two TéSA PhD students in the final year of their thesis presented their work, one on location-navigation, the other on networks and optimisation

TéSA SEMINAR — ***February 2021***

Lorenzo Ortega
Robust Standalone GNSS Navigation.

Julien Lesouple
Development of anomaly detection methods with user feed-back.

The opportunity for our two post-doctoral students (see previous report) to present the results of their work.

TéSA SEMINAR

November & December 2021

Steve McLaughlin
One, Two or Many Frequencies: Synchrosqueezing, EMD and Multicomponent Signal Analysis.

Challenges in imaging and sensing in photon-starved regimes.

Professor Steve McLaughlin, from Heriot-Watt University in Edinburgh, visited TéSA for a month and gave two talks.

TéSA SEMINAR

February 2022

Corentin Lubeigt
Signal Processing for GNSS Reflectometry.

Victor Perrier
Improve Congestion Control with Machine Learning.

Two TéSA PhD students in the final year of their thesis presented their work, one on reflectometry, the other on network congestion

TéSA SEMINAR

March 2022

Julián Tachella
Equivariant Imaging: learning to solve inverse problems without ground truth.

Julián Tachella, CNRS researcher at the Sisyphe laboratory of the École Normale Supérieure de Lyon, visited TéSA and gave a talk.

TéSA SEMINAR

May 2022

Kin Mimouni
An Overview of Dark Matter Theories and Zoom on the WIMP Scenario.

Kareth León
Tensor Sparse Representation Learning for Single-Snapshot Compressive Spectral Video Reconstruction.

TéSA welcomed two new post-docs who presented their thesis work.

TéSA SEMINAR

October 2022

Henry Arguello Fuentes
Data Driven Optical Coding Optimization in Computational Imaging.

This seminar was given by Professor Henry Arguello Fuentes, who was visiting TéSA with Hans Yecid Garcia Arenas and Karen Sanchez from the University of Santander in Colombia.

TéSA SEMINAR

November 2022

Stefano Fortunati
Matched, mismatched and semiparametric estimation in elliptical distributions.

This final seminar of the year was given by Professor Stefano Fortunati, a teacher-researcher at IPSA.

5.3. LES JOURNÉES SCIENTIFIQUES

Les années 2021 et 2022 ont permis de retrouver l'esprit des journées scientifiques de TéSA (baptisées les JS TéSA), avec leur convivialité et leur enthousiasme.

En 2021, nous nous sommes retrouvés le 17 juin au Mas des Cannelles, bel endroit de la banlieue toulousaine, propice aux échanges conviviaux. Même si nous étions tous encore masqués, 35 participants sont venus sur place et 8 personnes étaient en visioconférence. Le programme était le suivant :

- Le matin, présentation des activités de l'IMT Atlantique par visioconférence : à l'heure où les « zoom », « teams » et autres outils de visio-conférence devenaient légion, il nous a paru important de mettre en avant nos partenaires non toulousains afin de mieux les connaître et susciter des collaborations,

- Après les présentations de l'IMT Atlantique (et la pause-café), plusieurs intervenants du CNES se sont succédés pour nous présenter les sujets « chauds » du moment : les activités en RF (radiofréquence), les systèmes AIS (*Automatic Identification System*), le positionnement relatif et absolu dans un essaim, l'intelligence artificielle pour les multi-trajets GNSS et des développements dans les liens inter-satellites.

- Après le repas de midi, des équipes ont été constituées, mêlant des enseignants-chercheurs, des doctorants, post-docs, stagiaires et ingénieurs des partenaires de TéSA. Chaque équipe a réfléchi à de potentiels sujets de thèse de doctorat, en lien avec les présentations du matin, avec pour but de les présenter à l'appel à idées thèses du CNES d'octobre 2021.

- La journée s'est achevée par les présentations : dix sujets de thèse de doctorat des différentes équipes.

5.3. THE SCIENCE DAYS

The years 2021 and 2022 saw a return to the convivial and enthusiastic spirit of the TéSA science days (known as the JS TéSA).

On 17 June in 2021, we met at Mas des Cannelles, a beautiful spot on the outskirts of Toulouse, ideal for relaxed and friendly discussions. Even though we were all still wearing masks, 35 participants came to the event and 8 people took part by video conference. The programme was as follows:

- *In the morning, ITM Atlantic presented its activities by video conference: at a time when 'Zoom', 'Teams' and other video conferencing tools were being widely used, we felt it was important to focus on our partners from outside Toulouse in order to get to know them better and encourage collaboration.*

- *After the IMT Atlantique presentations (and the coffee break), several speakers from CNES took turns presenting the 'hot' topics of the moment: RF (radio frequency) activities, AIS (Automatic Identification System) systems, relative and absolute positioning in a satellite swarm, artificial intelligence for GNSS multipaths and developments in inter-satellite links.*

- *After lunch, teams were put together, combining teacher-researchers, PhD students, post-doctoral students, interns and engineers from TéSA's partners. Each team brain-stormed potential PhD thesis topics, linked to the morning's presentations, with the aim of submitting them to the CNES call for thesis ideas in October 2021.*

- *The day ended with presentations of ten thesis topics by the different teams.*

>> Journées scientifiques de TéSA en 2022.
TéSA Science days in 2022.

Il a fallu ensuite « mûrir » ces sujets, et finalement, 3 sujets ont été développés, rédigés et proposés à l'appel à idées CNES d'octobre 2021.

En janvier 2022, deux de ces sujets issus des JS TéSA 2021 ont été sélectionnés par le comité du CNES, ont trouvé des candidats doctorants et un cofinanceur… pour démarrer en octobre 2022. Encore une belle réussite pour cette JS TéSA !

En 2022, nous avons renoué avec la « tradition » des JS TéSA sur 2 jours. Nous nous sommes retrouvés les 4 et 5 juillet 2022 à St Lary, dans les Hautes-Pyrénées. Les quarante participants ont pu écouter des exposés d'intervenants du CNES, sur le modèle JS 2021 : les sujets « chauds » en RF, les besoins de détection intelligente, le traitement des données par *machine learning* et les « *in orbit services* ».

Les doctorants ont présenté leur thèse en 3 minutes mais, avec, comme à chaque fois dans TéSA, un petit « challenge » supplémentaire : pour cette édition des JS, ils devaient faire deviner un personnage au travers de leur présentation.

We then had to 'mature' these subjects, and finally, 3 subjects were developed, drafted and submitted in response to the CNES call for ideas in October 2021.

In January 2022, two of the subjects from the JS TéSA 2021 were selected by the CNES committee, and doctoral candidates and a co-funder were found – to start in October 2022. Another great success for JS TéSA!

In 2022, we renewed the 'tradition' of the JS TéSA, this time for 2 days. We met again on 4 and 5 July 2022 in St Lary, in the Hautes-Pyrénées. The forty participants listened to presentations by CNES speakers following the JS 2021 model: 'hot' topics in RF, smart-detection requirements, data processing using machine learning and 'in orbit services'.

The PhD students presented their theses in 3 minutes, but, as always in TéSA, spiced up with a little extra 'challenge': for this JS edition, they had to encourage people to guess a personality they had hinted at in their presentation.

Après ce moment un peu « décalé », une session poster a permis aux doctorants de présenter plus en détail leur thèse et de discuter les uns avec les autres. Enfin, forts de nos succès aux JS 2020 et 2021, nous avons instauré le « TéSAthon » : brainstorming par équipe pour réfléchir à des sujets de thèse de doctorat.

Un total de huit sujets a été présenté en fin de séjour. Parmi ces huit sujets, deux ont été développés et rédigés pour les soumettre à l'appel à idées thèses du CNES d'octobre 2022 mais malheureusement, ces sujets n'ont pas été retenus par le comité de thèses CNES… On ne peut pas gagner à tous les coups !

Mais les JS TéSA ne sont pas les seules occasions de réfléchir à des sujets de thèse, il suffit de regarder le nombre de sujets proposés chaque année par TéSA à l'appel à idées thèses du CNES : en octobre 2021, ils étaient 6 sujets proposés (dont 3 issus de la JS) et finalement 3 thèses ont été lancées en 2022 ; en octobre 2022, 7 sujets ont été proposés (dont 2 issus de la JS) et au moment de la rédaction de ce rapport, on ne sait pas encore combien de thèses seront lancées fin 2023… Rendez-vous au prochain rapport d'activité !

After this slightly 'offbeat' moment, a poster session gave PhD students the opportunity to present their theses in more detail and to discuss them with each other. Finally, building on our success at the JS 2020 and JS 2021, we introduced the 'TéSAthon' involving team brainstorming to come up with PhD thesis topics.

A total of eight subjects were presented at the end of the stay. Of these eight topics, two were developed and written up for submission to the CNES call for thesis ideas in October 2022, but unfortunately these topics were not selected by the CNES thesis committee. You can't win them all!

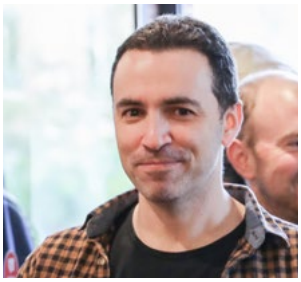
But the TéSA science days are not the only opportunities to think about thesis topics. Just look at the number of topics proposed each year by TéSA to the CNES call for thesis ideas: in October 2021, 6 topics were proposed (including 3 from the JS) and finally 3 theses were undertaken in 2022; in October 2022, 7 topics were proposed (including 2 from the JS) and at the time of writing this report, we do not yet know how many theses will be started at the end of 2023. Stay tuned for a follow-up in the next activity report!

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

Après avoir soutenu sa thèse de doctorat à TéSA en 2017, Fabio a repris son poste d'ingénieur chez THALES Brésil en tant que salarié détaché en France. En 2019, il intègre les équipes de Hensoldt NEXEYA à Toulouse comme responsable technique et animateur dans la cellule d'innovation. En 2022, Fabio a rétabli sa connexion avec le laboratoire TéSA en tant que Responsable Scientifique d'une thèse CIFRE (FUSCHIA) et un projet ANR ASTRID (PIRANIA-MMV) en cours de réalisation dans le nouveau consortium établi entre Hensoldt NEXEYA et le laboratoire TéSA.

WHERE ARE THEY NOW?

After defending his PhD thesis at TéSA in 2017, Fabio returned to his engineering position with THALES Brazil on assignment in France. In 2019, he joined the Hensoldt NEXEYA teams in Toulouse as Technical Manager and Innovation Unit Leader. In 2022, Fabio re-established his affiliation with the TéSA laboratory as Scientific Supervisor of a CIFRE thesis (FUSCHIA) and an ANR ASTRID project (PIRANIA-MMV) being carried out by the new consortium set up by Hensoldt NEXEYA and the TéSA laboratory.



Fábio Manzoni

6. 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 la start-up SpaceAble.

Ces activités offrent un cadre de collaboration privilégié pour les membres associés académiques : Toulouse INP, ISAE- SUPAERO, ENAC, IMT Atlantique… et l'IPSA qui est devenu membre associé de TéSA en 2021.

Cette collaboration se traduit particulièrement dans les directions académiques des thèses : un exemple est la thèse de Victor Perrier qui est une illustration de ces binômes de codirections de thèse, facilités et encouragés dans TéSA, permettant d'associer deux enseignants-chercheurs de deux entités académiques différentes (et de ministères de tutelle différents !), ici Toulouse INP et l'ISAE-SUPAERO.

De plus, cette thèse est aussi un bel exemple d'une collaboration pluridisciplinaire : en plus de provenir d'établissements différents, les deux co-directeurs de thèse sont de deux communautés scientifiques différentes, l'un en réseau, l'autre en traitement du signal et *machine learning*… mais tous deux parlent finalement le même langage pour mener ensemble une riche collaboration ! Et le binôme issu de cette collaboration est reconduit dans l'encadrement d'une nouvelle thèse de doctorat qui a démarré en novembre 2022.

L'arrivée de l'IPSA en tant que membre associé académique en 2021 marque un tournant dans TéSA. L'IPSA est une école d'ingénieur en aéronautique et spatial, de statut privé, certifiée par la CTI (Commission des Titres d'Ingénieur), avec deux campus, l'un à Paris, l'autre à Toulouse.

Développant sa 4ème et sa 5ème année du cursus ingénieur sur Toulouse, l'IPSA a cherché un laboratoire de recherche avec qui s'affilier dans le domaine des télécommunications spatiales et systèmes embarqués. Les discussions menées entre l'IPSA et TéSA ont conclu à une convergence de feuille de route : mener des activités de recherche appliquée dans les domaines concernés, en partenariat étroit avec des acteurs du spatial et de l'aéronautique comme le CNES, TAS et autres organismes correspond parfaitement aux objectifs de l'IPSA. Ceci a conduit l'IPSA à demander son adhésion à TéSA, adhésion validée à l'unanimité par le Conseil d'Association de TéSA en 2021.

6. COLLABORATION

Since its creation, TéSA has conducted its scientific activities mainly for its partner members, CNES, Thales Alenia Space, Collins Aerospace and the start-up, SpaceAble.

These activities offer a privileged framework for collaboration for associate academic members: Toulouse INP, ISAE-SUPAERO, ENAC, IMT Atlantique, and now IPSA, which became an associate member of TéSA in 2021.

This collaboration is particularly evident in the academic supervision of the theses: one example is the thesis by Victor Perrier, which illustrates this co-supervision of theses, facilitated and encouraged within TéSA, allowing the cooperation of two teacher-researchers from two different academic entities (and different supervisory ministries!), in this case Toulouse INP and ISAE-SUPAERO.

What's more, this thesis is also a fine example of multi-disciplinary collaboration: as well as coming from different institutions, the two thesis co-supervisors are from two different scientific communities, one in computer networking, the other in signal processing and machine learning; but in the end they both speak the same language, which facilitates fruitful collaboration! Furthermore, the co-supervisors of this collaboration have been called upon to supervise a new PhD thesis, which began in November 2022.

The arrival of IPSA as an associate academic member in 2021 marked a turning point for TéSA. IPSA is a private engineering school in aeronautics and space, certified by the CTI (Commission des Titres d'Ingénieur), with two campuses, one in Paris and the other in Toulouse.

As the 4th and 5th years of its engineering programme are being developed in Toulouse, IPSA has been looking for a research laboratory with which to join forces in the field of space telecommunications and onboard systems. Discussions between IPSA and TéSA have led to a convergence of roadmaps: conducting applied research activities in the fields concerned, in close partnership with space and aeronautics players such as CNES, TAS and other organisations, is perfectly in line with IPSA's objectives. This led IPSA to apply for membership of TéSA, which was unanimously approved by the TéSA Association Council in 2021.

Cette adhésion s'est accompagnée d'une convention d'accueil qui fait de TéSA le laboratoire d'accueil des enseignants-chercheurs de l'IPSA Toulouse dans les domaines des télécommunications spatiales et aéronautiques.

Ainsi, TéSA est le laboratoire de recherche de Lorenzo Ortega, recruté par l'IPSA en novembre 2021 et de Samy Labsir, recruté en décembre 2022. Cette collaboration donne encore plus de « corps » à TéSA qui, en plus des doctorants, post-docs et ingénieurs de recherche, compte désormais deux enseignants-chercheurs directement affiliés à TéSA. Une belle fierté pour TéSA !

TéSA insuffle de la collaboration entre ses membres partenaires et académiques mais aussi se nourrit de la richesse des échanges avec d'autres entités, non membres de TéSA. Même si l'Institut de Recherche Technologique (IRT) Saint Exupéry n'est plus membre de TéSA, les collaborations se poursuivent. En particulier, TéSA est impliqué dans le projet ELLIOT qui, rappelons-le, vise à lever les verrous technologiques qui permettraient un service d'IoT à large couverture géographique à partir de satellites bas-coût (nanosatellites).

Les collaborations académiques s'étendent aussi au-delà de l'Europe avec la poursuite de l'appel à chercheurs invités piloté par le Conseil Scientifique de TéSA. C'est ainsi que nous avons eu le plaisir de recevoir durant 4 semaines, en novembre et décembre 2022, Steve McLaughlin, professeur de l'Université Heriot-Watt d'Édimbourg, en Ecosse. Chercheur renommé et reconnu par la communauté de traitement du signal et des images, il a travaillé avec plusieurs doctorants et leur a insufflé plusieurs pistes à explorer. Nul doute que sa présence, son énergie, son enthousiasme et sa bonne humeur ont aussi concouru à motiver les jeunes doctorants démarrant leur thèse depuis seulement un ou deux mois…

Les échanges avec la Colombie initiés en 2017 se sont poursuivis avec la venue des doctorants Hans Yecid Garcia Arenas et Karen Sanchez, accompagnés du professeur Henry Arguello de l'Université de Santander qui ont profité de leurs séjours pour présenter leurs travaux dans le cadre des séminaires TéSA. Côté TéSA, c'est le doctorant Victor Perrier qui est parti séjourner à Bucaramanga, en Colombie, pour poursuivre la collaboration.

Its membership was accompanied by a hosting agreement that makes TéSA the host laboratory for IPSA Toulouse's teacher-researchers in the fields of space and aeronautical telecommunications.

Lorenzo Ortega, hired by IPSA in November 2021, and Samy Labsir, hired in December 2022, are now working in TéSA's research laboratory. This collaboration gives even more 'substance' to TéSA which, in addition to PhD students, post-doctoral students and research engineers, now has two teacher-researchers who are directly affiliated to TéSA. This is a source of great pride for TéSA!

TéSA thus fosters collaboration between its partner and academic members, but also benefits from the wealth of exchanges with other entities that are not members of TéSA. Although the IRT Saint Exupéry (Institut de Recherche Technologique) is no longer a member of TéSA, our collaboration continues. In particular, TéSA is involved in the ELLIOT project, which aims to remove the technological barriers to enable an IoT service with wide geographical coverage using low-cost satellites (nanosatellites).

Academic collaboration also extends beyond Europe with the call for guest researchers, managed by the TéSA Scientific Committee. We had the pleasure of welcoming Steve McLaughlin, professor at Heriot-Watt University in Edinburgh, Scotland, for 4 weeks in November and December 2022. A renowned researcher recognised by the signal and image processing community, he worked with several PhD students and inspired them to explore a number of avenues. No doubt his presence, energy, enthusiasm and good humour also helped to motivate the young PhD students who had only just started their theses a month or two earlier.

The exchanges with Colombia initiated in 2017 continued with the arrival of PhD students Hans Yecid Garcia Arenas and Karen Sanchez, accompanied by Professor Henry Arguello from the University of Santander, who took advantage of their visits to present their work as part of the TéSA seminars. On the TéSA side, the PhD student Victor Perrier went to Bucaramanga, Colombia, to continue the collaboration.

7. RAYONNEMENT DE TéSA

Le rayonnement d'un laboratoire de recherche se mesure en premier lieu sur la qualité des articles publiés. Les activités de TéSA sont largement diffusées au travers des articles de conférences ou de journaux avec comité de lecture, listés dans ce rapport. Le tableau suivant permet de retrouver les revues dans lesquelles TéSA a publié en 2021 et 2022, avec leur « quartile score », leur « impact factor » et leur « cite score » qui sont des mesures du rayonnement.

Au total sur les 2 années, 26 articles ont été publiés dans des journaux internationaux reconnus, 16 articles dans des conférences internationales et 1 brevet a été déposé, preuves de l'activité et du niveau scientifique de TéSA. Remarquons que si le nombre d'articles journaux publiés est stable (27 en 2019-2020), le nombre d'articles publiés dans les conférences a chuté et est passé de 48 en 2019-2020 à 16 en 2021-2022 ! La raison en est simple : la pandémie de COVID a transformé les conférences en sessions « virtuelles », enlevant l'opportunité de discussions informelles mais souvent productives autour d'un café… et les chercheurs ont fini par « bouder » les publications dans ces conférences… Mais la reprise progressive du mode de fonctionnement des conférences en « présentiel » devrait conduire les chercheurs à publier à nouveau intensivement dans les conférences internationales et nationales.

La qualité des publications est ainsi toujours au rendez-vous : TéSA publie majoritairement dans des revues « Q1 » avec des *impacts factors* (IF) et des *cite scores* (CS) élevés, comme illustré sur la page suivante.

Parmi les publications, celle issue de la thèse de Barbara Pilastre [C-13] a obtenu un « best paper award » et a été ensuite publiée dans un livre « Space Operations » édité par Springer en mars 2022. Cet article constitue le deuxième « best paper award » obtenu durant cette thèse (le premier était à l'occasion de la World Conference on Condition Monitoring en 2019). La qualité des résultats de sa thèse « estimation parcimonieuse et apprentissage de dictionnaire pour la détection d'anomalies multivariées dans des données mixtes de télémesure satellite » a permis à Barbara Pilastre d'obtenir en 2021 le prix Leopold Escande de Toulouse INP, récompensant chaque année les meilleures thèses.

7. TéSA OUTREACH

The influence of a research laboratory is measured first and foremost by the quality of the articles it publishes. TéSA's activities are widely disseminated via the peer-reviewed journal articles or conference presentations listed in this report. The following table shows the journals in which TéSA published in 2021 and 2022, with their quartile score, impact factor and cite score, which are measurements of influence.

In total over the two years, 26 articles were published in recognised international journals, 16 articles were presented at international conferences and 1 patent was filed, proof of TéSA's scientific activity and level. Note that while the number of journal articles published remained stable (27 in 2019-2020), the number of articles published in conferences fell from 48 in 2019-2020 to 16 in 2021-2022! The reason is simple: the COVID pandemic turned conferences into 'virtual' sessions, removing the opportunity for informal but often productive discussions during coffee breaks, and researchers ended up 'shunning' publications at these conferences. But the gradual return to 'face-to-face' conferences should lead researchers to publish intensively again at international and national conferences.

Consequently, the quality of the publications is always high: TéSA publishes mainly in 'Q1' journals with high impact factors (IF) and cite scores (CS), as shown on the next page.

Among the publications, the one resulting from Barbara Pilastre's PhD thesis [C-13] *won a Best Paper Award and was subsequently published in a book entitled 'Space Operations' by Springer in March 2022. This paper is the second Best Paper Award obtained during this thesis (the first was at the World Conference on Condition Monitoring in 2019). The quality of the results of her thesis on 'parsimonious estimation and dictionary learning for the detection of multivariate anomalies in mixed satellite telemetry data' enabled Barbara Pilastre to win the Toulouse INP Leopold Escande prize in 2021, which is awarded each year for the best theses.*

NOM | *NAME*	NOMBRE *NUMBER*	Q	IF	CS
IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing	2	Q1	8.125	12.2
Computers and Electronics in Agriculture	1	Q1	6.757	11.8
Remote sensing (MDPI)	2	Q1	5.349	7.8
IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters	2	Q1	5.343	8.5
IEEE Wireless Communication Letters	1	Q1	5.281	9.3
IEEE Trans. on Signal Processing	1	Q1	4.875	10.5
Pattern Recognition Letters (Elsevier)	1	Q1	4.757	8.6
Signal Processing (Elsevier)	3	Q1	4.729	8.9
Ultrasonics (Elsevier)	1	Q1	4.062	6.6
Sensors (MDPI)	1	Q1	3.847	5.8
IEEE Trans. on Circuits and Systems II	1	Q1	3.691	6
IEEE Communications Letters	1	Q1	3.553	7.2
IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems	1	Q1	3.491	7.4
IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control	1	Q1	3.267	5.7
IEEE Signal Processing Letters	1	Q1	3.201	6.6
Journal of Heuristics	1	Q1	2.247	3.9
IET Radar, Sonar and Navigation	3	Q2	1.596	4.3
Acoustics Australia	1	Q2	1.891	2.4
Array	1	-	-	25.2

Nombre total d'articles dans des journaux internationaux
Total number of papers in international journals 26

Nombre total d'articles dans des conférences internationales
Total number of papers in international conferences 16

Brevets
Patents 1

Le rayonnement, ce sont aussi les organisations et les invitations dans des sessions spéciales de conférences internationales. En 2021, Julien Lesouple, post-doc à TéSA, a été invité à la session spéciale d'EUSIPCO ''*Recent Advances Towards Robust Data Science*'' organisée par Michael Muma, Esa Ollila et Frédéric Pascal, à laquelle l'article [C-15] a été soumis et présenté. En 2022, Julien Lesouple a été à nouveau invité à la session spéciale EUSIPCO ''*Recent Advances on Statistical and Optimization Methods for High-dimensional Data*'' organisée par Abderrahim Halimi et Jean-Yves Tourneret, à laquelle l'article [C-21], qui est une poursuite des travaux précédents, a été soumis et présenté.

Cette invitation permet aussi de souligner l'implication des enseignants-chercheurs partenaires de TéSA dans l'organisation de conférences : Jean-Yves Tourneret, professeur à Toulouse INP, a co-organisé deux sessions spéciales d'EUSIPCO en 2022, à Belgrade en Serbie : une intitulée « *Dealing with missing data in signal and image processing: trends and new challenges* » en collaboration avec Nabil El Korso de Centrale-Supélec et Yajing Yan de l'université Savoie Mont Blanc et l'autre « *Recent Advances on statistical and optimisation methods for high-dimensional data* » en collaboration avec Abderrahim Halimi de l'université d'Heriot-Watt (Edinburgh) en Ecosse.

Enfin, on ne peut pas terminer cette section sur le rayonnement de TéSA sans reparler de la venue de Steve McLaughlin, professeur de l'Université Heriot-Watt d'Édimbourg, en Ecosse, venu passer un mois parmi nous et qui nous a illuminé de son expertise et de sa bonne humeur légendaire ! Oui, c'est la troisième fois qu'on vous en parle dans ce document mais on est vraiment très fiers et heureux de sa venue !

Our influence is also spread through our organisation of and invitations to special sessions at international conferences. In 2021, Julien Lesouple, a post-doctoral student at TéSA, was invited to the EUSIPCO special session entitled 'Recent Advances Towards Robust Data Science', organised by Michael Muma, Esa Ollila and Frédéric Pascal. He submitted his paper [C-15] *and was invited to present it. In 2022, Julien Lesouple was again invited to the EUSIPCO special session 'Recent Advances on Statistical and Optimization Methods for High-dimensional Data' organized by Abderrahim Halimi and Jean-Yves Tourneret, for which he submitted the paper* [C-21]*, a continuation of previous work, and then presented it.*

This invitation was also an opportunity to highlight the involvement of TéSA's teacher-researcher partners in organising conferences: Jean-Yves Tourneret, professor at Toulouse INP, co-organised two special sessions at EUSIPCO, in Belgrade, Serbia in 2022: one entitled 'Dealing with missing data in signal and image processing: trends and new challenges' in collaboration with Nabil El Korso from Centrale-Supélec and Yajing Yan from Savoie Mont Blanc University, and the other 'Recent Advances on statistical and optimisation methods for high-dimensional data' in collaboration with Abderrahim Halimi from Heriot-Watt University (Edinburgh) in Scotland.

Finally, we cannot end this section on TéSA's influence without mentioning the visit of Steve McLaughlin, a professor from Heriot-Watt University in Edinburgh, Scotland, who came to spend a month with us and enlightened us with his expertise and legendary good humour! Yes, this is the third time we've mentioned it in this document, but we're really proud and happy that he came!

PARTIE 3
PART 3

Tendance et perspectives
Trends and perspectives

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

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

1. LOCALISATION ET NAVIGATION

Les systèmes de localisation et de navigation sont tellement présents dans les technologies qui nous entourent que nous ne pouvons imaginer une société sans eux dans les technologies du futur. Il existe actuellement une grande variété d'applications grand public et de systèmes de sécurité critiques, parmi une pléthore de domaines techniques, où la précision et la fiabilité de la position sont d'une importance capitale. Des technologies telles que les systèmes de transport intelligent, la robotique et les villes intelligentes ne peuvent être conçues sans les systèmes actuels de positionnement ou de navigation.

Parmi toutes les technologies de positionnement et de navigation possibles, le système mondial de navigation par satellite (GNSS) est généralement la technologie de choix pour fournir des informations de positionnement, puisqu'il s'agit de la seule technologie capable de fournir un positionnement sur toute la surface de la terre. Néanmoins, il a été initialement conçu pour fonctionner dans des conditions nominales, c'est-à-dire dans des zones extérieures et dégagées, et ses performances se dégradent clairement dans les environnements difficiles. Par exemple, les phénomènes tels que les trajets multiples (réflexions), le *spoofing* (usurpation d'identité) et les interférences (intentionnelles ou non) sont les plus problématiques et constituent un problème clé dans les scénarios critiques pour la sécurité, tels que l'aviation civile. Ces effets ont été notés et rapportés dans la littérature, ce qui rend de facto nécessaire la conception de systèmes de localisation et de navigation précis et robustes dans les scénarios problématiques.

1. POSITIONING & NAVIGATION

Location and navigation systems are such an integral part of the technologies that surround us that we cannot imagine a society without them in the technologies of the future. There are currently a wide variety of consumer applications and safety-critical systems, among a plethora of technical fields, in which positional accuracy and reliability are of paramount importance. Technologies such as smart transport systems, robotics and smart cities cannot be designed without today's positioning and navigation systems.

Of all the possible positioning and navigation technologies, GNSS, the Global Navigation Satellite System, is generally the technology of choice for providing positioning information, since it is the only technology capable of providing positioning over the entire surface of the Earth. Nevertheless, it was initially designed to operate under nominal conditions, i.e. in open, outdoor areas, and its performance clearly deteriorates in more problematic environments. For example, phenomena such as multipath (reflections), spoofing and interference (intentional or unintentional) are the most problematic and are key issues in safety-critical scenarios such as for civil aviation. These effects have been noted and reported in the literature, making it de facto necessary to design accurate and robust location and navigation systems for problematic scenarios.

Pour minimiser l'impact de cet ensemble de phénomènes indésirables, il faut d'abord améliorer le traitement du signal actuel : réseaux d'antennes, boucles de poursuite vectorielles, augmentation du temps d'intégration du signal, utilisation de techniques de filtrage robuste, utilisation de mesures de phase, utilisation de nouveaux signaux GNSS ou combinaison de signaux GNSS pour générer des signaux à plus grande largeur de bande (métasignaux)... Ensuite, les nouvelles méthodes basées sur l'intelligence artificielle ouvrent un éventail de contre-mesures pour détecter et combattre des anomalies liées à d'éventuels effets perturbateurs sur le canal de transmission.

De nombreuses méthodes d'apprentissage automatique et en particulier l'utilisation d'architectures de réseaux neuronaux profonds peuvent être intégrées en différents points de la chaîne de réception, ce qui pourrait permettre d'atténuer les effets générés par les interférences, la propagation par trajets multiples ou le *spoofing*. Il est également possible d'exploiter des sources d'information complémentaires, par exemple l'utilisation simultanée de différentes fréquences porteuses, soit pour la correction ionosphérique, soit pour fournir des techniques de positionnement précis (métasignaux et positionnement par mesure de phase) et le filtrage des erreurs par les dynamiques Doppler accrues telles que le permettent les constellations en orbite basse.

›› Steve Mc Laughlin, professeur de l'université Heriot Watt en Ecosse a donné deux séminaires à TéSA.
Steve Mc Laughlin, professor of the Heriot Watt University (Scotland) gave two seminars in TéSA.

En outre, l'utilisation de techniques de positionnement coopératif offre une solution dans les environnements où les systèmes de navigation par satellite ne sont pas opérationnels. TéSA est positionné pour développer des nouvelles techniques de traitement du signal GNSS qui permettront de résoudre les problèmes mentionnés ci-dessus.

L'infrastructure de navigation par satellite européenne est désormais pleinement

To minimise the impact of this set of undesirable phenomena, we first need to improve current signal processing by means of antenna arrays, vector tracking loops, increased signal integration time, the use of robust filtering techniques, the use of phase measurements, the use of new GNSS signals or a combination of GNSS signals to generate signals with greater bandwidth (metasignals). Furthermore, new methods based on artificial intelligence open up a range of countermeasures to detect and tackle anomalies linked to possible disruptive effects on the transmission channel.

Numerous machine learning methods, and in particular the use of deep neural network architectures, can be integrated at different points in the reception chain, which could make it possible to mitigate the effects generated by interference, multipath or spoofing. It is also possible to exploit complementary sources of information, for example the simultaneous use of different carrier frequencies, either for ionospheric correction or to provide precise positioning techniques (metasignals and positioning by phase measurement) and error filtering by increased Doppler dynamics, as enabled by low orbit constellations.

Moreover, the use of cooperative positioning techniques offers a solution in environments where satellite navigation systems are not operational. TéSA is in a good position to develop new GNSS signal processing techniques that will solve the aforementioned problems.

The European satellite navigation infrastructure is now fully operational, and awaiting the development of new applications and new processing of raw signals and measurement data. New services such as OSNMA (Open Service Navigation Message Authentication) have also been included to resolve problems such as spoofing. It is not difficult to foresee that such services will be included in the navigation messages of the EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) augmentation system. It is therefore quite possible that the design of new waveforms could offer a promising compromise between data throughput and position accuracy.

Furthermore, new GNSS signals continue to emerge, such as the S-band signals of IRNSS (the Indian system), BEIDOU-3 (the Chinese system), and even GLOBALSTAR (an American company), which has declared itself to be a GNSS system, with its advanced spread spectrum signals and its project for a new PPP (Precise Point Positioning) service. The regional KPS (Korean Positioning System) system also intends to use the S-band in addition to the L-band. The S-band in question is

opérationnelle, et sujette au développement de nouvelles applications et de nouveaux traitements des signaux et mesures brutes. L'*Open Service Navigation Message Authentication* (OSNMA) a été inclus afin de résoudre des problèmes tels que le *spoofing*. Il n'est pas difficile de prévoir que de tels services seront inclus dans les messages de navigation du système d'augmentation EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*).

Pour cela, il est tout à fait possible que la conception de nouvelles formes d'onde puisse offrir un compromis prometteur entre le débit de données et la précision de la position. D'autre part, de nouveaux signaux GNSS continuent d'apparaitre, tels que les signaux en bande S d'IRNSS (système indien), de BEIDOU-3 (système chinois), et même de GLOBALSTAR (entreprise américaine) qui se déclare lui-même système GNSS avec ses signaux pilote en spectre étalé et son projet de nouveau service de positionnement précis (PPP). Le système régional *Korean Positioning System* (KPS) prévoit aussi l'utilisation de la bande S en plus de la bande L. La bande S en question est aussi la seule bande descendante réglementairement autorisée pour les communications mobiles (MSS) par satellite et les systèmes de radio détermination (RDSS) tels que GNSS. Des synergies entre systèmes de navigation et de communication mobile peuvent ainsi être trouvées au niveau des signaux, tout comme pour les liens possibles entre GNSS et positionnement à très faible consommation et donc faible bande des objets connectés IoT.

L'augmentation des performances de la mesure de distance grâce à la correction ionosphérique bi-fréquence est également l'une des clefs mais nécessite des études nécessaires. Enfin, il convient de mentionner l'intérêt croissant pour le positionnement dans l'espace.

A titre d'exemple, on peut citer les récepteurs GNSS à bord de satellites LEO (*Low Earth Orbit*), ainsi que les techniques de positionnement basées sur des satellites LEO (comme approches alternatives au positionnement GNSS classique basé sur des satellites MEO - *Medium Earth Orbit*), le développement de récepteurs spatiaux pour la navigation Terre-Lune et le positionnement coopératif d'essaims de satellites pour de nouvelles missions scientifiques dans le cadre de l'interférométrie. Le TéSA est positionné pour poursuivre ses contributions à l'étude de tous ces nouveaux signaux GNSS et de leurs performances, ainsi qu'à leur conception.

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

also the only downlink band authorised for MSS (Mobile Satellite Service) communications and RDSS (Radio Determination Satellite Systems) such as GNSS. Synergism between navigation and mobile communication systems can thus be found at the signal level, as well as for the possible links between GNSS and very low-power (and therefore low-bandwidth) positioning of IoT objects.

The increase in range-measurement performance, by means of the dual-frequency ionospheric correction, is also crucial but further studies are needed. Finally, we should mention the growing interest in positioning in space.

Examples include GNSS receivers on LEO (Low Earth Orbit) satellites, as well as positioning techniques based on LEO satellites (as alternative approaches to conventional GNSS positioning based on MEO, or Medium Earth Orbit) satellites, the development of space receivers for Earth-Moon navigation, and the cooperative positioning of satellite swarms for new scientific missions using interferometry. TéSA will continue contributing to the study of all these new GNSS signals and their performance, as well as their design.

GNSS scientific applications generally require maximum measurement accuracy. GNSS positioning accuracy can be improved by merging data from other sensors. In this context, a distinction is made between dead-reckoning techniques using a conventional inertial unit or odometer (but which can also include cameras or altimeters) and techniques using opportunity sources (LTE [Long-Term Evolution] cells, Wi-Fi, GLOBALSTAR, IRIDIUM, GNSS transmitters on the ground or in buildings, pseudolites, 5G links, IoT links, etc.). These techniques are based on a priori mapping but can be extended in the event that the environment is only partially known, i.e. SLAM (Simultaneous Localisation And Mapping).

›› Session de brainstorming during les journées scientifiques de TéSA en 2022.
Brainstorming session during TéSA science days in 2022.

peut être améliorée grâce à la fusion avec d'autres capteurs. Dans ce cadre, on distingue les techniques de navigation à l'estime (*dead reckoning*) exploitant classiquement une centrale inertielle ou un odomètre (mais pouvant également inclure caméras ou altimètres) des techniques exploitant des sources d'opportunités (cellules LTE, Wi-Fi, GLOBALSTAR, IRIDIUM, émetteur GNSS au sol ou dans les immeubles, pseudolites, liaisons 5G, liaisons IoT…).

Ces techniques sont fondées 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 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 contrôle 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, systèmes de surveillance, navigation pour hélicoptères…).

Enfin avec le prochain essor des objets communicants, il va devenir difficile d'administrer simplement les réseaux de communication mondiaux. La diffusion d'une référence de temps précise par les GNSS peut 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.

›› Stefano Fortunati, professeur à l'IPSA Paris, a donné un séminaire à TéSA.
Stefano Fortunati, professor at IPSA Paris gave a seminar in TéSA.

Another approach in this field of sensor data fusion consists in cooperative positioning by a fleet of receivers which then share their information. This improvement in positioning accuracy goes hand in hand with improvements in techniques for controlling the integrity of and authenticating the information. Indeed, in many applications, the reliability of the position information is as important as its accuracy (civil aviation, management of fleets of vehicles or drones, surveillance systems, helicopter navigation, etc.).

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

2. OBSERVATION DE LA TERRE

Le domaine de l'observation de la Terre gagne en densité et maturité de façon régulière depuis plusieurs décennies. S'il était historiquement porté par les grandes agences nationales pour des besoins institutionnels (recherche scientifique, défense, aménagement du territoire, météorologie, etc.), des acteurs privés ont fleuri en quelques années pour proposer des infrastructures et offres de services plus riches à destination d'applications commerciales.

Néanmoins, les acteurs historiques continuent de maintenir des programmes ambitieux et on assiste à une émergence de systèmes satellitaires opérationnels et récurrents tels que le programme européen Copernicus (satellites des filières Sentinel, Sentinel-NG, etc.) permettant l'accès à des données sur l'environnement issues de plusieurs sources et agrégées, garantissant leur fiabilité. Ces filières offrent une grande diversité d'observables (concernant l'océan, l'atmosphère, les terres émergées, etc.) ainsi qu'une garantie de continuité sur des temps longs, permettant ainsi le développement d'applications scientifiques mais aussi commerciales.

En parallèle, on note l'arrivée de satellites embarquant de nouveaux concepts instrumentaux spécifiques (imageur hyperspectral, imageur infrarouge, lidar à peigne de fréquence, interféromètre statique, tomographie radar, etc.), ce qui appelle de nouveaux algorithmes, avec un couplage toujours plus fort entre l'instrument et ses traitements.

2. EARTH OBSERVATION

The field of Earth observation has been steadily increasing in density and maturity for several decades. Historically, this was the domain of the major national agencies for institutional needs (scientific research, defence, regional planning, meteorology, etc.), but over the last few years private players have sprung up to offer enhanced infrastructures and services for commercial applications.

Nevertheless, the historical players continue to pursue ambitious programmes and we are witnessing the emergence of operational and recurrent satellite systems such as the European Copernicus programme (Sentinel and Sentinel-NG satellites, etc.) which provide access to environmental data from several sources and aggregated data, guaranteeing their reliability. These channels offer a wide range of observable parameters (for the ocean, atmosphere, land, etc.) as well as a guarantee of continuity over long periods, thus enabling the development of both scientific and commercial applications.

At the same time, we are seeing the arrival of satellites carrying specific new instrument concepts (hyperspectral imager, infrared imager, frequency comb lidar, static interferometer, radar tomography, etc.), which call for new algorithms, with ever stronger coupling between the instrument and its processing.

La multiplicité des données ainsi disponibles bénéficie à un écosystème fertile de développements d'applications commerciales (Internet des Objets, transport, logistique, agriculture, etc.) et scientifiques (observations géophysiques : gaz à effet de serre, hydrologie, etc.), qui se structure autour du marché des services avals (GeoDataHub, Space Data Marketplace, etc.).

Ce foisonnement de données disponibles est aussi possible grâce à la miniaturisation des capteurs et donc à l'arrivée de nouveaux systèmes satellitaires bénéficiant de l'essor depuis une quinzaine d'années des petites plateformes, tels que les nano et microsatellites, et des approches de développement de projets de type NewSpace. Cette tendance à travers des formats et time-to-market réduits, gagnant par ailleurs en fiabilité au fur et à mesure des années, a permis de mettre en orbite des systèmes de collecte plus vastes, basés sur des essaims ou des constellations offrant une revisite plus fréquente. Les performances des charges utiles embarquées sont directement corrélées à la taille des instruments d'observation et ces systèmes miniaturisés mais denses sont donc complémentaires de satellites d'observation plus massifs et disséminés permettant la haute résolution.

L'accroissement de la quantité de données produites s'accompagne d'un besoin de traitement et de délai de mise à disposition de la donnée qui sont des paramètres clés dans sa chaine de valeur.

Historiquement, le traitement des données collectées se faisait généralement au sol, impliquant que toute la production de données soit rapatriée sur Terre et analysée. Pour des systèmes d'observation dans le spectre visible par exemple, cela implique d'avoir des images partiellement ou complètement occupées par des nuages et donc avec peu de valeur ajoutée.

Le domaine du traitement numérique du signal et de l'image bénéficie depuis plusieurs années de l'essor de l'intelligence artificielle et l'intégration à bord des satellites de cette nouvelle approche, en plus des traitements sol bénéficiant des mêmes atouts algorithmiques, ce qui peut permettre un prétraitement des données collectées pour optimiser la quantité de données à redescendre. Celle-ci est de toute façon en constante augmentation du fait de l'amélioration des résolutions spatiales, radiométriques ou spectrale des instruments de collecte.

Cela implique de facto une amélioration des débits des systèmes de transmission embarqués sur les satellites.

The wide range of data available feeds a fertile ecosystem for the development of commercial applications (Internet of Things, transport, logistics, agriculture, etc.) and scientific applications (geophysical observations: greenhouse gases, hydrology, etc.), structured around the downstream services market (GeoDataHub, Space Data Marketplace, etc.).

This proliferation of available data is also made possible by the miniaturisation of sensors and, consequently, the arrival of new satellite systems benefiting from the development over the last fifteen years of small platforms, such as nano and microsatellites, and NewSpace-type project development approaches. This trend towards shorter formats and shorter time-to-market, which has also become more reliable over the years, has made it possible to place in orbit more extensive collection systems, based on swarms or constellations that offer more frequent revisits. The performance of on-board payloads is directly correlated with the size of the observation instruments, and these miniaturised but dense systems are therefore complementary to more massive observation satellites, that are more widely dispersed and provide high resolution.

As the amount of data produced increases, so does the need to process it and make it available quickly, which are key parameters in the value chain.

Historically, the data collected was generally processed on the ground, meaning that all the data produced had to be brought back to Earth and analysed. For observation systems in the visible spectrum, for example, this means including images that are partially or completely full of clouds, and therefore with little added value.

For several years now, the field of digital signal and image processing has benefited from the development of artificial intelligence and the integration of this new approach on board satellites, in addition to ground-based processing that benefits from the same algorithmic advantages, which can be used to pre-process the data collected to optimise the amount of data to be downloaded. In any case, this figure is constantly rising as a result of improvements in the spatial, radiometric and spectral resolution of collection instruments.

This implies a de facto improvement in the throughput rates of on-board satellite transmission systems.

L'architecture classique de vidage des données en bande X sur stations terrestres est actuellement bousculée du fait des besoins exprimés d'augmentation des débits, de réduction de l'âge de la donnée et de la congestion de cette bande. Les futurs systèmes intègreront des liens de communication en relais vers d'autres systèmes satellitaires LEO, MEO ou GEO (*Geostationary Earth Orbit*), pour la réactivité, en plus du traditionnel lien direct vers la Terre. Celui-ci évolue également vers de nouvelles bandes de fréquence et technologie (bande Ka à 26 GHz ou optique infrarouge). On assiste par ailleurs à des rapprochements stratégiques entre les acteurs de la prise d'images (Planet, BlackSky…) et les acteurs de fourniture de services de communication (Eutelsat, Inmarsat) afin de développer leur compétitivité sur un marché très prometteur.

Ces perspectives renvoient à des domaines techniques tels que le traitement du signal et des images dans les domaines temporel ou fréquentiel, le big data, l'hybridation de données hétérogènes (d'origine spatiales ou non), l'utilisation de modulations et codages toujours plus efficaces et robustes, autant de compétences que TéSA maitrise et développe depuis de nombreuses années et donc en cohérence avec les besoins exprimés et à venir de cette thématique de l'observation de la Terre.

The traditional architecture for dumping X-band data down to terrestrial stations is currently being challenged by the need to increase throughput, reduce the age of the data and cope with congestion in this band. Future systems will incorporate relay communication links to other LEO, MEO or GEO (Geostationary Earth Orbit) satellite systems, for greater responsiveness, in addition to the traditional direct link to Earth. It is also evolving towards new frequency bands and technologies (Ka band at 26 GHz or infrared optics). We are also witnessing strategic alliances between players in the image acquisition sector (Planet, BlackSky, etc.) and those supplying communication services (Eutelsat, Inmarsat) in order to develop their competitiveness in a highly promising market.

These prospects relate to technical fields such as signal and image processing in the time or frequency domains, Big Data, the hybridisation of heterogeneous data (whether or not from satellites), and the use of increasingly efficient and robust modulation and coding, all skills that TéSA has mastered and developed over many years and which are therefore consistent with the needs expressed and to be expressed in this area of Earth observation.

QUE SONT-ILS DEVENUS ?

Après avoir soutenu sa thèse de doctorat à TéSA en 2019, Selma a travaillé dans une startup française en tant qu'ingénieure de recherche en traitement du signal. En 2022, elle a rejoint Thales Alenia Space pour être une architecte systèmes télécoms et depuis juin 2023, Selma travaille à l'ESA/ESTEC aux Pays-Bas en tant qu'ingénieure des systèmes de communication et technologies.

WHERE ARE THEY NOW?

After defending her PhD thesis at TéSA in 2019, Selma worked in a French start-up as a research engineer in signal processing. In 2022, she joined Thales Alenia Space as a telecoms systems architect and since June 2023 she has been working at ESA/ESTEC in the Netherlands as a communications systems and technologies engineer.

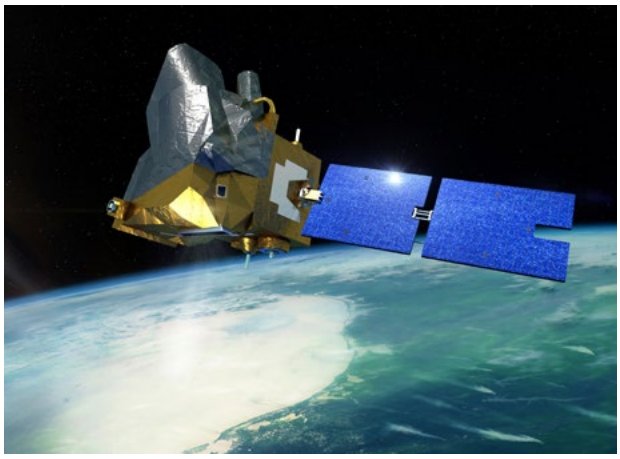
Selma Zamoum

3. 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 et en augmentant de façon importante leur flexibilité. On peut distinguer 3 catégories principales de nouveaux systèmes de télécommunication par satellite.

Fin des années 2010, on a vu apparaitre des systèmes VHTS (*Very High Throughput Satellite*) qui visent maintenant des capacités de plusieurs centaines de Gigabit/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, avec l'irruption des satellites entièrement flexibles (*Software Defined Satellite* - SDS) qui permettent une adaptation complète aux besoins des opérateurs et de leurs clients, que ce soit en débit ou en couverture. Ces solutions s'appuient principalement sur des processeurs numériques transparents et sur des antennes actives. Ces solutions peuvent être complétées par des techniques de multiplexage temporel de la ressource (*beam hopping*) qui



3. SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

Satellite communications are currently undergoing a revolution with the introduction of numerous techniques that increase throughput rates while reducing acquisition and operating costs and significantly increasing their flexibility. There are 3 main categories of new satellite telecommunications systems.

VHTS (Very High Throughput Satellite) systems that emerged at the end of the 2010s are now aiming at capacities of several hundred Gigabits/sec with coverage of several hundred spots for geostationary satellites. To meet these ever-increasing bandwidth requirements, the focus of future developments is on the use of the Q/V band, and higher frequency bands (W, optical) are beginning to be considered. As these high frequency bands characteristically have great attenuation, they require the implementation of spatial diversity solutions and corresponding scheduling. On the return channel, coordinated interference control techniques need to be adapted to the specific satellite context.

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

Finally, there has been an explosion in the use of telecommunications satellite constellations, with systems covering a wide range of services and markets. These systems are being developed by both traditional space players and state players, as well as a large number of new players (commonly referred to as NewSpace), whether start-ups or players from among the GAFAs. There are already established systems such as Iridium, O3B or OneWeb and numerous initiatives around nano/micro satellites. But the most significant phenomenon is the emergence of mega constellations such as Telesat's initiative with the LightSpeed project, Amazon's Kuiper project,

permettent d'offrir une flexibilité très forte et d'adapter ainsi les ressources offertes par ces systèmes aux demandes des utilisateurs sur la couverture. En effet, la variabilité des trafics incite à une allocation la plus dynamique possible des ressources, par exemple par le biais de techniques de partage en temps ou en fréquence.

Enfin, les constellations de satellites de télécommunication connaissent une véritable explosion, avec des systèmes couvrant des services et des marchés extrêmement variés. Ces systèmes sont portés aussi bien par des acteurs classiques du spatial que par des acteurs étatiques ou de très nombreux nouveaux entrants (communément regroupés sous le vocable de *NewSpace*), que ce soient des startups ou bien des acteurs issus des GAFAs. On trouve ainsi des systèmes déjà établis tel qu'Iridium, O3B ou OneWeb et de nombreuses initiatives autour des nano/micro satellites. Mais le fait majeur est l'irruption des méga-constellations avec les initiatives de Telesat avec le projet LightSpeed, d'Amazon avec le projet Kuiper, de SpaceX avec Starlink, ou des projets étatiques (principalement en Europe avec l'annonce du projet IRIS2 et en Chine), qui modifie profondément le marché des télécommunications par satellite. En effet, ces systèmes, composés d'un très grand nombre de satellites (jusqu'à 12000 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 térabits/s avec une couverture globale et des latences très faibles.

Pour ce faire, ces types de systèmes s'appuient sur l'ensemble des dernières avancées dans le domaine des télécommunications spatiales : antennes actives, régénération et traitement bord, liens inter - satellites optiques, flexibilité, virtualisation… On notera enfin que plusieurs initiatives venant des principaux opérateurs satellites voient le jour autour de constellations de satellites MEO, vu comme un compromis entre le nombre de satellites, la couverture et la latence.

Par ailleurs, deux tendances de fond traversent l'ensemble de ces systèmes. La première concerne le besoin pour des approches multi constellations avec la possibilité pour les terminaux satellite de se connecter de façon efficace à des systèmes GEO ou LEO/MEO. L'autre tendance concerne les opportunités offertes par la 5G avec une question de plus en plus prégnante de basculer du DVB à la 5G.

SpaceX with Starlink, or state projects (mainly Europe with the announcement of the IRIS2 project but also China), which are profoundly modifying 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 (some as low as 340 km), will make it possible to achieve extremely high total throughput capabilities of the order of several Terabits/sec with global coverage and very low latencies. To do this, these types of systems rely on all the latest advances in the field of space telecommunications: active antennas, on-board regeneration and processing, optical inter-satellite links and flexibility, virtualisation, etc. Finally, we should note that several initiatives from the main satellite operators are emerging around MEO satellite constellations, seen as a compromise between the number of satellites, coverage and latency.

In addition, two fundamental trends run through all these systems. The first concerns the need for multi-constellation approaches, with satellite terminals being able to connect efficiently to GEO or LEO/MEO systems. The other trend concerns the opportunities offered by 5G, with the increasingly important question of a possible switch from DVB to 5G.

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

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

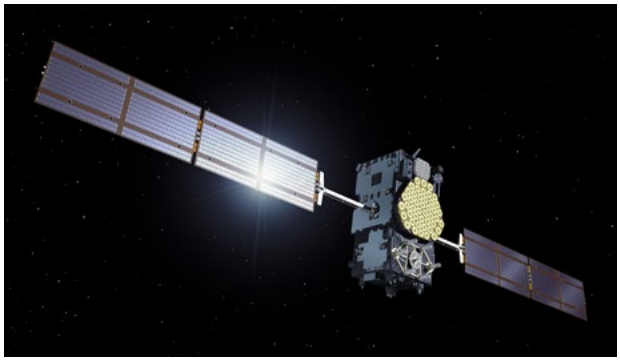
Pour finir, au niveau applicatif, de nouveaux marchés sont au cœur des interrogations des acteurs du domaine, avec en particulier les plateformes mobiles (avions, bateaux…) et le *Machine Type Communication*. Ce dernier présente en effet des caractéristiques très marquées, que ce soit en termes de trafic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

4. L'IA : LE COUTEAU SUISSE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS SPATIALES ET AÉRONAUTIQUES

L'association TéSA a investi depuis sa création dans le domaine de l'apprentissage statistique (*machine learning*) pour les communications spatiales et aéronautiques. L'apprentissage statistique est un domaine d'expertise de TéSA qui apparait dans la branche « Traitement du Signal et des Images » qui a été utilisé dans de nombreux projets, études et thèses passées.

En ce qui concerne les perspectives dans le domaine de l'Intelligence Artificielle (IA), on peut tout d'abord citer le développement de méthodes innovantes de détection d'anomalies – un axe avec une forte expertise de TéSA - pour l'analyse de séries temporelles. Ces méthodes seront considérées dans plusieurs thèses et projets liés par exemple à la détection de trajectoires anormales de bateaux pour la surveillance maritime (en collaboration avec la société Hensold-Nexeya France), ou à la détection d'anomalies dans les réseaux SATCOM (avec Thales Alenia Space).

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



4. AI: THE SWISS ARMY KNIFE OF SPACE AND AERONAUTICS TELECOMMUNICATIONS

The TéSA association has been involved in the field of statistical learning (machine learning) for space and aeronautical communications, since its creation. Statistical learning is an area of expertise at TéSA that falls into the 'Signal and Image Processing' category and has been used in many past projects, studies and theses.

With regard to prospects in the field of AI (Artificial Intelligence), we can first mention the development of innovative anomaly detection methods – an area in which TéSA has considerable expertise – for the analysis of time series. These methods will be considered in several theses and projects, linked, for example, to the detection of abnormal ship trajectories for maritime surveillance (in collaboration with Hensold-Nexeya France), or the detection of anomalies in SATCOM networks (with Thales Alenia Space).

Un autre domaine dans lequel l'IA peut jouer un rôle important est la détection et la réduction des perturbations affectant les signaux GNSS. Les connaissances de TéSA dans le domaine de la navigation par satellites et de l'IA seront mises à profit pour lutter contre les interférences affectant les signaux AIS (en collaboration avec la société KINEIS), développer des algorithmes de positionnement robustes à la présence d'interférences (avec Thales Alenia Space) ou proposer des solutions à base d'apprentissage profond pour la classification de ces perturbations (en collaboration avec le CNES).

Les méthodes d'apprentissage statistique seront également utilisées dans les domaines d'application de TéSA. Pour les systèmes de communications spatiales, plusieurs thèses et études (menées notamment avec le CNES et Thales Alenia Space) concerneront les communications par satellites « *Machine to Machine* » (M2M) et l'estimation de paramètres instrument basées sur la résolution de problèmes inverses. Dans le domaine de l'observation de la Terre, TéSA poursuivra ses travaux liés à l'utilisation conjointe de données radar et optiques avec notamment une application au diagnostic de l'état des forêts (avec le CNES et le CESBIO).

Dans les prochaines années, le laboratoire TéSA va enrichir encore plus son expertise acquise dans le domaine de l'intelligence artificielle pour répondre aux besoins de ses partenaires et de collaborations externes. Les domaines d'application de TéSA, à savoir les télécommunications spatiales et aéronautiques, la localisation et la navigation, l'observation de la Terre et les domaines connexes, sont le terrain de jeu idéal, sources de problématiques diverses et nouvelles auxquelles TéSA peut apporter sa contribution grâce au couteau suisse de l'intelligence artificielle.

Another area in which AI can play an important role is the detection and reduction of disturbances affecting GNSS signals. TéSA's expertise in satellite-based navigation and AI will be used to combat interference affecting AIS signals (in collaboration with KINEIS), to develop positioning algorithms that are robust in withstanding interference (with Thales Alenia Space) and to propose deep-learning-based solutions for classifying these disturbances (in collaboration with CNES).

Statistical learning methods will also be used in TéSA's areas of application. For space communications systems, a number of theses and studies (conducted in particular with CNES and Thales Alenia Space) will focus on M2M (Machine to Machine) satellite communications and the estimation of instrument parameters based on the resolution of inverse problems. In the field of Earth observation, TéSA will continue its work on the joint use of radar and optical data, with a particular application to assess the state of forests (with CNES and CESBIO).

Over the next few years, the TéSA laboratory will be further developing its expertise in artificial intelligence to meet the needs of its partners and external collaborators. TéSA's areas of application – space and aeronautical telecommunications, location and navigation, Earth observation and related fields – are the ideal playground for tackling diverse and new problems to which TéSA can contribute thanks to the 'Swiss Army knife' of artificial intelligence.

>> L'équipe TéSA 2023… à retrouver dans notre prochain rapport d'activité !
TéSA 2023 team… look out for them in our next activity report!

PARTIE 4
PART 4

Conclusion

Ce rapport d'activité a permis de présenter la synthèse des activités de recherche et d'expertise menées dans TéSA en 2021 et 2022.

TéSA est un laboratoire de recherche privé, existant sous forme d'une association loi 1901 depuis bientôt 20 ans, fédérant la recherche en télécoms spatiales et aéronautiques, permettant à des chercheurs de diverses entités de recherche de travailler ensemble, en s'enrichissant des compétences de tous pour mieux répondre aux besoins des industriels et institutionnels demandeurs d'une R&D de qualité.

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

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

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

This report is a summary of the research and applied expertise activities carried out by TéSA in 2021 and 2022.

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

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

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

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

Annexe

Appendix

1. LISTE DES PUBLICATIONS

La liste des publications ne se limite pas strictement aux publications faites en 2021 et 2022 mais comprend aussi quelques publications en dehors de cette période, relatives aux publications des thèses et post-docs décrits dans le rapport.

1. PUBLICATION LIST

The list of publications is not strictly limited to publications made in 2021 and 2022 but includes also some publications outside this period, relating to publications of PhDs and post-docs described in the report.

1.1. ARTICLES DE JOURNAUX

[J-1] 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-2] Lesouple Julien, Pilastre Barbara, Altmann Yoann and Tourneret Jean-Yves, *Hypersphere Fitting from Noisy Data Using an EM Algorithm*, IEEE Signal Processing Letters, vol. 28, pp. 314-318, January, 2021.

[J-3] Alves de Oliveira Vinicius, Chabert Marie, Oberlin Thomas, Poulliat Charly, Bruno Mickael, Latry Christophe, Carlavan Mikael, Henrot Simon, Falzon Frédéric and Camarero Roberto, *Reduced-Complexity End-to-End Variational Autoencoder for on Board Satellite Image Compression*, Remote sensing, vol. 13, issue 3, Art. no 447, January, 2021.

[J-4] Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi, Poulliat Charly and Closas Pau, *GNSS Data Demodulation over Fading Environments: Antipodal and M-ary CSK Modulations*, IET Radar, Sonar & Navigation, vol. 15, issue 2, pp. 113-127, February, 2021.

[J-5] Ortega Espluga Lorenzo, Poulliat Charly, Boucheret Marie-Laure, Aubault-Roudier Marion, Al Bitar Hanaa and Closas Pau, *Low Complexity Robust Data Demodulation for GNSS*, MDPI Sensors, vol. 21, issue 4, Art. no 1341, February, 2021.

[J-6] Medina Daniel, Vilà-Valls Jordi, Chaumette Eric, Vincent François and Closas Pau, Cramér-Rao Bound for a Mixture of Real -and Integer -Valued Parameter Vectors and its Application to the Linear Regression Model, Signal Processing, vol. 179, Art. no 107792, February, 2021.

[J-7] Lubeigt Corentin, Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-*Valls Jordi, Lestarquit Laurent and Chaumette Eric, On the Impact and Mitigation of Signal Crosstalk in Ground-Based and Low Altitude Airborne GNSS-R*, Remote sensing, vol. 13, issue 6, Art. no 1085, March, 2021.

[J-8] Lacaze Bernard, *Random Propagation Times for Ultrasonics through Polethylene*, Ultrasonics, vol. 111, pp. 130-134, March 2021.

[J-9] Hourani Mohamad, Basarab Adrian, Kouamé Denis and Tourneret Jean-Yves, *Ultrasound Image Deconvolution Using Fundamental and Harmonic Images, IEEE Transactions on Ultrasonics*, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 68 (4), pp. 993-1006, April, 2021.

[J-10] Ortega Espluga Lorenzo and Poulliat Charly, *On Nested Property of Root-LDPC Codes*, IEEE Wireless Communications Letters, vol. 10, issue 5, pp. 1005-1009, May 2021.

[J-11] Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi and Chaumette Eric, *Insights on the Estimation Performance of GNSS-R Coherent and Noncoherent Processing Schemes*, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 19, Art no. 8012205, pp. 1-5, 2022.

[J-12] Martin Nadine, Mailhes Corinne and Laval Xavier, *Automated Machine Health Monitoring at an Expert Level*, Special issue of Acoustics Australia on Machine Condition Monitoring, vol. 49, pp. 185-197, June, 2021.

[J-13] León-López Kareth, Mouret Florian, Arguello Fuentes Henry and Tourneret Jean-Yves, *Anomaly Detection and Classification in Multispectral Time Series based on Hidden Markov Models*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 60, pp. 1-11, August, 2021.

[J-14] Lamothe François, Rachelson Emmanuel, Hait Alain, Baudoin Cédric and Dupé Jean-Baptiste, *Randomized rounding algorithms for large scale unsplittable flow problems*, Journal of Heuristics, vol. 27, pp. 1081-1110, September, 2021.

[J-15] Lesouple Julien, Baudoin Cédric, Spigai Marc and Tourneret Jean-Yves, *Generalized Isolation Forest for Anomaly Detection*, Pattern Recognition Letters, vol. 149, pp. 109-119, September, 2021.

[J-16] Cheng Cheng, Tourneret Jean-Yves and Lu Xiaodong, *A marginalised particle filter with variational inference for non-linear state-space models with Gaussian mixture noise*, IET Radar, Sonar and Navigation, vol. 16, issue 2, pp. 238-248, 2021.

[J-17] Lesouple Julien, Baudoin Cédric, Spigai Marc and Tourneret Jean-Yves, *How to Introduce Expert Feedback in One-Class Support Vector Machines for Anomaly Detection ?*, Signal Processing, vol. 188, Art. no 108197, November 2021.

[J-18] Cheng Cheng and Tourneret Jean-Yves, *A Variational Marginalized Particle Filter for Jump Markov Nonlinear Systems with Unknown Transition Probabilities*, Signal Processing, vol. 188, Art. no 108226, November 2021.

[J-19] Mailhes Corinne, Besson Olivier, Guillot Amandine and Le Gac Sophie, *Improving the Estimation of the Wavenumber Spectra From Altimeter Observations*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 60, pp. 1-10, Art no. 4201810, 2022.

1.1. JOURNAL PAPERS

[J-20] Alves de Oliveira Vinicius, Chabert Marie, Oberlin Thomas, Poulliat Charly, Bruno Mickael, Latry Christophe, Carlavan Mikael, Henrot Simon, Falzon Frédéric and Camarero Roberto, *Satellite Image Compression and Denoising With Neural Networks*, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 19, pp. 1-5, January, 2022.

[J-21] Lacaze Bernard and Fabre Serge, *Foldings of Periodic Nonuniform Samplings*, IEEE Transactions on Circuits and Systems II, vol. 69, issue 3, pp. 1862-1868, March 2022.

[J-22] Mouret Florian, Albughdadi Mohanad Y.S., Kouamé Denis, Rieu Guillaume and Tourneret Jean-Yves, Reconstruction of Sentinel-2 Derived Time Series Using Robust Gaussian Mixture Models — Application to the Detection of Anomalous Crop Development, Computers and Electronics in Agriculture, vol. 198, Art. no 106983, May, 2022.

[J-23] Leon Arencibia, Wendt Herwig, Tourneret Jean-Yves and Abry, *A Bayesian Framework for Multivariate Multifractal Analysis*, IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 70, pp. 3663 - 3675, June, 2022.

[J-24] Gigleux Benjamin, Vincent François and Chaumette Eric, *Generalized Frequency Estimator with Rational Combination of Three Spectrum Lines*, IET Radar Sonar Navigation, vol. 16, issue 7, pp.1107-1115, July, 2022.

[J-25] Blais Antoine, Couellan Nicolas and Evgenii Munin, *A novel image representation of GNSS correlation for deep learning multipath detection*, Array, vol. 14, Art. no 100167, July, 2022.

[J-26] Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi and Chaumette Eric, *Non-Binary PRN-Chirp Modulation: A GNSS Fast Acquisition Signal Waveform*, IEEE Communications Letters, vol. 26, Issue 9, pp. 2151-2155, September, 2022.

[J-27] Lubeigt Corentin, Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi, Lestarquit Laurent and Chaumette Eric, *Clean-to-Composite Bound Ratio: A Multipath Criterion for GNSS Signal Design and Analysis*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 58, issue 6, pp. 5412-5424, December, 2022.

[J-28] Jerbi Anouar, Amis Karine, Guilloud Frédéric and Benaddi Tarik, *Delay Optimization of Conventional Non-Coherent Differential CPM Detection*, IEEE Communications Letters, vol. 27, issue 1, pp. 234-238, January, 2023.

[J-29] Lubeigt Corentin, Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi and Chaumette Eric, *Untangling first and second order statistics contributions in multipath scenarios, Signal Processing*, vol. 205, Art. no 108868, April, 2023.

[J-30] Lubeigt Corentin, Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi and Chaumette Eric, *Band-limited impulse response estimation performance*, Signal Processing, vol. 208, Art. no 108998, July, 2023.

1.2. ARTICLES DE CONFÉRENCES

1.2. CONFERENCE PAPERS

[C-1] 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-2] Thibaud Adrien, Fasson Julien, Arnal Fabrice, Sallantin Renaud, Dubois Emmanuel and Chaput Emmanuel, *An analysis of NDN Congestion Control challenges*, In Proc. Hot Information-Centric Networking (HotICN), Chongqing, China, December 13-15, 2019.

[C-3] Verheyde Thomas, Blais Antoine, Macabiau Christophe and Marmet François-Xavier, *Analyzing Android GNSS Raw Measurements Flags Detection Mechanisms for Collaborative Positioning in Urban Environment*, In Proc. International Conference on Localization (ICL-GNSS), Tampere, Finland, June 2-4, 2020.

[C-4] Thibaud Adrien, Fasson Julien, *Arnal Fabrice, Sallantin Renaud, Dubois Emmanuel and Chaput Emmanuel, Cooperative Congestion Control in NDN*, In Proc. IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC), Dublin, Ireland, June 7-11, 2020.

[C-5] Demoulin Quentin, Lefebvre-Albaret François, Basarab Adrian, Kouamé Denis and Tourneret Jean-Yves, *A New Flexible Photogrammetry Instrumentation for Estimating Wing Deformation in Airbus*, In Proc. European Test and Telemetry Conference (ETTC), Nuremberg, Germany, June 23-25, 2020.

[C-6] Boubaker Amal, Chaput Emmanuel, Kuhn Nicolas, Dupé Jean-Baptiste, Sallantin Renaud, Baudoin Cédric and Beylot André-Luc, *On the Impact of Intrinsic Delay Variation Sources on Iridium LEO Constellation*, In Proc. Wireless and Satellite Systems (WiSATS), Nanjing City, China, September 17-18, 2020.

[C-7] Alves de Oliveira Vinicius, Oberlin Thomas, Chabert Marie, Poulliat Charly, Bruno Mickael, Latry Christophe, Carlavan Mikael, Henrot Simon, Falzon Frédéric and Camarero Roberto, *Simplified Entropy Model for Reduced-Complexity End-to-End Variational Autoencoder with Application to On-Board Satellite Image Compression*, In Proc. 7th International Workshop on On-Board Payload Data Compression (OBPDC), Online Event, September 21-23, 2020.

[C-8] Thibaud Adrien, Fasson Julien, Arnal Fabrice, Sallantin Renaud, Dubois Emmanuel and Chaput Emmanuel, *Cooperative Congestion Control dans NDN*, In Proc. 5ème Rencontres Francophones sur la Conception de Protocoles, l'Evaluation de Performance et l'Expérimentation des Réseaux de Communication (CoRes), Lyon, France, September 28 - October 2, 2020.

[C-9] Demoulin Quentin, Lefebvre-Albaret François, Basarab Adrian, Kouamé Denis and Tourneret Jean-Yves, *Constrained Bundle Adjustment Applied to Wing 3D Reconstruction with Mechanical Limitations*, In Proc. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Abu Dhabi, United Arab Emirates, October 25-28, 2020.

[C-10] Thibaud Adrien, Fasson Julien, Arnal Fabrice, Sallantin Renaud, Dubois Emmanuel and Chaput Emmanuel, *Reactivity Enhancement of Cooperative Congestion Control for Satellite Networks*, In Proc. Hot Information-Centric Networking (HotICN), Hefei, Anhui, China, December 12-14, 2020.

[C-11] Lesouple Julien and Tourneret Jean-Yves, *Incorporating User Feedback Into One-Class Support Vector Machines for Anomaly Detection*, In Proc. 28th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Amsterdam, Netherlands, January 18-22, 2021.

[C-12] Demoulin Quentin, Lefebvre-Albaret François, Basarab Adrian, Kouamé Denis and Tourneret Jean-Yves, *Wing 3D Reconstruction by Constraining the Bundle Adjustment with Mechanical Limitations*, In Proc. 28th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Amsterdam, Netherlands, January 18-22, 2021.

[C-13] Lambert Pierre-Baptiste, Pilastre Barbara, Tourneret Jean-Yves, Boussouf Loïc, d'Escrivan Stéphane and Delande Pauline, *Multivariate Anomaly Detection in Discrete and Continuous Telemetry Signals Using a Sparse Decomposition Into a Dictionary*, Proc. of Space Operations (SpaceOps), Cape Town, South Africa, May 3-5, 2021.

[C-14] Verheyde Thomas, Blais Antoine, Macabiau Christophe and Marmet François-Xavier, *SmartCoop Algorithm : Improving Smartphone Position Accuracy and Reliability via Collaborative Positioning*, In Proc. International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS), Tampere, Finland, June 1-3, 2021.

[C-15] Lesouple Julien, Pilastre Barbara, Altmann Yoann and Tourneret Jean-Yves, *Robust Hypersphere Fitting from Noisy Data Using an EM Algorithm*, In Proc. European Conference on Signal Processing (EUSIPCO), Dublin, Ireland, August 23-27, 2021.

[C-16] Lubeigt Corentin, Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi, Lestarquit Laurent and Chaumette Eric, *Multipath Estimating Techniques Performance Analysis*, In Proc. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, March 5-12, 2022.

[C-17] Lestarquit Laurent, Dulery Christelle, Prévost Raoul and Iervolino Mariano, Mitigation of TACAN/DME interferences for L5/E5 space-borne GNSS receivers in LEO. First Simulation results with focus on Radio-Occultation missions, NAVITEC, ESA/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, April 5-7, 2022.

[C-18] Lubeigt Corentin, Vincent François, Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi, Lestarquit Laurent and Chaumette Eric, *Close-to-Ground Single Antenna GNSS-R*, In Proc. ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), Online Event, 5-7 april 2022.

[C-19] Perrier Victor, Lochin Emmanuel, Tourneret Jean-Yves, Kuhn Nicolas and Gélard Patrick, *How Attention Deep Learning Can Improve Copa Congestion Control Performance*, In Proc. International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Dubrovnik, Croatia, May 30-June 3, 2022.

[C-20] Perrier Victor, Lochin Emmanuel, Tourneret Jean-Yves and Gélard Patrick, *Attention Networks for Time Series Regression and Application to Congestion Control*, In Proc. 4th International Workshop on Network Intelligence (IFIP Networking), Catania, Italy, June 13-16, 2022.

[C-21] Lesouple Julien, Burger and Tourneret Jean-Yves, An *EM Algorithm for Mixtures of Hyperspheres*, 30th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2022), Belgrade, Serbia, August, 2022.

[C-22] Lesouple Julien, Pilastre Barbara, Altmann Yoann and Tourneret Jean-Yves, *Estimation du centre et du rayon d'une hypersphère à l'aide d'une loi a priori de Von Mises-Fisher et d'un algorithme EM*, In Proc. XXVIII ème Colloque Francophone de Traitement du Signal et des Images (GRETSI 2022), Nancy, France, September, 2022.

[C-23] Jerbi Anouar, Amis Karine, Guilloud Frédéric and Benaddi Tarik, *Détection Non-cohérente des Modulations CPM en Présence d'un Décalage Doppler.*, In Proc. Groupement de Recherche en Traitement du Signal et des Images (GRETSI), Nancy, France, September 6-9, 2022.

[C-24] Lubeigt Corentin, Vilà-Valls Jordi, Lestarquit Laurent and Chaumette Eric, *Les Signaux à Bande Large au Service de la Réflectométrie par GNSS à Site Bas*, In Proc. Groupe de Recherche et d'Etudes de Traitement du Signal et des Images (GRETSI), Nancy, France, September 5-9, 2022.

[C-25] Perrier Victor, Lochin Emmanuel, Tourneret Jean-Yves and Gélard Patrick, *Réseaux récurrents d'attention pour la régression de séries temporelles*, In Proc. Groupe de Recherche et d'Etudes de Traitement du Signal et des Images (GRETSI), Nancy, France, September 5-9, 2022.

[C-26] Jerbi Anouar, Guilloud Frédéric, Amis Karine and Benaddi Tarik, *Non-coherent CPM Detection under Gaussian Channel affected with Doppler Shift*, In Proc. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Virtual, September 12-15, 2022.

[C-27] Ortega Espluga Lorenzo, Vilà-Valls Jordi and Chaumette Eric, *Theoretical Evaluation of the GNSS Synchronization Performance Degradation under Interferences*, In Proc. 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022), Denver, Colorado, USA, September 19-23, 2022.

[C-28] Sombrin Jacques, *Caractère fractal des non-linéarités passives et croissance suivant une pente non-entière de la puissance des produits d'intermodulation*, In Proc. XXIIèmes Journées Nationales Microondes (JNM), Limoges, France, June 7-10, 2022.

[C-29] Sombrin Jacques, *Effective AM/AM and AM/PM curves derived from EVM simulations on constellations*, In Proc. 99th ARFTG Microwave Measurement Conference, Denver, Colorado, USA, June 24th, 2022.

[C-30] Zamoum Selma, Husson Thomas, Kébé Fatoumata, Barthélémy Mathieu, Gigleux Benjamin, Sombrin Jacques and Durand-Carrier Franck, *A Complete SSA Scheme for a Sustainable Low Earth Orbit: Space DATA Aggregation and AI Combined with In Orbit Inspection*, In Proc. Advanced Maui Optical ans Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, Hawaï, USA, September 27-30, 2022.

1.3. BREVETS

1.3. PATENTS

[B-1] Marmet François-Xavier, Robert Thierry, Michel Patrice and Jardak Nabil, *Procédé de réduction des erreurs liées aux multi-trajets d'un signal acquis bruité*, n° FR3101710 A1, April 9, 2021.

1.4. THÈSES DE DOCTORAT

[T-1] Tran N'Guyen Hoang Alexandre, *Routeur embarqué pour les communications critiques aéronautiques en environnement multi liens*, PhD Thesis, Defended on January 20, 2021.

[T-2] Tobie Anne-Marie, *Hybridation GNSS/5G pour la navigation en milieu urbain,* PhD Thesis, Defended on February 25, 2021.

[T-3] Demoulin Quentin, *Systèmes et Algorithmes de Traitement d'Images pour l'Estimation de Déformées de Structures d'Avion en Vol*, PhD Thesis, Defended on April 30, 2021.

[T-4] Thibaud Adrien, *Répartition de flux dans les réseaux de contenu, application à un contexte satellite.*, PhD Thesis, Defended on September 2, 2021.

[T-5] Lamothe François, *Le problème de flot insécable: application à la gestion des communications d'une constellation de satellites*, PhD Thesis, Defended on November 29, 2021.

[T-6] Boubaker Amal, *Performances des Protocoles de Transport dans les Constellations de Satellites*, PhD Thesis, Defended on May 4, 2022.

[T-7] Alves de Oliveira Vinicius, *Apprentissage profond pour la compression embarquée d'images d'observation de la Terre*, PhD Thesis, Defended on October 21, 2022.

[T-8] Verheyde Thomas, *Precise Cooperative Positioning of Low-Cost Mobiles in an Urban Environment*, PhD Thesis, Defended on February 10, 2023.

[T-9] Lubeigt Corentin, *Signal Processing for GNSS Reflectometry*, PhD Thesis, Defended on February 14, 2023.

[T-10] Anouar Jerbi, *Accès radio pour les réseaux de capteurs par satellite (SAT-IOT)*, PhD Thesis, Defended on March 14, 2023.

[T-11] Victor Perrier, LEO/GEO congestion control mechanism based on the contribution of artificial intelligence., PhD Thesis, Defended on March 16, 2023.

1.4. PHD THESES

2. LISTE DES ÉTUDES

[E-1] Observatoire des signaux GNSS sur 2018-2021, CNES-SILICOM.

[E-2] R-S19/BS-0005-049 - Définition d'un référentiel spatio-temporel autonome dans une constellation de satellites, CNES.

[E-3] R-S18/LN-0003-031 - Méthodes de réduction des interférences TACAN / DME pour des récepteurs GNSS spatiaux, CNES-AGENIUM.

[E-4] R-S20/OT-0001-151 - Etalonnage et restauration d'images par méthode stochastique, CNES.

[E-5] R-S20-LN-0002-061 - Optimisation et comparaison des solutions cepstre - ondelettes pour les multi-trajets en GNSS, CNES.

[E-6] R-S21/OT-0002-102 - Algorithmes d'estimation en vol d'ISRF spectralement variables, CNES.

[E-7] R&T R-S21/BS-0003-076 - Transfer Learning appliqué au monitoring de télémesure satellites, CNES.

[E-8] Localisation relative via EDM, CNES.

[E-9] RS21/LN-0002-064 - Amélioration des techniques de localisation Doppler Argos / Kinéis, CNES - KINEIS.

[E-10] Outils d'exploitation de données de réflectométrie GNSS, CNES-SILICOM.

[E-11] Détection RFI sur spectrogrammes, CNES.

[E-12] R-S19 TC-0005-105 - Utilisation de la mesure EVM et de mesures semblables pour le diagnostic d'équipements et des CU intégrées, CNES-TAS.

[E-13] RS20-RE-0002-037 - Etude des méthodes de démodulation des signaux AIS , CNES.

[E-14] Harmonisation ESA - Power RF measurements, CNES.

[E-15] R-S18/TC-0007-065 - Multipactor et PIM sur dispositifs passifs, CNES-COBHAM.

[E-16] RT - Blockchain for Space Object, CNES.

[E-17] Convergence Broadcast Multicast, CNES.

[E-18] E-next Authentifcation feasibility study, TAS.

[E-19] Simulateur de radar embarqué sur CubeSat, SpaceAble.

[E-20] Expertise Systèmes Satellitaires, SpaceAble.

[E-21] Détection d'anomalies appliquée au TLEs, SpaceAble.

[E-22] TéSA-IA, étude interne TéSA.

[E-23] Analyse du potentiel des systèmes de contrôle d'accès véhicule UWB en termes de détection de gestes, VITESCO.

[E-24] Détection d'objets dans des images de recyclage avec l'algorithme YOLO, PAPREC.

[E-25] ELLIOT, IRT St Exupery.

2. RESEARCH STUDY LIST

Merci à tous ceux qui ont contribué
Thanks to all contributors
Evelyne Akopyan, Cédric Baudoin, Antoine Blais, Eric Chaumette, Riadh Dhaou, Clément Dudal, Corinne Mailhes, Lorenzo Ortega, Philippe Paimblanc, Clémence Pierangelo, Raoul Prévost, Jacques Sombrin, Jean-Yves Tourneret.

Traduction
Translation
Coup de Puce Expansion coupdepuce.com

Conception et réalisation
Design and pre-press
Cécile Spadotto www.creatricegraphique.fr

Copyright des illustrations
Illustration copyright
CNES : pp. 3, 10, 18, 26, 37, 46, 65, 68, 69 et 70.
TéSA : pp. 17, 21, 23, 24, 27, 30, 31, 32, 33, 36, 40, 41, 42, 45, 48, 49, 53, 54, 55, 62, 63, 64 et 71.

RAPPORT D'ACTIVITÉ 2021-2022

ACTIVITY REPORT 2021-2022

www.tesa.prd.fr

TéSA

cnes CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES

ThalesAlenia Space a Thales / Leonardo company

Collins Aerospace A United Technologies Company

TOULOUSE INP

Isae SUPAERO Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace

IPSA ÉCOLE D'INGÉNIEURS DE L'AIR, DE L'ESPACE ET DE LA MOBILITÉ DURABLE

ENAC

IMT Atlantique Bretagne-Pays de la Loire École Mines-Télécom