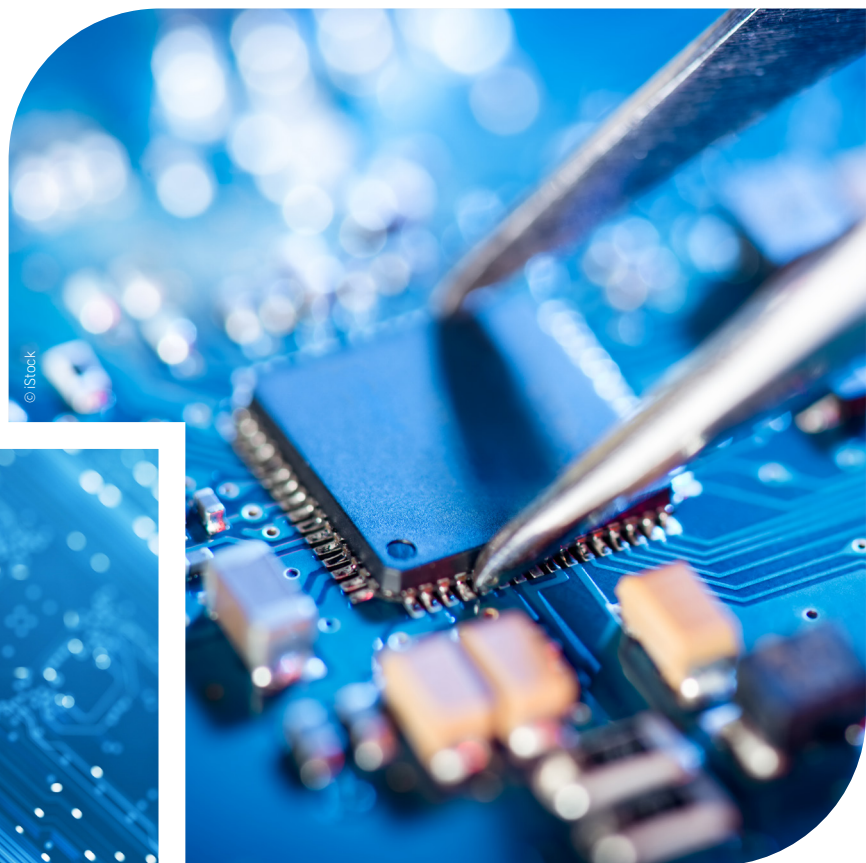


FEUILLES DE ROUTE TECHNIQUES DU CNES

COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES

PERFORMANCE ET FIABILITÉ AU SERVICE DE L'EXCELLENCE DE L'ÉCOSYSTÈME



AOÛT '24

Le contexte

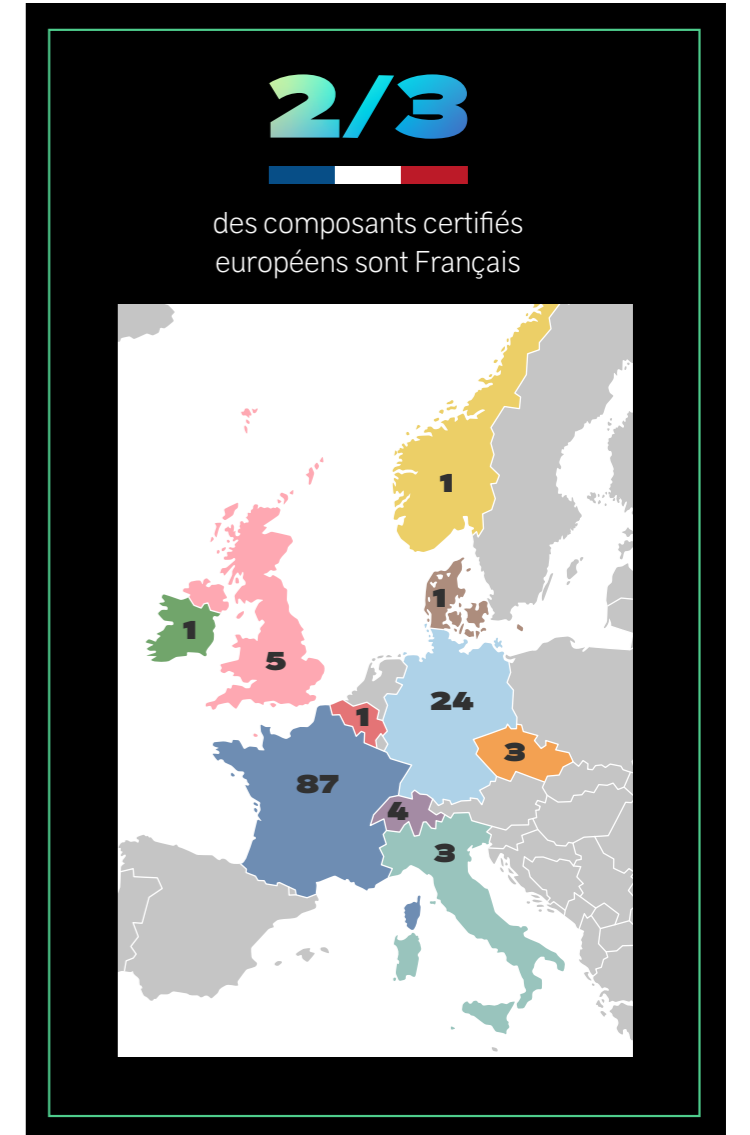
Dans un marché mondial très concurrentiel et à l'évolution rapide, la **compétitivité et la souveraineté de l'industrie spatiale européenne** requièrent une capacité de proposition de systèmes performants et à coût maîtrisé. Cet objectif ne peut être tenu que par **l'utilisation de composants EEE** (Électriques, Électroniques et Électromécaniques) « état de l'art ». Plus généralement, la performance et les coûts des systèmes spatiaux (lanceurs, satellites de Télécommunications, d'Observation, pour la Science ou la Défense) dépendent directement de la maîtrise des filières composants (performance, fiabilité, coût, délai, pérennité), et nos besoins stratégiques vers plus de performance requièrent des percées qui s'appuient sur des **produits spécifiques** que les marchés de masse ne soutiendront pas.

Le développement de ces composants s'appuie sur le savoir-faire des acteurs du domaine spatial en synergie avec les fabricants de composants à usage terrestre pour obtenir des produits spatiaux fiables, à coût maîtrisé, et avec la réactivité nécessaire. Le spatial bénéficie ainsi des composants développés pour les applications grand public et militaires, avec des acteurs français et européens de premier plan, soutenus par des investissements publics à la hauteur des enjeux.

Pour disposer de composants embarquables sur les satellites, il est cependant nécessaire de mener des activités spécifiques au domaine Spatial : adaptation à l'environnement (durcissement vis-à-vis des radiations), développement, évaluation et qualification spatiale.

Depuis sa création, le CNES, à travers des supports ciblés et soutenus dans la durée, a œuvré à garantir des chaînes d'approvisionnement viables, pérennes et sécurisées.

La chaîne de la valeur de la filière des composants spatiaux française est riche : elle comporte les fabricants de composants mais aussi les laboratoires et instituts de recherche, les PME aux savoir-faire propres (tests radiations, test fiabilité, report de composants sur PCB...) et bien entendu les grands maîtres d'œuvre satellites ADS et TAS ainsi que les équipementiers du spatial et les nouveaux entrants qui ont un double rôle en tant qu'utilisateurs finaux : celui de spécifier puis de valider les développements.



Dans plusieurs domaines, **les acteurs majeurs et leaders européens des composants spatiaux sont situés en France** : les sociétés NanoXPlore & STMicroelectronics (produits FPGA, ASICs, Circuits intégrés), Teledyne-e2V (Convertisseurs large bande), Microchip (Microprocesseurs), UMS (MMIC), Radiall (passifs), 3DPlus, Synergie-CAD, SERMA (packaging)... De nouveaux entrants souhaitent également proposer des composants pour le spatial.

En un coup d'œil

AXES TECHNIQUES

- Silicium
- RF
- Photonique
- PCB & Technologies d'assemblage
- Passifs
- Radiations

LES MOYENS

- R&T, RCS Composants Stratégiques
- Projets CNES
- France : PRE
- ESA : ARTES, GSTP, EEE Components Sovereignty
- CE : Horizon Europe

ACTIVITÉS

- Prospective et Évaluation de nouveaux Composants et Technologies
- Étude des effets des radiations sur les composants
- Développement, Evaluation et Mise sur le marché de composants et technologies stratégiques
- Expertise technologique

UNE FORTE COORDINATION

- Au niveau européen
 - European Space
 - Component Coordination



- Components and Technology Board



- Au niveau français
 - Multipartenariat CNES-Industries
 - DGA
 - COSPACE
 - Les directions Techniques, Projets et de la Stratégie du CNES



- Au niveau international
 - JAXA

Les enjeux

Les enjeux portent sur la **compétitivité**, la **souveraineté** et la **performance** au bénéfice de l'écosystème.

Les spécificités des composants pour le spatial sont liées à l'environnement spatial : il est nécessaire d'avoir des composants fiables et qui tiennent les radiations puisque la maintenance n'existe pas à bord !

Les volumes des composants spatiaux sont très faibles comparés à ceux du grand public ou de l'automobile et il faut donc porter une attention forte à la pérennité des chaînes d'approvisionnement. Pour cela, les ingénieurs du CNES DNT/QE en charge de la Qualité & Expertise, mènent des audits, réalisent un suivi régulier de ses fabricants qualifiés et établissent des qualifications (Agréments de Savoir-Faire et Qualification ESCC).

Actuellement, un changement de paysage technologique est en train de s'opérer. Pour des tailles de nœuds technologiques supérieures ou égales à 28nm, la disponibilité de la technologie était assurée sur le sol français par STMicroelectronics. Actuellement les fonderies des technologies silicium UDSM les plus avancées (nœuds technologiques 16 nm, 7 nm et en-dessous) sont toutes à l'étranger (principalement Taiwan). TSMC, le plus grand fondeur au monde, travaille sur le développement de puces à mille milliards de transistors et sur la fabrication de puces à 1 nm afin de répondre à la course à la performance.

Le risque de dépendance de l'Europe à des fournisseurs non européens est réel. Il est adressé au niveau politique par l'Europe, au travers du « **European Chips Act** », et par la France qui soutient de nouvelles capacités de production chez STMicroelectronics jusqu'au nœud 18 nm d'ici 2026.

Cependant, pour rester compétitif, à court et moyen termes, les technologies non européennes sont transitoirement incontournables pour les produits numériques complexes (FPGA, ASIC...), ce qui appelle une attention particulière pour protéger le savoir-faire (conception française/européenne) et pour sécuriser la chaîne d'approvisionnement. La **nouvelle approche chiplet*** assure une souveraineté progressive en maintenant nos savoir-faire de conception, durcissement, industrialisation, test et qualification. C'est l'enjeu des activités UDSM qui viennent d'être lancées par le CNES mi 2024 et coordonnées avec l'ESA et la CE.

*Un chiplet est un petit circuit intégré, conçu pour remplir une fonction spécifique dans un système électronique. Il permet de diviser un grand circuit intégré en plusieurs blocs fonctionnels plus petits. Cette approche modulaire facilite la conception, la fabrication et la réparation des systèmes électroniques complexes. Les chiplets peuvent être assemblés sur un substrat commun pour former un circuit intégré plus grand et plus performant. Chaque brique peut aussi être réutilisée dans le développement d'une autre fonction spécifique, réduisant ainsi les coûts de production pour de futurs produits.

Laboratoire d'expertise du CNES

Le Laboratoire d'Expertise (LE) gère une plateforme de moyens unique en France : ITEC-Lab qui comprend 600 moyens d'essais dont une trentaine de très gros moyens, sur une surface de 1200 m². Les moyens sont opérés par l'équipe CNES ainsi que par les équipes de nos trois partenaires industriels (THALES SIXT GTS, ELEMCA et INTRASPEC). Les domaines d'intervention et les techniques d'analyse sont très variés afin de répondre à tout type de sollicitations.

Au niveau des composants, les moyens portent sur l'analyse électrique et l'analyse technologique. La caractérisation des technologies et la localisation des défauts, en particulier sur les nouvelles technologies UDSM et l'étude de leur tenue à l'environnement spatial (Fiabilité, Qualité, Radiation, ON-OFF, Sécurité, ...) sont les enjeux actuels.

L'offre de service proposée par nos partenaires industriels permet d'amplifier grandement l'action du laboratoire au service de tout l'écosystème, bien au-delà du seul domaine spatial.

Le Laboratoire R2D2 (Radiation Reliability, Detection and Devices test – voir la feuille de route technique « Environnement radiatif spatial ») permet de développer et tester des prototypes d'instruments dédiés à l'étude de l'environnement radiatif (spectrométrie, dosimétrie, nouveaux détecteurs de particules). Il est également équipé pour préparer les essais d'environnement de composants ou de matériaux sensibles aux rayonnements ionisants.

Plusieurs activités peuvent se dérouler en parallèle dans des espaces spécifiques configurés selon le besoin : radiation, optique, câblage ou mesures. Il bénéficie aussi d'une enceinte d'irradiation dédiée à la caractérisation de détecteurs de rayonnements ionisants et à la préparation des bancs de tests radiations. Une partie du laboratoire R2D2 est situé hors des murs du CNES : Nous utilisons des accélérateurs de particules et des sources radioactives pour caractériser la réponse aux radiations des composants.



1200 m²



Les expertises et tests interviennent dans toutes les phases de projets, des phases très amonts de R&T, Développement et Evaluation de composants, aux Anomalies rencontrées pendant les développements ou même lors de l'exploitation des systèmes (on cherche alors à comprendre/reproduire les anomalies sur des modèles mimétiques disponibles). La réactivité, l'étendue des moyens et la compétence des intervenants constituent des atouts uniques et extrêmement précieux lors du traitement de ces anomalies.



Exemple de moyen à l'état de l'art de nos laboratoires : A gauche - préparation des détecteurs de radiation (R2D2 lab), à droite - Le FIB-Edit 'Centrios'(lab LE) qui permet la réparation de circuits intégrés à des échelles inférieures au micromètre.

Lumière sur le métier de l'Expert Composants

L'expert Composants et Technologie a le goût pour la technologie et l'innovation dans le domaine de l'électronique.

Il s'intéresse aux technologies émergentes en menant des études de prospective et de pré-évaluation vis-à-vis de la tenue en environnement spatial : qualité, fiabilité, radiation...

Il collecte les besoins de l'écosystème notamment dans le cadre du groupe Multipartenariat CNES-Industries, des COMET et du CTB au niveau européen et est force de proposition pour définir les activités à mener (feuilles de route techniques) et coordonne les différentes activités.

Il est le référent technique pour le spatial en France et est garant du bon déroulé des développements de composants spatiaux, en apportant son expertise lors des phases de revue de spécification, conception, test et qualification.

Le CNES, en tant qu'agence nationale, est responsable de la qualification des industriels français pour le compte de l'ESA. A ce titre l'expert composants du CNES mène des audits et assure un suivi régulier des fabricants pour garantir la viabilité et la qualité des chaînes d'approvisionnement.

Grâce à son expertise, il apporte un support aux projets du CNES en assurant la qualité des composants et technologies utilisées.

Pour valoriser nos activités et promouvoir nos développements, les experts Composants ont un fort rayonnement notamment au travers de publications et de présentations dans les colloques internationaux (ESREF, ISTFA, RADECS, NSREC...) et européens (ESCCON, SPCD, ...) et au travers de notre collaboration avec la JAXA.



Visite de ligne d'assemblage de composants par les experts Composants du CNES

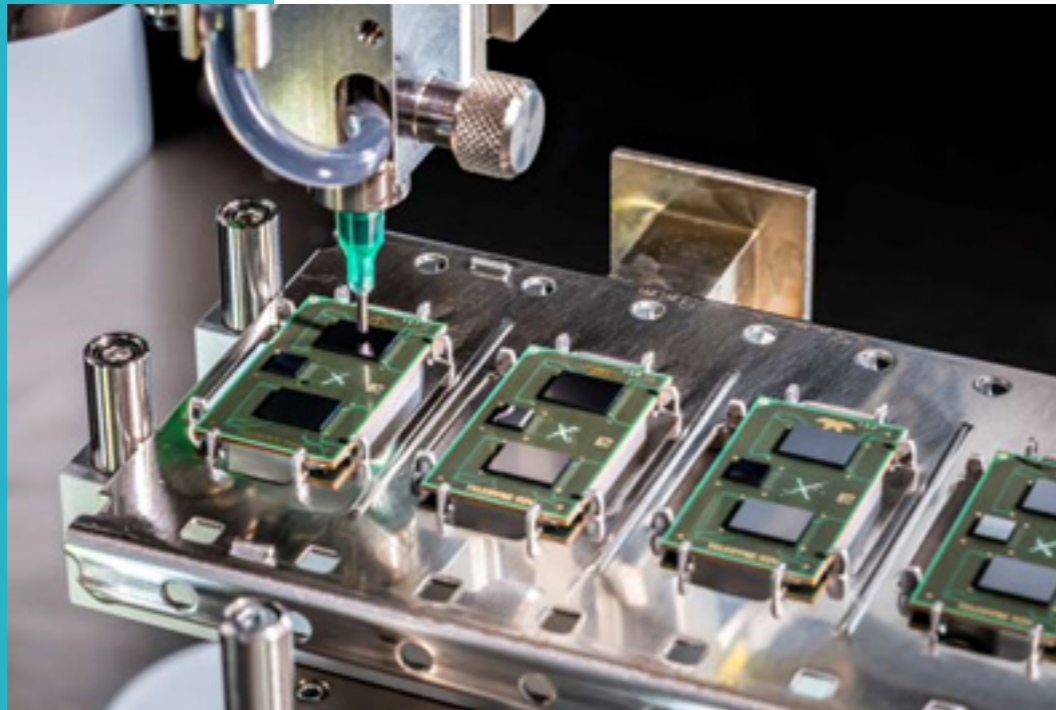
Axes techniques

Les enjeux de compétitivité et de souveraineté portent en priorité sur les technologies critiques :

Technologie UDSM pour ASIC, FPGA rad-hard, Microprocesseurs, Convertisseurs, Technologie RF GaN, GaN de puissance, Photonique, Circuits imprimés PCB et Assemblage et Moyens d'irradiations.

Pour ces composants clés, des activités de conception, durcissement et qualification sont menées et encadrées par les équipes du CNES pour offrir des composants rad-hard et qualifiés pour le spatial.

Pour répondre à la demande croissante des nouveaux entrants d'utiliser des composants commerciaux COTS ou de faible coût, de nombreuses évaluations radiations sont menées.



Fabrication de System-In-Package SIP par Teledyne-E2V
© Teledyne

Silicium

- Technologie avancée UDSM pour ASIC → Ces technologies numériques sont destinées aux fonctions nécessitant de grandes capacités de calcul et de traitement (On-Board Processeur, On-Board Calculator).
- FPGA en technologie 28nm et 7nm → Les FPGA, composants critiques, sont utilisés dans de nombreuses applications grâce à leurs capacités de flexibilité et de reconfigurabilité (OBC, Charge utile, Plateforme ...).
- Microprocesseurs, Microcontrôleurs, Mémoires, Circuits intégrés pour toute fonction électronique.
- Convertisseurs de données large bande et haute fréquence notamment pour les applications de Télécommunications et d'Altimétrie.
- Composants de puissance et technologie grand gap (SiC, GaN) utilisés pour les applications de puissance (convertisseur DC/DC) → Ces composants permettent de miniaturiser ces fonctions et d'obtenir de plus fort rendement

RF

- L'utilisation de composants RF GaN est nécessaire pour améliorer l'efficacité et les performances des amplificateurs de puissance pour les applications de communication. Les technologie GaN pour les bandes Ka à W, sont en cours de développement.

Photonique

- Les communications laser et l'observation par laser sont les moteurs du marché de la photonique spatiale. Les détecteurs et les principaux composants utilisés pour la communication laser, tels que les émetteurs-récepteurs optiques, les terminaux de communication optique et la fibre sont les fonctions attendues. Les télécommunications optiques prennent de plus en plus de place dans le paysage d'aujourd'hui.

Cellules solaires

- Les cellules solaires sont essentielles pour l'alimentation des satellites et les défis à relever sont l'amélioration de leur efficacité, la réduction de leur masse et de leur coût. Le potentiel des nouveaux matériaux est à l'étude, permettant ainsi de développer une nouvelle filière issue de l'innovation de nos laboratoires français.

PCB & Technologie d'assemblage

- Ces technologies doivent évoluer pour suivre les évolutions des composants complexes. Les efforts portent sur l'amélioration des densités et de la complexité d'interconnexions, du routage, de la montée en fréquence, de la dissipation thermique des PCB et les technologies d'assemblage. La pénurie de fournisseurs de PCB et de substrats organiques en Europe est une vraie problématique et une réflexion est également en cours pour pallier ce manque. Les assemblages « System-In-Package », c'est-à-dire assemblage hétérogène de plusieurs puces sont nécessaires notamment pour l'approche Chiplet mais aussi pour d'autres fonctions (Hyperfréquences, Puissance ...).

Passif

- Les composants passifs* représentent environ 80% des composants EEE utilisés dans un satellite. Les axes de travail portent sur la miniaturisation, la performance et la réduction des coûts.

*Un composant est dit passif lorsqu'il ne permet pas d'augmenter la puissance d'un signal

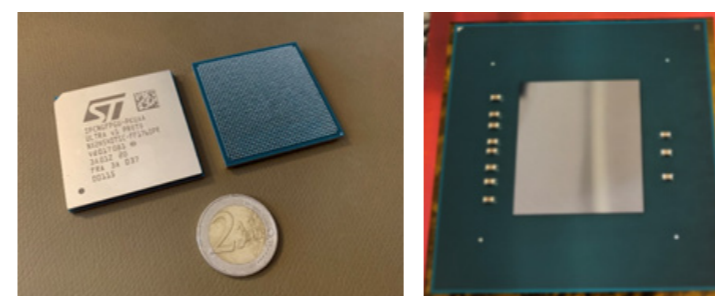
Radiation

- Moyens d'essais d'irradiations ions lourds, protons et neutrons : Les installations de tests d'irradiations sont un élément important de l'infrastructure de la chaîne d'approvisionnement. Leur disponibilité peut fortement influencer sur le délai de mise sur le marché, car elles permettent la fourniture de composants EEE qualifiés pour l'usage spatial. Aujourd'hui le monde manque de ce type d'infrastructure, il est donc essentiel pour la souveraineté Européenne de développer de nouveaux moyens. En France, des instituts comme le GANIL, le centre Antoine Lacassagne, ou l'IPN d'Orsay font l'objet d'attention toutes particulières.
- Étude des effets sur les composants → voir la feuille de route technique « Environnement radiatif spatial »

Travaux en cours et perspectives

Plus d'une trentaine d'actions de R&T et RCS en cours entre le CNES et ses partenaires industriels concernent les composants. Elles couvrent principalement les thèmes suivants : Prospective, Evaluation de nouveaux composants, technologies et effets associés, Développement, Qualification et Mise sur le marché de composants stratégiques français.

Principaux faits marquants du plan RCS 2024



FPGA NG-ULTRA de NanoXplore assemblé par STMicroelectronics. De gauche à droite : composant vue de dessus, dessous et vue de la puce © STMicroelectronics

- La mise en place de la technologie d'assemblage Flip Chip organique sur le site STMicroelectronics de Rennes (site spécialisé produits spatiaux) pour la fabrication du FPGA NG-ULTRA de NanoXplore. Cette étude a permis à STMicroelectronics de qualifier la ligne d'assemblage et de fournir les 1^{er} MV du NG-ULTRA au projet Space Inspire.

- Le développement d'une supply chain pour l'encapsulation plastique QFN de circuits RF GaN et la validation de son utilisation pour les applications spatiales. Ces travaux contribuent à étendre l'offre et la compétitivité des technologies de la société UMS en permettant aux utilisateurs de proposer des solutions non hermétiques pour les prochaines générations de SSPA à base de GaN.



MMIC de UMS assemblé en boîtier QFN © UMS

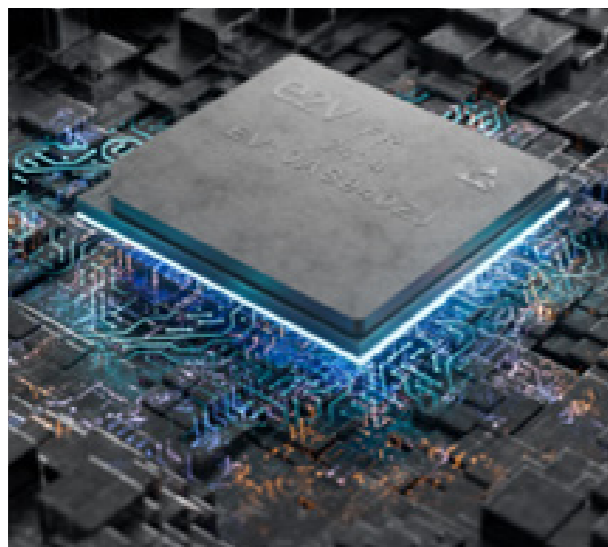
- L'évaluation sous environnements radiatifs & thermomécaniques de l'oscillateur à quartz OCXO nanOSTAR-SP de la société AR-Electronique qui s'est déroulée avec succès ; les OCXO sont prêts pour être embarqués. Les oscillateurs sont en sorte des "gardiens de temps" nécessaires aux applications de hautes précisions et stabilité temporelles et fréquentielles : navigation spatiale, télécommunications, radar, etc.



OCXO nanOSTAR-SP de AR-Electronique © AR-Electronique

Orientations techniques en 2024 et 2025 du plan RCS Composants Stratégiques

- Le développement du FPGA durci de nouvelle génération ULTRA7 de NanoXplore en technologie UDSM 7nm FinFET
- Le développement du FPGA durci ULTRA300 en 28nm chez STMicroelectronics Rennes et la mise à disposition d'échantillons mécaniques routés (daisy-chain) pour les essais de validation de report par les partenaires
- La conception et la validation du module processeur QLX2160 et mémoires DDR4-16GB de la société Teledyne-E2V.
- La qualification du microcontrôleur PIC32CZ à base de processeur ARM en version tolérante aux radiations de la société Microchip
- Le développement de convertisseur analogique/numérique en bande Ka et numérique/analogique en bande C de Teledyne-E2V
- Le développement et durcissement de diode schottky durci aux radiations en technologie SiC de la société STMicroelectronics
- La création d'une offre de service de COTS qualifiés en radiation, notamment pour répondre aux besoins des acteurs du NewSpace.



Carte d'évaluation du convertisseur analogique/numérique EV10AS940 de Teledyne-E2V
© Teledyne



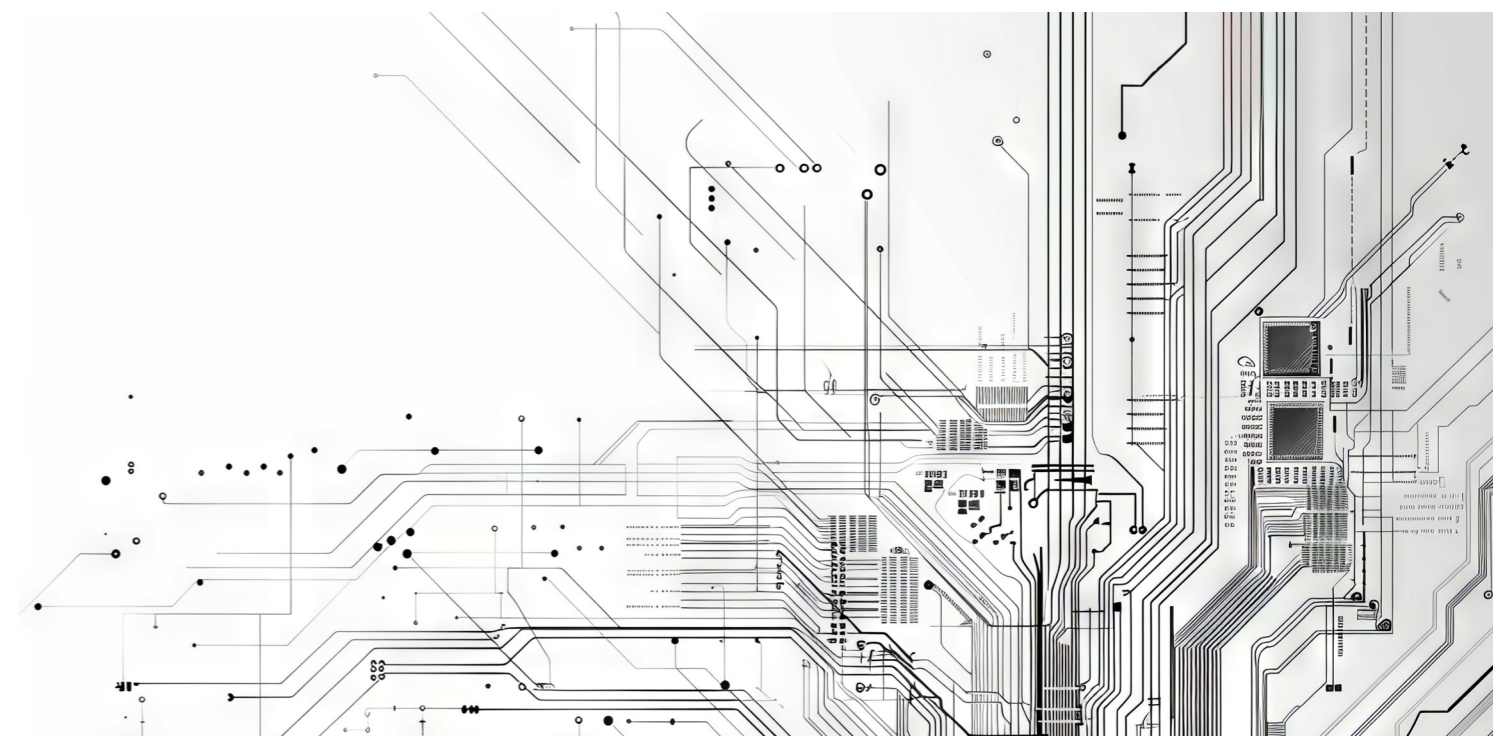
Travaux actuels dans le cadre de la R&T

- La technologie power GaN FET normally ON et normally OFF. L'objectif de cette étude vise à caractériser cette nouvelle technologie utilisant un process de réalisation du contact de grille différent des autres acteurs du domaine, dans un environnement spatial
- Le développement d'alternatives à l'usage du plomb dans les composants avec 2 études : l'évaluation de diverses alternatives de billes en remplacement des billes SnPb utilisées dans les interconnexions BGA, dans le but d'améliorer de manière significative la fiabilité du report sur carte et l'évaluation de nouvelles brasures sans plomb basse température

Contributions au travers du programme GSTP « EEE Space Component Sovereignty for Europe » de l'ESA

- Projet S²CANT avec le développement de technologies RF GaN pour améliorer les rendements en puissance et la montée en fréquence des filières GaN
- Projet UDSM avec le développement des briques de bases en technologie UDSM 7nm FinFET pour ASIC et FPGA durcis de nouvelles générations

L'ensemble des actions RCS et R&T sont publiés dans les Livres Bleus du CNES.



ACRONYMES

ARM : Advanced RISC Machines est une Architecture de microprocesseur

ARTES : Advanced Research in Telecommunications Systems

ASIC : Application Specific Integrated Circuits

BGA : Ball Grid Array est une matrice de billes pour un type de boîtier en montage en surface

CE : Commission Européenne

COTS : Components On The Shelf

CTB : Components Technology Board

DGA : Direction Générale de l'Armement

Diode Schottky : (nommée d'après le physicien allemand Walter H. Schottky) est une diode qui a un seuil de tension directe très bas et un temps de commutation très court.

DTN : Direction Technique et Numérique du CNES

EEE : Electrical, Electronic and Electro-mechanical

ESA : European Space Agency

ESCCON : European Space Components Conference (conférence)

ESREF : European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis (conférence)

FET : Field-effect transistor ou transistor à effet de champ

FinFET : type de transistor non planaire, ou « transistor 3D ». Il est à la base de la fabrication des dispositifs à semi-conducteurs modernes nanoélectroniques

FPGA : Field Programmable Gate

Array est circuit intégré prédiffusé programmable (ue l'on peut programmer sur le terrain après sa sortie des chaînes de fabrication)

GaN : Nitrure de Gallium

GSTP : General Support Technology Programme

ISTFA : International Symposium for Testing and Failure Analysis (conférence)

JAXA : Japan Aerospace Exploration Agency

MOI : Maîtres d'Œuvres Industriels

MMIC : Monolithic Microwave Integrated Circuit

NSREC : IEEE Nuclear & Space Radiation Effects Conference

OCCO : Oven Controlled X-tal(Crystal) Oscillator, qui se traduit en français par « oscillateur à quartz thermostaté »

PCB : Printed Circuit Board est un Circuit imprimé

PRE : Plan de Relance Exceptionnel

QFN : Quad Flat No-leads package (QFN) est un type de boîtier de circuit intégré plat et sans broche

RADECS : RADiation Effects on Components and Systems (conférence)

R&T : Recherche et Technologie

RCS : R&T Composants Stratégiques

RF : Radio Fréquence

SiC : Carbure de Silicium

SiP : System In Package

SPCD : Space Passive Components Days (conférence)

SSPA : Solid State Power Amplifier

UDSM : Ultra Deep SubMicron

LIENS

CNES

www.cnes.fr

Comet Microsystèmes et Composants Electroniques

<https://www.comet-cnes.fr/mce>

Comet Alerte Composants

<https://www.comet-cnes.fr/cac>

Comet Environnement Spatial et Atmosphérique

<https://www.comet-cnes.fr/env>

Feuille de route technique « Environnement radiatif spatial »

<https://cnes.fr/entreprises/feuilles-de-route-techniques>

ESCIES European Space Components Information Exchange System

<https://escies.org>

ANADEF Mécanismes de défaillance des composants électroniques et des assemblages

<https://www.anadef.org/>

RADECS Radiation Effects on Components

<https://radecs-association.net>

Appel à idées préparation du futur du CNES

<https://rd-cnes.wiin.io>

DES QUESTIONS, DES COMMENTAIRES ?

VOTRE AVIS NOUS INTERESSE

courriel : fdr-techniques@cnes.fr

DES QUESTIONS, DES COMMENTAIRES ? VOTRE AVIS NOUS INTERESSE

courriel : fdr-techniques@cnes.fr

