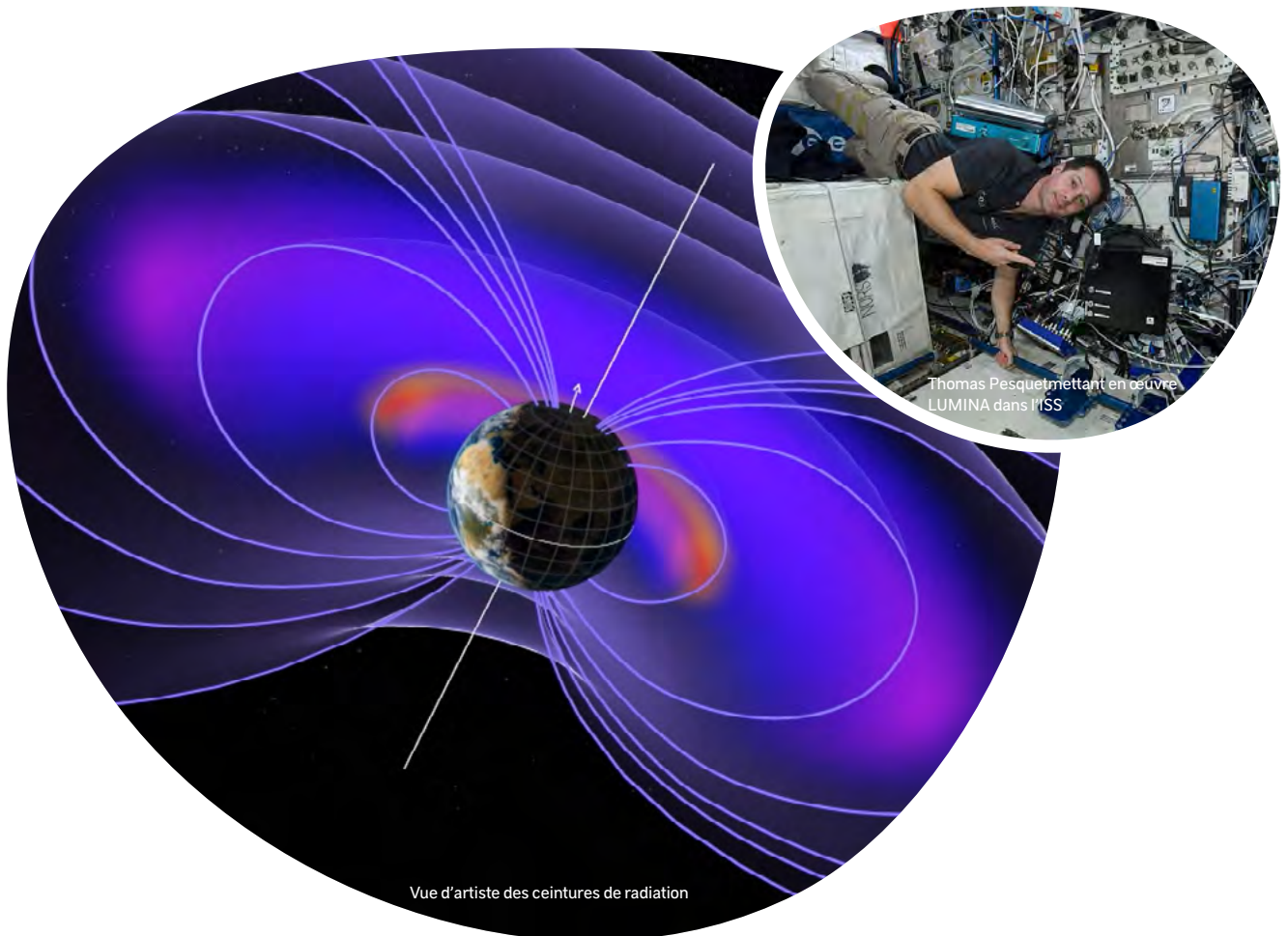


FEUILLES DE ROUTE TECHNIQUES DU CNES

ENVIRONNEMENT RADIATIF SPATIAL ET EFFETS SUR LES COMPOSANTS

«SPACE IS RADIOACTIVE»



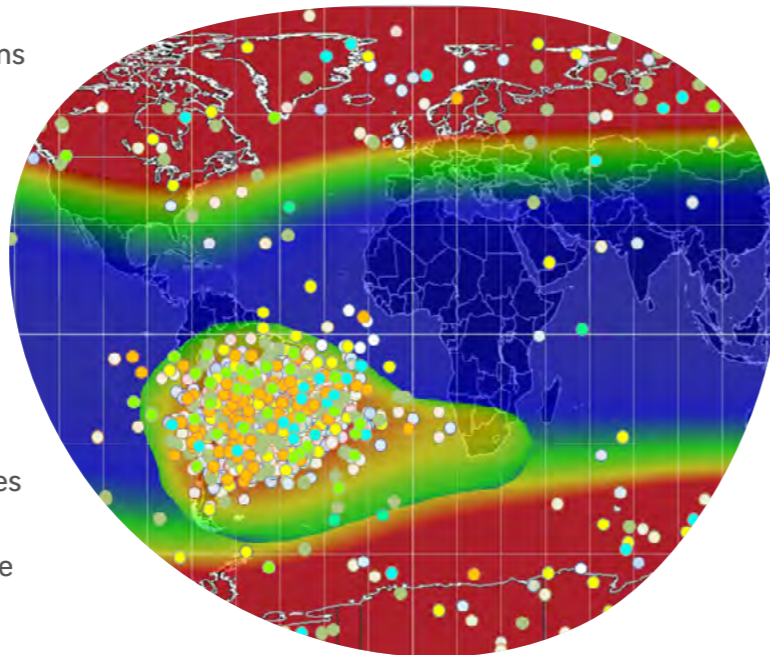
OCTOBRE '24

Le contexte

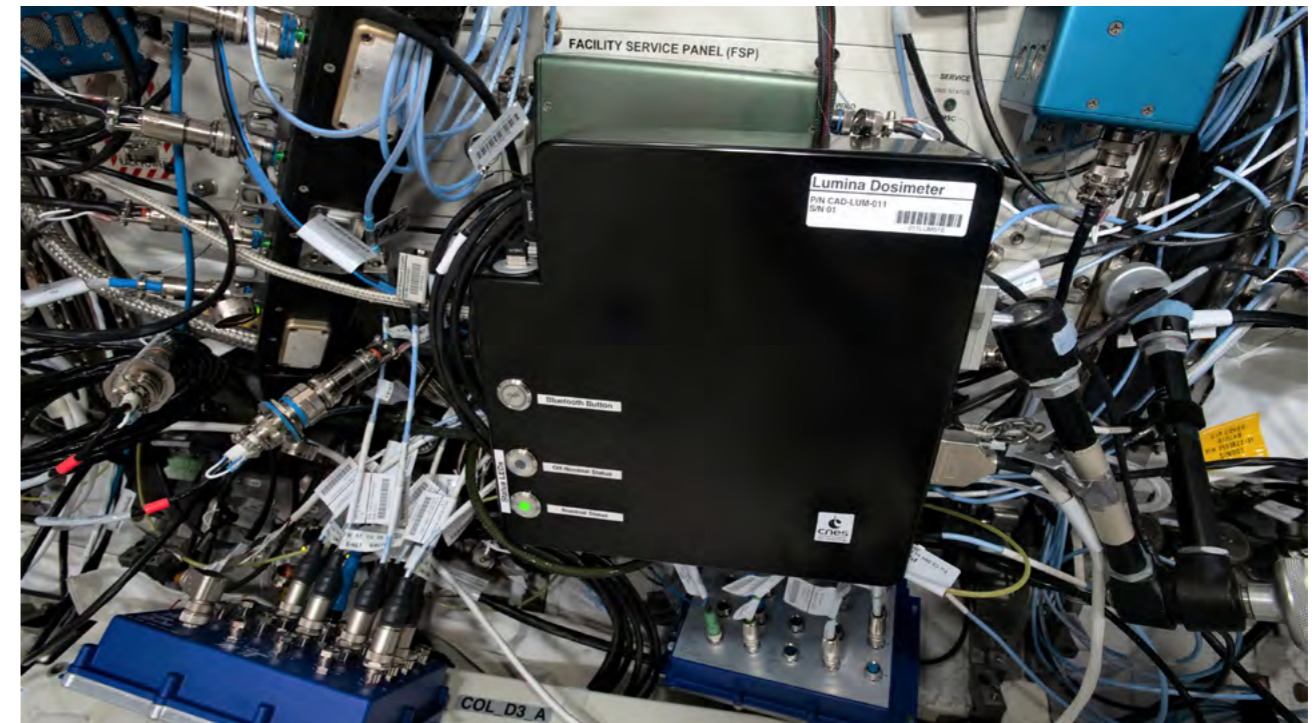
Le milieu spatial est traversé par des particules chargées de forte énergie originaires des ceintures de radiations de la Terre, des événements solaires, et des rayons cosmiques. Ces particules peuvent entraîner des dégradations irréversibles qui vont limiter la durée de vie des composants électroniques, et des événements dits « singuliers » (dus au passage d'une seule particule) qui résultent en de faux signaux, fausses informations, faux pixels, et pour certaines technologies, en des phénomènes potentiellement destructifs. Ces phénomènes singuliers sont responsables d'une majorité d'anomalies en orbite. Les anomalies sont principalement situées dans les ceintures de radiations et dans les zones de forte latitude peu protégées par le champ magnétique (événements solaires et rayons cosmiques). En orbite basse, une zone est particulièrement à risque à cause d'un déséquilibre du champ magnétique : l'Anomalie Sud Atlantique

D'autre part, les rayons cosmiques interagissent avec les atmosphères et surfaces planétaires en produisant des particules secondaires qui peuvent à leur tour constituer des risques pour les composants électroniques, et en radioprotection.

La découverte des ceintures de radiations par J. Van Allen et son équipe en 1958 avec Explorer-1 et -3 constitue le premier résultat scientifique de l'ère spatiale : « space is radioactive ! ». Les ceintures de radiations sont formées par des particules piégées dans le champ magnétique terrestre. Notre Terre est la seule planète rocheuse à posséder un champ magnétique structuré, seules les planètes géantes (Jupiter, Saturne, ...) possèdent aussi un champ. Ceci fait de notre monde un objet unique dans le système solaire.



~1000 anomalies sur 10 satellites LEO.



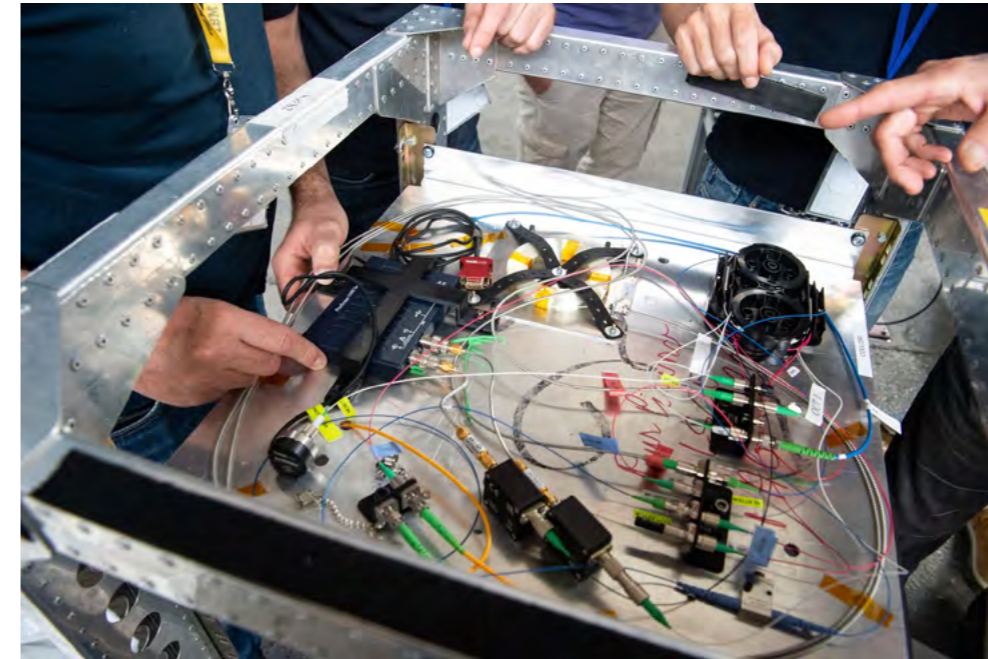
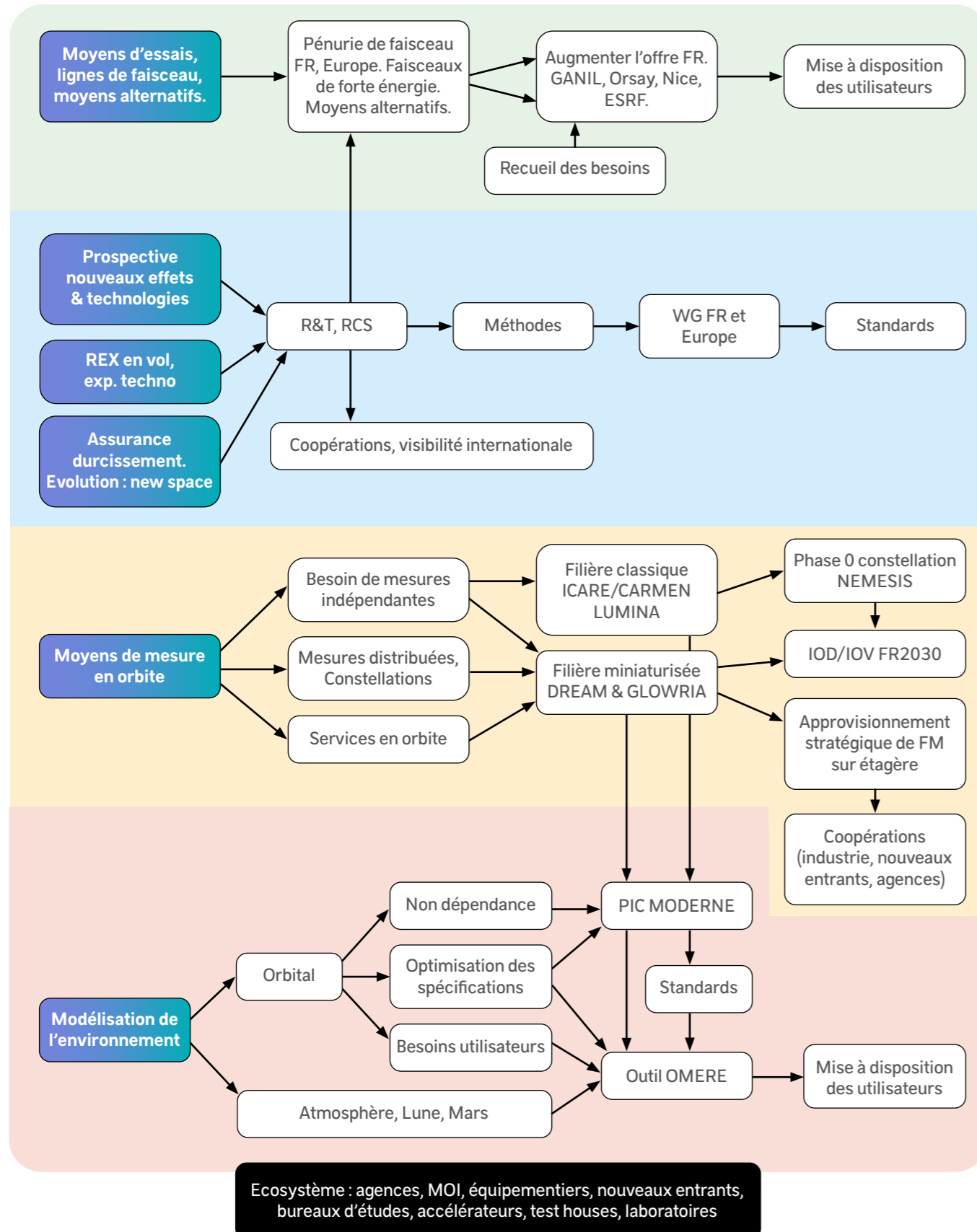
Le contexte général est caractérisé par :

- Une évolution rapide des technologies (nouveaux phénomènes, défis de test) et l'utilisation de composants commerciaux
- La croissance de l'intégration à bord et des capacités de calcul embarquées
- L'existence d'effets potentiellement destructifs à faible échéance
- La nécessité de caractériser les composants sous faisceaux de particules représentatives de l'environnement spatial
- Une pénurie d'accès aux faisceaux de particules qui impacte le temps de développement des projets, industriels ou institutionnels
- Une montée des besoins en termes de surveillance et restitution de l'environnement spatial radiatif
- Un besoin de modèles Européens améliorés de spécification à appliquer aux composants afin de garantir leur comportement face aux radiations ; ces modèles devant être adaptés aux nouvelles missions

L'écosystème impliqué dans le thème est constitué :

- Des agences, CNES, DGA, ESA
- Des industriels maîtres d'œuvre et équipementiers, « historiques » (Airbus-DS, TAS) et « nouveaux »
- Des bureaux d'études et d'ingénierie radiations
- Des prestataires d'essais radiations
- Des prestataires de faisceaux et sources (GANIL, ESRF, ...)
- Des laboratoires de recherche, ONERA, CNRS (INSU, IN2P3, ...), CEA, CERN
- Des Universités et Ecoles d'ingénieurs, et des Centres Spatiaux Universitaires

En un coup d'œil



Intégration instrument de mesure
© CNES/GRIMAUULT Emmanuel, 2024

Qui sommes-nous ? Quel est le métier de l'ingénieur radiations au CNES ?

L'ingénieur radiations contribue à toutes les phases des projets, des spécifications d'environnement initiales jusqu'aux tests d'évaluation et de qualification. Nous participons au développement de bancs de test de composants critiques ainsi qu'aux essais sous faisceau de particules sur le terrain.



Nous développons des outils de calcul des contraintes et estimation des risques qui intègrent les derniers développements dans les modèles d'environnement et d'effets radiatif.

Nous développons des instruments de mesure des effets en orbite afin d'avoir une connaissance de première main de l'environnement et des effets en pratique.

Nous participons au rayonnement du CNES au travers de publications dans des conférences et des revues internationales.

Nous sommes ouverts vers l'extérieur et participons à l'orientation de groupes d'échanges et de standardisation français et européens.

Nous nous impliquons dans des coopérations avec des partenaires nationaux et internationaux (industriels, laboratoires, agences).

Les enjeux

En ce qui concerne les effets des radiations sur les composants, les enjeux actuels sont :

- **Une évolution rapide des technologies électroniques** qui résulte en de nouveaux effets et des défis au niveau des moyens et procédures de test. Par exemple les nouvelles techniques de report et d'assemblage ne permettent plus un accès facile aux puces, il faut donc disposer de faisceaux à forte énergie pour traverser les boîtiers, dont l'accès est aujourd'hui limité. Un autre défi est la testabilité des composants intégrés, processeurs, FPGA, mémoires à grande capacité. Il est rarement possible de tester toutes les ressources de tels composants. De même des vitesses d'horloge de plus du GHz nécessitent des montages particuliers.

Pour en savoir plus, voir la feuille de route technique « Composants électroniques »

- **Une introduction de ces technologies dans les projets à cycle court des nouveaux entrants**, ce qui conduit à devoir adapter et bien souvent alléger les méthodes de qualification, envisager par exemple du test sur carte au lieu du traditionnel test individuel des composants. D'autre part, des projets à cycle court pourront amener un retour d'expérience en vol rapide sur des technologies avancées, ce qui pourra bénéficier à l'ensemble de l'écosystème.

- **Une pénurie d'accès aux faisceaux** ayant débuté suite à la pandémie de Covid et aggravée par la multiplication des projets, industriels ou scientifiques. Le même constat est fait aux USA. Il est indispensable de développer une nouvelle offre, en particulier au niveau national pour des raisons de souveraineté économique et stratégique.

Composant qualifié spatial et composant commercial, quelle différence ?

Sauf en ce qui concerne les composants dits « stratégiques », les composants même s'ils sont « qualifiés spatiaux » n'offrent pas de garantie a priori de tenue aux radiations, car le label ne comprend tout simplement pas de qualification aux radiations. Il faut donc dans la plupart des cas caractériser leur tenue au travers de tests. La différence avec les composants commerciaux est le « test as you fly », la garantie de tester ce qui va voler, grâce à la traçabilité des lots de vol.

En ce qui concerne la connaissance de l'environnement en particules chargées :

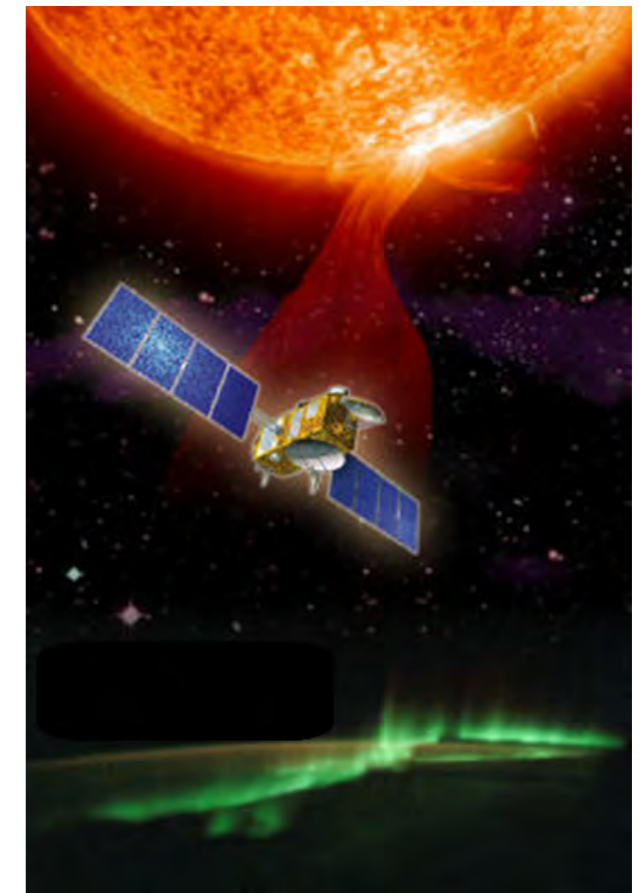
- Les flux de particules sont en dernier ressort gouvernés par **l'activité et les événements solaires**. Le cycle solaire influe à moyen et long terme sur les flux de particules dans les ceintures de radiations, et les flux de rayons cosmiques. Depuis le début de l'ère spatiale nous disposons de seulement 6 périodes de cycles solaires. Les premiers cycles de l'ère ont été très actifs, les cycles actuels sont faibles. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, la statistique est donc faible et il nous reste beaucoup à apprendre. Par exemple, comment définir un événement solaire pire cas sur 100 ans ?

- En conséquence, il faut **progresser dans la modélisation de ce milieu** afin de proposer des niveaux d'exigences de robustesse aux rayonnements au juste besoin, et donc des spécifications optimisées pour nos projets. Ces modèles ont été identifiés par ESA-UE-EDA comme des technologies critiques de non-dépendance. Enfin, il faut bien entendu diffuser et rendre ces modèles utilisables en pratique.

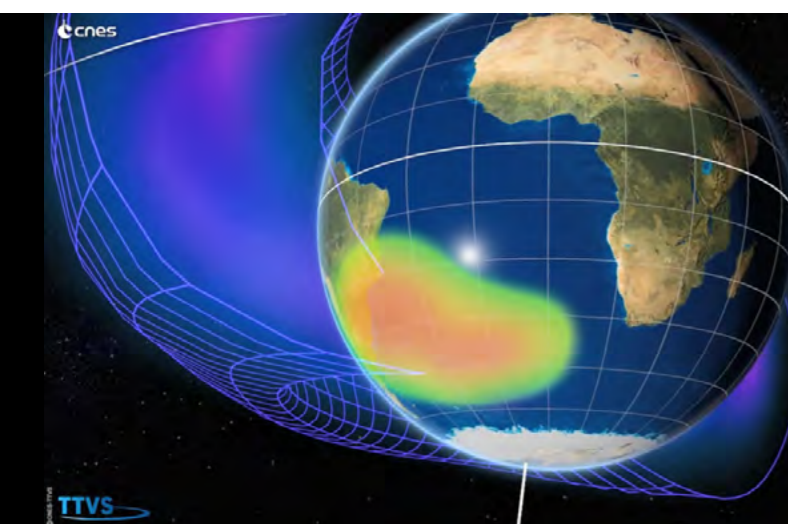
- Ces modélisations ont besoin de **mesures in-situ**, thème sur lequel le CNES s'implique depuis plus de 20 ans avec les instruments ICARE et les missions CARMEN, même si la France et l'Europe restent loin derrière les USA. D'autre part, l'utilisation de composants commerciaux et l'apparition de nouveaux concepts de mission de satellites agiles exploités sur des orbites variées (transport orbital, service en orbite, ...) plaident pour la restitution de l'environnement réellement rencontré pendant la mission. Par exemple les missions CARMEN 4, 5, 6 ont permis de caractériser la phase de mise à poste électrique de trois satellites. La disponibilité d'instruments versatiles et légers (DREAM, GlowRIA), capables d'être déployés en constellation, apporterait une plus-value majeure pour ces applications et pour la météorologie de l'espace. (Voir la feuille de route « Techniques bord pour les nanosatellites »).

Enfin, les mesures in-situ sont utilisées par le CNES pour d'éventuelles **analyses d'anomalies** ou pour documenter la situation dans l'espace à la demande de projets ou de partenaires institutionnels, et en échange dans des coopérations.

Les environnements planétaires (atmosphère, surface) et leurs interactions avec des engins (par ex. ballons stratosphériques, habitats,...) restent quant à eux à mieux connaître et modéliser.



Vue d'artiste d'un événement solaire accompagné d'aurore boréale



Vue d'artiste de la SAA

Les axes techniques

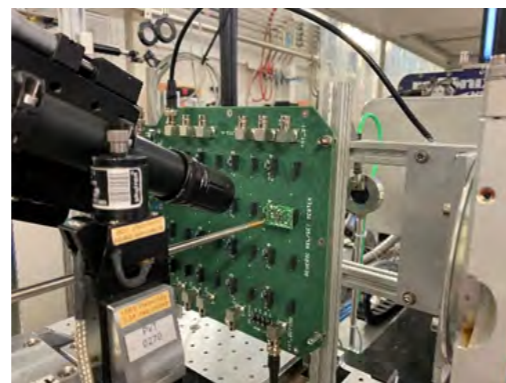
Axe n°1 : Accès aux faisceaux

Cet axe vise, en concertation avec les industriels et les laboratoires, et après recueil de leurs besoins, à augmenter et diversifier l'offre de faisceaux sur le territoire national d'ions lourds (GANIL) et de protons (Nice, Orsay). Il vise aussi à explorer les capacités de moyens alternatifs, par exemple les rayons X pulsés et les lasers focalisés.

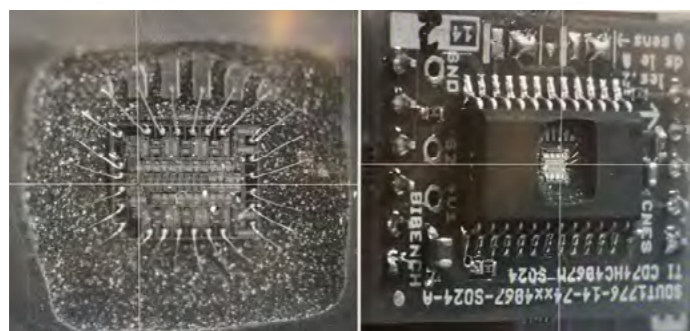
La question de l'accès aux faisceaux constitue une criticité majeure dans la chaîne d'approvisionnement des projets. Un constat similaire a été effectué aux Etats-Unis (« Testing at the speed of light »¹, rapport de l'Académie des Sciences Américaine) et à conduit au développement du NASA Space Radiation Laboratory (NSRL)² à Brookhaven, USA. Ce moyen de très forte énergie est réservé en priorité à l'industrie et la recherche américaine.



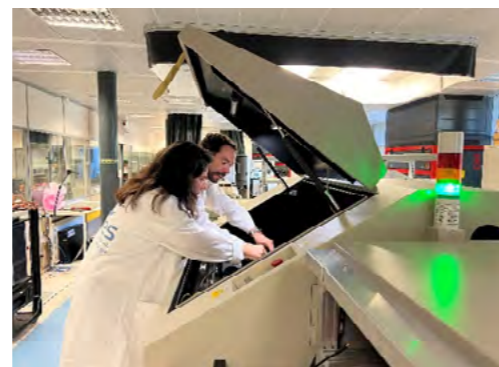
Ligne de faisceau GANIL
CEA © Philippe Stroppa



Installation X pulsés à l'ESRF



Echantillons préparés pour le test



Banc de test laser au CNES

¹ Testing at the Speed of Light: The State of U.S. Electronic Parts Space Radiation Testing Infrastructure | The National Academies Press : <https://nap.nationalacademies.org/catalog/24993/testing-at-the-speed-of-light-the-state-of-us>

² Heavy Ion Single-Event Effects (SEE) Test Facility Status and General Implications for Space System Evolution (nasa.gov)

Axe n°2 : Amélioration et adaptation des méthodes de tests et standards d'assurance durcissement

L'assurance durcissement c'est quoi ?

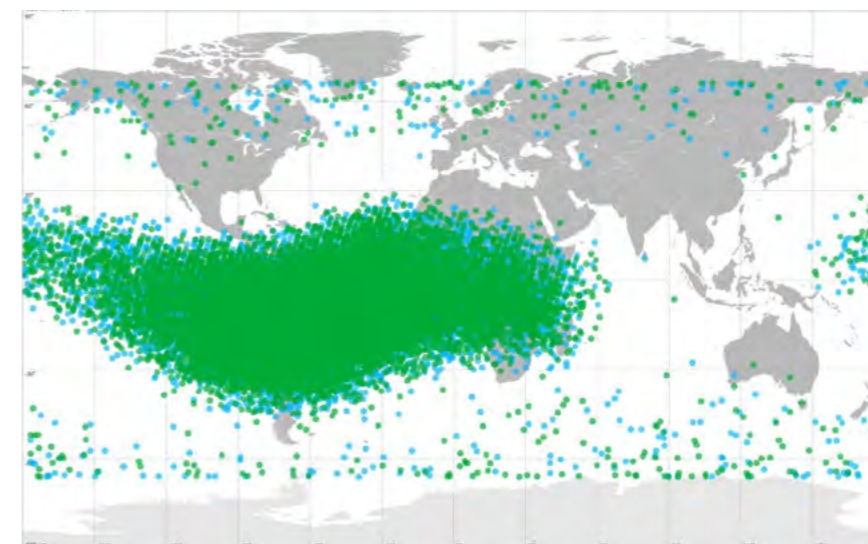
L'assurance durcissement consiste, à toutes les étapes d'un projet, à garantir que les composants électroniques, qualifiés spatial ou commerciaux, fonctionneront conformément à la spécification d'environnement radiatif du satellite pendant toute la mission.

L'activité comprend la définition de la spécification d'environnement, les analyses de niveaux de radiation reçus, les analyses des éventuels impacts fonctionnels, les tests et la qualification pour la mission.

Cet axe vise à faire évoluer les méthodes et standards en s'appuyant sur trois piliers :

- La prospective sur les **nouvelles technologies et nouveaux effets** (travail via le plan de R&T et le RCS), expérimentale, théorique, et par simulation
[Voir la feuille de route technique « Composants électroniques »](#)
- L'exploration de **méthodes d'assurance durcissement alternatives** (R&T) et leur nécessaire adaptation aux projets à cycle court et budget faible
- Le retour d'expérience en vol et les **expérimentations** technologiques dédiées (R&T, démonstrateurs, projets, coopérations)

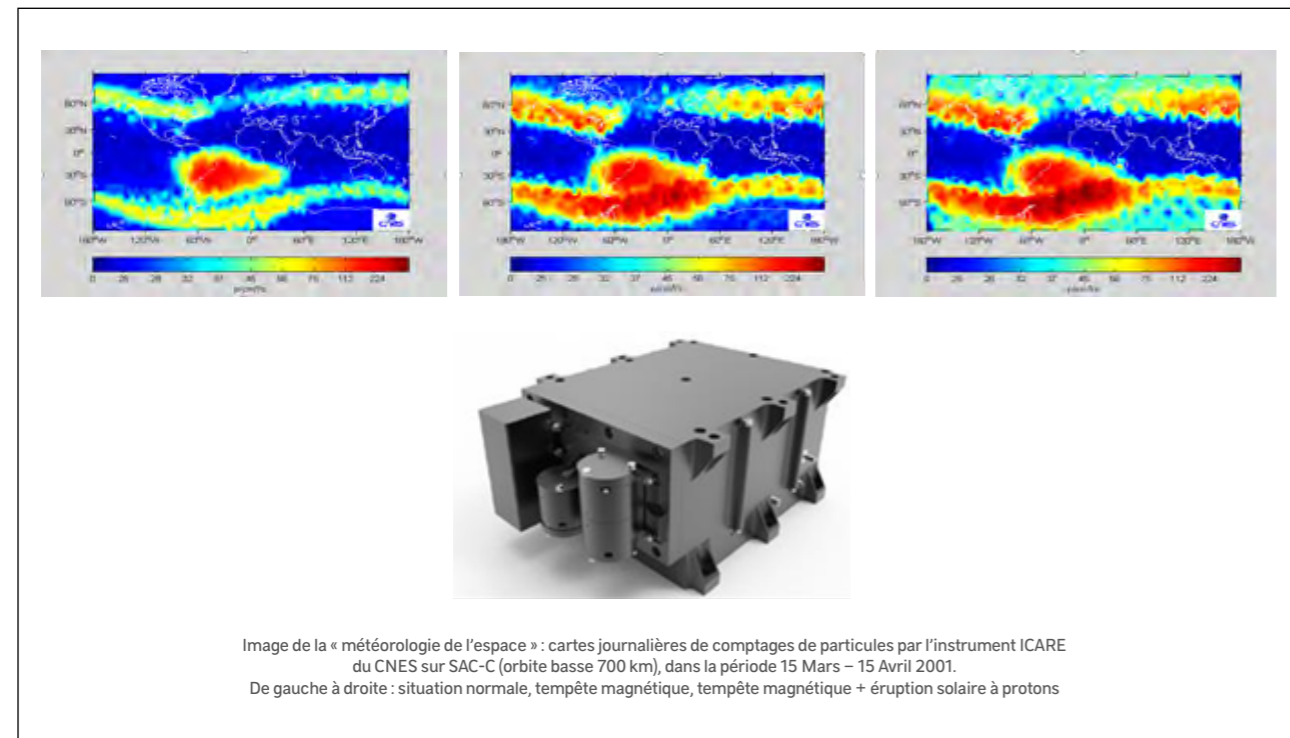
Ces résultats sont ensuite infusés vers les groupes de travail nationaux (multi partenariats CNES et industrie) et européens (groupe RWG/CTB) afin d'alimenter et orienter les mises à jour des standards ECSS et ESCC correspondants.



Expérimentation technologique : résultat de comptage d'effets potentiellement destructifs (ici, sur Jason 2)
Sans précaution particulière, le risque est la défaillance au bout d'un jour à 1400 km, au bout d'une semaine à 700 km

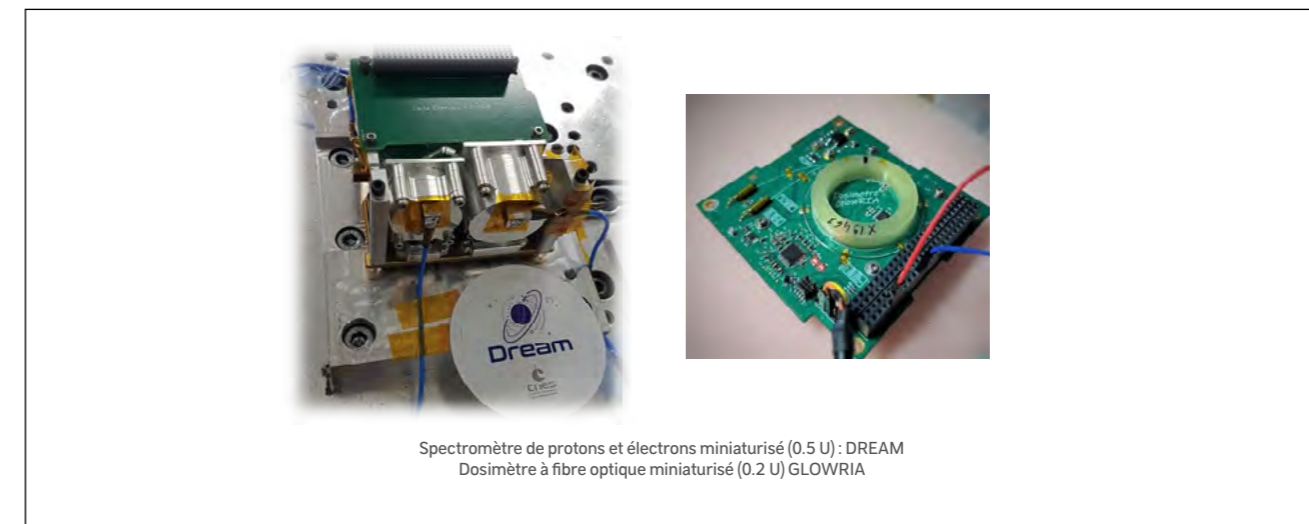
Axe n°3 : Développement d'instruments de mesure d'environnement et études d'application

La météorologie de l'espace fait l'objet d'un intérêt croissant pour ses possibles impacts techniques et sociétaux qui impliquent un besoin en souveraineté nationale.

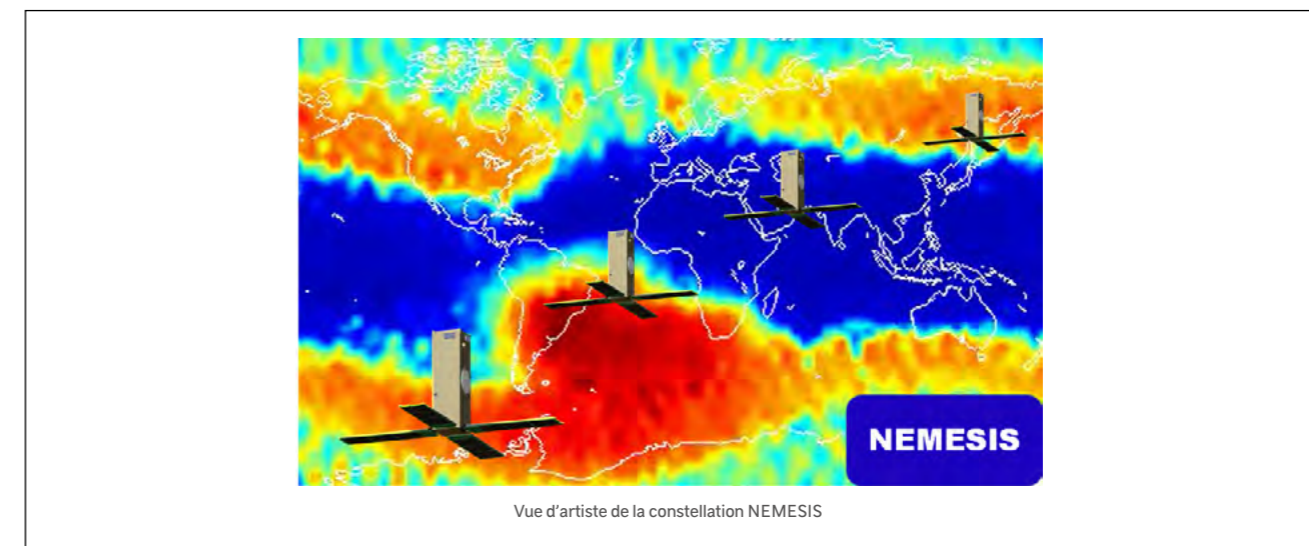
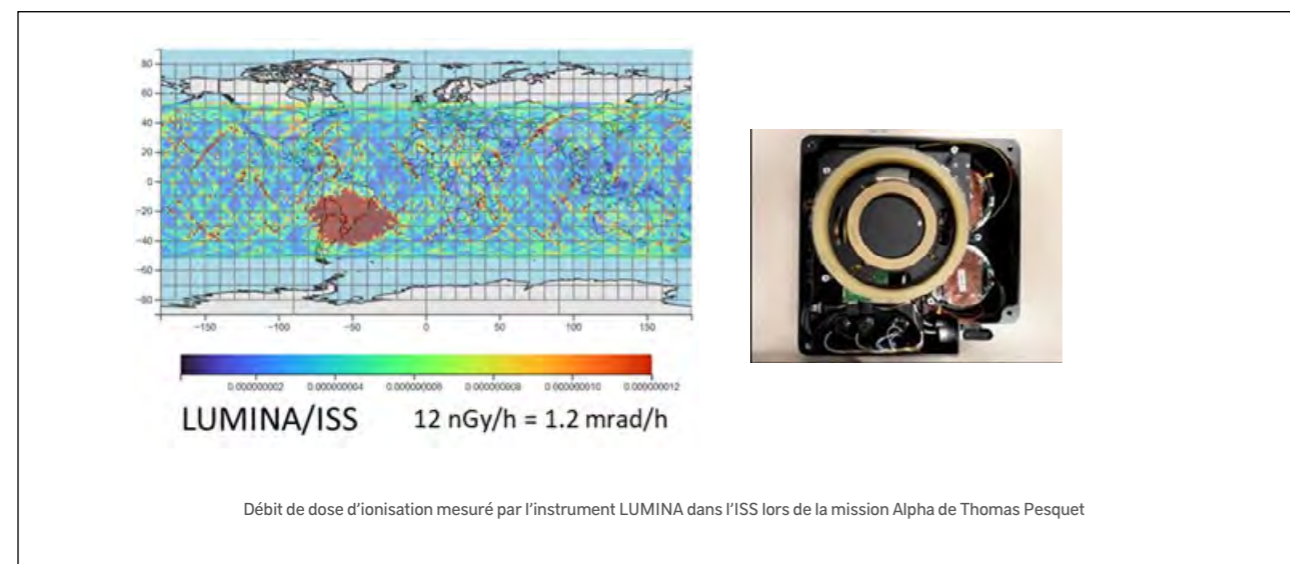


Cet axe vise à développer et mettre en opération des instruments de mesure miniaturisés, en complément de notre filière classique ICARE/CARMEN et LUMINA. L'objectif est de pouvoir adresser les constellations, le transport orbital et le service en orbite.

En plus d'un usage pour les services de météorologie de l'espace, les mesures obtenues sont utilisées en entrée des actions de modélisation de l'axe 4, ou par le CNES, le satellite hôte ou ses éventuels clients en cas d'anomalies.



Le premier vol de DREAM et GLOWRIA se fera sur le nano-satellite AEROSAT de la Nanolab Academy. Ces développements sont accompagnés, en aval, de discussions pour des possibilités d'emports et de services avec l'ESA (programme S2P) et avec les industriels « historiques » et « nouveaux », et d'une étude de phase 0, NEMESIS, pour une constellation qui réduirait la latence de restitution en météorologie de l'espace.



Des études de projection de mesures LEO vers d'autres positions ou trajectoires (par ex. EOR) sont aussi effectuées, en particulier à l'aide de techniques d'intelligence artificielle.

Axe n°4 : Amélioration des modèles de spécification d'environnement radiatif

Les modèles standard ECSS des ceintures de radiations sont aujourd'hui anciens (40 ans) et peuvent être selon le cas majorants ou minorants, et ne sont pas adaptés à des missions ou phases de mission courtes (mise à poste électrique par exemple).

Cet axe est essentiellement exploré en partenariat avec l'ONERA dans le cadre du PIC (Programme d'Intérêt Commun) MODERNE, dans le but de proposer un nouveau modèle de spécification des flux dans les ceintures de radiations, le modèle GREEN. L'approche poursuivie consiste à utiliser un code dynamique, représentant la physique des ceintures de radiations, contraint par de l'assimilation de données et l'utilisation de techniques d'IA. Le CNES contribue aussi à l'enrichissement de la base de données de mesures en vol IPODE, à ce jour la plus large au monde.

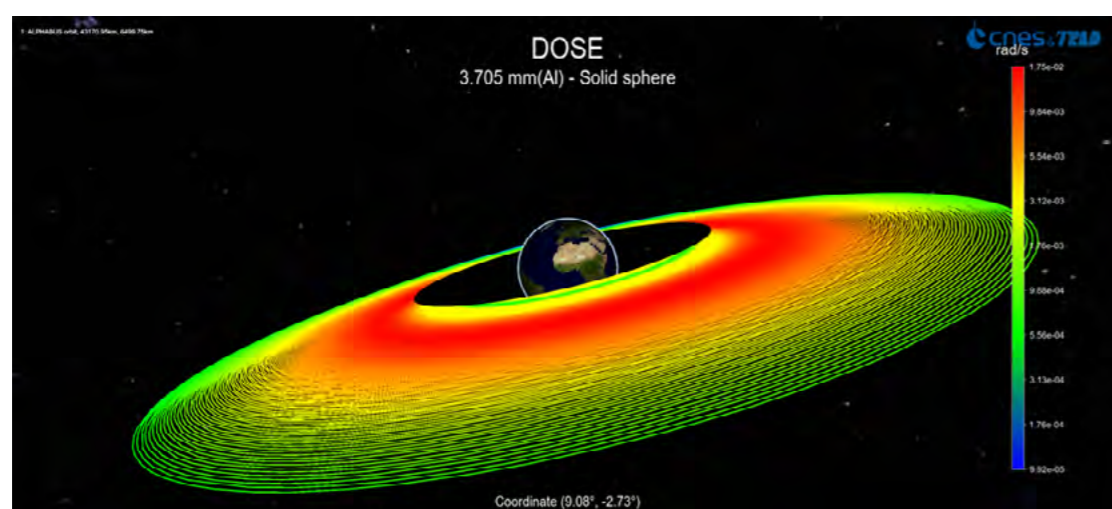
Les résultats (modèles améliorés) sont disponibles aux utilisateurs au travers de l'amélioration collective de l'outil OMERE, outil de modélisation de l'environnement de l'espace qui permet de simuler l'environnement radiatif (doses, taux d'événements etc) pour une mission en fonction de ses caractéristiques orbitographiques.

Des études de comparaison avec les autres modèles existants sont menées.

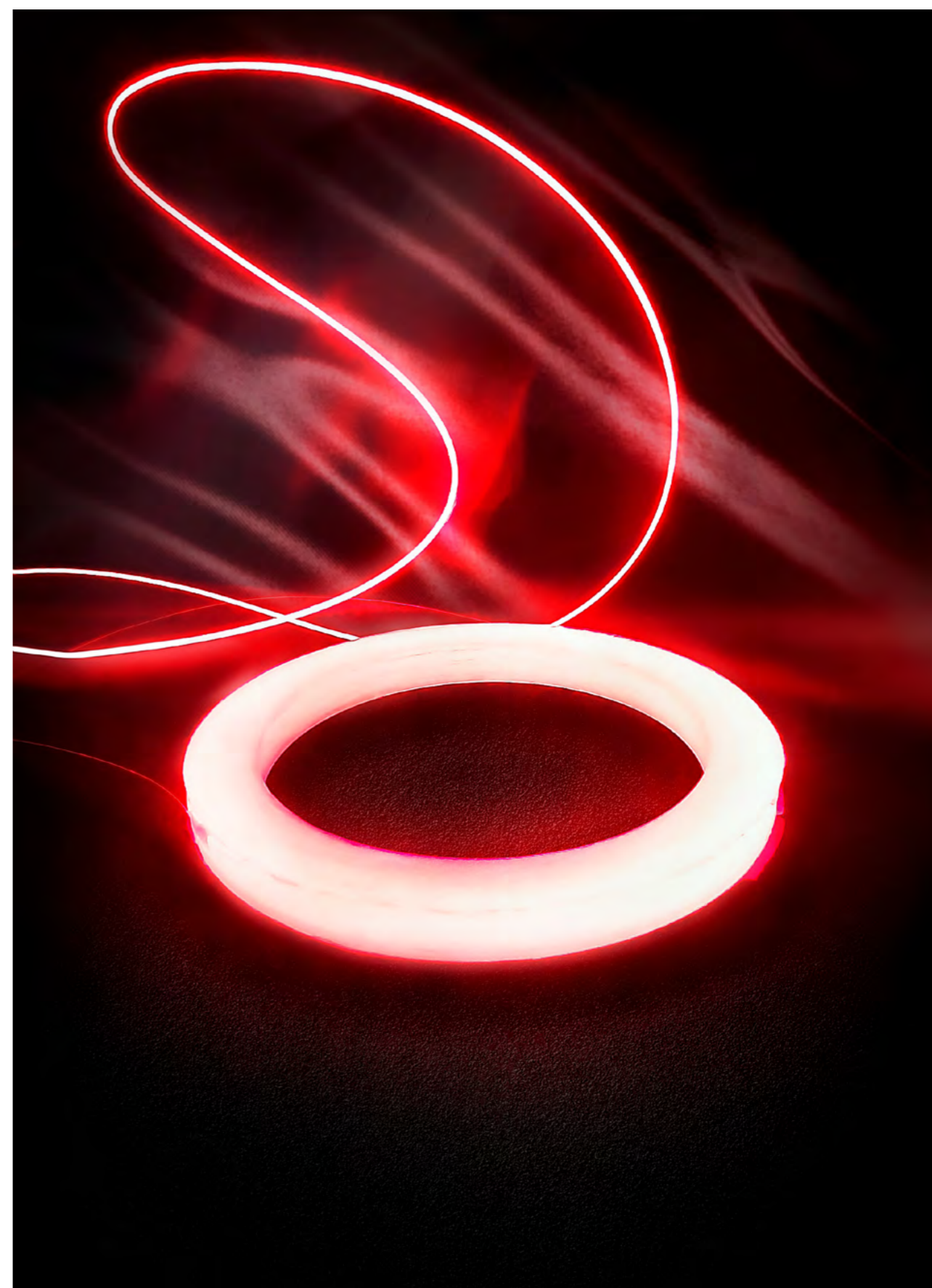
Les développements sont également portés à contribution de la mise à jour des ECSS

Développement au travers de doctorats réalisés au CNES des modèles atmosphériques terrestres pour l'impact sur les électroniques embarquées (RAMSEES) et atmosphérique et sol martien, pour l'impact sur les électroniques et la radiobiologie (ARAMIS).

Enfin, des actions d'amélioration de notre connaissance des environnements atmosphériques et planétaires sont menées, principalement au travers de travaux de thèse dans nos locaux. On notera aussi par exemple une mise à jour des modèles des ceintures de radiations de Jupiter par l'ONERA (R&T).



Cartographie de débit de dose d'ionisation sur une trajectoire de mise à poste électrique de principe, outil OMERE CNES/TRAD



Fibre optique du dosimètre Lumina
© CNES/LE BRAS Gwennwan, 2020

Synthèse des études en cours et prochaines étapes

Axe n°1 : Accès aux faisceaux

- Projet Centre Antoine Lacassagne à Nice : mise en place de lignes d'irradiations sous faisceaux de protons
 - Initiative similaire en discussion avec le CPO (Centre de Protonthérapie d'Orsay)
- Projet SAGA au GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) à Caen : amélioration des moyens existants, cocktail d'ions lourds, faisceaux très haute énergie et faisceaux de neutrons, en liaison avec l'industrie.
- Evaluation d'une alternative utilisant des faisceaux de rayons X pulsés et focalisés avec l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) à Grenoble.
- Réalisation, déploiement et mise à disposition de la nouvelle offre de faisceaux

Axe n°2 : Amélioration et adaptation des méthodes de tests et standards d'assurance durcissement

- Plus d'une dizaine d'actions de R&T sont en cours sur les effets et méthodes (par ex. mémoires non volatiles, ionisation directe des protons, latch-up basse température, etc...)
- Développement et mise en application de RHA (Radiation Hardness Assurance) allégée pour les projets « new space »
- Révision de l'ECSS Q-ST-60-15 (assurance durcissement) et écriture de guides de test (par ex. test sur cartes, mémoires, convertisseurs analogiques-numériques)
- Retour d'expérience en vol (boucles d'information avec nos opérateurs, coopérations) et expériences embarquées (Modules Expérience – MEX - des missions CARMEN)

Axe n°3 : Développement d'instruments de mesure d'environnement et études d'application

- Développement des filières miniaturisées DREAM et GLOWRIA
- Approvisionnement et déploiement de DREAM et GLOWRIA en orbite
- Plan IOD/IOV et approvisionnement stratégique
- Discussions pour les possibilités d'emport avec des opérateurs classiques et nouveaux
- Proposition en coopérations internationales
- Etude phase 0 de constellation NEMESIS

Axe n°4 : Amélioration des modèles de spécification d'environnement radiatif

- PIC CNES-ONERA MODERNE sur la modélisation de l'environnement radiatif
 - Finalisation du modèle GREEN (ONERA) des ceintures de radiations et portage dans OMERE
- Portage européen et valorisation du modèle GREEN, discussion et révision de l'ECSS E-ST-10-04 (environnement spatial)
- Mise à jour et amélioration de l'outil CNES/TRAD OMERE en liaison avec l'industrie et les Laboratoires
- Portage dans OMERE du modèle de radiations atmosphériques terrestre RAMSEES pour applications ballons et aéronautiques
- Travaux de thèse sur l'environnement martien et le blindage des habitats
- Développement d'un modèle amélioré des ceintures de radiations de Jupiter avec l'ONERA

ACRONYMES

ARAMIS : Atmospheric RAdiation Model
for Ionizing spectra on martian Surface

CARMEN : CARactérisation et
Modélisation de l'ENVironnement

CPO : Centre de Protonthérapie d'Orsay

DREAM : Détecteur de Radiations
Energétiques Adaptable et Miniaturisé

ECSS : European Coordination on Space
Systems

ESCC : European Space Components
Coordination

ESRF : European Synchrotron Radiation
Facility

EOR : Electrical Orbit Raising

GANIL : Grand Acélérateur National
d'Ions Lourds

GLOWRIA : Guided Light Orbiting
Radiation Induced Attenuation

GREEN : Global Radiation Earth
ENVironnement

IOD/IOV : In-Orbit Demonstration /
Validation

ICARE : Influence sur les Composants
Avancés des Radiations de l'Espace

IPODE : Ionising Particle Onera DatabasE

ISS : International Space Station

LEO : Low Earth Orbit

MEX : Module EXpérience

MODERNE : MODélisation de
l'ENVironnement Radiatif Naturel de
l'Espace

OMERE : Outil de Modélisation de
l'ENVironnement Radiatif de l'Espace

PIC : Programme d'Intérêt Commun

RAMSEES : Radiation Atmospheric
Model for Single Event Effect Simulation

RCS : Référentiel des Composants
Stratégiques

RHA : Radiation Hardness Assurance

RWG/CTB : Radiation Working Group /
Component Technology Board

SAC-C : Satellite de Applications
Scientificas n°C

SEE : Single Event Effects

LIENS

CNES

www.cnes.fr

Comet ENV

(Environnement spatial et Atmosphérique)

www.comet-cnes.fr/env

Comet MCE

(Microsystèmes et Composants Electroniques)

www.comet-cnes.fr/mce

Nanolab Academy

Nanolab Academy – Workshop Nanolab Academy 2024 (nanolab-academy.fr)

DES QUESTIONS, DES COMMENTAIRES ? VOTRE AVIS NOUS INTERESSE

courriel : fdr-techniques@cnes.fr