

CNES MAG



ESPACE • INNOVATION • SOCIÉTÉ

#86

Novembre 2020

The background of the cover is a dramatic photograph of a stormy sky. A bright sun is partially obscured by dark, heavy clouds on the right side. A powerful lightning bolt strikes down from the left side of the frame. The overall color palette is dominated by dark blues, greys, and oranges from the sunset or sunrise.

TARANIS

**LA FACE CACHÉE
DES ORAGES**



cnes
CENTRE NATIONAL
D'ÉTUDES SPATIALES



SOMMAIRE



06



13



16

05
ÉDITORIAL

06
L'ESSENTIEL

TLE, TGF ou encore sprites : le point sur les phénomènes lumineux qui éclairent la haute atmosphère et sur l'utilité de leur compréhension

12
#COMMUNAUTÉ
Lancement de Taranis : les followers du CNES expriment leur impatience

13
GRAND ORAL
Astrophysicien, auteur et vulgarisateur, Roland Lehoucq nous donne le goût de l'astrophysique

16
EN IMAGES
De fabuleux phénomènes

18
EN CHIFFRES
Entre éclairs et rayons gamma, les données clé de Taranis

19
LE CNES
EN ACTIONS
Enquête au cœur des orages

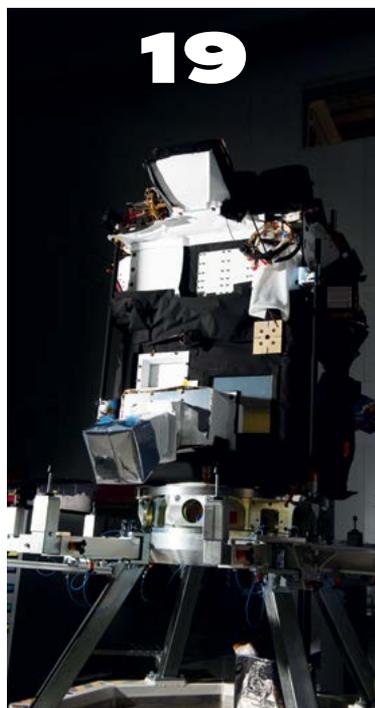
27
MATIÈRE
Les joies de l'addition

28
INSTANTS T
Charge utile de Taranis : du 8 en 1 !

30
RENCONTRES
• Elisabeth Blanc, conseillère scientifique au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)
• Xavier Delorme, chasseur d'orage
• Christophe Bastien-Thiry, chef de projet CNES du satellite Taranis



SOMMAIRE



19

LES PARTENAIRES DE LA MISSION TARANIS

ÉTATS-UNIS

P. 11, 21, 22 et 28

RÉPUBLIQUE TCHÈQUE

P. 22 et 29



FRANCE

P. 20-26

POLOGNE

P. 22, 28-29

33

ESPACE ÉTHIQUE

Prométhée raisonnable,
par Jacques Arnould

34

EN VUE

Les événements et ouvrages
à ne pas manquer

36

TRANSFERT

Protéger le personnel navigant

PARTENAIRES

Sont cités dans ce numéro : Laboratoire de physique et de chimie de l'environnement et de l'espace (LPC2E) p. 10, 21-22, 23, 28-29 ; Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) p. 10, 36 ; Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) p. 8-9, 15, 20-21, 28, 30 ; Agence spatiale américaine (NASA) p. 7, 21 ; Agence spatiale européenne (ESA) p. 10, 22 ; Institut de recherche en astrophysique et planétologie (Irap) p. 22, 29 ; Los Alamos National Laboratory (LANL) p. 9, 20-21 ; Laboratoire atmosphères, milieux, observations spatiales (Latmos) p. 22, 28 ; Laboratoire astroparticule et cosmologie (APC) p. 22, 29, 34 ; Direction générale de l'aviation civile (DGAC) p. 36 ; Institut français de recherche et de techniques polaires (IFRTP) p. 36.

En couverture : © Bill Paige



WWW.CNES.FR

Découvrez les contenus
en ligne de ce nouveau
numéro sur
cnes.fr/cnesmag



CNESfrance



@CNES



CNES



CONTRIBUTEURS

KADER AMSIF



Du concept à la réalité : l'histoire de Taranis est une longue saga. Kader Amsif en a compilé tous les épisodes.

Mémoire vive de l'aventure, il a retracé avec beaucoup de rigueur et de précision les orages et les temps calmes qui se sont succédé au-dessus du programme qu'il suit au quotidien.



JEAN-LOUIS PINÇON

Chercheur au LPC2E, Jean-Louis Pinçon a fait des plasmas spatiaux du proche environnement de la terre son terrain de jeu.

Depuis une décennie, cet infatigable curieux apporte sa caution scientifique à la mission Taranis. Ses publications sont un formidable creuset d'informations qui ont alimenté ce numéro.



SÉBASTIEN CÉLESTIN

Rien de ce qui concerne les phénomènes lumineux transitoires n'est étranger à Sébastien Célestin.

Au sein du LCP2E d'Orléans, il navigue entre recherches et analyses au cœur des nuages d'orages. Il a été un guide précieux dans le délicat cheminement entre rayons X, flares de rayons gamma et bouffées d'électrons.

CHRISTOPHE BASTIEN-THIRY



Chef du projet Taranis, Christophe Bastien-Thiry en connaît tous les arcanes.

Il a managé les équipes pendant plus de dix ans. S'il a partagé avec elles un grand sens de la pédagogie et de la transmission, il sait aussi en faire bénéficier le grand public. Pour ce *CNESmag*, il a éclairé l'atout du spatial dans l'étude des phénomènes obscurs.

CNESMAG

CNESmag, le magazine d'information du Centre national d'études spatiales, 2 place Maurice Quentin. 75039 Paris cedex 01. Adresse postale pour toute correspondance : 18 avenue Édouard Belin. 31401 Toulouse cedex 9. Tél. : +33 (0)5 61 27 40 68. Internet : <http://www.cnes.fr>. Cette revue est adhérente à Communication&Entreprises. Abonnement : <https://cnes.fr/reabonnement-cnesmag> **Directeur de la publication** : Jean-Yves Le Gall. **Directrice éditoriale** : Marie-Claude Salomé. **Rédactrice en chef** : Brigitte Alonzo-Thomas. **Secrétaire générale de la rédaction** : Céline Arnaud. **Rédaction** : Brigitte Alonzo-Thomas, Karol Barthélémy, Lilliane Feuillerac. **Photothèque (recherche iconographique)** : Marie-Claire Fontebasso. **Responsable photo** : Loïc Octavia, Thierry De Prada. **Crédits photo** : p. 4 CNES/N. Tronquart - J.-L. Pinçon - S. Célestin - CNES/E. Grimaud ; p. 5 CNES/C. Peus ; p. 6 CNES/O. Sattler ; p. 7 (haut gauche) McDonald Observatory/S. Hummel ; p. 7 (haut droite) NASA ; p. 8 (haut) X. Delorme ; p. 8 (bas) ESA/NASA ; p. 9 Getty Images ; p. 10 (haut) CNES/Prodigima R. Gaboriaud ; p. 10 (bas) ESA/NASA ; p. 11 G. Athier ; p. 13 et 15 SIPA/P. Baltet ; p. 16 S. Vetter ; p. 17 Muscapix/G. Moulard & E. Liot ; p. 19 CNES/E. Grimaud ; p. 20 Infographie/Lombry ; p. 21 CNES/ESA/Arianespace/Optique Vidéo CSG/J.-M. Guillon ; p. 23 CNES/A. Ollier ; p. 24 Infographie Ide/R. Sarian ; p. 25 CNES/E. Grimaud ; p. 26 Muscapix/G. Moulard & E. Liot ; p. 27 CNES ; p. 33 J. Arnould ; p. 34 (haut) ArtFX/Extrait Film Endless ; p. 34 (bas) Getty Images ; p. 36 Getty Images. **Illustrations** : François Foyard, Jean-Marc Pau, Robin Sarian (Idix). **Web master** : Sylvain Charrier, Mélanie Ramel. **Réseaux sociaux** : Mathilde de Vos. **Traduction** : Boyd Vincent. **Conception, conseil et réalisation** : Citizen Press – Camille Aulas, David Corvaisier, Mathilde Gayet, Alexandra Roy. **Impression** : Ménard. ISSN 1283-9817. **Ont participé à ce numéro** : Kader Amsif, Claude Audouy, Christophe Bastien-Thiry, Elisabeth Blanc, Pierre Bousquet, Florent Canourgues, Sébastien Célestin, Philippe Collet, Claire Dramas, Vincent Dubourg, Thomas Farges, Corentin Kimenau, Philippe Landiech, Philippe Laurent, Denis Perriot, Sylvie Petit, Jean-Louis Pinçon, Sophie Roelandt, Sébastien Rougerie, Catherine Series, Serge Soula, Stéphane Vetter.



É D I T O R I A L



Sprites, Elfes, Jets... Peu de gens savent que ces termes fantastiques sont utilisés par les scientifiques pour décrire des événements lumineux transitoires, moins poétiquement nommés TLE (*Transient Luminous Events*). Ce sont des flashes, des émissions électromagnétiques, qui se produisent pendant les orages actifs, au-dessus de nos têtes, à quelques dizaines de kilomètres d'altitude à peine.

Mais quels sont les processus et les mécanismes physiques derrière ces phénomènes découverts il y a à peine 30 ans ? Ont-ils un impact sur la physique et la chimie de la haute atmosphère, sur l'environnement, ou même sur l'être humain ? Et est-ce bien l'activité électrique dans les orages, qui cause les émissions de rayons gamma terrestres détectés en plus de ceux provenant du rayonnement cosmique ?

Voici les enjeux du satellite français Taranis qui rejoindra l'espace cet automne, sur un lanceur Vega au départ du Centre Spatial Guyanais. Depuis une brillante idée émise par la communauté scientifique française, à sa réalisation par le CNES, 20 années se sont écoulées. Il a fallu œuvrer pour débloquer les verrous technologiques et faire cohabiter, sur un microsatellite de la filière Myriade, huit instruments extrêmement sensibles et réactifs et entièrement dédiés à la physique des phénomènes au-dessus des orages.

Voilà ce que vous découvrirez dans ce numéro de CNESMAG, entièrement dédié à la mission Taranis, qui lèvera le voile sur la face cachée des orages.

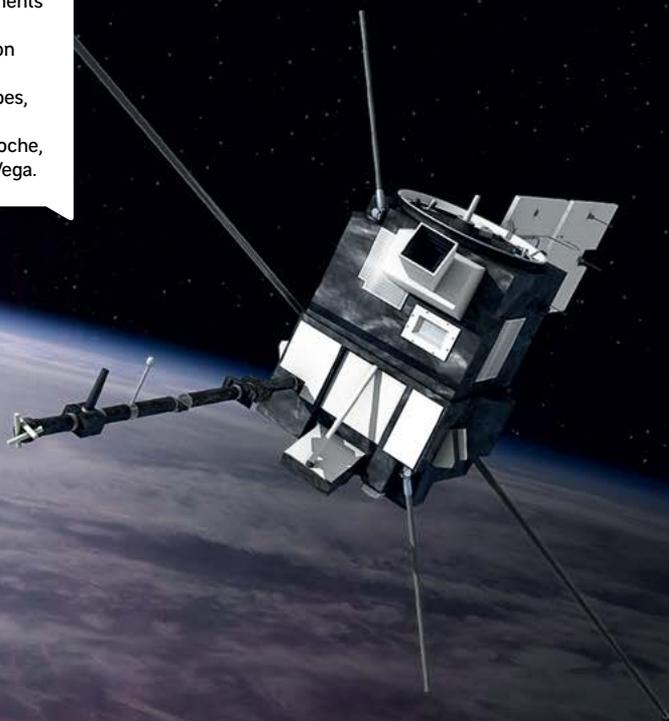
JEAN-YVES LE GALL

PRÉSIDENT DU CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES

2020

TARANIS EN ROUTE POUR LE COUP DE FOUDRE

Novembre 2020 : le satellite Taranis est enfin prêt pour le voyage. Contrairement à son homonyme, le dieu celte, il ne va pas provoquer la foudre et le tonnerre mais analyser leur incidence sur les transferts d'énergie. Cette mission de science fondamentale a connu de nombreux rebondissements (cf. En actions p. 20-21) mais la détermination du CNES et de la communauté scientifique a eu raison de tous les aléas. À l'heure du confinement, le microsatellite est resté une priorité pour les équipes, qui ont finalisé sa préparation dans le respect des normes sanitaires. Son certificat d'aptitudes en poche, Taranis embarquera à Kourou à bord du lanceur Vega.



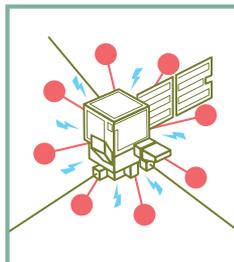


TLE UNE GRANDE FAMILLE FÉRIQUE

Elfes, sylphes, anges, farfadets, jets, lutins¹ ou même gnomes... la poésie du glossaire contraste avec la violence du phénomène. Différentes par leur nom, leur durée ou leur forme, ces manifestations atmosphériques lumineuses constituent la famille générique des événements lumineux transitoires (TLE²). Éphémères, elles se produisent entre le sommet des nuages d'orage et 90 km d'altitude. Présumée dès 1920, leur existence a été confirmée dans les années 1990. De nombreuses observations faites depuis le sol et l'espace ont permis de les répertorier. En forme d'anneaux lumineux en expansion, les elfes apparaissent à 90 km d'altitude et ne durent qu'une milliseconde; un orage actif peut en produire des milliers en quelques heures. Entre 40 et 90 km d'altitude, les sprites ont une structure filamentaire complexe et peuvent durer jusqu'à 10 millisecondes. Les jets bleus apparaissent à la partie supérieure des nuages d'orage et se propagent jusqu'à 50 km d'altitude. Occasionnellement, des jets « géants » peuvent se propager jusqu'à 90 km (cf. p. 17).

1. Sprites en anglais.

2. Transient Luminous Events.



1 M³

Comme tous les satellites Myriade, Taranis est un petit gabarit. Ses mensurations : 80 cm x 80 cm x 1 m 30 pour 175 kg. Dans ce tout petit volume se loge une exceptionnelle puissance (cf. Instants T p. 28-29).



TGF DE L'ÉLECTRICITÉ DANS L'AIR

L'observation des flashes de rayons gamma (TGF¹) est récente à l'échelle de la science; la première a été faite en 1994 par un observatoire des sources célestes de rayons X et gamma embarqué sur la navette américaine Atlantis, CGRO². Dans certaines conditions, l'orage provoque une bouffée de photons gamma; le phénomène est ultra-bref. Ces flashes ont été, un temps, considérés comme rares et concomitants à l'apparition des sprites. On sait maintenant qu'ils sont liés à l'activité électrique dans les orages. Faute d'équipements spécifiques, les études complémentaires du laboratoire spatial italien Agile³ (2007) ou du télescope spatial américain Fermi (2008) n'ont permis ni de confirmer totalement les hypothèses actuelles sur le mécanisme qui les génère, ni d'estimer leur nombre. Taranis apportera donc des compléments d'information sur leur apparition, leur mécanisme et leur impact radiatif, non mesuré à ce jour.

1. Terrestrial Gamma-Ray Flash (TGF).

2. Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO).

3. Astro-rivelatore gamma a immagini leggere.



L'ESSENTIEL



LSO

GRAND-PÈRE DE TARANIS



née 2001 : depuis dix ans, les phénomènes lumineux transitoires intriguent la communauté scientifique.

Programme conjoint CNES-CEA, LSO¹ propose alors de « voir au-dessus des orages » et d'apporter les premières mesures jamais effectuées au nadir (l'opposé du zénith). Confié à l'astronaute française Claudie Haigneré sur la mission Andromède, cet instrument pionnier est alors installé dans la Station spatiale internationale (ISS), une excellente plateforme d'observation pour ces phénomènes de haute atmosphère. Il était constitué de deux microcaméras pilotées par ordinateur, l'une localisant les éclairs, l'autre observant les sprites. Activé de nuit au-dessus des continents, LSO a transmis les premiers détails sur ces phénomènes (forme, éclaircissement, etc.) à la communauté scientifique internationale. Il a aussi servi de démonstrateur, validant le principe et l'équipement. En ce sens, il portait en lui le germe d'un projet de mission spatiale entièrement dédiée à la mesure de toutes les signatures électromagnétiques de ces phénomènes : Taranis !

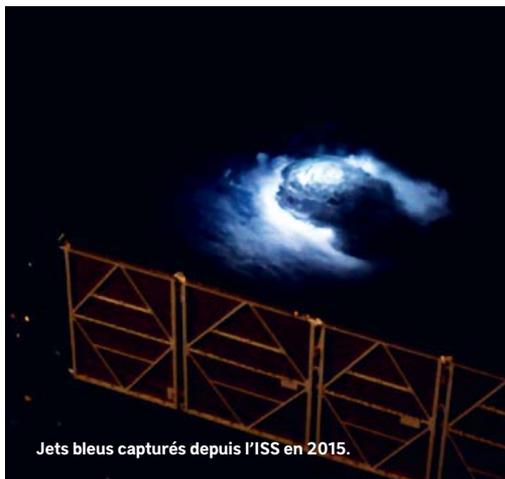
1. Lightning and Sprites Observations.

CLIMATOLOGIE

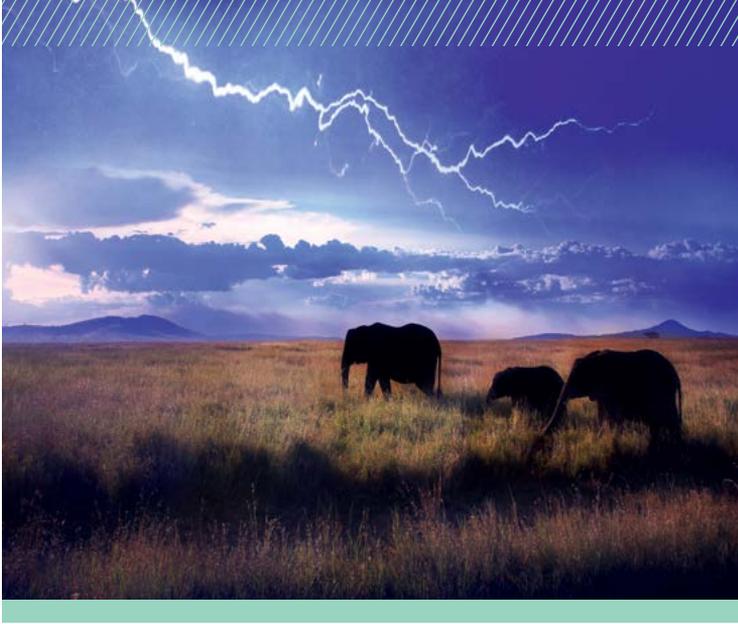
MIEUX COMPRENDRE POUR MIEUX PRÉVOIR



es événements lumineux transitoires (TLE) ainsi que les flashes de rayons gamma (TGF) sont observés dans toutes les régions du monde, partout où se produisent des orages. Mais faute de connaissances suffisantes, ils ne figurent pas dans la chaîne d'outils mis à la disposition des climatologues et météorologues. Ont-ils un impact sur les événements climatiques extrêmes qui se multiplient ? Si oui, leur modélisation permettrait de les intégrer, en temps réel, dans les prévisions. Taranis a beau être un satellite de recherche fondamentale, en contribuant à la connaissance de la machine thermique et climatique qu'est la Terre, l'exploitation de ses données pourrait déboucher sur des applications plus opérationnelles, comme la climatologie ou la météorologie.



Jets bleus capturés depuis l'ISS en 2015.



0,1-2 millisecondes

Les flashes de rayons gamma (TGF) peuvent produire plusieurs centaines de mégawatts, autant qu'un réacteur de centrale nucléaire... Suffisant pour en faire une source d'énergie ? C'est illusoire : fulgurants, ils ne durent que 0,1 à 2 millisecondes. Générés par des décharges électriques, les événements lumineux transitoires (TLE), eux, durent entre 3 et 10 microsecondes. Il s'en produit des millions chaque année dans le monde.

FOUDRE ENQUÊTE AU CŒUR DES DÉCHARGES



vec l'Amérique du Sud, le continent africain est une des régions les plus « foudroyées » au monde. La fréquence des jours orageux par mois peut varier de 20 à 25 pendant la période avril-octobre.

En 1993, alors que la connaissance des phénomènes transitoires est encore balbutiante, le CEA fait figure de pionnier : dans le cadre de l'année internationale de l'électrojet équatorial, il réalise des études expérimentales en Côte d'Ivoire. Rejoint par le laboratoire américain Los Alamos, il mène ses premières observations radar haute fréquence pour détecter la présence d'ionisation associée aux décharges à haute altitude au-dessus des orages. Il mesure les échos ionosphériques simultanément dans des fréquences différentes. Plusieurs échos de plusieurs centaines de millisecondes la nuit, et de 1 à 10 secondes le jour, sont observés. Leur analyse a confirmé que ces phénomènes sont généralement corrélés à une forte activité de la foudre. Une première étape !

10 000 K

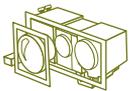
Au moment où il est visible, un éclair est un plasma à l'équilibre thermique qui peut atteindre des températures de l'ordre de 10 000 kelvins, soit plus de 9 700 degrés Celsius.

600 000 impacts

En France, on compte entre 300 000 et 600 000 impacts de foudre par an. Ils sont à l'origine de 15 000 incendies, 20 à 50 morts et plus de 20 000 têtes de bétail foudroyées. Source : ONU

2001-2018 : LES PROGRAMMES PRÉCURSEURS

OCTOBRE 2001



LSO
400 km d'altitude (France-Russie). Mesure des émissions lumineuses de sprites. Premières statistiques sur leur fréquence et leur origine.

MAI 2004



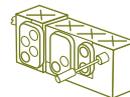
ISUAL
880 km d'altitude (Taïwan). Observation des TLE (heure et lieu d'apparition). Premier inventaire mondial de ces phénomènes.

JANVIER 2012



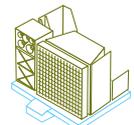
CHIBIS-M
510 km d'altitude (Russie). Étude de l'interrelation des processus transitoires d'ondes de plasma dans la foudre atmosphérique.

21 JUILLET 2012



JEM-GLIMS
400 km d'altitude (Japon). Étude des occurrences et mesure de la fréquence de la foudre dans la haute atmosphère.

AVRIL 2018



ASIM
400 km d'altitude (Europe). Étude et localisation des flashes de rayons gamma terrestres, des éclairs et des décharges électriques à haute altitude.

Campagne ballons
Strateole-2 à Mahé,
aux Seychelles.

OREO

UN BALLON DANS LA TOURMENTE



Le cœur des orages est inhospitalier ; c'est pourtant là, *in situ*, que pourraient être prises

les mesures les plus précises. Maître d'œuvre de Taranis, le CNES est aussi expert en ballons ; avec le LPC2E¹ et l'IRSN², il a conçu et prépare la mission Oreo³ pour observer le rayonnement énergétique dans les orages. Son but : utiliser des ballons-sondes légers pour amener une charge utile de 3 kg jusqu'à 35 km d'altitude, au-dessus des nuages d'orage. Oreo sera équipé de deux capteurs : l'un mesurera le champ électrostatique, le second intégrera deux scintillateurs rapides développés par la société Icohup pour



Dans la famille des ballons, il y a aussi le projet Stratelec et sa suite instrumentale embarquée sur les ballons stratosphériques de la campagne Strateole-2. Stratelec apportera des compléments de mesures sur les TGF et TLE. Corrélées à celles de Taranis et Oreo, elles seront d'autant plus intéressantes qu'elles porteront sur des périodes d'observation longues (3 mois) et un nombre important de ballons : Strateole-2 prévoit le lancement de deux fois vingt ballons en 2021 et 2024.

capturer les émissions à haute énergie (Gamma Ray Glows). Il sera lancé depuis le centre d'opérations ballons d'Aire-sur-l'Adour (Landes), à l'approche des déclenchements orageux. Oreo collectera des données tout au long de l'ascension, au-dessus

de l'orage et lors de la redescente. La première campagne de mesures devrait se dérouler en 2021.

1. Laboratoire de physique et de chimie de l'environnement et de l'espace (le LPC2E est une unité mixte de recherche dont les tutelles sont le CNRS, l'université d'Orléans et le CNES).
2. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.
3. Observation du rayonnement énergétique dans les orages.

ASIM

PLATEFORME AVEC VUE



est dans le cadre d'un appel à idées de l'ESA que l'expérience Asim¹ a été développée, en parallèle de Taranis. Techniquement, elle est conçue sur la base de deux caméras optiques. Trois photomètres complètent les mesures de variations de luminosité non observables par les caméras. Un détecteur traque rayons X et gamma. Ce dispositif d'observation a bénéficié d'une contribution européenne à large participation danoise. Asim ressemble à un appareil photo dérivé des

ancestrales chambres noires, mais il saisit, en rafales, des centaines de prises de vue qui sont ensuite centralisées numériquement en une image unique. Il bénéficie d'une situation privilégiée puisqu'il est installé sur l'une des plateformes extérieures du module européen Columbus de l'ISS. Ces plateformes sont dédiées aux « expériences exposées au vide ». Cette position sur orbite basse, avec vue sur la Terre à basse latitude, doit lui permettre de remplir sa mission : établir la relation entre les sursauts gamma terrestres, la foudre et les

décharges électriques à haute altitude. Et ce, en toute saison. Lancé le 2 avril 2018, Asim doit collecter des données en continu jusqu'en 2021.

1. Moniteur des interactions atmosphère-espace.





PIC DU MIDI

CHASSEUR DE SPRITES

Ses 3 000 m d'altitude donnent à l'observatoire du pic du Midi « pignon sur orage » et une légitimité certaine pour observer les événements lumineux transitoires depuis le sol. Depuis 2000, il accueille des campagnes scientifiques. En 2009, le chercheur en aérologie Serge Soula y a installé une caméra à très haute sensibilité, enregistrant *in situ* 50 images par seconde. Des caméras placées sur le plateau d'Albion (Alpes-de-Haute-Provence) ou dans le Puy-de-Dôme captent aussi d'autres images. Minutieusement « disséquées », étudiées, ces données livrent des informations essentielles sur les décharges lumineuses : heure d'apparition, durée, localisation, taille ou forme... autant d'éléments de compréhension des transferts d'énergie entre Terre et ionosphère. Mode opératoire de leur déclenchement, éventuels signaux avant-coureurs, influence sur la chimie de l'atmosphère, toutes les informations déjà recueillies et celles à venir seront aussi utiles pour la calibration et la validation des instruments de Taranis.

3000

Pilotée numériquement pour entrer en configuration lors de la survenue d'orages, la caméra du pic du Midi a enregistré pas moins de 3 000 sprites en dix ans.



SALLE BLANCHE

LA RÉALITÉ AUGMENTÉE REMPLACE LE PAPIER

Taranis va réaliser sa mission au-dessus des nuages. Avant de partir, il en aura rempli une autre, cette fois en salle blanche. Pendant la phase d'intégration, le CNES a en effet testé la pertinence de la réalité augmentée. Objectif : vérifier la performance de cet outil et son adéquation aux métiers liés à l'assemblage, à l'intégration et aux tests (AIT) spécifiques aux salles propres. Avec la réalité augmentée, la tablette tient lieu de plans papier : les éléments virtuels sont directement projetés sur le satellite. Ce processus facilite la tâche des intégrateurs, limite les risques d'anomalie et assure une meilleure rentabilité : réduction des phases intermédiaires, continuité entre la conception 3D et l'engin spatial... Demain, l'intégration pourra se faire à partir d'un seul fichier et optimisera encore le gain de temps et d'argent. Seul écueil, à ce jour il n'existe pas de format d'échange de données universel entre les logiciels de conception 3D et les solutions de réalité augmentée. L'expérimentation a donc nécessité des ajustements ; la start-up Diota a fourni une solution logicielle adaptée.



#COMMUNAUTÉ

Tous les jours, sur les réseaux sociaux, le CNES discute avec vous. Vous nous faites part de vos réflexions ou questions. Rejoignez la conversation !;)

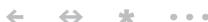


@METEOVILLES

Météorologiste sur #BFMTV et créateur de 19 sites de prévisions #météo expertisées par villes (<http://meteo-paris.com>, <http://meteo-lyon.net>, <http://meteo-grenoble.com>, etc.)



En 2019, Taranis sera le 1^{er} #satellite dédié à l'observation des phénomènes lumineux transitoires et des flashes gamma terrestres détectés au-dessus des #orages - Explications du CNES : <https://bit.ly/2K2NifM>
Reportage de France 3 : <https://bit.ly/213f7Tr>



@JY_LEGALL

Président du @CNES



Cayenne, aéroport Félix-Éboué. Arrivée du satellite Taranis en Guyane en vue de son lancement par le lanceur Vega VV17 en novembre. Taranis n'a jamais été aussi près des étoiles ! @CNES



@PRODIGIMA

Campagne photo / vidéo pour le CNES et Arianespace. Tests en salle blanche sur le satellite Taranis ;) Attention : l'essai dure moins d'1 seconde... il ne faut pas le rater !! Mission accomplie, comme toujours ^^ ++



@CLOSTERSPACE

Passionné de spatial (et surtout de son histoire), vidéaste et développeur sur Next Spaceflight !

Dites-vous que d'ici quelques mois, on aura un satellite en orbite capable d'imager directement les différents phénomènes se produisant au-dessus des orages ! Les elfes et les farfadets n'ont qu'à bien se tenir, Taranis arrive pour les chasser...





GRAND ORAL

**ROLAND
LEHOUCQ**

ASTROPHYSICIEN, AUTEUR, VULGARISATEUR,
Roland Lehoucq est un humaniste du XXI^e siècle.
Mû par l'envie de donner les clés et le goût des sciences,
il partage avec nous sa passion pour l'espace.



GRAND ORAL

Quels grands sujets de recherche vous ont occupé ?

Roland Lehoucq : De 1989 aux années 2000, je me suis intéressé aux émissions de haute énergie, notamment les rayons gamma et les supernovæ. Puis je me suis tourné vers la cosmologie et la topologie de l'Univers, à savoir l'idée qu'un espace a, avant sa géométrie, une structure de relations entre ses points. Par exemple, les surfaces d'une feuille plane, d'un cylindre et d'un tore (roue de vélo) ont la même géométrie car, en joignant les bords opposés d'une feuille, on obtient un cylindre, qui lui-même devient un tore lorsqu'on joint les deux cercles opposés. En revanche, ils n'ont pas la même topologie : la feuille possède une surface finie avec un bord, le tore propose une surface finie dont on ne rencontre jamais de bord.

Comment les missions spatiales vous ont-elles permis d'avancer dans vos travaux ?

R.L. : Je ne participe pas directement aux missions mais j'utilise leurs résultats. D'abord, car elles permettent de s'affranchir du filtre de l'atmosphère. Toute absorption de la lumière de hautes énergies se produit dans l'atmosphère. Il est parfois

possible de les observer en ballon mais les meilleures observations viennent de télescopes spatiaux comme Sigma, Integral ou Fermi. Ensuite, les missions spatiales jouent un rôle crucial pour obtenir des données précises sur de longues durées et dans des longueurs d'onde difficilement accessibles depuis le sol. Quand j'ai dû utiliser le rayonnement électromagnétique du fond diffus cosmologique pour travailler sur les questions de topologie de l'Univers, les données satellite, notamment de WMAP (américain) et Planck (européen), étaient incontournables.

La mission spatiale Taranis pourrait-elle apporter des éléments de réponse en astrophysique ?

R.L. : Cette mission fait véritablement le lien entre l'astrophysique et l'étude de l'atmosphère de la Terre : les techniques spatiales permettent de bénéficier des avancées d'un domaine pour en observer un autre. Pour la petite histoire, c'est Victor Hess qui, en 1912, a découvert en montant dans un ballon que des particules venues de l'espace pénètrent dans notre atmosphère. Sans le savoir, il utilisait l'atmosphère comme un détecteur de rayons cosmiques. Nous avons alors compris que, dans les très hautes altitudes, notre atmosphère abrite de nombreux mystères électriques comme les farfadets, les elfes et les jets bleus. Avec Taranis, nous allons notamment voir les flashes de rayons gamma du dessus, eux qui sont invisibles du dessous. Je vais donc garder un œil attentif sur ses résultats pour voir si le déclenchement de ces

flashes peut être lié aux particules cosmiques qui frappent la Terre avec des énergies formidables.

Comment intéresser le grand public à des sujets aussi complexes que l'astrophysique ?

R.L. : L'enseignement et la vulgarisation sont des sujets qui me sont chers et dans lesquels je m'investis depuis vingt ans, auprès du grand public comme des grandes écoles et universités. Je n'ai pas de théorie, mais j'ai l'impression qu'il faut partager une passion et raconter une histoire, en l'occurrence celle de l'Univers. Or, à l'instar des dinosaures ou de l'apparition de la vie, les thèmes d'astrophysique tels que les trous noirs et la cosmologie sont naturellement attractifs, facilitant leur vulgarisation malgré leur complexité. Je pense enfin qu'il faut partager un « vécu » commun, raison pour laquelle j'utilise la culture populaire de science-fiction, diffusée par les films, les livres et les BD. Il s'agit d'amener le public à analyser certaines scènes en mettant en œuvre les mêmes mécanismes intellectuels que dans une démarche scientifique. Je propose donc au public une enquête miniature dans un monde simplifié, où l'on peut même parfois reconstruire une cohérence scientifique qui n'avait pas été imaginée par l'auteur !

En quoi est-ce important, utile ?

R.L. : Processus collectif et collaboratif, les sciences ne peuvent être l'œuvre d'une personne unique.

« Dans les très hautes altitudes, notre atmosphère abrite de nombreux mystères électriques. »



ROLAND LEHOUCQ

ASTROPHYSICIEN, AUTEUR, VULGARISATEUR

« Il est crucial de parler de la méthode scientifique pour expliquer comment l'on sait ce que l'on sait. »

Il me semble donc important de diffuser les connaissances brutes déjà acquises – les lois de Kepler, l'évolution des étoiles, les sprites, etc. – mais aussi de livrer un état actuel des connaissances scientifiques par ceux qui les font. Beaucoup plus important, qui plus est dans notre monde de réseaux sociaux où s'expriment pêle-mêle tous les modes de pensée, j'estime qu'il est crucial de parler de la méthode scientifique pour expliquer comment l'on sait ce que l'on sait. Par ailleurs, transmettre les connaissances aère l'esprit et permet de revenir avec une dynamique nouvelle dans nos activités. La vulgarisation est enfin une école d'humilité : spécialistes d'un sujet, sommes-nous assez « forts » pour expliquer au grand public les choses compliquées sur lesquelles nous travaillons ?

Selon vous, quel est le rôle des scientifiques en la matière ? Et celui du CNES ?

R.L. : Les scientifiques jouent un rôle prépondérant car ce sont les acteurs de la recherche, la source primaire des sciences. Ils transmettent leurs méthodes et connaissances au grand public ainsi qu'aux sources secondaires que sont les médiateurs scientifiques : les journalistes, les associations, les vulgarisateurs. Certains vidéastes scientifiques produisent un travail remarquable sur des modes de communication que ceux de ma génération ne maîtrisent pas, c'est tout à fait complémentaire et bénéfique. En tant qu'agence d'État, il est normal que le CNES participe à la diffusion des connaissances et à l'exaltation intellectuelle des Français. Il se doit d'être bienveillant pour, lui aussi, donner les clés d'accès et le goût de la connaissance.

Quelle est la prochaine mission spatiale que vous attendez ?

R.L. : Il y en a plein ! Je citerai en premier le JWST (James Webb Space Telescope), successeur du remarquable Hubble, puis Euclid, qui trouve son origine ici, au département Astrophysique du CEA. Cette mission internationale va s'attaquer à un grand mystère : produire une cartographie de la matière noire et de l'énergie noire, qui représentent à elles deux 95 % de la masse de l'Univers ! Enfin, à l'horizon 2030, Lisa sera

un spectaculaire engin pour détecter les ondes gravitationnelles. J'appelle aussi de mes vœux une mission pour savoir si, en partant demain, il serait possible de doubler la sonde Voyager 2 en vingt ou trente ans, sans propulsion nucléaire... Il semble que cela soit *a priori* possible mais il faudrait trouver à cette mission des objectifs scientifiques suffisamment forts pour qu'elle soit mise sur pied. Avis à la communauté !

PROFIL

1985

Entrée à l'École normale supérieure de Paris

1992

Entrée au CEA

2000-2010

Travaux autour de la topologie cosmique

2012

Élu président du festival de science-fiction Utopiales à Nantes

2019

Un astéroïde est baptisé Lehoucq en hommage à son travail de diffusion des sciences



EN IMAGES



FEU D'ARTIFICE

Ce sprite rouge est un 14 Juillet à lui tout seul. Le 10 septembre 2019, l'infatigable chasseur de phénomènes lumineux Stéphane Vetter en a pris le cliché parfait. Faible luminosité, brève durée et haute altitude font de ces phénomènes transitoires imprévisibles des sujets difficiles à capturer sur pellicule. Ce sprite photographié depuis la presqu'île italienne d'Orbetello provient d'un orage survenant à 450 km de là en Méditerranée, entre la Corse et l'Espagne. D'une hauteur approximative de 50 km et d'une largeur quasi équivalente, il révèle ici sa structure complexe faite de « tubes fluorescents » et de terminaisons en filaments, ou « streamers ».

Sa couleur particulière résulte de l'ionisation des molécules de diazote atmosphérique.



EN IMAGES



ÉCLAIR D'UN AUTRE MONDE

Un cadeau du ciel ! En mars 2015, Elka Liot et Muscapix Gregory Moulard ont capturé ce gigantesque jet bleu à Saint-Barth (Antilles françaises). L'image est aussi rare que le phénomène. La première de ces manifestations naturelles a été détectée en 2001. À ce jour, une dizaine seulement ont été documentées et répertoriées à travers le monde. Alors qu'un éclair de foudre classique parcourt au plus 10 km, ces jets bleus se propagent de 40 à 50 km au-dessus des orages, atteignant parfois 70 km. Lorsqu'ils sont géants, ils peuvent aller jusqu'à 90 km et durer plusieurs centaines de millisecondes.



EN CHIFFRES

1 000

Produits par des avalanches d'électrons, les rayons gamma terrestres se révèlent très nombreux.

Il se produirait jusqu'à 1 000 flashes par jour ! Ils dérivent des énergies très élevées qui peuvent atteindre 40 mégaelectronvolts (MeV).

Record



Qui bat le record du plus grand nombre d'orages au monde ? La ville et le lac de Maracaibo, au Venezuela ! Là-bas, on compte 150 jours d'orage par an (tous les jours de mai à septembre). Les orages durent l'équivalent de 10 heures par jour et on enregistre jusqu'à 280 éclairs par heure !

Télé commande

Le CNES veut rendre les télétransmissions entre un satellite et une station-sol plus réactives.

En lien avec la Dirisi¹, il a conçu le projet HFPE, inspiré d'une technologie déjà éprouvée : la transmission en bande haute fréquence (HF). Embarqué sur Taranis, HFPE validera à la fois le principe et la faisabilité de ces transmissions. Il contribuera à établir des cartes de bruit HF en vol et améliorera la compréhension des processus de propagation des ondes. Atout supplémentaire : son emport n'a demandé aucun équipement spécifique : l'antenne IME-HF (cf. Instants T p. 28-29) se chargera de capter, pour lui, les signaux propagés dans et à travers l'ionosphère.

1. Direction interarmées des réseaux d'infrastructure et des systèmes d'information.

Big Brother

Composé de microcaméras et d'un boîtier électronique interfacé avec les plateformes Myriade, le poids plume (550 g !) Eyes (Ensemble d'yeux électroniques pour satellite) constitue un service de surveillance inédit. Cofinancé par le CNES et développé par Eremis¹, ce « passager » de Taranis surveillera le déploiement des antennes du microsatellite, mais pas seulement : Eyes peut assurer un monitoring complet des équipements durant toute la durée de vie du satellite grâce aux images mensuellement prises par ses trois caméras embarquées. Chocs, vibrations, cycles thermiques... Eyes a été qualifié pour fonctionner dans des conditions extrêmes. Autre atout : il a été conçu à partir d'éléments « sur étagère », en particulier des microcaméras commerciales.

1. PME toulousaine spécialisée en équipements électroniques.

10

IMAGES/S

Avec l'instrument MCP, ensemble de microcaméras de Taranis, les scènes d'orage pourront être imagées à raison d'environ 10 images par seconde, et les éclairs localisés.



LE CNES EN ACTIONS

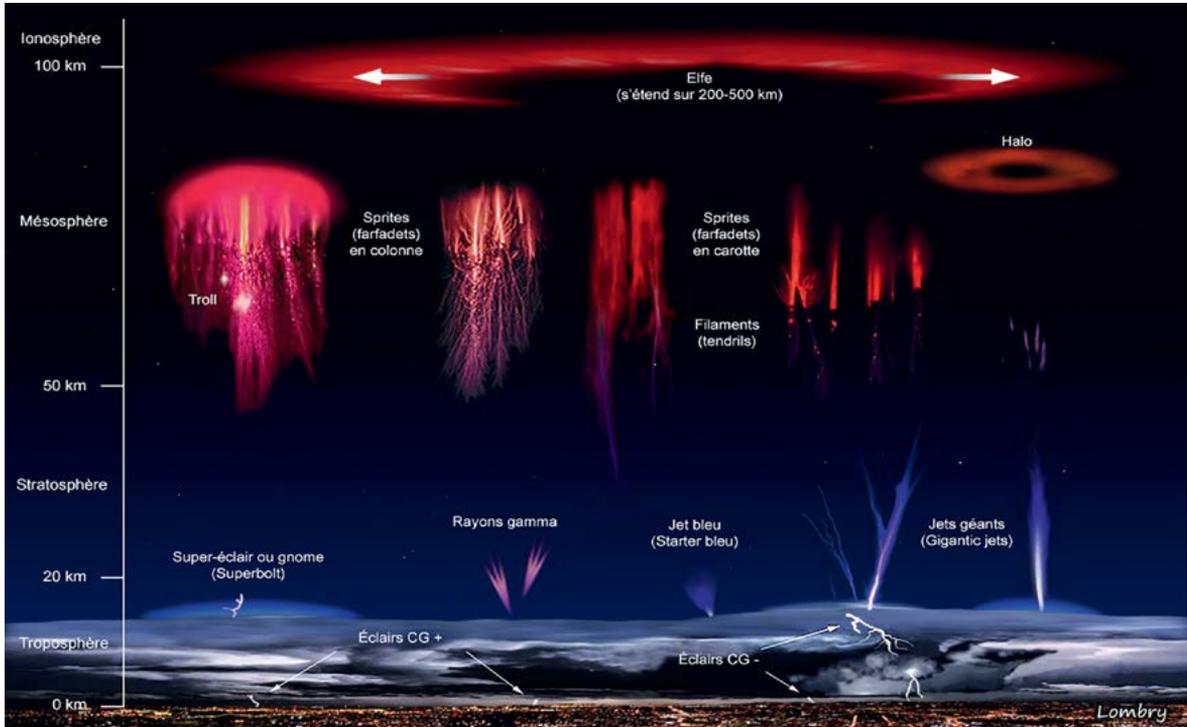
TARANIS

ENQUÊTE AU CŒUR DES ORAGES

À L'AUTOMNE 2020, LE MICROSATELLITE 100 % FRANÇAIS TARANIS PARTIRA À LA DÉCOUVERTE DE PHÉNOMÈNES ORAGEUX QUI FASCINENT LE MONDE ENTIER. UNE MISSION D'EXCEPTION QUI N'A D'AUTRE VOCATION QUE DE PERCER LES SECRETS LES MIEUX GARDÉS DE LA HAUTE ATMOSPHÈRE.



LE CNES EN ACTIONS



Le CNES vous propose de visiter les différentes couches qui composent notre atmosphère dans une vidéo à retrouver au fil des pages de la version numérique du *CNESmag* et sur la chaîne YouTube du CNES. À l'issue de ce voyage de trois minutes, troposphère, stratosphère et thermosphère n'auront plus de secret pour vous.

Pour les Gaulois, le dieu Taranis déclenchait tonnerre et éclairs. La communauté scientifique, elle, veut en savoir plus non pas sur les orages, mais sur leur « face cachée », siège de transferts impulsifs d'énergie. Avec Taranis, on pourra enfin observer « le dessus » des nuages. Mais il aura fallu temps, expertise et conviction pour que la mission voie le jour.

DES DÉBUTS BALBUTIANTS

C'est seulement en 1989 que des universitaires du Minnesota découvrent par hasard, dans un ciel d'orage, d'étranges flashes lumineux en testant la sensibilité d'une nouvelle caméra. Cette « photographie » de sprites depuis le sol fait l'effet d'un coup de tonnerre pour la science. Cinq ans plus tard, ce sont



ans

Le centre de contrôle gère les satellites des filières Proteus et Myriade pendant toute leur durée de vie. Pour l'ensemble de la flotte suivie, le temps cumulé des années d'exploitation atteint environ 97 ans.

des flashes gamma et X qui sont mis en évidence. Depuis, ces phénomènes impulsifs, lumineux ou radiatifs font l'objet de recherches multiples. En France, le CEA s'intéresse dès 1993 à ces manifestations et à leur impact. Pour faire suite aux premières campagnes qu'il mène en Afrique avec un laboratoire américain (le LANL¹ – cf. L'Essentiel p. 11), il contacte le CNES dans le cadre d'un appel à projets de recherche. Naît alors, en 1999, le projet d'une mission dédiée à « l'étude approfondie du couplage atmosphère-ionosphère-magnétosphère lors des orages atmosphériques ». En décembre 2000, à Arcachon, le séminaire de prospective scientifique du CNES entérine l'idée et engage une étude préliminaire. Les plateformes Myriade se préparent à accueillir ce type de mission : le projet Taranis prend forme. Dès lors, ni



110
M€

C'est le coût total de Taranis, pris en charge par le CNES. Si l'intérêt scientifique prime, la Défense nationale pourrait aussi tirer profit de certaines données. À ce titre, Taranis a pu bénéficier des crédits du « programme 191 », une dotation spécifique allouée aux recherches pour des applications duales, c'est-à-dire à la fois civiles et militaires.

idées, ni expertises ne manquent. Ce qui fait défaut, c'est le financement !

Conçu dans l'enthousiasme, le projet sera mis en stand-by pendant trois ans avant d'être relancé au printemps 2004 dans une perspective de coopération internationale avec le LANL. Mais... faux espoir ! *In fine*, le programme est jugé intéressant mais pas prioritaire. Une équipe américaine du laboratoire de physique appliquée de la NASA (APL²) prend alors le relais mais, à son tour, échoue à obtenir le financement nécessaire. Et bis repetita ! En attendant « meilleure fortune », Taranis repart dans les cartons.

UN PROGRAMME 100 % FRANÇAIS

De défections en déconvenues, le projet s'organise tout de même avec de nouveaux partenaires. « *Le véritable démarrage a lieu fin 2010, quand le CNES engage le programme avec le financement nécessaire. Ce volontarisme a été décisif* », constate Christophe Bastien-Thiry, chef de projet Taranis au CNES (cf. Rencontres p. 32). Le 9 décembre 2010, le projet est officialisé par le Conseil d'administration. Dans cette nouvelle configuration, la mission devient 100 % *made in France*, l'axe scientifique étant développé par des laboratoires également français. En plus du CEA, le LPC2E s'engage fortement ; il assure la maîtrise d'œuvre du développement de la charge utile et d'une partie du centre de mission scientifique. L'Institut de recherche en astrophysique et planétologie (Irap), le Laboratoire atmosphères,



Arrivée à Cayenne (Guyane) du satellite Taranis à l'aéroport international de Félix-Eboué le 24 septembre 2020.



LE CNES EN ACTIONS

milieux, observations spatiales (Latmos) et le Laboratoire astroparticule et cosmologie (APC) contribuent à la charge utile. Taranis intégrera finalement quelques participations étrangères marginales, celles de l'Université de Stanford et du Goddard Space Flight Center (États-Unis), de l'Institut de physique atmosphérique de l'Université Charles (République tchèque) et enfin du Space Research Centre de l'Académie des sciences polonaise.

UN ENGAGEMENT SANS FAILLE

Le CNES assurera la prise en charge financière du programme. Son engagement budgétaire volontariste est aussi l'une des singularités de Taranis : habituellement, la politique spatiale française se développe dans un cadre multinational, soit au sein de l'Agence spatiale européenne soit dans des contributions à des projets internationaux. Les programmes nationaux se font rares. L'implication du CNES sera donc sans faille. La quasi-totalité des services techniques du Centre spatial de Toulouse (CST) aura mobilisé ses forces vives pendant plus de quinze ans pour ce programme. Au Centre spatial guyanais (CSG), en novembre 2020, Taranis embarquera à bord d'un lanceur Vega. Ce lancement marquera une première technologique mondiale mais aussi une belle victoire sur l'adversité.

1. Los Alamos National Laboratory.

2. Applied Physics Laboratory.



million

Les centres de contrôle du CNES génèrent un volume d'activités variées et difficilement quantifiables.

En moyenne chaque année, 1 million de commandes sont envoyées vers les satellites grâce à 20 000 passages au-dessus des stations sol du réseau multi-missions du CNES.

Centres de contrôle



SURVEILLANCE À QUATRE MAINS

Comme pour tous les satellites scientifiques en orbite basse, la surveillance et le contrôle de Taranis seront assurés au CNES Toulouse au sein du centre de contrôle de la filière Myriade. Il faut en effet pouvoir fournir les données attendues et minimiser les interruptions de la mission.

En cas d'anomalie à bord, le centre de contrôle reconfigure les équipements. En cas d'alerte sur un risque de collision, il met en œuvre des manœuvres de réduction du risque. Mais Taranis n'est pas le seul point focal de ces équipes : depuis l'adoption de la loi sur les opérations spatiales (LOS), les centres de contrôle du CNES en assurent la mise en application pour lutter contre la prolifération de débris spatiaux. En revanche, c'est le Centre de mission scientifique Taranis (CMST), hébergé au LPC2E d'Orléans, qui exploitera les résultats scientifiques pour les mettre à la disposition de la communauté internationale. C'est lui qui effectuera également les plans de programmation des huit instruments de la charge utile.



LE CNES EN ACTIONS

Charge utile

UN LABORATOIRE D'EXCELLENCE

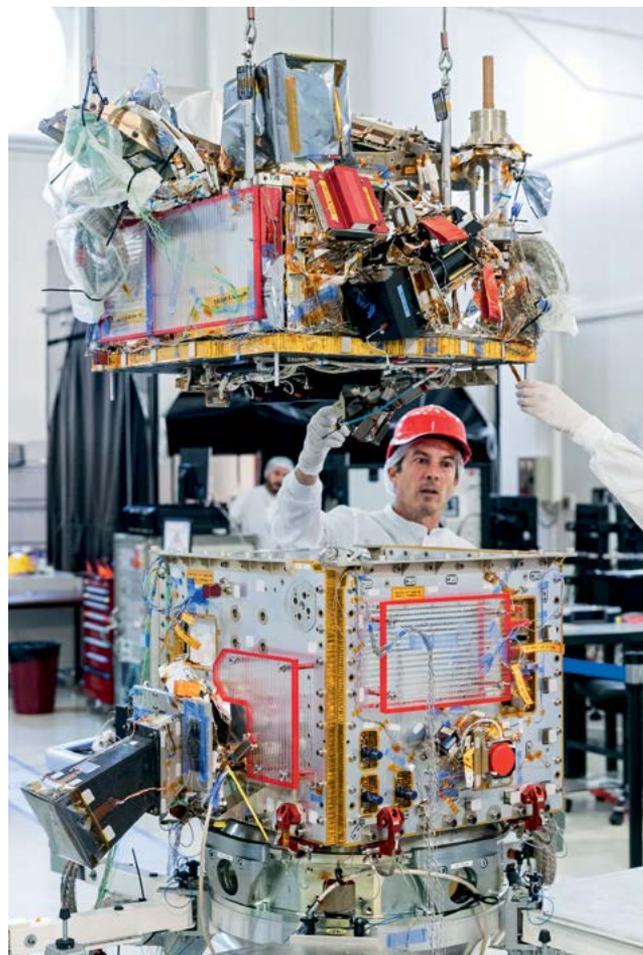
Chasser sprites, elfes et autres transferts d'énergie au-dessus des nuages est un vrai défi. Pour les photographes, le challenge est artistique. Pour les scientifiques, il est ailleurs, dans le décryptage minutieux de ces mystérieux tumultes atmosphériques.



La connaissance des phénomènes lumineux liés aux orages a progressé au fil des observations. Au sol, la France mène des campagnes régulières depuis les années 2000 au pic du Midi. Les expériences LSO (2001) puis Asim (2018) depuis la Station spatiale internationale traquent sylphes et éclairs. Enfin, certaines missions spatiales comme Formosat-2 (2004-2016) pour les événements lumineux transitoires (TLE) ou Rhessi (2001-2018), Agile (2007) et Fermi (2008) pour les flashes de rayons gamma (TGF) ont déjà apporté quelques pierres à l'édifice.

UNE MISSION AMBITIEUSE

En dépit de ces données (ballons, spatial, radar), les informations disponibles restent parcellaires. Faute d'équipements suffisamment rapides et spécifiques, certaines données cruciales font toujours défaut. « *Ce que l'on voulait, c'était pouvoir récupérer toutes les données qui nous manquent pour répondre aux questions encore en suspens sur les TLE et les TGF*, explique Jean-Louis Pinçon, du LPC2E, responsable scientifique de cette mission. *Or ces événements sont imprévisibles ; il nous fallait donc disposer dans l'espace d'un véritable laboratoire capable d'identifier toutes les signatures physiques associées à ces phénomènes et de centraliser les données correspondantes.* » Si Taranis fait figure de première mondiale, c'est parce qu'il propose justement ce « tout-en-un », à savoir l'identification simultanée des signatures optiques, X, gamma, électroniques et électromagnétiques. « *C'est une mission ambitieuse par le nombre d'instru-*



Assemblage de la plateforme Myriade et de la charge utile du satellite Taranis en salle blanche au Centre spatial de Toulouse.



LE CNES EN ACTIONS

ments embarqués et par la couverture du spectre physique, qui va du visible, au radiatif en passant par des photons gamma », précise Christophe Bastien-Thiry, chef de projet CNES.

UNE CONCEPTION PLUS QU'INGÉNIEUSE

Dans son apparence, déjà, Taranis est atypique : il a troqué le « mylar » alu ou doré, ce matériau qui recouvre traditionnellement les satellites, pour une peinture spéciale noire et blanche. Le détail n'a rien d'esthétique. Il s'agit d'une part de ne pas modifier le champ électrique qui l'entoure et, d'autre part, d'éviter toute réflexion lumineuse susceptible de perturber les capteurs optiques de la mission. Moins visible, son atout majeur réside dans la conception originale de sa charge utile. Elle cumule huit instruments¹ qui seront exploités comme un seul grâce au bloc électronique Mexic, la vraie plus-value de Taranis ! Ce cerveau cumule les responsabilités : il alimente les instruments et gère la charge utile, met en œuvre la stratégie de déclenchement lors d'un événement, synchronise les instruments et assure même le transfert des données sélectionnées vers la mémoire de masse (cf. Instants T p. 28-29). Concrètement, la cohabitation des instruments dans un format XS n'a pas été simple. Microsatellite de la

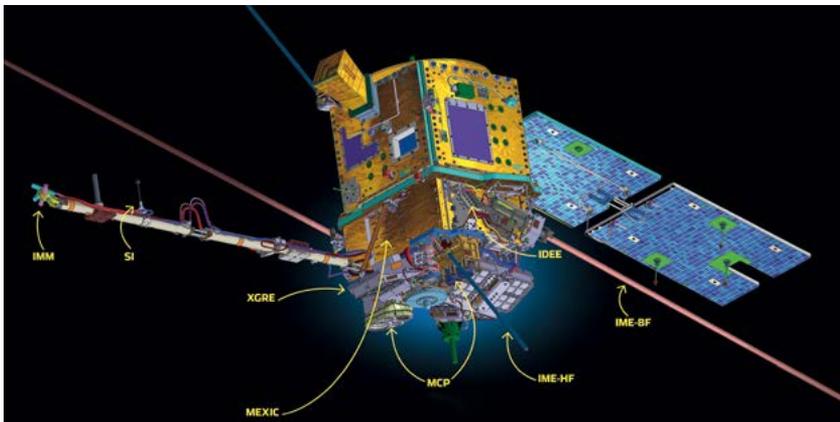


heures
Sur son orbite héliosynchrone basse d'une période de 100 minutes, Taranis va couvrir en 36 heures l'intégralité de la planète. L'intelligence à bord triera automatiquement les données enregistrées et transférera 4 Go de données par jour.

filrière Myriade, il n'offre à la charge utile qu'un volume restreint (moins d'un mètre cube) ; la conception du laboratoire a donc demandé des trésors d'ingéniosité aux équipes du CNES. Pour rendre possible l'interface unique entre le « cerveau », la charge utile et la plateforme, tous les instruments ont dû être orientés vers la Terre. Pour intégrer cette contrainte supplémentaire et agencer ce laboratoire dans un mouchoir de poche, les équipes ont eu recours à la conception assistée par ordinateur (CAO).

UNE ATTENTE FÉBRILE

Pendant deux à quatre ans, Taranis va scruter, en particulier, les régions où l'activité orageuse est intense et où la probabilité d'observations d'événements lumineux transitoires (TLE) et/ou de flashes de rayons gamma (TGF) est élevée. Si le programme est national, c'est bien la communauté scientifique internationale qui attend avec impatience ses résultats. Chimie et physique de l'atmosphère, environnement, climatologie... dans de nombreux domaines, Taranis sera source de révélations. Lesquelles, et comment les exploiter ? Un groupe de travail vient de se constituer avec la ferme intention d'animer une communauté élargie. Ils s'occupera de la diffusion et de l'exploitation des données, de la validation et de la publication des principaux résultats. Il quantifiera aussi l'impact potentiel des TLE et TGF sur la physique et chimie de la haute atmosphère et, si cet impact est significatif, réfléchira à la prise en compte de ces phénomènes dans des modèles de climatologie. La mission n'est pas une fin en soi ; elle ouvrira sans doute la voie à de nouvelles investigations.



La gestion centralisée et l'inter-opérationnalité des huit instruments de Taranis est une première (cf. Instants T p28-29).

1. Microcaméras et photomètres, détecteurs X et gamma, détecteurs d'électrons de haute énergie, antennes électriques et magnétiques.



LE CNES EN ACTIONS



Myriade

PETITE PLATEFORME, GRANDE CARRIÈRE

Taranis est l'héritier exemplaire de la filière Myriade, créée au CNES à la fin des années 1990 pour servir la science. Ce microsatellite en est, à ce jour, l'avant-dernier utilisateur. Chronique d'une fin annoncée.



En 1996, les pratiques spatiales sont encore aux engins de plusieurs tonnes. À la demande de la communauté scientifique, le CNES innove avec Proteus¹, une plateforme pour des minisatellites de 500 à 700 kg en orbite basse. Jason (océanographie), Calipso (nuages et aérosols), Corot (exoplanètes) ou Smos (salinité des océans) seront autant de programmes phares. En 1998, le CNES s'appuie sur les atouts de la miniaturisation pour créer une nouvelle filière : Myriade. « Cette nouvelle gamme de plateformes sert les missions poids léger de 120 à 150 kg et facilite l'accès à l'espace à moindre coût », remarque Philippe Landiech, chef du projet MicroCarb. Sur une structure standard de 60 cm x 60 cm x 80 cm, Myriade bénéficie d'une réduction du poids, des coûts et de l'énergie consommée. Sans être figée, la configuration prévoit un certain nombre de fonctionnalités standard, qui laissent



LE CNES EN ACTIONS

les équipes disponibles pour le cœur de mission et les spécificités de ses instruments.

UNE FILIÈRE À SUCCÈS

Cette filière Myriade, le CNES va l'utiliser sur six missions scientifiques : Demeter, Parasol, Picard, Microscope, Taranis et MicroCarb. Chef de file dédié à la détection d'émissions électromagnétiques transmises par les régions de séismes, Demeter (2004) sera développé en cinq ans. Sur un autre terrain d'observations (volcans et tremblements de terre), il partage cependant quelques-uns des objectifs de Taranis : en apprendre plus sur les champs électromagnétiques et les perturbations ionosphériques. La filière Myriade n'aura pas servi que les intérêts scientifiques puisque, d'emblée, le CNES a associé les industriels au développement. Sous maîtrise ou comaitrise d'œuvre industrielle, les démonstrateurs Essaim ou Elisa, composés d'une grappe de quatre microsattellites, ainsi que les deux satellites Spirale seront construits pour le compte de la Défense. Myriade trouvera aussi des débouchés à l'export (Algérie, Chili, Vietnam) pour des applications institutionnelles. En 2010, dans le cadre du Programme d'investissements d'avenir (PIA) et avec le soutien de l'industrie², une variante, Myriade Evolutions, est développée pour des missions spécifiques. Cette plateforme modulable pour des satellites de 350 à 400 kg est utilisée au CNES pour une mission conjointe avec le DLR (agence spatiale allemande), pour la mission Merlin (mesure du méthane) et à l'export par l'industrie sur au moins deux satellites d'observation.

UNE FIN PROGRAMMÉE

Si aucune nouvelle mission n'est identifiée, le lancement de MicroCarb, en 2021, pourrait constituer le dernier acte de Myriade. Après vingt ans de bons et loyaux services, le modèle doit se renouveler. Le CNES s'inscrit dans une logique : celle de la miniaturisation. Avec autant de succès que les « micro », les nanosatellites sont aujourd'hui de fabuleux outils au service de l'investigation. Souples, légers, économiques, rapides à mettre en œuvre, interagissant, technologiquement matures... Leur capacité à porter des missions scientifiques ne fait aucun



Jet bleu pris depuis la plage de Saint-Barthélemy.



Taranis est le 19^e microsatellite de la filière Myriade.

Le 20^e et dernier sera MicroCarb, actuellement en cours de développement. Lancé en 2021, il mesurera les échanges de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

doute. En témoigne le développement des filières françaises Angels et Kineis.

La filière Myriade laissera derrière elle un héritage conséquent. Pour un faible volume, elle aura montré les grandes performances de ses plateformes en termes de capacités offertes à la charge utile (mémoires de masse, puissance, précision de pointage, télémétrie et traitement). Elle aura pleinement servi la science mais aussi la Défense avec des missions dont les durées de vie ont largement dépassé les espérances initiales. Elle aura contribué à la formation de nombreux jeunes ingénieurs et permis la montée en gamme de PME, sociétés de services et start-up. Elle aura enfin été précurseur dans la recherche de simplification des processus et dans l'utilisation de composants commerciaux.

1. Acronyme de Plate-forme reconfigurable pour l'observation, les télécommunications et les usages scientifiques.

2. Thales Alenia Space et Airbus Defence and Space.



MATIÈRE



Les joies de l'addition

CONTRAIREMENT AUX MÉTHODES DE FABRICATION TRADITIONNELLES, OÙ L'ON ENLÈVE DE LA MATIÈRE, LA FABRICATION ADDITIVE – OU IMPRESSION 3D – PROCÈDE PAR ADJONCTION DE COUCHES SUCCESSIVES À PARTIR D'UN MODÈLE NUMÉRIQUE. Pour en démontrer la fiabilité, le CNES a fait produire le support de l'un des trois senseurs solaires du satellite Taranis avec la technique du Laser Beam Melting, ou fusion par faisceau laser sur lit de poudre. Du haut de ses 12 x 10 x 13 cm d'aluminium, la pièce a enduré des vibrations spécifiques avant que les essais habituels au niveau satellite ne soient réalisés. Légèreté, bonne tenue selon les critères de raideur imposés par le décollage et les contraintes de l'environnement spatial, économie de matière, production de pièces à la géométrie complexe, délais de fabrication particulièrement courts... la fabrication additive s'affiche décidément comme une technologie d'avenir pour le spatial.

Support du capteur stellaire de Taranis réalisé en fabrication additive.



I N S T A N T S T



1

LES ONDES, TOUTES LES ONDES

Taranis est doté de deux antennes munies de capteurs spécifiques. La première va mesurer le champ électrique en basse fréquence. Conçue par le Latmos et le GSFC (États-Unis), IME-BF¹ inclut aussi une sonde ionique (SI) pour déterminer les fluctuations du plasma thermique. Une fois dans l'espace, elle se déploiera sur huit mètres. La seconde antenne œuvrera dans le domaine des hautes fréquences. IME-HF² a été développée par le LPC2E et le Space Research Centre de l'Académie des sciences polonaise. L'instrument de mesure du champ magnétique (IMM) du LPC2E et de l'Université de Stanford (États-Unis) détectera quant à lui des types spéciaux d'ondes électromagnétiques.

1. Instrument de mesure du champ électrique – Basse fréquence.
2. Instrument de mesure du champ électrique – Haute fréquence.

2

DE L'OPTIQUE À TOUS LES ÉTAGES

L'ensemble MCP¹ est composé de deux microcaméras et quatre photomètres. Il observera les éclairs et les événements lumineux transitoires (TLE) qui se produisent dans la haute atmosphère.

Objectif : les identifier et déterminer leur durée, leur luminosité à différentes longueurs d'onde, leur taille et leur emplacement par rapport à leur éclair « parent ». Il localisera aussi les régions sources dans le monde et distinguera les éclairs les plus forts. Responsable scientifique, le CEA a également bénéficié de la collaboration des universités japonaises de Tohoku et Riken.

1. MicroCameras and Photometers.



LA CHARGE UTILE DE TARANIS EST SUFFISAMMENT ROBUSTE POUR RÉSISTER AUX ÉMISSIONS ÉLECTROMAGNÉTIQUES. MAIS SURTOUT, LA GESTION CENTRALISÉE ET L'INTER-OPÉRATIONNALITÉ DE SES HUIT INSTRUMENTS PERMETTENT DE COUVRIR TOUS LES CHAMPS D'INVESTIGATION ATTENDUS. DÉMONSTRATION.

3

LES ÉMISSIONS RADIATIVES À LA LOUPE

Deux types d'instruments sont dédiés à la détection des rayons gamma et X. Le premier XGRE¹ doit distinguer électrons et photons, puis mesurer leurs dépôts d'énergie. Composé de trois détecteurs de rayons X et gamma, il a été réalisé par l'APC avec la collaboration de l'Irap. Il doit notamment dater chaque flash gamma terrestre (TGF) avec une précision de l'ordre de la microseconde. En collaboration, l'Irap et l'université Charles de Prague ont fourni l'autre instrument, IDEE², chargé de détecter et de caractériser les faisceaux d'électrons impulsifs montants et descendants.

1. X-Ray, Gamma-Ray et électrons relativistes.
2. Instrument détecteurs d'électrons énergétiques.

4

MEXIC, LE DEUS EX MACHINA

Derrière le nom exotique de Mexic¹ se cache le centre névralgique de la mission : le calculateur de bord auquel tous les instruments sont reliés. Pour centraliser les données, il est doté de deux boîtiers électroniques composés de huit analyseurs reliés chacun à un instrument. Il gère leur déclenchement, reçoit et décode les commandes, transfère les données vers la mémoire de masse... Il gère également l'interface avec la plateforme Myriade, via des cartes électroniques conçues par le CNES ou par les laboratoires. Il a été réalisé sous maîtrise d'œuvre du LPC2E avec le concours du Space Research Centre de l'Académie des sciences polonaise.

1. Multi EXperiment Interface Controller.



RENCONTRES

ÉLISABETH BLANC

Conseillère scientifique au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)

« Taranis était un challenge inouï, ce fut un grand bonheur de travailler avec les meilleurs »



La passion, ça vous prend parfois très tôt. **Élisabeth Blanc a passé 41 ans au Laboratoire de détection et de géophysique du département Analyse surveillance environnement du CEA.** Et en guise de retraite, elle y est conseillère scientifique depuis 2019. « *Je viens des premiers contreforts des Pyrénées où, déjà toute petite, j'étais fascinée par les orages, leur bruit, leur énergie ! Cette passion s'est décuplée grâce à la diversité des moyens d'observation qu'offre le CEA.* » De fait, Élisabeth Blanc compte parmi les chercheurs qui ont étudié les sprites à la fin des années 1990. **Et c'est bien elle qui est à l'origine de Taranis :** « *En 2000, lorsque le CNES m'a*

demandé si j'avais des idées de missions satellites sur une plateforme Myriade, j'ai proposé au séminaire de prospective scientifique de mesurer ces phénomènes très brefs qui dégagent une énergie semblable à celle des étoiles. ». L'intérêt des laboratoires comme du CNES fut immédiat. « *Au début, il a fallu trouver comment mesurer les sprites depuis le dessus. On a vite constaté que sur les caméras, leurs lueurs rouges se superposant aux éclairs, on ne distinguait rien ! Le défi suivant consistait donc à séparer les éclairs des sprites, ce qui a été résolu grâce à deux caméras dans des bandes spectrales différentes.* » Son objectif étant d'avoir une manipulation unique,

Élisabeth Blanc a ensuite proposé « un nouveau concept combinant plusieurs instruments pour tout mesurer en même temps : les éclairs, les sprites, les émissions électromagnétiques, les rayons gamma et les électrons de haute énergie. Nous avons pu le valider sur LSO (Lightning and Sprite Observation) à bord de la Station spatiale internationale (cf. L'Essentiel p. 8) ».

Également chercheuse associée à l'université de Versailles, Élisabeth Blanc attend déjà la suite de Taranis en se concentrant sur l'étude d'un réseau européen mutualisant divers moyens d'observation de l'environnement terrestre du sol jusqu'à l'ionosphère.



RENCONTRES

XAVIER DELORME

Chasseur d'orage

« L'orage est imprévisible. Lorsque culmine l'adrénaline, ce n'est plus moi le chasseur. »



L'instinct est le meilleur des guides. Celui de Xavier Delorme le mène inéluctablement à la rencontre des orages, qu'il traque parfois sur plusieurs jours. « Ce sont des phénomènes très localisés. Les modèles météo ont beaucoup évolué, les images radar et satellite ainsi que les données foudre sont très utiles, mais j'ai appris à chasser en observant », entame-t-il. Comment ? « À dix ans, j'ai commencé à faire des relevés météo quotidiens, que je notais dans un calepin et que j'illustrais grâce à l'appareil argentique de mon père. Jusqu'à ce qu'il m'explique comment faire des photos d'orage », se souvient-il. Les années passant, le jeune homme se révèle capable

de dénicher les orages et de prendre des clichés surprenants ; son travail attire l'attention. « De 2013 à 2016, j'ai collaboré avec Météorage, filiale de Météo France, qui me fournissait du matériel à chaque saison pour procéder à des relevés scientifiques sur toute la France et une grande partie de l'Espagne », relate-t-il. Lors de ses expositions photo, le chasseur d'orages se fait aussi conférencier, souvent interrogé par le public sur le changement climatique : « D'après mon expérience, les orages ne sont pas plus nombreux mais ils sont plus violents et pluvieux. Depuis trois ans, on constate cependant en France, en période de canicule, des orages qui s'apparentent à un

climat espagnol : secs, avec beaucoup d'éclairs mais peu de foudre. » Pour calmer le rythme effréné des traques, Xavier Delorme aborde aujourd'hui sa passion différemment, en simples randonnées plaisir, mais toujours avec son appareil photo. De Taranis, il attend désormais des statistiques : « Invisibles en journée, les phénomènes lumineux transitoires (TLE) constituent une branche mal connue qui concentre beaucoup d'hypothèses ! Taranis va nous permettre de voir ce qui se passe en continu, d'identifier les zones où les TLE se produisent, les impacts au niveau de la haute atmosphère et les phénomènes en cascade qui s'ensuivent ».

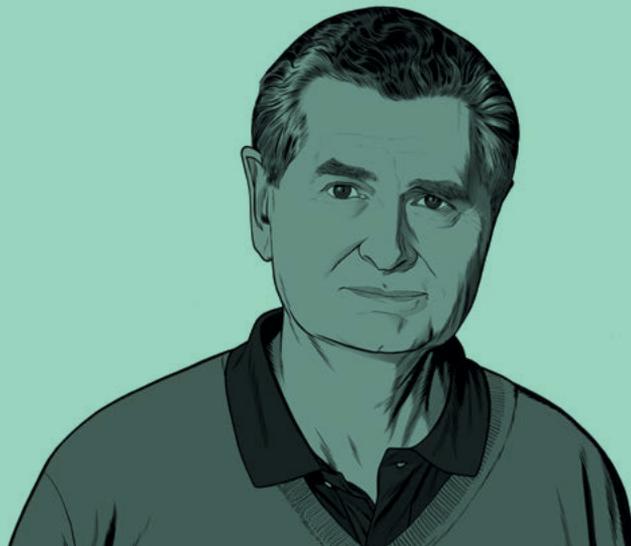


RENCONTRES

CHRISTOPHE BASTIEN-THIRY

Chef de projet CNES du satellite Taranis

« À l'instar d'un chef d'orchestre, le chef de projet s'assure que tout fonctionne ensemble »



Ingénieur généraliste de formation, plutôt teinté informatique, Christophe Bastien-Thiry a démarré sa carrière dans l'aéronautique, sur le logiciel de vol des Mirage 2000. Mais une question le taraudait : « Comment font-ils dans le spatial ? Un avion ça revient, pas un satellite... » Pour lever le voile, direction Toulouse : **Christophe Bastien-Thiry intègre le CNES en 1988.**

Trente-deux ans plus tard, son parcours traduit un homme de défis qui a fait le tour de la question : programmation des images Spot-4, responsable Intelligence artificielle puis Qualité image sur l'instrument Vegetation, ingénieur Bord pour le lancement d'Hélios 1B, chef de projet du

satellite franco-brésilien FBM... et enfin de Taranis, qui profite de cette expérience tous azimuts. « **Avec une vision complète du projet, je suis le garant de la tenue des performances de la mission par rapport aux exigences scientifiques, ainsi que du respect du budget et du calendrier.** Au-delà du management humain, je dois comprendre, avec l'aide des responsables techniques, les problèmes que l'on m'expose et leurs impacts, mais aussi trouver des compromis lorsque nécessaire. Notamment, il nous est souvent arrivé de devoir arbitrer entre les demandes scientifiques et les contraintes techniques du satellite. »

En sus des instruments conçus par les

laboratoires scientifiques, développer un système en orbite requiert un ensemble de compétences techniques Bord et Sol, que le CNES possède. Pour Taranis, le centre s'est fait maître d'œuvre, mobilisant depuis le début du projet plusieurs centaines d'ingénieurs et quasiment tous les métiers du CNES. Selon le chef de projet, « **la plupart des satellites scientifiques de la filière Myriade ont ainsi été menés en interne, nous propulsant en première ligne sur tous les sujets : spécifications, contrats, suivi technique, recettes, tests et essais, intégration du satellite, préparation du lancement... Des projets très formateurs qui renforcent notre crédibilité à l'extérieur.** »



JACQUES ARNOULD

PROMÉTHÉE RAISONNABLE

Ceux qui peuplaient la Gaule il y a deux millénaires craignaient, dit-on, que le ciel ne leur tombe sur la tête ; pour s'en prémunir, ils invoquaient le dieu Taranis. Aujourd'hui, nous en appelons à lui pour explorer les derniers secrets de notre haute atmosphère !

Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, il n'était pas rare de trouver sous la plume des écrivains et des érudits le terme d'extraterrestre pour désigner ce que nous qualifions aujourd'hui de surnaturel. Il aura fallu la naissance des techniques astronautiques et le début des voyages dans l'espace pour que le monde au-delà de la Terre commence vraiment à perdre son caractère sacré, sans que disparaisse pour autant son pouvoir de fascination sur l'esprit et les sens des humains. Nous le savons, « Taranis » n'est pas seulement un astucieux acronyme, mais aussi le nom de la divinité celte associée au ciel, à l'orage et au tonnerre. Aucun culte ne sera évidemment célébré, aucun sacrifice animal ou humain pratiqué, lorsque le satellite quittera le sol guyanais pour rejoindre l'espace ; pour autant, avoir choisi de baptiser ce satellite scientifique du nom de Taranis peut être lu comme un oracle de bon augure.

DE LA FASCINATION À LA RAISON

Quelle culture, en effet, ne recèle pas, dans son bric-à-brac mythologique, son patrimoine artistique ou sa production

de science-fiction, le projet de maîtriser les puissances gigantesques, contenues, retenues par et au-delà des nuages. Qu'il s'agisse de dérober le marteau de Thor ou de menacer l'ordre du monde à l'aide d'immenses paraboles susceptibles de concentrer les énergies cosmiques, l'esprit de Prométhée, le voleur du feu sacré de l'Olympe, n'a jamais cessé d'inspirer les rêves et les cauchemars des humains. Choisir le nom de Taranis plutôt que celui de Prométhée n'est donc pas anodin : à la prétention de maîtriser des forces, des énergies qui peuvent, aujourd'hui encore, se révéler hors de notre portée et de notre contrôle, paraît préférable la volonté d'en apprendre d'abord un peu plus sur elles. Si la fascination exercée par l'espace sur nos sens et nos esprits est un mélange d'attrait et de répulsion, d'émerveillement et d'effroi, le propos scientifique, parce qu'il allie curiosité et raison, peut nous permettre de jouir de cette fascination sans y être asservis. Que Taranis nous soit favorable dans cette noble tâche.



FRIPON

ATTENTION, CHUTE DE MÉTÉORITES !

Sous un patronyme léger, Fripon¹ cache un objectif sérieux. Ce réseau de 100 caméras et 25 antennes radio maillera le territoire français² pour repérer des météorites dès leur chute. Les récupérer permettrait de mieux comprendre la formation de l'Univers. Le réseau Fripon va aussi enregistrer des images du ciel 24 h/24. Ainsi, il pourra détecter des phénomènes très lumineux à très haute altitude (de 10 à 100 km) intéressants pour la communauté scientifique. Il est à l'étude pour la détection de TLE en support de la mission Taranis. Constitué de correspondants éducatifs, académiques, de clubs, de citoyens... ce réseau est aussi interactif : astronomes amateurs ou particuliers peuvent apporter leur aide en accueillant une caméra ou en suivant les données d'observation via le site <https://www.fripon.org>.

1. Fireball Recovery and InterPlanetary Observation Network.
2. L'une de ces caméras est en fonctionnement au CNES Toulouse.



FICTION

« The Endless ou la tentation du vide »

Les leurs des sprites auraient-elles le même pouvoir que le chant des sirènes ? Les « elfes » ont en tout cas séduit six étudiants de l'école internationale des métiers du cinéma d'animation ArtFX. Fascinés par ce phénomène découvert au hasard d'un reportage télé, ces jeunes designers ont fait des sprites les « têtes d'affiche » d'une fiction efficace de trois minutes : *The Endless ou la tentation du vide*. Subjugué par le phénomène mystérieux, le personnage central se laisse aspirer par un univers qui garde sa part de mystère. « C'était une manière originale de travailler sur des effets spéciaux, d'imaginer une atmosphère musicale sans tomber dans les standards de la fiction », racontent les étudiants. Réalisation léchée, accompagnement sonore lancinant et effets spéciaux particulièrement soignés : *The Endless* a d'ailleurs été sélectionné dans plusieurs festivals. Pour le plaisir, les auteurs mettent à disposition le making-of qui dévoile le processus de réalisation : travail sur plan, story-board, graphisme, maquette, bruitages, sons... un ensemble documenté, mais sans revendication scientifique qui sert largement la cause esthétique et prouve toute l'attractivité de ces phénomènes encore méconnus.

Un film à découvrir sur : <https://vimeo.com/223745445>

BELISAMA

LES LYCÉENS DANS LA BOUCLE

La radioactivité fait partie du programme du cycle terminal de l'Éducation Nationale. Dans le cadre d'un partenariat qui lie établissements secondaires, universités et laboratoires, le Laboratoire astroparticule et cosmologie (APC) coordonne un programme éducatif original : Belisama. Grâce à la mise à disposition d'un détecteur facile à utiliser, les lycées partenaires peuvent mener au sol des mesures de rayonnements gamma terrestres ou atmosphériques (TGF). Une fois traitées par les lycéens et leurs enseignants, ces mesures pourront être comparées à celles de Taranis lorsqu'il survolera l'établissement. Enfin, hors temps d'orage, les détecteurs Belisama permettront de mesurer la radioactivité au sol. Avant le lancement de Taranis, un des détecteurs déjà réalisés permettra d'affiner les calibrations de l'instrument XGRE (cf. Instants T p. 28-29).



EN VUE



NÉBULEUSES ET CACAO

LA PATIENCE POUR TOUTE VERTU

Regarder une vidéo de *Nébuleuses et Cacao*, c'est respirer une grande bouffée d'**oxygène**. Astrophotographe-vidéaste-scénariste-producteur-réalisateur-auteur, Corentin Kimenau est aussi poète naturaliste et globe-trotter. Il dédie sa vie à l'infini et la partage au fil de « web-documentaires ». Dans *L'Endroit exact de la solitude*, un film de la série « Lettres ouvertes à l'infini », le rôle-titre est attribué à l'ISS. Pas le module spatial que vous connaissez, mais l'infime point noir passant devant le halo du Soleil... La patiente et vertueuse attente d'un événement fugace, c'est la raison de vivre de Corentin. Après cette vidéo émouvante qui lui a valu le prix du jury au Frames Festival d'Avignon en 2019, le vidéaste relève un autre défi : photographier des sprites rouges. « *J'ai flashé sur ces phénomènes, explique-t-il. Les filmer est un challenge ; ça m'a pris dix mois !* » C'est toute cette longue aventure que Corentin Kimenau va verser au compte de *Nébuleuses et Cacao*. Entre-temps, il est passé par le CNES, à Toulouse, pour se documenter, rencontrer des ingénieurs, des chercheurs... « *Un film, c'est un cheminement. J'avais aussi besoin de savoir, d'apprendre et de comprendre pour accompagner la construction du film, écrire l'histoire.* »

À voir dès cet automne sur Youtube – *Nébuleuses et Cacao*

POSTER

TARANIS TÊTE D'AFFICHE

Pour sa troisième saison, le CNES a choisi l'illustrateur Mathieu Persan et l'agence Wat pour sa collection d'affiches rétrofuturistes dédiée aux projets phares de l'année. Ici, l'idée décalée du coup de foudre dans une mise en scène empreinte des codes cinématographiques, notamment *La La Land*, présente Taranis, en exclusivité mondiale, comme la dernière production à grand spectacle du CNES !



À VOIR

« Précédemment dans Taranis »

L'aventure Taranis a duré 15 ans. Vous avez manqué des épisodes ? Des séances de rattrapage sont possibles sur Youtube.

Vous pourrez suivre la préparation et partager les temps forts du programme :

La chasse aux elfes lumineux :

<https://www.youtube.com/watch?v=MgkEoHBLhRc>

À la recherche de la face cachée des orages :

<https://www.youtube.com/watch?v=HVnLLAsadal>

Circuit en salle « propre » : <https://www.youtube.com/watch?v=56KyxadKPsg>



PROTÉGER LE PERSONNEL NAVIGANT

Atmosphère et champ magnétique terrestre sont des boucliers naturels contre les rayonnements cosmiques. Mais la protection qu'ils confèrent diminue lorsque l'altitude augmente. L'enjeu de l'exposition est donc crucial pour les personnels navigants.

Les équipages « long-courriers », qui cumulent haute altitude de croisière (10 km environ) et exposition prolongée, sont particulièrement à risque. La trajectoire peut également constituer un facteur aggravant : l'exposition est plus forte près des pôles que de l'équateur. Quant à la carlingue de l'avion, elle n'a que peu d'effet protecteur. Depuis 1996, une réglementation européenne impose aux compagnies aériennes une surveillance individuelle renforcée du personnel navigant. En France, la DGAC¹, l'IRSN², l'Observatoire de Paris et l'IFRTP³ ont mis au point le premier système d'évaluation de l'exposition des personnels navigants : Sievert, un calculateur hébergé et opéré par l'IRSN, référent pour la radioprotection. Sont pris en compte les facteurs organisationnels (temps de travail, plan de vol, etc.) mais aussi les modulations induites par l'activité solaire (cycle solaire et éruptions). En 2014, une nouvelle version (SievertPN) a intégré de nouvelles contraintes réglementaires.

MIEUX SURVEILLER AVEC TARANIS

Les flashes de rayons gamma (TGF) étudiés par Taranis contribuent-ils significativement à l'exposition des personnels navigants ? En sa qualité d'employeur, la compagnie Air France s'est emparée de la question. En 2000, elle avait participé au développement de Sievert ; en 2014, elle avait accepté de tester les nouveaux protocoles SievertPN. Aujourd'hui, en lien avec l'IRSN, le CNRS et avec le soutien du CNES, elle s'intéresse aux investigations menées en matière de TGF et à leur impact potentiel sur les personnels navigants. Elle participe ainsi au financement d'un programme d'études ambitieux qui associera les données de Taranis à des simulations et mesures dans les orages. De quoi fournir de premiers éléments de réponse à la question du risque que comportent ces événements, et à son éventuelle prise en compte.

1. Direction générale de l'aviation civile.

2. Institut de radioprotection et de sécurité nucléaire.

3. Institut français de recherche et de techniques polaires.

**7**

En effectuant 7 vols aller-retour Paris-Tokyo, on reçoit un rayonnement équivalent à une exposition au rayonnement naturel de 27 mois à Paris, 16 mois dans le Limousin et d'environ 7 jours à bord de la Station spatiale internationale.