

Séminaire de **PROSPECTIVE**

Scientifique



Le Havre
8 au 10
octobre
2019

www.sps2019.com

SOMMAIRE

INTRODUCTION (p.5)

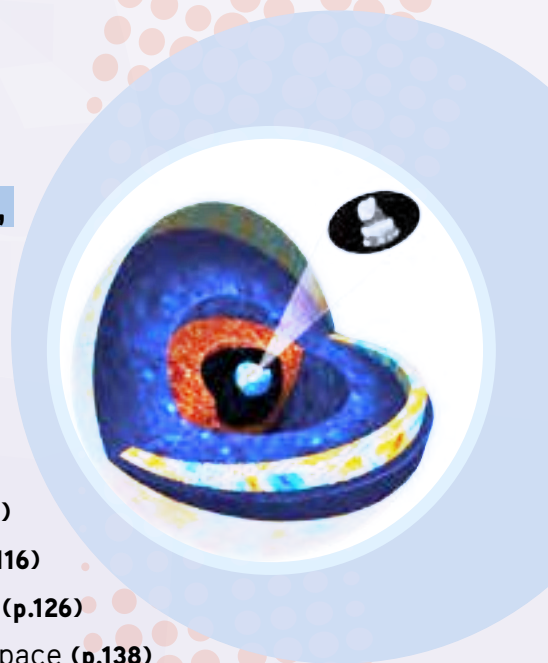
SCIENCES DE LA TERRE (p.9)

- Synthèse du TOSCA (p.10)
- Terre solide (p.24)
- Océan (p.34)
- Surfaces Continentales (p.44)
- Atmosphère (p.54)



SCIENCES DE L'UNIVERS, MICROPESANTEUR ET EXPLORATION (p.65)

- Synthèse du CERES (p.66)
- Physique fondamentale (p.76)
- Astronomie et astrophysique (p.86)
- Système solaire (p.96)
- Exobiologie, exoplanètes et protection planétaire (p.106)
- Soleil, héliosphère, magnétosphères (p.116)
- Sciences de la matière (p.126)
- Sciences de la vie dans l'espace (p.138)



GROUPES TRANSVERSES (p.147)

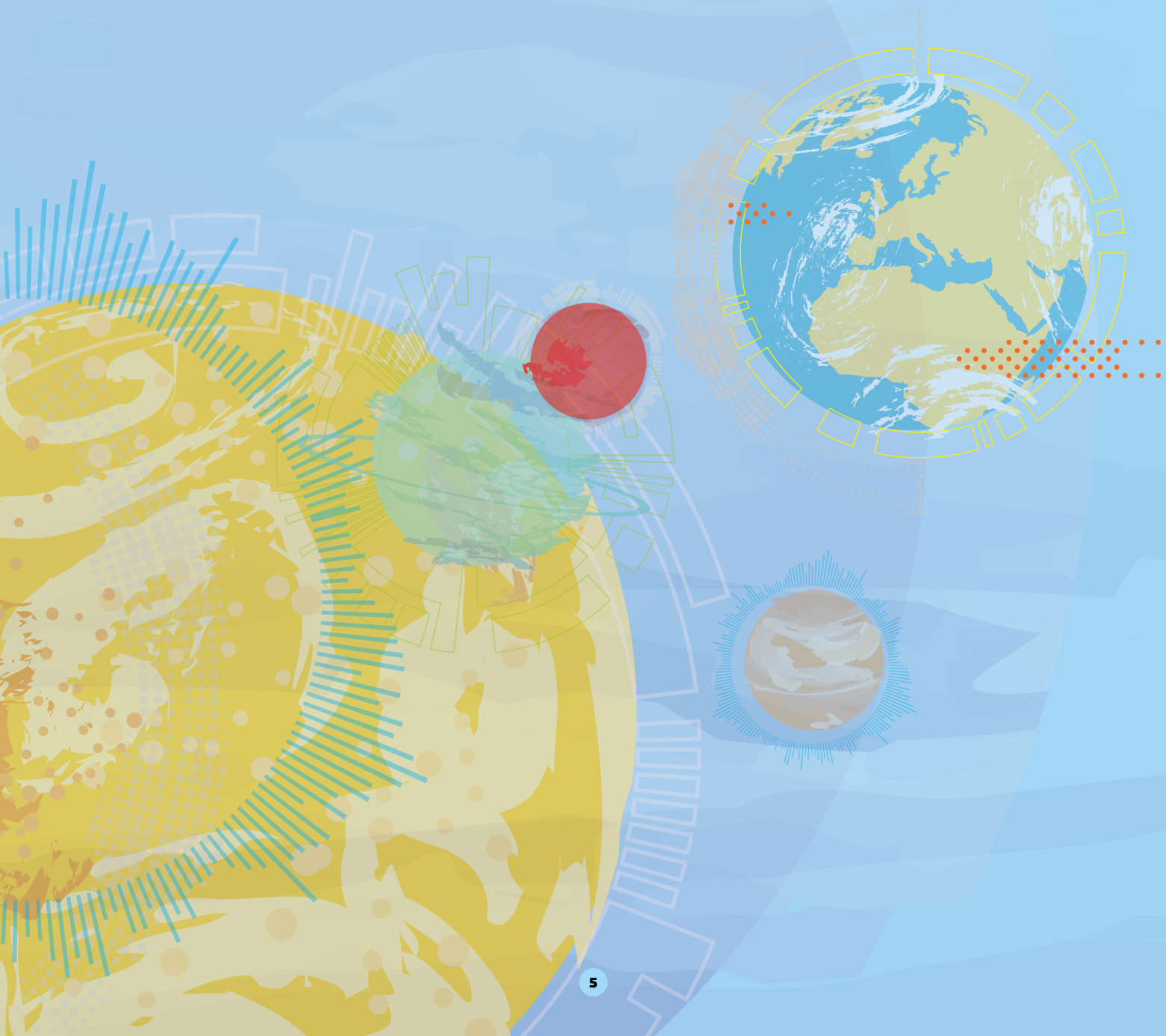
- Technologie (p.148)
- Newspace et nanosatellites (p.160)
- Numérique et données (p.172)
- Stratégie spatiale pour la science (p.182)

CONCLUSION DU CPS (p.199)

ANNEXES (p.203)

- Synthèse de l'appel à contributions (p.204)
- Audition des laboratoires (p.206)
- Synthèse des ateliers et restitution finale (p.208)
- Liste des participants (p.216)

INTRODUCTION



Le séminaire de Prospective Scientifique du CNES :

le spatial au service des connaissances, du citoyen et de l'inspiration

Le Séminaire de Prospective Scientifique (SPS) du CNES s'est déroulé au Carré des Docks au Havre du 08 au 10 octobre 2019, en présence de près de 300 délégués représentant la communauté des Sciences Spatiales françaises.

Cet événement de fréquence quinquennale est une étape essentielle pour le CNES et la communauté scientifique, puisqu'il scelle l'ultime étape de la réflexion prospective, engagée depuis le mois d'août 2018. Il nous permet de prendre, collectivement, la mesure du chemin parcouru depuis l'édition précédente de la Rochelle (2014), et nous projette au-delà de nos horizons quotidiens, de nos projets en cours, pour saisir la tendance des temps longs.

Dans les missions que lui confie l'Etat, le CNES soutient les Sciences Spatiales à travers différents leviers : ceux d'une agence de moyens, d'un centre d'expertise technique, d'un opérateur de recherche et de coopération. Ces modes d'intervention multiples les inscrivent au carrefour d'enjeux thématiques, technologiques, industriels, d'enjeux de souveraineté, de connaissance et de société. Une telle complexité requiert la permanence d'un dialogue stratégique entre le CNES et la communauté scientifique spatiale, qui s'exerce à travers le Comité des Programmes Scientifiques du CNES (CPS) dont la mission est d'éclairer le Conseil d'Administration du CNES sur la sélection et le suivi de ses programmes scientifiques.

Sous la responsabilité du CPS, le travail de prospective a mobilisé plus de 200 experts dans la communauté et au CNES. Outre l'analyse des 225 contributions reçues en réponse à l'appel à idées émis en août 2018, 17 groupes de travail ont produit des recommandations sur les différents volets des Sciences Spatiales. Des entretiens menés avec les principaux laboratoires spatiaux, des rencontres avec les organismes de recherche sont venus compléter cette analyse. Enfin, deux ateliers de consolidation ont rendu possible la diffusion des rapports intermédiaires de prospective dès l'été 2019, afin de permettre à la communauté scientifique de réagir en amont du séminaire. L'ensemble de ces travaux constituent le socle de ce rapport final, promis de par sa qualité à une postérité équivalente à ceux des exercices précédents de La Rochelle en 2014 et de Biarritz en 2009.

Je souhaite m'associer aux remerciements que le Président du CNES Jean-Yves Le Gall a prononcés lors de l'ouverture du séminaire, à l'adresse de tous les contributeurs (et à travers eux de l'ensemble de leurs organismes), des présidents des groupes de travail du CERES (Comité d'Evaluation sur la Recherche et l'Exploration Spatiale) et du TOSCA (Comité Terre Océan Surfaces Continentales Atmosphère) pour leur magnifique travail préparatoire, parachevant leur action permanente de conseil des instances scientifiques du CNES. Par ailleurs, le rôle des groupes de réflexion transverse consacrés aux ruptures technologiques, à l'usage des données, des nanosatellites, à l'élaboration d'une stratégie pour la Science a été fort justement mis en exergue tant leurs propositions ont aiguillonné la communauté des interlocuteurs thématiques traditionnels. Je n'oublie pas dans ces distinctions méritées, d'évoquer l'équipe des responsables thématiques et responsables de programmes de la Direction de l'Innovation, des Applications et de la Science du CNES, qui ont été vos interlocuteurs pendant toute la période de préparation, et qui continueront d'incarner cette relation privilégiée du CNES et de la communauté scientifique française. La Direction des Systèmes Orbitaux et la Direction du Numérique et des Opérations du CNES ont également contribué largement à la préparation de ce SPS, dans les différentes phases de réflexion et d'élaboration des recommandations ; qu'ils en soient chaleureusement remerciés. Enfin, rendons hommage à Christian Sirmain et Olivier La Marle qui, en lien étroit avec la Direction de la Communication, ont organisé minutieusement l'ensemble des travaux sous la Direction du CPS. La richesse et la qualité des débats doit énormément à l'action, souvent invisible, qu'ils ont menée avec enthousiasme, compétence et ténacité.

Le SPS du Havre a accompagné le passage de témoin entre l'équipe du Comité des Programmes Scientifiques (CPS) de Jean-Loup Puget, et la nouvelle équipe présidée par Gilles Bergametti. L'équipe sortante a exercé un mandat remarquable depuis 2014, sur une période féconde en termes de résultats et de décisions de programmes, pour la plupart en écho aux grandes priorités de la prospective précédente. Cette période 2014-2019 a également été marquée par les évolutions fortes de l'écosystème spatial : concrétisations de la doctrine du New Space, élargissement du nombre

d'acteurs internationaux, renouveau des ambitions de l'Humanité à reconquérir la Lune en prélude de l'odyssée vers Mars, avènement du programme européen Copernicus garantissant une continuité de mesures pour l'environnement, et engendrant une augmentation massive des volumes de données produites... Et puis la prépondérance au premier rang des préoccupations mondiales de la question climatique, pour laquelle le CNES et la France ont fait œuvre d'avant-gardisme avec les décisions de programme Microcarb (dédié à l'étude du cycle du carbone), Merlin (cycle du méthane), et la création du Space Climate Observatory (SCO) dans le sillage de l'initiative française du One Planet Summit de 2015.

Le nouveau CPS est constitué comme le précédent d'un collège de 12 personnalités scientifiques, représentatif d'un équilibre destiné à représenter au mieux les différents thèmes de la communauté scientifique des Sciences de l'Univers, des Sciences de la Terre, des Sciences de la vie et de la matière. Signe fort de la volonté d'assurer une représentation équilibrée de la communauté, sa constitution respecte strictement la parité hommes-femmes.

Les perspectives du nouveau quinquennat 2019-2024 s'annoncent tout aussi enthousiasmantes que le bilan du précédent. Les synthèses présentées par les présidents des différents groupes de travail, reprises dans cet ouvrage, recensent les grands sujets à aborder, parmi lesquels :

- Pour l'étude du système Terre, la nécessité d'une continuité des mesures actuelles, d'une amélioration de leurs performances (temporelle, spectrale, spatiale), d'acquisitions d'observables inédits, autour de thèmes qui nous ramènent presque invariablement à l'omniprésence de la question climatique, des changements globaux de notre planète et de ses ressources, et qui rappellent le caractère incontournable du segment spatial pour appréhender ces questions à l'échelle planétaire.
- Pour les Sciences de l'Univers et de la Matière, la perpétuelle quête des origines reste le moteur des propositions (origine de l'Univers, du système solaire, du système Terre et de la vie) : traces du Big-Bang, recherche des ondes gravitationnelles primordiales, retour d'échantillons martiens, ... sont quelques exemples de sujets au rendez-vous des prochaines années.
- Les Sciences de la Vie abordent quant à elles des questions en résonance directe avec les aspirations humaines à s'ancre durablement au-delà de l'orbite terrestre, plus franchie depuis 1972.

Pour concrétiser au mieux ce corpus d'ambitions scientifiques, il conviendra de progresser sur certains enjeux transverses, ciments indispensables à la construction de la connaissance scientifique. Gilles Bergametti en a énoncé les grandes lignes en fin de séminaire :

- Une implication plus soutenue dans la production de données à forte valeur ajoutée, appelant à une concertation entre les différents organismes nationaux et européens.
- Encourager la curiosité et l'ambition technologique autour de la miniaturisation de charges utiles modulaires, de leurs capacités à intégrer de l'intelligence à bord, des éléments commerciaux non spécifiques au spatial (COTS) pour réduire les coûts, du vol en constellation ou en essais pour ouvrir la voie à de nouveaux mesurables.
- Avoir une approche volontariste des partenariats tant internationaux qu'inter-organismes et universités : dans un contexte où la ressource publique est contrainte, cette dynamique est essentielle pour édifier « l'équipe de France du spatial », et porter dans un contexte globalisé les meilleures offres nationales.

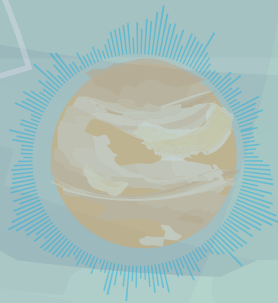
Les Sciences Spatiales dans leur acception la plus large jouent un rôle primordial pour l'essor et la visibilité des activités spatiales en France. Elles sont au cœur de la stratégie de programmation du CNES, et des positions françaises défendues au sein de l'Agence Spatiale Européenne et de l'Union Européenne. Le séminaire du Havre nous emporte vers une période passionnante et ambitieuse, au service des connaissances et des citoyens de l'Humanité. Et c'est bien à l'échelle de l'Humanité que doit se porter l'ambition de plus-value tant les sujets abordés, de la question climatique à celle des origines de l'Univers ou de l'odyssée vers Mars, nous projettent dans cette dimension universelle.

Je ne voudrais pas conclure sans évoquer les parts d'inspiration et de rêve chevillées à nos métiers. Mes collègues du CNES comme vous tous, peuvent en saisir la fulgurance dès qu'ils franchissent le seuil des écoles primaires, des collèges, pour transmettre quelques fragments de connaissance sur ces sujets qui n'en finissent pas d'habiter nos rêves. Les Sciences Spatiales sont la charpente de la machine à inspiration, grâce à vous, à vos travaux, et à votre inépuisable énergie à proposer au CNES des idées nouvelles.

Merci pour tout cela !

Jean-Claude Souyris,
*Directeur Adjoint de l'Innovation,
 des Applications et de la Science, CNES*

SCIENTES DE LA TERRE



SYNTHÈSE DU TOSCA

Cyril Crevoisier (président), Alain Dabas, Carole Deniel,
Juliette Lambin (responsable Terre-Environnement-Climat), Pierre-Yves Le Traon,
Anne Lifermann, Philippe Maisongrande, Mioara Manda, Jean-Louis Roujean,
Annick Sylvestre-Baron, Pierre Tabary, Cécile Vignolles, Olivier de Viron.

Le système Terre est un système complexe. Il est composé de sous-systèmes caractérisés par un grand nombre de processus et de paramètres interagissant entre eux et liant milieux physique et vivant, sur des échelles de temps et d'espace très larges (de quelques secondes à plusieurs dizaines de milliers d'années et du centimètre à l'ensemble de la planète). La Terre présente de plus une particularité fondamentale : elle est notre habitat et est affectée par les activités anthropiques qui génèrent de profonds changements de l'environnement. En découle un lien étroit entre enjeux scientifiques et sociétaux liés aux changements globaux et aux questions environnementales.

Par sa couverture globale et homogène, l'observation de la Terre depuis l'espace occupe un rôle majeur pour l'étude du système Terre via la mesure de paramètres-clés, les variables dites « essentielles » que ce soit pour le climat, la biodiversité ou l'un des sous-systèmes. Elle donne accès à une large gamme d'échelles spatio-temporelles permettant un suivi global et sur le long terme, un taux de revisite élevé, ou une couverture à haute voire très haute résolution spatiale.

Composants essentiels d'un système d'observation intégré qui combine divers systèmes, spatiaux et au sol (in situ et par télédétection), les systèmes d'observation spatiaux doivent être homogènes et stables sur le long terme afin d'assurer la continuité des mesures, mais aussi reposer sur une innovation constante afin d'améliorer les précisions des mesures et d'assurer la transition des systèmes pour la recherche vers des systèmes opérationnels. Un enjeu particulier est la nécessité de mettre au point des proxys quantifiables depuis l'espace apportant une précision compatible des observations in situ qui restent fondamentales pour étudier le système Terre, calibrer et exploiter les observations spatiales. La fusion de l'ensemble de ces données est réalisée à l'aide de modèles du système Terre.

Les activités menées au cours de la période 2014-2019 s'inscrivent logiquement dans cette vision intégrée, systémique et transverse aux milieux terrestres, reposant sur l'appropriation de l'outil spatial en complément des observations de réseau sol ou de campagne, de la modélisation et de l'expérimentation. Les priorités définies dans le cadre de cette prospective scientifique asseyent cette vision, tout en prenant en considération l'évolution du contexte spatial de ces dernières années.

1. LES GRANDES QUESTIONS ET DÉFIS

1.1. COMPRÉHENSION DU SYSTÈME TERRE [ST]

Améliorer notre compréhension du système Terre nécessite de mieux connaître les processus internes propres à chacun des milieux terrestres mais aussi de mieux comprendre le fonctionnement des grands cycles intégrateurs ainsi que les échanges qui ont lieu aux interfaces entre les milieux.

1.1.1. Le cycle de l'eau [ST1]

Indispensable à la vie humaine et aux écosystèmes, disponible en quantité limitée, l'eau douce est une ressource rare, profondément affectée par les changements globaux. Son devenir, notamment en cas d'évènements extrêmes (sécheresses et inondations), représente une préoccupation environnementale de premier plan. L'eau est également un acteur majeur du système Terre en contrôlant la circulation de l'atmosphère et les propriétés des surfaces. La réduction des incertitudes sur la dynamique et l'évolution du cycle de l'eau (évapotranspiration et précipitation, convection humide et formation des systèmes convectifs, phénomènes extrêmes) et sur la compréhension des processus qui régissent les interactions entre les flux à l'interface surface-atmosphère et les précipitations est ainsi un enjeu essentiel de compréhension des changements

globaux, d'adaptation à ces changements aux niveaux local, régional et mondial et pour l'accès à la ressource en eau.

1.1.2. Les cycles biogéochimiques [ST2]

L'augmentation de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre anthropiques (dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote, ozone troposphérique) est le principal moteur du changement climatique. Prédire son évolution nécessite de comprendre les processus qui contrôlent les échanges de ces gaz entre leurs différents réservoirs (atmosphère, océans, surfaces terrestres). Les principaux enjeux sont de réduire les incertitudes sur les stocks de carbone et d'azote, leurs tendances, et les flux entre les réservoirs, et d'apporter les éléments pour comprendre et modéliser les processus qui contrôlent ces échanges, qu'ils soient d'origine physique, chimique ou en lien avec le vivant. Un enjeu particulier vise à mesurer les émissions anthropiques de gaz à effet de serre, notamment dans l'objectif d'assurer le succès de l'Accord de Paris.

1.1.3. La cryosphère [ST3]

A l'interface entre les principales composantes du système Terre, la cryosphère est un indicateur de l'état du système climatique et contribue à son évolution. Les régions polaires sont particulièrement vulnérables à l'évolution du climat. Il est nécessaire d'établir leurs bilans de masse, année après année, et d'améliorer la

compréhension des processus qui expliquent ces variations, tant dans la composante de surface (précipitation, fonte, sublimation, transport de la neige par le vent) que dans la partie dynamique. Les principaux défis concernent la continuité mais aussi l'amélioration de la mesure (précision et résolutions spatiales, temporelles et spectrales) des variables impliquées dans le bilan d'énergie de surface (albédo, température de surface, fonte, précipitations).

1.1.4. Le littoral [ST4]

Les zones littorales sont des régions d'intérêt majeur pour la compréhension du système Terre, l'impact des changements globaux sur les populations et les intérêts économiques et sociaux. Mieux connaître leur fonctionnement et suivre leur évolution répond au besoin de mieux prévoir et de mieux gérer les ressources et les risques littoraux qui résultent de la combinaison d'une forte dynamique démographique et d'une accentuation probable des événements extrêmes régionaux. Les enjeux sont de mieux quantifier les transferts de matière et d'énergie sur le continuum Terre-Mer et d'adapter le système d'observation afin de mieux prendre en compte les processus aux échelles considérées.

1.2. DÉTECTION ET QUANTIFICATION DES CHANGEMENTS GLOBAUX [CG]

1.2.1. Changement climatique [CG1]

L'étude du climat et de son impact sur nos sociétés est devenue un champ de recherche prioritaire face à la demande sociétale d'une compréhension approfondie des mécanismes d'évolution du climat et d'une stratégie pour tenter d'atténuer et de s'adapter à ces changements globaux. Les principaux enjeux sont d'assurer le suivi des indicateurs du changement climatique (température de l'océan ou de l'atmosphère, élévation précise du niveau des océans, pertes de masse des calottes polaires, humidité des sols et désertification), des facteurs responsables du forçage climatique (aérosols et leurs interactions avec les nuages, gaz à effet de serre, changement d'utilisation des sols) et des principales rétroactions du système climatique (nuages, interfaces entre milieux et processus climatiques).

1.2.2. Anthropisation [CG2]

L'anthropisation est un processus par lequel les populations humaines modifient ou transforment durablement les espaces, les écosystèmes et les milieux naturels ou semi-naturels. La déforestation, l'élevage, l'urbanisation et l'activité industrielle sont parmi les principaux

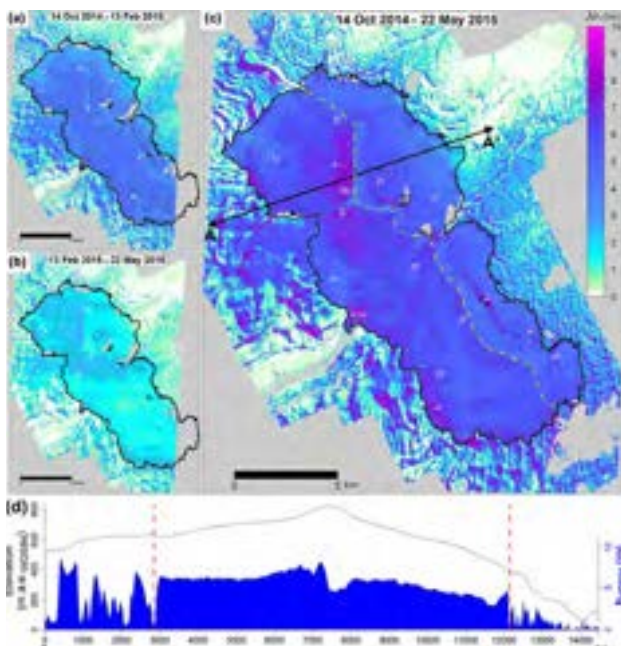


Fig. 1 : Variation d'altitude de la calotte Drangajökull (Islande) au cours de l'hiver 2014-2015 étudiée à l'aide des observations Pléiades et WorldView-2. Le polygone noir indique la marge du glacier en octobre 2014. Le profil longitudinal A-A' indique l'élévation de la surface (noir) et l'épaisseur de la neige (bleue) au-dessus des glaciers et des zones libres de glace. Les lignes pointillées rouges indiquent l'emplacement des marges du glacier.

facteurs d'anthropisation. L'objectif du Millénaire pour le développement des Nations Unies, visant à éradiquer l'extrême pauvreté dans le monde, ne peut être atteint qu'en comprenant les processus d'anthropisation et leurs impacts sur le système Terre. Les principaux enjeux concernent l'identification des facteurs (environnementaux, climatiques et humains) des changements anthropiques avec des attendus en termes de continuité des services écosystémiques (préservation de la biodiversité, production de nourriture), des systèmes de gestion des terres et d'interaction urbain-rural, et des politiques sanitaires.

1.2.3. Dynamique et forme de la Terre [CG3]

Le suivi précis, continu et homogène de la forme de la Terre, de son champ de pesanteur et de son champ magnétique est un outil essentiel pour la compréhension de la dynamique de la Terre sur une large gamme d'échelles spatio-temporelles (éruptions volcaniques, tremblements de terre, déformations du sol, soulèvement tectonique), mais aussi pour le suivi du changement global (fonte des glaces, niveau des mers, suivi des ressources en eau). Les principaux enjeux concernent la quantification de la nature et du rythme du changement solide sur Terre, notamment du rebond postglaciaire dont une bonne modélisation est essentielle pour affiner les projections de la distribution spatiale de la hausse future du niveau des mers, et la caractérisation des précurseurs, des impacts et des seuils-clés d'événements perturbateurs. Un enjeu critique pour l'exploitation de l'ensemble des missions par satellite est de protéger et d'étendre le système de référence terrestre mondial avec une précision de positionnement de 1 mm et une précision d'évolution de 0,1 mm/an.

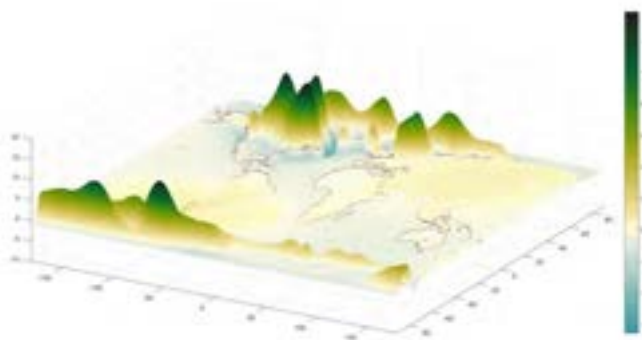


Fig. 2 : Mouvements verticaux du sol en mm/an calculés d'après un modèle de rebond postglaciaire (ICE-6G ; Peltier et al., 2015). La méconnaissance du rebond postglaciaire, notamment les déformations qu'il induit, est une des sources majeures d'incertitude pour l'estimation des masses mises en jeu par la fonte actuelle des calottes polaires. Les déglaciations actuelle et passée sont étudiées conjointement à partir d'observations d'altimétrie satellitaire, de géodésie spatiale (GPS) et de gravimétrie spatiale.

© IGN/ L. Metivier
.....

1.3. ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX ET RISQUES [ER]

1.3.1. Les objectifs de développement durable [ER1]

Le suivi et la prévention des risques environnementaux et l'optimisation des ressources sont des défis majeurs auxquels sont confrontées nos sociétés. Ils se déclinent dans les Objectifs de Développement Durable (ODD) du Programme des Nations Unies pour le Développement. L'UNOOSA a montré que 65 des 169 cibles des ODD bénéficiaient directement de l'utilisation des systèmes d'observation de la Terre et de navigation par satellite. L'observation spatiale se focalise sur l'impact des aléas liés aux changements globaux, qu'ils soient climatiques ou démographiques, sur la sécurité alimentaire (malnutrition, contamination) et sanitaire (épidémiologie, pollution), sur les ressources en eau (disponibilité, qualité, distribution, stockage), sur la gestion des territoires (aménagement et urbanisme, artificialisation, littoral), sur la biodiversité et sur la dégradation des sols. L'initiative Tempo, lancée en 2015, vise à développer l'utilisation des données spatiales pour le suivi territorial à l'échelle des régions françaises.

1.3.2. La pollution atmosphérique [ER2]

La pollution de l'air est le plus grand facteur de risque environnemental pour la santé à l'échelle mondiale et a de nombreux effets néfastes sur les écosystèmes. Cette dernière décennie a marqué un saut quantitatif et qualitatif dans la surveillance depuis l'espace de la pollution à l'échelle globale tant pour la détection d'événements extrêmes (feux, éruptions, pollution urbaine) que pour le suivi à long terme des principaux gaz réactifs. Les principaux enjeux concernent l'amélioration : du suivi de la distribution spatiale des particules (O_3 , PM), et des précurseurs organiques (COVs) et inorganiques (NO_2 , NH_3 , N_2O , SO_2) des polluants secondaires, en particulier près du sol ; de la spéciation chimique des polluants ; de la compréhension des processus de transport et des processus chimiques associés ; de l'impact des polluants sur la santé et les écosystèmes.

1.3.3. Les événements extrêmes [ER3]

Des phénomènes transitoires et extrêmes d'origine géologique (séismes, tsunamis, éruptions volcaniques et glissements gravitaires), océanique (tempêtes, submersion), hydrologique (sécheresse ou inondation) ou météorologique (orages, cyclones tropicaux) perturbent le système terrestre et ont un impact sociétal particulièrement important, ce qui implique de développer une surveillance permanente et fiable. Le cycle sismique et les mécanismes de préparation et de déclenchement des éruptions volcaniques sont aujourd'hui mieux com-

pris grâce notamment aux observations d'interférométrie spatiale (InSAR) et de positionnement (GNSS). Les principaux enjeux concernent le développement des techniques de géodésie de fond de mer et la mesure des déformations de la surface de l'océan avec une précision centimétrique et une couverture spatiale et temporelle homogène, notamment pour développer un système d'alerte tsunami. La compréhension des mécanismes physiques et dynamiques des extrêmes météorologiques fait partie des grands challenges du *World Climate Research Programme* (WCRP).

1.3.4. La biodiversité [ER4]

La biodiversité qui comprend trois niveaux étroitement liés (diversité des gènes, des espèces et des milieux) est essentielle pour le développement naturel de tous les écosystèmes de notre planète. La perte de biodiversité causée par les changements globaux se traduit par un certain nombre d'indicateurs (lente disparition des espèces et des écosystèmes, fragmentation des habitats naturels). La conservation de la biodiversité des surfaces continentales et marines est un enjeu environnemental majeur qui nécessite de mesurer les changements des variables essentielles de la biodiversité avec une incertitude minimale via le suivi des propriétés morphologiques, physiologiques et phénologiques des espèces.

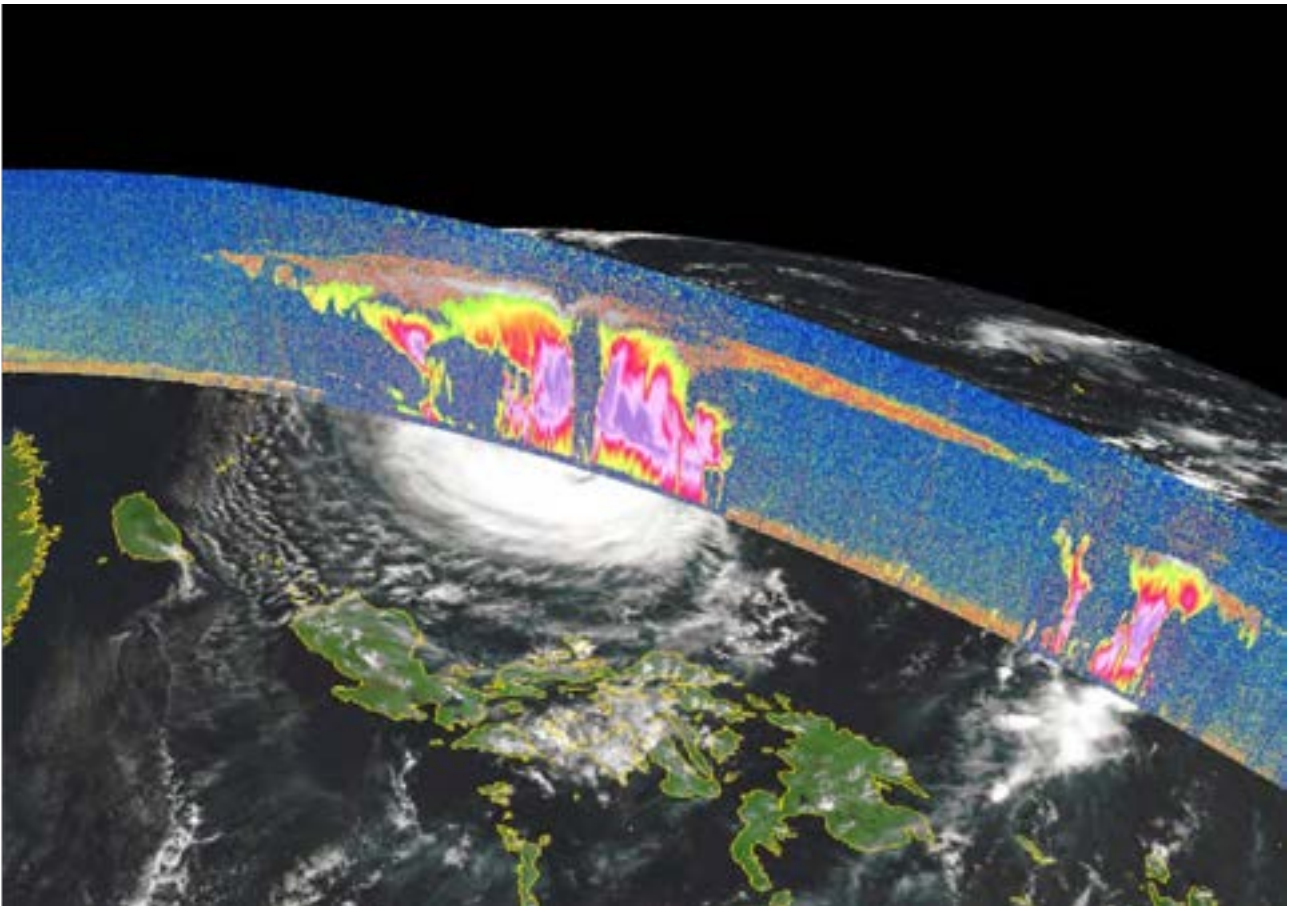


Fig. 3 : Super typhon Yutu, cyclone tropical le plus puissant de l'année 2018, vu en octobre 2018 par Calipso et CloudSat dans leur nouvelle configuration orbitale du C-Train.

© NASA/JPL, 2019

2. BILAN PROGRAMMATIQUE DU SPS 2014

2.1. LES PRIORITÉS SUR LES MISSIONS

Objectif scientifique	Mission	Travaux effectués	Etat actuel / Nouveau cadre éventuel
Priorités à court-terme			
Quantification précise des bilans hydriques et énergétiques des surfaces	Thirsty	Phase 0 (Thirsty avec NASA) puis A (Trishna avec ISRO)	Phase B Trishna
Amélioration du système de référence	Grasp	Phase 0 avec la NASA, non retenue à EVM2/ NASA ni à EE9	Cadre à définir
Dynamique des zones côtières	Ocapi	Phase 0 puis A, non retenue à EE9	Cadre à définir
Gaz à effets de serre	MicroCarb	Phase 0 puis A, annoncée à la COP21	Phase C. Lancement en 2021 Partenariat CNES/UKSA/CGI
	CarbonSat	Non sélectionnée à EE8 face à Flex	Mission Sentinel-7/CO2M en phase A/B1 ESA, lancement en 2026
Étude de la haute troposphère /basse troposphère par ballons	Stratéole-2	Phases 0 à C	Phase D. Campagnes fin 2019, 2021-2022 et 2024-2025.
Mesures altimétriques	Altika-2	Phases 0 et A (Wisa)	Besoins repris dans Sentinel-1 à 3, Swot, Cristal et Sentinel-3-NG Topo
Mesures gravimétriques	Grace-FO		Lancée en 2018 (NASA)
Priorités à moyen-terme			
Forme de la Terre	Z-Earth	Phase 0 (Z-Earth et Memfis)	CO3D
Courants de surface océaniques	Sword	Phase 0 (Vasco), Phase A (SKIM) non retenue à EE9	Skim
Structure de la végétation	Alive-Folio	Phase 0 (Alive-Folio et Expe-Val)	R&T lidar à soutenir
Mesures hyperspectrales	Hypxim	Phases 0 et A (Hypxim et Chimere). Hypex non retenue à EE9	Proposition Biodiversity
Mesures de la qualité de l'air à haute répétitivité	Orepo	Phase 0, Mageaq non retenue à EE9	Partiellement repris dans Sentinel-4/MTG
Aérosols et nuages	Mescal (suite Calipso/ EarthCare)	Phase 0 (2014 – 2019) avec NASA	Pre-formulation study 2018-2021 NASA ACCP. Phase A au CNES (lidar et radiomètre micro-ondes, avec priorité plus forte sur le lidar)
Géoïde océanique	suite Goce/ Grace	Phase 0 Grice	Proposition Marvel
Champ magnétique	Swarm Follow-On	Phase 0 NanoMagSat	Proposition NanoMagSat
Priorités à long-terme			
Salinité des océans et de l'humidité des sols à haute résolution spatiale	Smos-Next	Phase 0 (Ulid et Smos-Next)	Phase A Ulid
Profil vertical de la vapeur d'eau dans l'UTLS et la couche limite	Live, Topase, Winti	Phase 0 (2015-2018), non retenue à EE10 (Qsat)	R&T lidar à soutenir
Dynamique atmosphérique	Dycect	Wivern non retenue à EE10	-
Dynamique des surfaces	Suite Ceres, Sentinel-1 à 3	Phase 0 Copernicus	Sentinel- NG 1 à 3

Tableau 1. Etat des recommandations du SPS 2014 sur les missions prioritaires à court, moyen et long termes.

Le bilan sur les missions prioritaires à court terme est mitigé. Environ la moitié des missions sont en cours de développement : **MicroCarb** et **Merlin** pour l'observation des gaz à effet de serre anthropiques, **Stratéole-2** pour l'étude de la haute troposphère-basse stratosphère. La mission **Grace Follow-On** a été lancée. La mission infrarouge thermique **Thirsty**, rebaptisée **Trishna**, se concrétise par une collaboration entre le CNES et l'ISRO et fédère une communauté conséquente. Par contre, les missions **Grasp** (champ de pesanteur) et **Ocapi** (couleur de l'océan géostationnaire) ne sont toujours pas programmées, malgré la validation technique du concept et la démonstration de la possibilité d'atteindre leurs objectifs.

2.2. LES PÔLES DE DONNÉES ET DE SERVICE

La mise en place des pôles de données Aeris, Odatis, Form@ter et Theia a été un succès, avec la création d'une dynamique de rapprochement des développeurs et des utilisateurs de produits spatiaux et de données in situ, à l'image des Animations Régionales Theia. Organisation incontournable pour fournir données et produits associés, avec le label « FAIR », à tous les utilisateurs, les pôles assurent la dissémination des produits phares issus du traitement des missions nominales du CNES et offrent un tremplin vers Copernicus

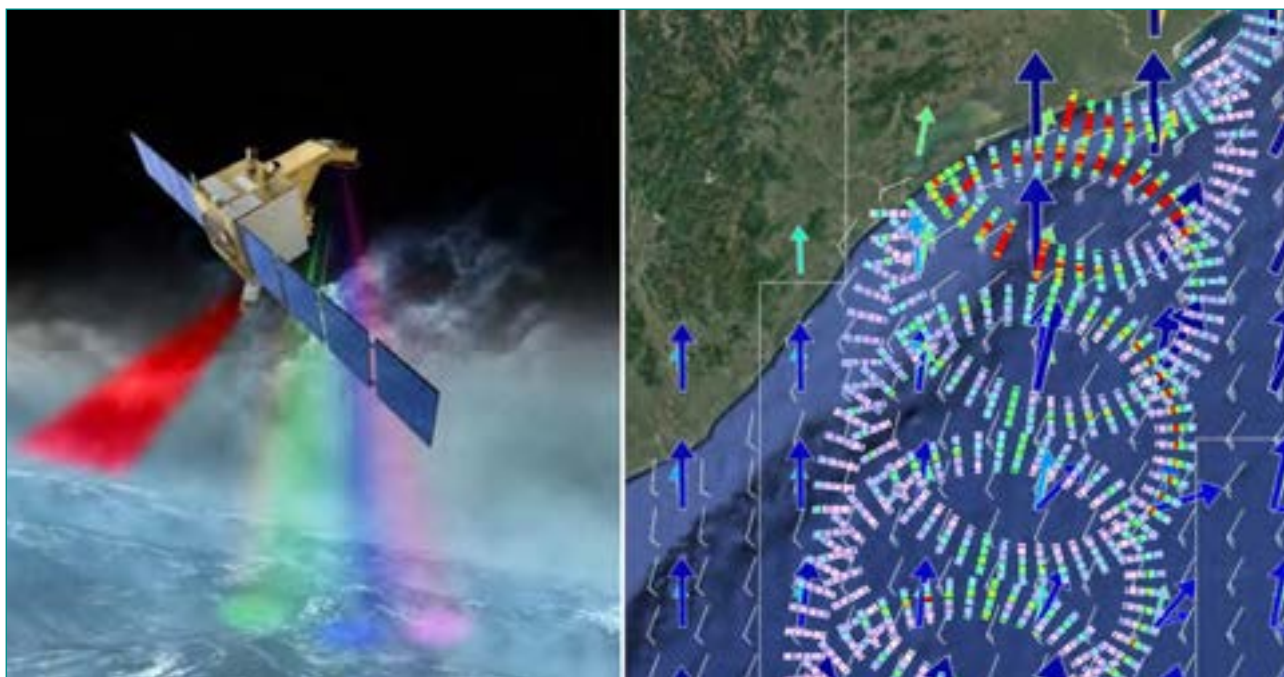


Fig. 4 : Vue d'artiste du satellite franco-chinois CFOSAT lancé en 2018 afin d'étudier le vent et les vagues à la surface des océans (gauche) et spectres de vagues à 10° représentés en mode ruban (spectres le long des fauchées de l'instrument au cours de la rotation et de l'avancée du satellite) lors du passage du cyclone FANI sur la côte Est de l'Inde le 3 mai 2019 (droite).

© CNES/O. Sattler / LOPS/OceanData Lab.

La plupart des missions à moyen et long termes ont été instruites et les recherches soutenues, même si le futur de certaines n'est toujours pas assuré (**Mescal**) ou actuellement inexistant (**LiVE**, **Alive-Folio**, **Hypxim**, **Dycect**). Certaines missions ont été proposées dans le cadre Earth Explorer de l'ESA (**Skim**) ou ont trouvé un débouché dans le programme Copernicus (**Altika-2**, **Orepo**, **CarbonSat**).

Sur recommandation du comité TOSCA, le CNES a accompagné à des degrés divers les études liées aux missions de l'ESA (**SMOS/EE4**, **Aeolus/EE5** lancée en 2018, **EarthCare/EE6**, **Biomass/EE7**, **Flex/EE8**), soutenu l'exploitation systématique des données de la constellation Sentinel, et la participation des équipes française au *Climate Change Initiative* de l'ESA.

et GEOSS. La création du pôle Data Terra améliorera la cohérence du fonctionnement et des services des pôles avec la mise en place d'un point d'entrée unique pour les utilisateurs.

2.3. LES AVIONS DE RECHERCHE

Depuis le SPS 2014, le nombre des utilisateurs des avions de recherche de l'UMS SAFIRE et le nombre de campagnes au service de missions spatiales ont fortement augmenté dans l'ensemble des domaines du TOSCA. Impliquant une cinquantaine de laboratoires, les campagnes visaient à améliorer la connaissance du système Terre, préparer et valider des missions spa-

tiales, ou réaliser de la R&T aéronautique et spatiale. En moyenne, 20% des heures de vol avion ont été consacrées au spatial, telles les campagnes Kuros pour la préparation de CFOSAT ou AerolRT pour Trishna. En incluant les campagnes scientifiques ayant des objectifs liés au spatial, ce pourcentage monte à 80%. Toutes ces campagnes, soutenues par plusieurs agences, ont mobilisé des instruments innovants de la communauté nationale préfigurant des instruments spatiaux ou servant à la validation. Une consultation large de la com-

riques. Le rôle des ballons stratosphériques ouverts (BSO) pour le suivi de la composition stratosphérique et l'empport de démonstrateurs a été reconnu, la recommandation étant de poursuivre des campagnes BSO aux bases actuelles tous les 18 mois, et de déployer rapidement un site de lâcher équatorial ou tropical, ce qui n'a toujours pas été réalisé. Enfin, le développement d'aéroclippers pour la prévision de la trajectoire et de l'intensité des cyclones était encouragé, mais le projet n'a pas encore abouti.

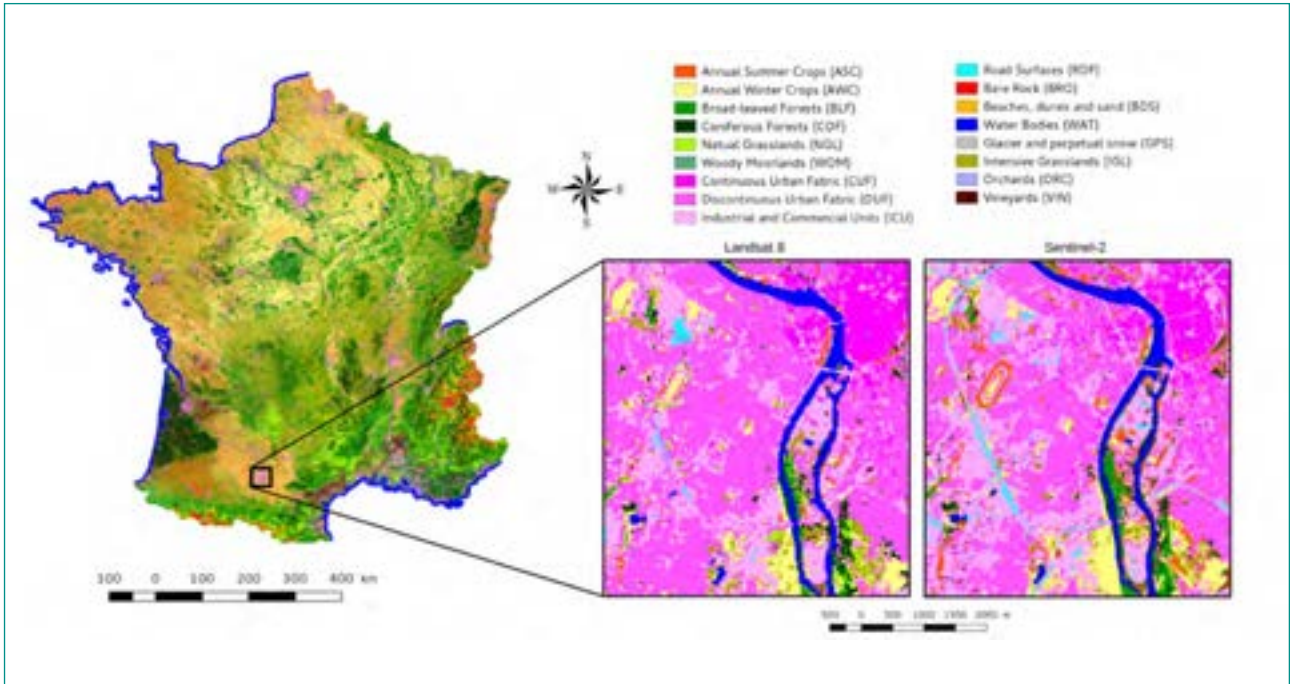


Fig. 5 : Carte d'occupation des sols à la résolution spatiale de 20 m préparée par le Centre d'Expertise Scientifique OSO du pôle thématique THEIA à partir de l'analyse multi-temporelle de données Sentinel-2 pour l'année 2016. L'amélioration apportée par Sentinel-2 par rapport à Landsat-8 (résolution de 30 m) est visible sur le zoom réalisé sur Toulouse.

© Pôle Theia 2019

munauté en 2017 a fait ressortir la nécessité du renouvellement du Falcon20 de SAFIRE, le seul de ses avions à pouvoir voler haut (10-12km d'altitude) avec un long rayon d'action et actuellement en fin de vie, afin de préparer au mieux différentes missions spatiales du CNES dont les lancements sont prévus à l'horizon 2022 (en particulier **Iasi-NG**, **Merlin** et **MicroCarb**).

2.4. LES BALLONS

Les recherches soutenues ces dernières années suivent les priorités définies lors du séminaire de prospective CNES-INSU Ballons pour l'observation de la Terre de 2015, au cours duquel la mission **Stratéole-2** a été confirmée comme une priorité forte de la communauté pour l'étude de la haute troposphère-basse stratosphère à l'aide de ballons pressurisés stratosphé-

Ces dernières années, une demande forte de la communauté scientifique a concerné l'organisation de lâchers réguliers de ballons légers dilatables avec récupération de la charge utile depuis le centre d'Aire-sur-l'Adour afin de mieux documenter l'atmosphère et participer à des campagnes de cal/val. Enfin, le projet HEMERA, porté par le CNES, a débuté en 2018. Il vise à mettre en place une infrastructure européenne afin de permettre un accès facilité à l'outil ballon aux utilisateurs des communautés scientifiques et technologiques européennes.

3. CONTEXTE ET STRATÉGIE PROGRAMMATIQUES

Depuis le dernier SPS, le paysage programmatique en sciences de la Terre a connu des évolutions fondamentales avec l'émergence de nouvelles agences spatiales et d'acteurs privés, et la mise en place du programme Copernicus qui constitue une réelle opportunité de faire porter la pérennisation et la consolidation à long terme de l'observation de variables-clés au niveau européen, tout en restant une force de proposition et de développement pour des missions innovantes. La question climatique, avec la COP 21 et l'accord de Paris, et l'émergence d'une préoccupation politique majeure en la matière, a sensiblement infléchi les programmes spatiaux d'observation de la Terre dans le monde. La décision de réaliser **MicroCarb** et **Merlin** peut être directement attribuée à cette évolution. Le *Space Climate Observatory* (SCO), proposé par le CNES à l'occasion du *One Planet Summit* en 2017, est aussi issu de la volonté française de mobiliser les partenariats internationaux sur un axe plus aval visant à promouvoir les capacités de l'observation spatiale pour le suivi et l'étude des impacts du changement climatique à des échelles locales. Au niveau français, le SCO devrait être une opportunité de fédérer les recherches dans ces domaines, en s'appuyant sur le pôle Data Terra.

3.1. LE PROGRAMME MULTILATÉRAL DU CNES

Le programme multilatéral du CNES est fondé sur des coopérations multilatérales avec les agences spatiales du monde entier. Les opportunités de coopération internationale se sont multipliées ces dernières années : au-delà des grandes agences partenaires (ESA, NASA, ISRO, CNSA), de nombreuses sollicitations ont concerné des pays plus émergents en termes de compétences spatiales, visant plutôt des concepts '*quick&cheap*'. Ces nombreuses demandes de partenariat sont autant d'opportunités à saisir, mais leur format de réalisation ne satisfait généralement pas complètement les besoins scientifiques identifiés lors des prospectives précédentes et dépendent plutôt d'un calendrier diplomatique.

Le TOSCA rappelle que des décisions essentiellement politiques de réalisation de missions, pour légitimes qu'elles soient, ne doivent mettre en danger ni la réalisation des missions prioritaires pour la communauté scientifique qui ont fait l'objet d'un travail de prospective, ni le leadership de la communauté nationale. Le TOSCA propose la création d'un catalogue de missions répondant à des

besoins identifiés de la communauté qu'il faudrait privilégier dans le cadre de coopérations bilatérales imposées.

3.2. LE PROGRAMME ENVELOPPE DE L'ESA

Le programme Enveloppe de l'ESA permet la réalisation des missions Earth Explorer (EE). L'action du CNES porte plus sur le soutien à la communauté nationale en amont pour l'élaboration de propositions et l'accompagnement des développements que dans le processus de sélection ESA.

Depuis le dernier SPS, les missions **Flex** (EE8, pour l'étude de la fluorescence de la végétation) et **Forum** (EE9, pour clore le bilan radiatif terrestre en couvrant une bande spectrale originale dans l'infrarouge lointain) ont été sélectionnées. Dans le cadre EE10, trois missions candidates ont été retenues par l'ESA : **Steroids**, **Daedalus**, et **G-Class**. La communauté française est relativement peu impliquée dans ces missions.

Une analyse du faible engagement de la communauté dans les dernières missions Earth Explorer est à réaliser afin de préparer au mieux les propositions portées par la communauté française lors du prochain processus de sélection.

3.3. LE PROGRAMME DES SATELLITES MÉTÉOROLOGIQUES OPÉRATIONNELS

Essentiellement porté par l'ESA et EUMETSAT, le programme des satellites météorologiques assure sur le long terme les besoins spécifiques à cette branche opérationnelle de l'observation de la Terre. Il fournit également des observations pertinentes pour les activités de recherche. Diverses missions d'intérêt pour la communauté française sont prévues dans les prochaines années.

Prenant la suite des sondeurs infrarouges hyperspectraux **Iasi**, la mission **Iasi-NG** du programme EPS-SG poursuivra sur 20 années supplémentaires le suivi de paramètres thermodynamiques essentiels à la prévision numérique du temps (PNT), mais aussi de nombreuses variables atmosphériques essentielles pour l'étude de la composition atmosphérique et du climat, avec une précision et une couverture verticale de l'atmosphère accrues.

Ces observations seront complétées par les observations issues d'une suite d'instruments micro-ondes (vapeur d'eau, température, nuages de glace, précipi-

tations), du polarimètre **3MI** hérité de **Polder** (nuages et aérosols) et de **Sentinel-5** (qualité de l'air). L'utilisation synergétique de ces instruments embarqués sur **Metop-SG** permettra de mieux caractériser la composition atmosphérique et comprendre les processus atmosphériques. Les sondeurs infrarouges **IRS** (PNT à échelle régionale, phénomènes extrêmes), et **Sentinel-4** sur les plateformes géostationnaires **MTG** viendront compléter le dispositif et permettront d'étudier la variation diurne des principaux polluants.

Sur les 20 prochaines années, les besoins d'observation en composition atmosphérique, en lien avec l'étude de la qualité de l'air, le suivi long terme de gaz réactifs [ER2], et le climat [CG1] seront ainsi assurés dans le cadre de ce programme. Il sera essentiel d'accompagner la communauté française qui est très fortement impliquée dans la proposition et l'exploitation de cette filière d'excellence.

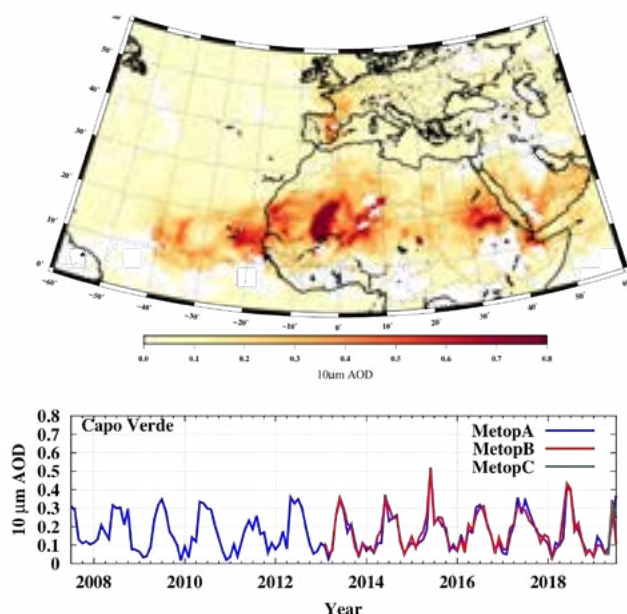


Fig. 6 : Distribution des aérosols désertiques observée par Iasi/Metop-A et Iasi/Metop-B le 27 juin 2019 (la combinaison des deux satellites permet une couverture globale en une journée) et évolution mensuelle de l'épaisseur optique des aérosols observée autour sur les îles du Cap-Vert par les trois instruments IASI lancés en 2006, 2012 et 2018.

© CNRS-LMD/V. Capelle

3.4. LE PROGRAMME COPERNICUS LONG TERM SCENARIO

Le programme Copernicus de l'Union Européenne développé en coopération avec l'ESA constitue une révolution tant pour la recherche que pour les services dans le domaine de l'environnement, avec une politique de données ouverte favorable au développement d'applications nouvelles. Il a pour objectif d'assurer une capacité pérenne et autonome de l'Europe pour le suivi

de l'environnement. Il repose principalement sur des observations satellitaires, mais aussi in situ.

La composante spatiale est actuellement composée de six séries de missions satellitaires détaillées sur la figure 1. Il a permis la mise en place de services opérationnels pour différentes composantes : *Atmosphere* (CAMS), *Marine Environment* (CMEMS) piloté par la France, *Land* (CLMS), *Climate* (C3S), *Emergency Management* (CEMS), *Security*. Ce programme, que s'est approprié la communauté scientifique, structure de façon durable le paysage spatial en assurant la pérennité et la continuité d'observations essentielles. Un enjeu particulier concerne le stockage, la dissémination et le traitement de ces données.

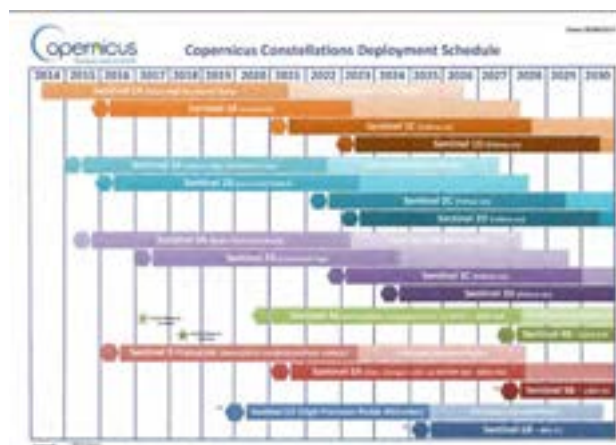


Fig. 7 : Calendrier de déploiement des missions Sentinel du programme Copernicus.

© Copernicus

Au-delà des six missions **Sentinel** actuelles, le Long Term Scenario vise à planifier à moyen et long termes (2025-2035) l'ensemble de la composante spatiale du programme Copernicus en proposant, d'une part, six nouvelles missions dites High Priority Copernicus Missions ou **Sentinel-Expansion** couvrant de nouvelles observables (Tableau 2) et, d'autre part, l'évolution des missions actuelles avec les **Sentinel-NG**.

Dans ce nouveau contexte, le CNES doit être un acteur majeur dans la définition et la mise en œuvre du programme Copernicus tout en accompagnant l'implication des laboratoires français. En s'appuyant sur des partenariats stratégiques, le CNES doit continuer d'être une force de proposition et de développement pour des missions « amont » innovantes pouvant être ou non intégrées à terme dans Copernicus.

Tableau 2.
Description des missions Sentinel-Expansion du programme Copernicus Long Term Scenario

Noms	Objectifs scientifiques	Technique de mesure	Lancement
Chime	Agriculture et biodiversité [ER4]	Spectromètre dans le proche infrarouge	2028
Cimr	Océan et glace de mer en Arctique [ST3]	Radiomètre micro-ondes à haute résolution	2028
CO2M	Emissions anthropiques de CO ₂ [ST2, CG1]	Spectromètre dans le proche infrarouge	2026
Cristal	Epaisseur de la glace de mer et des calottes glaciaires [ST3]	Radar multi-fréquences	2026
Lstm	Température de surface [CG2]	Infrarouge thermique à haute résolution	2027
Rose-L	Surveillance des écosystèmes terrestres, de l'humidité des sols et de la glace [CG2, ST3]	SAR Bande-L	2027

3.5. NEWSPACE ET NANOSATELLITES

Avec l'irruption des intérêts privés en observation de la Terre (constellations, orientation sur les usages aval), le *NewSpace* modifie la perception des possibilités offertes par le spatial et mobilise de nouvelles ressources financières et humaines. Cependant, le peu d'importance accordé pour l'instant à la qualité des mesures est peu compatible des exigences scientifiques. L'arrivée d'acteurs privés pose également la question de la nécessité, à terme, de l'achat des données, comme l'illustre le cas de la fourniture payante à des centres de PNT de paramètres thermodynamiques de l'atmosphère obtenus à partir de données de radio-occultation GNSS issues de programmes privés.

Les réponses à l'appel à contribution du SPS ont montré un intérêt certain de la communauté scientifique pour les nanosatellites qui se retrouve dans les missions définies comme prioritaires. Bien que leur utilisation à des fins non pédagogiques en sciences de la Terre reste très récente, la disponibilité de nouvelles plateformes (nanosat, microsat) peut favoriser l'émergence de nouveaux projets visant à emporter un instrument développé en laboratoire, avec une attention particulière à la rapidité de mise en œuvre. Une réflexion sur la complémentarité entre étalonnage au sol et en orbite compatible d'un emport sur nanosat est à mener afin d'assurer la stabilité spatiale et temporelle des mesures et de la vérifier sur le système de référence global.

4. PRIORITÉS ET RECOMMANDATIONS

Les priorités et recommandations du TOSCA intègrent le nouveau contexte programmatique décrit ci-dessus et visent à permettre le suivi de nouvelles observables essentielles mais aussi la continuité de mesures de variables-clés afin de répondre aux enjeux scientifiques rappelés précédemment : compréhension du Système Terre [ST], Changements Globaux [CG] et enjeux Environnementaux et Risques [ER].

4.1. MISSIONS EN MULTILATÉRAL

4.1.1. Missions en priorité haute

Quantification précise des bilans hydriques et énergétiques des surfaces [ST1, ER1, ST4]

Le projet *Trishna* est une mission infrarouge thermique engagée en collaboration entre le CNES et l'ISRO pour un lancement envisagé en 2025. Ses caractéristiques (50 m, 3 jours) répondent au besoin de caractériser le stress hydrique des végétaux, en particulier pour les surfaces agricoles, et d'étudier le climat urbain, la cryosphère et l'hydrologie continentale et côtière. La mission *Sentinel-Expansion LSTM* projette d'acquérir à un horizon plus lointain des données similaires mais avec des conditions angulaires d'observation différentes qui ne permettent pas d'éviter les phénomènes de hot spot aux latitudes intertropicales.

Le TOSCA soutient la poursuite du développement de Trishna qui permettra de bien positionner la communauté française pour jouer un rôle majeur dans la préparation et l'exploitation de la mission LSTM proposée comme Sentinel-Expansion.

Impact radiatif des aérosols et des nuages [CG1, ST1]

Le projet **Mescal** est un lidar multi-longueurs d'onde à haute résolution spectrale pour l'étude des nuages et des aérosols visant à assurer la continuité de la série **Calipso-Aeolus-EarthCare**, sur une durée compatible des études de l'évolution du climat et des rétroactions nuageuses. **Mescal** ira plus loin que ses prédécesseurs via la spéciation des aérosols observés, essentielle pour comprendre leur impact radiatif et leur rôle dans la formation des nuages, principales sources d'incertitudes sur le bilan radiatif terrestre. La mission devrait en outre permettre la mesure de la couleur de l'océan par lidar.

Mescal est proposée dans le cadre programmatique ACCP mis en place par la NASA en réponse aux priorités du *Decadal Survey* (2018), pour lequel le CNES a exprimé son intérêt sur deux contributions potentielles : une composante du lidar et, en moindre priorité, un radiomètre micro-ondes.

Le TOSCA considère la participation de la communauté française au futur observatoire international ACCP comme une opportunité majeure et, dans ce cadre, soutient de manière prioritaire la mission Mescal afin de valoriser l'expertise française dans la filière des lidars nuages-aérosols et de répondre aux objectifs de suivi sur le long terme de leurs propriétés.

4.1.2. Priorités à moyen terme sur les grosses missions

Amélioration du système de référence et mesure du champ de pesanteur [CG3, ST3, ST4, CG1]

Le projet **Marvel** répond au double besoin d'avoir accès à une connaissance précise du système de référence tout en fournissant des observations gravimétriques à haute résolution. Il propose une amélioration inédite en termes de précision et de résolution du champ de pesanteur via une amélioration des données de positionnement et de la configuration orbitale. Il combine une double constellation comprenant un satellite haut (reprenant le concept de **Grasp**) et un satellite gravimétrique en orbite basse. Les performances annoncées rendent cette mission très attractive pour plusieurs domaines d'intérêt du TOSCA : le système de référence terrestre et le suivi de la redistribution des masses sont des éléments-clés dans le suivi du stock total d'eau, y compris les calottes polaires, et de sa dynamique, et dans la compréhension des mécanismes responsables

de l'augmentation du niveau de la mer et du bilan énergétique de la planète. Le TOSCA soutient de manière prioritaire le développement d'une telle mission et recommande de l'inscrire dans le contexte de l'étude *Mass Change* mise en place par la NASA et l'ESA suite au *Decadal Survey* (2018).

Mesure du courant océanique de surface [ST1, ST3]

Le projet **Skim** vise une mesure directe du courant de surface total, une Essential Ocean Variable (EOV) complémentaire des mesures de topographie par altimétrie. La vitesse totale diffère des courants géostrophiques accessibles par l'altimétrie, et informe les transports très en surface, les courants à l'équateur et au voisinage des glaces, et l'amélioration du suivi des spectres de vagues. Le TOSCA soutient très fortement le développement de **Skim**, qui devrait améliorer la compréhension de la dynamique océanique de surface et les échanges océan/atmosphère, mais aussi contribuer aux applications d'océanographie opérationnelle.

Biodiversité et écosystèmes terrestres [ER4, ER1, CG2, ST4]

Le projet **Biodiversity**, qui fait suite aux Phases-0 et **A Hypxim**, **Chimere** et **Hypex**, a pour objectif d'assurer le suivi de plusieurs variables essentielles de la biodiversité terrestre, intertidale et marine. Les caractéristiques de cet imageur hyperspectral à haute résolution (<10m pour une revisite de 5 jours), supérieures à celles proposées par la mission **Chime** de Copernicus, répondent au besoin de caractériser la distribution et l'abondance des espèces, la fragmentation des habitats, la phénologie et les variables biophysiques de la végétation pour les écosystèmes terrestres, les zones côtières et urbaines et les eaux continentales. Le TOSCA soutient le développement d'une mission hyperspectrale à haute résolution afin de remplir des besoins scientifiques prioritaires et de bien positionner la communauté nationale, en s'appuyant sur le retour d'expérience des missions **Prisma** et **EnMAP**, pour jouer un rôle majeur dans la future mission **Chime** proposée comme **Sentinel-Expansion**.

Dynamique des zones côtières [ST4, CG2]

Le développement d'une mission géostationnaire couleur de l'océan sur l'Europe (**Geo-Ocapi**) a été mise en priorité forte au dernier SPS afin d'améliorer nettement la couverture spatio-temporelle par rapport aux satellites défilants et de mieux contraindre les modèles biogéochimiques. Une étude de faisabilité a été menée par le CNES, mais aucun cadre programmatique n'a été trouvé. Le besoin d'une telle mission étant aussi prioritaire pour le service marin de Copernicus, le TOSCA recommande d'étudier la possibilité d'inscrire

cette mission dans le cadre du *Copernicus Long Term Scenario* et d'une insertion à plus long terme sur les futures plates-formes **Meteosat** (4^{ème} génération).

4.1.3. Priorité à moyen-terme sur les petites missions

Développement des nuages convectifs [ST1]

Le projet **C3iel**, constellation de 2 nanosatellites, est dédié à l'observation à haute résolution des nuages convectifs, actuellement mal observés depuis l'espace, du fait de leur petite taille et de leur développement très rapide. En combinant à la fois une haute résolution spatiale et temporelle, la mission est très novatrice et offre une capacité d'observation inédite sur une thématique scientifique prioritaire. Un cadre de coopération avec Israël est envisagé pour un lancement en 2024.

Humidité des sols [ST1, ST2, CG1]

Le projet **Ulid** vise à vérifier le principe de mesure interférométrique bande L à partir d'éléments d'antennes disposées sur 2 nanosatellites en formation afin de préparer la poursuite de la mission **Smos** et le futur de la filière de radiométrie en bande L au sein de la communauté nationale (**Smos-HR** puis **Smos-Next**). L'objectif est d'améliorer la résolution spatiale des cartes d'humidité du sol et d'épaisseur optique de la végétation et des cartes de salinité des océans à l'échelle globale, afin notamment de mieux évaluer les risques d'inondation et de sécheresse et de contribuer à une meilleure gestion des ressources en eau et une meilleure connaissance du cycle du carbone.

Mesure du champ magnétique terrestre [CG3]

Le projet **Nanomagsat**, en cours d'investigation, vise à améliorer la qualité de la détermination spatiale du champ magnétique permise actuellement par la mission **Swarm** de l'ESA lancée en 2013. Elle vise à pérenniser le suivi de cet observable sur le long terme en exploitant des nanosatellites et des magnétomètres miniaturisés ce qui améliorera la connaissance de la dynamique du noyau, la conductivité dans le manteau, le magnétisme de la croûte, et la météorologie de l'espace. Grâce à la mission **Swarm**, la communauté scientifique nationale et internationale du géomagnétisme interne et externe est bien structurée. Le TOSCA soutient la proposition de cette mission au *SmallSat Challenge* de l'ESA.

4.2. MISSIONS EARTH EXPLORER

Le TOSCA recommande d'accompagner les membres français qui participeraient aux travaux préparatoires des missions EE sélectionnées et encourage la mise en

place d'un cadre bien défini pour l'accompagnement des équipes françaises dans les missions EE, de la conception à l'exploitation, comme cela a été fait pour la mission Biomass/EE7.

4.3. MISSIONS COPERNICUS

Dans le cadre de la préparation des **Sentinel-Expansion** (> 2025), le TOSCA recommande que le CNES s'assure que les besoins des communautés françaises seront bien pris en compte dans les quatre domaines : conception des missions, tenue des performances, accès aux produits et accompagnement de l'exploitation scientifique. Les six missions (cf. Tableau 2) proposées sont, à des degrés divers, d'un intérêt majeur pour la communauté française qui joue un rôle fondamental dans la définition des spécifications et/ou dans l'exploitation de ce type d'observation.

Le TOSCA incite le CNES à prévoir un plan d'accompagnement scientifique de ces missions et propose l'organisation de journées annuelles sur Copernicus réunissant l'ensemble des acteurs nationaux afin d'organiser la communauté nationale (agences, laboratoires, entreprises) et tirer pleinement parti du programme.

Dans le cadre de la préparation des **Sentinel-NG** (> 2030), le TOSCA recommande que le CNES porte les priorités et demandes françaises dans la définition du programme, en défendant la continuité des missions **Sentinel** d'intérêt pour la communauté nationale. C'est particulièrement le cas de la mission **Wisa/Sentinel-3-NG**, suite opérationnelle de la mission **Swot** pour l'altimétrie [CG1] avec l'objectif de déterminer la topographie de surface à haute résolution. Le développement d'une mission géostationnaire couleur de l'océan sur l'Europe (**GEO-OCAPI**) visant à étudier la dynamique des zones côtières a été mise en priorité forte au dernier SPS afin d'améliorer nettement la couverture spatio-temporelle par rapport aux satellites défilants et de mieux contraindre les modèles biogéochimiques. Une étude de faisabilité a été menée par le CNES, mais aucun cadre programmatique n'a été trouvé.

Le besoin d'une telle mission étant aussi prioritaire pour le service marin de Copernicus, le TOSCA recommande d'étudier la possibilité d'inscrire cette mission dans le cadre du Copernicus Long Term Scenario et d'une insertion à plus long terme sur les futures plateformes Meteosat (4^{ème} génération).

4.4. R&T

Tout en soulignant le rôle essentiel de la R&T pour maintenir au meilleur niveau les capacités d'innovation de la communauté, le TOSCA rappelle qu'il est essentiel de maintenir une activité de développement instrumental dans les laboratoires afin de pouvoir mener avec eux des projets de R&T, notamment lors de la définition et de la construction de démonstrateurs technologiques (sol, aéroportés, nanosatellites). Le TOSCA a identifié des verrous et défis technologiques à réaliser en priorité :

Miniaturisation

Dans certains domaines, des « petits satellites » pourraient prendre la suite de filières dont la performance est bien maîtrisée : magnétomètre, sondeur infrarouge (micro-spectromètres), altimétrie radar, radiomètre micro-ondes. Les verrous techniques, propres à ces filières, devront être identifiés. En lien avec la miniaturisation des capteurs, une réflexion est à mener sur l'organisation et le développement de l'utilisation de la filière avion/ballon/drone.

Lidar

Un effort de R&T est nécessaire sur la technologie des lasers et sur la possibilité de réaliser des lidars à multi-visée ou à balayage afin d'augmenter la densité d'observations, en particulier pour la détermination de la répartition tridimensionnelle de l'humidité. Un besoin de lidars profileurs robustes, fiables, simples et d'un coût modéré existe pour suivre l'évolution des gaz (CO₂, CH₄), des nuages et des aérosols.

Algorithmie

Le travail permanent sur les algorithmes est une composante essentielle de la réussite d'une filière. Le TOSCA encourage le CNES à poursuivre son soutien aux équipes algorithmiques (niveaux 1 et 2), en assurant une bonne coordination avec les agences partenaires et entre les différents programmes du CNES (R&T, projets en développement, APR).

L'augmentation des volumes de données couplée à l'augmentation des résolutions spatiales ou spectrales imposeront le recours à des méthodes de traitement de données innovantes (big data, HPC, IA), tant pour les aspects algorithmiques que le contrôle qualité. Le TOSCA recommande qu'un effort particulier soit porté sur l'estimation des incertitudes associées à ces méthodes innovantes.

4.5. INFRASTRUCTURES

Renouvellement du jet de SAFIRE

L'UMS SAFIRE opère aujourd'hui deux avions complémentaires pour la recherche en environnement, un turbopropulseur (ATR42) de grande capacité mais d'élongation réduite et ne pouvant voler très haut, et un jet (Falcon 20) de plus faible capacité mais volant haut et ayant une élongation de plusieurs milliers de km. Comme l'a montré une large enquête menée par le CNES en 2017, le remplacement du jet actuel, en fin de vie, est particulièrement attendu pour des missions spatiales de premier intérêt pour la communauté française : **Iasi-NG, 3MI, ICI, MTG/LI, MTG/IRS, Merlin, EarthCare, Mescal, Biomass, Trishna**. A vocation multi-thématiques, le nouveau jet constituera un levier puissant pour développer des projets transverses, tester des prototypes, et réaliser des activités de cal/val (en particulier des nombreuses missions spatiales du CNES dont les lancements sont prévus à l'horizon 2020-2025). La capacité de SAFIRE à exploiter un tel avion sera un atout pour positionner la France dans l'offre européenne de services aéroportés et envisager des retours sur investissement de cette acquisition.

Le TOSCA considère le renouvellement du jet de SAFIRE comme hautement prioritaire et encourage les trois tutelles de SAFIRE à assurer la disponibilité d'un tel vecteur à court terme.

Mesures au sol

Le succès de toute mission spatiale repose sur l'accès à des mesures in situ et de télédétection au sol fiables et disponibles sur le long terme, que ce soit pour des activités de cal/val ou d'exploitation. L'enjeu est de mettre en place un support programmatique pérenne d'observation et d'archivage.

Le TOSCA recommande que le CNES participe activement à la définition des infrastructures de mesures in situ et de télédétection au sol, en particulier des sites de cal/val, en partenariat avec les organismes nationaux et avec les autres agences (ESA, EUMETSAT, COPERNICUS).

Ballons

Le TOSCA salue la mise en place de l'infrastructure de recherche HEMERA et recommande de soutenir les actions de positionnement de la communauté scientifique française associée aux ballons dans cette stratégie européenne.

Le TOSCA encourage également une meilleure intégration des ballons, en synergie avec les avions de recherche, dans les plans de cal/val que ce soit sur le

site d'Aire-sur-l'Adour (accueil pérenne de moyens de mesures in situ et hébergement d'équipes lors de campagnes) ou lors de campagnes BSO. Le TOSCA rappelle la demande récurrente de la communauté scientifique de disposer d'un site de lâcher dans la région équatoriale (zone d'intérêt pour l'étude des cycles biogéochimiques et de la dynamique atmosphérique).

4.6. RECOMMANDATION SUR L'ACCOMPAGNEMENT DES MISSIONS SPATIALES

4.6.1. Europe

La visibilité des activités françaises dans le domaine spatial reste très forte. Il n'en demeure pas moins nécessaire d'améliorer le positionnement de la communauté française du spatial en Europe, notamment dans le cadre du programme Copernicus et dans le contexte de baisse des budgets nationaux.

Le TOSCA recommande de :

- Renforcer le lobbying au niveau européen en mettant en place une organisation coordonnée entre les différentes partenaires nationaux (CNES, organismes partenaires, laboratoires) permettant un échange d'information et une définition des stratégies afin d'assurer notamment le succès des filières d'excellence.
- Coordonner un effort international CNES/ESA/EU-METSAT/COPERNICUS sur l'exploitation des longues séries de données multi-capteurs pour l'ensemble des Essential Climate Variables (ECVs) afin d'assurer leur homogénéisation.
- Définir une stratégie sur les relations entre les laboratoires et les industriels du spatial pour le développement de projets de missions spatiales proposés dans le cadre H2020 ou ERC.

4.6.2. Pôles de données

Priorité du dernier SPS, la mise en place des pôles, qui s'appuient sur un partenariat multi-organismes, est un succès de ces dernières années. Il est désormais nécessaire d'améliorer la cohérence de leur fonctionnement et de leurs services, notamment dans le cadre de la création du pôle Data Terra. Le TOSCA rappelle que l'accès aux compétences et aux services associés aux données spatiales doit être facilité par la mise en place d'un point d'entrée unique pour les utilisateurs, permettant un accès facilité à l'expertise reposant sur la capitalisation des expériences passées.

Le TOSCA encourage fortement le CNES et les organismes partenaires à mettre en place les moyens humains supplémentaires permettant aux pôles d'assurer leurs missions.

L'augmentation du volume des données à traiter et à retraiter implique des moyens de stockage et de calcul massifs. Avec la quantité et la diversité croissante des données, le traitement et l'accès aux données doivent être considérés comme un tout. Le développement des plates-formes DIAS et PEPS va dans ce sens, même si le positionnement des pôles de données par rapport aux DIAS devra être clarifié.

Le TOSCA recommande d'engager une réflexion multi-organismes sur le rapprochement effectif des pôles de données et des moyens de calcul permettant de prendre en compte les nouvelles stratégies algorithmiques.

4.6.3. Accompagnement de la recherche spatiale

Même si, pour les sciences de la Terre, les instruments sont généralement réalisés par l'industrie, il est nécessaire de s'appuyer sur des compétences fortes dans les laboratoires dans le domaine de la physique de la mesure, de l'analyse de la donnée et de la conception instrumentale. La pérennisation de ces compétences est indispensable afin d'assurer l'exploitation des nombreuses missions spatiales prévues et être source de proposition pour de nouveaux concepts. Le recours à des contrats à durée déterminée successifs ou à de l'assistance technique ne peut répondre à ce besoin.

Le TOSCA recommande de faire reconnaître et de valoriser (par exemple par la mise en place de partenariats) auprès des universités et organismes de recherche l'investissement des chercheurs et des enseignants-chercheurs dans le spatial et les actions du CNES. L'absence de perspectives et de valorisation est un frein à l'attraction des filières universitaires et à l'investissement de chercheurs et enseignants-chercheurs dans la recherche spatiale.

Le développement d'échanges de personnel (ingénieurs CNES au sein des laboratoires et inversement) est une solution intéressante afin de créer des équipes intégrées et renforcer ainsi les liens entre les différents acteurs.



Centre de maintien et mise à poste Galiléo.

© CNES/GRIMAULT Emmanuel, 2017

GROUPE DE TRAVAIL THÉMATIQUE TERRE SOLIDE

Pascal Allemand, Etienne Berthier, Sylvain Bonvalot, Xavier Briottet, Rodolphe Cattin, Patrick Charlot, David Coulot, Christophe Delacourt (président sortant), Olivier de Viron (président entrant), Michel Diament, Bénédicte Fruneau, Marianne Greff, Mioara Manda (thématicienne), Aurélie Marchaudon, Isabelle Panet, Erwan Pathier, Lucie Rolland, Erwan Thébault, Guy Wöppelmann.

Le périmètre d'étude du groupe Terre solide (TS) couvre la géophysique interne, la géodynamique, la géodésie, ainsi que les couplages entre la Terre solide et les enveloppes externes. Les scientifiques de la Terre solide s'attachent donc à comprendre son fonctionnement interne : histoire et évolution de sa composition (répartition et nature des matériaux, propriétés rhéologiques, couplage entre enveloppes) et de sa dynamique ; comme ses impacts en surface (séismes, volcanisme, déformations crustales en réponse au rebond postglaciaire,). Ils s'attachent également à caractériser les risques telluriques et les ressources du sous-sol, et à participer au suivi des changements globaux.

L'une des difficultés majeures réside dans l'impossibilité d'observer directement l'intérieur de notre planète : au-delà de 10 km de profondeur, la connaissance de la Terre est déduite uniquement de mesures indirectes au sol, aériennes ou spatiales.

De plus, les phénomènes géodynamiques et climatiques ont des échelles de temps allant de la seconde à plusieurs millions d'années. Leur étude requiert donc un suivi fréquent, voire continu. De par leur caractère global et répété depuis plusieurs décennies, les observations spatiales sont donc pour la communauté TS un jeu de données incontournable.

La Terre solide est soumise à des sollicitations d'origine interne, liées aux processus physiques et chimiques qui ont cours dans le noyau, le manteau et la croûte, mais aussi d'origine climatique – associées à la dynamique de l'atmosphère, de l'océan, de l'hydrologie, de la glace – et externe au système Terre, telles qu'exercées par la Lune, le Soleil et les planètes. En réponse à ces contraintes, les masses de la Terre solide se déplacent, et la forme de la Terre, son champ magnétique et son orientation dans l'espace sont modifiés.

La variabilité spatio-temporelle des processus internes constitue un défi dans l'étude de la Terre solide. Ainsi, les échelles temporelles et spatiales caractéristiques varient sur plusieurs ordres de grandeurs : depuis la seconde (séismes) aux millions d'années (tectonique des plaques) et du centimètre (faille) à la dizaine de milliers de kilomètres (dorsales médio océaniques par exemple). Des processus à l'œuvre dans la Terre solide interagissent avec ceux des enveloppes externes (impacts du volcanisme sur le climat, formation et destruction des reliefs, déplacements horizontaux et verticaux, ajustement glacio-isostatique...). Ils sont aussi à l'origine des risques telluriques qui affectent une population de plus en plus nombreuse et dense dans les zones actives (sismique / volcanique / glissements de terrain) ou menacées (littoraux).

Les données spatiales permettent de déterminer avec précision la forme, l'orientation et la distribution de masse de la Terre à l'équilibre – ou au moins à long terme – et d'en suivre l'évolution au cours du temps, avec une distribution homogène en qualité. Similairement, on détermine à partir des données spatiales le champ magnétique statique et son évolution temporelle. Combinées avec des données de géophysique in situ, les données spatiales nous donnent alors accès à une connaissance de plus en plus précise, résolue, pérenne et homogène des principales observables de la Terre solide. Ces informations diverses et complémentaires participent à la construction de cette compréhension globale de la dynamique, du fonctionnement et de l'évolution du système Terre.

Cette construction passe par l'analyse et l'interprétation d'un ensemble de données hétérogènes nécessitant d'améliorer la complexité des modèles et la précision de l'information. On le voit, l'utilisation des données spatiales en Terre solide requiert de mobiliser des chaînes de traitements et d'inversions complexes, où la propagation des erreurs est un enjeu majeur. Ce n'est qu'en accumulant sur le long terme des observations continues de la meilleure qualité – précision, homogénéité, localisation – que l'on peut accéder aux signaux d'origine interne parfois dominés par des contributions externes, par exemple liées à la dynamique climatique. Inversement, parce que l'es-

sentiel des phénomènes qui ont cours dans le système Terre modifie sa forme, son champ de pesanteur et/ou son champ magnétique, les observables « Terre solide » fournissent des informations, avec une couverture globale et une haute précision, pour la compréhension de la dynamique du système Terre. La géodésie, quant à elle, permet non seulement le positionnement précis ou le suivi des déformations, mais fournit aussi la référence de l'ensemble des mesures sur le Système Terre.

1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2014

1.1. RETOUR SUR LA MISE EN ŒUVRE DES PRIORITÉS DU SÉMINAIRE DE PROSPECTIVE SCIENTIFIQUE DE LA ROCHELLE

1.1.1. Prioriser les missions spatiales

Grasp

De nombreuses applications scientifiques et sociétales, telles que le suivi du niveau moyen des mers, nécessitent une précision et une stabilité du système de référence avec une exactitude de 1 mm en position et 0.1 mm/an en vitesse. L'importance de cette référence est d'ailleurs mondialement reconnue depuis l'adoption, en 2015, par les Nations Unies, de la résolution A/RES/69/266. Un satellite de type **Grasp** est nécessaire pour atteindre ce niveau de qualité. Or, malgré une reconnaissance de l'intérêt scientifique d'une telle mission par toutes les communautés du TOSCA, une validation technique du concept, une démonstration par simulations numériques de la possibilité d'atteindre ces objectifs et des contacts pris avec d'autres agences spatiales (NASA, etc.), une telle mission n'est pas encore programmée.

Z-Earth

Le besoin d'une topographie globale, précise et répétée des surfaces continentales est toujours très présent et pas uniquement en Terre solide (p. ex. surfaces continentales). Le concept **Z-Earth**, soutenu à La Rochelle, a évolué dans le cadre d'une phase 0 (nommée Menfis). Aujourd'hui, c'est la mission **Co3D** qui fait l'objet d'une phase A, toujours pour réaliser un Modèle Numérique de Terrain (MNT) global. Aussi, une option "stéréo" est actuellement à l'étude (phase B) dans le cadre du concept **Sentinel-HR** pour répondre à la forte demande en répétitivité de l'information topographique.

Pour ces deux missions, il est important que la communauté scientifique puisse bénéficier d'un accès rapide et complet aux données topographiques.

1.1.2. Assurer la continuité et la compatibilité des missions

L'accès à des signaux faibles, et à leurs variations spatiales et temporelles, impose d'améliorer les techniques de mesure et d'étendre la période d'acquisition des données qui doivent être compatibles entre elles.

Imagerie Radar

La mesure fine des déformations de surface par imagerie satellitaire nécessite le traitement de longues séries temporelles d'images radar et par là-même une continuité des acquisitions. Celle-ci est assurée avec la constellation **Sentinel-1**, dont la pérennité est désormais garantie au moins jusqu'en 2030. La communauté française, fédérée grâce à ForM@Ter autour des techniques d'interférométrie radar et de corrélation d'images, dispose désormais de chaînes de traitement spécifique. Ces chaînes, en développement continu, forment le noyau d'outils qui seront accessibles en ligne par la communauté pour diverses applications (calcul à la demande, série temporelle, ...).

Magnétisme - Prolongation de Swarm et préparation Nanomagsat

Grâce à ses trois satellites aux orbites désynchronisées, la mission européenne **Swarm** a permis de mieux modéliser les processus électromagnétiques générateurs de champs géomagnétiques et de mieux prévoir leurs évolutions temporelles. L'ESA a reconnu l'importance d'une surveillance continue pour la navigation aéronautique et la météorologie de l'espace en prolongeant la mission de cinq ans. Le projet **Nanomagsat**, mission française en cours d'investigation, a vocation à pérenniser la mesure spatiale après **Swarm** en exploitant des nanosatellites et des magnétomètres miniaturisés.

Gravimétrie Grace Follow-On et Grice

La connaissance fine et globale du champ de pesanteur terrestre et le suivi des masses dans le système Terre depuis l'espace grâce aux missions dédiées de gravimétrie spatiale du début du XXI^e siècle ont révolutionné de nombreux domaines (hydrologie, cryosphère, géodynamique, ...). L'enjeu est désormais d'assurer la continuité de la mesure des variations temporelles du champ de pesanteur tout en améliorant résolution et précision. La continuité est certes assurée aujourd'hui avec la mission **Grace Follow-On** mais reste fragile, d'autant que la mission ne fonctionne actuellement pas de façon nominale. En outre, de nombreuses améliorations

sur la qualité de la mesure sont encore nécessaires, par exemple autour de développements novateurs (interférométrie atomique dans **Grice**, accéléromètres hybrides, liens laser...). Il a aussi été démontré l'intérêt de disposer de deux missions de type **Grace Follow-On** sur des orbites différentes dans le cadre d'une coopération internationale.

1.1.3. Faciliter l'exploitation des données

La communauté scientifique TS utilise les données de nombreux satellites d'observation de la Terre en activité ou ayant acquis une archive conséquente. Ces données, au potentiel important, sont parfois sous-exploitées. Il est donc nécessaire de faciliter l'accès aux données d'archive avec des tarifs attractifs et d'attirer de nouveaux scientifiques aux approches complémentaires vers le spatial. Dans ce même objectif, il est aussi important de faciliter la mise à disposition et l'exploitation de données in situ complémentaires aux observations spatiales. Au cours des quatre dernières années, des initiatives ont été mises en place : **Spot World Heritage** pour mettre à disposition une partie des archives **Spot**, accès facilité aux images Pléiades et **Spot 6-7** pour les chercheurs. Ces procédures d'accès à la donnée fonctionnent plutôt bien mais montrent leur limite dès que des grands volumes de données sont nécessaires ou quand une forte réactivité est souhaitable.

Depuis le séminaire de prospective scientifique de La Rochelle, le pôle de données et de service pour la Terre solide, intitulé ForM@Ter, s'est mis en place, en application du rapport sur les pôles de données et de service. Il a pour mission, au sein de l'Infrastructure de Recherche Data Terra, de fournir un accès aux données et de développer des produits et des services pour la recherche en Terre solide, et plus généralement sur le système Terre. Il se construit dans un contexte d'une augmentation exponentielle des données satellitaires pertinentes liées aux missions d'observation ou à des projets portés par des initiatives privées.

1.1.4. Renforcer la structuration de la communauté

L'effort de structuration de la communauté via des regroupements thématiques de projets a été poursuivi via le pôle ForM@Ter. De nombreux projets déposés dans le cadre de l'Appel à Proposition de Recherche CNES, axés sur les outils et méthodes, s'inscrivent désormais dans le cadre de ForM@Ter. Malgré des recommandations, de nombreuses activités liées à l'analyse et au traitement des données de géodésie spatiale ou à la préparation de missions spatiales ne sont pas suffisamment intégrées dans des Services Nationaux d'Observation. Les discussions avec l'INSU et des structures fédératrices intermédiaires (GRGS par exemple) sont toujours en cours. L'ouverture

pluridisciplinaire (au niveau TS) s'est illustrée par une augmentation significative des projets multi capteurs.

1.2. LES AVANCÉES SCIENTIFIQUES

Depuis le séminaire de La Rochelle, l'utilisation de nouveaux capteurs plus performants, l'allongement de la période d'archive de données et des développements méthodologiques ont permis de mesurer des signaux à des amplitudes et des échelles spatiales et temporelles inédites, et ainsi de progresser dans la compréhension de processus géophysiques associés, depuis l'ionosphère jusqu'au noyau terrestre.

Par ailleurs l'accès à ces nouvelles mesures a permis de relier plusieurs communautés qui travaillaient sur les mêmes processus mais avec des outils et méthodes différents.

1.2.1. Signature ionosphérique de tsunamis

Suite aux premières détections de tsunamis depuis l'espace à partir de perturbations de Contenu Électronique Total (TEC) déduites des signaux GNSS ou de perturbations d'émission de lumière atmosphérique (airglow) observées par des caméras au sol, une caractérisation plus systématique et une modélisation plus fine de ces signaux ont été entreprises. Plusieurs dizaines d'observations de tsunamis ont été rapportées par des équipes différentes utilisant le réseau GNSS mondial et trois vidéos de l'évolution de l'empreinte lumineuse du tsunami ont été effectuées à partir d'une seule caméra située à Hawaii. Les modélisations ont permis de prendre en considération les effets de la géométrie d'observation ou de la configuration du champ magnétique qui peuvent expliquer la mauvaise ou, exceptionnellement, la non-observation de certains tsunamis, ainsi que l'effet des vents horizontaux qui peuvent perturber la direction de propagation des ondes.

Enfin, une méthode d'inversion a également été développée pour extraire la variation de hauteur d'eau à partir de la signature d'un tsunami dans le TEC. Appliquée avec succès à trois tsunamis d'amplitude modérée (2 cm) à forte (60 cm), cette méthode permet d'envisager aujourd'hui un suivi en temps réel des tsunamis depuis l'espace. Ces résultats sont à l'origine de la mission satellite **IonoGlow** (aujourd'hui en phase 0) et dont l'objectif est de compléter les réseaux d'observation des tsunamis dans les zones peu ou pas couvertes via leur signature airglow.

1.2.2. Déformations de la surface terrestre

Les méthodes d'interférométrie radar et de corrélation d'images sont désormais couramment utilisées pour le suivi des déformations sismiques, volcaniques ou des grands glissements. Alliées à l'imagerie haute résolution (**Pléiades, Spot 6/7**), elles deviennent aujourd'hui pertinentes pour suivre des objets de petites tailles et les mouvements lents. Ainsi, couplées à des mesures GNSS continues (GPS, Galileo, Glonass,...), ces cartes de déformations ont permis, par exemple, de mettre en évidence la réponse d'un glissement de terrain péruvien (région d'Arequipa) dû à la fois à des secousses sismiques et à la pluviométrie régionale. Ce type d'étude permet de progresser dans la compréhension de la mécanique du glissement.

1.2.3. Compréhension du cycle sismique

Les développements récents des méthodes interférométriques utilisant de longues séries temporelles InSAR couplées à des données GNSS permettent désormais d'aborder les mesures des déformations inter-sismiques et des séismes lents. En effet, les déplacements du sol de quelques millimètres par an sont classiquement mesurés de l'échelle locale à l'échelle continentale, y compris dans les régions à forte topographie. Ainsi, le long de la subduction mexicaine, les déformations de surface causées par plusieurs séismes lents ont pu être mesurées et analysées. Elles ont permis de montrer que le séisme de Papanoa (Mw = 7,3) avait été déclenché par un événement de séisme lent débuté deux mois plus tôt (Fig. 1).

Depuis la mise à disposition d'outils de corrélation d'image et de calcul de MNT, les archives d'images aériennes sont utilisées pour estimer les déplacements de séismes anciens. Des MNT peuvent également être calculés pour des images satellite à très haute résolution (**Pléiades, Spot 6/7**) afin d'identifier des marqueurs paléo-sismiques.

Les données de gravimétrie spatiale couplées ou non à celles de la géodésie spatiale sont désormais systématiquement analysées pour l'étude des processus co- et post-sismiques lors de très grands séismes.

Par ailleurs, la détection d'un signal gravitationnel pré-sismique du méga-séisme de mars 2011 au Japon (magnitude 9,1) a été réalisée (Fig. 2) : en analysant les variations du champ de gravité à partir des données des satellites Grace dans un vaste domaine de l'espace et du temps encadrant l'événement de 2011, il a été montré que ce séisme était l'expression extrême d'une déformation, à l'origine silencieuse, migrant depuis la profondeur du manteau jusqu'à la surface terrestre au travers de l'intégralité du système de subduction.

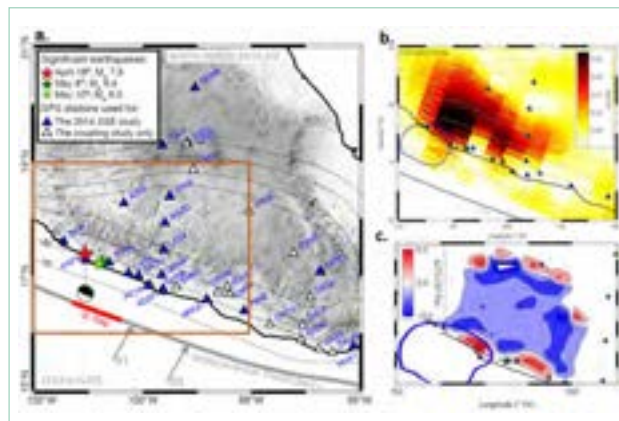


Fig. 1 : Déclenchement du séisme de Papanoa (Mw=7.3) par le séisme lent de 2014 dans la région de Guerrero (Mexique).

a) Carte de localisation, b) Carte montrant en couleur les déplacements cumulés du séisme lent de 2014 sur l'interface de subduction, et la localisation du séisme de Papanoa (contour bleu). c) Carte du changement de contraintes de Coulomb sur l'interface de subduction causé par le séisme lent, montrant que le point d'initiation du séisme (étoile rouge) se trouve dans une zone où le changement de contrainte favorise le déclenchement du séisme.

© M. Radiguet et al. (2016), Triggering of the 2014 Mw7.3 Papanoa earthquake by a slow slip event in Guerrero, Mexico Nature Geosciences doi:10.1038/ngeo2817

1.2.4. Interaction manteau-surface

Les analyses conjointes des données de gravimétrie spatiale (Grace) et des déplacements du sol (GNSS) nous apportent des contraintes sur les rhéologies transitoires du manteau : par exemple, à partir du suivi des variations de masse en Antarctique, ou de la réponse viscoélastique de la Terre aux charges hydrologiques saisonnières. Sur de plus grandes échelles de temps, elles ont permis de prendre en considération les effets du rebond postglaciaire dans les modèles de vitesses de plaques tectoniques.

1.2.5. Champ magnétique terrestre

L'objectif scientifique principal de **Swarm** est la caractérisation, la description et la compréhension du champ magnétique terrestre et de sa variabilité temporelle.

Les mesures **Swarm** ont été utilisées pour la production du modèle géomagnétique international de référence et de sa variation séculaire (IGRF) le plus récent. Elles sont actuellement exploitées pour la mise à jour du modèle en 2020. Plusieurs laboratoires français sont impliqués dans la modélisation du champ magnétique du noyau.

En assimilant les données de dans un modèle numérique de dynamo terrestre, des contraintes statistiques ont été obtenues sur les mouvements à la surface du noyau. En particulier, un gyre planétaire à la surface du noyau a pu être mis en évidence et caractérisé (Fig. 3). L'inversion directe des données satellitaires a d'autre part révélé une accélération intense des flux au cours des 15 dernières années, et une accélération rapide de la dérive du pôle magnétique Nord.

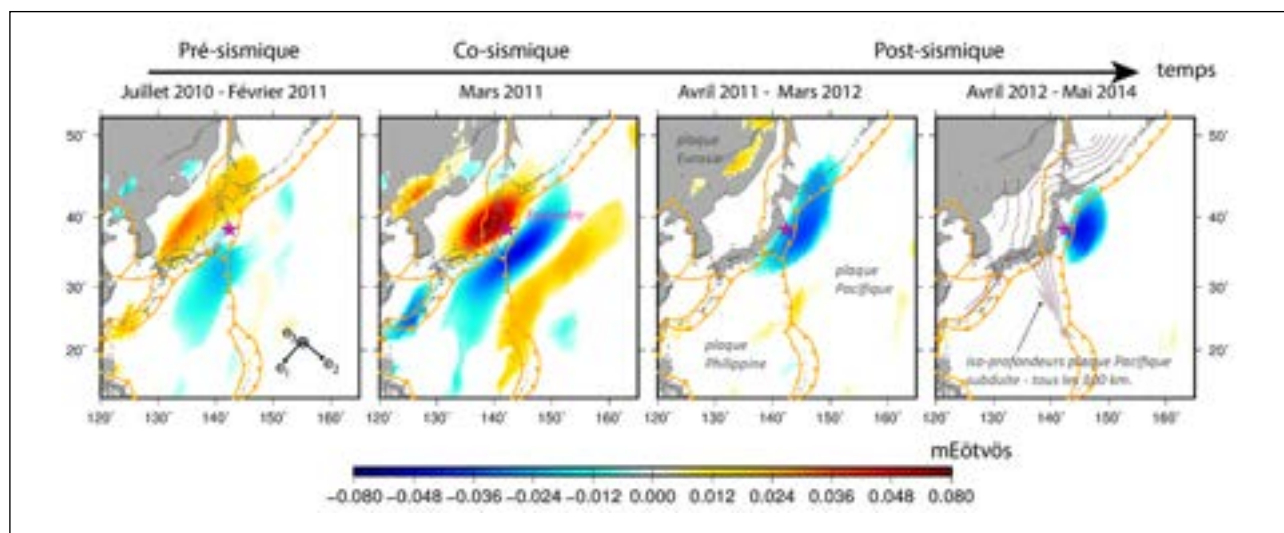


Fig. 2 : Détection par Grace d'un signal pré-sismique (redistributions de masse en profondeur) associé au séisme de Tohoku (M = 9,1). On observe la migration d'Ouest en Est du signal gravimétrique, initiée quelques mois avant la rupture, jusqu'à l'intérieur de deux plaques océaniques. La rupture apparaît comme événement extrême au sein d'un mouvement plus lent, se propageant des profondeurs vers la surface dans la zone de subduction.

© Modified from Panet et al. (2018), copyright Nature Geoscience

1.3. PRÉSENCE DE LA COMMUNAUTÉ TS AU NIVEAU INTERNATIONAL

La communauté française TS est très active dans la communauté internationale dans différents domaines :

a) La coordination ou la contribution aux services scientifiques internationaux de l'Association Internationale de Géodésie (IAG) ou de l'Association Internationale de Géomagnétisme et d'Aéronomie (IAGA). Dans le domaine Terre solide, plus qu'ailleurs sans doute, la communauté nationale et internationale sont très structurées, avec des associations internationales actives et puissantes. La France est ainsi centre de produit pour l'International Terrestrial Reference Frame (ITRF) et diverses équipes animent des centres d'analyses ou centres de données pour les techniques de géodésie spatiale (International Doris Service, International GNSS Service, International Laser Ranging Service, International VLBI service for Geodesy and Astrometry, Earth Rotation and Reference System Services) ou de géomagnétisme (International Geomagnetic Index Service). Pour l'International Gravity Field Service (IGFS), elle héberge le Bureau Gravimétrique International (BGI) et l'International Geodynamics and Earth Tides Service (IGETS) et contribue à la production de modèles globaux de champs de gravité de l'International Center for Global Gravity Field Models (ICGEM). En magnétisme, elle contribue à la production du modèle international géomagnétique de référence (IGRF) et assure la responsabilité du modèle des anomalies magnétiques crustales (World Digital Magnetic Anomaly Map).

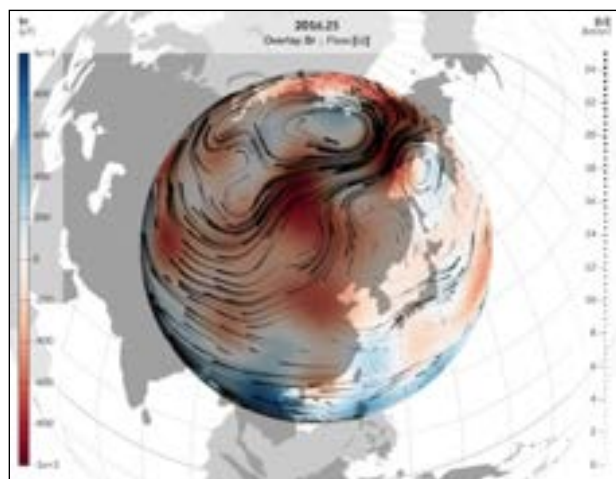


Fig. 3 : Accélération moyenne du mouvement sur la période 2000-2016, à la surface du noyau, obtenue par l'inversion des données spatiales (basées sur les mesures obtenues par les missions Champ et Swarm) et données d'observatoires au sol (l'échelle de couleur correspond à la norme de l'accélération (de 0 à 1 km/yr²), en noir les lignes de courant de cette accélération).

© Nicolas Gillet/CNRS GEODYN

b) L'exploitation scientifique des données : des chercheurs français sont membres des comités consultatifs (*Advisory Board*) du groupe *Data, Innovation, and Science Cluster* (DISC) pour l'exploitation scientifique de la mission européenne **Swarm**, et de l'International Gravity Field Service (IGFS). Ils animent également différents groupes de travail en étude et observation de la Terre sous l'égide de l'IAG ou de l'IAGA (p. ex. *International Gravity Reference System*).

c) Le pilotage de missions scientifiques : des chercheurs français sont co-initiateurs scientifiques de la mission européenne **Swarm**, et investigateur principal de mission en cours d'évaluation Nanomagsat.

2. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

2.1. AMÉLIORATION DE NOTRE CONNAISSANCE DE LA FORME DE LA TERRE

2.1.1. Géodesie

La géodesie spatiale, qui détermine la forme et l'orientation de la Terre, joue un rôle central dans nombre d'applications en sciences de la Terre. Par la détermination précise des orbites des satellites d'observation de la Terre et des satellites de navigation, elle permet le référencement précis des observations dans l'espace et le temps, mais aussi le suivi des déformations de la Terre – mouvements tectoniques et gravitaires, réponse aux surcharges, réajustement isostatique. La précision des références géodésiques est en constante amélioration, même si les précisions-cibles du repère de référence - 1 mm d'exactitude et 0,1 mm/an de stabilité globale – nécessaires à son rôle fondamental et à son exploitation en termes de connaissance de la physique de l'intérieur de la Terre ne sont pas encore atteintes aujourd'hui. Atteindre ces objectifs passe par une amélioration de l'infrastructure d'observation au sol, en particulier pour l'interférométrie à très longue base (VLBI) et la télémétrie laser. Cela passe aussi par une meilleure connaissance, tant statistique que géophysique, des séries temporelles de positions de stations de référence et une amélioration des méthodes de traitements et de combinaison. La précision du lien entre les techniques est également un enjeu et une priorité du groupe Terre solide, avec une proposition d'envoi dans l'espace d'un ou plusieurs satellite(s) permettant une co-localisation globale des quatre techniques – DORIS, GNSS, SLR, VLBI - avec une qualité sans précédent. Plusieurs déclinaisons de cette mission ont été identifiées précédemment dans les projets **Grasp** (NASA, 2015), **E-Grasp** (ESA, 2016 et 2017) et **Mobile** (ESA, 2018, mission de gravimétrie avec un volet géodésique de type **Grasp**), malheureusement non retenues. Ces projets, fédérateurs dans la communauté géodésique française et internationale, ont prouvé qu'ils permettraient une amélioration sans précédent de la qualité du repère terrestre. Le groupe Terre solide met donc en priorité absolue la mission **Marvel** qui, en plus d'améliorer la qualité des données de gravimétrie spatiale, intègre l'instrumentation prévue pour le projet **Grasp**.

En parallèle, le groupe TS souligne la nécessaire complémentarité des mesures espace-sol, et recommande en priorité la mise en place d'un observatoire géodé-

sique fondamental à Tahiti (Papeete, Polynésie française), qui serait doté d'une station de télémétrie laser nouvelle génération et d'une antenne VLBI qui sera financée par la NASA, en complément des instruments GNSS et DORIS, dans un cadre collaboratif international. La localisation de l'Observatoire de Tahiti est intéressante, puisqu'il est situé dans une zone à faible couverture en stations où des techniques géodésiques sont co-localisées. Y ajouter une station VLBI et le doter d'une station SLR de dernière génération permettra donc d'améliorer notablement la précision et la stabilité globale du système de référence.

2.1.2. Topographie et bathymétrie

Une détermination globale, précise, homogène et répétée de la topographie et de la bathymétrie est nécessaire en Terre solide et au-delà (par ex. surfaces continentales, groupes transverses littoral et cryosphère). La comparaison de topographies précises et répétées permet de caractériser l'impact des processus dynamiques à la surface du globe : les déplacements des mouvements gravitaires, des séismes, des volcans, du littoral (cordons dunaires, ou morphologie de plage) ou les changements de volume des glaciers et calottes polaires, voire les variations saisonnières du manteau neigeux. Ce besoin 3D sera en partie couvert par la mission **Co3D**, même si le fort poids de la défense et des industriels dans cette mission suscite des inquiétudes parmi les scientifiques quant à son adéquation à leurs besoins et à l'accès libre à la donnée. En parallèle, une option "stereo" a été proposée dans le cadre du concept **Sentinel-HR** pour répondre à la demande en répétitivité de l'information topographique.

Le CNES est également en possession d'une archive conséquente et inexploitée d'images stéréo acquises par le capteur **Spot 5-HRS** entre 2002 et 2015. L'ouverture de ces données d'archive à la communauté scientifique est une priorité : elle permettra d'élaborer une topographie de référence pour étudier la dynamique d'une surface planétaire en constante évolution. Enfin, le groupe souligne l'importance de la mise à disposition de l'ensemble des images (stéréo notamment) acquises par **Pléiades**, **Spot 6**, **Spot 7** et des constellations commerciales via un catalogue en ligne. Nous recommandons également une coordination des efforts des différents groupes pour l'exploitation des données de la mission laser altimétrique **IceSat-2** (lancée fin 2018), à la fois pour la topographie des terres émergées et la bathymétrie. Pour le volet bathymétrique, les techniques Hyperspectrale (Mission Biodiversity) ou Lidar bathymétrique (**IceSat-2**) sont des opportunités à saisir pour combler le manque de données, principalement dans la zone littorale où les moyens nautiques conventionnels ou aériens, particulièrement onéreux, se limitent à échantillonner une faible partie des zones d'intérêt.

2.1.3. Pôle form@ter

Le Pôle ForM@Ter vise à fournir à la communauté scientifique l'accès à des services et des outils performants pour accéder, traiter et analyser les données satellitaires et in situ, ainsi que des produits dérivés sur la Terre solide et la Géodésie. D'une manière plus générale, ForM@Ter contribue à une structuration de la communauté TS au niveau national, nécessaire pour faire face aux nouveaux défis et aux changements rapides du traitement scientifique des données spatiales. Par exemple, le programme Copernicus et la stratégie long-terme d'acquisition et de diffusion gratuite des données **Sentinel** adoptée par l'ESA ont conduit ces dernières années à une rupture dans la façon de travailler des chercheurs. La masse de données générées et directement accessible (> 10 To/jour) offre des perspectives nouvelles.

En raison des volumes de données en jeu et de la complexité du traitement, cette production de connaissances ne peut toutefois plus être menée au niveau d'une équipe de recherche ou d'un laboratoire sans l'appui d'infrastructures de recherche nationale ou européenne. Pour exploiter pleinement les opportunités offertes par le programme Copernicus et l'émergence de constellations du *Newspace*, l'élaboration et la mise en œuvre de stratégies novatrices adaptées à l'analyse de gros volumes de données en temps court sont indispensables. Ainsi, les recherches futures devront utiliser les techniques de fouille de données et d'intelligence artificielle (apprentissage profond, PCI, ACI), de combinaison d'observations (assimilation de données multi-capteurs, etc.) en s'appuyant sur l'analyse et la modélisation des données Copernicus, de données de capteurs in situ et parfois de productions participatives (réseaux sociaux, crowdsourcing, etc.). En Terre solide, comme dans les autres compartiments du système Terre, la modélisation physique et numérique joue un rôle croissant, soulignant le défi d'articuler données et modèles numériques. Au-delà de l'infrastructure de données et de services, le pôle doit s'interfacer avec des moyens/infrastructures de calcul numérique adaptés aux besoins (et au XXI siècle) et développer des outils pour exploiter ces données massives (IA).

Permettre aux chercheurs français de la communauté TS de rester dans la compétition mondiale implique de leur assurer un accès efficace à des plateformes performantes de traitement, stockage et diffusion des données, et leur apporter du soutien aux développements méthodologiques comme une expertise sur le traitement massif et la gestion du cycle de vie de la donnée, en particulier dans la démarche légitime vers la « FAIRisation » des données. Le groupe TS encourage donc le CNES à poursuivre, voire intensifier, son soutien au Pôle ForM@Ter. Le groupe recommande la prise en considération des besoins liés aux problématiques

spécifiques du domaine, et à la structuration historique de la communauté Terre solide comme par exemple dans l'hébergement et le soutien du CNES aux services développés. Le groupe apprécie les efforts déjà engagés dans le cadre de collaborations avec d'autres structures, par exemple au sein de l'Infrastructure de Recherche « Data Terra » réunissant les quatre pôles (Aeris, ForM@Ter, Odatis et Théia) et recommande leur renforcement.

2.2. AMÉLIORATION DE NOTRE CONNAISSANCE DES CHAMPS DE PESANTEUR ET MAGNÉTIQUE

2.2.1. Gravimétrie terrestre

Les variations spatiales et temporelles du champ de gravité terrestre reflètent l'ensemble des variations de distribution des masses au sein du globe, à la fois aux échelles géologiques et aux échelles humaines. Aux longues échelles de temps, elles portent des empreintes des mouvements de convection profonde qui sous-tendent le volcanisme et les mouvements des plaques tectoniques en surface, et donnent lieu à des hétérogénéités de structure mantellique jusqu'à la limite avec le noyau. À l'autre extrémité du spectre, elles enregistrent les manifestations les plus catastrophiques de cette activité interne, les déformations de la Terre solide sous l'effet du déplacement des charges d'eau et de glace à sa surface, et toute la dynamique de circulation de l'eau sous ses différentes phases au sein du système climatique, y compris à des profondeurs peu accessibles par les autres types d'observations.

Cette richesse de la donnée gravimétrique explique le succès des missions **Grace** et **Goce**, le lancement de **Grace Follow-On** en mai 2018 et de nombreux travaux de la communauté nationale et internationale pour concevoir de futures missions ou combinaisons de missions gravimétriques. Les observations de gravimétrie satellitaire contiennent des signatures de phénomènes associés à toutes les composantes du système Terre, et leur combinaison avec les données d'autres types de senseurs permet de lever les ambiguïtés en observation de la Terre. Par exemple, la combinaison avec les observations de déformations de la surface terrestre, différemment affectées par les redistributions de masse en profondeur, contraint la profondeur des sources et apporte une information unique sur la façon dont la Terre se déforme y compris en son intérieur, sous l'effet de charges internes et externes.

La meilleure compréhension des événements catastrophiques et de l'évolution de notre environnement proche surface (en termes de risques naturels mais aussi de ressources en eau et d'impact des variations

climatiques sur le cycle de l'eau), en lien avec la dynamique et la rhéologie profonde, requiert l'observation des variations temporelles du champ de gravité terrestre sur des périodes longues. Les variations de gravité terrestre sont le seul senseur sur les mouvements asismiques en profondeur au sein du système Terre, qui échappent à tous les autres systèmes d'observation. Complétées par un suivi géométrique pour identifier la composante plus proche surface, elles offrent une possibilité unique pour suivre l'intégralité du mouvement des plaques et du manteau dans de larges volumes autour des frontières majeures, y compris avant une rupture géante comme cela a pu être observé récemment (séisme du Japon 2011). Pour la même raison, elles sondent les réserves en eau dans le sous-sol. Afin d'avoir accès à la dynamique de la Terre interne, aux grandes longueurs d'ondes spatiales et temporelles, il est nécessaire d'avoir des données de la meilleure qualité sur le long terme, avec une précision homogène. Pour les observations satellites, une partie des limitations de qualité des données est intrinsèquement liée à la configuration orbitale des missions actuelles (**Grace**, **Grace Follow-On**), tandis que d'autres limitations viennent de la qualité de la mesure.

Le groupe Terre solide demande en priorité le lancement de la mission **Marvel**, qui propose des perspectives d'amélioration inédites en précision et en résolution via une amélioration des données de positionnement et de la configuration orbitale de la mission. Il en résultera un gain en résolution spatiale et temporelle, qui permettra de développer les applications en temps réel (suivi des inondations par exemple) et d'étendre les complémentarités avec les autres capteurs (altimétrie, GNSS). En outre, le concept de mission, unique dans sa conception qui combine une double constellation comprenant un satellite haut (reprenant le concept de la mission **Grasp**) et un satellite gravimétrique en orbite basse, répond ainsi à un double besoin de fournir un système de référence géodésique précis et des observations gravimétriques à haute résolution. Cette constellation à deux altitudes permet de lever une limite majeure des systèmes de type **Grace**, à savoir les motifs d'erreurs le long des orbites qui limitent considérablement l'exploitation scientifique des modèles de géoïdes.

Par exemple, dans les zones sismogènes, ces progrès permettront de suivre les mouvements sismiques et asismiques des plaques de la surface aux plus grandes profondeurs, associés à des séismes de Mw 7,8 (seuil de détection) à 7 (cible). Un tel suivi est indispensable pour comprendre si ces ruptures sont systématiquement précédées par des déformations profondes détectables. Un autre exemple concerne la séparation des signaux associés à la fonte des glaces actuelle et au rebond postglaciaire à partir des observations de gravimétrie spatiale, de géodésie spatiale et d'altimétrie satellitaire, qui permettra de nouvelles estimations des

bilans de masse des calottes polaires (et leurs incertitudes). Enfin, l'amélioration en résolution donnera accès au suivi de bassins hydrologiques de taille moyenne (40% à 85% des bassins pour les configurations seuil ou cible, contre 10% par **Grace**).

En complément des observations spatiales, les mesures in situ au voisinage de la surface terrestre restent indispensables pour compléter le spectre des observations des petites aux grandes longueurs d'onde et à différentes échelles temporelles ou encore apporter une référence globale et absolue à toute observation spatiale. Le développement de nouvelles technologies de mesures du champ de gravité utilisant les atomes froids, d'ores et déjà éprouvées pour des mesures ponctuelles ou embarquées (bateau, avion) offre des perspectives inédites pour des observations nouvelles en particulier dans les zones de transition Terre/Mer, très mal cartographiées par les satellites ou encore sur des régions difficiles d'accès (zone montagneuses, zones polaires, régions volcaniques, etc.).

Ces techniques en plein essor au niveau international vont donner accès pour la première fois à des mesures absolues sur de vastes zones et hors des régions émergées (campagnes marines ou aéroportées) créant ainsi un degré de précision et d'homogénéité unique entre observations spatiales et in situ. De telles technologies sont également déjà à l'étude pour la conception de nouveaux capteurs (gravimètres, accéléromètres) pour de futures missions spatiales. À noter que dans un contexte très compétitif au niveau international sur ces activités de R&D très prometteuses, les équipes françaises (dont le CNES) occupent actuellement une position de leadership qu'il convient de maintenir et de valoriser. Enfin la complémentarité des missions via une collaboration internationale active, à l'image de ce qui a été réalisé pour la filière altimétrique, doit être soutenue.

2.2.2. Magnétisme terrestre

La description du champ magnétique a particulièrement progressé ces dernières années, grâce aux données satellitaires de **Swarm**. Les modèles les plus récents incorporent des données d'observatoires magnétiques et presque deux décennies de mesures satellitaires. La connaissance du champ magnétique est essentielle à la géolocalisation, la navigation, la météorologie de l'espace et la prédiction des flux de particules chargées qui pénètrent l'atmosphère et perturbent les télécommunications. L'assimilation de données satellitaires dans des modèles numériques de dynamos permet de mieux comprendre la physique des variations du champ magnétique terrestre et de quantifier l'évolution passée et future des grandes caractéristiques du champ.

L'accumulation pluriannuelle à décennale d'informations à échelle globale a permis d'obtenir des modèles

de haute précision et de haute résolution du champ magnétique. Au niveau du manteau, ces modèles viennent compléter la tomographie sismique pour décrire la structure du manteau. Au niveau crustal, c'est la structure magnétique de la croûte dont la connaissance est révolutionnée. Parce que ces structures dépendent de l'âge de la croûte, des mouvements tectoniques, des variations de flux de chaleur, de la composition minéralogique, et de son épaisseur, elles permettent de mettre en évidence les paramètres géophysiques clés qui régissent la structure et l'état thermique de la lithosphère terrestre. La continuité des observations de haute qualité en magnétisme, nécessaire à l'amélioration de notre connaissance de l'intérieur profond de la Terre, est une priorité du groupe TS.

La mission **Swarm** lancée par l'ESA en 2013 a contribué à fédérer les communautés du géomagnétisme interne et externe. Le projet de mission **NanoMagSat** propose l'envoi d'un nanosatellite avec une période de recouvrement sur la mission **Swarm**. Outre l'amélioration du retour scientifique de **Swarm**, ce projet offre aussi la possibilité de mesurer le champ magnétique sur le long terme depuis l'espace et à moindre coût. Ce satellite est donc aussi un démonstrateur pour une possible future constellation.

2.3. QUESTIONS TRANSVERSES

2.3.1. Système terre et changement global

Parce que l'essentiel des phénomènes géophysiques sont associés à des changements dans la distribution de masse de la Terre et à des déformations de sa surface, l'observation de la Terre solide donne accès à des informations sur la dynamique de la Terre, comme système complexe qui inclut et couple l'atmosphère, l'océan, la cryosphère, l'hydrosphère. En cela, le suivi précis, continu et homogène de la forme de la Terre et de son champ de pesanteur est un outil vital pour la compréhension des grands échanges à l'échelle du système Terre. En particulier, les mesures géodésiques apportent de multiples données fondamentales pour le suivi du changement global : fonte des glaces, niveau des mers, suivi des ressources en eau... La mission gravimétrique **Grace** a révolutionné l'étude du bilan de masse des calottes polaires (Antarctique et Groenland) et des grands glaciers de l'Arctique. Elle s'avère complémentaire des autres techniques (altimétrie radar ou différence de MNTs) pour affiner les estimations de la contribution de la cryosphère à la hausse du niveau moyen des mers. Aujourd'hui la principale source d'incertitude sur les bilans déduits de **Grace** est la méconnaissance du rebond postglaciaire (GIA, Glacial Isostatic Adjustment). Une bonne modélisation du GIA est essentielle, à la fois pour corriger les pertes de masse

observée par **Grace** (et bientôt par **Grace Follow-On**) mais également pour affiner les projections de la distribution spatiale (elle sera très hétérogène) de la hausse future du niveau des mers. Une mission comme **Marvel** est donc essentielle pour progresser sur ces questions à forts enjeux scientifiques et sociétaux. Pour les régions de montagne, où les données **Grace** comme l'altimétrie radar sont difficilement exploitables, c'est le lancement d'une mission "topographie" fournissant des MNT précis, réguliers (pas de temps saisonnier) et sur des zones vastes qui permettra de mieux contraindre les pertes de masse des glaciers et les évolutions des stocks saisonniers de neige.

2.3.2. Les risques

À des échelles temporelles et spatiales plus courtes, l'activité géologique de la Terre solide se manifeste aussi par des phénomènes transitoires et extrêmes - séismes, tsunamis, éruptions volcaniques et glissements gravitaires - venant perturber le système, parfois durablement pour les événements les plus intenses. Leur impact sociétal implique de développer une surveillance permanente et fiable. Le cycle sismique et les mécanismes de préparation et de déclenchement des éruptions volcaniques sont aujourd'hui mieux compris, grâce notamment aux observations d'interférométrie spatiale (InSAR) et GNSS. Les satellites **Sentinel** contribuent à la compréhension fine du cycle sismique via la mesure des déformations inter-, co- et post-sismiques au niveau des zones tectoniquement actives, grâce à un temps de retour réduit. Le développement des techniques de géodésie de fond de mer doit se poursuivre.

En complément, pour les tsunamis, il faut se tourner vers d'autres méthodes, capables de mesurer les déformations de la surface de l'océan avec une précision centimétrique et une couverture spatiale et temporelle homogène. La détection ionosphérique des tsunamis a ouvert une voie prometteuse avec en particulier la luminescence de l'ionosphère qui peut être observée avec une caméra optique IONOGLOW équipée de filtres. Ce concept est à l'origine du projet de satellite **s**. La phase 0 a permis de dégager des paramètres de pré-dimensionnement tels que l'orbite géostationnaire pour permettre un champ de vue suffisant. Cette étude a aussi démontré l'utilité des observations multi-longueur d'onde (visible, infrarouge et ultraviolet). Un futur système d'alerte tsunami basé sur ces méthodes optiques impose de mieux connaître les systèmes de détection airglow (faible luminescence de la haute atmosphère) des ondes de gravité et de continuer les travaux engagés sur la modélisation quantitative de la signature airglow des tsunamis et sur l'évaluation de l'impact du bruit de fond. Une collaboration avec les communautés s'intéressant à la météorologie de l'espace et à la chimie de l'atmosphère est nécessaire

pour précisément évaluer les niveaux de détectabilité des tsunamis et la fiabilité des méthodes d'observation ionosphérique.

2.3.3. Le littoral

Le littoral est un thème qui a été abordé par le groupe TS, principalement sous l'angle de la quantification des transferts de matière sur le continuum Terre/Mer. Le potentiel des données spatiales est en effet important, par exemple pour mesurer les évolutions morphodynamiques des environnements littoraux (falaises, plages, estuaires) en réponse aux forçages météorologiques. Des données topo-bathymétriques sont alors requises, tant à très haute résolution spatiale (meilleure que le mètre) à l'échelle des sites d'études, qu'à l'échelle mondiale. Les données stéréo-photogrammétriques, Lidar et hyperspectrales n'ont pas encore révélé tout leur potentiel dans ce domaine à très fort enjeu sociétal.

2.4. PRIORITÉS DU GROUPE TERRE SOLIDE

Dans ce contexte, le groupe TS souhaite mettre en avant quatre types de priorités :

- **Missions spatiales.** Le groupe soutient fortement deux missions spatiales : Marvel (mission multi-techniques en géodésie-gravimétrie, permettant un bond

en avant de la qualité en positionnement et du suivi du champ de gravité), et NanoMagSat (nanosatellite dédié à l'amélioration de la connaissance sur la dynamique du noyau, la conductivité dans le manteau, le magnétisme de la croûte, et la météorologie de l'espace). Le groupe soutient également le développement du projet IonoGlow (mission dédiée au suivi des tsunamis par imagerie de la signature airglow et à l'étude des interactions atmosphère/ionosphère).

- **Infrastructures sol.** Le groupe recommande le déploiement de l'Observatoire Géodésique Fondamental (OGF) de Tahiti, infrastructure géodésique unique dans le Pacifique Sud, combinant les quatre techniques géodésiques fondamentales, crucial pour améliorer la couverture du système de référence terrestre.
- **R&D.** Le groupe souligne l'importance de maintenir l'excellence française dans le développement de capteurs innovants pour la gravimétrie spatiale (accéléromètres et gravimètres atomiques).
- **Données et calculs.** Un accès amélioré aux données d'archives (multi-capteurs et multi-agences) et à des moyens de calculs adaptés aux traitements de données massives. Dans cet objectif le groupe souhaite le développement du Pôle ForM@Ter afin de permettre de recenser les besoins et de coordonner les efforts nécessaires.

2.5. SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

Type de mesure/d'observables	Cadre de réalisation	R&T associée	Thème scientifique
Systèmes de référence et positionnement millimétrique	Marvel		Précision et stabilité du système de référence
Champ de pesanteur	Marvel Copernicus/ESA	Accéléromètres et gravimètres atomiques	Evolution du système climatique, dynamique profonde de la Terre
Systèmes de référence et positionnement millimétrique	Observatoire fondamental de Tahiti		Précision et stabilité du système de référence
Champ magnétique	NanoMagSat (ESA SmallSat)		Dynamique du noyau, conductivité dans le manteau, magnétisme de la croûte, spaceweather
Airglow associé aux tsunamis	IonoGlow Coopération Inde, Singapour, US		Détection et imagerie des tsunamis

GROUPE DE TRAVAIL THÉMATIQUE OCÉAN

Sévérine Alvain, Jean-Michel André, Marcel Babin (expert invité), Pascal Bonnefond, Jacqueline Boutin, Annick Bricaud, Francesco D'Ovidio, Yann Drillet, Alexei Kouraev, Pierre-Yves Le Traon (président entrant), Marina Levy (présidente sortante), Anne Lifermann (thématicienne), Hubert Loisel (expert invité), Bertrand Lubac, Benoit Meyssignac, Rosemary Morrow (experte invitée), Alexis Mouche (expert invité), Thierry Penduff, Annick Sylvestre-Baron (thématicienne).

1. LES GRANDES QUESTIONS ET DÉFIS

1.1. L'OBSERVATION DES OCÉANS : UN BESOIN PRESSANT AFFIRMÉ AUX PLUS HAUTS NIVEAUX

L'océan joue un rôle de premier plan vis-à-vis de l'évolution du climat. Plus de 90 % de l'excès de chaleur reçu par la planète en raison du réchauffement climatique et un tiers des émissions anthropiques de CO₂ sont absorbés par l'océan. Plus de 75 % des flux évaporation-précipitation ont lieu au-dessus de l'océan. L'océan est aussi une source essentielle de nourriture, d'énergie et contribue au développement de l'économie mondiale. 90 % des transports de marchandises se fait par les océans. La pêche et l'aquaculture fournissent plus de 20 % de la ration protéique moyenne de trois milliards de personnes. Les énergies marines renouvelables offrent un potentiel considérable pour l'organisation de la transition énergétique.

Les océans subissent cependant des pressions majeures en raison du changement climatique et d'autres activités humaines (p. ex. pollution, surpêche, extraction minière). Une gestion durable de l'océan et de ses ressources visant à préserver l'état de santé des océans tout en contribuant au développement de l'économie bleue est devenue impérative. Celle-ci doit s'appuyer sur l'observation continue et sur le long terme de l'ensemble des océans pour comprendre, décrire et prévoir l'évolution de ses propriétés physiques et biogéochimiques, caractériser l'impact du changement climatique sur les océans et appuyer les politiques visant à réduire les effets climatiques et à s'y adapter.

Le besoin d'observation des océans est affirmé aux plus hauts niveaux politiques : agenda 2030 et *Decade of Ocean Science* des Nations Unies pour le dévelop-

pement durable (Objectifs de Développement Durable/ ODD dont l'ODD 14 dédié à l'océan), préparation par le GIEC d'un rapport spécial sur *Climate Change, the Oceans and Cryosphere, Tsukuba*, Communiqué du G7 sur l'observation des océans, rapport de l'OCDE *The Future of Ocean Economy in 2030* et conférence internationale OceanObs19 sur l'observation des océans.

1.2. APPORT DE L'OBSERVATION SPATIALE

Une des caractéristiques essentielles du système d'observation des océans est l'intégration des moyens d'observations : utilisation conjointe et complémentarité des observations spatiales et in situ, rôle de la modélisation et de l'assimilation de données pour interpoler de façon dynamique les observations et effectuer des prévisions. Le système est aussi conçu pour répondre à des besoins variés (recherche, climat, santé de l'océan, services océaniques). Les satellites jouent un rôle majeur dans ce système intégré. Ils permettent d'accéder à des observations de paramètres-clés pour la compréhension, le suivi et la prévision des océans : niveau de la mer et courants géostrophiques, température et salinité de surface de la mer, biogéochimie marine via la couleur de l'océan, vagues, vents et glace de mer. Les satellites apportent une couverture unique globale à haute résolution (spatiale et temporelle) et long terme. Les mesures des satellites doivent être complétées par des mesures in situ permettant d'étalonner et valider les observations des satellites, d'apporter la dimension verticale (observation de l'intérieur de l'océan) et de donner un contexte historique à long terme.

1.3. UN RÔLE ACCRU DE L'UNION EUROPÉENNE AVEC COPERNICUS

Le CNES a eu un rôle moteur en océanographie spatiale avec, en particulier, le développement de la filière d'excellence altimétrique. La mise en place du programme

européen Copernicus représente un changement de paradigme pour l'observation de la Terre en Europe. Copernicus met en œuvre de nouvelles capacités opérationnelles de suivi du système Terre avec une vision à long terme (> 20 ans). Celles-ci s'appuient sur une composante spatiale (les missions **Sentinel**) remarquable et un ensemble de services dont le service marin (CMEMS) piloté par la France (Mercator Ocean). Dans ce nouveau contexte, le rôle du CNES évolue. Il doit être un acteur majeur dans la définition et la mise en œuvre de Copernicus, assurer une collaboration étroite avec l'ESA et EUMETSAT et accompagner la participation des laboratoires français. Parallèlement, il doit continuer d'être une force de proposition et de développement pour des missions ou des concepts innovants pouvant être ou non intégrés à terme dans Copernicus.

1.4. LES GRANDES QUESTIONS ET DÉFIS EN OCÉANOGRAPHIE

Les grandes tendances en océanographie pour la prochaine décennie et qui relèvent de cette prospective peuvent se décliner en cinq thèmes principaux :

• Le climat

Il s'agit d'améliorer notre connaissance du rôle de l'océan sur le climat, de prédire son évolution, de suivre et prévoir l'évolution de l'océan pour analyser l'impact des mesures d'atténuation et mettre en œuvre des politiques d'adaptation adéquates. La recherche internationale sur le climat s'oriente aujourd'hui vers deux directions fortes :

- 1) l'observation, la compréhension et la prédiction/projection couplée du climat en analysant non plus les composantes du système comme l'océan, l'atmosphère, la cryosphère et les continents, mais en analysant les grands cycles climatiques qui couplent toutes les composantes (p. ex. eau, énergie, carbone) ;
- 2) le développement d'une recherche qui soutient le développement de savoir utilisable par la société (*climate services*). Il est impératif dans ce cadre d'assurer une continuité des observations spatiales, une cohérence entre les différentes variables observées et d'associer des incertitudes fiables et validées aux mesures. Des observations toujours plus précises et résolues (en particulier dans les régions anthropisées comme le domaine côtier ou les zones-clés qui sont source de risque comme les calottes polaires) sont également indispensables.

• Le côtier et le littoral

La plupart des attentes sociétales vis-à-vis de l'océan se manifestent dans les zones côtières qui subissent des pressions majeures en raison des activités humaines. Mieux comprendre la dynamique des zones

côtières (continuum terre-mer incluant le couplage avec les bassins versants) et les interactions entre la physique, la géochimie et la biologie, quantifier leur rôle sur le cycle du carbone, suivre et prévoir leur évolution sont des priorités fortes pour la prochaine décennie. Les observations spatiales permettront de compléter les rares mesures in situ disponibles sur les variables biogéochimiques (flux de substances particulières et dissoutes terrigènes colorées, pigments phytoplanctoniques). Elles permettent également de caractériser la bathymétrie et les habitats benthiques. L'incertitude sur la bathymétrie côtière est un verrou pour l'étude de la morphodynamique du littoral et des processus hydrodynamiques contrôlant la dynamique des plages et du trait de côte. Les habitats benthiques littoraux sont souvent négligés dans les bilans globaux de carbone, alors que ces écosystèmes sont de plus en plus reconnus comme étant aussi productifs que les forêts tropicales. Ils structurent l'ensemble des services écosystémiques rendus par les systèmes littoraux ainsi que les activités économiques associées, telles que la conchyliculture.

• Les fines échelles spatio-temporelles

La mise en évidence du rôle essentiel de la mésoéchelle et de la submésoéchelle sur la dynamique océanique et du couplage avec la biologie est une des avancées majeures des dernières années en océanographie. Elle va de pair avec le développement de modèles globaux/régionaux avec une résolution kilométrique et leur couplage avec des modèles côtiers. Les petites mésoéchelles sont actives dans la circulation horizontale et affectent le bilan d'énergie cinétique de l'océan ; les fronts et les filaments sub-mésoéchelles jouent un rôle important dans les échanges verticaux des couches supérieures aux couches les plus profondes et ont un impact sur les échanges verticaux de chaleur, de carbone, de nutriments et donc sur la structure physique, biogéochimique et biologique de l'océan.

La mission **Swot** fournira à partir de 2021 des observations 2D sans précédent de la topographie de la surface de l'océan résolvant les longueurs d'onde de 15 à 40 km en fonction de l'état de la mer. À ces échelles, les interactions entre les mouvements en équilibre géostrophique (p. ex. tourbillons mésoéchelles, méandres et jets) et les mouvements haute fréquence non équilibrés (p. ex. courants inertiels, ondes internes) jouent un rôle important dans la dynamique des courants océaniques et dans la définition des voies menant au mélange et à la dissipation dans l'océan. **Swot** fournira une mine d'informations sur ces fines échelles en haute mer, mais également dans le continuum côtier-estuarien. **Swot** est cependant une mission de démonstration et il est essentiel que les avancées technologiques et scientifiques réalisées grâce à **Swot** se poursuivent sur le long terme.

• La biogéochimie et l'écologie marine

La compréhension de la biogéochimie marine et de son couplage avec la physique, du global au côtier, fait partie des grands enjeux scientifiques de la prochaine décennie, notamment au niveau du cycle du carbone, de l'évolution de la production primaire, des échelons trophiques plus élevés et plus généralement de la biodiversité marine.

L'effort d'observation de l'océan, via une synergie entre des plateformes in situ autonomes (flotteurs profileurs, *gliders*, mouillages), classiques (navires océanographiques) et les satellites, est amené à se renforcer afin d'obtenir une vision en 3D/4D des processus biogéochimiques. Cette synergie est essentielle pour les études touchant l'écologie marine, pour laquelle l'intégration de données satellitaires et observations in situ, telles que l'acoustique et la télémétrie animale, permettra de caractériser la biogéographie hauturière. Cette information sera primordiale pour supporter les politiques de conservation (p. ex. négociations intergouvernementales *Biodiversity Beyond National Jurisdictions*) et d'exploitation de ressources marines en haute mer.

En parallèle de ces études, les activités de recherche liées à l'interprétation du signal optique (propriétés optiques et radiométriques) devront être poursuivies. Les relations bio-optiques sont des relations empiriques qui connectent les mesures optiques aux variables biogéochimiques d'intérêt (p. ex. couleur de l'eau et Chl-a ; coefficient de rétrodiffusion particulaire et stock de carbone organique particulaire POC). Il est indispensable de mieux contraindre ces relations, de déterminer leur représentativité à l'échelle globale et d'identifier plus précisément les régions pour lesquelles les relations globales sont inadéquates afin de développer des relations locales.

La détection des tendances du changement climatique devient possible via différents indicateurs : la concentration en chlorophylle, mais aussi les PFT (*Plankton Functional Types*) et les mesures radiométriques (réflectances). Les algorithmes de détection et quantification des PFT s'appuieront de plus en plus sur les données satellitaires hyperspectrales (p. ex. PACE/OCI). La détection des tendances climatiques devra s'appuyer sur des séries de données multi-capteurs les plus homogènes possibles, selon des techniques de fusion qui restent à améliorer.

• Les zones polaires

Les zones polaires subissent en raison du réchauffement climatique des changements majeurs bien plus rapides que l'océan global (phénomène d'amplification polaire). Ce sont des régions-clés peu observées sources de nombreux enjeux géostratégiques, notamment dans l'Arctique. Les grands défis scientifiques

de l'océanographie propres aux zones polaires englacées (océans Arctique et Austral), auxquels les observations spatiales peuvent contribuer concernent principalement la banquise, les mers nordiques et les flux biogéochimiques.

La banquise joue un rôle majeur dans les échanges océan-atmosphère, le mélange vertical et les flux biogéochimiques dans l'océan. Sa réponse actuellement observée au changement climatique reste mal comprise, à tel point que les modèles climatiques continuent de mal prédire l'évolution de son étendue en mode rétrospectif.

Les mers nordiques sont le siège des échanges de masses d'eau entre l'Atlantique Nord et l'océan Arctique. La chaleur que ces premières contiennent et leur devenir en Arctique affectent l'évolution de la banquise et de la circulation à grande échelle. Les flux biogéochimiques sont fortement affectés par les changements des propriétés thermodynamiques, dynamiques et optiques de la banquise. La banquise constitue par ailleurs un obstacle significatif pour les flux océan-atmosphère de carbone dont l'ampleur pourrait changer significativement avec une réduction de l'étendue de la banquise Arctique, et entrainer une augmentation significative du pH. La banquise affecte aussi les flux de composés volatils climatiquement actifs tels que le DMS. Finalement, la banquise contraint fortement la dynamique (phénologie) des *blooms* de phytoplancton, qui eux-mêmes façonnent la structure du réseau trophique marin.

Ces thèmes ne sont pas, bien entendu, indépendants. Les couplages avec les autres composantes du système Terre (atmosphère, cryosphère, surfaces continentales, terre solide) font notamment partie intégrante des questionnements de recherche de ces différents thèmes.

Un thème transverse concerne l'océanographie opérationnelle qui apporte une approche intégrée (observations satellites et in situ, modélisation et assimilation de données, services) pour traiter du besoin de suivi et de prévision des océans. Les systèmes de réanalyse, d'analyse et de prévision océanique pour la physique permettent aujourd'hui de représenter et de prévoir l'évolution de l'océan global de la grande échelle jusqu'à la mésoéchelle. La tendance pour la prochaine décennie est de proposer des systèmes plus intégrés prenant en compte les interactions et rétroactions de la physique sur la biogéochimie et les couplages océan/vagues/glace de mer/atmosphère, des systèmes à plus haute résolution, permettant une représentation plus complète de la mésoéchelle à toutes les latitudes et des systèmes ensemblistes permettant de mieux représenter les incertitudes et les erreurs de prévisions. L'amélioration des systèmes pour la biogéochimie nécessitera des

développements méthodologiques mais aussi l'amélioration des mesures satellitaires de couleur de l'océan (p. ex. géostationnaire) et le développement des systèmes d'observation in situ (p. ex. *BioGeochemical Argo*).

Les techniques d'intelligence artificielle pour l'analyse en masse de données (*big data mining*, *machine learning*) vont enfin jouer un rôle de plus en plus important avec le développement de l'observation et de la modélisation à très haute résolution.

2. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2014

2.1. COMPRÉHENSION DES PROCESSUS OCÉANIQUES

La combinaison d'observations multicapteurs et in situ, de simulations numériques, et l'assimilation de ces données dans les modèles, a permis d'affiner l'étude de la dynamique de mésoéchelle, de son rôle sur les transports de propriétés et ses interactions avec d'autres échelles. Par exemple, les observations satellitaires ont permis de calibrer des modèles globaux qui à leur tour ont permis de montrer que la mésoéchelle alimente et confère un caractère partiellement chaotique à la variabilité interannuelle à décennale grande échelle. Les données de l'altimétrie côtière, confrontées aux simulations numériques, permettent désormais de mieux comprendre la dynamique des fronts d'*upwelling* ou des courants de bord.

La préparation de la mission altimétrique à haute résolution **Swot** a multiplié les études de modélisation initialement motivées par les imageries haute résolution de couleur et température, explorant le rôle de la sub-mésoéchelle sur la cascade d'énergie océanique, sur les transports verticaux de chaleur et de nutriments, et sur la diversité du plancton.

Ces modèles ont montré le couplage entre la dynamique géostrophique et les ondes internes en tant que mécanisme sub-mésoéchelle important jusqu'ici largement négligé (Fig. 1), et des méthodes ont été proposées pour séparer dans les observations ces deux contributions. Des stratégies d'échantillonnage in situ adaptatives ont été développées pour tirer le meilleur parti des observations de télémétrie actuelles et futures.

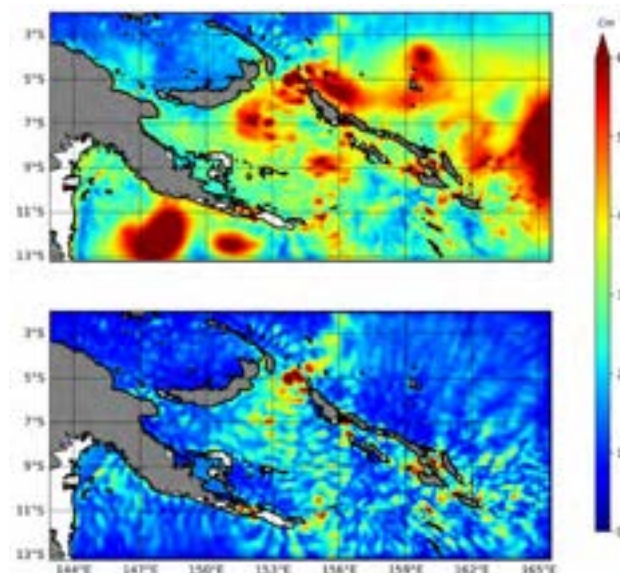


Fig. 1 : Impression d'artiste de la mission Swot - altimétrie à large échelle (crédit CNES) (en haut). Variabilité du niveau de la mer dans la mer des Salomon pendant une période El Niño de 3 mois, à partir d'un modèle 1/36° avec forçage par la marée (au milieu) et variabilité du modèle aux périodes <48h, dominées par la marée océanique interne (en bas). L'interaction de ces deux dynamiques océaniques sera vue en 2D par Swot.

© M.Tchilibou LEGOS/CNRS

L'observation spatiale de la salinité depuis neuf ans, combinée aux autres mesures satellitaires et in situ (SST, couleur de l'eau, courants, pluie), a amélioré la compréhension du cycle de l'eau, la détection des anomalies interannuelles de salinité reliées aux événements climatiques (El Niño, Indian Ocean Dipole), aux flux d'eau douce, notamment aux décharges de fleuves jusqu'au voisinage des côtes.

Des études récentes ont montré que l'assimilation de la salinité satellitaire pourrait permettre d'améliorer la prévision des événements El Niño.

La préparation de la mission **CFOSAT** a motivé de gros efforts pour améliorer la caractérisation des relations entre vent, rugosité, vagues et courants de surface. Ces caractéristiques jouent un rôle prépondérant dans les échanges air-mer et sont particulièrement affectées par les événements extrêmes (p. ex. cyclones) avec de possibles rétroactions.

L'amélioration des algorithmes couleur de l'océan a ouvert la voie à de nouvelles études, à la fois sur la structuration de la biodiversité, sur la quantification des stocks de carbone particulaire et dissous, et sur les liens entre apports atmosphériques et production biologique. La préparation de la mission **Ocapi** a motivé des études de la variabilité biologique sur des échelles de temps diurne et intra-saisonnière. Les données acquises par les flotteurs profileurs dans les diverses zones océaniques ont ouvert la voie à une vision 3D de certains processus biogéochimiques à partir des observations satellites. Quant aux niveaux trophiques supérieurs, l'intégration entre donnée satellite et télémétrie animale a mis l'accent sur le rôle des systèmes frontaux en tant que lieux d'interaction trophique et d'agrégation pour la mégafaune marine.

2.2. PHYSIQUE DE LA MESURE

Améliorer la précision des variables déduites des mesures satellitaires et déterminer de nouvelles variables requièrent de bien comprendre et modéliser les liens théoriques entre les observables et la mesure au niveau du satellite. Les principaux axes de recherche ont concerné :

• Algorithmes de couleur de l'océan

L'étude des paramètres optiques se poursuit et s'associe à des innovations instrumentales in situ pour améliorer ces algorithmes. Des paramètres comme la rétrodiffusion, l'absorption, l'atténuation ou la polarisation sont toujours au cœur des projets de recherche. Les études d'anomalies bio-optiques régionales permettent en retour une meilleure compréhension des processus biogéochimiques et le développement d'algorithmes régionaux.

• Salinité/radiométrie bande L

La modélisation du signal radiométrique en bande L s'est grandement améliorée grâce à la multiplication des mesures et à des développements de nouveaux modèles physiques. Il reste néanmoins des incertitudes, par exemple liées à l'influence de la hauteur significative des vagues et les variations observées avec la SST ne sont pas totalement expliquées. Ces mesures permettent également la détection des vents extrêmes, y compris sous les nuages, qui sont utilisés dans certains centres météorologiques.

• Altimétrie/Etat de mer

En 2014, l'altimétrie en bande Ka venait juste de naître avec **Saral/AltiKa** et le SAR n'était disponible avec **CryoSat-2** que sur certaines zones. La bande Ka apparaît de plus en plus comme incontournable pour l'altimétrie du futur (p. ex. **Swot**). En ce qui concerne le mode SAR, **Sentinel-3** a clairement montré une avancée majeure sur la précision de la mesure. Il reste malgré tout des efforts à faire en ce qui concerne la physique de la mesure. Par exemple, la correction d'état de mer (SSB) doit être affinée par l'utilisation de modèle de vagues et/ou à l'aide de mesures complémentaires vents/vagues s'appuyant par exemple sur les missions **Sentinel-1** et **CFOSAT**. Cette très importante synergie avec d'autres missions spatiales est donc à maintenir et renforcer.

2.3. DÉTECTION ET QUANTIFICATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Un traitement amélioré des observations **TOPEX/Poseidon** a permis d'identifier pour la première fois une accélération significative dans l'élévation du niveau global de la mer entre 1993 et 2017 essentiellement due à une perte de masse accélérée des calottes de glace au Groenland et en Antarctique (Fig. 2). Ces données sont aussi utilisées pour évaluer la quantité de chaleur stockée dans l'océan en réponse au changement climatique et mesurent aujourd'hui directement le déséquilibre énergétique de la Terre avec une précision inégalée. Plus généralement, les données de niveau de la mer en hauteur ont atteint un tel niveau de maturité depuis cinq ans qu'elles sont utilisées de manière systématique dans toutes les études multivariées de la dynamique océanique ; aujourd'hui la majorité des nouvelles études concerne la caractérisation du déséquilibre énergétique de la planète, la zone côtière et les impacts associés à la hausse du niveau de la mer.

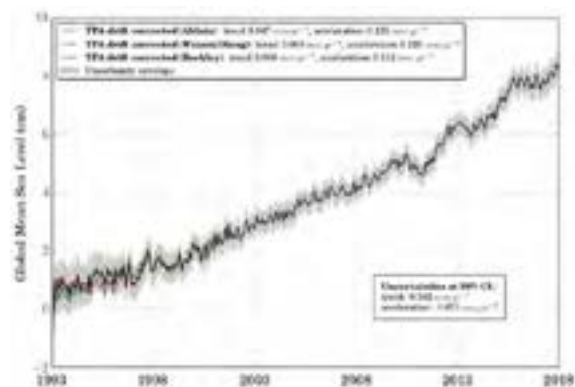


Fig. 2 : Variations du niveau moyen des mers mesurées à partir des satellites altimétriques TOPEX/Poseidon, Jason-1, 2 et 3 et erreurs associées. Ces mesures mettent en évidence une accélération significative du niveau moyen des mers.

© Ablain et al., 2019

Earth Energy imbalance : 2006-2015

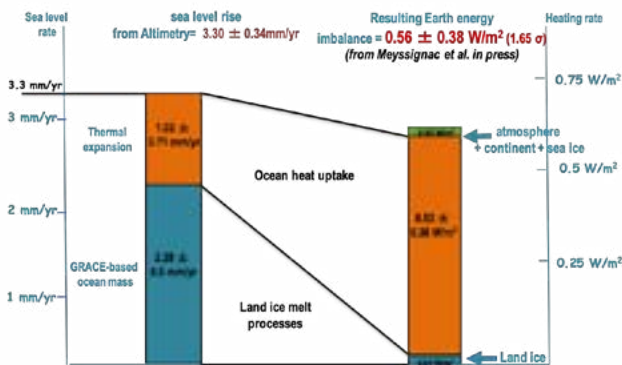


Fig. 3 : Estimation du déséquilibre énergétique de la planète à partir des mesures altimétriques du niveau de la mer et des mesures gravimétriques de Grace sur la période 2006-2015.

© Meyssignac et al. 2019

Les observations spatiales (altimétrie radar et laser, gravimétrie, images SAR) permettent d'établir la topographie des calottes polaires et de suivre leurs bilans de masse et leurs variations temporelles, l'épaisseur et la fracturation de la glace de mer et le vèlage des icebergs. Un progrès significatif concerne le retraitement des observations radar qui permet aujourd'hui d'estimer l'épaisseur de glace de mer depuis 2002 en Arctique et de remonter potentiellement jusqu'en 1991. Par ailleurs la combinaison de fréquences Ku/Ka sur différentes missions (**Saral/AltiKa**, **CryoSat-2**, **Sentinel-3**) permet aujourd'hui de mesurer l'épaisseur de neige à la surface de la banquise, ce qui ouvre la voie à l'estimation de l'épaisseur de la glace de mer et de son évolution temporelle en Antarctique.

De nouvelles approches ont permis d'assurer une meilleure cohérence interne aux données couleur de l'océan multicapteurs sur maintenant deux décennies, et de nourrir des études visant à comprendre la variabilité décennale de la biomasse phytoplanctonique à l'échelle globale, et leur variabilité saisonnière et interannuelle à l'échelle régionale (Atlantique Nord, Kerguelen, Arctique). Elles ont également permis d'étudier l'évolution de la concentration en carbone organique particulaire et dissous en océan ouvert et en côtier.

2.4. ENVIRONNEMENT ET SOCIÉTÉ

Le lien fort entre les agences spatiales, la communauté recherche et les développeurs de produits opérationnels permet aujourd'hui d'assurer une utilisation optimale des différents produits satellites. Cette démarche a sensiblement amélioré la prévision océanique des différentes variables observées à différentes échelles spatiales et temporelles et permet de mieux spécifier

les besoins pour les futures missions. L'océanographie opérationnelle en France et en Europe s'est structurée au cours des dernières années, en particulier avec la mise en œuvre du service marin de Copernicus coordonné par la France.

La variabilité de l'environnement océanique dérivée des observations spatiales a aussi contribué à la définition des aires marines protégées, comme dans le cas de l'extension de la réserve naturelle de Kerguelen, et est amenée à jouer un rôle de plus en plus important dans la gestion des ressources marines.

2.5. MISSIONS

Les inquiétudes émises lors du dernier séminaire de prospective sur la fragilité de la constellation altimétrique sont retombées suite aux lancements réussis et aux excellents résultats des missions **AltiKa**, **Jason-3** et **Sentinel-3 (A&B)** mais aussi sur le long terme par une programmation qui pérennise la constellation jusqu'en 2030 environ, en grande partie grâce à Copernicus mais aussi grâce aux engagements des différentes agences (CNES, ESA, EUMETSAT, NASA, NOAA) : **Sentinel-6/Jason-CS (A en 2020/B en 2025)**, **Sentinel-3 (C en 2023/D en 2025)**, **Swot (2021)**.

La mission **CFOSAT** vient d'être lancée avec succès permettant la mesure du spectre des vagues à l'aide de l'instrument SWIM. Des évolutions de SWIM sont d'ores et déjà prévues et ont conduit à la proposition d'une nouvelle mission de mesure des courants de surface (**Skim**), et qui a été présélectionnée pour EE9. La vitesse totale accessible par **Skim**, diffère des courants géostrophiques accessibles par l'altimétrie, et pourrait mieux caractériser les transports en surface, les courants à l'équateur (divergence, *upwelling*) et au voisinage des glaces.

Le CNES a fortement aidé à la préparation de la mission de couleur de l'océan en orbite géostationnaire **Ocapi**, qui a été présentée pour EE9, mais malheureusement non retenue car ne rentrant pas dans le cadre de cet appel d'offres. Des études sur le potentiel des mesures LIDAR ont été menées et encouragent à poursuivre le développement de cet outil dans le domaine de la biogéochimie, notamment pour avoir accès à des informations sur la colonne d'eau.

2.6. STRUCTURATION DE LA COMMUNAUTÉ

La communauté s'est organisée autour de groupes mission fortement soutenus par le TOSCA (**Smos**, **Ocapi**, **CFOSAT**, **Swot**, **OSTST**) qui sont fondamentaux pour

coordonner les activités au niveau national, avec une ouverture forte de ces groupes à l'international, ce qui a renforcé le rayonnement de la communauté française. Un effet structurant de ces groupes a été de tisser des liens entre la communauté spatiale et des communautés menant des expériences in situ. La pérennité de ces groupes mission a créé un point d'ancrage autour duquel les acteurs des différentes communautés peuvent continuer de se retrouver.

Par ailleurs, ces dernières années ont vu émerger une communauté côtière de plus en plus présente et active tant les enjeux sociétaux et scientifiques sont importants. Ceci est intimement lié à l'amélioration de la mesure altimétrique (bande Ka, mode SAR) mais aussi aux efforts d'amélioration des algorithmes qui ont été mené de concert entre l'OSTST et les meetings *coastal altimetry*.

Au-delà des publications, un certain nombre des recherches spatiales produisent des jeux de données et/ou des algorithmes de traitements d'intérêt pour la communauté. Ceux-ci peuvent être valorisés dans le cadre du pôle de données Odatis. Dans une seconde étape, ces données et services peuvent concourir au niveau européen pour intégrer des initiatives ESA/CCI ou des services Copernicus (C3S, CMEMS). Ils sont alors labellisés et bénéficient de financements complémentaires leur permettant d'être opérés dans la durée et d'être améliorés (retraitements). Le TOSCA et le pôle ont alors pleinement joué leur rôle d'incubateur.

3. RECOMMANDATIONS ET PRIORITÉS DU GROUPE OCÉAN

Les recommandations concernent les futures missions spatiales, les segments sols et l'exploitation des données, les activités Cal/Val et le soutien aux observations in situ et la structuration et l'accompagnement de la recherche spatiale.

3.1. CONTEXTE

Les missions d'océanographie spatiale relevant de cette prospective et pour la prochaine décennie seront principalement menées dans le cadre du programme Européen Copernicus, du programme Earth Explorer de l'ESA et de coopérations spécifiques entre le CNES et des agences internationales.

Les missions déjà décidées incluent :

- Constellation des **Sentinel-1** (SAR), **Sentinel-2** (optique haute résolution), **Sentinel-3** (température de surface, couleur de l'océan et altimétrie) et **Sentinel-6 (Jason-CS)**, altimétrie de référence).
- Mission **Swot** en coopération avec la NASA (ainsi que UK et Canada) pour l'étude de la dynamique océanique à haute résolution et l'hydrologie.
- Missions Earth Explorer de l'ESA pouvant intéresser la communauté océan (**Flex/EE-8**).

Les principales missions en préparation incluent :

- La mission Earth Explorer de l'ESA EE-9 **Skim** pour la mesure directe des courants de surface et l'amélioration du suivi des spectres de vagues. D'autres missions Earth Explorer sont aussi d'intérêt pour cette prospective (p. ex. **Stereoid/EE-10**).
- Le programme expansion des **Sentinel** avec en particulier les missions CIMR (Copernicus Imaging Microwave Radiometer) (micro-onde pour la concentration des glaces, la température de surface, la salinité et l'épaisseur fine des glaces) et **Cristal** (Copernicus Polar Ice and Snow Topography Altimetry) (la topographie des océans en zone polaire, l'épaisseur des glaces de mer et le suivi des calottes glaciaires).
- La préparation de l'évolution à long terme (post 2028) des Sentinel avec notamment l'introduction de l'altimétrie à fauchée (**Wisa**) pour l'évolution de la composante topographie des **Sentinel-3** mais aussi les évolutions à apporter aux autres Sentinel concernant l'océan (**Sentinel-1, 2 et 6**).
- Des mesures de salinité de surface à haute résolution spatiale (**Smos-HR** avec un gain d'un facteur 4 en résolution par rapport à **Smos**, **Ulid** concept de 3^{ème} génération visant une rupture technologique permettant d'atteindre dans le futur la résolution kilométrique).
- De nouveaux concepts d'instruments ou de missions proposés dans le cadre de cette prospective : **Marvel** (système de référence, champs de gravité variable avec des performances supérieures d'un facteur 5 à 10 par rapport à **Grace**), **Glistero** (mesure via le *sun glint* des variations de rugosité et de la dynamique océanique de surface (convergence/divergence)).
- Des missions en coopération bi ou multilatérales dont l'objectif principal ne concerne pas l'océan mais qui sont potentiellement intéressantes pour notre communauté : **Trishna** mission multispectrale spatiale franco-indienne (CNES-ISRO) permettant la mesure de la température de surface à très haute résolution et **Mescal** (NASA-CNES) pour la mesure de la couleur de l'océan par lidar.
- Des nouvelles missions développées dans un cadre hors CNES mais pour lesquelles la communauté scientifique française devrait s'impliquer notamment vis-à-vis de l'hyperspectral (p. ex. **Prisma, Pace**).

3.2. PRIORITÉS VIS-À-VIS DES MISSIONS SPATIALES

Les priorités de la communauté océan pour les futures missions spatiales se déclinent selon plusieurs axes :

- Continuité des mesures.
- Amélioration des résolutions spatiales et temporelles et de la précision des mesures.
- Mesure de nouveaux paramètres.

Les priorités sont classées en trois catégories : P0 (mission ou concept d'intérêt majeur), P1 (mission ou concept d'intérêt fort) ou P2 (mission ou concept potentiellement intéressant). Les priorités prennent en compte la faisabilité des concepts ou missions, l'impact pour la recherche et l'océanographie opérationnelle et l'existence d'une communauté nationale structurée autour des missions ou concepts proposés.

Il est essentiel vis-à-vis des enjeux liés au climat et à l'océan, mais aussi pour le besoin des services océaniques (*Copernicus Marine Service*), d'assurer une continuité des mesures. Au-delà des missions Sentinel actuelles qui continueront leurs observations sur la prochaine décennie, la mise en place des missions **CIMR** et **Cristal** proposées dans le cadre du programme **Sentinel-Expansion** sont une priorité forte (P0) afin d'assurer une continuité (avec des améliorations) des mesures micro-ondes de température de surface de la mer, de salinité (CIMR) et des mesures d'épaisseur de glace de mer (**Cristal** et CIMR) et répondre aux enjeux majeurs de l'observation en Arctique. Le CNES devra s'assurer que ces priorités soient reprises par l'UE et l'ESA dans le cadre de Copernicus et que les besoins des communautés océan et glace françaises soient bien prises en compte dans le design de ces missions.

Le développement de l'altimétrie à fauchée avec **Swot** est potentiellement une révolution en océanographie et océanographie opérationnelle et le groupe recommande fortement une démarche proactive pour inclure l'altimétrie à fauchée **Wisa** (P0) dans le scénario à long terme de Copernicus (mission topographie de **Sentinel-3**) afin d'assurer une suite opérationnelle à la mission **Swot**. L'objectif est le suivi de la mésoéchelle et submésoéchelle océanique et l'intégration de ces données dans les futurs systèmes d'analyse et de prévision océanique à haute résolution.

Au-delà de **Wisa**, la communauté scientifique française doit aussi être pleinement impliquée dans les réflexions sur l'évolution à long terme des **Sentinel Long Term Scenario (Sentinel-1, 2, 3 et 6)**.

La mission **Skim/EE-9** portée par la France va permettre pour la première fois une mesure directe du

courant de surface, une Essential Ocean Variable (EOV) complémentaire des mesures de topographie par altimétrie. Le groupe soutient avec une très forte priorité cette mission (P0) autant pour la compréhension de la dynamique océanique de surface et des couplages océan/vagues/atmosphère, l'analyse des courants équatoriaux et l'observation de l'évolution rapide des zones marginales de glace, que pour sa contribution potentielle à l'océanographie opérationnelle et aux applications.

La communauté océan/biogéochimie a mis en priorité forte (voir prospectives précédentes) le développement d'une mission géostationnaire couleur de l'océan sur l'Europe (**Geo-Ocapi**). Il est très regrettable qu'un cadre programmatique n'ait pas pu être trouvé pour cette mission. Le besoin de la communauté scientifique reste toujours d'actualité et ce besoin est aussi prioritaire pour le service marin de Copernicus (P0). Elle permettrait des avancées majeures pour l'observation et la compréhension des phénomènes à évolution rapide liés, en particulier, à la dynamique côtière et aux panaches des fleuves ainsi que l'étude du fonctionnement à petite échelle temporelle de l'écosystème et du cycle diurne de la photosynthèse/respiration. L'amélioration de la couverture spatio-temporelle par rapport aux satellites défilants (couverture nuageuse) sera très importante et permettra de bien mieux contraindre les modèles biogéochimiques via l'assimilation de données. **Copernicus** est le cadre programmatique naturel pour une mission de ce type avec une insertion à plus long terme sur les futures plates-formes Meteosat (Meteosat 4^{ème} génération). Le besoin de mission hyperspectrale est aussi affirmé (P1) et la communauté note l'intérêt des concepts de type Lidar (**Mescal**) (P2). On note aussi l'intérêt de la communauté pour la mission EUMETSAT **Metop Second Generation** et son Multi-Viewing Multi-Channel Multi-Polarisation Imaging instrument (3 MI). Les observations incluant la polarisation permettent une meilleure caractérisation de la nature chimique (via l'indice de réfraction) et de la taille des particules marines, en particulier dans les eaux océaniques productives et dans les eaux côtières.

Le groupe recommande parallèlement de poursuivre l'instruction de nouveaux concepts prometteurs pour la mesure des variations du champ de gravité (**Marvel**) (P1) et de la salinité à haute résolution (**SmosHR, Ulid**) (P1). Il note l'intérêt potentiel de la mission **Trishna** (P1) pour l'océan côtier. Une démonstration du concept Glistero est également souhaitable (P2).

L'objectif de **Marvel** est la détermination du système de référence terrestre et le suivi de la redistribution des masses. Les performances annoncées (facteur 5 à 10 par rapport à **Grace**), si elles sont confirmées lors d'une étude de phase A, rendent cette mission très attractive pour l'océanographie : compréhension des mécanismes

responsables de l'augmentation du niveau de la mer, bilan énergétique de la planète, complémentarité avec l'altimétrie voire assimilation dans les modèles.

L'observation de la SSS à mésoéchelle permet avec les mesures de SST de contraindre la densité de surface ce qui revêt une grande importance pour comprendre les échanges océan-atmosphère, l'évolution des cyclones, la dynamique océanique du large à la côte et mieux contraindre les systèmes d'analyse et de prévision océanique. Le groupe océan est donc très favorable au développement de nouveaux concepts pour la mesure de la salinité de surface à haute résolution (**Smos-HR, Ulid**).

Trishna donne l'opportunité de mesurer en zone côtière la SST à très haute résolution (50 et 100 m) avec une période de revisite de 1 à 3 jours. Cette mission ouvre des perspectives sur de nombreux travaux scientifiques associés à des questions liées à l'écologie marine et/ou la dynamique océanique comme par exemple le suivi de gradients de courant, la dynamique des upwellings ou la cartographie des habitats benthiques.

3.3. ALGORITHMIQUE, EXPLOITATION DES DONNÉES ET PÔLES DE DONNÉES

Le travail permanent sur les algorithmes est une composante essentielle de la réussite d'une filière (p. ex. altimétrie). Le CNES se doit de soutenir les équipes algorithmiques (niveaux 1 et 2) et doit s'assurer d'une bonne coordination entre les différentes agences partenaires (p. ex. ESA, EUMETSAT, NASA, ISRO). Le support aux *Science Team* internationales et la prise en compte de leurs recommandations est un élément-clé du succès d'une filière.

L'exploitation des longues séries de données multi-capteurs pour l'ensemble des ECVs Océan va demander un effort conséquent (recherche et opération) pour assurer leur homogénéisation. Le CNES doit s'engager avec l'ESA (programme CCI), EUMETSAT et le programme Copernicus (C3S, CMEMS) pour mettre en œuvre cette exploitation.

Les gros volumes de données couplés à une plus haute résolution imposeront probablement le recours à des méthodes de classification des données utilisant les techniques du big data et de l'IA. Les bénéfices attendus concernent les aspects algorithmiques, le contrôle qualité lors de la Cal/Val et tout au long de la mission mais aussi l'exploitation des données. Ces techniques peuvent révéler des relations entre variables et/ou des téléconnexions entre événements.

L'explosion du volume des données à traiter et à re-traiter implique des moyens de stockage et de calcul massifs. Avec la quantité et la diversité croissante des données, le traitement et l'accès aux données doivent être considérés comme un tout. Les pôles de données devraient évoluer et être couplés à des moyens de calcul pour prendre en compte les nouvelles stratégies algorithmiques, le big data et l'IA.

Le développement des plates-formes DIAS (et PEPS) va dans ce sens et le positionnement des pôles de données par rapport aux DIAS devra être clarifié. Des moyens nouveaux doivent être, par ailleurs, affectés afin que les pôles (dont Odatis pour l'océan) puissent répondre aux besoins des équipes scientifiques (p. ex. mise à disposition de jeux de données). La mise en cohérence des différents pôles est également nécessaire pour mieux servir la communauté climat.

A long terme, une refonte de la stratégie d'acquisition, de production et de gestion des données spatiales pourrait être envisagée. Cela comprendrait des réflexions sur le pilotage fin des acquisitions, la souplesse des traitements à bord, le stockage et le traitement des données. L'utilisation d'une programmation agile (sur la base d'informations issues de prévisions opérationnelles) a permis l'observation des cyclones avec **Sentinel-1**. Il faut assurer la pérennité de cette stratégie d'acquisition.

3.4. ACTIVITÉS CAL/VAL ET OBSERVATIONS IN SITU

Le développement de l'observation spatiale doit s'accompagner d'une évolution de l'observation in situ, que ce soit pour l'étalonnage/validation ou la valorisation. Il est indispensable que le CNES renforce sa coopération avec les organismes en charge de l'observation in situ et développe une politique inter-agences (ESA, EUMETSAT, Copernicus) sur les aspects Cal/Val.

L'enjeu est de mettre en place un support programmatique pérenne pour l'observation in situ nécessaire aux activités Cal/Val (non limité à une mission particulière mais plutôt lié à une « filière », comme la radiométrie couleur de l'océan ou l'altimétrie). Cela inclut aussi l'archivage à long terme et pérennisé des données de Cal/Val.

Ces mécanismes devraient être organisés conjointement avec les agences nationales mais également au niveau européen. Cela implique également un soutien renforcé sur le long terme à Coriolis et aux TGIR, IR et SO traitant de l'observation in situ des océans et nécessaires à la recherche spatiale.

3.5. ACCOMPAGNEMENT DE LA RECHERCHE SPATIALE

En regard du nombre de missions actuelles ou futures (notamment dans Copernicus), un renforcement du support aux équipes françaises impliquées dans l'exploitation des données des missions en cours nous semble indispensable au niveau des développements de simulateurs, des études de design de missions, de la mise au point et de l'amélioration des algorithmes, et de l'exploitation scientifique des observations.

Le CNES a joué un rôle pionnier et moteur dans la mise en place et la pérennisation de la filière altimétrique mais aujourd'hui cette filière est prise en charge naturellement par Copernicus. Pour autant le CNES doit continuer et renforcer son accompagnement de la recherche, notamment liée à l'altimétrie, au-delà d'un soutien lié à une ou plusieurs missions dont il a la charge (p. ex. **Swot**).

La mise en place de simulateurs end-to-end et collaboratifs capables d'accompagner la préparation de concept-missions innovants et les phases de cal/val de ces missions serait très souhaitable. Ces simulateurs incluraient de manière cohérente les besoins de modélisation de la surface océanique et des interactions ondes/surfaces. Le développement systématique d'approches de type OSSEs (Observing System Simulation

Experiments) est nécessaire pour analyser l'impact de missions futures dans des systèmes d'assimilation de données.

Le maintien des compétences en physique de la mesure sur les traitements de niveau 1 à 2 est essentiel. Les nouveaux concepts instrumentaux tels que l'altimétrie SAR (possiblement à large fauchée comme **Swot**) ou le spectromètre radar qui fonctionne en proche nadir (**Swim** ou **Skim**), le renforcement des observations en radiométrie microonde en Europe pour les observations SSS et SST nécessitent de maintenir et renforcer les compétences en physique de la mesure dans les laboratoires.

L'accompagnement de la préparation des missions au travers de CDD et/ou de sous-traitance est jugé inadéquat pour pérenniser les compétences, assurer le lien entre les thématiques et les agences spatiales, et continuer à être force de propositions pour de nouveaux concepts. Par ailleurs, l'absence de perspectives (liée à ce mode de fonctionnement) diminue fortement l'attractivité des filières (universitaire ou grandes écoles) en physique de la mesure pour l'observation de la Terre. Le CNES doit influencer sur la politique des postes permanents dans la recherche spatiale (techniciens, ingénieurs de recherche, chercheurs).

3.6. SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

Type de mesure/d'observables	Cadre de réalisation	Activité associée	Thème scientifique
Courant de surface	Opportunité/partenariat	Phase A	Courant de surface total
Couleur de l'océan /GEO	Copernicus LTS ou opportunité	Mure	Dynamique côtière haute fréquence et biologie
Glace de mer (concentration, épaisseur), température de surface, salinité de surface	EU/Copernicus Expansion CIMR	Activités ESA Technologie bande Ka (CNES)	Evolution des zones polaires
Topographie de surface à haute résolution	EU/Copernicus LTS (Wisa)	Phase A CNES Activités ESA	Mésoéchelle/submésoéchelle Prévision océanique
Champ de gravité	Opportunité Concept Marvel	Phase 0 Grice, démonstrateur	Variations du champ de gravité
Salinité de Surface	Opportunité Concept Smos-HR	Phase 0 Smos-HR Interférométrie distribuée bande L, Phase A Ulid	Salinité de surface à mésoéchelle
Couleur de l'océan/hyperspectral	EU/Copernicus Expansion Chime	Activités ESA Imageur Hyperspectral compact	Nouveaux paramètres biologie (p. ex. types de phytoplancton)
Température de surface	Coopération ISRO-CNES Trishna	Détecteur Infrarouge	Côtier/Littoral
Couleur de l'océan/Lidar	Opportunité / Mescal	Diverses activités technos sur Lidar	Apport lidar vs optique passive
Sun glint	Opportunité Concept Glistero		Dynamique océanique de surface

GROUPE DE TRAVAIL THÉMATIQUE SURFACES CONTINENTALES

Clément Albergel, Agnès Begue (Co-Présidente), Xavier Briottet, Laurent Ferro-Famil, Simon Gascoin, Jean-Pierre Lagouarde, Fabienne Maignan, Philippe Maisongrande (thématicien), Nadège Martiny, Thierry Pellarin, Ghislain Picard, Anne Puissant, Jean-Louis Roujean (président), Frédérique Seyler, Kamel Soudani, Cécile Vignolles (thématicienne).

Les enjeux et les questions scientifiques

D'ici à 2050, la population mondiale va passer de 7,7 à 9,8 milliards d'habitants. Cela accentuera les déséquilibres environnementaux et sociaux déjà en cours. Il y a donc urgence à réfléchir à des voies de transition écologique, nutritionnelle et épidémiologique. L'observation spatiale des surfaces continentales est un atout majeur pour surveiller des objets d'étude très variés qui forment des paysages rapidement évolutifs sous contrainte anthropique et climatique. Les défis prioritaires concernent le suivi et la prévention des risques environnementaux, l'optimisation des ressources (nourriture, eau, énergie) (10 % de la population est sous-alimentée, l'accès à l'eau potable reste difficile), et la réponse apportée à une urbanisation en plein expansion (+ 3 % par an). Les enjeux ciblés sont l'impact des aléas (vulnérabilité littorale et climat, pression sur la ressource), la sécurité alimentaire, le risque sanitaire (épidémiologie, pollution), la gestion des territoires (aménagement, urbanisation, artificialisation, littoral, trames vertes et bleues, foncier) et la résilience à la perte de biodiversité (espèces et écosystèmes). Les travaux de recherche menés aident à mieux comprendre les processus pour mieux répondre aux besoins environnementaux et sociétaux. La multiplicité des missions spatiales - proposant de nouvelles mesures ou assurant leur continuité - améliore notre connaissance des processus physiques mis en jeu pour répondre aux grands questionnements scientifiques autour des thèmes fédérateurs que sont les cycles de l'eau et du carbone, et l'usage des terres.

Le cycle de l'eau

L'eau est un sujet transverse qui implique tous les compartiments clés de la « zone critique » (du socle rocheux au sommet de la canopée), lieu des interactions atmosphère/ hydrosphère/ lithosphère/ biosphère. Un bilan d'eau amélioré aide à spécifier la disponibilité, la qualité, la distribution, la localisation des stocks, les zones inondées, l'endoréisme, et le fonctionnement des grands bassins. Les composantes principales du cycle de l'eau sont mesurables de façon directe ou indirecte depuis l'espace : précipitations, évaporation, transpiration, interception, ruissellement, infiltration, percolation, réserves de la nappe souterraine. Les missions en vol permettent déjà de dresser un bilan satisfaisant de l'évolution de la ressource en eau via une modélisation des échanges principalement verticaux. Des améliorations sont souhaitables au regard des échanges latéraux avec une augmentation de la résolution spatiale. Des cartographies à haute résolution spatiale de l'évaporation font aujourd'hui défaut.

Le cycle du carbone

Ce thème est aussi transverse car le carbone existe sous forme gazeuse, dissoute, minérale et est aussi stocké dans les sols et les plantes. Pour lutter contre un rejet anthropique atmosphérique d'environ 4 Gt C/an, la surface peut renforcer son rôle de puits en misant sur la reforestation et aussi la mise en place de pratiques agricoles durables. Les missions spatiales mesurant la biomasse aérienne renseignent sur les stocks de carbone des forêts, ce qui est informatif sur l'allocation et la régénération du biome. La mesure de fluorescence représente la photosynthèse et détecte des stress alors que les images optiques à haute et très haute résolution spatiale donnent accès à la cartographie de l'occupation des sols, supports des enjeux de décision et de gestion sur les moyens de lutte contre le réchauffement climatique à partir de leviers d'atténuation, un objectif du *Space Climate Observatory*.

L'usage des terres

Les processus liés aux activités humaines et à l'utilisation des sols ainsi que les services écosystémiques associés sont regroupés sous le terme « Land System » dans lequel l'occupation et l'utilisation des sols dérivées des données spatiales multi-sources et multi-résolutions ont un rôle central vis-à-vis de la plupart des applications thématiques. Au premier rang se situe l'urbain car près de 60 % de la population vit en ville et cela va augmenter, notamment dans les pays émergents. L'aménagement de l'urbanisme, la nature en ville, la gestion des risques, et le suivi de grands territoires sont des sujets centraux. La caractérisation de l'usage agricole des terres est un sujet majeur pour appréhender la sécurité alimentaire et sa durabilité. La télé-épidémiologie s'intéresse aux bouleverse-

ments anthropiques de l'environnement (urbanisation, déforestation) sur l'émergence des épidémies. L'érosion du littoral est aussi quantifiable. La perte de biodiversité, causée par une anthropisation croissante, est suivie via des indicateurs sur les espèces et les écosystèmes (fragmentation des habitats naturels). Les missions spatiales proposant une haute résolution spatiale avec une revisite fréquente et du multi-spectral détectent déjà les tendances et les ruptures pour les objets étudiés.

1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2014

1.1. LES PRIORITÉS DU SPS 2014

Les recommandations faites lors de la prospective 2014 visaient à améliorer notre compréhension du fonctionnement et des dynamiques spatio-temporelles des surfaces et interfaces continentales, sous forçage anthropique et climatique : nature et dynamique des paysages, fonctionnement des surfaces (énergie, eau, carbone), évolution des ressources en eau.

Le tableau ci-dessous dresse un état des lieux.

La Rochelle 2014	Le Havre 2019
P1 (2015) : Thirsty (IRT 50 m, 3 jours)	Trishna (coll. ISRO). Phase A (fin en juillet 2019)
Continuité (2020) : Swot (altimétrie eau)	Forte mobilisation, études préparatoires convaincantes
Biomass : Sélection ESA en 2013, 7e mission EE	Forte mobilisation, études préparatoires convaincantes
Plus long terme : hyperspectrale Hypxim	Forte mobilisation, études préparatoires confortant la mission. Phase A HSP (depuis mai 2019)
Plus long terme : géostationnaire Ocapi	Un projet TOSCA/SC
Plus long terme : lidar végétation	Une communauté, des études scientifiques et techniques
Démarrage du pôle thématique THEIA	De nombreux CES et des ART
Flex - Sélection ESA en 2013, 8e mission EE	Une communauté, des études prospectives

Une mission proposant des mesures dans l'infrarouge thermique avec une haute résolution spatiale avait été jugée prioritaire. Initialement envisagée en collaboration avec le JPL/NASA, qui a depuis concentré son effort sur la mission ECOSTRESS à bord de l'ISS, une telle mission, baptisée **Trishna** et conduite en collaboration avec l'ISRO, arrive en fin de phase A. Le vœu d'accompagner des missions scientifiques Earth Explorer de l'ESA comme **Flex** (2023) et **Biomass** (2021) a été bien suivi, ainsi que l'exploitation des données des missions actuelles **Sentinel-2** et **Venüs** dédiées à la cartographie et au suivi des ressources végétales. Les études préparatoires ont concerné une mission hyperspectrale destinée à caractériser la biodiversité végétale, les eaux côtières et continentales et le milieu

urbain. Une telle mission, initialement nommée **Hypxim** rebaptisée **HSP**, démarre une phase O/A (coll. avec Singapour). La recommandation de développer un lidar végétation aura permis de démarrer des études scientifiques et techniques, de même pour la mission géostationnaire à haute résolution spatiale **Ocapi**. L'évaluation des besoins en eau pour la consommation humaine et la production agricole ainsi que l'appréciation du risque sanitaire s'appuient sur des programmes spatiaux en cours (**Smos**, **Sentinel-1**, **Sentinel-2**) et en préparation (**Swot**, 2021) en ce qui concerne l'altimétrie des eaux continentales. Des études préparatoires visent à prolonger le succès de **Smos** avec une amélioration de la résolution d'un facteur 10 pour **Smos-HR**.

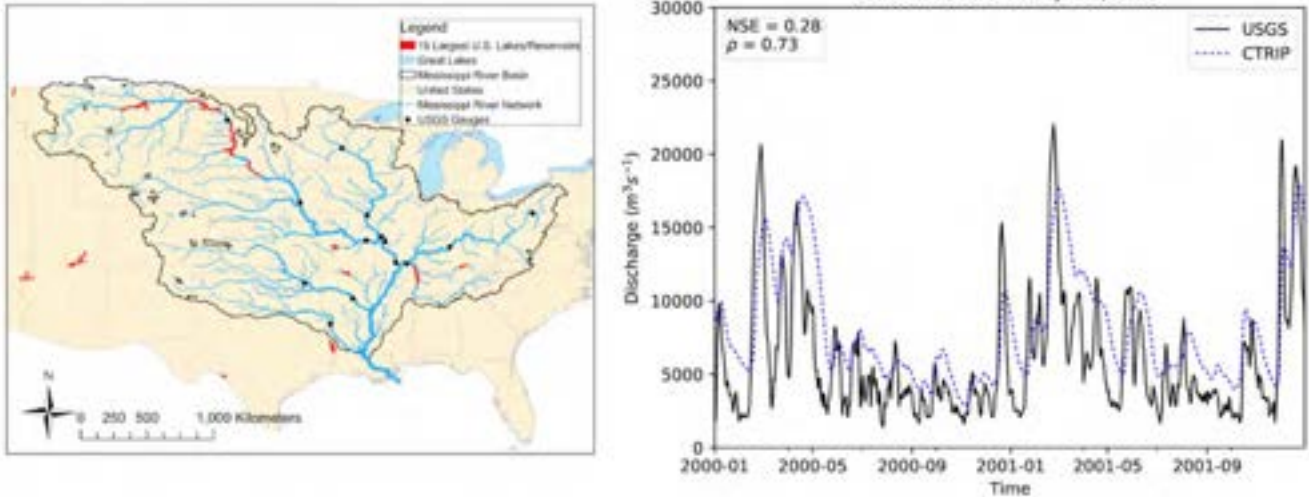


Fig. 1 : Dans le cadre de la préparation à Swot, il a été montré le réalisme des simulations avec le modèle CTRIP du CNRM pour obtenir les débits sur 2 ans de la rivière Mississippi dans le cadre du projet RiverMIP.

© David et al., 2017

1.2. LES AVANCÉES SCIENTIFIQUES

Des cartographies multi-échelles des paysages et des variables biophysiques sont indispensables pour suivre les changements des effets anthropiques et climatiques, et quantifier les ressources naturelles. Décrire l'occupation et l'usage des terres apparait comme une nécessité pour obtenir une stratification du paysage qui sert d'appui aux modèles hydriques et de carbone distribués.

1.2.1. Une meilleure connaissance de la ressource en eau

Les variables et les compartiments liés au cycle de l'eau ont bénéficié de la richesse des données spatiales pour accroître le rôle intégrateur de l'hydrologie dans le système socio-écosystème, ce qui est essentiel pour appréhender la variabilité spatio-temporelle de la 'zone critique'. Les mesures gravimétriques réalisées par le passé avec **Grace** - et sa suite récente **Grace-FO** - mesurent les fluctuations des stocks d'eau dans les réservoirs continentaux (eau des sols, eaux souterraines et manteau neigeux). Concernant l'altimétrie, HydroWeb a fourni une banque de données globales de séries temporelles de hauteurs d'eau sur les grands fleuves (Amazone, Congo, Mékong, Niger), les lacs et les réservoirs, et les zones inondées (**Saral/Altika, Sentinel-3**). La préparation de la mission **Swot** a motivé un projet d'envergure internationale sur les estuaires et les zones côtières visant à caractériser les phénomènes hydrodynamiques complexes, ce qui représente des enjeux économiques et écologiques majeurs. L'humidité des sols mesurée par l'instrument micro-ondes **Smos** sert à évaluer aussi les risques d'inondation et de séche-

resse. L'assimilation des données **Smos** améliore la prévision de la température de l'air dans le modèle du CEPMMT et précise le rôle de la végétation dans le cycle hydrologique (via la zone racinaire). Les données **Smos** se sont aussi révélées pertinentes pour le suivi de la banquise et de l'intérieur de la masse des calottes glaciaires. Pour préparer **Swot**, le modèle CTRIP a été utilisé pour simuler les débits sur plusieurs grands fleuves (exemple du Mississippi en Fig. 1) en préparation à l'assimilation des débits estimés à partir de séries altimétriques de cotes d'eau **Envisat**. Les observations **Sentinel-2** ont servi à cartographier l'état hydrique des sols et les zones irriguées et d'estimer la consommation en eau de parcelles agricoles pour une gestion optimale de la ressource en eau.

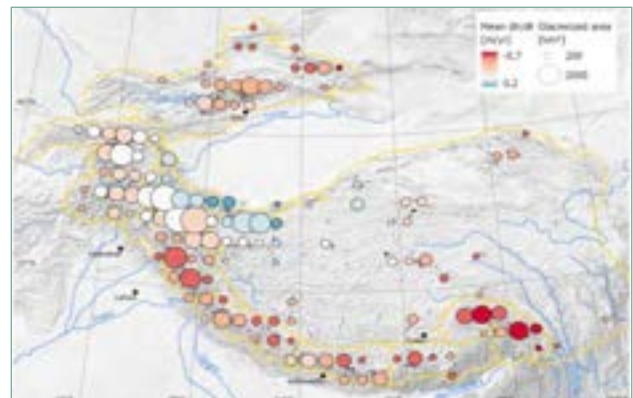


Fig. 2 : Carte des changements d'épaisseur (en mètres par an) des glaciers des hautes montagnes d'Asie pour la période 2000-2016 à partir de l'archive ASTER.

Les cercles rouges correspondent à des zones où les glaciers s'amincissent, les bleus où ils s'épaississent.

© Brun et al., 2017

Les travaux sur la cryosphère de montagne ont concerné notamment une mise en production opérationnelle des cartes d'enneigement sur le relief (France, monde) réalisées à partir des données **Sentinel-2**. Grâce à deux décennies de données ASTER retraitées, il a été démontré que l'amincissement des glaciers des hautes montagnes d'Asie apporte une contribution trois fois moindre à la hausse du niveau des mers comparée à la prédiction par les modèles (Fig. 2). La qualité des eaux continentales est maintenant renseignée grâce au transport sédimentaire à partir des données Sentinel. L'évaporation due à la végétation a été cartographiée à partir des données **Landsat**. Les produits liés au cycle de l'eau sont maintenant délivrés par le pôle THEIA au travers de nombreux CES (Fig. 5), ce qui contribue à améliorer la gestion de la ressource en eau.

1.2.2. Une meilleure connaissance du cycle, des flux et de stocks de carbone

Les satellites sont un outil majeur pour une meilleure représentation de la grande variabilité spatiale et temporelle des flux et des stocks de carbone. L'estimation multi-échelle des attributs structuraux et fonctionnels des agroécosystèmes, des écosystèmes aquatiques, des paysages ainsi que des variables biophysiques sert à paramétrer et valider les modèles de la biosphère. La teneur en carbone organique des sols à l'échelle de la France a été cartographiée à la résolution de 90 m selon la nomenclature *GlobalSoilMap* en utilisant des données **Sentinel-1** et **Sentinel-2** et des modèles statistiques multivariés. La typologie des changements de biomasse a été exploitée pour établir une cartographie des modifications de stocks de carbone pour les forêts sèches africaines à partir du VOD (*Vegetation Optical Depth*) en bande L de **Smos**. Pour préparer **Biomass**, les données ALOS de données de biomasse aérienne et de hauteur du couvert à la résolution de 200 m ont servi à quantifier les aires déforestées à l'aide de modèles calibrés in situ (forêt du Gabon). Pour préparer **Flex**, la fluorescence induite par le Soleil (SIF) dérivée de **Gome-2** et **Oco-2** assimilée dans les modèles de surface continentale offre une contrainte inégalée pour estimer les variations de production primaire. La donnée lidar donne accès aux variables dendrométriques (hauteur et densité des arbres) et par fusion avec l'optique, à la structure verticale forestière pour accéder à la biomasse aérienne.

1.2.3. Un usage et une dégradation des terres mieux déterminés (urbain, littoral, végétation)

L'avènement des missions **Sentinel-1** et **Sentinel-2**, et les progrès en termes de prétraitements de séries temporelles décimétriques (corrections atmosphériques, *gap filling*) ont contribué à mieux cartographier l'occupation et l'utilisation des sols sur de grandes surfaces (exemple de la carte annuelle de la France).

La complémentarité entre optique et radar a été mise en œuvre pour le suivi des surfaces et des pratiques agricoles dans différents systèmes de production : le riz en Camargue, dans le delta du Mékong (Fig. 3) et sur les hauts plateaux malgaches. La fusion de données optiques multi-résolutions (MODIS, **Sentinel-1**, **Sentinel-2**, **Landsat-8** et **Spot 6/7**) a été exploitée pour cartographier les zones de feu, les agrosystèmes, les surfaces dégradées, la petite agriculture des pays du Sud, et pour délimiter des unités paysagères.

La haute répétitivité de **Sentinel-2** a été valorisée pour bâtir des séries temporelles pluriannuelles d'indices spectraux (STIS), de variables biophysiques, et dériver des métriques phénologiques et des dates-clés caractéristiques des dynamiques des états de surface. Ces observables sont utilisés pour étudier les effets combinés de la saisonnalité naturelle et des activités humaines pour suivre la dynamique des systèmes naturels ou anthropisés (dégradation et régénération forestières en Amazonie, fonctionnement des roselières dans le delta du Danube, etc.). Les méthodes de détection des changements ont débouché sur des produits opérationnels pour la surveillance de la déforestation, des inondations et des glaciers. La typologie des changements et des tendances basée sur l'analyse des STIS est en plein essor ; l'analyse des tendances du NDVI MODIS sur 10-15 ans a servi d'appui pour étudier la dégradation des terres en Afrique sub-saharienne et ses déterminants climatiques et anthropiques. Le développement de méthodes de fouille de données a conduit à caractériser l'évolution de phénomènes spatio-temporels (état de changement d'un lac, division de parcelle agricole) par analyse orientée objet via des techniques de représentation sous forme de graphes.

Pour étudier les EBV (variables essentielles de biodiversité), des campagnes aéroportées et le modèle de transfert radiatif DART ont montré l'apport de la richesse spectrale pour identifier les espèces à une échelle unitaire et à l'échelle du groupement d'arbres. La structure 3D des forêts tempérées et tropicales est estimée à partir de données lidar. Le maintien de la biodiversité repose sur le maintien des mosaïques paysagères, i.e. la fermeture des milieux naturels entraîne la disparition d'habitats et l'homogénéisation des paysages, et augmente les risques d'incendies. L'hétérogénéité des paysages est étudiée par analyse fréquentielle d'image à très haute résolution ou par le calcul d'indices paysagers à partir de cartes d'occupation des sols. En Californie, la résilience d'une végétation après une période de sécheresse intense a été bien mise en évidence à partir de la chlorophylle dérivée de l'imagerie hyperspectrale AVIRIS (Fig. 4).

Les maladies infectieuses telles que paludisme, dengue, méningite bactérienne, ou maladies diarrhéiques sont multifactorielles et difficiles à prévenir, dépister et

contrôler. Pour identifier les facteurs environnementaux, démographiques et météorologiques favorables à l'émergence et à la propagation de ces maladies, des études en télé-épidémiologie s'appuient sur des produits issus de l'exploitation de données optiques et radar (occupation des sols, présence de poussières désertiques, qualité de l'eau, qualité de l'air, indices paysagers, étendue des eaux de surface et matières en suspension).

La fusion de données optiques multi-résolutions (MODIS, Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat-8 et Spot 6/7) a été exploitée pour détecter les surfaces artificialisées et les tissus urbains en zones tempérée et tropicale. Des travaux exploitant la stéréoscopie Très Haute Résolution de Pléiades ont permis une meilleure connaissance 3D des bâtiments et de la distribution de la végétation urbaine. L'infrarouge thermique a été mis à profit pour cartographier les flots de chaleur urbaine qui valident les schémas de bilan d'énergie en zone urbaine.

Les données Pléiades ont été utilisées pour caractériser le trait de côte en zone Aquitaine, ainsi que le continuum bathymétrie-MNT. De telles informations sont utiles pour l'estimation de la vulnérabilité des zones littorales aux événements extrêmes et donc à leur aménagement. De plus, le littoral fait l'objet d'un projet transverse sur l'érosion des falaises de craies à partir de l'imagerie Pléiades.

1.3. LES PROGRAMMES NATIONAUX ET INTERNATIONAUX

1.3.1. Une bonne dynamique nationale

On relève une structuration forte de la communauté nationale autour des missions spatiales en opération (Smos, Sentinel-1, Sentinel-2, Pléiades, Venµs) et en préparation (Swot, Biomass, Flex) et à l'étude (Trishna, Smos-HR, Hypxim, etc.), avec des projets combinant des données radar et optique (forêts tropicales, cultures). Plusieurs projets se sont focalisés sur l'assimilation de ces données, ce qui atteste de leur qualité. Des communautés émergentes se fédèrent autour des thématiques lidar et hyperspectral. Un élément structurant est le pôle de données et de services pour les surfaces continentales THEIA qui, depuis 2012, s'est doté de 22 Centres d'Expertise Scientifiques (CES) développés autour de 10 thèmes et de 8 réseaux d'Animation Régionale THEIA (ART) (Fig. 5). Les CES développent des méthodes innovantes de mobilisation des données satellitaires, aéroportées et in situ pour en dériver des méthodes, des outils et des démonstrateurs. Les ART ont pour ambition d'accompagner les acteurs régionaux dans la maîtrise de l'observation spatiale pour répondre aux enjeux majeurs territoriaux en France et dans la

ceinture intertropicale. Les CES bénéficient d'un soutien financier via l'Appel à Proposition de Recherche (APR), ce qui représente 35 % des projets soumis en 2018, pour valoriser les données spatiales et positionner la communauté française sur les futurs enjeux européens dans le cadre du programme Copernicus. Certains projets initiés dans le cadre de l'APR ont trouvé un prolongement avec des programmes nationaux (PNTS, ANR, LEFE). Une communauté spatiale urbaine s'est fédérée à partir de 2016 autour de l'atelier annuel TEMU (Télé-détection pour l'Étude des Milieux Urbains) ouvert aux acteurs du monde socio-économique. La communauté hyperspectrale est maintenant structurée et organise un colloque national dans le cadre de la SFPT Groupe hyperspectral, réunissant environ 80 personnes chaque année, depuis 2014.

1.3.2. Participation aux programmes internationaux

Le Global Land Service du programme Copernicus amplifie la visibilité et l'usage de bases de données bio-géophysiques issues du spatial. C'est par exemple le cas du CES HydroWeb qui propose des produits sur la hauteur d'eau des fleuves et des lacs à partir de différents altimètres. Dans le cadre du programme *Climate Change Initiative* (CCI) de l'ESA, qui a pour objectif de bâtir de longues séries temporelles d'*Essential Climate Variables* (ECV), la recherche spatiale française contribue aux produits « Biomass », « Soil Moisture » et « Lakes ». Elle participe aussi à la définition des variables essentielles de biodiversité.

Des équipes françaises sont impliquées dans des projets européens (FP7 Sigma, Sen2Agri, H2020 Sensagri, Multiply). Dans le cadre du CEOS, un rapport a été produit pour définir les besoins de la communauté nationale hyperspectrale pour l'étude des eaux côtières et continentales (coll. CSIRO).

2. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

2.1. LES PRIORITÉS SCIENTIFIQUES

2.1.1. Le cycle de l'eau

La connaissance du stress hydrique des végétaux, accessible par télé-détection dans l'infrarouge thermique, conditionne le réalisme des estimations d'évapotranspiration issues des modèles. Aujourd'hui les

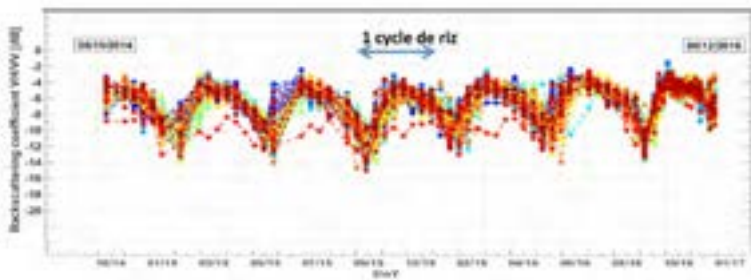
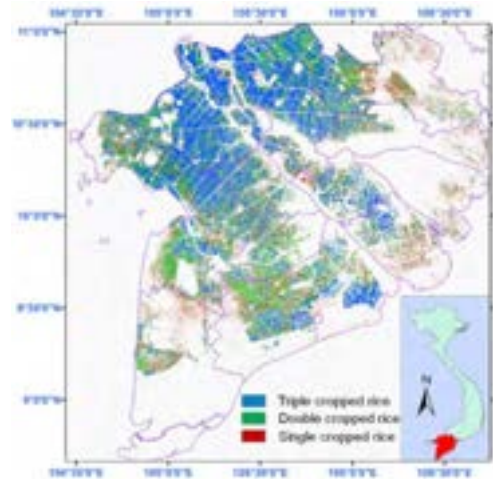


Fig. 3 : Cycles saisonniers de la culture de riz à partir de l'imagerie radar Sentinel-1 pour la zone cartographiée du delta du Mékong.

© Projet GeoRice, CESBIO



observations thermiques disponibles avec **Sentinel-3/SLSTR**, **MODIS** et **Landsat-8** n'offrent pas de résolutions spatiales et temporelles suffisantes pour aborder les besoins en eau du parcellaire agricole alors que les données optiques **Sentinel-2** sont assimilées dans les modèles d'irrigation. Avec **Smos**, la radio-interférométrie bande L permet depuis 11 ans l'élaboration de cartes d'humidité du sol, d'indices de sécheresse et de risques d'inondation à l'échelle globale mais avec une résolution de 40 km. Depuis 2019 l'assimilation de ces cartes dans le modèle du CEPMMT améliore les prévisions météorologiques et l'évaluation des risques d'inondation et de sécheresse. Autres composantes du cycle de l'eau observable par satellite, les niveaux des fleuves et des rivières bénéficient des missions altimétriques conventionnelles (nadir) passées, actuelles et à venir (**Topex**, **Jason 1 et 2**, **Saral/Altika**, **Jason-CS/Sentinel-6**, **Sentinel-3**, **HY-2**) et des missions à fauchée (avec **Swot** en 2021 puis **Wisa** vers 2028). On note cependant qu'aucune de ces missions ne propose de répétitivité journalière. L'altimétrie à fauchée est également très utile au suivi pluriannuel des fluctuations de volume des calottes polaires. La gravimétrie renseigne directement sur le contenu total d'eau (liquide et calottes glaciaires) sous la trace de satellites comme **Grace** et **Grace-FO**. A ce jour l'Europe ne possède pas de mission gravimétrique et n'en prévoit pas.

2.1.2. Le cycle du carbone

Les enjeux liés au cycle global du carbone nécessitent de caractériser le rôle essentiel de la végétation. À partir de 2021, la quantité de biomasse sera renseignée directement à partir d'observations en bande P (mission **Biomass**) avec, selon les densités observées, une sensibilité complémentaire en bande L en mode passif (produits **Smos/L-VOD**). Les mesures de fluorescence issues de **Flex** renseigneront sur la production primaire brute. Le domaine thermique fournira une information complémentaire sur le stress hydrique aux résolutions spatiales et temporelles déjà évoquées pour le cycle de l'eau. Les pratiques agricoles décrites par

Sentinel-2 préciseront le stockage du carbone dans le sol comme levier d'atténuation.

2.1.3. Land system

La description des surfaces et de leurs types de couvert par imagerie satellitaire bénéficie directement de toute amélioration de résolution, qu'elle soit spatiale, temporelle ou spectrale (les résolutions **Sentinel-1** et **Sentinel-2** servant de référence actuelle). Souvent évoqué pour satisfaire les besoins du thème biodiversité, l'apport de l'hyperspectral pourra faire ses preuves avec **Prisma**. Les données **Pléiades** et **Spot 6/7** ont montré l'intérêt de la très haute résolution avec cependant un déficit de revisite que la future mission **CO3D** ne compensera que partiellement.

Dans ce contexte programmatique, les priorités de la communauté Surfaces Continentales (SC) sont déterminées principalement selon quatre critères :

- L'émergence de mesures physiques fondamentales manquantes à l'un des trois thèmes,
- La continuité des observations ayant fait la preuve de leur utilité,
- L'existence d'une communauté thématique structurée autour d'un besoin avéré que renseigne une mission spatiale,
- L'amélioration des résolutions spatiales et temporelles des observations selon la dynamique des processus et la taille des objets étudiés.

Parmi les propositions reçues et selon ces critères, le groupe identifie trois missions prioritaire :

Trishna (en fin de phase A) est une mission d'imagerie dans l'infrarouge thermique engagée en collaboration avec l'agence spatiale indienne ISRO. Actuellement en fin de phase A, le lancement est prévu pour 2025. La spécificité de la mission (résolution spatiale de 50 m, revisite à 3 jours) répond à un besoin récurrent affiché par l'Inde et la France : caractériser le stress hydrique des végétaux, en particulier pour les surfaces agricoles.

Viennent ensuite d'autres objectifs thématiques importants comme le climat urbain, la cryosphère, l'hydrologie continentale et côtière, ainsi que le suivi des eaux côtières et continentales. La mission européenne **LSTM** projette - dans l'hypothèse de sa sélection parmi les 6 candidats prioritaires Copernicus - d'acquérir des données de nature très similaire (résolutions spatiales et temporelles, canaux). Si cette perspective de pérennisation de la mesure dans un contexte opérationnel Copernicus est fortement souhaitable, le concept proposé ne s'inscrit que dans un horizon plus lointain (vers 2028). La mission **Trishna** apparaît donc comme un précurseur indispensable pour la maîtrise de cette mesure et permettra de positionner la communauté française en pointe avec pour perspective Copernicus. **Le groupe SC soutient le démarrage de la phase B Trishna, assorti d'un fort accompagnement de la communauté de recherche et aval.**

Le projet Smos-HR (en fin de phase 0) a pour objectif d'assurer la continuité de Smos avec des mesures d'humidité du sol dont la résolution spatiale sera améliorée d'un facteur 4 (10 km pour **Smos-HR** contre 40 pour **Smos** aujourd'hui). Ainsi **Smos-HR** contribuera notamment à améliorer la gestion des ressources en eau et notre connaissance du cycle du carbone (bio-

masse aérienne des arbres). Dans le domaine bande L passive dont il est ici question, **Ulid** est un projet visant à vérifier le principe de mesure interférométrique bande L à partir d'éléments d'antennes disposés sur différents nanosatellites (de deux à quatre satellites en formation). La base interférométrique ainsi élargie améliorerait la résolution de la surface émettrice mesurée. Si le concept **Ulid** est vérifié, il pourrait éventuellement bénéficier à **Smos-HR** et surtout être appliqué à une troisième génération (**Smos-NG**) dans l'objectif d'atteindre la résolution kilométrique à l'horizon 2030. **Le groupe SC soutient l'instruction de la phase A du projet Ulid et espère la continuité de la filière radiométrie en bande L au sein de la communauté nationale.**

Biodiversity (étudiée par le CNES en phase 0 sous le nom de **Hypxim, Hypex**). Cette mission a pour objectif d'évaluer la biodiversité, l'état et le fonctionnement des écosystèmes terrestres, des zones côtières, des eaux continentales et de la végétation urbaine. L'imagerie hyperspectrale à haute résolution spatiale (< 10 m) avec une revisite de cinq jours sur plus d'une centaine de sites par jour, vise plusieurs variables essentielles de la biodiversité terrestre, intertidale et marine (distribution et abondance des espèces, fragmentation des habitats, phénologie, variables biophysiques de la

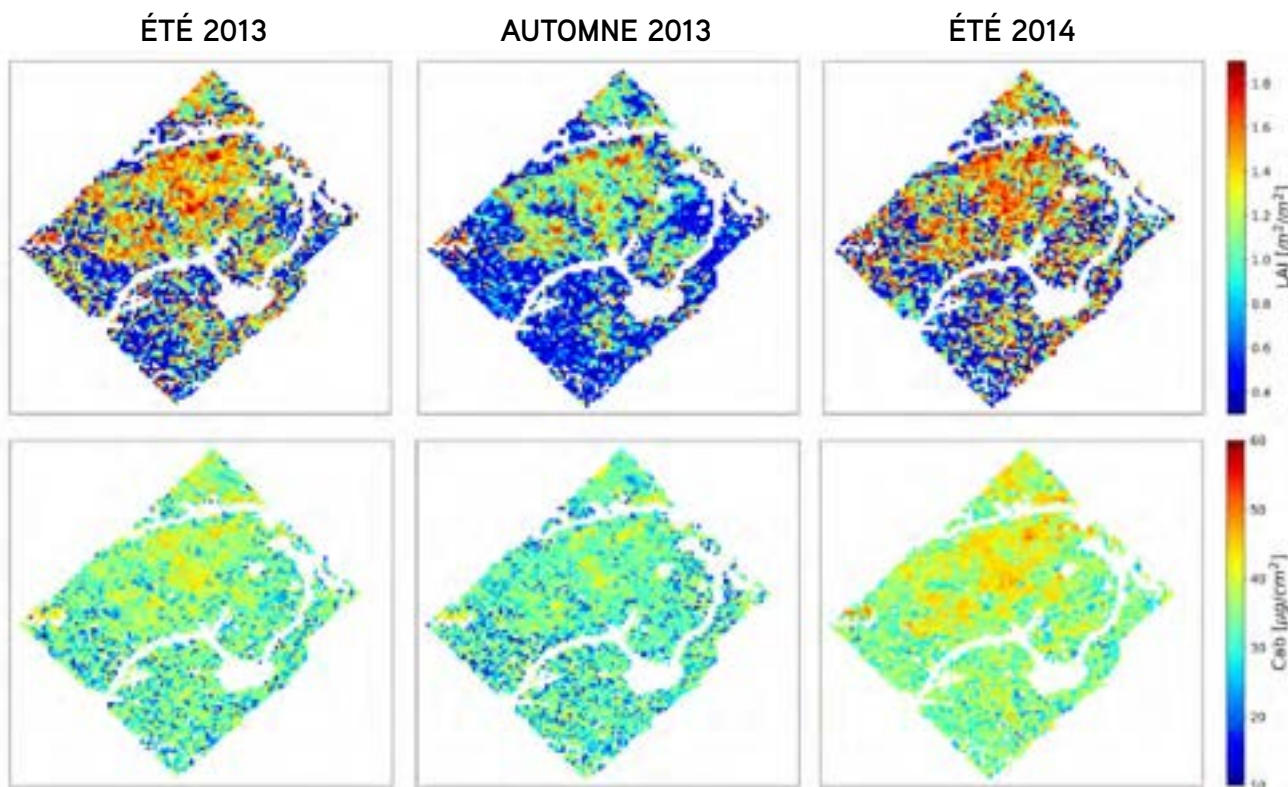


Fig. 4 : Evolution de variables de la biodiversité pour la densité des feuilles (haut) et la chlorophylle (bas) à partir de l'imagerie AVIRIS sur la zone de Tonzi (Californie) après la période de sécheresse intense de l'été 2013.

© CSTARS/UCD-USA, NASA, ONERA/DOTA, CESBIO

végétation). L'hyperspectral vise aussi la concentration des hydrolats, la bathymétrie et l'occupation des petits fonds. Un suivi à haute résolution spatiale sur différents sites est requis afin notamment de faire le lien entre les observations de terrain faites par les écologues sur les assemblages d'espèces et la diversité fonctionnelle.

Le groupe SC soutient l'idée d'une mission hyperspectrale et suggère d'affiner les spécifications de besoins.

Le groupe SC exprime son intérêt pour les missions suivantes :

Déjà à l'étude, **Smash** propose avec une constellation de 10 nanosats une mesure altimétrique nadir des niveaux d'eau des rivières à cadence journalière. La mission apporte une complémentarité temporelle aux autres missions nadir ainsi qu'aux altimètres avec fauchée comme **Swot** (prévu en 2021) et **Wisa** (Wide Swath Altimetry, envisagé vers 2028) qui assureront une couverture spatiale quasi-globale. **Marvel** propose de mesurer le champ gravimétrique dont une partie correspond au stock total d'eau et sa dynamique, ce qui est d'intérêt pour les estimations de déplétion des nappes phréatiques liées à l'irrigation et le volume des calottes polaires. Cette mission est très complémentaire de **Grace-FO**.

Le groupe SC recommande de poursuivre les études relatives à ces missions et d'explorer activement les cadres programmatiques envisageables pour leur réalisation.

Sentinel-HR propose de fournir quatre fois par an des mosaïques globales, avec une stéréoscopie envisageable, des terres et des côtes avec une résolution entre 1 et 2 mètres dans quatre bandes spectrales optiques. L'objectif est de déterminer des éléments fins du paysage (artificialisation, végétation urbaine, infrastructures, forêts, haies, couronnes d'arbres, trait de côte, variations intra-parcellaires en agriculture, glacier, sous réserve de la stéréoscopie) et d'assurer un suivi intra-annuel des changements. **VLOBS** est un projet novateur de radar bi-statique opérant en bande L, complété par un capteur optique, qui mesurera les volumes des forêts, des glaciers, et des mouvements de terrain. La diversité d'angle d'incidence, grâce à l'association entre un récepteur mesurant au nadir et un système actif mono-statique, offre une grande pénétration dans les milieux volumiques naturels (complémentarité avec le ROSE-L).

Pour ces deux dernières missions, le groupe SC propose que soient entreprises des études de faisabilité pour en estimer le rapport coût/bénéfice/maturité technique et scientifique.

2.2. L'EXPLOITATION DES DONNÉES

Les approches traditionnelles d'extraction de la donnée connaissent des progrès incrustaux et doivent continuer à être soutenues. Les approches émergentes en intelligence artificielle (IA), telles que le *Machine Learning*, soulèvent des enjeux particuliers, notamment la quantité et la qualité des bases de données d'apprentissage. Le *Cloud Computing* offre des services de calculs à distance pour le big data). C'est également le cas pour des approches en traitement de l'image (segmentation, classification objet), des signaux temporels (détection et typologie des changements, ondelettes) et de la fusion des données (multi-résolution, multi-sources). Ces approches se fondent sur des modèles mathématiques de l'information analysant des données hétérogènes (spatiales, textuelles, bases de données) pour en extraire une information (*data mining* ou fouille de données hétérogènes). L'inversion du signal radiométrique via des modèles du transfert radiatif ou des simulations de futurs capteurs doit continuer à exister. C'est un domaine plus segmenté par objet d'étude ou par capteur que les approches précédemment listées, mais la tendance actuelle va vers une généralité des outils et un champ d'application plus large dans lequel l'assimilation des données peut s'appuyer sur l'IA.

Sur le plan technique, l'offre est foisonnante avec les DIAS de Copernicus, les TEP de ESA, *Google Earth-Engine* ou *Amazon Web Services* dans le secteur privé, ou au niveau national l'offre de GEOSUD (IDS). En complément de GEOSUD, il est demandé de mutualiser les traitements de données de télédétection et les données in situ en assurant leur disponibilité future via un cloud public (assurer le devenir de PEPS). La mise en place de formations est une priorité pour une adoption par la communauté. Toutefois se posent des questions quant aux coûts induits et à la dépendance à telle ou telle offre, particulièrement pour les acteurs du secteur privé dont la feuille de route est inconnue.

2.3. LA STRUCTURATION DES PROGRAMMES NATIONAUX

2.3.1. Des développements au service des scientifiques

Les algorithmes développés dans le cadre des CES et qui répondent à un cahier des charges précis (pertinence, intérêt, données disponibles, etc.) doivent continuer à être mis en production, via l'IDS **THEIA** ou grâce aux ressources de certains programmes internationaux, organismes ou fonds privés. A ce jour, six CES sont en phase de production (réflectance de surface, occupation des sols, hauteur des lacs et rivières, humidité des sols BR et HR, surfaces enneigées), et deux

sont en cours de prototypage (variables biophysiques de végétation et qualité des eaux continentales). Le CNES pourra aider les acteurs de THEIA à offrir une vitrine internationale aux produits des CES pour les valoriser, assurer leur pérennité et rentabiliser les moyens investis par le CNES (GEOGLAM, GEOBON) pour faciliter l'édition de métriques nécessaires à la satisfaction des ODD. Pour différentes situations géographiques, les EBV et ECV doivent aussi démontrer leur capacité à renseigner les modèles écologiques sur de grandes surfaces.

Les **services d'observation** (CRYOBSCLIM, JECAM, etc.) doivent être soutenus par le TOSCA pour continuer à exister. Les sites nationaux qui entrent dans un processus de labellisation INSU (SNO, SOERE, ZA) bénéficient d'infrastructures existantes et pourraient être des sites privilégiés mentionnés dans l'appel d'offre. Les sites des infrastructures de recherche (OZCAR pour la ressource en eau, ICOS pour les GES) doivent être considérés pour devenir d'éventuels sites de calibration/validation multi-missions et multi-agences de façon aussi à valoriser les données spatiales pour un certain nombre d'applications phares. La **proxydétection** est une activité émergente qui consiste à collecter des données in situ via un équipement pérenne de caméras, des drones, des ballons captifs. Des moyens d'accompagnement pour densifier les outils de proxydétection pourraient être mis en place pour affiner la préparation de futures missions spatiales et accompagner les missions en cours (cal/val).

L'**offre SAFIRE** doit servir à mieux préparer les missions en préparation du CNES. Pour cela, elle doit mieux bénéficier d'une instrumentation multispectrale dans l'infrarouge thermique pour de la cal/val et préparer la certification des futurs produits de la mission **Trishna** prévue pour 2025. Ce sera également le cas avec une mission hyperspectrale en gestation destinée à accroître notre connaissance de la biodiversité. Il paraît souhaitable que de nouveaux équipements soient embarqués notamment sur un aéronef ayant un long rayon d'action comme l'ATR pour garantir une meilleure accessibilité et promouvoir de plus amples collaborations, notamment internationales.

2.3.2. Propositions pour le TOSCA

Les liens entre les groupes TOSCA et les programmes nationaux pourraient être renforcés pour donner une meilleure cohérence au niveau de la recherche nationale compte tenu de la prépondérance croissante du volet spatial dû à des observations bien résolues. Des mécanismes de cofinancement pourraient être envisagés. Des membres du TOSCA pourraient également siéger dans des Commissions Spécialisées. Un autre constat est le manque de transversalité avec les agences nationales comme ALLENI, ce qui ne permet pas toujours la remontée d'informations utiles.

Les liens entre le TOSCA et THEIA sont assurés par la présence dans le groupe SC de personnes engagées dans des CES, et par l'avis consultatif du responsable du pôle THEIA sur les projets labellisés THEIA. On pourrait imaginer des liens renforcés avec le dépôt des données in situ, acquises dans le cadre de projets TOSCA, sur la plateforme de l'infrastructure de recherche Data Terra. Les activités de sensibilisation, formation et accompagnement des utilisateurs publics et privés des ART ne sont pas soutenues par le TOSCA, mais elles pourraient être relayées par le comité auprès des services aval du CNES. Compte tenu du volume croissant de propositions, il serait utile de réfléchir à limiter le nombre de propositions à évaluer par membre et de faire désormais plus appel à des évaluateurs externes. Le séminaire à mi-parcours de la prospective est une bonne chose et devrait être maintenu. Les enseignants-chercheurs ont des contraintes d'emploi du temps qui sont prohibitives pour une implication dans une mission spatiale et aspirer à des responsabilités de haut niveau. La mise en place avec le CNES d'un système de partenariat, chaire ou de délégation comme cela est fait par ailleurs, apparaît souhaitable. Le groupe s'inquiète de la perte de physiciens de la mesure, du besoin croissant en ressources informatiques et en moyens humains pour traiter des gros volumes de données.

2.4. SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

Type de mesure/d'observables	Cadre de réalisation	R&T associée	Thème scientifique
Température, émissivité	Trishna (ISRO)	Chaîne de détection et cryogénie	Stress hydrique des écosystèmes, îlots de chaleur urbains
Humidité du sol	Smos-HR/Ulid	Interférométrie en bande-L	Météo, agriculture, stock de carbone, hydrologie, climat, cryosphère,
Cartographie des écosystèmes	Biodiversity	Imagerie optique hyperspectrale	Biodiversité, état et fonctionnement des écosystèmes
Niveau des fleuves et rivières	Smash	Altimétrie nadir bande Ka	Hydrologie continentale
Champ de gravité	Marvel	Réflecteur ou transpondeur SLR, récepteurs GNSS et DORIS, émetteur VLBI, laser, micro-accéléromètre	Suivi de la dynamique des masses d'eau (glace)
Cartographie THR	Sentinel-HR	Imagerie optique HR	Mosaïque globale des paysages 4 fois par an
Dynamique des stocks de carbone	VLOBS	SAR bande L bi-statique	Caractérisation dynamique des forêts, mouvements de terrain/ glaciers



GROUPE DE TRAVAIL THÉMATIQUE ATMOSPHÈRE

Philippe Chambon, Frédéric Chevallier, Cyril Crevoisier (président sortant), Alain Dabas (président entrant), Carole Deniel (thématicienne), Gaëlle Dufour, Jean-Louis Dufresne, Fabrice Jégou, Olivier Jourdan, Laurent Labonnote, Pierre Tabary (thématicien), Valérie Thouret, Nicolas Viltard.

Objectifs scientifiques. La compréhension des phénomènes atmosphériques constitue un enjeu majeur pour la connaissance du système Terre et pour répondre à des préoccupations fortes de nos sociétés. De nombreuses incertitudes demeurent quant au bilan des gaz à effet de serre, acteurs majeurs du réchauffement climatique, ou quant à certaines contraintes ou rétroactions présentes au sein du système climatique (rôle des nuages, des aérosols, de la vapeur d'eau et de leurs couplages). Les espèces chimiques réactives affectent de manière directe ou indirecte la qualité de l'air et le climat. L'adaptation au changement climatique passe par notre capacité à nous protéger des événements extrêmes et climatiques violents (tempêtes, pluies diluviennes, éruptions volcaniques). L'observation de la Terre depuis l'espace, du fait de sa couverture spatio-temporelle, constitue l'un des piliers fondamentaux pour progresser significativement dans le domaine en combinaison avec des données in situ et aéroportées et en association étroite avec la modélisation numérique du système Terre.

Observables. L'observation spatiale, complétée par les mesures réalisées par des ballons, des avions ou des stations au sol, permet d'accéder à un nombre de plus en plus grand de variables atmosphériques. Il est important de rappeler que l'étude des processus atmosphériques nécessite de croiser l'observation de plusieurs variables. Par exemple, la compréhension du couplage entre aérosols et nuages passe par la caractérisation de paramètres tant physiques (altitude, épaisseur optique) que microphysiques (émissivité, taille et forme des particules, etc.), pour lesquelles les niveaux de maturité sont différents. De plus, la mesure par télédétection de nombreuses variables atmosphériques au niveau de précision requis reste particulièrement difficile. Par exemple, le suivi des tendances, variabilités diurne, synoptique, saisonnière et interannuelle des gaz à effet de serre sont de deux ordres de grandeur inférieures aux valeurs de fond.

Science de l'observation et moyens. Interpréter les observations spatiales en paramètres géophysiques nécessite un travail amont en physique de la mesure, spectroscopie et transfert radiatif, étalonnage/validation, analyse de données, développement d'algorithmes, dans lequel la communauté nationale, soutenue par le CNES, est fortement impliquée. Seule la complémentarité des observations sol, aéroportées et spatiales permet de répondre aux objectifs scientifiques décrits ci-dessus, dans le cadre de campagnes dédiées ou en réseaux de mesure à long terme. Les campagnes ballons permettent d'accéder à des couches atmosphériques (interface troposphère/stratosphère, couche limite) encore difficilement atteignables depuis l'espace. Les mesures aéroportées permettent l'étude de phénomènes particuliers et d'accéder à des régions spécifiques, tout en assurant une grande répétabilité spatiale et temporelle. Enfin, ces vecteurs aéroportés sont un élément indispensable de déploiement des démonstrateurs spatiaux et de validation des missions spatiales.

Priorités du SPS de La Rochelle 2014 et du séminaire ballon 2015. Les recherches soutenues ces dernières années suivent les priorités définies lors du séminaire de prospective scientifique de 2014, et lors du séminaire de prospective Ballons pour l'observation de la Terre de 2015. L'ensemble des missions prioritaires à court terme ont été engagées et sont en cours de développement (**MicroCarb** et **Merlin** pour l'observation des gaz à effet de serre anthropiques, **Stratéole-2** pour l'étude de la haute troposphère-basse stratosphère). La plupart des missions à moyen et long termes ont été instruites et les recherches soutenues (développement des aéroclippers pour le suivi de l'intensité des cyclones, campagnes de ballons stratosphériques), même si le futur de certaines n'est toujours pas assuré (**Mescal** pour la mesure des aérosols et des nuages par mesure active) ou actuellement inexistant (**Orpeo** pour la mesure de la qualité de l'air à haute répétitivité, **Live** pour la mesure du profil vertical de la vapeur d'eau ou **Dycect** pour le bilan d'énergie dans la convection). Enfin, une consultation large de la communauté en 2016 a fait ressortir la nécessité du renouvellement du Falcon20 de l'unité SAFIRE, toujours non réalisé.

1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2014

1.1. LES INCERTITUDES MAJEURES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

1.1.1. Gaz à effet de serre (GES)

Objectifs scientifiques. L'observation depuis l'espace des gaz à effet de serre « à longue durée de vie » comme le gaz carbonique (CO₂) et le méthane (CH₄), bien connus grâce aux réseaux de mesure au sol, vise à mieux caractériser leurs sources et puits à la surface du globe. La précision des inventaires d'émissions de GES d'origine anthropique est notamment jugée insuffisante pour la gestion politique des émissions, à l'échelle de la ville et à celle d'un pays ; leur amélioration par des mesures atmosphériques suscite un intérêt récent.

Bilan. Grâce au soutien du CNES et à la participation de plusieurs équipes au programme CCI-GHG de l'ESA, les contenus troposphériques de CH₄ retrouvés avec lasi sont désormais assimilés en quasi-temps réel au Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMET) afin de réaliser les analyses des profils de concentration de ce gaz dans le cadre du service atmosphère de Copernicus. Forte de son expertise, de son implication dans les mesures au sol et de ses modèles physiques (rayonnement, chimie-transport) et statistiques, la communauté française est particulièrement active sur la préparation des futures missions **MicroCarb/CNES**, **Merlin/CNES-DLR**, **lasi-NG/CNES-EUMETSAT** et **GeoCarb/NASA**. Au niveau européen, elle accompagne la Commission européenne et l'ESA dans la préparation de la future mission **Sentinel-7/CO2M** dédiée aux émissions anthropiques de CO₂ pour la fin de la décennie 2020, après la non sélection en 2015 du projet **Carbonsat** soumis au programme EE8 de l'ESA. La communauté s'implique également de manière croissante sur la validation des produits spatiaux avec un bouquet innovant de mesures au sol, par ballon ou par avion (AirCore, Amulse, picoSDLA, EM27-Sun, etc.) qu'elle déploie dans le cadre du programme MAGIC de campagnes dédiées.

1.1.2. Forçage climatique dû aux aérosols

Objectifs. La variabilité des aérosols atmosphériques est l'une des principales sources d'incertitudes sur l'évolution du climat. Les aérosols ont aussi une grande influence sur la qualité de l'air, la chimie atmosphérique ou le cycle de vie des nuages. Leur suivi global et

régulier nécessite de maintenir une stratégie d'observation multi-senseurs combinant instruments spatiaux (passifs et actifs), sols et aéroportés.

Bilan. Des progrès significatifs ont été réalisés ces dernières années dans la compréhension du cycle des aérosols et de son couplage avec celui de l'eau grâce à la restitution à l'échelle planétaire des propriétés optiques et granulométriques des aérosols. Des climatologies des aérosols fins et grossiers ont pu être construites à partir des données **Polder** grâce au développement de nouveaux algorithmiques tel **Grasp**. Les observations **lasi** ont également permis d'avoir accès à la distribution et à l'altitude des modes grossiers des aérosols désertiques et des premiers résultats sur les aérosols sulfatés et provenant des feux de biomasse. Ces travaux ont permis le suivi du transport des poussières désertiques et de leur dépôt au-dessus de l'Atlantique. Ils se prolongent dans le cadre de la préparation de l'instrument 3MI et de son démonstrateur aéroporté **Osiris** déployé notamment dans le cadre de la campagne aéroportée **Aeroclo-Sa** et de l'instrument **lasi-NG**. Le lidar de la mission **Calipso** a permis des avancées significatives dans l'étude de la distribution verticale des aérosols et des nuages et de leur typologie. Un projet soutenu par le TOSCA (EECLAT) a permis de coordonner cette thématique au niveau national et de préparer les futures missions **EarthCare** et **Mescal**. La Calibration/Validation (Cal/Val) de toutes ces missions spatiales s'appuie régulièrement sur les réseaux sols (réseau de photomètres AERONET, réseau NDACC de détection du changement de la composition atmosphérique) et sur les sites instrumentés (Site Instrumenté de Recherche en Télédétection Atmosphérique, Observatoire de La Réunion), réunis au sein de l'infrastructure de recherche ACTRIS. Récemment de nouveaux développements ont permis de mesurer les aérosols à partir de vols ballon. C'est le cas du compteur d'aérosols LOAC et du lidar BeCOOL, deux instruments impliqués dans **Stratéole-2** qui seront déployés pour la validation des produits aérosols **Aeolus**, **EarthCare** et **Mescal**.

1.1.3. Réponse aux perturbations des nuages

Objectifs. Les nuages jouent un rôle fondamental dans les bilans hydrique et énergétique du système climatique. Même si les modèles de climat s'accordent sur une rétroaction nuageuse globalement positive (renforcement du réchauffement), une forte disparité persiste entre les modèles.

Bilan. La stratégie d'analyse des observations spatiales aux échelles régionale et globale mise en place ces dernières années a permis d'améliorer la caractérisation des propriétés des nuages et la compréhension de leur cycle de vie. Les sondeurs infrarouges **lasi** ou **AIRS**, sensibles aux nuages de la haute troposphère, ont permis de mieux cartographier la répartition géographique

des nuages glacés et de mieux comprendre leurs processus de formation en reliant par exemple la taille des enclumes à l'intensité de la convection. Les sondeurs micro-ondes MHS et AMSU ont permis de mieux quantifier les précipitations et de tester la capacité des modèles à bien les représenter, notamment en intensité et localisation géographique. L'exploitation des observations **Calipso-Cloudsat** a mené à la définition de nouveaux diagnostics climatiques nuageux grâce au développement de produits dédiés à la validation de modèles de circulation générale GOCCP (GCM-Oriented Calipso Cloud Product), dont la valorisation constitue une nouvelle piste de recherche fructueuse ainsi qu'un élément de pilotage important des missions spatiales futures comme **Mescal**. Dans les latitudes tropicales, la synergie radiomètre/lidar/radar AIRS-**Calipso-Cloudsat** a été exploitée pour estimer l'extension verticale et le taux de chauffage des nuages hauts en fonction de leurs propriétés physiques et de leur environnement thermodynamique. Les missions **A-Train**, **Megha-Tropiques**, **MSG** et **GERB** ont également permis de mieux comprendre l'impact radiatif des systèmes convectifs de mésoéchelle et d'évaluer leur représentation dans les modèles.

1.1.4. Réponse aux perturbations : le cycle de l'eau

Objectifs. Le cycle de l'eau comporte trois boîtes interconnectées : la vapeur d'eau, les nuages et les précipitations. Toutes trois ont des caractéristiques très liées à l'échelle de l'observation, les deux dernières étant de plus affectées d'effets d'intermittence spatio-temporelle. Si, à partir des données spatiales, on peut assez bien restituer quantitativement la vapeur d'eau en moyenne atmosphère, c'est moins vrai pour les nuages et encore moins pour les précipitations.

Bilan. L'exploitation de l'ensemble des radiomètres hyperfréquences passifs a permis de mieux quantifier les précipitations à l'échelle globale et de tester la capacité des modèles à bien les représenter, notamment en termes d'intensité et de localisation géographique. En particulier, ces travaux ont conduit au développement et à la mise à disposition via AERIS, du produit pluie 1° x 1° quotidien actuellement le plus performant sur l'Afrique de l'ouest. Grâce à l'apport du sondeur SAPHIR, la mission **Megha-Tropiques** (MT) a pleinement intégré le consortium Global Precipitation Mission (GPM). En réalisant la synthèse entre différents capteurs spatiaux en orbites géostationnaire et en orbites basses, il a été possible de suivre précisément le déplacement et l'évolution des systèmes convectifs afin de mieux documenter et comprendre leur cycle de vie. Ces activités se sont concentrées sur la région tropicale mais des actions sont aussi menées sur les comparaisons entre produits GPM et radars du réseau Météo-France sur la zone métropolitaine. Enfin, dans les régions polaires, la

synergie **CloudSat-Calipso** a permis d'étudier la variabilité spatio-temporelle des propriétés microphysiques des nuages, l'impact des nuages sur la fonte de la calotte arctique, et les précipitations en Antarctique.

1.2. MÉTÉOROLOGIE, POLLUTION ET ÉVÈNEMENTS EXTRÊMES

1.2.1. Dynamique atmosphérique

Objectifs. L'observation spatiale tient une part grandissante dans l'étude et la prévision numérique du temps, notamment à travers l'assimilation de données. Le soutien du CNES aux laboratoires français a permis de développer l'assimilation de nouveaux produits spatiaux.

Bilan. **Iasi** a apporté une contribution significative à l'amélioration des prévisions par sa capacité à observer les profils verticaux de température et d'humidité. Les outils nécessaires à la future exploitation opérationnelle de **Iasi-NG** ont été développés. L'assimilation des observations SAPHIR a été menée avec succès à Météo-France ainsi que dans sept autres services météorologiques opérationnels. Son impact sur les prévisions s'est révélé positif grâce à sa capacité à observer fréquemment l'humidité et les systèmes convectifs dans la ceinture tropicale. Des produits de synthèse entre différents capteurs spatiaux en orbites géostationnaire et polaire ont été développés qui permettent de suivre précisément le déplacement et l'évolution de ces systèmes dans une optique de recherche. L'observation du profil vertical du vent à l'échelle globale est devenue une réalité grâce au lancement du satellite **Aeolus** de l'ESA en 2018. **Aeolus** fournit notamment des données systématiques sur la haute atmosphère, peu documentée, que les campagnes ballons **Stratéole-2** vont observer dans la bande équatoriale au cours de plusieurs campagnes de mesures. Des données d'un nouveau type – la détection des éclairs – vont être bientôt disponibles en opérationnel grâce au *Lightning Imager* à bord de **MTG**. Portant une information sur l'activité des orages, leur assimilation dans les modèles de prévision est en cours de développement. L'exploitation de la campagne de mesures Exaèdre soutenue par le TOSCA va permettre de préparer l'exploitation scientifique de la mission. Le soutien du CNES a permis à des chercheurs français de proposer ou de se positionner sur des missions innovantes, comme le projet **C3IEL**.

1.2.2. Pollution et qualité de l'air

Objectifs. L'observation spatiale de la composition de la troposphère, avec sa couverture spatiotemporelle sans équivalent, est une pierre angulaire du suivi de la pollution à l'échelle globale à haute résolution spatiale (~ 10 km). Cette surveillance s'inscrit à la fois dans la

détection des événements de pollution extrême (feux, éruption, pollution urbaine), dans leur suivi à long terme et dans la quantification de leur impact sur la composition globale de l'atmosphère.

Bilan. Les instruments **IASI** ont contribué fortement aux avancées majeures dans le suivi de la pollution depuis l'espace. Les observations de monoxyde de carbone sont assimilées dans les Services Copernicus et permettent le suivi des feux, tels les feux indonésiens en 2015. Pour la première fois, grâce à **IASI**, l'identification à très haute résolution des points sources des émissions agricoles d'ammoniac a été possible depuis l'espace et a conduit à l'amélioration de la temporalité des inventaires d'émission d'épandage d'engrais. Ces travaux ouvrent la voie à l'amélioration des capacités des modèles de qualité de l'air à reproduire les pics de pollution. En parallèle, des approches multispectrales couplant les instruments **IASI** et **GOME-2** sur **Metop** permettent d'assurer un suivi de la pollution à l'ozone au plus proche de la surface. Des travaux aux interfaces avec les surfaces continentales et la santé sont également développés, notamment pour caractériser la matière particulaire comme vecteur de maladies en zone sahélienne. La robustesse (validation/dérive) des séries temporelles des composés atmosphériques déduites de **IASI**, qui seront poursuivies par la mission **IASI-NG**, est régulièrement évaluée par la communauté et les premières séries, pour l'ozone notamment, ont pu être incorporées au rapport international sur l'ozone troposphérique (TOAR).

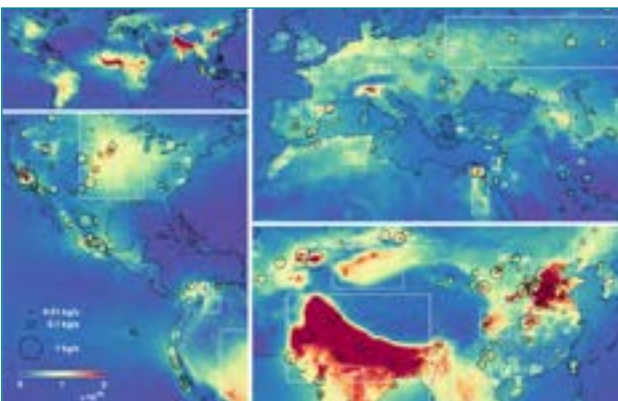


Fig. 1 : Concentrations en ammoniac mesurée par **IASI** et restituée par un réseau de neurones. Ces concentrations ont permis d'identifier 450 sources.

© Van Damme et al., Nature, 2018

.....

1.2.3. Phénomènes extrêmes

Objectifs. Les phénomènes extrêmes, météorologiques (orages, tempêtes des moyennes latitudes ou cyclones tropicaux) ou les éruptions volcaniques peuvent engendrer des pertes humaines et des dégâts matériels importants. Améliorer la prévision de ces phénomènes ou de leurs effets (transport de panache volcanique par exemple) est un enjeu de sûreté. Anticiper l'évolution de leurs caractéristiques (fréquence, intensité) dans le cadre du changement climatique est nécessaire pour construire une société plus résiliente. La compréhension des mécanismes physiques et dynamiques qui sont à leur origine fait partie des grands challenges fixés par le programme mondial de recherches sur le climat (WCRP).

Bilan. En balayant les gammes des micro-ondes et de l'infrarouge, les missions **Megha-Tropiques** et **IASI** ont permis d'améliorer la prévision des événements précipitants extrêmes grâce aux méthodes d'assimilation de données en zones nuageuses et pluvieuses. En particulier, l'intérêt de l'orbite tropicale de **Megha-Tropiques** pour l'amélioration de la prévision de la trajectoire des cyclones a été démontré. Les nouvelles observations par radar à synthèse d'ouverture des satellites **Sentinel-1** ont prouvé leur meilleure sensibilité que les diffusiomètres plus classiques en cas de vents forts, adaptée aux cyclones tropicaux. De nouvelles missions dans lesquelles la communauté française est particulièrement impliquées (**IRS/MTG**, **EarthCare**, **Metop-SG**) seront clés pour nourrir les structures SWFDP (*Severe Weather Forecasting Demonstration Project*) de l'OMM focalisées sur les événements intenses. Par ailleurs, l'instrument **IASI** participe désormais à la détection des éruptions volcaniques grâce à son inclusion dans les VAAC (Volcanic Ash Advisory Centers), pièces fondamentales de la Veille Volcanique des Routes Aériennes Internationales.

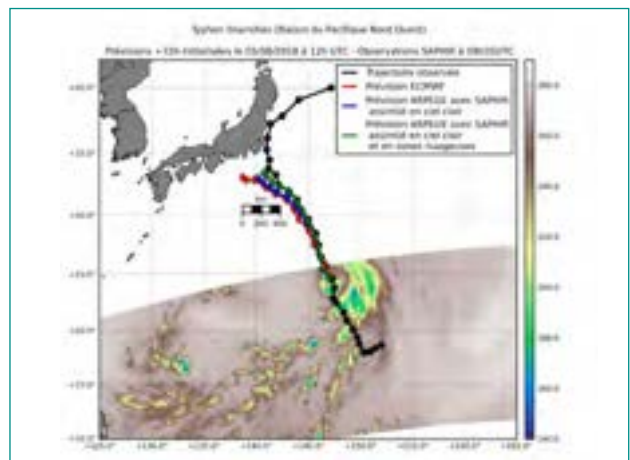


Fig. 2 : Amélioration de la prévision de la trajectoire d'un cyclone grâce à l'assimilation des températures de brillance mesurée par **SAPHIR** sur **Megha-Tropiques**.

© Duruisseau et al., Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2019,
<https://doi.org/10.1002/qj.3456>

.....

1.3. SCIENCES DE L'OBSERVATION

1.3.1. Interaction rayonnement/atmosphère

Objectifs. Le développement et l'exploitation des instruments spatiaux de télédétection reposent sur la bonne connaissance de l'interaction rayonnement/atmosphère. C'est pourquoi une attention particulière est apportée depuis de nombreuses années à l'accompagnement des développements en physique de la mesure, spectroscopie, modélisation directe et inverse du transfert radiatif atmosphérique et simulateurs d'observables.

Bilan. Suite aux recommandations du workshop national TRATTORIA-II en 2015, le développement de codes de transfert radiatifs couvrant plusieurs domaines spectraux a été réalisé, à l'image des codes 4A (référence de plusieurs missions nominales) et ARTDECO. Une attention particulière a été portée à l'amélioration de différents processus radiatifs (diffusion). L'exploitation et la préparation des missions du CNES a fait apparaître la nécessité d'une amélioration de la connaissance de la spectroscopie dans des domaines bien connus mais désormais couverts par une haute résolution spectrale (infrarouge thermique pour **Iasi/Iasi-NG**, raie à 183 GHz pour Saphir) ou plus exploratoire (proche infrarouge pour **Merlin** ou **MicroCarb**). Ces données sont regroupées au sein de la base de données GEISA dont les mises à jour régulières sont soutenues par le CNES. Ces dernières années ont été marquées par le développement d'inversions multispectrales basées sur l'exploitation simultanée de missions couvrant diverses régions spectrales (IR/UV, IR/SWIR, IT/MO). L'ensemble de ces travaux a permis le développement de simulateurs de missions spatiales toujours plus complexes (à l'image du simulateur de **Merlin** qui permet de relier concept instrumental du lidar IPDA et colonne intégrée de méthane) et de mettre au point des méthodes originales d'étalonnage des missions spatiales, cruciales dans le cadre du suivi des variables climatiques essentielles, basées sur le suivi des différences entre radiances observées et simulées.

1.3.2. Conception et réalisations instrumentales du futur

Objectifs. L'observation du système Terre, la validation des missions spatiales et le développement d'expériences spatiales novatrices exigent un arsenal expérimental performant, adapté et bénéficiant des derniers progrès technologiques. Les activités de développement de nouveaux capteurs et porteurs sont donc essentiels.

Bilan. Ces dernières années ont vu émerger plusieurs instruments permettant la mesure de profils verticaux de différents composants atmosphériques à des fins de validation des missions spatiales, d'étude de leur transport vertical et horizontal, ou d'étude de couches atmosphériques peu accessibles depuis l'espace (couche limite, haute troposphère/basse stratosphère). C'est particulièrement le cas pour les gaz à effet de serre : échantillonneurs atmosphériques (AirCore), spectromètres à diode laser (Amulse, pico-SDLA, SPECIES). Leur exploitation a mis en évidence, pour la première fois, une surestimation systématique du méthane par les modèles de transport atmosphérique couramment utilisés par la communauté. Afin de préparer les missions actives du futur, les lidars ont fait l'objet de nombreux développements que ce soit pour les mesures in situ (lidar WaVil pour la vapeur d'eau et la température) ou pour préparer les futures missions spatiales (lidar CoWi dont les premières mesures de CO₂ ont été obtenues). Des campagnes de mesures ambitieuses, soutenues par le CNES et d'autres partenaires, ont été organisées (NAWDEX, AEROCLOUD-SA, MAGIC, EXAEDRE...). Elles ont permis d'étudier plus en détails différents processus atmosphériques, de valider et d'améliorer les algorithmes de restitutions de diverses variables à l'image du système RALI (lidar LNG-HRS et radar W RASTA) utilisé pour évaluer l'algorithme Dardar de restitution des paramètres nuageux à partir des données **CloudSat/Calipso** et préparer **EarthCare** et **Mescal**.

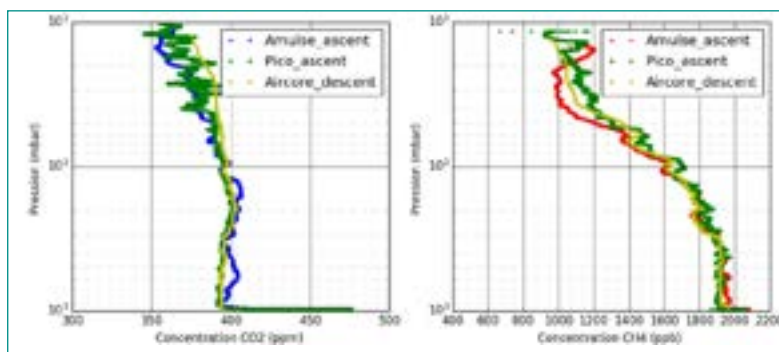


Fig. 3 : Profils verticaux jusqu'à 10hPa (environ 30 km d'altitude) de CO₂ (à gauche) et de CH₄ (à droite) mesurés par les systèmes de mesure Amulse, pico-SDLA et Aircore sous ballon stratosphérique ouvert (BSO). Ces systèmes seront utilisés pour la validation des futures missions spatiales MicroCarb et Merlin.

1.4. STRUCTURATION DE LA COMMUNAUTÉ

Appel à Projet de Recherche. De nombreuses évolutions ont marqué l'évaluation des propositions annuelles de recherche ces cinq dernières années. La nécessité d'assurer une visibilité sur le soutien que le CNES apporte à l'exploitation (**Megha-Tropiques, Calipso, Iasi**) ou à la préparation (**Iasi-NG, Merlin, MicroCarb**) de ses missions, ainsi qu'au fonctionnement des dispositifs nationaux jugés indispensables (Services d'Observation, Sites Instrumentés, Plateformes) font désormais l'objet d'une demande d'un soutien pluriannuel. Autre évolution notable, l'évaluation des propositions basées sur l'utilisation de ballons est désormais effectuée par le TOSCA, avec sollicitation du CS LEFE. Ces évaluations sont ensuite transmises au nouveau Comité Technique Ballons. Le groupe Atmosphère a noté avec satisfaction la part grandissante de propositions scientifiques recourant aux ballons. Plus généralement, le nombre de propositions coordonnées, dans le sens où elles regroupent l'ensemble des équipes et des activités s'appuyant sur une plate-forme ou un instrument, a été en augmentation : EECLAT (10 labos), **Iasi** (9 labos), **Iasi-NG** (7 labos), SOLID/LI (7 labos), MAGIC (7 labos), MINO2S (7 labos), **Megha-Tropiques** (5 labos), **Merlin** (5 labos), **MicroCarb** (5 labos), **Stratéole-2** (5 labos), **Aeolus** (4 labos) et **C3IEL** (4 labos). Cette structuration permet une bonne animation des communautés impliquées dans l'exploitation de ces missions et est complétée par l'établissement de groupes missions. Le rôle de PI scientifique reste cependant très disparate d'une mission à l'autre et mériterait une meilleure reconnaissance.

Aeris. La communauté française a, dans un effort d'homogénéisation, regroupé l'ensemble des données et produits Atmosphère dans le pôle Aeris. Organisation incontournable pour fournir des données brutes et des produits associés, avec le label « FAIR », à tous les utilisateurs, Aeris permet de disséminer les produits phares issus du traitement des missions nominales du CNES et offre un tremplin vers Copernicus (services Atmosphère CAMS et Climatique C3S) et GEOSS (Global Earth Observation System of Systems). Au-delà de la simple dissémination, la prise en main de chaînes de traitement développées dans les laboratoires de recherche est possible une fois atteint un degré satisfaisant de maturité, afin qu'Aeris en assure la production, voire l'exploitation des données.

Infrastructures de recherche. Le développement en cours ou à venir des infrastructures de recherche au niveau français et européen (ACTRIS et ses différentes composantes, IAGOS et ICOS déjà opérationnelles), est un gage de disponibilité de longues séries de données de qualité standardisée. Ce sont des organisations indispensables à la validation des observations satellitaires,

à leur intercomparaison, et à la vérification des éventuelles dérives temporelles. Les bases de données acquises par ces infrastructures de recherche sont également utilisées pour des études de tendance et de processus fournissant ainsi des diagnostics et des métriques pertinentes pour vérifier la cohérence des produits spatiaux (exemple de l'activité TOAR pour l'ozone). Au cours des cinq dernières années, des demandes récurrentes de soutien de base au fonctionnement des dispositifs nationaux tels que réseaux (NDACC, AERONET/PHOTONS), super sites d'observation (SIRTA, OHP), plateformes ou instruments nationaux (plateforme aéroportée PMA) ont été financées. Les activités autour de SAFIRE - EUFAR (avions de recherche) et HEMERA (ballons) sont essentielles pour compléter les dispositifs relevant des stations de surface (ACTRIS, ICOS) ou d'avions commerciaux (IAGOS). Notons que le besoin se fait aussi de plus en plus pressant pour une fourniture des données en temps (quasi) réel afin de satisfaire les besoins d'assimilation et/ou de vérification immédiate des produits d'assimilation.

2. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

2.1. NUAGES, CONVECTION, PRÉCIPITATIONS

Les recherches qu'entend mener la communauté française s'articulent autour de trois grandes questions : (i) *Comment observer, comprendre et attribuer la variation des propriétés des nuages et des précipitations ?* (ii) *Quel est l'effet des conditions environnementales à grandes et petites échelles sur les processus nuageux ?* (iii) *Quels processus physico-dynamiques conduisent à des événements météorologiques extrêmes ?*

La première question nécessite d'observer les nuages et les précipitations pour comprendre l'évolution de leurs propriétés et les processus microphysiques, dynamiques et radiatifs associés. La future combinaison d'instruments micro-ondes à bord de **Metop-SG** (MWI et ICI) devrait combler un manque pour l'observation des variables condensées en observant l'eau sous toutes ses phases. Des gouttes de pluie jusqu'aux hydrométéores en phase solide, ces variables seront mieux observées grâce à **Metop-SG**, en particulier grâce aux nouvelles fréquences submillimétriques d'ICI exploitées pour la première fois au niveau mondial. Cette capacité pourrait être renforcée avec la mission **Forum** (Infrarouge lointain) actuellement en course dans le cadre EE09.

Le transport des variables condensées au sein des nuages reste très peu observé bien qu'il constitue un élément clé de la convection. Le radar Doppler d'**EarthCare** permettra de le mesurer, mais sans vision tridimensionnelle car ce radar sera à visée au nadir. **EarthCare** pourrait être complété par les missions **C3IEL** et **C2OMODO** proposées par la communauté, visant toutes deux à restituer des flux verticaux à partir d'images successives observées par des trains de satellites, l'un dans le domaine visible pour le sommet des nuages, et l'autre dans le domaine des micro-ondes pour l'intérieur des nuages en phase glace.

La détection et l'attribution de tendance climatique sera également un sujet d'étude critique dans les années à venir. Il paraît vital de consolider et pérenniser les longues séries temporelles d'observations des nuages déjà disponibles. La mission **Mescal** revêt de ce fait une importance capitale en prolongeant au-delà d'**EarthCare** la série temporelle des mesures lidar démarrée en 2006 avec **Calipso**. Une observation de plusieurs dizaines d'années est nécessaire pour mieux comprendre les rétroactions nuageuses sur le climat et s'assurer de leur fidèle représentation dans les modèles climatiques.

La deuxième question nécessite d'observer à la fois la vapeur d'eau, la dynamique atmosphérique et les flux radiatifs de surface dans l'environnement des nuages ainsi que la variabilité des propriétés physico-chimiques des aérosols. Les deux futures missions **Iasi-NG** à bord de **Metop-SG** et **IRS** à bord de **MTG** permettront d'améliorer la résolution verticale des mesures de vapeur d'eau, principalement en haute troposphère/basse stratosphère. À noter que la troisième génération d'**Iasi** sera discutée dès 2024 dans le cadre EPS-TG. Les équipes françaises devront se mobiliser pour faire valoir leurs besoins. Ces systèmes d'observation pourraient être complétés par des instruments actifs proposés par la communauté, tel que le lidar vapeur d'eau de la mission **Waliss**. Celui-ci devrait permettre une meilleure description des champs de vapeur d'eau notamment dans les basses couches de l'atmosphère. **Aeolus** permet d'estimer pour la première fois depuis l'espace la dynamique à grande échelle. La suite de la mission sera sans doute envisagée dans un cadre européen sous la conduite d'EUMETSAT. Les mesures aéroportées sont encore indispensables pour observer les structures spatiales plus fines. L'observation de la variabilité des aérosols devrait bénéficier du futur imageur 3MI à bord de **MetOp-SG**. La documentation de cette variabilité pourrait également être grandement améliorée grâce à un lidar multi-longueur d'ondes et à haute résolution spectrale tel que **Mescal**.

Enfin, l'observation des événements extrêmes est une thématique qui nécessite en premier lieu une haute répétitivité des mesures pour être compatible avec la

vitesse d'évolution des phénomènes. La nouvelle génération de satellites géostationnaires devrait être utile pour ces études, en particulier grâce aux croisements d'informations possible entre les capteurs dans l'infrarouge tels que FCI (**MTG**) ou ABI (**Goes-16, 17**) et les nouveaux instruments de mesure de l'activité électrique dans les nuages (**MTG/LI, Goes-R/GLM**). En complément de ces observations, le déploiement de constellations de petits satellites pourrait être étudié afin d'améliorer la répétitivité des mesures dans différentes longueurs d'ondes, de l'hyperspectral infrarouge jusqu'aux micro-ondes.

2.2. FORÇAGES RADIATIFS

Simuler l'évolution du bilan radiatif du globe reste un défi majeur, renforcé par la difficile modélisation du forçage direct et indirect de certaines composantes atmosphériques. La réduction des incertitudes passe ici par une meilleure représentation des processus d'absorption et d'émission de carbone, une compréhension plus fine des interactions aérosols-nuages, une description plus précise du transport de la vapeur d'eau dans la stratosphère ainsi qu'une meilleure représentation de l'évolution de la concentration d'ozone.

Pour cela de nouvelles observations sont nécessaires comme celles des missions **MicroCarb** et **Merlin** (quantification des puits et des sources de CO₂ et CH₄), celles de la mission **Sentinel-5** (mesure des concentrations de H₂O et O₃ dans la stratosphère), celles des ballons **Stratéole-2** (description des échanges troposphère-stratosphère) ou de la mission 3MI (caractérisation fine des propriétés des aérosols - nature et concentrations - et de leurs interactions avec les nuages). Des campagnes aéroportées sont indispensables pour valider ces nouvelles observations satellitaires mais également pour tester de nouvelles méthodes permettant par exemple d'améliorer notre connaissance de la nature des aérosols et de leur répartition verticale (au-dessus, en-dessous et dans les nuages).

Les projets de mission **Sentinel-7/CO2M** (CO₂ à haute résolution spatiale) prévue dans le cadre des High Priority Copernicus mission, ou **NanoCarb** retiennent l'intérêt de la communauté en prolongeant et en améliorant sensiblement la capacité d'observation du carbone à l'échelle globale au-delà de **MicroCarb**. La mission **FORUM** (EE9) améliorera notre compréhension du bilan radiatif dans l'infrarouge lointain bien adapté aux régions froides.

Certains verrous ne pourront être levés que par (1) des mesures plus précises (en termes de radiométrie, de résolution spectrale, et spatiale) incluant une dimension temporelle (mesures continues) et 3D (constellation de

nanosatellites), (2) le développement de nouveaux observables (Lidars vapeur d'eau), (3) l'avènement de simulateurs d'observables plus réalistes (code de transfert radiatif 3D) et plus rapides, et (4) l'amélioration des bases de données spectroscopiques et d'indice des aérosols, qui dépend de leur composition, sur tout le spectre actuellement mesuré.

2.3. QUALITÉ DE L'AIR ET GAZ RÉACTIFS

Tant pour les questions relatives au climat qu'à la qualité de l'air, cette dernière décennie a marqué un saut quantitatif et qualitatif dans la surveillance depuis l'espace de la pollution à l'échelle globale aussi bien pour la détection d'évènements extrêmes (feux, éruption, pollution urbaine) que pour le suivi à long terme des principaux gaz réactifs et gaz à effet de serre. En parallèle, parce qu'indispensables au système global d'observation/prévision, les modèles et les programmes pérennes d'observations in situ se sont aussi développés pour permettre des avancées significatives avec par exemple les services atmosphère et climat de Copernicus (CAMS et C3S). Toutefois, plusieurs challenges nous attendent encore pour les années à venir, afin de rendre complètement efficaces les politiques de régulations par le suivi et la prévision des polluants-clés, à différentes échelles de temps et d'espace :

- Tendre à une observation tridimensionnelle des polluants (ozone et aérosols notamment) en passant du suivi des colonnes troposphériques à la séparation des couches-clés (couche limite, troposphère libre, haute troposphère-basse stratosphère, stratosphère). L'utilisation en synergie des capteurs UV/Vis et IR à bord de **Sentinel-4 et 5** et le développement de nouvelles technologies actives multi-longueurs d'onde (**Mescal**) devraient permettre d'avancer en ce sens.
- Passage de la mesure optique intégrée de l'aérosol (AOD) à la spéciation chimique et à la distribution en taille des aérosols. Là encore l'exploitation **Metop** et **Metop-SG/Sentinel-5** devrait apporter de nouvelles informations. Le développement de lidars multi longueurs d'onde et à haute résolution spectrale, comme **Mescal**, devrait également apporter une meilleure contrainte pour discriminer l'origine des aérosols et comprendre leur évolution au cours du transport.
- Accéder à la distribution spatio-temporelle des concentrations et des émissions des précurseurs organiques (COVs) et inorganiques (NO₂, NH₃, N₂O, SO₂) des polluants secondaires. Ce challenge doit être relevé pour répondre aux enjeux sociétaux liés à la régulation de la qualité de l'air et à la limitation de son impact sur la santé et les écosystèmes. Le soutien à l'exploitation des **Sentinel-4 et 5** et de **Metop-SG** en ce sens est indispensable.

- Mieux séparer les contributions anthropique et naturelle des émissions et leur évolution.

En retour, les observations spatiales ont également un rôle important à jouer pour mieux contraindre les modèles atmosphériques et leur capacité à simuler la grande diversité de la composition atmosphérique dont les aérosols secondaires sont une part très incertaine. En troisième pilier du système global, les observations in situ (sols, aéroportées) sont indispensables aux opérations de calibration/validation et l'évaluation incessante des modèles en mode prévision ou réanalyses. Cette synergie entre les mesures (sols, aéroportés, ballons, satellites) et la modélisation est la seule stratégie efficace pour surveiller l'atmosphère et vérifier l'application des protocoles internationaux.

2.4. OBSERVATIONS AU SOL, SOUS BALLON ET AÉROPORTÉES

La nécessité de disposer de moyens d'observation au sol, sous ballon ou à partir d'avions a été soulignée à plusieurs reprises. Ces moyens demeurent nécessaires pour accéder à certains milieux d'intérêts (nuages par exemple) avec des résolutions spatiales et temporelles suffisantes pour comprendre les processus physiques de petite échelle. Ils constituent un investissement certes coûteux, mais qui facilite et sécurise le développement de nouveaux capteurs et des chaînes de traitement numériques associées en confrontant les techniques à des données réelles acquises dans un environnement et avec des géométries qui se rapprochent du spatial. Ils permettent de réaliser des mesures nécessaires à la mise au point des algorithmes d'inversion des signaux acquis à bord des satellites (propriétés physiques ou optiques des différents types d'aérosols par exemple). Ils peuvent enfin être utilisés pour valider les mesures spatiales et les étalonner, ce qui est indispensable pour garantir la fourniture de longues séries de données sans dérive instrumentale, indispensable pour les études sur le changement climatique.

Les ballons stratosphériques (notamment les Ballons Pressurisés Stratosphériques de longue durée uniques au monde) constituent aujourd'hui l'unique moyen d'accéder à la basse stratosphère dont les propriétés thermodynamiques et chimiques sont cruciales pour la compréhension de phénomènes tels que la couche d'ozone. L'après **Stratéole-2** devra être envisagé sur la base des résultats obtenus, en lien avec l'IR HEMERA, et en conduisant parallèlement un effort de R&D sur les porteurs (augmentation de la durée de vie par exemple) et les capteurs (adaptation aux conditions stratosphériques, miniaturisation...).

Le risque de ne plus disposer de jet au-delà du Falcon 20 de SAFIRE est problématique alors que la communauté s'apprête à exploiter, entre autres, trois nouvelles missions dédiées à la composition chimique de l'atmosphère. Très innovantes, ces missions vont en effet requérir un gros travail de développement des chaînes de traitement des données qu'un démonstrateur aéroporté permet d'accélérer et de faciliter.

2.5. SCIENCES DE L'OBSERVATION

La précision des mesures de concentration des espèces chimiques détectées depuis l'espace repose sur une connaissance fine de leurs propriétés spectroscopiques. Améliorer celles-ci est indispensable si l'on veut atteindre les spécifications de missions telles que **Merlin** ou **Iasi-NG**. La communauté française maintient et améliore depuis de nombreuses années la base de données GEISA. Coordonné entre missions, ce travail devra être poursuivi en mettant l'effort tout particulièrement sur les bandes spectrales des missions à venir.

L'inversion des flux d'énergie captés par les instruments spatiaux en propriétés chimiques ou thermodynamiques passe par un code numérique de transfert radiatif. Ceux-ci doivent être à la fois précis et rapides pour pouvoir traiter en un temps raisonnable, notamment dans un cadre opérationnel, la masse toujours croissante des données acquises. Ces deux qualités, contradictoires, ne pourront continuer à être mariées qu'au prix d'un effort de recherche et de développement.

Il est aujourd'hui courant d'exploiter les mesures spatiales à l'aide d'un « opérateur d'observation » tradui-

sant en observation spatiale un état de l'atmosphère prévu ou simulé par un modèle numérique. Le code de transfert radiatif cité au paragraphe précédent en est un exemple. L'opérateur d'observation permet de fusionner des observations de différents types de capteurs à des états modélisés intégrant les connaissances disponibles sur la physique du milieu étudié. Cette fusion permet de contraindre un modèle de prévision opérationnelle à demeurer proche de la réalité (assimilation de données), ou bien de réaliser des séries de longue durée de données cohérentes indispensables pour l'analyse ou l'attribution des évolutions climatiques. En amont des missions, elle permet aux partenaires du CNES (CNRS, Météo-France...) de réaliser des études sur l'apport prévisible des mesures et d'affiner les spécifications. L'opérateur d'observation doit être considéré comme partie intégrante d'une mission spatiale.

Croiser des volumes croissants de données provenant aussi bien du spatial que d'observations réalisées dans les observatoires ou pendant des campagnes de mesure est une gageure que les bases de données telles qu'AERIS doit relever. Ces pôles de données doivent continuer à se développer et une interopérabilité des différents pôles thématiques est à envisager pour faciliter les recherches sur les interfaces entre compartiments.

La quantité de données spatiales va croître exponentiellement dans les années qui viennent. Disposer de moyens de communication et de calcul suffisamment puissants est indispensable, mais il faudra aussi exploiter les capacités offertes par les techniques d'intelligence artificielle en plein développement. Les chercheurs commencent à se les approprier. Favoriser leur diffusion est un enjeu de formation pour les années qui viennent.



Instrument Iasi NG.

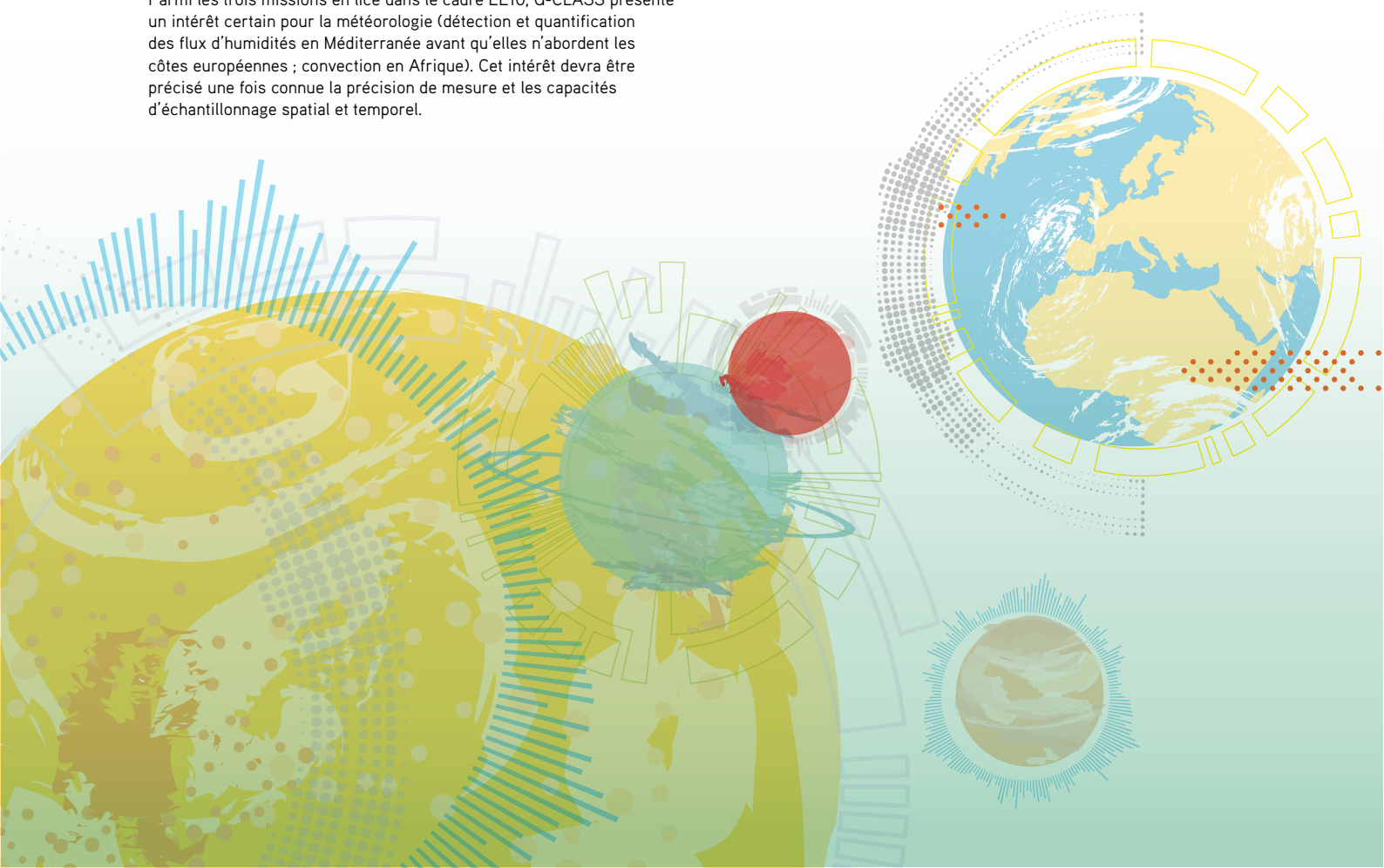
© CNES/GRIMAULT Emmanuel, 2017
.....

2.6. SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

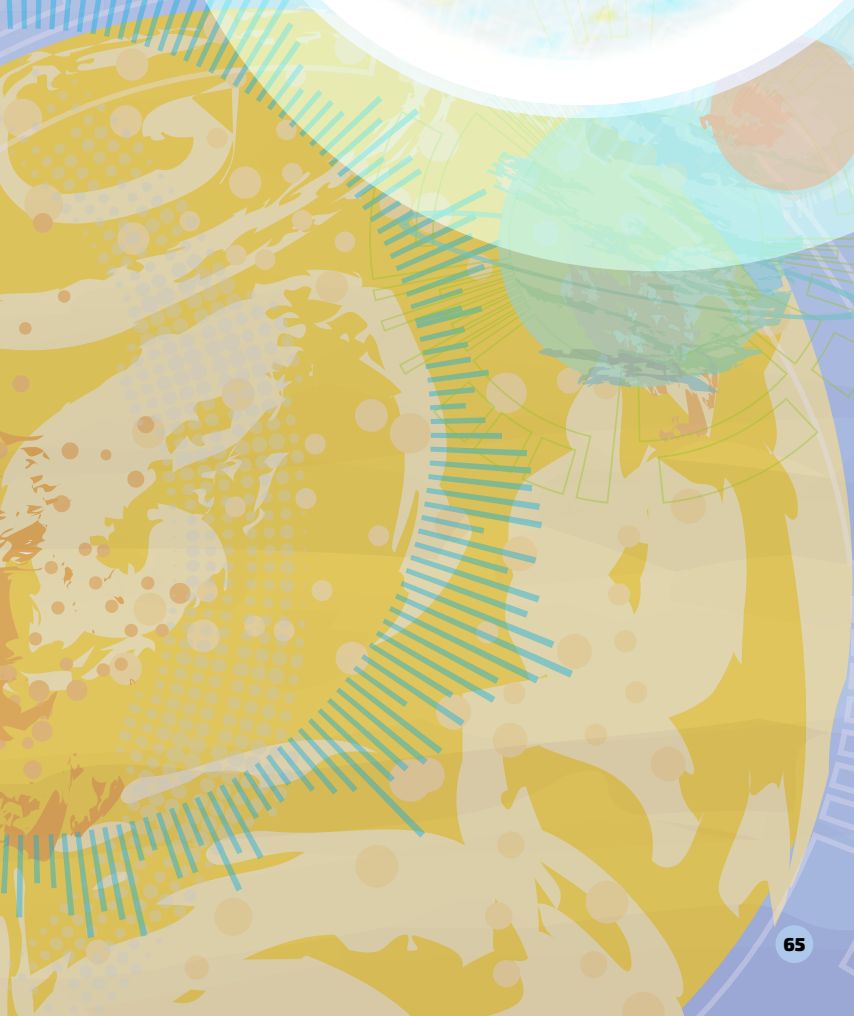
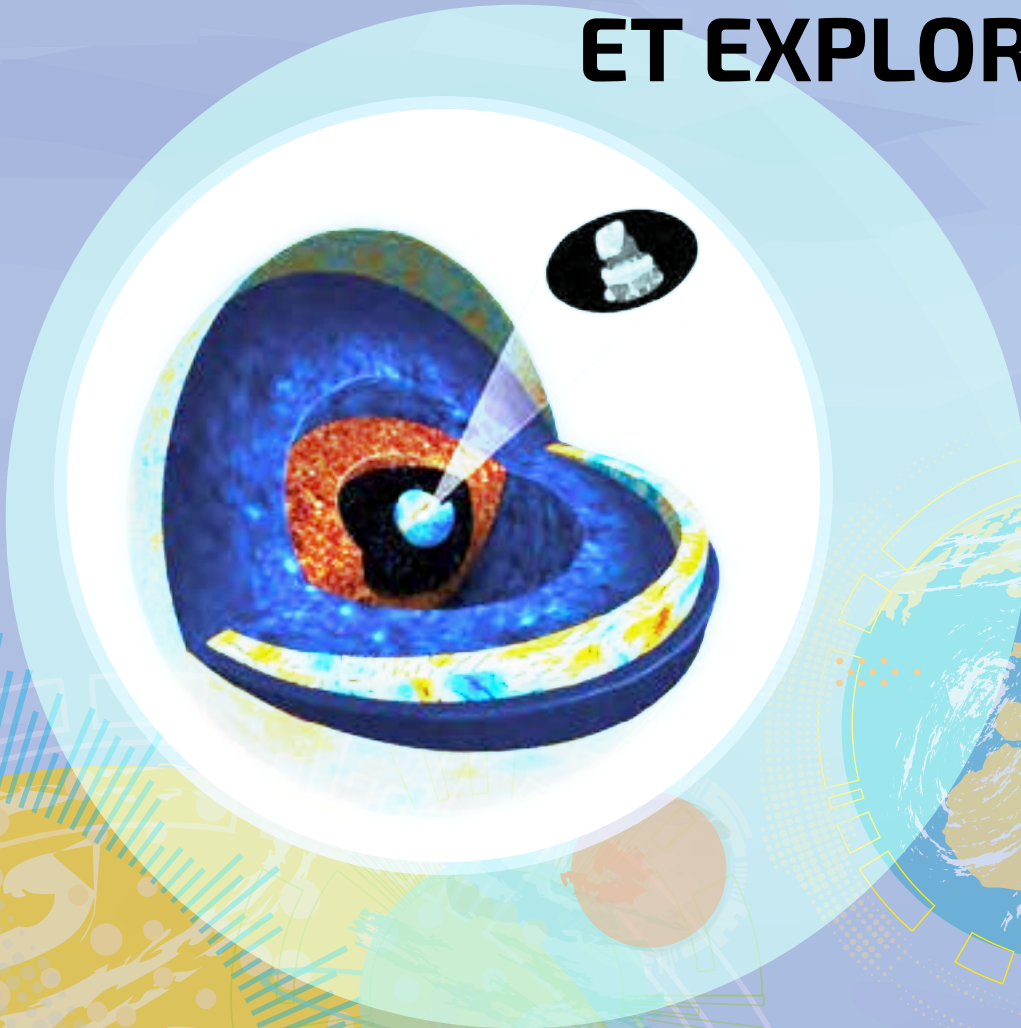
Type de mesure/d'observables	Cadre de réalisation	R&T associée	Thème scientifique
Nature, spéciation chimique, propriétés physiques et optiques des aérosols, rétroactions nuageuses	Mescal (NASA)	Lidar multi- λ à haute résolution spectrale	Aérosols/nuages
Contenu en CO ₂	COPERNICUS Sentinel-7 (CO ₂ M)		Puits et sources de carbone
Nuages (microphysique et dynamique)	C3IEL		Interaction nuage/climat, prévision des précipitations, événements extrêmes
	C2OMODO		
Renouvellement jet	A définir		Toutes thématiques
Rayonnement Infrarouge lointain	Forum (EE09)		Bilan radiatif, nuages froids, chimie stratosphérique
Humidité des sols	ULID ¹ (suite SMOS) ¹		Cycle de l'eau, échanges surface/atmosphère
Humidité des sols, contenu intégré en vapeur d'eau	GCLASS (EE10) ²		Cycle de l'eau
Champ 3D d'humidité		Lidar vapeur d'eau	Nuages, changement climatique

¹ L'humidité des sols contraint les échanges d'énergie entre la surface continentale et l'atmosphère. Elle présente un intérêt pour les études sur le cycle de l'eau, la convection, la prévisibilité de l'état de l'atmosphère à des échelles de temps de quelques semaines...

² Parmi les trois missions en lice dans le cadre EE10, G-CLASS présente un intérêt certain pour la météorologie (détection et quantification des flux d'humidités en Méditerranée avant qu'elles n'abordent les côtes européennes ; convection en Afrique). Cet intérêt devra être précisé une fois connue la précision de mesure et les capacités d'échantillonnage spatial et temporel.



SCIENCES DE L'UNIVERS, MICROPESANTEUR ET EXPLORATION



SYNTHÈSE DU CERES

Nabila Aghanim, Kader Amsif, Athena Coustenis (présidente entrante), Christophe Delaroche, Eric Falcon, Jean-Marie Hameury (président sortant), Philippe Laudet, François Leblanc, Aurélie Marchaudon, Jean-Louis Monin (responsable Sciences de l'Univers, Micropesanteur et Exploration), Franck Montmessin, Christian Mustin, Alain Omont, Isabelle Petitbon, Cécile Renault, Francis Rocard, Michel Viso, Peter Wolf.

Le spatial, central dans le domaine des sciences de l'univers, donne une forte visibilité à la communauté française et fournit des résultats de premier plan. Sur les 100 publications les plus citées du domaine, tous pays confondus, sur 2014-2019, 40 s'appuient de façon quasi-exclusive sur des données spatiales (dont 18 sur Planck), auxquelles il faut ajouter cinq publications où le spatial a joué un rôle déterminant.

Dans ce contexte, les chercheurs français sont très visibles sur le plan international ; ainsi, en planétologie, la France se situe à la deuxième place mondiale en nombre de publications et en citations, derrière les Etats-Unis.

Outre ses compétences scientifiques, ces succès s'appuient sur une forte implication de la communauté française dans la réalisation des charges utiles. En effet, si les missions sont sélectionnées par les agences spatiales, la réalisation de leur charge utile est, dans le domaine des sciences de l'univers, généralement confiée à des consortiums de laboratoires ; la maîtrise des performances reste sous le contrôle des scientifiques car la conception et les tests sont réalisés le plus souvent dans les laboratoires ou en collaboration étroite avec eux. Ainsi, les missions sélectionnées correspondent aux priorités scientifiques des pays capables d'assurer la maîtrise d'œuvre des instruments, sachant que la charge utile représente environ un tiers du coût total d'une mission.

Il faut enfin souligner que le périmètre du CERES s'est étendu depuis le SPS de La Rochelle en incluant les sciences de la matière et s'appuie désormais sur six groupes thématiques. Le fonctionnement général des groupes est apparu satisfaisant, les sujets aux interfaces n'apparaissant pas comme moins bien traités, au contraire.

1. PRIORITÉS SCIENTIFIQUES

1.1. LOIS DE LA PHYSIQUE GOUVERNANT L'UNIVERS

Une des questions majeures de la physique est de réconcilier mécanique quantique et relativité générale. Cela passe par le test du principe d'équivalence, fondement des théories métriques de la gravitation, alors que de nombreuses théories cherchant à unifier la gravitation avec les autres interactions prévoient une violation de ce principe, notamment à travers des nouveaux champs introduits dans ce type de théorie. Se pose également la question de savoir si la relativité générale décrit bien la gravitation, tant en régime de champ fort, au voisinage de trous noirs, qu'en régime de champ faible, tels qu'ils existent aux confins des galaxies.

Un résultat majeur des 20 dernières années est que l'univers est composé pour l'essentiel de matière et d'énergie noires, dont la nature nous est totalement inconnue, et qui pourraient bien être liées à ces nouveaux champs qui, par exemple, violent le principe d'équiva-

lence et la relativité générale. Les progrès passeront par la détection directe de la matière noire au sol et par la caractérisation des propriétés de ces deux composantes via l'observation de leurs effets sur la distribution des galaxies dans l'univers.

Enfin, l'univers primordial permet de sonder la physique à des énergies inaccessibles sur Terre. On veut comprendre la période d'inflation de l'univers pendant laquelle l'expansion s'est produite exponentiellement sur plusieurs dizaines d'ordres de grandeur, expliquant l'homogénéité de l'univers actuel. Pendant cette phase, des ondes gravitationnelles primordiales ont été générées et ont laissé une empreinte sur la polarisation du fond diffus cosmologique – les modes B – qu'on cherche à détecter. Dans un premier temps, cette détection se fera par imagerie conjointement au sol et dans l'espace ; à long terme, la mesure de distorsion du spectre du fond diffus deviendra prioritaire. Par ailleurs, l'univers primordial a laissé une empreinte gravitationnelle, le fond stochastique d'ondes gravitationnelles qui peut être sondé par des détecteurs spatiaux d'ondes gravitationnelles à basse fréquence.

1.2. ORIGINE ET ÉVOLUTION DE L'UNIVERS

Il s'agit de comprendre comment l'univers s'est formé et a ensuite évolué pour donner naissance aux galaxies, étoiles et planètes que nous observons aujourd'hui, et ce que sera son devenir à long terme.

Deux thèmes font l'objet d'une attention particulière :

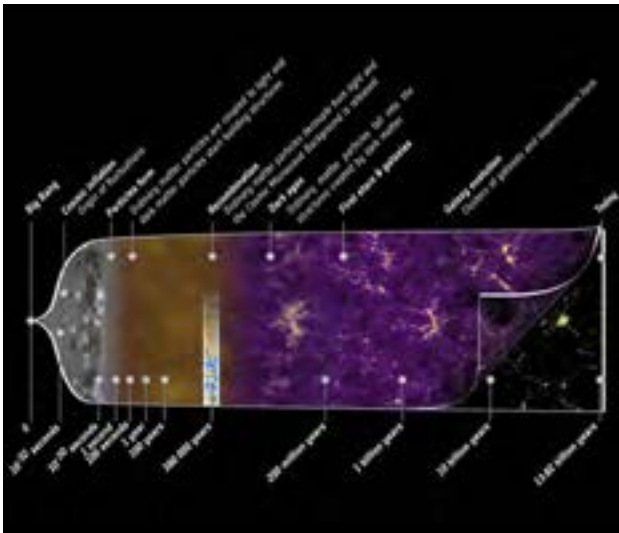


Fig. 1 : Description schématique de la formation et de l'évolution de l'univers par Planck.

© ESA - C. Carreau
.....

- La formation et l'évolution des galaxies, et notamment la coévolution des galaxies et du trou noir qu'elles hébergent pratiquement toutes en leur cœur,
- Le rôle du champ magnétique dans la structuration de l'univers, depuis l'échelle stellaire jusqu'à celle des grandes structures.

Ce dernier point est assez nouveau dans les préoccupations de la communauté scientifique. On savait certes depuis longtemps que les champs magnétiques jouent un rôle important, mais les observations récentes – **Herschel** par exemple pour la formation stellaire – ont montré que les modèles ne pouvaient plus se passer de cet ingrédient essentiel, même si cela aboutit à les complexifier sensiblement. L'observation polarimétrique qui trace les effets du champ magnétique devient alors un enjeu majeur.

1.3. FORMATION DES PLANÈTES ET ÉMERGENCE DE LA VIE

On cherche à savoir comment s'est formé et comment a évolué (avec en particulier la migration des planètes géantes ou le bombardement primitif) notre système solaire, ce qui le rapproche ou le différencie des autres

systèmes planétaires. L'observation d'un nombre croissant de systèmes exosolaires très diversifiés pose les bases d'une taxonomie planétaire universelle et donne un nouvel essor à la planétologie comparée : comprendre comment Vénus, Mars et la Terre, initialement très proches, ont évolué dans des directions si différentes et quel est le rôle des processus physiques et des conditions environnementales.

Une autre question concerne l'habitabilité, depuis le milieu interstellaire jusqu'aux planètes. Il s'agit de savoir comment la vie est apparue sur Terre, et si elle existe ou a existé ailleurs que sur Terre. Cela nécessite de comprendre les processus de formation des molécules prébiotiques dans le milieu interstellaire et les environnements planétaires, de déterminer où existent les conditions favorables à l'apparition puis au maintien éventuel de la vie, et d'identifier les biomarqueurs pertinents pour la détecter.



Fig. 2 : Le rover de la mission Mars 2020, emportant l'instrument Supercam qui aidera à la sélection d'échantillons.

© NASA/JPL-Caltech
.....

Les données récentes de nombreuses missions spatiales ont montré que la planète Mars a été habitable le fait qu'elle ne l'est plus nous interpelle pour mieux comprendre le passé et l'avenir de notre planète. La recherche de traces de vie passée revêt donc une importance considérable, et passe par l'analyse d'échantillons qu'il faudra rapporter sur Terre. De même, les découvertes récentes sur l'existence de conditions habitables sur les satellites glacés des planètes géantes ou de zones habitables inédites dans des systèmes exoplanétaires ouvrent de nouvelles perspectives sur les questions de l'émergence et du maintien de la vie. Enfin, les petits corps jouent un rôle important dans l'histoire de la Terre et l'apparition de la vie qu'il nous faut mieux comprendre.

1.4. FONCTIONNEMENT GLOBAL DU SYSTÈME SOLAIRE

La question est de comprendre les couplages et les interactions entre l'intérieur du Soleil, l'héliosphère, puis le vent solaire et les magnétosphères terrestres et planétaires, et ultimement les atmosphères. Cela implique d'étudier la structure interne du Soleil, l'origine de la couronne solaire, son chauffage et l'accélération du vent solaire ; cela implique aussi de comprendre les mécanismes de déclenchement et de propagation des phénomènes éruptifs solaires et de production des particules énergétiques solaires. Il faut encore considérer la propagation du vent solaire et les mécanismes de chauffage de celui-ci, et étudier l'interaction du vent solaire et des événements énergétiques solaires avec les magnétosphères intrinsèques ou induites des objets du système solaire, et en tout premier lieu avec la magnétosphère terrestre. Enfin, on s'intéresse à l'ionosphère, non seulement comme lieu ultime des perturbations issues de la magnétosphère et de son interaction avec le Soleil mais également comme région en relation étroite avec l'ensemble des couches atmosphériques. Cela nécessite de comprendre les effets du forçage solaire sur notre atmosphère mais également d'étudier tous les phénomènes se propageant de la basse atmosphère jusque dans l'ionosphère. Les progrès dans ce domaine requièrent l'exploration de zones peu connues telles l'héliosphère interne ou les zones aurorales, ainsi que l'exploration de régimes spatio-temporels nouveaux, par des mesures multipoints et multi-échelles. Il faut observer simultanément les échelles fluides, ioniques et électroniques pour comprendre le transfert de l'énergie dans les plasmas spatiaux.

Un enjeu important est de comprendre la variabilité solaire des courtes aux longues échelles de temps, et leurs impacts sur notre environnement spatial pour permettre à terme une météorologie de l'espace opérationnelle.

1.5. COMPRENDRE LES PROCESSUS ÉLÉMENTAIRES DE TRANSFORMATION DE LA MATIÈRE

La question centrale ici est de comprendre les propriétés de la matière qui, lorsqu'on veut les étudier en laboratoire sur Terre, sont masquées par les effets de la gravité (convection, sédimentation, pression hydrostatique, drainage, etc.).

Trois thèmes principaux sont concernés :

- Matière molle et fluides complexes : un des enjeux est de comprendre les comportements dynamiques des

milieux hétérogènes, en particulier des milieux multiphasiques (milieux granulaires, mousses, émulsions, brouillards...). On s'intéresse notamment à leurs processus d'évolution et de transport, ainsi qu'à leurs réponses à diverses sollicitations,

- Etats et transitions d'état de la matière : cette thématique est étudiée depuis plusieurs années ; l'accent est aujourd'hui mis sur l'étude de la combustion froide et hydrothermale dans l'eau supercritique,
- Instabilités, transferts et ondes dans les milieux comportant des interfaces liquide/solide, liquide/liquide ou liquide/gaz : il s'agit d'étudier, par exemple, la dynamique des flammes dans les aérosols combustibles ou les propriétés statistiques des grandes échelles en turbulence d'ondes de surface.

Ces sujets ont, outre leur intérêt pour leurs aspects fondamentaux, des applications importantes dans de nombreux domaines technologiques ou sociétaux, telles que la transformation des matériaux, la météorologie et la climatologie (échanges liquide/vapeur), la transition énergétique (combustion, valorisation des déchets), la santé (biophysique, biomimétisme)



Expérience Fluidics à bord de l'ISS.

© ESA/NASA/, 2017
.....

2. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2014

2.1. FAITS MARQUANTS

Il serait vain de tenter un bilan exhaustif des nombreuses avancées scientifiques depuis 2014. On les illustrera plutôt par deux faits marquants.

2.1.1. Gaia et l'archéologie galactique

Gaia est une mission d'astrométrie et de spectroscopie lancée fin 2013, qui a mesuré la position de 1,7 milliard d'étoiles, la distance et les mouvements sur la sphère céleste de 1,3 milliard d'étoiles, avec une précision meilleure que 10 % pour 70 millions d'étoiles et les vitesses radiales de 7 millions d'étoiles. C'est une avancée majeure, les distances des étoiles n'étant connues avec une précision raisonnable avant Gaia que dans le voisinage du Soleil. **Gaia** touche pratiquement tous les domaines de l'astrophysique, de la détection des planètes extrasolaires à la formation de la galaxie. L'archéologie galactique permet de retracer l'histoire de la galaxie via la cinématique des étoiles ; **Gaia** a ainsi montré que la galaxie a fusionné il y a 10 milliards d'années avec une galaxie de la taille du Grand Nuage de Magellan, qui représentait à l'époque le quart de la masse de la galaxie. Cela permet de mieux comprendre le rôle de l'accrétion de galaxies naines dans la formation des galaxies.

L'exploitation scientifique n'en n'est qu'à ses débuts, mais **Gaia** est d'ores et déjà la mission la plus productive de l'histoire de l'ESA en nombre de publications par an (plus de 800 articles parus dans des revues de rang A en 2018), comparable au nombre de publications issues du télescope spatial Hubble.

2.1.2. Rosetta et la Terre primitive

Lancée en 2004, la sonde **Rosetta** a rejoint la comète 67P/67P/Churyumov-Gerasimenko en 2014, et a envoyé l'atterrisseur **Philae** se poser pour analyser la composition de son sol et sa structure. L'impact médiatique de cet événement a été considérable. Même si l'atterrissage de **Philae** ne s'est pas déroulé comme prévu, **Rosetta** a fourni plus de 1000 publications (plus de 600 depuis 2014), dont plus de la moitié a un co-auteur français.

Parmi la moisson de résultats, on note la résolution de l'énigme du xénon terrestre, une des quatre percées recensées en 2016 par Science et où le premier au-

teur est français. L'atmosphère terrestre possède une signature isotopique spécifique, différente de celle des météorites et du Soleil ; **Rosetta** a montré que le xénon primitif apporté sur Terre durant la formation du système solaire serait issu d'un mélange de xénon provenant de comètes et d'astéroïdes. Ce résultat indique également que le xénon de la comète serait antérieur à la formation du système solaire. On retient aussi la découverte de matières organiques primitives : macromolécules complexes dans les grains cométaires, molécules comme la glycine, un acide aminé, dans la coma et à la surface du noyau. Ce dernier résultat renforce l'hypothèse selon laquelle la vie pourrait s'être formée sur Terre grâce à l'apport de molécules d'origine extra-terrestre.

2.2. BILAN PROGRAMMATIQUE

Côté ESA, les cinq dernières années ont vu l'adoption de la mission **Plato** (M3) de détection d'exoplanètes, la sélection d'**Ariel** (M4) qui caractérisera les atmosphères d'exoplanètes, d'**Athena** (L2), observatoire en rayons X, de **Lisa** (L3) pour l'observation des ondes gravitationnelles à basse fréquence, les présélections de **Spica** (observatoire infrarouge lointain), **Theseus** (détection des sursauts gamma) et **EnVision** (mission vers Venus) pour la mission M5, et la sélection de la première mission F (**Comet Interceptor**). Ces missions correspondent aux priorités affichées lors du séminaire de prospective de 2014, même si on regrette l'absence de mission européenne de détection des ondes gravitationnelles primordiales par leur signature sur la polarisation du fond cosmologique et d'une mission dédiée à l'exploration des plasmas spatiaux. Le programme **ExoMars** a été stabilisé ; l'échec de l'atterrisseur **Schiaparelli** de la mission **ExoMars 2016** est certes à déplorer, mais l'orbiteur **TGO** fonctionne nominalement et produit déjà des résultats intéressants.

Du côté du CNES, on se félicite :

- Du succès de l'instrument Seis de sismologie martienne embarqué sur la mission **InSight** de la NASA ; Seis a été reconstruit dans un calendrier très tendu, lancé en 2018 (et a enregistré son premier séisme martien en avril 2019) ;
- Du passage en phase C/D des instruments de **Juice** (mission vers Jupiter), de Supercam à bord de la mission NASA **Mars 2020** et de **Svom**, mission franco-chinoise d'observation de sursauts gamma,
- Du passage en phase A/B du spectromètre à intégrale de champ X-ifu d'**Athena**, instrument sous responsabilité française,
- Du passage en phase A des instruments embarqués à bord des missions **Lisa**, **Ariel**, **MMX** (mission japonaise vers les satellites Phobos et Deimos) et des

trois missions présélectionnées dans le cadre M5 de l'ESA. Le financement par l'ESA d'une partie significative des trois phases A de M5 a été déterminant,

- De la décision de participer au volet météorologie de l'espace du programme optionnel SSA (Space Situational Awareness) de l'ESA et de la création d'OFAME (Organisation Française de Recherche Appliquative en Météorologie de l'espace) dont l'objectif est d'organiser la communauté scientifique dans le but de répondre de manière visible, efficace et structurée aux sollicitations dont elle est l'objet.

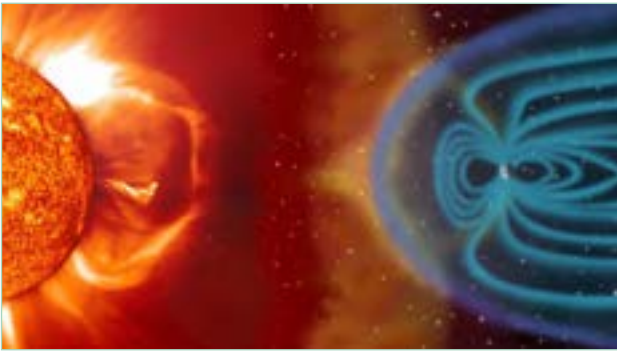


Fig. 3 : Illustration de l'interaction du vent solaire avec la magnétosphère terrestre.

© SOHO/LASCO/EIT NASA, ESA
.....

On regrettera que les contraintes budgétaires ne permettent d'espérer qu'une participation limitée à la prochaine mission F de l'ESA.

Il faut noter qu'il n'y a qu'une mission prévue dans le domaine SHM au-delà de l'horizon 2020. La communauté SHM sera certes alimentée par les données de nombreuses missions, mais le maintien des compétences instrumentales dans ce domaine est une préoccupation ; un effort soutenu de R&D sera un élément de la solution, au moins à court terme, mais il ne suffira sans doute pas.

Les cinq ans passés ont enfin vu le lancement de plusieurs missions dans lesquelles la France avait une contribution instrumentale : **Hayabusa2** (2014, mission japonaise de retour d'échantillons vers l'astéroïde Ryugu), **Lisa Pathfinder** (2015, mission ESA préparatoire à **Lisa**), **Microscope** (mission française lancée en 2016, test du principe d'équivalence), **ExoMars** (2016), **InSight** (2018), **BepiColombo** (2018, mission ESA vers Mercure) et **Parker Solar Probe** (2018, mission NASA s'approchant à 0,3 unité astronomique du Soleil).

Depuis 2014, on note la fin des missions **Cassini** (mission NASA/ESA vers Saturne et Titan), **Corot** (sismologie stellaire et exoplanètes), **Herschel** (observatoire infrarouge lointain), **Picard** (observation du Soleil), **Planck**, **Rosetta** et **T2L2** (comparaison d'horloges par liens lasers).

Malgré quelques préoccupations mentionnées plus haut, **ce bilan programmatique est extrêmement positif.**

3. STRATÉGIE PROGRAMMATIQUE

3.1. PROGRAMMES DE L'ESA

Les programmes de l'ESA, et en premier lieu le programme obligatoire, restent l'ossature de la programmation pour le CERES, en raison de l'investissement national dans ces programmes et du fonctionnement du programme obligatoire basé sur des consensus scientifiques. Pour les raisons mentionnées en introduction, les choix de l'ESA sont en phase avec les priorités scientifiques de la communauté nationale et lui procurent l'opportunité de participer à une grande variété de missions.

Le CERES soutient l'accroissement du niveau de ressources du programme obligatoire qui a baissé de 20 % depuis 1995 alors que l'ESA a accueilli plusieurs nouveaux pays membres (le PIB des états membres a presque doublé sur cette période). Cette augmentation est indispensable pour la réalisation d'une mission M* vers les géantes glacées Uranus et/ou Neptune conjointe avec la NASA. Elle permettra aussi à l'ESA de s'impliquer davantage dans la réalisation des charges utiles, y compris financièrement, tant durant les phases A/B que les phases de réalisation. L'expérience récente a montré combien ce soutien pouvait être précieux, avec par exemple le financement d'une part significative des phases A pour M5. Cette croissance du niveau de ressources implique une croissance parallèle, mais moindre, du financement des charges utiles par le CNES.

Les missions L et M structurent le programme obligatoire et bénéficient donc d'une priorité importante, modulée par les intérêts spécifiques de la communauté française. Les missions de moindre envergure, S dans le passé et F aujourd'hui, sont à considérer au cas par cas, au même niveau que les missions d'opportunité.

Le CERES soutient également la souscription au programme optionnel Mars Sample Return (MSR) du Directorate Human Spaceflight and Robotic Exploration (HRE), le retour d'échantillons de la planète Mars étant une priorité forte réaffirmée ici.

Il souhaite enfin que la France puisse renforcer sa participation au programme SSA.

3.2. MISSIONS D'OPPORTUNITÉ DU CNES

Ces missions jouent un rôle essentiel. Au-delà de considérations politiques qui peuvent être déterminantes dans les décisions de collaborer avec tel ou tel pays, elles complètent le dispositif et assurent la réactivité aux évolutions scientifiques. Les opportunités stratégiques, apparues lors du séminaire de Biarritz en 2009, sont des missions pour lesquelles la contribution française à la charge utile peut être du même ordre de grandeur que celle aux missions de l'ESA. L'expérience a montré combien elles étaient précieuses et avaient un retour scientifique important pour un investissement limité ; elles assurent une forte visibilité de la contribution française.

A côté de ces contributions majeures qui ont pu aller jusqu'à fournir l'instrument principal d'une mission NASA (Seis), les petites contributions d'opportunité permettent de valoriser les compétences techniques (si fourniture instrumentale) et scientifiques de la France. Le retour scientifique de ces « petites » contributions d'opportunité est extrêmement élevé, et valorise l'implication importante de la France dans d'autres missions, qui conditionne le désir de pays étrangers à faire appel à une collaboration avec le CNES.

La question de l'équilibre entre les programmes de l'ESA et les missions d'opportunité est délicate. Le premier est, pour l'essentiel, engagé jusqu'en 2035 et se prépare actuellement jusqu'à l'horizon 2050, alors que l'échelle de temps des missions d'opportunité est plus courte, ce qui biaise la vision du poids des opportunités sur le long terme. D'un autre côté, le ratio actuel programme ESA/opportunités est fortement affecté par le poids de **Svom**. Cela rend inopérant l'affichage d'un ratio prévisionnel programme ESA/opportunités ; il faut par contre avoir la possibilité, comme aujourd'hui, de réaliser plusieurs missions d'opportunité stratégiques en parallèle.

Il est aussi apparu qu'en raison du développement rapide du programme spatial de pays tels que la Chine, les sollicitations se multiplient, et elles doivent être gérées avec rigueur. Le CERES souhaite que les décisions politiques correspondent autant que possible aux priorités scientifiques. Cela suppose qu'avant des engagements significatifs, les groupes, ou à tout le moins leur président, soient consultés.

Enfin, la science ne justifie pas les vols habités en projet vers la Lune et Mars qui peuvent cependant offrir des possibilités d'emport d'instruments scientifiques ; elles devront être évaluées et comparées aux autres opportunités.

3.3. NANOSATELLITES

Les réponses à l'appel à contribution du SPS ont montré l'intérêt de la communauté scientifique pour les nanosatellites. Ils sont particulièrement bien adaptés au domaine SHM et à certaines investigations du système solaire, car ils offrent des perspectives très intéressantes de constellations et de mesures in situ, et les capteurs dans ce domaine sont souvent de petite taille, même si celle-ci devrait être encore réduite. Ils offrent des possibilités inaccessibles aux systèmes traditionnels, pour des raisons de coût. Restent cependant à lever plusieurs obstacles, dont la propreté électromagnétique ou la communication entre nanosatellites ; une fois ces verrous levés, une mise en priorité des projets, prématurée aujourd'hui, sera possible. En planétologie, les nanosatellites peuvent compléter une mission de plus grande envergure, et être par exemple utilisés comme éléments sacrificiels d'une mission pour des mesures dont le risque ne pourrait être pris par le vaisseau mère. Dans les autres domaines, ils peuvent être une option intéressante sur des cas scientifiques précis, comme l'a montré l'expérience de **PicSat**, qui devait observer les transits de la planète Beta Pictoris b, même si cette mission s'est achevée prématurément.

3.4. EXPLOITATIONS

Le soutien à l'exploitation d'une mission conditionne son retour scientifique et est crucial, mais il faut veiller à d'éventuelles dérives afin d'éviter que le financement des exploitations prenne une part excessive et empêche le développement de nouveaux projets. Cependant, les missions lancées d'ici trois ans (**Cheops, ExoMars 2020, Mars 2020, Taranis, Solar Orbiter, Svom, JWST, Juice, Euclid**) vont fournir sur la période 2020-2025 une moisson de données qu'il faudra exploiter. La recherche de financements externes pourra contribuer à la solution, mais ne suffira pas ; la ligne exploitation devra croître pendant quelques années, et ceci doit être bien anticipé.

Les organismes et les universités ont une responsabilité particulière dans ce domaine ; il est regrettable que la réduction des effectifs, en particulier ITA, constatée dans les laboratoires aboutisse à ce que des tâches qui devraient normalement être assurées par des personnels permanents le soient par des CDD CNES. Il est peu probable que la situation évolue rapidement ; la recherche de financements extérieurs est un impératif. L'ERC peut amener des financements substantiels, mais trop concentrés sur un petit nombre d'équipes. Le CNES et le CNRS auraient tout intérêt à agir conjointement auprès de la commission européenne pour faire croître le budget européen dédié à l'accompagnement scientifique, aujourd'hui très insuffisant dans H2020.

Enfin, la croissance du volume des données et surtout de leur complexité, de la précision des mesures, la nécessité de traiter simultanément des données sol et spatiales, l'émergence de la variable temporelle, la nécessité de développer des simulations « end-to-end », imposent un changement de positionnement du CNES dans le traitement des données qui est détaillé dans le chapitre « numérique et données ».

3.5. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT

La R&D prépare l'avenir à long terme en permettant que l'instrumentation reste à la pointe des possibilités techniques. Avec les exigences croissantes des agences spatiales en matière de TRL requis lors de la sélection des missions, la R&D joue un rôle croissant qui peut, dans un nombre limité de cas, aller jusqu'au besoin de réaliser un démonstrateur.

3.6. BALLONS

L'emport d'instrument sur des ballons stratosphériques peut répondre à des objectifs ponctuels bien identifiés ; l'intérêt, au moins en ce qui concerne les charges utiles lourdes, restera cependant limité tant que la durée des vols ne dépassera pas quelques jours. Dans ce contexte, l'action actuelle du CNES pour étendre la durée de ses vols est suivie avec intérêt.

3.7. LIENS AVEC L'UNION EUROPÉENNE

Suite à l'accord de coopération avec l'ESA, les laboratoires français devraient tirer parti des opportunités offertes par les appels Horizon Europe en soutien à l'exploitation des données (cf. supra) et pour le développement d'instruments, notamment sur les aspects sol/espace. L'ERC est également une ressource à ne pas négliger.

4. PRIORITÉS ET RECOMMANDATIONS

Les priorités vont pratiquement jusqu'à l'horizon du programme Cosmic Vision (2035). Elles incluent les priorités sur les missions décidées à l'ESA mais pas

encore engagées en phase C/D au CNES. Certaines sont mutuellement exclusives (M5 ESA) ; d'autres sont liées à des décisions à prendre lors de la ministérielle de 2019 (MSR, M*).

4.1. CONSOLIDER LA PARTICIPATION FRANÇAISE AUX MISSIONS DÉCIDÉES

4.1.1. Athena (Advanced Telescope for High ENergy Astrophysics)

Deuxième mission « large » de l'ESA qui sera lancée en 2031, **Athena** observera l'univers chaud et énergétique, avec de multiples objectifs ; les plus importants concernent la formation des premières structures que sont les amas distants de galaxies, la coévolution des galaxies et du trou noir supermassif hébergé en leur cœur, la confirmation de l'existence de filaments chauds entre galaxies qui pourraient constituer 30 % de la matière baryonique et l'histoire de la genèse des éléments. **Athena** permettra également d'étudier l'environnement des objets compacts et des trous noirs.

La France est responsable du spectromètre à intégrale de champ X-lfu, et il faut conforter cette position.

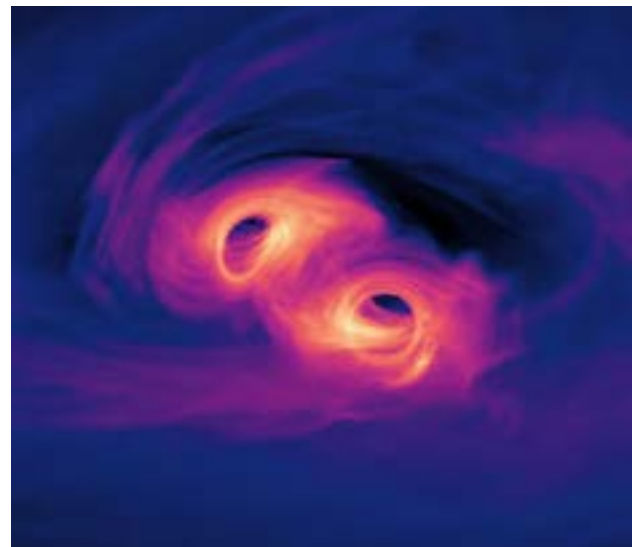


Fig. 4 : Simulation numérique de la coalescence de deux trous noirs supermassifs entourés de gaz.

© NASA's Goddard Space Flight Center
.....

4.1.2. Lisa (Laser Interferometer Space Antenna)

Mission L3 de l'ESA qui sera lancée en 2034, **Lisa** ouvrira une nouvelle fenêtre sur l'univers en détectant les

ondes gravitationnelles à basse fréquence émises par la coalescence de trous noirs supermassifs ou par les phases de contraction de binaires stellaires précédant de quelques mois ou quelques années leur coalescence observable par les détecteurs au sol. **Lisa** devrait aussi détecter le fond stochastique d'ondes gravitationnelles. Cette mission comporte un volet astrophysique (formation des trous noirs) et un volet de physique fondamentale (lois fondamentales opérant dans des champs forts).

L'implication française, forte, porte sur le centre de traitement de données et les AIV, tous deux déterminants pour le retour scientifique.

4.1.3. Ariel (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey)

Mission M4 de l'ESA qui sera lancée en 2028, **Ariel** permettra l'étude détaillée d'un millier d'exoplanètes en caractérisant les atmosphères de planètes chaudes autour d'étoiles brillantes par spectroscopie infrarouge entre 2 et 8 μm lors de transits. **Ariel** mesurera la composition et la structure des atmosphères planétaires, contraindra la nature des cœurs planétaires, détectera la présence de nuages et étudiera les interactions avec l'étoile hôte.

La France est responsable de la conception et de la fourniture du spectromètre infrarouge, instrument principal de la mission.

4.1.4. MMX (Martian Moons eXploration)

Mission JAXA qui sera lancée en 2024, **MMX** a pour objectif principal de déterminer l'origine des satellites Phobos et Deimos en rapportant sur Terre un échantillon du sol de Phobos. C'est une première étape d'enjeu majeur dans la perspective d'un retour d'échantillons martiens, les modèles prédisant que Phobos est recouvert d'une fine couche de poussière arrachée de la surface martienne.

La France fournirait le spectroimageur infrarouge qui jouera un rôle clé dans la sélection des échantillons. Elle se propose également de fournir un rover dont l'intérêt est principalement technologique.

4.1.5. Accès aux moyens de microgravité

Les sciences de la matière et les sciences de la vie ont besoin d'accéder à des moyens de microgravité (avion Og, fusées sondes, station spatiale internationale). Leur maintien est une nécessité.

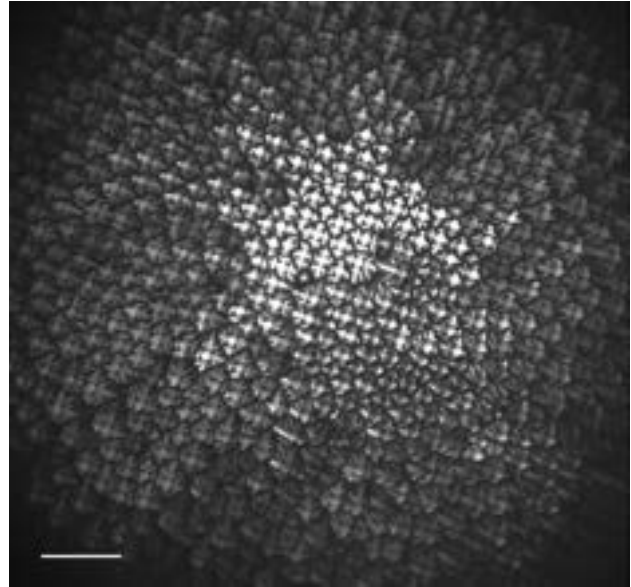


Fig. 5 : Exemple de réseau dendritique observé par l'expérience Declic lors de la solidification dirigée d'alliage.

© Springer Science.
.....

4.2. PRIORITÉS SUR LES MISSIONS ESA À VENIR

4.2.1. Mission M5

Trois missions sont en compétition pour la future mission M5 de l'ESA qui sera lancée en 2032 :

Spica (SPace Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics) permettrait d'étudier la formation des premières étoiles et des premières galaxies, et en particulier le rôle du champ magnétique dans la structuration de la matière de l'échelle stellaire aux grandes échelles. **Spica** bénéficie d'une forte priorité liée à la combinaison de la spectroscopie haute résolution et de la polarimétrie qui donne accès au champ magnétique, justifiant un investissement important de la France qui assurerait la fourniture du spectropolarimètre BPOL.

EnVision déterminerait la nature et l'état actuel de l'activité géologique sur Vénus et sa relation avec l'atmosphère, afin de mieux comprendre pourquoi la Terre et Vénus ont suivi des voies évolutives si différentes. Elle cartographierait une partie de la surface à partir d'images radar d'une résolution cent fois meilleure que celle de la mission Magellan des années 1990. Sa technique d'interférométrie permettrait de restituer les déplacements centimétriques de la croûte, révélant ainsi la tectonique de la planète. La contribution française envisagée porte sur la responsabilité d'un spectroimageur ultraviolet et une participation à un instrument infrarouge.

Theseus (Transient High-Energy Sky and Early Universe Surveyor) observerait à très haute énergie des événements transitoires à travers le ciel sur toute l'histoire cosmique et effectuerait un recensement complet des sursauts gamma survenus pendant le premier milliard d'années d'existence de l'univers afin de faire la lumière sur le cycle de vie des premières étoiles. La France souhaite prendre la responsabilité du spectromètre infrarouge qui observerait les contreparties des sursauts gamma.

4.2.2. Géantes glacées

Il s'agit de la mission **M***, conditionnée par l'augmentation du niveau de ressources du programme obligatoire de l'ESA en discussion dans le cadre de la ministérielle 2019. Cette mission effectuerait la première exploration in situ d'Uranus et/ou Neptune, conjointe avec la NASA, en tirant parti d'un alignement planétaire unique en 2028-2032. Ces deux planètes, intermédiaires entre les planètes telluriques et les planètes géantes ont un intérêt particulier en ce qu'elles constituent une classe planétaire représentative d'une fraction notable d'exoplanètes restée inexplorée à ce jour et que leur intérieur est constitué d'un fluide supercritique.

4.2.3. Retour d'échantillons martiens

La recherche de traces de vie passée ou présente est un des enjeux majeurs dans le domaine des sciences de l'univers. Le programme MSR consiste en un ensemble de missions dont la première est la mission **Mars 2020** de la NASA et à laquelle la France participe en fournissant l'instrument Supercam pour analyser à distance la composition chimique et minéralogique des roches. Cette mission prélèvera des échantillons qui seront ensuite récupérés par deux missions (l'une incluant un rover récupérateur associé au Mars Ascent Vehicle qui acheminera les échantillons en orbite pour être récupéré par le vaisseau de retour sur Terre, amené par la seconde mission), lancées en 2026 pour un retour d'échantillons prévu en 2031 ; la contribution européenne comprendra notamment, outre Supercam qui sera utilisé pour la sélection d'échantillons, le fetch rover qui ira rechercher les échantillons et le vaisseau de convoyage vers la Terre.

Un enjeu stratégique est de disposer en Europe, voire en France, d'une installation de quarantaine de type P4 donnant accès à l'analyse d'échantillons pour la détection de traces de vie et l'évaluation des risques biologiques. Ceci est essentiel afin de disposer d'une analyse indépendante tant pour les résultats décisifs que pour toute décision politique de sortie de quarantaine. A noter que la communauté scientifique concernée dépasse largement le périmètre du CERES et de l'INSU.

4.2.4. Mission F1

La mission F1, **Comet Interceptor**, réalisera la première rencontre avec une comète primitive – par opposition aux comètes périodiques qui ont été altérées par plusieurs approches du Soleil. La contribution française à la charge utile est focalisée sur l'interaction entre la comète et le vent solaire, et pourrait être financée en partie par l'ESA ; cette mission rentre dans la classe des petites contributions d'opportunité.

4.3. MISSIONS D'OPPORTUNITÉ STRATÉGIQUES DANS UN CADRE PROGRAMMATIQUE DÉFINI

4.3.1. Litebird (Lite (Light) satellite for the studies of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection)

Litebird est une mission qui vient d'être décidée par la JAXA pour un lancement vers 2028 dont l'objectif est la détection des ondes gravitationnelles primordiales par l'empreinte qu'elles ont laissée sur le fond diffus cosmologique. Suivant les recommandations du CPS, la France se propose de prendre la responsabilité du télescope à haute fréquence, avec une contribution financière importante de l'ESA. La participation à **Litebird**, fortement recommandée par la feuille de route CMB, permettra à la France d'avoir une position privilégiée pour négocier un accès aux données d'observations au sol (projet américain S4), les données spatiales étant indispensables pour contraindre les avant-plans qui se superposent au fond cosmologique.

4.3.2. Solar-C

La mission **Solar-C** est la prochaine grande mission de physique solaire de l'agence spatiale japonaise, dont le lancement est prévu en 2025 et qui se propose de mieux comprendre les mécanismes de transfert d'énergie entre la photosphère et la couronne, et ses conséquences pour la structure et la dynamique de l'atmosphère solaire en sondant les structures solaires à toutes les échelles spatiales et temporelles, notamment aux petites échelles. La contribution française porte sur la fourniture d'éléments optiques du spectroimageur ultraviolet, un des instruments clé de la mission.

4.4. MISSION HORS CADRE PROGRAMMATIQUE DÉFINI

4.4.1. Observations simultanées des échelles fluides, ioniques et électroniques

L'objectif est de résoudre la dissipation aux plus petites échelles turbulentes dans le vent solaire proche, l'accélération des particules dans la magnétosphère terrestre, la reconnexion magnétique et la physique du choc magnétosphérique. Pour atteindre ces objectifs, une mission multipoints et multi-échelles de type **Cross-Scale**, ou une mission bi-satellites dont la position et la séparation sont contrôlées et variables sont deux options possibles, toutes deux proposées à l'ESA dans le passé. Cette future mission pourrait s'inscrire dans un contexte ESA (mission de type M, voire F), ou bien faire l'objet d'une contribution d'opportunité dans un cadre à déterminer.

4.4.2. Universalité de la chute libre

Après le grand succès de **Microscope** qui a amélioré par plus d'un ordre de grandeur la mesure du principe d'équivalence, l'étape suivante est d'améliorer sa précision d'au moins deux ordres de grandeur, à un niveau de 10^{-17} ou mieux. Ce test peut s'effectuer soit sur des atomes froids afin de tester le principe d'équivalence sur des objets quantiques, soit sur des objets macroscopiques. Dans le premier cas, il s'agirait d'une mission similaire à **STE-Quest**, candidate à l'appel M4, qui pourrait être soumise dans le cadre d'un prochain appel M de l'ESA ; dans le second, il s'agirait d'une version évoluée de la technologie **Microscope** dans un cadre programmatique à déterminer.

4.5. PRÉPARATION DE L'AVENIR

4.5.1. Recherche et Développement

Au-delà des activités habituelles de R&D, notamment sur les détecteurs et le développement de nouvelles générations d'instruments s'inscrivant dans le cadre de filières instrumentales établies, qu'il faut bien entendu maintenir, le CERES a identifié quelques axes novateurs qu'il conviendrait d'explorer :

- Développement d'une instrumentation adaptée aux nouveaux moyens disponibles (drones, nanosatellites) dans les domaines SHM et planétologie ; les actions à mener concernent notamment les aspects systèmes des essaims, la miniaturisation et la propriété électromagnétique,

- Etude d'un spectromètre à transformée de Fourier refroidi recommandé par la feuille de route CMB,
- Développement d'instruments analytiques compatibles avec la quarantaine pouvant être introduits dans un laboratoire P4.

4.5.2. Démonstrateurs

Les priorités dans le domaine SHM, mettent en évidence le besoin crucial d'anticiper une contribution française de type nanosatellite aux missions SHM et à des applications en météorologie de l'espace. Les nouveaux concepts de mission dans ce domaine intègrent en effet désormais systématiquement la fourniture d'un ensemble de nanosatellites, mais souvent avec des calendriers courts impliquant des niveaux de maturité très élevés. Il faut donc démarrer rapidement le développement d'un démonstrateur de mesures plasma in situ et de mesure des champs électriques et magnétiques à partir d'une petite plateforme. Acquérir la capacité nationale d'une telle fourniture est stratégique.

Pour cela, il faut étudier, développer et éventuellement réaliser un prototype de nanosatellite dédié à la mesure in situ. Cela implique notamment de résoudre un certain nombre de verrous technologiques (mât, EMC, spin...) au niveau plateforme mais également au niveau instrumentation (miniaturisation).

5. CONCLUSION

Lors du précédent SPS, le CERES s'était félicité du bilan 2009-2013 et espérait que le bilan 2014-2019 serait aussi bon. Le CERES est heureux de constater que cela a été le cas, même si les problèmes budgétaires du CNES ont généré quelques remous et malgré les préoccupations notées plus haut. Nous espérons que l'avenir de la recherche spatiale en France sera tout aussi brillant dans les années à venir.

GROUPE DE TRAVAIL THÉMATIQUE PHYSIQUE FONDAMENTALE

Anne Amy-Klein, Alain Blanchard, Luc Blanchet, Philippe Bouyer, Chiara Caprini, Bruno Christophe, Jacques Dumarchez, Agnès Fienga, Ericourgoulhon, Antoine Heidmann, Arnaud Landragin, Christophe Leponcin-Lafitte, Isabelle Petitbon (thématicienne), Peter Wolf (président).

1. GRANDES QUESTIONS SCIENTIFIQUES

Les motivations et les grandes questions dans le domaine de la physique fondamentale dans l'espace ont été définies lors des séminaires de prospective précédents. Il s'agit de rechercher de nouveaux moyens d'accès à une physique nouvelle qui interviendrait :

- À la frontière entre la mécanique quantique et la relativité générale (RG), résultant d'une unification non comprise actuellement entre la gravitation et les autres interactions fondamentales qui sont décrites par la théorie quantique des champs,
- Et/ou dans la description des constituants fondamentaux de l'univers à grande échelle (énergie noire et matière noire), mesurés par les succès du modèle cosmologique Λ -CDM, mais dont la nature est jusqu'à présent inconnue.

Ces questions sont au centre des préoccupations de la communauté physique fondamentale, et elles sont étroitement imbriquées aux grandes questions que se posent les communautés voisines qui interviennent dans les sciences de l'univers, car la gravitation joue un rôle primordial dans la compréhension de la quasi-totalité des observations à toutes les échelles, de la Terre jusqu'à la cosmologie. A titre d'exemple, les mesures ultra-précises des trajectoires des satellites (et du temps des horloges atomiques à bord) en orbite terrestre et dans le système solaire permettent les meilleurs tests des théories de la gravitation en champ faible et aux échelles du système solaire (**Microscope**, **Galileo**, laser lune, éphémérides planétaires, **Gaia**). A l'autre extrême, les observations du fond cosmologique de rayonnement diffus (**Planck**, **Euclid**) permettent d'étudier l'impact des théories alternatives de la gravitation dans l'univers primordial à des échelles d'énergie qui ne sont pas accessibles autrement.

D'une manière générale, en absence de mise en évidence d'une violation de la physique actuelle, le but de la recherche en physique fondamentale est d'une part une amélioration de l'exactitude des tests, et d'autre part une diversification vers des nouveaux domaines ou messagers. Deux exemples récents en sont le test du principe d'équivalence par le satellite **Microscope** et la récente détection directe des ondes gravitationnelles (OG) par LIGO et VIRGO. Les quelques événements observés en OG ont déjà donné lieu à une moisson de résultats en physique fondamentale, et la campagne d'observation en cours promet de les démultiplier. Dans le futur, les études seront étendues vers des objets de plus en plus massifs (trous noirs super massifs) et autres objets compacts grâce à la mission **Lisa**, ainsi que l'observatoire **Athena** en X. Au voisinage de la terre, on cherche à améliorer l'exactitude des tests du principe d'équivalence mais aussi à aller vers des nouveaux objets quantiques (**STE-Quest**) ou de l'anti-matière (ex. : GBAR et AEGIS au CERN).

D'un point de vue théorique, toutes les tentatives d'unification (super-cordes, etc.) de la relativité générale avec les autres interactions décrites par des théories quantiques renormalisables ont conduit à des champs nouveaux se superposant au champ de spin 2 de la relativité générale. L'énergie et matière noire peuvent d'ailleurs être constituées de tels champs. Comme a priori ces champs n'ont aucune raison d'être couplés d'une manière universelle aux champs connus et qu'ils peuvent être massifs, on attend comme conséquences observables :

- Une violation de principe d'équivalence et donc de toutes les théories métriques de la gravitation.
- Une violation des lois de la relativité générale.

En physique fondamentale nous cherchons à utiliser tout type d'expérience et observation qui mettrait en évidence de tels champs et éclairerait le chemin vers une physique nouvelle : expérience de précision dans des domaines variés, observations à toute échelle, nouveaux messagers, etc.

2. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2014

Le domaine de la physique fondamentale a connu un véritable âge d'or en Europe dans la période 2014-2019, grâce à des missions phares comme **Microscope** ou **Lisa Pathfinder**, à des opportunités inattendues (satellites **Galileo** excentriques), ou des résultats au sol comme la détection directe d'ondes gravitationnelles. On se réjouit aussi de la sélection de **Lisa** en L3, qui sera une des missions phares des prochaines décennies et la communauté contribuera de manière tout à fait significative à cette nouvelle fenêtre de la physique que constitue l'univers gravitationnel.

Cependant certaines priorités affichées en 2014 n'ont pas pu être satisfaites, en particulier la mission pour un test du principe d'équivalence au niveau quantique (**STE-Quest**) ou l'embarquement d'un accéléromètre de précision sur une mission planétaire ex. : **Juice**. De plus nous déplorons le retard d'**Aces/Pharao**, retard dû uniquement à l'ESA, le CNES ayant livré l'horloge **Pharao**, en juillet 2014.

Globalement le bilan est extrêmement positif et installe fermement la France et l'Europe comme leader mondial en physique fondamentale dans l'espace. Quelques faits marquants illustrent ce propos.

2.1. TEST DU PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE

Le principe d'équivalence d'Einstein est le fondement de la relativité générale et plus généralement de toutes les théories métriques de la gravitation. Cela nécessite de le tester avec la meilleure incertitude possible et dans des domaines aussi différents que possibles par exemple en testant indépendamment ces différents facettes (universalité de la chute libre, *redshift* gravitationnel, invariance de Lorentz) et en utilisant des « objets » aussi diverses que possibles (masses classiques, superpositions quantiques, antimatière, horloges de différents types, etc.).

2.1.1. Universalité de la chute libre : **Microscope**

Les premiers résultats de l'expérience **Microscope** ont été publiés dans *Physical Review Letters* en décembre 2017. Alors qu'ils ne portent que sur 120 orbites, ces résultats confirment le principe d'équivalence avec une incertitude de 2.10^{-14} améliorée d'un facteur 10

par rapport aux meilleures mesures au sol ou avec le laser-lune. Ces résultats sont utilisés dans de nombreuses autres publications (> 60 citations en un an). Comme exemple, la Fig. 1 montre les contraintes dans une théorie qui postule un champ scalaire massif additionnel (qui pourrait être la matière noire) couplé d'une manière non-universelle aux interactions connues. En fonction du type de couplage, **Microscope** permet d'améliorer les contraintes précédentes de 1 à 8 ordres de grandeur.

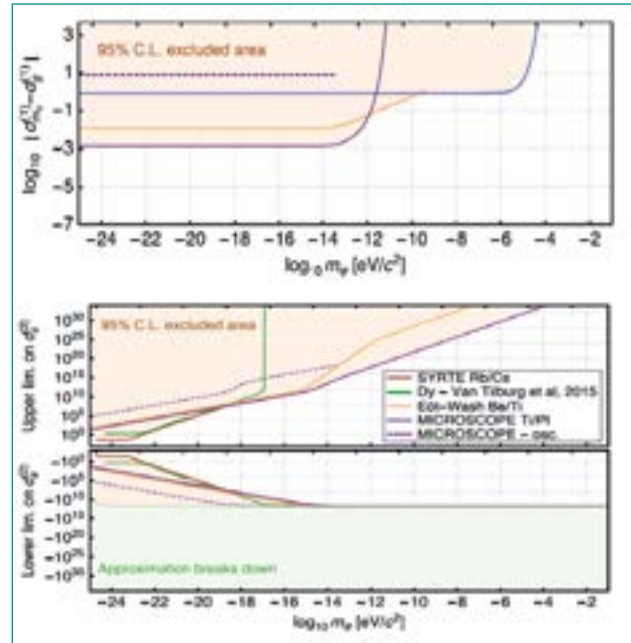


Fig. 1 : Contraintes sur le couplage d'un champ scalaire massif à l'électron et gluon (haut) ou au photon (bas) pour un couplage linéaire (haut) ou quadratique (bas), en fonction de la masse du champ scalaire. En absence d'une violation du principe d'équivalence de $d = 0$. On voit que **Microscope** améliore les contraintes de 1 à 8 ordres de grandeur.

© Extrait de PRD 98, 064051 (2018)
.....

L'analyse en cours de l'ensemble des mesures devrait permettre de gagner environ un facteur 10 par rapport aux premiers résultats. Les progrès seront acquis par une amélioration de la statistique (environ 1 900 orbites utiles à la fin de la mission) et aussi par une estimation plus précise des effets systématiques liés à la sensibilité aux effets thermiques grâce à l'analyse fine des sessions dédiées.

2.1.2. *Redshift* gravitationnel : **Galileo 5 et 6**

Le 22 août 2014, les deux satellites **Galileo 5 et 6** ont été placés sur une orbite excentrique en raison d'une défaillance du lanceur Soyouz (étage Fregat). Dès 2015, une étude préliminaire menée par le SYRTE avait montré qu'il était possible d'exploiter, sur plus d'une année, les données de ces deux satellites excentriques afin d'améliorer le test du décalage gravitationnel, une expérience jamais améliorée depuis 1976 et **Gravity**

Probe A (GP-A), grâce à la modulation de l'effet par l'altitude variable des satellites et des horloges atomiques stables à bord.

Sous l'égide de l'ESA, deux études parallèles et indépendantes ont été financées pour exploiter les données de **Galileo**, sous le nom de GREAT (Galileo gravitational Redshift Experiment with eccentric sATellites). L'une a été confiée au SYRTE à l'Observatoire de Paris et l'autre au ZARM, à l'université de Brême. Après trois ans de mesures et d'analyse de données, les résultats de l'étude des chercheurs du SYRTE et du ZARM sont parus dans le journal *Physical Review Letters*. Ils confirment les prédictions de la relativité générale avec une incertitude relative de $2,5 \times 10^{-5}$, une amélioration d'un facteur 5 à 6 par rapport aux résultats de GP-A. La Fig. 2 montre l'effet variable sur quelques orbites et le très bon accord entre la prédiction du principe d'équivalence d'Einstein et les mesures.

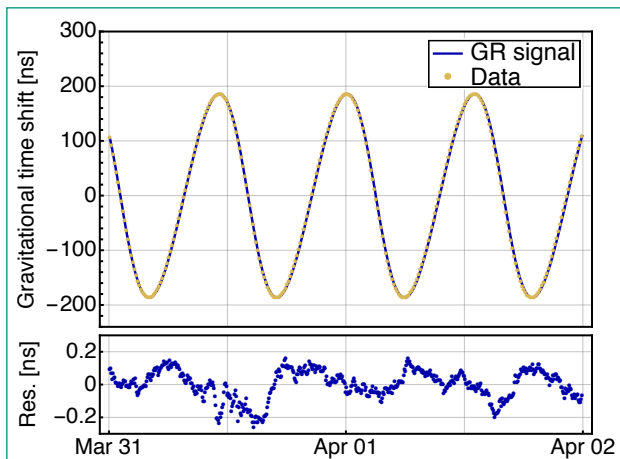


Fig. 2 : Décalage gravitationnel de l'horloge à bord d'un satellite Galileo excentrique, montrant le parfait accord entre les mesures et le modèle théorique. Extrait de PRL 121, 231101 (2018).

© Extrait de PRL 121, 231101 (2018)

.....

2.2. ONDES GRAVITATIONNELLES

En 2014 lors du séminaire de La Rochelle le groupe physique fondamentale avait recommandé en première priorité les ondes gravitationnelles avec l'interféromètre **Lisa** dans l'espace pour l'observation des ondes de basses fréquences. Depuis deux facteurs ont considérablement augmenté l'intérêt scientifique (et la faisabilité technique) de **Lisa** : (i) La détection des ondes gravitationnelles à hautes fréquences par les interféromètres LIGO et Virgo au sol ; (ii) Le succès de la mission **Lisa Pathfinder**.

2.2.1. Détection au sol

Le 14 septembre 2015, les deux détecteurs LIGO observent le signal gravitationnel (GW150914) de la

coalescence de deux trous noirs (TN) ayant des masses élevées de 36 et 29 $M_{\text{sol}}^{\text{aire}}$ à une distance d'environ 400 Mpc. Depuis, 10 événements de coalescence de trous noirs ont été identifiés, dont l'un (GW170729) ayant des masses de 50 et 35 M_{sol} (pour un trou noir final d'environ 80 M_{sol}) à 2700 Mpc. Les signaux gravitationnels reproduisent parfaitement la prédiction de la relativité générale : accord complet avec le développement post-newtonien dans la phase spirale (lors des derniers cycles orbitaux avant la coalescence), et avec les calculs de relativité numérique pour les phases de fusion et de *ringdown*. Certains TN de type LIGO auraient pu être détectés à basses fréquences par **Lisa** plusieurs années avant la détection au sol. Grâce à cette possibilité **Lisa** fera des prédictions de l'instant précis et de la direction d'observation des coalescences de LIGO-VIRGO, d'où la possibilité de se préparer très à l'avance en particulier pour les recherches de contreparties électromagnétiques, et cela autorisera des tests très précis de la relativité générale sur des signaux observés à plusieurs années ou mois d'écart.

Le 17 août 2017 était observée une coalescence de deux étoiles à neutrons à 40 Mpc (GW170817). Cet événement constitue le début de l'astronomie multi-messagère avec un sursaut gamma observé par les satellites **Fermi** et **Integral** 1,7 seconde après le signal gravitationnel, puis un transitoire en optique identifié à une kilonova qui a été découvert par les télescopes au sol au voisinage de la galaxie NGC4993 à la distance prédite par les détecteurs gravitationnels.

L'ensemble de ces observations (purement gravitationnelles ainsi que multi messagers) a engendré une série de nouveaux tests de physique fondamentale, parmi lesquels des nouvelles contraintes sur la masse du graviton, une confirmation du principe d'équivalence fort ou une mesure indépendante de la constante de Hubble. La Fig. 3 montre les deux observations « historiques », la première (2015) et la première avec contrepartie électromagnétique (2017).

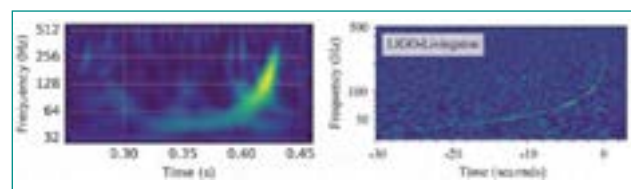


Fig. 3 : Signaux du premier signal GW observé (GW150914, à gauche) et de la coalescence de deux étoiles à neutrons (GW170817, à droite). On voit clairement l'augmentation en fréquence à l'approche de la coalescence et la coupure nette correspondant à la coalescence. Cette dernière permet une datation très précise du moment de coalescence permettant une comparaison fine aux contreparties électromagnétiques, comme les sursauts gamma.

© Extrait de 116, 061102, (2016) et PRL 119, 161101 (2017).

.....

2.2.2. Lisa Pathfinder

Lisa Pathfinder était un démonstrateur technologique pour la future mission **Lisa**. Son objectif était de valider une grande partie des technologies en particulier celles qui ne peuvent pas l'être au sol telles que le maintien de très haute qualité de masses de référence en chute libre (senseur inertielle), le contrôle d'attitude, la mesure interférométrique de la position des masses et la micro-propulsion de précision. **Lisa Pathfinder** a été lancé le 3 décembre 2015 et les opérations scientifiques se sont déroulées jusqu'au 18 Juillet 2017. Les performances ont été meilleures que les spécifications de **Lisa Pathfinder** de plus d'un ordre de grandeurs, et même meilleures que les besoins de **Lisa** sur la totalité de la bande de mesure de **Lisa** (Fig. 4). C'était donc une démonstration éclatante de la capacité de mesure d'accélération fine, et de contrôle *drag-free* du satellite à un niveau bien suffisant pour **Lisa**, mais aussi d'intérêt plus général pour toute autre mission qui cherche à réaliser des trajectoires purement gravitationnelles dans le système solaire.

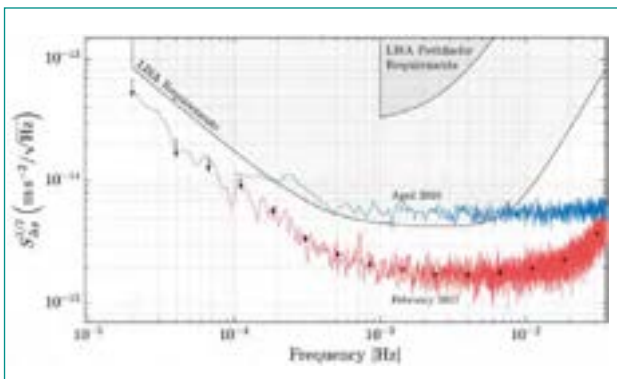


Fig. 4 : Densité spectrale de bruit d'accélération mesurée à bord de LPF, démontrant une performance bien suffisante pour **Lisa**.

© Extrait de PRL 120, 061101 (2018)

2.2.3. Lisa (Laser Interferometer Space Antenna)

Pendant les années 2015-2016 la communauté **Lisa** a travaillé à la définition du retour scientifique de plusieurs configurations de l'interféromètre. Ceci a conduit à la proposition d'une configuration à trois bras de 2,5 millions de km et à une durée de mission fixée à 4 ans, lors de la réponse à l'appel à mission lancé par l'ESA en fin 2016. **Lisa** a été approuvé par le SPC de l'ESA le 20 juin 2017 comme mission L3 du programme *Cosmic Vision*. La Phase 0 s'est déroulée en 2017 en deux étapes : la définition de la mission et celle de la charge utile. Au niveau national, **Lisa France** a évolué en une entité fournissant un accompagnement principalement scientifique à une collaboration gérée par le CNES qui coordonne la contribution technique des différents la-

boratoires à **Lisa**, et soutient, avec d'autres instituts du CNRS et CEA, la contribution scientifique.

2.3. GRAVITATION DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

Le système solaire reste un de nos meilleurs laboratoires pour des tests fins de gravitation, notamment à travers des mesures fines spatio-temporelles, autour de la Terre, à la Lune, et jusqu'aux planètes les plus lointaines de notre système solaire. C'est un travail de longue haleine, utilisant des décennies et même des siècles de données dont une bonne partie est issue d'observations et de missions dont les objectifs principaux ne sont pas liés à la physique fondamentale, par exemple les données de navigation des missions planétaires.

2.3.1. Ephémérides planétaires (INPOP)

Depuis 2014, les éphémérides planétaires INPOP ont évolué dans trois directions : i) le développement d'un modèle Terre-Lune à la pointe de la précision mondiale permettant des exploitations scientifiques dans le domaine de la planétologie et de la physique fondamentale ii) l'analyse et la préparation des expériences de radio-science dans le cadre des missions **Cassini**, **Juno**, **BepiColombo** et **Juice** avec pour but l'amélioration des éphémérides planétaires. iii) l'amélioration permanente des éphémérides INPOP et leur utilisation scientifique, comme les tests des théories alternatives de gravité. Entre 2014 et 2018, deux versions d'INPOP (INPOP13c en 2015 et INPOP17a en 2018) ont été mises à disposition des utilisateurs via le site www.imcce.fr/inpop.

Entre 2014 à 2019 les nouveaux modèles du système Terre-lune ont permis à INPOP17a d'atteindre une précision centimétrique ainsi que des nouvelles contraintes sur le test du principe d'équivalence fort. Au cours de ce travail, nous avons montré que 40 % de l'incertitude sur le principe d'équivalence venait du modèle de structure interne de la Lune. L'analyse des données LLR et la construction d'un modèle Terre-Lune permet des avancées majeures pour notre connaissance de la structure interne de la Lune et pour les tests de physique fondamentale.

Les éphémérides planétaires sont contraintes à 70 % par les données de positions des systèmes planétaires et des planètes obtenues par les expériences de radio-science ou par les données de navigation. Ces dernières années une collaboration forte a été mise en place avec l'équipe PI des expériences de radio-science sur **Cassini**, **Juno**, **BepiColombo** (MORE) et **Juice** (3GM), aboutissant à une réanalyse complète des données de radio-science de la sonde **Cassini**. Cette

collaboration utilise aussi les données de radio-science de la mission **Juno** pour améliorer les éphémérides planétaires et permettre de nouveaux tests de la relativité générale comme l'estimation de la masse du graviton.

L'utilisation des données Gaia d'observations des astéroïdes de la ceinture principale (DR2) dans INPOP est en cours de finalisation. Ce travail, intègre les orbites de près de 14 000 objets dans INPOP et l'ajustement de leurs orbites aux observations Gaia. Sur les aspects tests de la relativité générale avec INPOP, des travaux récents ont permis d'identifier différentes classes de théories alternatives de la gravité à tester avec INPOP, comme des théories de graviton massifs ou de champ scalaire (dilaton). En ce qui concerne des tests plus « classiques » INPOP a fourni les meilleures contraintes sur des paramètres post-newtoniens, l'aplatissement du Soleil et le taux de perte de masse gravitationnelle du Soleil.

2.3.2. Laser lune et satellite

La station de télémétrie laser de Grasse traque aussi bien des satellites artificiels équipés de coins de cube que les différents réflecteurs posés sur la surface lunaire, (télémétrie laser vers la Lune (LLR)). Historiquement, la station tirait dans le vert à 532 nm car les détecteurs étaient performants dans cette gamme. Grâce à l'installation d'un détecteur supplémentaire dans l'infrarouge (1064 nm) récemment, la station est maintenant capable de détecter à la fois dans le vert et l'infrarouge (IR). Dans l'IR, le nombre de photons détectés en retour est beaucoup plus favorable avec un bien meilleur rapport signal sur bruit. Par ailleurs, cette longueur d'onde permet d'étendre la capacité d'observation de la station aux périodes de nouvelle et pleine lune, difficilement accessible dans le vert, et permet donc de densifier les observations.

La conséquence pour l'utilisation de la Lune à des fins de physique fondamentale est immédiate, en particulier lorsque l'on considère un test du principe d'équivalence fort qui nécessite une couverture optimale de l'ensemble de l'orbite de la Lune. Ainsi, les éphémérides lunaires INPOP ont permis, grâce à l'ensemble des données LLR, d'obtenir les meilleures contraintes actuelles sur ce test. INPOP a également été utilisé pour étudier une possible variation temporelle de la constante universelle de la gravitation et d'en obtenir les meilleures contraintes. Enfin, des tests de la violation de l'invariance de Lorentz ont été conduits jusqu'à l'état de l'art, via l'utilisation de la phénoménologie SME dans deux de ses secteurs : celui de la gravité et celui du couplage gravité-matière.

Plus généralement le laser satellite est un support nécessaire à des tests en physique fondamentale, par exemple le test récent du décalage gravitationnel grâce

aux deux satellites **Galileo 5 et 6** (voir plus haut) ; deux campagnes d'observation spécifique, par télémétrie laser sur ces satellites, ont été menées afin de permettre une bonne estimation des effets systématiques sur l'incertitude orbitale des deux **Galileo**.

2.3.3. Gravity Advanced Package (GAP)

La recommandation du groupe de physique fondamentale lors du SPS de 2014 était de favoriser l'emport, sur des missions d'opportunité vers les planètes lointaines, d'un accéléromètre de précision 10^{-11} m/s² afin de tester la relativité générale dans le système solaire. Cet instrument a été proposé dans les missions planétaires vers Uranus (**Uranus Pathfinder** pour M4) et dans la proposition **Island** (mission dédiée) pour l'appel à idée ESA de 2016. Plusieurs leçons peuvent être tirées de ces tentatives :

- Nécessité de faire apparaître un objectif planétaire de l'emport de l'instrument, au-delà de ces objectifs de physique fondamentale pour faire accepter l'instrument par la communauté planétaire, du fait de la pression pour de telles missions,
- Les contraintes imposées à la sonde pour exploiter la précision de l'instrument semblent rédhibitoires pour ces missions (il est à noter que sur la mission **Juice**, le besoin d'un accéléromètre est apparu a posteriori pour mesurer les ballottements d'ergols qui perturbent la mesure de radio-science pour la gravité de Ganymède),
- Importance de continuer à travailler sur l'exploitation des données de navigation des missions précédentes, en montrant les limites des solutions ne reposant que sur des modèles pour supprimer les effets non gravitationnels (cf. paragraphe sur INPOP).

2.4. MATURATION TECHNOLOGIQUE

Il n'est pas possible de lister ici l'ensemble des avancées technologiques qui ont été faites depuis 2014, ou même d'en détailler certaines. Cependant il est important de souligner certains progrès spécifiques à la physique fondamentale qui seront cruciaux pour les missions à venir.

Le contrôle inertiel des satellites a franchi un palier avec les missions **Microscope** et **Lisa Pathfinder** (voir ci-dessus). Cela est une base essentielle pour des futures missions, en premier lieu des futurs tests du PE et, bien sûr, **Lisa**.

Les horloges atomiques, en particulier horloges optiques, atteignent maintenant des incertitudes sub- 10^{-18} en fréquence relative et deviennent de plus en plus fiables. Leur utilisation, hors du labo et dans l'espace,

nécessitera de nouveaux types de liens pour les comparer entre elles ou aux horloges au sol, basés sur des liens laser cohérents, technologie semblable à celle de **Lisa**. Plusieurs actions sont en cours pour développer ce type de lien optique.

Les senseurs inertiels basés sur l'interférométrie atomique sont très prometteurs pour des futures missions en physique fondamentale (tests du PE) et en observation de la Terre (mesures du champ de gravité terrestre). Des améliorations considérables ont vu le jour depuis 2014, notamment en ce qui concerne les sources lasers et les sources atomiques. L'expérience ICE (Interférométrie atomique à sources Cohérentes pour l'Espace) développée avec le fort soutien du CNES, a abouti entre autres au premier test du PE en microgravité (vol parabolique) en interférométrie atomique, publié dans *Nature Communications* en 2016.

3. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

3.1. L'UNIVERS GRAVITATIONNEL

Lisa observera les sources d'ondes gravitationnelles émettant entre 0,02 mHz et 1 Hz telles que des binaires de trous noirs supermassifs, des binaires galactiques, des binaires à rapport de masses extrême, des binaires de trous noirs de masse stellaires (détectés également par les interféromètres sol), et des fonds stochastiques d'ondes gravitationnelles, qui peuvent être dus en partie à des potentielles sources opérantes dans l'univers primordial.

Les domaines scientifiques couverts par **Lisa** sont nombreux en astrophysique, cosmologie et physique fondamentale (ils sont détaillés dans le *Science Requirements Document* https://dms.cosmos.esa.int/COSMOS/doc_fetch.php?id=3752747).

Les sources garanties sont les binaires galactiques, les sources attendues avec le signal sur bruit le plus élevé sont les collisions de trous noirs (TN) supermassifs de masse 10^5 à $10^7 M_{\text{sol}}$, situés au centre des galaxies, les sources plus spéculatives des TN de masse intermédiaire ($10^3 M_{\text{sol}}$), avec toujours la possibilité de découvrir des sources inconnues à l'heure actuelle. L'environnement et la dynamique des centres des galaxies du même type que la voie lactée, sera explorée par le spiralement et la fusion d'objets compacts dans le champ gravitationnel des trous noirs supermassifs. Cela permettra aussi des tests poussés de la théorie de la gravitation. Nombreuses sont les observables que **Lisa** fournira sur

cet objectif : la phase de ring-down après la coalescence sera accessible dans le cas des signaux de collision de trous noirs ; **Lisa** testera l'existence de modes de propagation scalaire et vectoriel, ainsi que la relation de dispersion des ondes gravitationnelles, la masse du graviton, des violations de l'invariance de Lorentz ; il sera possible de sonder la présence de champs scalaires massifs (candidats pour la matière noire) en accréation autour des trous noirs supermassifs. Les binaires de trous noirs de quelque dizaine de masses solaires, dont les interféromètres terrestres observent la fusion, pourront être détectées par **Lisa** quelques semaines à des dizaines d'années à l'avance, pendant leur phase spiralante. Ces observations multi-bandes d'ondes gravitationnelles pourront fournir des informations importantes sur l'origine de ces trous noirs, et tester des modifications de la gravité comme par exemple une variation temporelle de la « constante » gravitationnelle G . **Lisa** aura également deux retombées cruciales en cosmologie. D'une part, elle pourra tester l'expansion de l'univers, en mesurant le paramètre de Hubble et les paramètres cosmologiques, à *redshift* inférieur à 5-7, d'autre part, **Lisa** pourra contraindre ou détecter le fond stochastique d'origine primordiale, qui contient des informations fondamentales sur l'état de l'univers à des énergies supérieures à 100 GeV. Ceci permet de tester la théorie physique qui décrit l'univers à haute énergie au-delà du modèle standard, fournissant des contraintes à la physique fondamentale complémentaires à celles provenant des accélérateurs de particules. Un grand nombre de ces résultats profiteront des observations multi messenger et en particulier des *follow-up* électromagnétiques par les grands télescopes futurs (SKA, LSST, ELT, **Athena**, SKA, **Euclid**, ...).

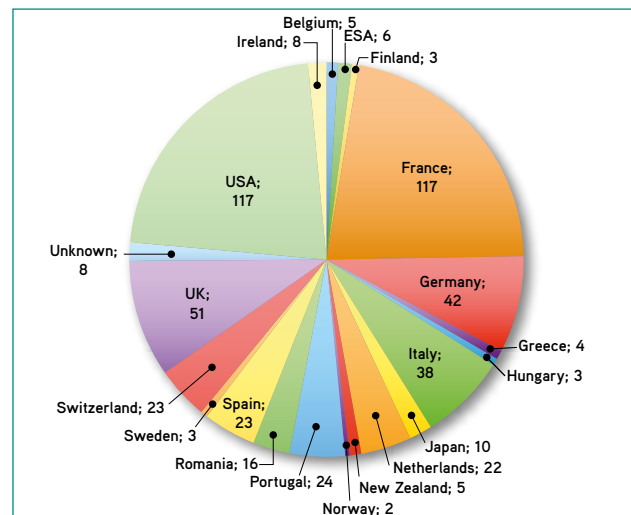


Fig. 5 : « Full members » du Lisa consortium par pays (Mai. 2019).

© APC
.....

La communauté française est fortement impliquée dans **Lisa**. Avec 168 membres (dont 108 « full » membres) dans le **Lisa** consortium elle fournit le deuxième

contingent en taille, avec des responsabilités à tous les niveaux. La France est en charge du DDPC (Distributed Data Processing Center) et de l'AIVT (Assembly Integration Validation and Tests) de la partie mobile de l'instrument et une participation conséquente aux activités de gestion des performances et de simulation.

Lisa sera sans doute la mission principale de l'ESA dans le domaine de la physique fondamentale, et bien au-delà, des prochaines décennies. L'investissement dans cette mission doit être à la hauteur de ces engagements et responsabilités, et de la science que **Lisa** fournira.

3.2. LE PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE

Le principe d'équivalence d'Einstein est à la base des théories dites métriques de la gravitation, qui incluent la relativité générale. La distinction entre les théories *métriques* d'une part, qui décrivent la gravitation comme un phénomène géométrique, et celles qui ne le sont pas, et qui donc violent le principe d'équivalence, est fondamentale. Le formalisme des théories métriques de la gravitation est très différent de celui des autres interactions fondamentales connues (interaction électrofaible et forte), qui sont décrites par la théorie quantique des champs dans laquelle les champs se propagent dans un espace-temps de Minkowski fixé. En conséquence il est très difficile de réconcilier la théorie actuelle de la gravitation, avec tous ses succès à l'échelle macroscopique dont l'un des plus importants est la confirmation récente des propriétés des ondes gravitationnelles, avec la théorie quantique des champs qui conduit au modèle standard de la physique des particules, lui aussi extrêmement bien vérifié par les mesures effectuées au LHC et la découverte du boson de Brout-Englert-Higgs.

A côté du problème de l'unification des interactions fondamentales, une autre motivation importante concerne la cosmologie, car les modèles alternatifs pour l'énergie noire, qui tentent de résoudre un problème grave d'ajustement fin à la valeur observationnelle très petite de la constante cosmologique, sont basés sur des champs scalaires de longue portée, qui lorsqu'ils sont considérés dans le contexte de la physique des particules, se couplent d'une manière non-universelle aux autres champs du modèle standard et donc violent le principe d'équivalence. Mentionnons aussi le problème de la matière noire, pour lesquels certains modèles sont aussi basés sur des champs scalaires avec les mêmes propriétés.

La conclusion est qu'il est essentiel de continuer à tester le principe d'équivalence jusqu'à des niveaux très fins et dans tous les domaines, car c'est l'une des clés

d'accès possible à des scénarios d'unification des interactions fondamentales, et aux grands problèmes de la cosmologie comme l'énergie ou la matière noire.

La mission **Microscope** a permis de démontrer la capacité des équipes françaises à réaliser les différentes briques nécessaires à de futures missions, et aussi d'évaluer les efforts à mener pour une mission plus ambitieuse. Deux missions sont proposées par la communauté scientifique pour atteindre un test de l'EP à 10^{-17} ou mieux : **Microscope 2** et **STE-Quest**. **Microscope 2** est la suite logique de **Microscope**, en utilisant le retour d'expérience afin d'améliorer l'instrument et le satellite pour gagner deux ordres de grandeurs (test EP à 10^{-17}). Une phase 0 instruite au CNES devrait permettre de mieux préciser cette proposition en profitant pleinement du retour sur expérience **Microscope** des équipes du CNES et de l'ONERA. La mission **STE-Quest**, proposée dans le cadre des AO M3 et M4 de l'ESA, avait pour objectif un test du PE à $2 \cdot 10^{-15}$. Depuis plusieurs évolutions théoriques (méthode d'annulation de l'effet de gradient de gravité) et expérimentaux (démonstrations en vol parabolique, tour 0 g de Brême, et fusée sonde) ainsi que des études mission et techno (ex. : phases 0 **Grice** et **Carioqa**) ont permis de conforter la technologie et de pousser vers des niveaux de 10^{-17} à 10^{-18} . De plus, les retours d'expérience des missions **Microscope** et **Lisa Pathfinder** démontrent la capacité de contrôle inertiel et thermique de la plateforme.

3.3. GRAVITATION DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

La mesure précise du champ métrique créé par le Soleil et les planètes est un enjeu crucial pour la physique fondamentale et les domaines reliés. Elle permet la trajectographie très précise des satellites, une meilleure réalisation des systèmes de référence, et l'amélioration des éphémérides planétaires dans le système solaire. La connaissance du champ de gravitation à grande distance du Soleil est également intimement liée aux modèles de formation du système solaire.

Au niveau des orbites des objets du système solaire, dans le cadre de la mission **BepiColombo**, une nouvelle approche a été proposée pour l'analyse et la conduite de tests de la relativité générale. En effet, après un scénario de test basé sur un ajustement limité au couple Terre-Mercure, le nouveau scénario de traitement est basé sur l'ajustement complet des orbites des planètes du système solaire via INPOP avec l'ensemble des données disponibles incluant les données **BepiColombo**. Cette approche garantit une meilleure prise en compte des effets systématiques et une meilleure cohérence des tests prévus et d'étendre le nombre de théories alternatives testées. Dans les années qui viennent, les tests de théories alternatives dans les éphémérides

planétaires se poursuivront. Les données **Gaia** DR3 et DR4 pour les astéroïdes seront incluses dans INPOP suivant les algorithmes développés pour le DR2. Des déterminations de masse seront effectuées et des tests de raccordements à l'ICRF seront effectués.

Au niveau de l'orbitographie des sondes elles-mêmes, l'objectif d'emport d'un accéléromètre de type GAP sur des missions lointaines, reste important pour des projets futurs d'exploration des planètes géantes glacées, par exemple dans le cadre d'une mission S. Une solution séduisante consisterait à placer un instrument scientifique dédié dans une contribution instrumentale française en cours de discussion pour cette mission. La démonstration du principe de l'accéléromètre à biais compensé et de ses performances a été faite en laboratoire.

L'ajout d'un tel accéléromètre sur une mission lointaine permettrait :

- En phase orbitale, d'améliorer considérablement la description du champ de gravité de la planète et de ses satellites,
- En phase de survol (lors des assistances gravitationnelles), d'avoir une meilleure étude de la dynamique de la sonde et de la planète survolée notamment en vue des éphémérides planétaires,
- En phase interplanétaire, d'obtenir pour la première fois une caractérisation précise de la dépendance en distance de la loi de la gravitation.

Ces mesures sont complémentaires des mesures de planétologie en phase orbitale, avec une meilleure connaissance de la structure interne de la planète obtenue à partir de son champ de gravité. Le champ de gravitation créé par le Soleil au niveau d'Uranus ou de Neptune pourrait être caractérisé avec une précision relative d'environ 10^{-5} . L'accélération typique de la galaxie au voisinage du système solaire est de l'ordre de 10^{-10} m/s², ce qui est du même ordre de grandeur que l'accélération MOND et un facteur plus de 10 plus petit que la connaissance actuelle, mais environ 10 fois plus grand que la précision de mesure de l'accéléromètre GAP.

3.4. OPPORTUNITÉS TRANSVERSES

3.4.1. Cosmologie

La détection directe des ondes gravitationnelles renforce l'intérêt pour la recherche des modes de polarisation dans le fond cosmologique spécifiquement produits par les ondes gravitationnelles primordiales, les modes B aux grandes échelles. La présence d'un fond d'ondes gravitationnelles est une prédiction générique des scénarios d'inflation. La détection des modes B dans le fond cosmologique est donc un enjeu essentiel

pour notre compréhension de la physique de l'univers primordial et donc de la physique aux très hautes énergies inaccessibles au laboratoire par les expériences directes. Les diverses théories d'inflation compatibles avec les données actuelles prévoient une grande plage de valeurs possibles pour l'amplitude de ces modes B. Leur détection nécessite un très bon contrôle des amplitudes des signaux des avant-plans (principalement les poussières polarisées de notre galaxie), principales limites des expériences actuelles. Le signal des modes B du fond primordial étant attendu principalement aux grandes échelles angulaires il est nécessaire de disposer de la couverture angulaire la plus grande possible, d'où l'intérêt des expériences spatiales. De plus la soustraction optimale des avant-plans nécessite une couverture en fréquences inaccessibles depuis le sol. Une expérience comme **Litebird** a été conçue et optimisée pour cet objectif. Sa sensibilité lui permettra de détecter le signal attendu dans un grand nombre de théories (même si certaines théories prévoient un signal extrêmement faible, qui pourrait rester inaccessible à jamais).

3.4.2. Terre Solide

L'interface entre physique fondamentale et Terre solide s'articule autour de certaines problématiques (détermination du champ gravitationnel) et technologies communes. Par exemple, le développement des accéléromètres et gradiomètres (électrostatiques aussi bien que atomiques) ainsi que les liens optiques, trouvent des applications en étude du champ gravitationnel de la Terre (**Grace, Goce, Grace-FO, Grice, Carioqa**) et de physique fondamentale (**Microscope, Lisa Pathfinder, Ice, Lisa, STE-Quest**). Dans ce contexte un démonstrateur technologique d'accéléromètre atomique, à vocation d'application dans les deux domaines, est une piste intéressante vers l'amélioration du TRL de cette technologie prometteuse. D'une manière moins directe, les horloges optiques de haute performance commencent à être utilisées en géodésie chronométrique (détermination du potentiel au niveau centimétrique via le *redshift* relativiste), ce qui nécessite le développement des horloges bien sûr, mais aussi des liens optiques en espace libre pour les comparer, lien du type déjà mis en œuvre sur **Grace-FO** et prévus pour **Lisa**. Ce type de lien peut être utile aussi dans le contexte des liens inter-satellite **Galileo**. Au niveau infrastructures sol, les deux domaines partagent l'usage intensif des stations laser satellite et laser lune. Une pérennisation des activités des stations françaises et en particulier de la station Méo est fondamentale pour notre communauté et doit se faire en coordination avec celle de Terre solide.

3.4.3. Navigation

Comme démontré avec le test du *redshift* utilisant **Galileo 5 et 6**, il y a des nombreuses opportunités à l'interface entre navigation et physique fondamentale :

l'ESA étudie la possibilité d'embarquer des instruments qui auront un intérêt pour la communauté scientifique, parmi lesquelles : horloges de haute performance, unités de mesure de la radiation, accéléromètres, émetteurs VLBI, retro-rélecteurs laser passifs et actifs, récepteurs GNSS, liens inter-satellites. De plus, l'ESA étudie la possibilité d'avoir des stations laser au sol dédiées à l'observation des satellites **Galileo**, afin d'inclure les données laser dans la détermination d'orbite. Toutes ces évolutions peuvent présenter des opportunités en physique fondamentale, dans le sillage de ce qui a été fait avec **Galileo 5 et 6**. Par ailleurs, **Galileoscope** est une proposition de mission scientifique dédiée, basée sur le GNSS avec un coût de mission réduit grâce à la réutilisation de la plateforme et/ou des instruments **Galileo** existants, d'instruments supplémentaires et d'une orbite spécifique. On peut imaginer, par exemple, une horloge de haute performance, par ex. horloge optique, sur une orbite excentrique pour améliorer encore le test du *redshift* gravitationnel.

3.5. SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

Le groupe physique fondamentale a établi ses priorités scientifiques :

1. Un investissement très conséquent du CNES dans la mission Lisa, avec une forte implication française (AIVT de l'instrument+ DDPC+ perfos et simulation). Un soutien du CNES aux laboratoires qui préparent l'exploitation scientifique, y compris pour les aspects multi-messagers, est également indispensable pour assurer d'un retour scientifique à la hauteur de l'investissement.
2. Une mission de test de l'universalité de la chute libre (PE) dans le sillage de Microscope, à un niveau de 10^{-17} ou mieux. Soit à base d'atomes froids

(STE-Quest) dans le cadre d'un prochain appel M de l'ESA, soit avec une version évoluée de la technologie Microscope dans un cadre programmatique qui reste à définir.

3. Inclure un accéléromètre avec une incertitude de l'ordre de 10^{-10} à 10^{-11} m/s² comme instrument sur les prochaines missions planétaires, en particulier vers les géantes glacées. Il s'agit là de l'incertitude de l'instrument, l'incertitude finale en termes de navigation sera le résultat d'un compromis entre les impératifs du satellite et les performances de l'instrument.

De plus le groupe recommande :

- Une phase 0 sur **Microscope2** avec REX **Microscope**, pour en étudier la faisabilité et le cadre programmatique le mieux adapté (M, F, bilatérale, ...).
- Une participation à **Litebird**, porté par le groupe astronomie et astrophysique, pour l'étude de la polarisation du CMB et notamment pour la détection des modes B, d'une grande importance pour la cosmologie et la physique fondamentale.
- De continuer les efforts en R&D dans le domaine de l'interférométrie atomique et des liens optiques en espace libre, pour des futures applications en physique fondamentale (p. ex. **STE-Quest**), mais aussi en observation de la Terre (p. ex. phase 0 **Grice** ou **Carioqa**), en passant par un démonstrateur technologique si nécessaire.
- De soutenir l'exploitation des stations laser au sol, dont les données long terme et pérennes sont essentielles pour les tests de physique fondamentale, les systèmes de référence et les éphémérides lunaires et planétaires.
- De soutenir l'exploitation de données spatiales venant d'autres domaines (p. ex. GNSS, **Galileo**, instruments radioscience des sondes planétaires) pour des tests de physique fondamentale et la construction d'éphémérides planétaires, lunaires et satellitaires.

Type de mesure/d'observables	Cadre de réalisation	R&T associée	Thème scientifique
Observation d'ondes gravitationnelles entre 10^{-5} et 1 Hz	L3 (ESA)	Interférométrie à 10 pm/VHz. Moyens de test et intégration.	<i>Les ondes gravitationnelles basse fréquence pour l'étude de la gravitation en champ fort, l'astrophysique, et la cosmologie.</i>
Test du principe d'équivalence	M (ESA) ou autre (F, bilatérale)	Interférométrie atomique, accéléromètres électrostatiques	<i>Recherche de nouvelles interactions ou champs liés à l'unification et ou l'énergie/matière noire</i>
Mesure du champ de gravitation dans le système solaire lointain	Instrument sur mission ESA ou Opportunité	Accéléromètre électrostatiques et son accommodation sur satellite	<i>Test de gravitation dans le système solaire lointain. Détermination du champ gravitationnel en phase de croisière et en phase de survol ou orbitale.</i>



GROUPE DE TRAVAIL THÉMATIQUE ASTRONOMIE ET ASTROPHYSIQUE

Emmanuel Dartois, Thierry Fogglizzo, Guillaume Hebrard, Jürgen Knodlseder, Joao Marques, Frédérique Motte, Céline Péroux, Michel Piat, Étienne Pointecouteau, Delphine Porquet, Cécile Renault (présidente) et Philippe Laudet (thématicien).

La thématique astronomie et astrophysique se caractérise par une large diversité dans les méthodes d'observation (des ondes radio aux rayons gamma, que ce soit au sol, depuis des ballons stratosphériques ou dans l'espace) et dans les échelles spatiales considérées (des systèmes stellaires orbitant à quelques années-lumière de nous jusqu'à la limite de l'univers observable située à environ 45 milliards d'années-lumière).

Nous ne connaissons plus seulement quelques objets du cosmos mais une fraction non négligeable des étoiles et des galaxies qui nous entourent. Les baryons sont de mieux en mieux détectés, même s'ils sont sous forme de gaz chaud diffus. La cosmologie est passée dans l'ère de la précision, les hypothèses peuvent être testées et les différentes sondes confrontées. Les observations des objets célestes sont multiples : non plus dans un domaine de fréquences mais multi-longueurs d'onde - voire multi-messagers, non plus généralement pointées mais également en mode de relevé systématique, pas toujours préprogrammées mais aussi réactives aux alertes. L'utilisation des observations s'est adaptée : des outils statistiques ont dû être développés pour bénéficier des mannes d'information contenues dans des catalogues de centaines de millions de galaxies, de milliards d'étoiles et les simulations jouent un rôle essentiel, en particulier pour suivre l'évolution temporelle des étoiles, des galaxies, de la toile cosmique.

Les grandes questions scientifiques ont beaucoup évolué au cours des deux dernières décennies, et, conjointement, les façons de travailler se sont également considérablement modifiées.

Trois grands sujets sont particulièrement mobilisateurs aujourd'hui. Le premier s'attèle à la compréhension de l'évolution de la matière. Deux axes se dessinent. D'une part, il faut connaître les conditions initiales avec les caractéristiques de l'inflation primordiale, juste après le Big-Bang, et la physique durant les âges sombres et la réionisation, donc l'ère des premières étoiles. D'autre part, il est indispensable de pouvoir suivre l'évolution de la matière aux différentes échelles, en particulier les galaxies et leur trou supermassif central ainsi que les étoiles et leurs systèmes planétaires.

Le deuxième sujet a trait au champ magnétique qui joue un rôle important et est encore très peu connu ; on sait aujourd'hui que la gravitation n'est pas la seule force à l'œuvre dans l'organisation de la matière. Il faut donc appréhender son impact dans la formation des étoiles et de leurs systèmes planétaires émergents, dans la structure et l'évolution du milieu interstellaire ou encore dans la formation des grandes structures, à savoir les galaxies, amas de galaxies et filaments.

Enfin la prochaine décennie permettra un accès sans précédent à la dimension temporelle du cosmos. Cette dimension, par des observations multi-longueurs d'ondes et multi-messagers, est essentielle pour comprendre les phénomènes transitoires violents et leur impact sur leur environnement et constitue le troisième sujet. Il s'agit notamment des sursauts gamma, en particulier dans l'univers jeune pour étudier l'époque de la réionisation, des supernovas et kilonovas pour mieux cerner l'origine du rayonnement cosmique et des éléments chimiques ou encore de la fusion de trous noirs stellaires ou supermassifs pour reconstituer l'histoire de leur formation.

1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LES PROSPECTIVES 2014

Le périmètre du groupe astronomie et astrophysique ayant évolué puisque les exoplanètes concernent désormais le groupe exobiologie, les priorités liées à ce sujet ne sont pas évoquées dans ce document.

1.1. BILAN PROGRAMMATIQUE

1.1.1. Priorités du précédent séminaire

- Le séminaire de prospective de la Rochelle en 2014 avait identifié deux priorités P0 :

Observer l'univers dans le domaine des rayons X :

Ce premier objectif a été concrétisé par la sélection par l'ESA de la mission **Athena** (Advanced Telescope for High-Energy Astrophysics), pour aborder le thème scientifique "The Hot and Energetic Universe", dans le cadre de sa deuxième mission de classe L. La maîtrise d'œuvre de l'instrument X-ifu a été endossée par le CNES et sa responsabilité scientifique (investigateur principal) par l'IRAP. Les consortiums instruments ont été formellement approuvés par l'ESA à la mi-décembre 2018. La revue de fin de phase A de X-ifu a été un succès, la phase B a donc officiellement démarré. Le lancement est actuellement prévu en 2031. La durée nominale des opérations est de quatre ans, avec une extension possible de quatre années supplémentaires. Les objectifs scientifiques d'**Athena** sont de répondre aux deux grandes questions fondamentales : Comment la matière ordinaire se structure et évolue en grandes structures telles que nous observons aujourd'hui ? Comment les trous noirs façonnent-ils l'évolution de notre univers ?

Observer les modes B de la polarisation du fond diffus cosmologique (CMB) :

Ce deuxième objectif devrait enfin se concrétiser, après une succession de propositions fortement soutenues par la France mais non retenues : la proposition Core dans le cadre de l'appel à proposition pour les missions M4 et M5 de l'ESA, le projet Pixie de la NASA (comprenant une contribution d'opportunité française endossée par le CNES) et le projet Pristine proposé dans le cadre de l'appel à proposition pour les missions F de l'ESA. La mission **Litebird** en coopération avec la JAXA, dont la phase A1 est en cours, vient d'être sélectionnée par la JAXA. La France aurait la responsabilité de l'instrument haute fréquence. **Litebird** va cartographier l'ensemble du ciel polarisé dans le domaine millimétrique et submillimétrique. Son objectif majeur

est la physique de l'inflation. Ses résultats se combineront idéalement avec l'expérience au sol S4 pour obtenir des mesures ou des contraintes encore plus fines.

- Une priorité P1 avait également été exprimée :

Observer l'univers lointain dans l'infrarouge, ou l'univers proche dans l'ultra-violet : La mission **Spica**, présélectionnée dans le cadre de l'appel d'offre M5 de l'ESA, répondrait à cet objectif. La contribution française à l'instrument Safari correspond parfaitement à cette priorité, étendue avec le développement de l'instrument B-Bop dédié à la polarisation.

Une phase 0 instrumentale pilotée par la France concernant un spectromètre hétérodyne infrarouge lointain est en cours pour la mission **OST** (Origin Space Telescope), actuellement à l'étude dans le cadre de la préparation du Decadal Survey NASA (l'implémentation d'une nouvelle mission *flagship* de la NASA ne devrait pas advenir avant 2035).

Pour la composante UV, l'expérience **Fireball** réalise une étude du milieu galactique chaud en coopération avec la NASA. Elle a volé le 22 septembre 2018 sous ballon NASA. Hélas le vol a avorté à cause d'une fuite du ballon mais des résultats prometteurs ont cependant pu être obtenus. Un nouveau vol est prévu. Ce projet s'inscrit dans la préparation à la mission **Luvoir**, concurrent d'**OST** pour être le prochain *flagship* de la NASA.

- Trois priorités P2 avaient été identifiées :

Observer l'univers dans le domaine du MeV : Les propositions **e-Astrogam** soumises dans le cadre des appels de l'ESA M4, M5 et F1, dans une version réduite, n'ont pas été retenues. Cette fenêtre reste très peu explorée à ce jour.

Observer les étoiles dans l'ultraviolet : La proposition **Arago** n'a pas été retenue dans le cadre des appels de l'ESA M4 et M5. En parallèle, la NASA a lancé des études de phase 0 dans le cadre du prochain *Decadal Survey*. Parmi elles, une phase 0 instrumentale pilotée par la France concernant un spectropolarimètre UV à très haute résolution est en cours pour l'instrument Pollux sur la mission **Luvoir** (Large UV/Optical/IR surveyor).

Observer l'univers lointain dans l'infrarouge : La mission **Spica**, présélectionnée pour M5, adresse également cette thématique.

Il faut de plus mentionner :

- L'extension des missions **XMM-Newton** et **Gaia**.
- Le report du lancement du **JWST** à 2021 et de celui d'**Euclid** à 2022.

- La décision de développement de la mission Svom pour un lancement en 2021.
- Les deux vols de Pilot en 2015 et 2017, le troisième étant programmé pour l'automne 2019.

1.1.2. R&T associée

En lien avec les priorités scientifiques, trois axes de développements instrumentaux ont émergé des actions sur les concepts optiques, les chaînes de détection et les actions transverses : ce sont respectivement la spectroscopie UV, les détecteurs dans le domaine sub-millimétrique et la cryogénie sub-kelvin. On peut noter la fructueuse collaboration avec le LabEx Focus sur les techniques de détection de l'infrarouge au millimétrique.

Une action majeure a été la rédaction de la feuille de route sur les détecteurs dans le domaine submillimétrique et millimétrique qui comprend un état des lieux des technologies existantes et vise à définir quelle technologie devait être amenée à TRL 5 pour faciliter la sélection de projets qui l'intégrerait. Des développements ont eu lieu en parallèle pour conduire les trois candidats identifiés à TRL 4. Aujourd'hui, en l'absence de mission définie dans le cadre d'un appel à projet - donc sans concept instrumental complet, il semble illusoire de privilégier une technologie plutôt qu'une autre.

Les durées de développement sont importantes pour diverses raisons (financements étalés pour limiter l'investissement annuel, disponibilité des personnels avec les expertises requises mais aussi complexité technique). Malgré les efforts du CNES et de ses partenaires - industriels et laboratoires, le plan d'actions de levée de risque s'avère difficilement compatible avec le contexte programmatique de **Theseus** en ce qui concerne le détecteur Alfa - la mission n'est pas compromise car une alternative existe mais il faudra acheter des détecteurs américains alors que d'importants efforts ont été faits pour développer des détecteurs européens. Il en va de même pour la dilution à cycle fermée, dont le développement ne sera probablement pas assez avancé pour être considéré pour la mission **Litebird**, alors que les objectifs scientifiques requièrent un refroidissement continu et que plusieurs actions successives ont été dédiées à la spatialisation de cette technique.

Le schéma ci-dessous rassemble les missions au moins en phase A. Les périodes indiquées correspondent aux opérations nominales ou aux extensions approuvées alors que les pointillés indiquent les extensions envisagées. Les missions **Plato** et **Lisa** relèvent respectivement des thématiques exobiologie, exoplanètes et protection planétaire, et physique fondamentale mais sont indiquées car elles présentent un intérêt de premier plan pour l'astrophysique.

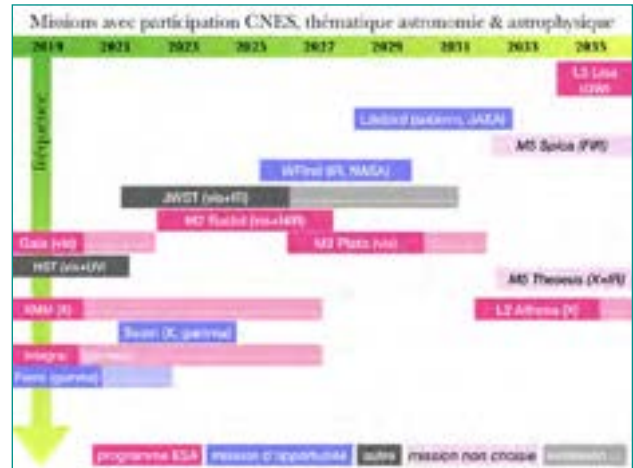


Fig. 1 : Missions avec participation CNES, thématique astronomie et astrophysique.

© Groupe thématique astronomie et astrophysique
.....

1.1.3. Paysage programmatique

Collaborations avec les agences spatiales autres que l'ESA : Dans le cadre de la thématique astronomie et astrophysique, le CNES est significativement impliqué avec les agences suivantes :

- La NASA pour **Fermi** et **HST**, et dans le futur **JWST**, **WFIRST** et **Athena**,
- La JAXA pour **Litebird**, **Athena** et **Spica**, ce dernier étant en compétition pour **M5**,
- La CNSA pour **Svom**, et, probablement, **Einstein Probe** et **EXTP**, ainsi sans doute que **HSTDm** sur leur station spatiale. Ces contributions futures sont a priori plus modestes que celles avec la NASA et la JAXA, c'est pourquoi elles ne figurent pas sur le schéma.

1.2. QUELQUES RÉSULTATS SCIENTIFIQUES SAILLANTS

1.2.1. Planck

Lancé en 2009, le satellite européen **Planck** a permis de nombreux progrès dans la compréhension des origines et l'évolution des grandes structures de l'univers. **Planck** a rendu publiques les données complètes en température et en polarisation début 2015 et la version définitive, avec une analyse raffinée, en juillet 2018.

Les cartes des anisotropies de température du fond de rayonnement cosmologique à 3 K, ou Cosmic Microwave Background (CMB), obtenues par **Planck**, en température et en polarisation, demeureront une référence pendant de nombreuses années. De multiples informations ont été extraites sur l'univers primordial (inflation), l'univers jeune (réionisation), l'univers évolué (potentiel gravitationnel, fond diffus infrarouge et amas

de galaxies) et l'univers local (champ magnétique de la galaxie). Le modèle standard de la cosmologie est très solidement validé par les observations des premiers milliards d'années de l'histoire de l'univers. Cependant des tensions existent aujourd'hui pour quelques paramètres cosmologiques entre certaines mesures réalisées avec des sondes astrophysiques dans l'univers mature et les valeurs extrapolées de l'univers primordial et au début de son évolution. Le terrain est ainsi idéalement préparé pour la mission **Euclid**.

Les articles de la collaboration ont été cités plus 28 000 fois (dont plus de 14 000 citations pour les trois articles sur les paramètres cosmologiques).

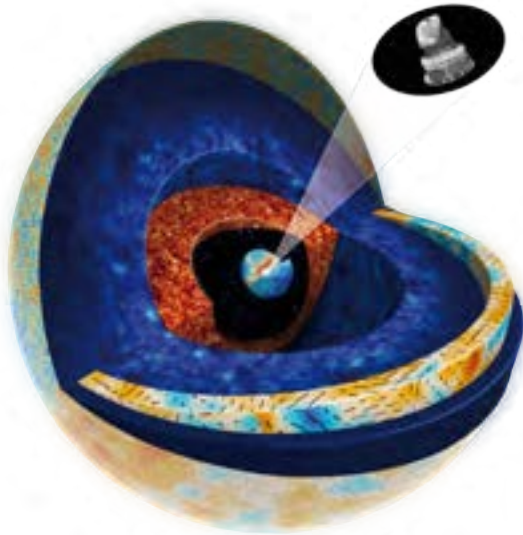


Fig. 2 : l'univers observable vu par Planck en température et en polarisation.

© ESA - collaboration Planck - Canopée
.....

1.2.2. Gaia

La mission spatiale astrométrique **Gaia**, lancée le 19 décembre 2013, a commencé sa phase de collecte de données le 25 juillet 2014. Sa mission est de cartographier plus d'un milliard d'étoiles de notre galaxie et au-delà, en accédant aux positions, parallaxes et mouvements propres à un niveau de précision sans précédent. Aujourd'hui, **Gaia** a rendu publics deux catalogues intermédiaires, DR1 et DR2. Le catalogue suivant est prévu en 2021 et sera suivi de la version finale associée à la mission nominale.

Le DR1 a été livré le 15 septembre 2016 : un relevé de position pour 1 milliard d'étoiles, un catalogue astrométrique incluant les parallaxes et les mouvements propres pour 2 millions d'étoiles brillantes, des étoiles variables et la réalisation d'un premier système de référence

avec les quasars dans le domaine optique. Le DR1 a déjà permis à lui seul plus de 300 publications dans des journaux à comité de lecture.

Le DR2 est quant à lui un catalogue astrométrique complet de 1,4 milliard de sources et de nombreux autres produits. Il a été livré le 25 avril 2018. Le DR2 inclut la position et la luminosité de 1,7 milliard d'étoiles, la parallaxe, le mouvement propre et la couleur de plus de 1,3 milliard d'étoiles, la vitesse radiale de plus de 7 millions d'étoiles, la température effective de plus de 100 millions d'étoiles, l'extinction due à la poussière de 87 millions d'étoiles, la position de 500 000 sources variables, et la position de 14 099 objets du système solaire.

Bien qu'encore à un stade intermédiaire, les données de **Gaia** ont d'ores et déjà permis une révolution dans de nombreux domaines de l'astrophysique : la physique stellaire, le milieu interstellaire, la cinématique et l'histoire de la formation de notre galaxie. Elles ont permis la réalisation d'une carte 3D de la distribution des étoiles et du milieu interstellaire de notre galaxie. Le catalogue complet ouvrira de nombreuses perspectives par l'ajout notamment d'un catalogue d'étoiles binaires avec leurs orbites, la classification des étoiles variables, les résultats sur des systèmes planétaires, etc.



Fig. 3 : Le ciel de Gaia : carte réalisée à partir du catalogue d'étoiles.

© ESA
.....

1.2.3. Ondes gravitationnelles et événements multi-messagers et multi-longueurs d'onde

Depuis la première détection directe d'ondes gravitationnelles le 14 septembre 2015 par LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, USA), une nouvelle ère de notre compréhension de l'univers a débuté en physique fondamentale, en astrophysique et en cosmologie. Cette première détection appelée GW150914 a mis en évidence la fusion de deux trous noirs ayant des masses de 29 et 36 masses solaires aboutissant à un trou noir de 62 masses solaires.

L'équivalent des trois masses solaires restantes a été libéré sous forme d'ondes gravitationnelles. Depuis cet événement fondateur de l'astronomie gravitationnelle, neuf autres événements de fusion de deux trous noirs ont été détectés (incluant aussi l'interféromètre au sol européen Virgo) avant fin 2017, dont sept impliquant également des masses de l'ordre de 20-40 masses solaires pour les progéniteurs. Ces détéctions de fusion de trous noirs de type stellaire de grande masse ont remis en question nos connaissances sur leur distribution en masse dans notre univers. En effet, les masses mesurées via des observations électromagnétiques (radio, infrarouge et rayons X) de systèmes binaires composés d'un trou noir et d'une étoile sont bien inférieures avec des valeurs maximales d'environ 15 masses solaires.

métaux lourds tels que du plomb et de l'or sont produits puis éjectés très loin de l'objet résultant.

L'émission initiale en rayons gamma combinée à la détection des ondes gravitationnelles a également permis de confirmer la relativité générale qui prédit que les ondes gravitationnelles doivent se déplacer à la vitesse de la lumière. Enfin, cet événement peut être considéré comme une sirène standard qui permet une mesure géométrique de la constante de Hubble, très complémentaire des mesures cosmologiques et astrophysiques.

Cet événement a été cité par plus de 1500 publications internationales en 15 mois.

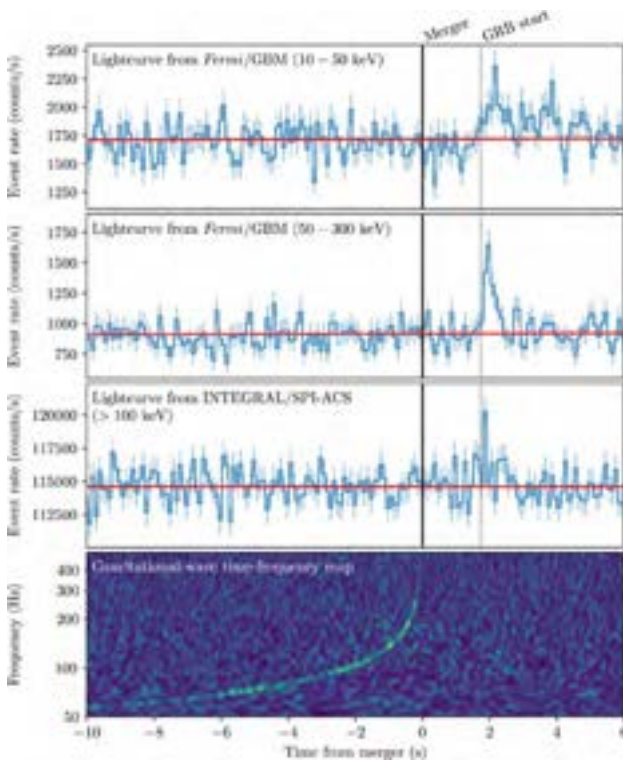


Fig. 4 : Première détection multi-messagers de la fusion de deux étoiles à neutrons : les ondes gravitationnelles détectées au sol par Ligo/Virgo (GW170817) précèdent de 1,7s le sursaut gamma GRB170817A détecté par les satellites Fermi et Integral.

© NASA, ESA, Ligo/Virgo
.....

De plus, la détection d'ondes gravitationnelles de la fusion de deux étoiles à neutrons en août 2017 (GW170817) a été la première à être détectée également dans le domaine électromagnétique (de la radio aux rayons gamma). Le sursaut gamma court détecté parallèlement par **Fermi** et **Integral** a démontré qu'au moins une partie de ce type de sursauts gamma seraient bien dus à la fusion de deux étoiles à neutrons, confirmant ainsi les prédictions théoriques. Cette fusion a créé un objet ultra-dense produisant un phénomène initial de "boule de feu" suivi par une kilonova. Lors de la fusion, des

2. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

2.1. SPECTROSCOPIE À HAUTE RÉOLUTION DANS LES DOMAINES SUBMILLIMÉTRIQUE, INFRAROUGE, ULTRAVIOLET ET X

Ces moyens observationnels sont nécessaires pour comprendre l'évolution de la matière par la connaissance de sa composition et de sa dynamique. Observer ainsi les galaxies lointaines dans l'infrarouge permet d'appréhender les galaxies dans leurs stades initiaux. On dispose alors du point de départ pour leur évolution postérieure. Observer les galaxies proches dans l'ultraviolet permet d'accéder aux détails de l'émission de l'environnement des galaxies. On accède alors aux processus dynamiques qui ont opéré durant l'assemblage de la galaxie et surtout aux échanges entre les galaxies et le gaz diffus qui l'entoure.

Dans ce cadre, le groupe renouvelle son fort soutien à la mission **Athena** associée à l'univers chaud et énergétique qui est toujours identifié comme prioritaire depuis plusieurs exercices de prospectives. L'univers chaud se réfère à la matière ordinaire chauffée à des températures supérieures à $\sim 10^5$ K. Elle représente environ 50% du contenu total en baryons de l'univers. Parmi ces baryons, ceux chauffés au-dessus de 10^7 K sont situés dans les grands puits de potentiel de matière noire, les groupes et les amas de galaxies. Ceux à des températures en deçà (et jusqu'à 10^5 K) suivent la distribution de matière noire qui tracent les grands filaments for-

mant la toile cosmique. Ce gaz chaud distribué à très grandes échelles est le lieu de processus physiques complexes gouvernant l'assemblage de ces grandes structures, par exemple la rétroaction de la formation et de l'évolution des trous noirs supermassifs, qui a un impact jusqu'aux échelles cosmiques. Ces processus énergétiques génèrent l'émission importante de rayons X par le gaz chaud dans les grandes structures et par l'accrétion de matière sur les trous noirs. La fenêtre observationnelle des longueurs d'ondes X est donc nécessaire pour l'observation de l'univers chaud et énergétique. La mission **Athena** permettra ainsi de répondre aux grandes questions fondamentales concernant les mécanismes d'échange de matière et d'énergie aux différentes échelles, des étoiles aux trous noirs supermassifs et aux amas de galaxies : comment la matière ordinaire s'est-elle assemblée à grande échelle pour former les grandes structures que nous observons aujourd'hui ? Comment les trous noirs supermassifs croissent-ils et façonnent-ils l'univers ?

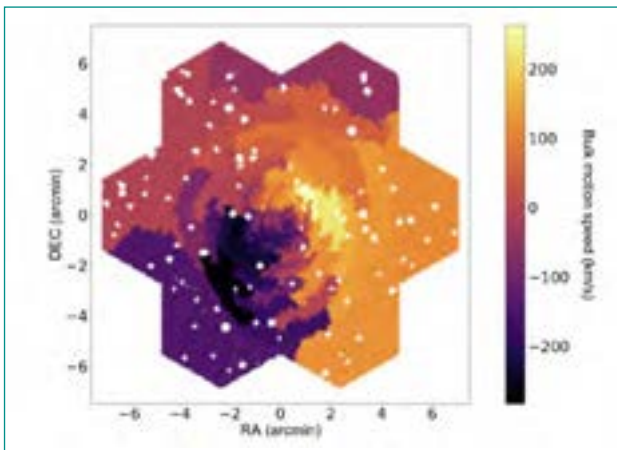


Fig. 5 : a) Simulations d'observation avec X-ifu/Athena : champ des vitesses du gaz chaud d'un amas de galaxie (gauche)
 b) spectre d'un trou noir binaire de 120 secondes seulement (droite).

© Cucchetti et al., 2018, A&A et D. Barret, 2019.

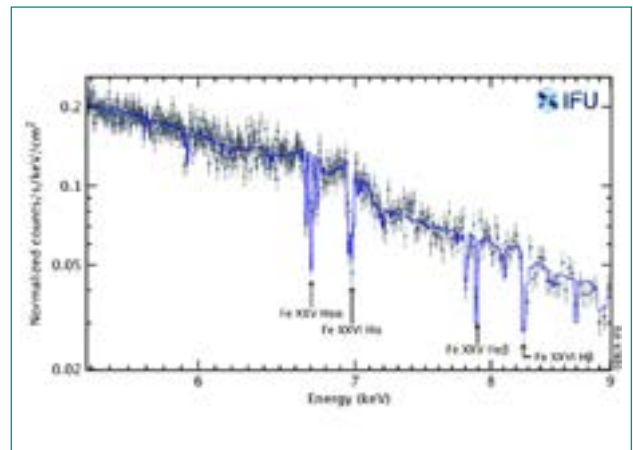
Le groupe soutient également fortement la mission infrarouge **Spica**, candidate pour M5, avec l'instrument Safari (spectroscopie) et l'instrument B-Bop (imagerie polarisée). La mission **Spica** couvre le domaine de l'infrarouge moyen au lointain (~12-350 μm) avec une sensibilité attendue limitée par le fond diffus infrarouge, soit environ deux ordres de grandeur meilleure que les observatoires ayant volé jusqu'à présent.

Cet observatoire, combinant imagerie et spectroscopie, a pour but de répondre à un large ensemble de questions scientifiques telles que : quels processus physiques régulent la formation des étoiles et la croissance des trous noirs dans l'évolution des galaxies ? Comment les métaux et la poussière sont-ils produits

et détruits ? Quelles sont l'origine et la composition de la première poussière ? Comment les nuages de gaz primordiaux se sont-ils effondrés dans les premières galaxies et les premiers trous noirs ? Quand et comment le gaz passe-t-il des disques aux systèmes planétaires émergents ? Comment les glaces et les minéraux évoluent-ils à l'ère de la formation des planètes, en tant que premiers condensats des systèmes solaires ? Quels sont les rôles des champs magnétiques et de la dissipation de la turbulence au début des processus de formation des étoiles ?

Certains objectifs concernent également le groupe exobiologie, exoplanètes et protection planétaire car Spica permettra de caractériser les conditions physiques dans et autour des disques protoplanétaires et, notamment, tracera en leur sein la ligne critique qui sépare la vapeur d'eau de la glace.

Une participation à **OST**, l'une des cinq missions en lice pour être la prochaine mission *flagship* de la NASA, ou



à **HSTDM** à bord de la station spatiale chinoise pourraient être des opportunités intéressantes.

2.2. POLARIMÉTRIE DANS LES DOMAINES SUBMILLIMÉTRIQUE, INFRAROUGE, ULTRAVIOLET ET X

Cette technique permet d'appréhender le rôle du champ magnétique dans différents systèmes ainsi que les conditions initiales de notre univers. La mesure de la polarisation tensorielle du fond diffus cosmologique permet à la fois de mieux connaître la phase d'inflation, son énergie notamment, ainsi qu'une meilleure compréhension de l'histoire de la réionisation. Ce domaine étant nouveau, il offre un potentiel de découvertes majeures sur la structure magnétique des galaxies. La possibilité de détecter la polarisation du fond diffus infrarouge permettra de mieux appréhender l'histoire

de la formation stellaire. Dans le domaine ultraviolet, la spectropolarimétrie donne accès à la formation et à l'évolution des étoiles et de leurs planètes à travers les vents et les magnétosphères. À l'extrémité du spectre électromagnétique, la polarisation X des sources compactes permet un accès unique à la matière soumise à des conditions extrêmes de densité, de gravité ou de champ magnétique.

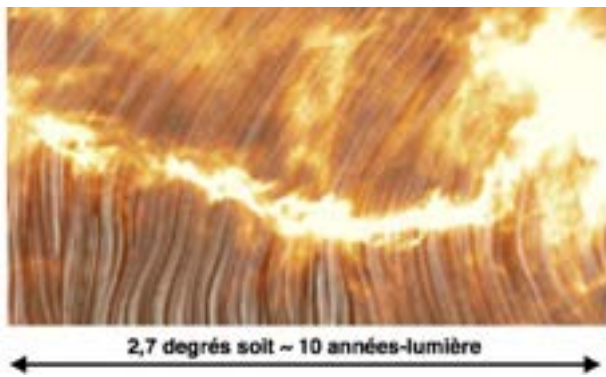


Fig. 6 : Lien magnétique entre les filaments de faible densité et les filaments denses où se forment les étoiles.

© ESA/Collaborations Planck et Herschel

L'instrument B-Bop de la mission **Spica** permettra d'obtenir des cartes de I, Q et U, soit l'observation simultanée de la puissance totale, l'intensité polarisée et l'angle de polarisation. Ces données permettront de contraindre le rôle important du champ magnétique dans la formation des structures filamentaires du milieu interstellaire, son impact à grande échelle dans les environnements de cœurs pré-stellaires, les propriétés polarimétriques, la nature et les propriétés d'alignement de la poussière interstellaire dans le FIR, ainsi que l'organisation du champ magnétique à plus grande échelle pour les galaxies proches. La polarimétrie de l'émission des poussières dans les nuages interstellaires proches permettra de caractériser pour la première fois la morphologie et la force du champ magnétique aux échelles critiques du déclenchement de l'effondrement du gaz en étoiles et planètes au sein des filaments moléculaires. La spectroscopie permettra en plus d'éclaircir la nature du gaz turbulent, et les mécanismes de dissipation d'énergie.

Dans ce domaine également, le groupe soutient la mission d'opportunité **Litebird** dont l'objectif est la détection, ou l'obtention d'une limite de l'ordre de 10^{-3} sur l'amplitude, des modes B primordiaux de la polarisation du fond diffus cosmologique. L'obtention de ces cartes de tout le ciel polarisé dans de multiples fréquences avec une sensibilité de plus d'un ordre de grandeur meilleure que celle de **Planck** devrait permettre de contraindre les modèles d'inflation. Cette mesure s'accompagnera de celle des modes E à grande échelle angulaire afin d'obtenir une mesure de l'épaisseur optique

Tau limitée par la variance cosmique, que ce soit pour l'intérêt de ce paramètre lui-même ou pour briser la dégénérescence avec d'autres paramètres, la masse des neutrinos notamment, de cartographier le champ magnétique galactique ou encore de contraindre de la physique non-standard avec des limites sur l'annihilation de matière noire par exemple. Cette mission est à l'interface de l'astrophysique et de la physique fondamentale puisque le rayonnement fossile est un accès unique à la physique à très haute énergie.

La compréhension des mécanismes gouvernant l'évolution de l'univers dans son ensemble nous amène aux questions sur l'interaction entre les galaxies et le milieu intergalactique. Comment les galaxies sont-elles alimentées en gaz au cours du temps ? Comment dissipent-elles l'énergie mécanique libérée par leur formation, et comment construisent-elles leur moment cinétique ? Comment les galaxies et noyaux actifs maintiennent-ils l'ionisation du milieu intergalactique ? Ces questions se complexifient actuellement, avec la prise en compte du rôle des champs magnétiques et des rayons cosmiques dans la circulation du gaz et la formation d'étoiles. Pour y répondre, le groupe soutient une participation à la mission **Luvoir** si elle devient la prochaine mission *flagship* de la NASA.

À encore plus haute énergie, la mission d'opportunité **eXTP** développée par la Chine est également à considérer.

2.3. MULTI-MESSAGERS, ALERTES ET SUIVI TEMPOREL

Cet arsenal est convoqué pour accéder à la dimension temporelle. Il est nécessaire de disposer d'une capacité continue d'imagerie du ciel à haute énergie, des X mous aux gammas, pour comprendre les mécanismes des phénomènes transitoires violents. Astucieusement, les sursauts gamma très distants permettent d'éclairer les âges sombres en donnant accès aux premières galaxies ordinaires qui restent inaccessibles par d'autres moyens. L'étude de l'univers non-thermique est la voie d'accès indispensable pour l'étude des phénomènes astrophysiques extrêmes. Par exemple, ce type d'observations permet de mieux cerner l'origine des éléments chimiques formés dans les ondes de choc. Enfin les ondes gravitationnelles basses fréquences, inaccessibles depuis la Terre, permettront de compléter l'histoire de la formation et de l'évolution des trous noirs stellaires et supermassifs par l'étude leurs fusions.

Dans ce cadre le groupe soutient notamment la mission **Theseus**, candidate pour M5. Ses objectifs scientifiques portent à la fois sur l'évolution cosmologique de l'univers et la compréhension physique des phénomènes transitoires violents. Il s'agit d'une part de dé-

couvrir l'univers des premières générations d'étoiles par l'observation des sursauts gamma jusqu'à $z = 10$: ces observations révéleront l'évolution chimique de l'univers, l'histoire de la formation stellaire et les sources de la réionisation ($z \sim 7$ à 9) et d'autre part de surveiller l'univers transitoire profond en rayons X pour découvrir la contrepartie électromagnétique des sources d'ondes gravitationnelles et de neutrinos et déclencher des alertes pour les observatoires aux autres longueurs d'ondes. L'observation profonde et détaillée des phénomènes transitoires doit aider à comprendre la physique de l'univers violent : sursauts gamma, magnétars, explosion de supernovas (4/an), novas (250/an), événements de rupture par effet de marée (50/an) ...

Le groupe renouvelle également son soutien à toute opportunité pour l'observation de l'univers dans le domaine du MeV afin de comprendre les propriétés des jets relativistes telles que leur composition, leur émis-

2.4. RECHERCHE ET TECHNOLOGIE

Les missions en phase 0 ou A nécessitent la poursuite des efforts engagés : dilution à cycle fermé (**Litebird**), équipement de test pour télescope et instrument refroidis (**Litebird**, **Spica**), détecteurs dans les domaines submillimétriques ou infrarouge avec polarisation ou spectroscopie dans le pixel (**Theseus**, **Spica**), spectropolarimètre dans l'ultraviolet et traitement de surface pour le visible et l'ultraviolet (**Luvoir**), microcalorimétrie X et chaîne de détection basse consommation à haute énergie notamment (nanosatellite).

De plus, le groupe soutient fortement la mise en place d'une nouvelle R&T pour un spectromètre à transformée de Fourier à basse température, tel que recommandé par la feuille de route sur le CMB. Le rayonnement fossile contient encore des informations, aujourd'hui inac-

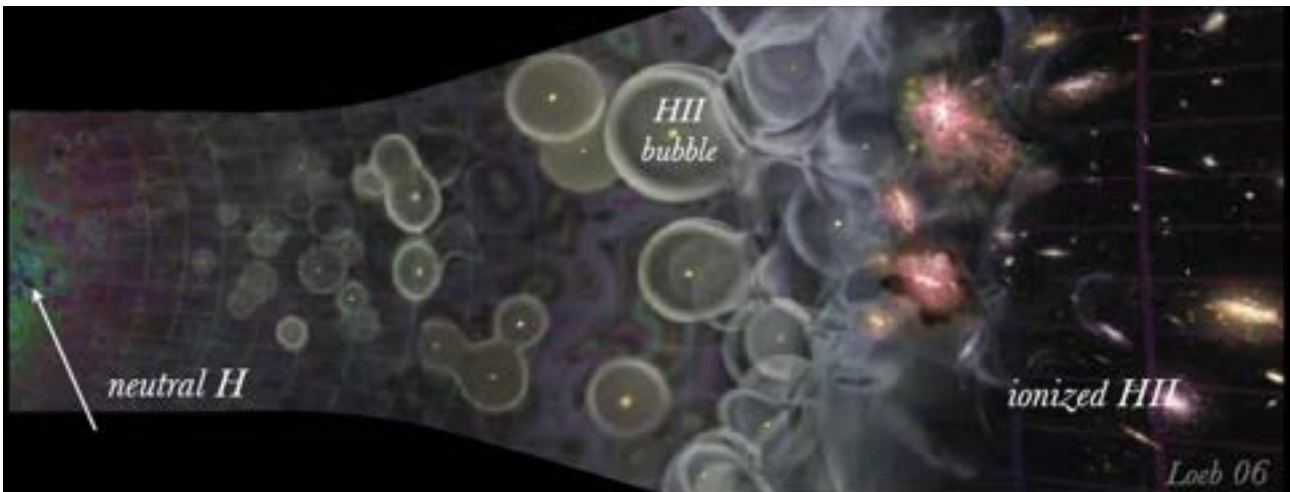


Fig. 7 : Illustration des âges sombres et de la phase de réionisation, entre l'émission du CMB et les galaxies en pleine production stellaire.

© Proposition Theseus
.....

sion, l'accélération de particules, afin de caractériser les propriétés des rayons cosmiques de basse énergie et l'origine des positrons des régions centrales de la galaxie, et mieux contraindre l'enrichissement chimique galactique et la physique des supernovas. En ce qui concerne le ciel transitoire, la mission chinoise **Einstein probe** est une opportunité à envisager.

Même si la mission **Lisa** est associée en premier lieu au groupe physique fondamentale, elle est de premier plan également pour l'astrophysique par l'accès unique qu'elle permet à l'histoire de la formation des trous noirs supermassifs par fusions successives : le taux d'événements en fonction du temps sera une nouvelle sonde cosmologique et un élément essentiel de l'évolution des galaxies. De plus, la détection des dizaines de milliers de naines blanches binaires galactiques va contraindre les scénarios d'évolution stellaire des systèmes binaires.

cessibles mais uniques. Afin de se préparer aux futures opportunités pour une mission d'étude des distorsions spectrales du fond diffus cosmologique, cette R&T est cruciale.

Enfin le groupe soutient le développement de détecteurs haute énergie adaptés aux nanosatellites qui offrent un accès souple à tout l'espace, comme les ballons stratosphériques, mais avec la possibilité de vols de plusieurs mois ou années. L'inconvénient est l'extrême limitation en taille et en poids. Si certains sujets d'étude ne peuvent s'accommoder de ces contraintes, c'est un choix pertinent pour le suivi multi-longueurs d'onde du ciel transitoire avec un retour scientifique garanti pour un coût bien inférieur à celui d'un satellite standard.

2.5. DONNÉES ET ACCOMPAGNEMENT SCIENTIFIQUE

La complexité des analyses s'illustre bien avec la reconstruction de la carte du potentiel gravitationnel d'après la déformation des galaxies par **Euclid** pour contraindre à la fois les propriétés de l'énergie noire et tester la loi de la gravitation aux plus grandes échelles. Il faudra extraire la forme et le *redshift* photométrique de centaines de millions de galaxies en combinant les images spatiales d'**Euclid** et des images sol de plusieurs télescopes dans différentes bandes de longueurs d'onde, avec les effets de confusion et tous les effets systématiques propres à chaque instrument. Des méthodes d'apprentissage automatique sont en développement, semblent très prometteuses mais l'erreur associée à la mesure est très délicate à estimer alors que la précision visée est de quelques pourcents sur l'équation d'état de l'énergie noire. Le traitement des images, la combinaison des données et l'estimation des paramètres cosmologiques sont des processus complexes qui s'appuient sur des simulations lourdes. Ainsi, si les mesures instrumentales sont certes la base, elles sont très loin d'être l'aboutissement d'une mission.

La pertinence de l'analyse multi-longueurs d'onde, de la radio aux gamma, est particulièrement flagrante dans l'étude du ciel transitoire. La synergie sol-espace est primordiale. Le sol permet l'utilisation de grands télescopes avec une instrumentation parfois « lourde » ou de nombreux télescopes plus simples, alors que l'espace donne accès à l'ensemble du spectre électromagnétique, tout le temps, pour une très large partie du ciel parfois. Si la complémentarité instrumentale est évidente, l'accès aux données est un enjeu important. Le changement d'échelle attendu, de quelques alertes par mois ou semaine à des centaines de milliers par nuit d'ici quelques années, impose un accès efficace pour un usage optimal des données.

Le CNES doit accompagner les projets jusqu'à leur phase finale, l'accompagnement scientifique est crucial. Il doit inclure aujourd'hui la formation et l'équipement de la communauté pour l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique. Il est également indispensable de ne pas sous-estimer les besoins en simulations, dans la préparation de la mission et dans l'analyse et l'interprétation des données. **Euclid** et **Plato** notamment seront fortement confrontés à ces exigences. Les segments sol doivent faire face aux défis associés au volume de données et, surtout, à leur accessibilité effective. Que les données soient publiques est nécessaire mais non suffisant. La pérennisation des données, la documentation associée et la facilité d'accès sont autant d'aspects essentiels. À l'heure des multi-longueurs d'onde, multi-messagers et des phénomènes transitoires, seront concernés très prochainement **Euclid** et **Svom**.

Le cadre indiqué correspond au cadre de réalisation principal envisagé. Le type de contribution est associé à l'ampleur de l'investissement du CNES envisagé dans ce cadre.

Le groupe astronomie et astrophysique apporte également son soutien à la mission L3 **Lisa** portée par le groupe physique fondamentale qui permettra de mesurer les ondes gravitationnelles de basses fréquences.

3. CONCLUSION

La prochaine génération d'instruments, avec l'extension des capacités d'observation en termes de polarimétrie, de résolution spectrale ou de résolution temporelle, permettra d'accéder aux détails de la physique d'objets lointains ou complexes. Par ailleurs, pour certaines observations qui ne nécessitent ni grand miroir ni cryogénie, le développement des nanosatellites peut être une réelle opportunité, en complément de missions plus classiques.

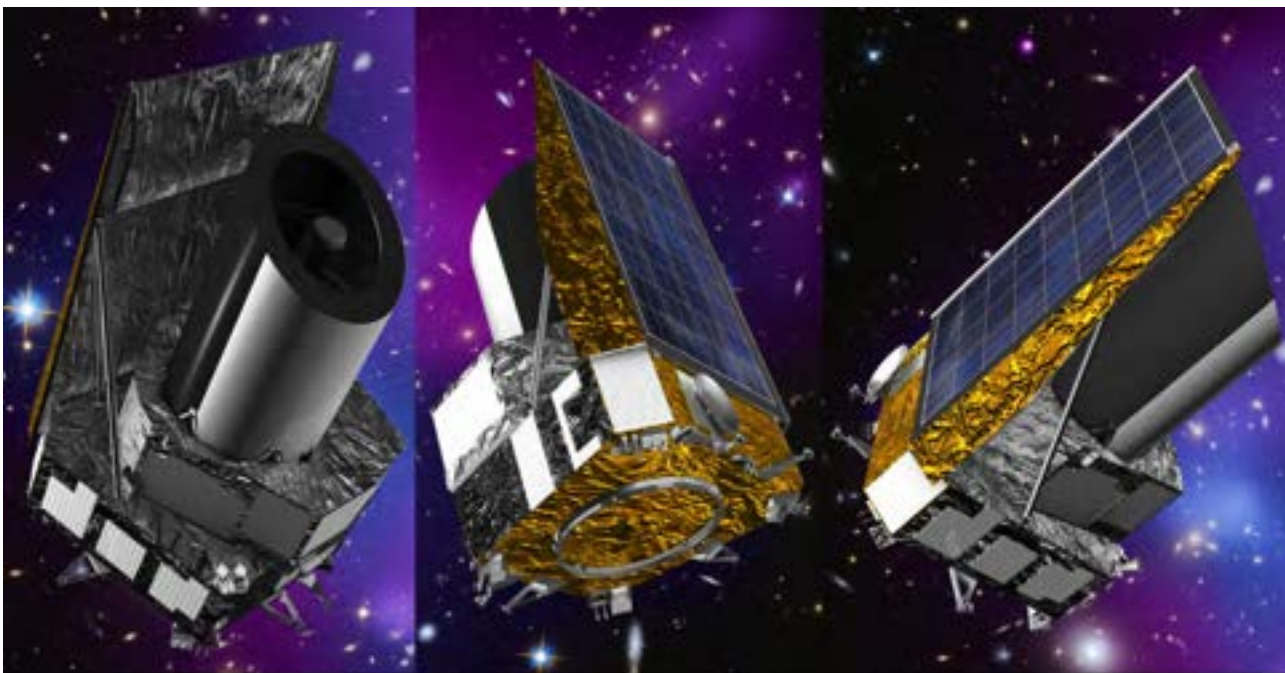
Le domaine de l'astrophysique s'apprête également à vivre une révolution en termes de traitement des données avec l'intégration des techniques d'apprentissage automatique. La communauté doit être formée et équipée pour bénéficier pleinement de ces possibilités. La préparation des analyses en amont, puis l'exploitation optimale des données, requièrent un accompagnement scientifique à la hauteur de l'investissement instrumental et des enjeux scientifiques.

Le groupe thématique astronomie et astrophysique couvre de nombreux domaines de recherche, comme en attestent les quatre programmes nationaux qui lui sont associés. Les grands observatoires sont à même de répondre à de multiples objectifs scientifiques, ils peuvent ainsi satisfaire les priorités d'une très large communauté. Au contraire, certains objectifs sont des priorités pour une communauté spécifique et nécessitent des instruments dédiés. Les priorités établies par le groupe visent à proposer un équilibre entre ces deux approches de façon à répondre au mieux aux grandes questions scientifiques actuelles.

(voir le tableau récapitulatif ci-après)

3.1. SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

Type de mesure/d'observables	Cadre de réalisation	R&T associée	Thème scientifique
L'univers en spectroscopie haute résolution X	ESA - L2 / majeure		<i>Formation et évolution des groupes et amas de galaxies, trous noirs supermassifs et leur rôle dans l'évolution de l'univers, baryons manquants.</i>
L'univers en spectroscopie et polarimétrie du MIR au FIR	ESA - M5 / majeure	Détecteurs submm ou IR avec polarisation ou spectroscopie dans le pixel	<i>Champ magnétique et formation des structures en IR. Milieu interstellaire galactique et extragalactique.</i>
Relevé du ciel polarisé en submillimétrique	JAXA - MoO / substantielle	Spectromètre à transformée de Fourier à basse température ; dilution à cycle fermé	<i>Physique de l'inflation, univers primordial, réionisation et avant-plans galactiques polarisés</i>
L'univers transitoire en X très grand champ et en NIR	ESA - M5 / substantielle	Détecteurs haute énergie adaptés aux CubSat ; microcalorimétrie X	<i>Phénomènes transitoires violents. Sonder la fin des âges sombres et les premières galaxies.</i>
L'univers à haute résolution spectrale en Infrarouge ou ultraviolet	NASA - flagship / modérée	Spectropolarimètre UV	<i>Échange de matière et d'énergie des étoiles aux galaxies au cours de l'évolution cosmique</i>
L'univers dans le domaine du MeV	MoO / modérée	Chaîne de détection basse consommation à haute énergie	<i>Univers non-thermique, origine des rayons cosmiques, phénomènes extrêmes, nucléosynthèse stellaire</i>



Vue d'artiste du satellite Euclid.

© ESA
.....

GROUPE DE TRAVAIL

THÉMATIQUE SYSTÈME SOLAIRE

Sébastien Charnoz, Thierry Fouchet, Olivier Gasnault, Olivier Groussin, Benoit Langlais, Ronan Modolo, Franck Montmessin (président), Olivier Mousis, Cathy Quantin-Nataf, Francis Rocard (thématicien), Violaine Sautter, Michael Toplis, Matthieu Vincendon..

1. LES GRANDES QUESTIONS SCIENTIFIQUES EN PLANÉTOLOGIE

Les grandes questions traitées en sciences planétaires s'appuient sur les travaux de prospective de la NASA (*Decadal Survey*, 2011) et de l'ESA (*Cosmic Vision*, 2005 puis 2015). A ce titre, l'étude du système solaire s'organise autour de trois grandes questions :

QI. Quelle est l'origine du système solaire & de la matière primitive ?

Ce sont les 100 premiers millions d'années du système solaire dont il est question ici, depuis la formation des objets du système solaire, il y a 4,56 milliards d'années, à partir de la nébuleuse primitive jusqu'aux premières étapes qui ont vu nombre de processus à l'œuvre pour poser les bases de l'architecture du système solaire et où s'est incorporée de la matière interstellaire dont la nature reste à élucider. Ces processus ont fait naître deux types de planètes de part et d'autre de la « ligne des glaces » : à l'intérieur, les planètes telluriques et à l'extérieur, les planètes géantes. Pour les telluriques, se pose la question des mécanismes physico-chimiques qui ont présidé à leur accréation, puis leur différenciation et enfin à la formation de leur atmosphère. Pour les géantes, on s'intéresse aux conditions de leur agrégation, et à la formation de leurs anneaux et de leurs satellites. Les résidus de cette période d'accréation sont les petits corps rocheux et glacés qui peuplent tout le système solaire.

QII. Quelle a été l'évolution et quelles sont les propriétés actuelles des planètes ?

Il s'agit ici de retracer les principales étapes de l'évolution du système solaire après sa formation qui l'ont amené progressivement au cours du premier milliard d'années à sa configuration actuelle. C'est dans cette

période que le système solaire a sans doute connu ses événements les plus perturbateurs (migration des géantes gazeuses, bombardement tardif... ou pas) qui ont fait probablement interagir les deux familles de corps planétaires et où les scénarios de l'évolution dynamique se confrontent (modèle de Nice, Grand Tack). C'est aussi ici que l'on peut introduire le principe de planétologie comparée, car c'est au cours de cette période que se sont dessinés les chemins d'évolution, distincts pour chaque corps, qui ont créé les disparités de caractéristiques physico-chimiques entre les planètes au sein même des deux grandes familles. L'une des questions centrales pour les telluriques concerne les raisons qui ont fait aboutir à la restriction de la zone habitée du système solaire au tracé de l'orbite terrestre, faisant de Mars un désert glacé et de Vénus une fournaise infernale. Pour les géantes, la question de leurs interactions (planètes – satellites – anneaux – magnétosphères) reste la plus prégnante en ce qu'elle pourrait servir de laboratoire pour comprendre les processus dynamiques à l'œuvre dans le système solaire et dans les systèmes planétaires lointains.

QIII. Où se trouvent les environnements habitables et comment le sont-ils devenus ?

Autant la question de la formation du système solaire nous amène aux frontières de l'astrophysique, autant la problématique de l'habitabilité amène la planétologie aux frontières de l'exobiologie. Si le biologiste caractérise le vivant, son émergence et sa subsistance ; le planétologue lui se consacre d'abord à identifier les conditions et les processus environnementaux présidant à l'émergence et à la préservation de la vie. En premier lieu, se pose la question du matériau primitif, et donc des sources primordiales et contemporaines de la matière organique. Ensuite vient la question des environnements géochimiques et climatiques fournissant les ingrédients nécessaires pour que la vie puisse prendre racine, impliquant de s'intéresser à l'origine de l'eau et aux éventuels mécanismes de transfert de matière (eau et matière organique) au sein du système solaire. Les processus d'évolution traités en **QII**. trouvent ici leur extension la plus importante car elles conçoivent le berceau originel à partir duquel une activité biologique pourra s'établir. Pour les planètes telluriques, seules

Mars et Vénus semblent pertinentes pour tenter de répondre à ces questions car si leur destin a divergé de celui de la Terre, la possibilité que ces corps aient un jour abrité la vie reste ouverte. Pour les géantes, ce sont plutôt les satellites auxquels on est amenés à s'intéresser car rien n'interdirait à certains, tels Europe ou Encelade, d'avoir créé et/ou d'abriter des niches écologiques en leur sein et de trouver sous leur épaisse couche de glace, d'éventuels organismes évoluant dans ces mondes océans.

2. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2014

Le bilan ci-dessous est structuré en sous-thèmes qui reprennent les principaux éléments de la taxonomie des sciences planétaires ; à savoir les différents corps telluriques, les géantes et les petits-corps. Ces derniers ont été choisis pour débiter cette synthèse des résultats en raison de leur intense actualité.

2.1. PETITS CORPS (ASTÉROÏDES, COMÈTES, TROYENS, CENTAURES ET OBJETS TRANS-NEPTUNIENS)

La période 2014-2019 constitue un âge d'or pour les petits corps : cinq missions spatiales ont exploré les géocroiseurs Ryugu et Bennu, les planètes naines Cérés et Pluton, et bien sûr la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko, alors que **Gaia** a dans le même temps identifié 14 000 nouveaux petits objets. Au sein de ces missions, la communauté française affiche un bilan scientifique et une visibilité remarquables, consolidant sa deuxième place au plan mondial.

2.1.1. Rosetta

La sonde **Rosetta** et son atterrisseur **Philae** ont constitué le point d'orgue du dernier quinquennal, mobilisant l'ensemble de la communauté française des petits corps. L'exploration in situ de 67P, pendant 2 ans, a permis de faire des avancées majeures dans notre compréhension des comètes.

S'agissant de la composition de la comète, **Rosetta** a identifié une grande variété de volatils, ajoutant plusieurs dizaines de molécules (surtout organiques) à la liste des composés connus. La forte abondance relevée

pour O_2 (~4 %) est surprenante, vu sa forte réactivité et sa faible abondance interstellaire, tout comme la détection inexplicquée du phosphore atomique. La découverte de la glycine, le plus simple des acides aminés, étaye l'idée que les comètes ont pu fournir à la Terre des molécules impliquées dans l'émergence du vivant.

Pour la surface du noyau, **Rosetta** a mis en évidence à une couverture globale potentiellement constituée de sels organiques d'ammoniums associés à des acides carboxyliques, alors que le faible albédo serait dû à des poly-aromatiques sombres combinés à des minéraux opaques (FeS).



Fig. 1.1 : La comète 67P et ses jets proéminents vus par **Rosetta**.

© ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA*
.....

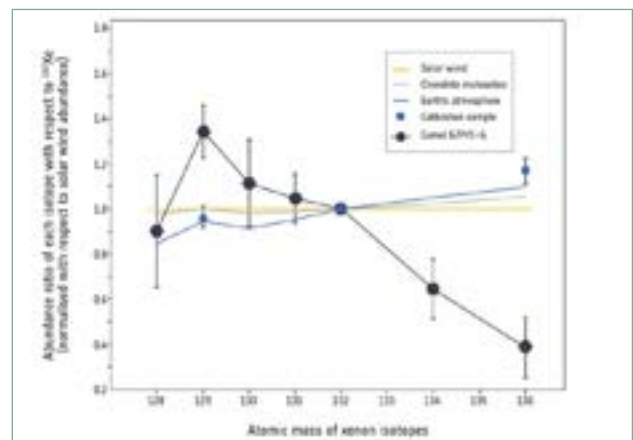


Fig. 1.2 : Abondances relatives des isotopes du Xénon en comparaison d'autres références.

© ESA/Rosetta
.....

La composante réfractaire a pu être étudiée grâce à l'analyse des particules de poussière venant du noyau. Constituées pour moitié de matière organique macromoléculaire, elles pourraient avoir une origine commune de celle de la matière organique insoluble des chondrites carbonées. La matière cométaire se présente sous forme de grains multi-échelles issus d'une accréation hiérarchique.

L'apparence bilobée du noyau semble le résultat de l'accréation de deux planétésimaux et sa faible densité (530 kg/m^3) implique une porosité de l'ordre de 70-80%. L'activité du noyau se caractérise par un dégazage continu qui engendre une coma diffuse, permanente et marquée par des jets visibles des heures durant et émis par des régions riches en givre de CO_2 ou d' H_2O (cf. Fig. 1-gauche). Ce dégazage entraîne une érosion progressive trahie par l'effondrement de falaises, l'apparition de ridules dans les zones lisses, etc. Ces processus restent superficiels car l'intérieur du noyau est isolé du chauffage solaire par sa faible inertie thermique.

Compte tenu de l'orbite de 67P et de notre connaissance des rapports D/H pour d'autres comètes, un rapport D/H proche de celle des océans terrestres ($1,5 \times 10^{-4}$) était attendu, mais **Rosetta** a révélé la valeur la plus forte pour une comète ($\sim 5,4 \times 10^{-4}$). La statistique reste trop faible pour conclure sur l'apport cométaire de l'eau terrestre mais les mesures isotopiques du xénon offrent des contraintes fortes : l'anomalie isotopique du xénon de l'atmosphère terrestre (le U-Xénon), au regard de celle de 67P, ne s'explique que si la composition de l'atmosphère terrestre primitive était à 20% cométaire et 80% chondritique. Les comètes de type 67P n'auraient donc que faiblement contribué à la formation de la Terre (cf. Fig. 1-droite).

Même si l'origine de 67P reste débattue, la comète pourrait s'avérer être un objet primordial peu altéré. L'hypothèse sur la collision entre deux gros objets ($> 100 \text{ km}$) de la ceinture de Kuiper est maintenant écartée.

2.1.2. New Horizons

New Horizons a survolé Pluton, Charon et ses quatre autres petits satellites le 14 juillet 2015 puis a survolé en 2019 un objet étonnant : Ultima Thulé. Elle a révolutionné notre compréhension de Pluton, ouvrant des perspectives pour tous les objets trans-neptuniens. Les équipes françaises impliquées ont contribué à la caractérisation des glaces en surface ainsi qu'à l'étude théorique du climat de Pluton.

Grâce à ses instruments, **New Horizons** a révélé un monde actif et complexe entouré d'une atmosphère composée d'azote (99,5%, 1Pa) avec un peu de CH_4 (0,5%) et du CO (0,05%). Ces composés sont en équilibre de phases solide-gaz, formant des glaciers et des



Fig. 2 : Pluton vue par New Horizons.

© NASA
.....

givres de N_2 , CH_4 , CO en surface. Cette atmosphère est le siège d'une photochimie complexe qui conduit à la formation de brumes de polymères organiques s'organisant en couches à des altitudes variées et s'accumulant en surface. À l'équateur, le bassin Sputnik Planitia, large de 1000 km, est recouvert de glace d'azote d'où émergent des « icebergs ». Ailleurs, de vastes régions sont couvertes d'épais glaciers de CH_4 , tandis qu'un givre de CH_4 recouvre les moyennes/hautes latitudes (Fig. 2).

2.1.3. Dawn

Dawn a exploré la planète naine Cérès, le plus gros objet de la ceinture principale d'astéroïdes, mélange de glace et de roche. Sa surface est fortement cratérisée et présente des singularités comme les taches brillantes du cratère d'Occator ainsi qu'une montagne haute de 4 km, Ahuna Mons. On retient l'omniprésence d'argiles riches en magnésium et en azote sous forme d'ammoniaque, qui atteste d'un fort degré d'altération chimique de la surface et d'une contribution notable de matière du système solaire externe. Les données géophysiques révèlent un « noyau » rocheux plus dense que la croûte externe, que l'on suppose plus riche en eau. La minéralogie d'Occator et des flancs d'Ahuna Mons est dominée par du carbonate de soude, résultat probable de l'évaporation d'une saumure. La détection de chaîne de carbones aliphatiques en surface suggère que le carbone a été protégé de l'érosion spatiale, impliquant que celui-ci soit aussi présent à l'intérieur et donc déjà présent lors de sa formation, et a été altéré ensuite par la circulation d'eau. La couverture de poussière fine de pyroxène découverte avec le télescope aéroporté Sofia de la NASA conjuguée aux argiles riches en ammoniac identifiés par **Dawn** feraient de Cérès un

objet issu du système solaire externe ayant migré par la suite.

2.1.4. Hayabusa 2, Osiris-Rex et Gaia

Hayabusa 2 s'est positionnée autour de l'astéroïde Ryugu en août 2018, et son atterrisseur franco-germanique Mascot s'est posé à la surface en octobre 2018. Ryugu s'avère être un astéroïde possédant un bourrelet équatorial. Il est recouvert de nombreux rochers et présente un terrain consolidé. Ryugu possède une ressemblance frappante avec l'astéroïde Bennu, que la mission **Osiris-Rex** vient juste d'observer.

Depuis 2014, la mission **Gaia** observe le ciel pour mesurer la position et faire la spectrophotométrie des corps célestes, incluant petits corps. En 2018, 14 000 petits corps ont été ainsi identifiés, la plupart des astéroïdes, fournissant leur orbite précise (<1 mas) et permettant leur classification ainsi que l'étude de leur évolution dynamique.

2.2. MARS

Mars reste le corps le plus visité du système solaire avec sept missions sur la période 2014-2019. La France est la deuxième communauté mondiale pour l'exploration de Mars, participant activement à la moisson remarquable de données fournies par les missions **Mars Express**, **MRO**, **MSL/Curiosity**, **Maven**, **ExoMars/TGO** et maintenant **InSight**. Ce rayonnement est le résultat de l'implication de notre communauté dans l'exploitation et le développement d'instrumentations de pointe. Le dernier quinquennal a permis de progresser sur plusieurs questions posées lors de la dernière prospective : structure interne, habitabilité, histoire climatique, composition de l'atmosphère et de la surface ainsi que l'origine de son satellite Phobos.

2.2.1. Intérieur et surface de Mars

Le rayon du noyau est estimé entre 1300 et 1700 km. Il est suspecté être partiellement liquide mais n'engendre plus de dynamo. L'arrêt de celle-ci, entre 4,1 et 3,7 Ga, est à relier à un changement des conditions thermiques et/ou chimiques à l'interface noyau-manteau en interactions avec l'activité volcanique liée aux mouvements dans le manteau. Une nouvelle estimation de l'épaisseur de la croûte (<65 km) est sortie, plus cohérente avec les analyses du géoïde et les bilans géochimiques. La croûte primitive martienne serait ainsi proche des premiers continents terrestres, ce qu'**InSight** devrait pouvoir confirmer.

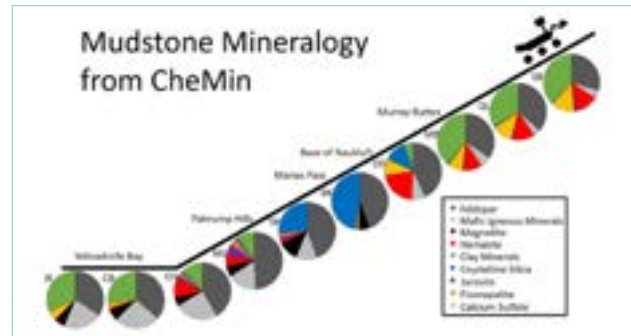


Fig. 3 : La diversité minéralogique du cratère Gale rapportée par MSL.

© NASA/JPL
.....

La combinaison des données orbitales et des analyses pétrographiques in situ donnent accès aux conditions de formation et révèle une grande diversité de processus physico-chimiques (différenciation des roches ignées, hydrothermalisme, évaporation, pédogénèse, etc.). **MSL** nous a ainsi fait découvrir la complexité pétrologique et minéralogique des roches mères comme leur mode d'altération qui varie sur une échelle allant de la centaine de mètres au kilomètre. Avant même d'arriver aux couches d'argiles du Mont Sharp vues depuis l'orbite, les sédiments au fond du cratère Gale renferment jusqu'à 28% d'argiles lardées de sulfates de calcium symptomatiques d'un environnement lacustre datant de 3,5 milliards d'années (Fig. 3).

S'il est acquis que de l'eau a coulé et subsisté en surface pendant le Noachien et l'Hespérien, la question d'une présence actuelle d'eau liquide a été ravivée par l'observation d'écoulements actifs, les *Recurring Slope Lineae* vers l'équateur, et par la découverte d'un lac souterrain sous le pôle Sud.

2.2.2. Chimie Organique

MSL a découvert dans l'argile sédimentaire de Gale les premières molécules organiques indigènes (de l'ordre du ppm). Cependant, ces molécules ont été transformées dans le circuit analytique de l'instrumentation du rover (chimie à chaud). Par conséquent, la nature des composés organiques natifs reste inconnue alors que la question de leur abondance, leur distribution spatiale et leur préservation est posée.

2.2.3. Atmosphère & cryosphère contemporaines

Mars Express, **MRO** et **Maven** ont approfondi l'étude climatique à l'échelle globale, avec une résolution spatiale de quelques kilomètres et temporelle de quelques jours, fournissant les paramètres essentiels : température en surface et dans la troposphère (<40 km), composition et dynamique des constituants atmosphériques (gaz, rapports isotopiques, aérosols), condensats saisonniers en surface, cartographie des glaces en sous-surface et d'eau liquide dans les régions polaires.

Avec **TGO** depuis avril 2018, une étape a été franchie pour la recherche des gaz traces (espèces hydrocarbonées & soufrées), relançant le débat sur l'existence du CH_4 martien avec une non-détection à un niveau 10 à 100 fois inférieur aux mesures de CH_4 faites par **MSL** dont l'un des pics a été corroboré par **Mars Express**.

En parallèle, la modélisation du climat martien, fleuron de la communauté française, fournit un outil incontournable pour la planification des missions et pour les projections paléo-climatiques du Noachien/Hespérien, période de l'histoire martienne a priori la plus « habitable ».

2.2.4. Magnétosphère/ionosphère

Sans dynamo, la magnétosphère de Mars est induite par l'interaction de la planète avec le vent solaire, avec des variations spatiales liées aux anomalies crustales pouvant localement être très intenses (>12 000 nT à la surface). Les niveaux de radiations relevés par **MSL** montrent que la magnétosphère et l'atmosphère actuelles réduisent suffisamment les flux de particules pour être supportées par des formes de vie microbienne.

Mars Express et **Maven** ont permis d'estimer les taux d'échappement actuels de l'atmosphère martienne sous forme ionique et neutre. Ces processus ont pu contribuer significativement à l'évolution de l'atmosphère et du climat. L'extrapolation des mesures d'échappement actuel permet de remonter au réservoir atmosphérique primitif, puisque l'équivalent de près de 800 mbar de CO_2 se serait échappé au cours du temps, en conformité avec les projections paléo-climatiques optimistes pour l'habitabilité de Mars.

2.2.5. Phobos

L'étude de l'origine de Phobos et Deimos s'inscrit dans l'étude la dynamique du système solaire précoce lors de l'accrétion planétaire, et pour laquelle **Mars Express** a majoritairement contribué. Capturées ou formées lors d'un impact ? Pour l'instant les données d'observation de sa surface ne permettent pas de trancher. Dans le deuxième cas, ces objets se révéleraient précieux pour comprendre l'histoire primitive de Mars. Néanmoins, le dernier quinquennal a vu un consensus émerger autour de l'hypothèse de l'impact dans un scénario identique à celui qui a donné naissance à la Lune.

2.3. PLANÈTES GÉANTES

Cassini-Huygens et **Juno** ont apporté des résultats majeurs sur la physico-chimie des atmosphères des géantes gazeuses, telle que la profondeur sur laquelle

s'étendent les courants-jets vus en surface (3000 km pour Jupiter, 8000 km pour Saturne) grâce à la mesure du champ de gravité à des ordres élevés (Fig. 4). Dans l'atmosphère superficielle, **Cassini** a pu caractériser le transfert saisonnier d'énergie et de matière entre les deux hémisphères et a mis en évidence un apport de matière depuis le système externe dans la haute atmosphère. Lors de l'ultime phase de la mission **Cassini**, le *Grand Finale*, les mesures in situ de radiosondage et du magnétomètre ont pu identifier la source d'émission radio auroral de Saturne : à savoir l'instabilité Maser cyclotron également à l'œuvre dans les environnements terrestre et jovien.

2.3.1. Le Grand Finale et les anneaux

Le Grand Finale a permis la première exploration de la région « entre » les anneaux et l'atmosphère (à l'intérieur de l'anneau D). Une série de mesures très attendues a abouti à la masse totale des anneaux, environ 1019 kg (soit un quart de celle de la lune Mimas), et dont la majorité est stockée dans l'anneau B, confirmant des estimations datant de Voyager. De plus, le radar a livré la première mesure de contenu en silicates des anneaux (entre 0,5 % et 5 %) impliquant une faible pollution météoritique. Toutes ces mesures suggèrent que les anneaux devraient être jeunes ((O)107 d'années) mais les incertitudes sur les modèles restent fortes. En sus, le « *Grand Finale* » a confirmé la présence de poussières chargées orbitant le long des lignes de champ depuis l'anneau D vers l'atmosphère. Cette « pluie » de particules, confinée autour de l'équateur, devrait créer une couronne d'hydrogène. Ces grains, d'origine inconnue, sont très riches en organiques (~50 % en masse). Il apparaît en synthèse que les anneaux ont fortement évolué depuis leur formation, mais le mécanisme à leur origine reste abondamment débattu.

2.3.2. Satellites

Les *grands satellites* des planètes géantes font l'objet d'un engouement très particulier car ils possèdent des réservoirs liquides sous une croûte de glace, exception faite de Io qui ne possède pas d'eau. Encelade et Europe sont par ailleurs suspectés d'abriter des océans en contact avec des surfaces silicatées. Les nombreuses découvertes de **Cassini** ces dernières années, en particulier sur Titan (variations saisonnières de la dynamique atmosphérique et du niveau des lacs, contraintes sur la structure interne, découvertes de nouveaux composés complexes comme le propylène, ...) et Encelade (caractérisation des volatils dans les geysers, analyse de la structure 3D et de la variabilité des plumes), ont vu émerger de nombreux projets sur l'habitabilité de ces lunes océans. La formidable activité au niveau du pôle sud d'Encelade a été intensément étudiée par la sonde **Cassini**. Il faudra toutefois attendre au moins 2028 avec **Europa Clipper** et 2030 dédiée à

Europe avec **Juice** dédiée au système jovien pour avoir de nouvelles données issues de l'exploration spatiale sur les lunes de Jupiter.

2.3.3. Uranus et Neptune

Au cours des dernières années, seules les observations depuis la Terre à diverses longueurs d'ondes ont permis d'apporter des contraintes sur la composition chimique et isotopique des atmosphères d'Uranus et de Neptune, produisant en particulier des rapports D/H quasi-analogues pour le méthane de ces deux planètes et suggérant que leur formation est issue d'un même réservoir de planétésimaux. Cependant, aucune mission n'est venue explorer ces deux corps qui sont restés vierges de toute mesure in situ sur la période.

2.4. VÉNUS

Seules deux missions ont étudié Vénus depuis 2014 : **Venus Express** qui a pris fin en décembre 2014 et l'orbiteur japonais **Akatsuki** qui, depuis 2016, orbite autour de l'équateur pour observer l'atmosphère avec des objectifs similaires à **Venus Express**. Cette dernière a mis en évidence la très forte variabilité de la haute atmosphère et a mieux caractérisé sa composition sous les nuages. Parmi les faits marquants, on retiendra (i) la variation décennale du SO_2 , peut-être liée à une activité volcanique contemporaine, (ii) l'accélération inexplicquée des vents sur six ans, et (iii) le possible ralentissement de la rotation de la planète.

2.5. MERCURE

Mercure se caractérise par une surface vieille et cratérisée, une atmosphère ténue formée de particules issues du vent solaire ou éjectées de la surface de la planète, et un champ magnétique intrinsèque trop faible pour la protéger efficacement du vent solaire. Mercure a connu un regain d'intérêt grâce à la mission **Messenger** entre 2011 et 2015 qui s'est focalisé sur quatre objectifs majeurs : (i) l'histoire géologique, (ii) l'étude de la dynamo interne, (iii) la caractérisation du noyau et l'identification de la zone fondue, et (iv) la composition des volatils des zones polaires. La communauté française s'est investie sur les trois premiers objectifs, i.e. la géomorphologie liée à la sublimation de volatils en sous-sol, ou la modélisation des champs magnétiques statiques internes et périodiques d'origine externe, qui ont permis de caractériser la taille du noyau métallique. L'exploration de Mercure se poursuit avec le décollage des deux sondes de la mission **BepiColombo** MPO et MMO en octobre 2018 pour une arrivée fin 2025.

2.6. LUNE

Si la science de la Lune n'était pas apparue à La Rochelle comme prioritaire, les missions se sont néanmoins succédé depuis. Entre 2009 et 2019, la Lune a été explorée presque chaque année par une nouvelle mission (**LRO** et **LCROSS** en 2009 ; **Chang'e 2** en 2010-2011 ; **Grail** en 2012 ; puis **Ladee** 2013-2014 et **Chang'e 3** en 2013, enfin **Chang'e 4** en 2018). L'implication française sur ces missions s'est limitée à une coopération scientifique sur **Grail**. Au cours de ces missions, la Lune a été cartographiée quasi-totalement à très haute résolution, son exosphère analysée en détail, les volatils des régions polaires identifiés, et son champ gravitationnel caractérisé, notamment autour des fortes anomalies des grands cratères d'impact.

3. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

3.1. PANORAMA PROGRAMMATIQUE

Le contexte programmatique se caractérise par : (1) L'arrêt des grandes missions de télédétection telles que **Cassini** (Grand Finale sept. 2017) et **Rosetta** (arrêt sept. 2016) où la communauté française était très présente (60 à 80 Co-Is). La prochaine mission de ce type (**Juice**) n'arrivera à Jupiter que dans une décennie. (2) Des perspectives lointaines pour des contributions au programme *Cosmic Vision*. Seule **EnVision** en M5 est en compétition pour un lancement en 2032. (3) La perspective d'une mission vers une géante glacée vers 2030 pour une arrivée en 2040. (4) Le démarrage de MSR avec le lancement de **Mars 2020** en 2020 et le retour des échantillons d'ici une décennie au mieux. (5) La montée en puissance de nouveaux acteurs qui vont offrir de multiples opportunités à court et moyen terme : la Chine avec son programme lunaire ambitieux mais qui prévoit aussi des missions vers Mars, les petits corps —**ZhengHe**— et Jupiter ; ainsi que l'Inde qui prévoit des missions vers Vénus, Mars et la Lune. Les coopérations avec ces acteurs devront prendre en compte les risques au regard du retour scientifique attendu. (6) La mise en œuvre de contributions complexes et ambitieuses tant pour le développement que pour les opérations, comme **InSight** mais également **MSL/Curiosity** et **Mars 2020**.

3.2. PETITS CORPS (ASTÉROÏDES, COMÈTES, TROYENS, CENTAURES, ET OBJETS TRANS-NEPTUNIENS)

Les petits corps peuplent tout le système solaire, depuis les régions internes jusqu'aux régions externes. Les missions passées et récentes ont révélé l'extraordinaire diversité de ces objets, que ce soit pour leurs propriétés physiques, géophysiques, géologiques, dynamiques, ou dans leurs compositions. Malgré des avancées significatives ces cinq dernières années, des questions importantes restent ouvertes sur le contexte astrophysique de leur formation, leur évolution, ainsi que leur rôle dans l'histoire de la Terre et l'apparition de la vie. Pour avancer sur ces questions, les cibles prioritaires sont les astéroïdes non représentés dans les collections de météorites, les comètes, et les troyens de Jupiter.

A cette fin, il est primordial pour le CNES : i) de poursuivre le soutien à la conception et à la réalisation des instruments spatiaux dans les laboratoires, ce qui englobe les efforts de R&D pour l'analyse in situ et la miniaturisation des instruments afin d'en récolter les fruits (i.e. en faisant voler **CosmOrbitrap**), ii) de soutenir les expériences et les analyses de laboratoire sur la matière extraterrestre.

Pour la période 2019-2024, les efforts devront se concentrer, sans ordre de priorité sur : i) les opportunités offertes par les nouveaux acteurs comme le Japon et la Chine, vu l'assèchement programmatique en Europe sur la thématique des petits corps, (ii) une contribution instrumentale à une mission F de l'ESA, (iii) une participation de la France au programme *Space Safety/Planetary Defence* de l'ESA, et en particulier une contribution instrumentale à la mission **Hera**, seule mission ESA dédiée aux petits corps, et (iv) la mission **MMX** à laquelle la France se doit de contribuer à la charge utile scientifique du *rover*.

A plus long terme (cadre ESA *Voyage* 2035-2050), la France devra soutenir une mission très ambitieuse (type ESA classe L, ou NASA *Flagship*) vers un corps primitif, combinant mesures à distance, analyses in situ et retour d'échantillon.

3.3. MARS

La planète Mars demeure une cible privilégiée de l'exploration, de par ses ressemblances passées avec la Terre et son potentiel exobiologique unique. Malgré les grandes avancées réalisées au cours du dernier quinquennal, certains observables-clés sont manquants. Ils concernent Mars primitive et la recherche de preuves

de vie passées (conditions d'altération, analyse de la matière organique virgine, datation des roches, contraintes sur l'hydrothermalisme en surface/sous-sol), mais aussi Mars contemporaine et son climat (vent, écoulements). Par ailleurs, une autre approche spatio-temporelle de l'échantillonnage de la mesure est nécessaire pour effectuer des avancées significatives sur les grands paramètres géophysiques : le multipoints en sismologie, météorologie et pour la magnétosphère (rôle des nanosatellites) ; ou encore le sondage de la surface à une échelle intermédiaire entre orbiteur et atterrisseur.

Deux nouvelles missions robotisées en surface impliquant la France seront lancées en 2020 (**ExoMars** et **Mars 2020**) à la recherche de la matière organique biogénique. Le rover de **Mars 2020** tentera en plus de sélectionner et d'encapsuler des échantillons (20 tubes de 15 g) susceptibles d'être ramenés sur Terre, comme le prévoit le programme Mars Sample Return (MSR) que la NASA et l'ESA élaborent actuellement. En parallèle, la mission JAXA **MMX**, à laquelle la France est associée, est censée rapporter sur Terre en 2029 des échantillons de Phobos, que l'on estime contenir du matériau martien en quantité significative.

La participation de la France à ces missions et à l'analyse des échantillons sur Terre (ce qui inclut la participation à l'infrastructure pour la mise en quarantaine des échantillons) doit être soutenue au plus haut niveau de priorité par le CNES. Derrière celle-ci, le groupe soutient toute opportunité de missions sol, de mesure multipoints ou de missions orbitales/aéroporées répondant à la problématique d'échantillonnage. Une analyse détaillée de l'engagement français dans l'exploration martienne est présentée dans la Roadmap Mars établie en 2017 par les groupes système solaire/exobiologie, exoplanètes et protection planétaire/Soleil, héliosphère, magnétosphères (<https://mycore.corecloud.net/index.php/s/wgLmozY0d2IO8bD>).

3.4. PLANÈTES GÉANTES

Le maintien d'un soutien CNES à la mission NASA **Juno** (opérationnelle jusqu'en 2021) est nécessaire dans la perspective de la mesure attendue de l'abondance profonde de l'eau dans **Jupiter**, laquelle aidera les modèles de formation de la planète. La France est très impliquée dans Juice, qui sera lancée en 2022 vers le système jovien et qui, outre la caractérisation précise de l'atmosphère de Jupiter, explorera les lunes Ganymède et Callisto. En parallèle, des laboratoires Français participent à **Europa-Clipper**, mission NASA lancée d'ici 2023 qui explorera la lune Europe. Ces deux missions concomitantes offrent une opportunité unique pour l'exploration du système jovien. Il est impératif de soutenir leur pré-

paration, tant sur le plan des mesures de laboratoires, que celui de la modélisation numérique utile à l'interprétation des données. La Chine envisage aussi une mission vers Jupiter pour 2030 et à laquelle la France devrait s'intéresser.

Enfin, l'ESA et la NASA devraient décider d'une mission conjointe vers les géantes glacées pour 2030, période qui offre une configuration planétaire optimale pour leur exploration. Pour l'ESA, deux options sont envisagées (i) un orbiteur autour d'Uranus, ou (ii) une sonde de rentrée atmosphérique. Alors qu'Uranus et Neptune restent les grandes « oubliées » de l'exploration du système solaire des dernières décennies, l'implication de la France sur cette mission revêt une importance stratégique. L'inventaire des exoplanètes réalisé par la mission **Kepler** a révélé la dominance d'objets de tailles intermédiaires entre la Terre et Neptune, faisant de cette dernière un archétype de grande valeur pour la compréhension des systèmes exoplanétaires.

3.5. VÉNUS

Côté NASA, Vénus est restée vierge de toute exploration depuis la fin en 1994 de **Magellan** qui avait réalisé le premier relevé topographique global d'un corps autre que la Terre. La période 2014-2019 a été marquée par l'arrêt de **Venus Express** et la non-sélection par la NASA et l'ESA de plusieurs projets pour l'exploration vénusienne dont la première mesure atmosphérique des gaz rares (**DaVinci**) ainsi que le premier relevé minéralogique in situ de la surface (**Vici**), et plusieurs projets de cartographie orbitale par radar.

Des pans entiers de la recherche vénusienne restent inexplorés. Cependant, Vénus offre un cadre exploratoire étroit, de par son épaisse couche de nuages qui empêche la caractérisation en orbite de sa surface sur une large part du spectre électromagnétique, et de par son atmosphère acide et brûlante qui limite la durée de vie des missions en surface à quelques heures.

Pour cette raison, le groupe recommande de soutenir fortement les deux concepts principaux à l'étude à même de répondre aux grands questionnements : (i) depuis l'orbite, une mission de reconnaissance du terrain vénusien et de ses mouvements qui pourraient attester d'une activité tectonique actuelle (type **EnVision** ou **Vox**, et dans une moindre mesure **Veritas**), et (ii) dans son atmosphère jusqu'à la surface, une sonde in situ réalisant les mesures infaisables depuis l'orbite pour réaliser un relevé précis de la composition atmosphérique (gaz rares et gouttelettes) et de la surface (pétrologie et minéralogie). Derrière ces priorités fortes, il convient d'ajouter des tentatives astucieuses de mesure de la sismologie vénusienne par détection

d'ondes de surface depuis l'orbite via l'*airglow* ou dans l'atmosphère via les ondes acoustiques.

La contribution française à la mission multi-disciplinaire **EnVision**, en lice pour Cosmic Vision M5, constitue la priorité du groupe car elle concerne un vaste périmètre de la communauté avec des observations fondamentales aussi bien pour la surface, l'atmosphère que les échanges entre les deux.

3.6. LUNE

On observe aujourd'hui un fort regain d'intérêt pour notre satellite naturel que ce soit via la **Lunar Orbital Platform Gateway** (LOPG) de la NASA qui se concrétisera dès 2023, l'ambition de l'ESA de s'associer pleinement à ce projet, la poursuite du programme lunaire chinois avec **Chang'e 6, 7, 8**, les missions indiennes et l'émergence probable de missions « commerciales » d'un format nouveau. En 2014, les priorités scientifiques portaient sur l'installation d'un réseau géophysique pour sonder la structure interne et le retour d'échantillons issus de régions inexplorées in situ (face cachée, Bassin Aitken, hautes latitudes, pôles, ...). En 2019, ces objectifs n'ont toujours pas trouvé de réponses programmatiques et restent donc les axes forts de la prospective 2019-2024.

Mais au-delà de ces objectifs premiers, les problèmes posés par l'origine et l'évolution du satellite, le couplage Terre-Lune, les interactions avec le vent solaire, et aussi par la méconnaissance du flux météoritique, fournissent un corollaire d'objectifs pertinents auxquels des missions d'opportunité seraient à même de contribuer. Le groupe recommande donc de prendre une part active à cette nouvelle dynamique programmatique pour la Lune et de soutenir à court/moyen terme la fourniture d'instruments à des missions in situ sur la base de concepts éprouvés facilement adaptables au contexte lunaire.

3.7. R&T

Le prochain quinquennal devra permettre de franchir les dernières étapes de la maturation du concept Orbital trap et ouvrir une nouvelle ère pour l'analyse des molécules complexes que l'on trouve parmi les corps du système solaire. La nécessité, pour Mars, de combler l'écart d'échelles entre les sondage in situ et orbital pourrait s'appuyer sur des moyens de mobilité adaptés (petits drones étudiés au CNES) couplés à des imageurs hyper-spectraux miniaturisés. La spectropolarimétrie serait très utile pour augmenter notre capacité diagnostique en minéralogie des surfaces par des mé-

thodes passives dans le VIS-IR et contribuer à la mesure de la chiralité dans la matière organique.

3.8. SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

La prochaine décennie sera, pour l'exploration du système solaire, celle du retour d'échantillons. La confirmation que Mars a été autrefois habitable fait du retour d'échantillons martiens la pierre angulaire de l'horizon programmatique. Avec **MMX** et **MSR**, la communauté française va s'engager pleinement dans cette dynamique qui permettrait de répondre à des questions fondamentales pour les sciences planétaires et au-delà. Les retours d'échantillons de la Lune et des petits corps devront aussi être soutenus dans un contexte programmatique potentiellement riche, en particulier pour la Lune, pour fournir à la cosmochimie les moyens d'étude nécessaires pour remonter aux conditions de formation du système solaire.

En ligne avec les recommandations du CERES, le groupe apporte tout son soutien aux missions ESA à l'étude pour Vénus (**EnVision**) et pour la première exploration d'une géante glacée (**M* Ice Giants**). Le programme obligatoire reste un élément éminemment structurant pour la planétologie européenne qu'il convient de préserver. Mais alors que les deux seules missions en lice pour la planétologie concernent la décennie 2030, les contributions d'opportunité (par exemple aux programmes NASA, JAXA et ESA hors programme obligatoire) revêtent un enjeu stratégique pour la décennie 2020. Le savoir-faire instrumental français vaut à notre communauté d'être régulièrement sollicitée pour participer à des projets devant apporter des réponses majeures aux principales questions du système solaire. Ce succès français à l'international doit être encouragé et soutenu, notamment si les projets de contributions

se basent sur des instruments issus des concepts R&T financés par le CNES (Orbitrap, mesure du vent, etc.).

Le contexte de la Lune tient une place à part sur la prochaine décennie : riche et hétéroclite, le programme lunaire à l'international incite à soutenir toute participation instrumentale si celle-ci repose sur un savoir-faire « sur étagère » à très faible risque programmatique.

Enfin, l'analyse des réponses de la communauté à l'appel à idées a mis en exergue l'intérêt que constituerait un nanosat dédié au sondage de la structure interne des petits corps ou des corps planétaires. Ces mêmes nanosats pourraient s'avérer la meilleure option pour améliorer le maillage des champs magnétique et gravitationnel grâce à des mesures multipoints.

4. CONCLUSION

Si la période 2014-2019, sur la lancée du précédent quinquennal, a été marquée par une moisson scientifique exceptionnelle qui a notamment profité à la communauté des petits corps ; la période 2019-2024 devrait voir un retour au premier plan de l'exploration lunaire et surtout la poursuite des grands projets de retour d'échantillon entamés au cours du présent quinquennal. Pour son prochain mandat, le groupe système solaire aura à charge de distinguer les opportunités les plus prometteuses scientifiquement au sein d'un paysage programmatique appelé à se complexifier avec la recrudescence d'acteurs et du nombre de missions et subissant par ailleurs de profondes mutations (émergence du *Newspace* et des nanosatellites).

(voir le tableau récapitulatif ci-après)

4.1. SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

Type de mesure/d'observables	Thèmes scientifiques	Cadre de réalisation
Retour d'échantillons : 1. Mars (MSR & MMX) 2. Lune & Petits Corps	(QIII) Vie extraterrestre ? (QI) Géochimie & Géochronologie des telluriques (QIII) Origines de la matière organique	MSR, MMX Chang'e 6
(1 ^{ère}) Exploration in situ des géantes glacées	(QI) Formation du système solaire	ESA M* NASA Flagship
Topographie & Tectonique vénusiennes	(QII) Divergences climatiques des planètes de type « terrestre »	ESA M5
Sondage in situ (si possible sur la base d'une R&T)	(QI) Formation/différentiation des corps (QII) Climat des planètes (QIII) Origines de la matière organique	NASA Discovery/NF JAXA, ESA
Structure interne et/ou magnétosphère d'un petit/grand corps par nanosat(s)	(QI) Formation des système solaire/petits corps (QI) Dynamo/Magnétosphère de la Lune ou de Mars	NASA Discovery, ESA Plan. Defence, CNSA Zenghe
Opportunité d'instrument « sur étagère »	(QI) Stratigraphie & Structure interne (QII) Étude des volatils et de la matière réfractaire	Contexte lunaire



Instrument Supercam de Mars 2020.

GROUPE DE TRAVAIL THÉMATIQUE EXOBIOLOGIE, EXOPLANÈTES ET PROTECTION PLANÉTAIRE

Jean-Philippe Beaulieu, Nicolas Biver, Anthony Boccaletti, Céline Brochier, Nicolas Fray, Didier Gourier, Laurence Lemelle, Christian Mustin (président), Robert Pascal, Eric Quirico, Barbara Schoepp-Cothenet, Franck Selsis, Cyril Szopa, Michel Viso (thématicien), Véronique Vuitton.

Dans un contexte programmatique et scientifique florissant, l'étude des exomondes, et à terme de leur habitabilité, est devenu l'un des thèmes centraux, structurants et fédérateurs pour la communauté scientifique française. À partir d'observables à toute échelle, les planétologues s'efforcent de formuler les lois de construction et d'évolution des systèmes planétaires alors que les exobiologistes essaient d'en dégager les propriétés physiques et chimiques qui seraient favorables à l'émergence ou au développement de formes de vie. Cette approche systémique fondée sur l'observation comparée d'habitats planétaires est un premier pas vers l'écologie planétaire. En effet, l'habitabilité englobe à la fois la qualité d'un monde à être occupé durablement par des êtres vivants et la capacité de formes de vie à investir et utiliser les ressources présentes. La notion d'habitabilité renvoie ainsi à la géographie planétaire, car elle sous-entend des relations bio-physico-chimiques pérennes entre la niche environnementale et les organismes qui y habitent. En ce sens, il y a une convergence avec certains champs thématiques développés par le TOSCA, notamment dans la description à l'échelle locale du cycle biogéochimique du carbone et du fonctionnement hydrique des surfaces continentales.

Les champs de recherche couverts par le groupe exobiologie, exoplanètes et protection planétaire sont ainsi perfrusés par les approches et méthodes natives de la chimie, de l'astronomie, des sciences de la Terre et des sciences de la vie. L'identification de l'architecture des exomondes et notamment de certains d'entre eux potentiellement habitables, la compréhension de l'origine de la vie terrestre ainsi que la recherche de formes de vie extraterrestres amènent les chercheurs à s'interroger sur (Fig. 1) :

- Les processus de synthèse de composés moléculaires primitifs dans le milieu interstellaire, sur les petits corps ou dans les environnements planétaires et les processus d'élaboration exogène ou endogène de matières organiques complexes,
- La diversité des systèmes planétaires, leurs caractéristiques et leur évolution,
- Les limites physico-chimiques de la vie terrestre et les conditions éco-physico-chimiques nécessaires à l'émergence d'une forme de vie et suffisantes pour son développement durable sur une planète,
- La robustesse des biosignatures et traces de vie dans des contextes planétaires variés.

Depuis plusieurs années, la communauté nationale « Exo » se structure autour de la Société Française d'exobiologie (SFE) qui favorise une synergie de plus en plus forte entre chimistes, biologistes et exoplanétologues. La France est probablement le pays dans lequel cette structuration des communautés autour des problématiques de l'habitabilité, des origines et des recherches de biosignatures est la plus forte. Les demandes de soutien abondées dans l'exercice 2014-2019 démontrent clairement que les différentes disciplines travaillent conjointement pour répondre à ces questions scientifiques.



Fig. 1 : Champs thématiques structurants dans le cadre programmatique du groupe de travail exobiologie, exoplanètes et protection planétaire. Étude des exomondes et de leur habitabilité potentielle à toute échelle depuis le milieu interstellaire jusqu'aux niches planétaires.

© Groupe de travail exobiologie, exoplanètes et protection planétaire
.....

1 BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LE SPS 2014 DE LA ROCHELLE

Depuis fin 2016 sur décision du CNES, le périmètre du groupe exobiologie, exoplanètes et protection planétaire a évolué en intégrant la composante « exoplanètes » gérée jusqu'à lors par le groupe astronomie et astrophysique. De manière factuelle, la couverture du champ thématique pluridisciplinaire regroupé sous le terme « exobiologie » se traduit par une implication importante dans de nombreuses missions ESA ou d'opportunités (NASA, JAXA...) de nature très diverse (Fig. 2) : exploration planétaire, observatoires spatiaux, missions orbitales, vols paraboliques, etc.

1.1 LE CADRE PROGRAMMATIQUE : MISSIONS ESA ET MISSIONS MULTILATÉRALES

Les chercheurs français de la communauté « exobiologie et exoplanètes » sont très présents dans les grandes missions européennes et internationales pour la recherche de traces de vie (**ExoMars**, **Mars 2020**...), la détection d'exoplanètes par la méthode des transits (**Tess**, **Plato 2.0**) pour la caractérisation d'exoplanètes depuis l'espace (**Cheops**, **JWST**, **Ariel**, **WFIRST**) avec le complément d'instruments implantés dans des observatoires au sol (**Sphere**, **Spirou**, **Harps**, **Sophie**).

La programmation européenne spatiale dans le domaine des exoplanètes et de l'exobiologie est particulièrement dense avec pas moins de cinq missions lancées dans 10 prochaines années (Fig. 2) : **Cheops** (S1, 2019), **ExoMars 2020**, **Plato 2.0** (M3, 2026) et **Ariel** (M4, 2028). La mission **Juice** (2022), première mission de classe-L du programme *Cosmic Vision* de l'ESA entre aussi dans le panorama de l'exobiologie, car en plus d'observer Jupiter elle étudiera deux de ses satellites galiléens Ganymède et Callisto et effectuera aussi deux survols d'Europe. Les lunes glacées des planètes géantes sont des cibles inédites pour la recherche de la chimie prébiotique ou d'une forme de vie éventuelle dans des mondes « océans ».

La France est aussi présente par ses contributions techniques et scientifiques dans des missions d'opportunité. Avec la NASA, les scientifiques français participent :

- A la mission **Mars 2020** avec la fourniture de l'instrument américano-français SuperCam,
- Par la fourniture de modules d'analyses pour la mission **DragonFly** sélectionnée par la NASA pour explorer, à l'aide d'un drone la surface de Titan en 2034,
- Enfin pour la contribution éventuelle au coronographe de **WFIRST**.

De même, la France contribue à la mission **MMX** de la JAXA (2025-2029), qui rapportera des échantillons de Phobos et déploiera un véhicule franco-allemand à sa surface. A l'horizon 2031, une mission américano-européenne MSR doit rapporter sur Terre des échantillons martiens. Le véhicule Mars 2020 est chargé de les collecter et de les conditionner. SuperCam jouera un rôle essentiel dans ces opérations de sélection et de collecte d'échantillons.

1.2 AVANCÉES PROGRAMMATIQUES PAR THÈMES

1.2.1 Exploration martienne et recherches de traces de vie :

Première priorité du groupe thématique exobiologie au SPS de La Rochelle.

La mission **ExoMars 2016** est le premier volet du programme **ExoMars** de l'ESA. Cette mission comprend un satellite **TGO** (Trace Gas Orbiter) et le démonstrateur d'atterrissage **Schiaparelli**. Si ce dernier s'est abîmé lors de la phase d'atterrissage en octobre 2017, le satellite **TGO** s'est inséré en orbite martienne. Il a commencé à sonder depuis l'orbite les composés gazeux atmosphériques et les zones d'émission ou de piégeage de gaz légers d'intérêt exobiologique, p. ex. méthane.

L'orbite non héliosynchrone de **TGO** facilite l'observation conjointe des changements physiques de surface et des compositions atmosphériques au cours des cycles diurnes/nocturnes.

La mission, **ExoMars 2020**, sera lancée en juillet 2020, (arrivée le 19 mars 2021). Pour cette mission, le bassin *Oxia Planum* a été sélectionné comme site d'atterrissage. Les épaisses couches de sédiments marins ou lacustres déposées dans le bassin et âgées de 3,9 milliards d'années (Noachien) sont susceptibles de conserver les traces de l'existence de formes de vie au sein des différentes strates. La plateforme russe et le véhicule européen **Rosalind Franklin** étudieront leur structure géologique et leur composition minéralogique et organique dans les deux premiers mètres du sous-sol martien.

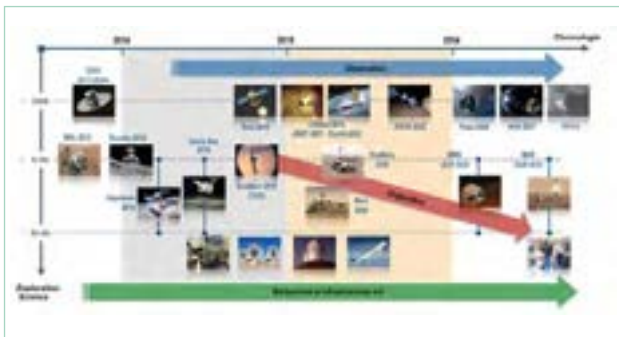


Fig. 2 : Chronologie des missions d'intérêt pour l'exobiologie et les exoplanètes en fonction du type d'exploration scientifique. Tendances stratégiques à moyen terme : [1] Poursuite des missions d'observation des exoplanètes depuis l'espace [2] Déploiement de missions d'exploration martienne de l'in situ vers l'ex situ [3] Soutien par les recherches et infrastructures sol : astrophysique et chimie de laboratoire, grands télescopes (VLT, Alma...) et dispositifs de quarantaine.

© CNES
.....

1.2.2 Détection et identification des systèmes exoplanétaires

Première priorité du groupe thématique astronomie et astrophysique au SPS de La Rochelle.

La stratégie actuelle de détection d'exoplanètes est construite autour de plans d'observation conjoints de transits d'exoplanètes depuis l'espace ou le sol et de relevés de vitesse radiale uniquement opérables depuis le sol afin de déterminer avec précision leur rayon et leur masse. Les observations actuelles montrent la richesse des données apportées par l'analyse des courbes de lumière et transits, notamment dans la détection croissante d'exoplanètes à courte distance orbitale ou de planètes tempérées de taille quasi-terrestre. Au-delà des missions de relevés de nouvelles exoplanètes par la mission **Tess** et de suivi photométrique de systèmes exoplanétaires déjà identifiés par la mission **Cheops**, deux missions moyennes de l'ESA dédiées viendront satisfaire les attentes de la communauté d'exoplanétologues français et compléter la stratégie de détection et

de caractérisation dans la prochaine décennie.

Avec une observation photométrique en continu d'environ 1 million d'étoiles, la mission M3 de l'ESA, **Plato 2.0** (2026) aura pour objectif de détecter et de mesurer le rayon d'exoplanètes en transit. L'astéro-sismologie de précision de **Plato 2.0** fournira également des paramètres intrinsèques des étoiles (rayon, masse, âge). Sur **Ariel** (2028), la quatrième mission moyenne M4 sélectionnée par l'ESA (programmée en 2028), le concept instrumental est optimisé pour la spectrophotométrie Vis-NIR-MIR (transit, éclipse, courbes de phase) des exoplanètes à courte période orbitale autour d'étoiles brillantes. Le spectromètre infrarouge AIRS (**Ariel** Infra Red Spectrometer), fourni par la France, mesurera l'abondance d'espèces chimiques (C, O, N...) et de gaz atmosphériques fondamentaux.

Avec le soutien de **JWST**, **Plato 2.0** et **Ariel** seront des composantes spatiales essentielles d'un réseau international d'observation des exoplanètes intégrant, notamment, les suivis au sol de cibles compatibles avec une caractérisation des atmosphères.

1.2.3 Expérimentation en orbite et nano-charges utiles :

Priorité du groupe thématique exobiologie au SPS de La Rochelle.

Au cours des quatre dernières années, les activités exobiologiques sur l'**ISS** se sont limitées, à des activités technologiques à l'intérieur des modules, **Matiss** et **Aquapad**, qui ont été mises en œuvre lors du vol de **Thomas Pesquet**. **Matiss** étudie les propriétés antibactériennes de traitements de surface en micropesanteur. Son intérêt technologique a été reconnu par l'ESA qui en a demandé la reconduction. **Aquapad**, développé avec l'Institut Bio Mérieux, a validé une méthode rapide et pratique de détection des contaminations bactériennes de l'eau de boisson à bord de la station spatiale. En complément du programme spatial de l'ESA sur l'**ISS**, une coopération scientifique s'est établie avec la **JAXA** autour de la détection de biomolécules ou de microorganismes dans l'environnement extérieur de l'**ISS**. Un système de collecte de particules japonais, « **Tampopo** », a été installé à l'extérieur du module **Kibo**.

Les travaux de conception de systèmes d'exposition en orbite de composés chimiques au rayonnement direct du Soleil, ont été poursuivis. Les objectifs initiaux ont été scindés en deux activités :

- **IR-Coaster**, pour l'exposition de cellules fermées contenant des mélanges de gaz ou des dépôts moléculaires dont l'évolution photochimique sera suivie en continu par infrarouge,
- **Problce** pour suivre la transformation de glaces condensées extemporanément sur un doigt froid (50 à 75K).

1.2.4 Protection planétaire (MMX et MSR)

Priorité du groupe thématique exobiologie de la Rochelle.

La protection planétaire est progressivement montée en puissance. Cela s'est traduit par une implication forte du CNES dans les activités du COSPAR (Committee on Space Research) et les réunions des groupes de travail de la NASA et de l'ESA. Actuellement une grande partie des activités de protection planétaire sont liées aux projets **ExoMars**, **Mars 2020** et **Mars Sample Return (MSR, 2026-2031)**, afin de d'organiser et préparer la communauté scientifique. Des analyses poussées dans le domaine de la protection planétaire sont maintenant incontournables pour les futures missions d'exploration in situ. Dans ce cadre le groupe exobiologie, exoplanètes et protection planétaire a été sollicité pour réétudier en détails les études produites par l'ESA (SterLim) et la JAXA. Les recommandations du groupe ont été utilisées lors de la réunion du COSPAR qui a défini la qualification protection planétaire de la mission **MMX**.

La mission de retour d'échantillons martiens a donné lieu à des études préliminaires entre la NASA et l'ESA. Les organismes internationaux comme le COSPAR, les agences spatiales avec l'IMEWG (International Mars Exploration Working Group) étudient activement les contraintes qu'impose l'hébergement d'échantillons extraterrestres, contenant éventuellement une forme de vie. Dans un premier temps, les échantillons seront étudiés sous un strict régime de quarantaine et de protection des échantillons contre des contaminations terrestres chimiques ou biologiques. C'est dans ces *Sample Receiving Facilities* que seront effectuées les recherches de traces de formes de vie (*Life detection*) et l'évaluation des risques biologiques (*Biohazard*). Pour analyser sous confinement les échantillons en quarantaine en utilisant la puissance des faisceaux de lumière synchrotron, nous disposons d'ores et déjà d'un conteneur mini-P4 de transport fiable, hermétique et insérable comme porte-échantillons dans différentes lignes de lumière (PEEP). Après la quarantaine, si elle est levée, les échantillons pourront être conservés et gérés dans des *Sample Curation Facilities* qui assureront leur distribution et le suivi des opérations scientifiques menées. Où qu'ils soient les échantillons martiens seront considérés comme faisant partie d'un seul ensemble et gérés par une entité unique.

Des discussions sont entamées pour la construction d'une *Sample Receiving Facility* en Europe (voire en France) qui travaillera en liaison étroite avec celle installée aux USA.

1.2.5 Les mondes « océans » et glacés

L'exploration successive des satellites de Jupiter et Saturne par les missions **Galileo** (1996-2003) et **Cassini-**

Huygens (2004-2017) a révélé que plusieurs de leurs lunes (Europe, Ganymède, et Callisto, Encelade et Titan) abritent potentiellement un océan d'eau salée sous leurs surfaces glacées. Ces mondes « océans » en proximité de planètes géantes et très éloignés de leur étoile-hôte sont aujourd'hui des cibles à fort potentiel exobiologique. Leurs situations et structures particulières élargissent la notion de zones habitables. La présence simultanée de molécules carbonées, de sources d'énergie et d'eau liquide sur ou à l'intérieur de ces lunes offre une opportunité unique d'étudier in situ des processus hydro-chimiques dans le système solaire et d'en déduire des paramètres d'habitabilité. Ces mondes seront explorés dans la prochaine décennie par des missions dédiées, en cours de développement à l'ESA **Juice** (Jupiter Icy moon Explorer) et à la NASA (**Europa Clipper**, **DragonFly**).

1.3 RÉSULTATS SCIENTIFIQUES MARQUANTS

1.3.1 Astrochimie dirigée et expérimentation en micropesanteur : une aide indispensable à la compréhension des processus de synthèse organiques

Les productions de molécules de références et d'analogues de matières organiques (grains cométaires, aérosols, etc.) en conditions contrôlées s'avèrent très utiles pour comprendre la chimie des glaces dans le milieu interstellaire (MIS) et interpréter les signatures spectrales ou les contributions respectives des processus dynamiques, chimiques et radiatifs dans les atmosphères planétaires.

La communauté française s'est largement impliquée au cours des dernières années dans des synthèses chimiques ou photochimiques afin d'expliquer

- La présence dans le MIS, de molécules organiques, suffisamment élaborées et réactives pour constituer le socle moléculaire robuste d'une chimie du vivant,
- La chimie organique de l'atmosphère et de la surface de Titan et plus récemment de Pluton,
- La composition des matières organiques dans les agrégats cométaires de 67P/Churyumov-Gerasimenko.

Même si seulement une à deux molécules organiques originales sont découvertes chaque année dans le MIS grâce aux observations de sondes spatiales (p. ex. **Herschel**) et de télescopes terrestres (Alma), la détection d'isocyanate de méthyle ($\text{CH}_3\text{-N=C=O}$) dans l'environnement de protoétoiles semblables au Soleil jeune, est une découverte importante pour l'exobiologie (Fig. 3). L'identification de cette molécule dans les spectres millimétriques d'Alma grâce à la synthèse de composés

de référence et la validation expérimentale d'une voie de synthèse sur des particules de glace à très basses températures (30 K) améliorent notre compréhension de la chimie froide du MIS et des processus de formation précoce de molécules prébiotiques dans les environnements protoplanétaires. Ce résultat confirme l'existence de pouponnières moléculaires dans le MIS, sources de précurseurs pouvant initier des liaisons peptidiques. Cette découverte amène aussi de nouvelles hypothèses pour l'origine de la glycine sur la comète 67P et relance le débat sur les origines exogènes ou endogènes des briques élémentaires du vivant. Aujourd'hui, il est possible de postuler l'existence de nouveaux composés dans le MIS par analogie ou par des calculs théoriques (p. ex. sur la base du Principe d'Énergie Minimale), de les synthétiser pour confirmer les détections spectrales et de valider expérimentalement leur processus de formation.

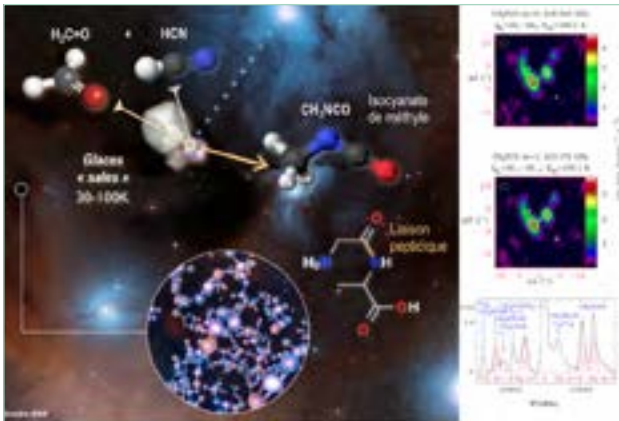


Fig. 3 : Découverte de l'isocyanate de méthyle dans l'environnement d'une étoile naissante *IRAS 16293-242*, précurseur de la liaison peptidique formé à très basses températures dans le milieu interstellaire sur des particules de glace. Distribution spatiale et identification dans les spectres millimétriques ALMA.

© Cernicharo J. et al. *Astronomy & Astrophysics* 2016 : 587, Maté B. et al. *Astrophys J.* 2018 : 861

La détermination des propriétés diélectriques et optiques d'aérosols synthétiques carbonés a complété l'interprétation des mesures de permittivité réalisées par la sonde **Huygens** à la surface de Titan ou les observations astronomiques du MIS. Les mesures obtenues en micropesanteur sur l'**ISS** ou l'**Airbus Zéro G** avec une orientation aléatoire contribuent à déterminer l'importance des caractéristiques physiques des grains (distribution en taille, porosité, composition) et des effets triboélectriques dans les signaux mesurés en polarisation.

1.3.2 Diversité des systèmes exoplanétaires : un bestiaire à la diversité étonnante

Depuis le séminaire de prospective de la Rochelle en 2014, le nombre de planètes extrasolaires découvertes et confirmées a été multiplié par quatre et les données acquises par les télescopes spatiaux **CoRoT**, **Kepler**, **HST** et **Spitzer** ont été consolidées. La communauté française est particulièrement active dans ce champ de recherche très compétitif et aura un rôle de premier plan dans les futures missions **Ariel** et **JWST**. C'est une reconnaissance du travail accompli, depuis 20 ans par les équipes françaises dans la détection d'exoplanètes par des télescopes spatiaux ou terrestres et l'analyse spectrométrique des transits. En combinant des méthodes variées de détection (vélocimétrie, transits, détection directe, microlentilles), la diversité phénotypique des exoplanètes et des systèmes planétaires est aujourd'hui une réalité. Grâce aux télescopes spatiaux et terrestres, ont été répertoriées plus de 4000 planètes extrasolaires, distribuées dans environ 3000 systèmes planétaires et 650 systèmes planétaires multiples (Fig. 4). Pour la plupart, il s'agit de planètes géantes orbitant à proximité de leur étoile en dehors de la « zone habitable », mais une fraction grandissante de planètes telluriques de type super-terre (p. ex. **Kepler 22 b**, **Proxima b**) se situe dans cette zone.

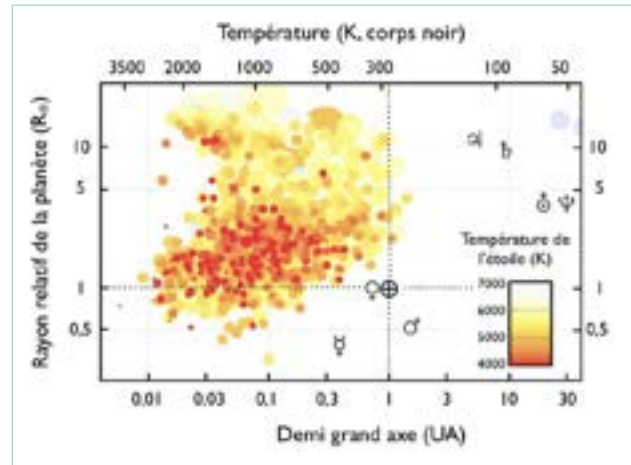


Fig. 4 : Diversité phénotypique des exoplanètes connues en fonction de trois paramètres : Distance à l'étoile (AU), Rayon relatif ($R_{\text{Terre}} = 1$) et de la température de l'étoile. La température d'équilibre (K) est déduite de la période orbitale, c.-à-d. température estimée du corps noir équivalent.

© Tinetti G., et al. *Experimental astronomy*, 46, 2018

Les résultats les plus marquants ne se limitent pas à la simple découverte de planètes exotiques, mais il devient possible de contraindre par spectroscopie la composition chimique de leur atmosphère, leur structure interne, voire leur champ magnétique.

Aujourd'hui la question récurrente de l'habitabilité exige un bilan détaillé des propriétés de la planète et de son

étoile. La détection dans le système Trappist-1 de sept planètes telluriques de masses proches de celle de la Terre et pour la plupart situées dans la zone habitable de l'étoile-hôte (Type M, naine rouge), est un résultat exceptionnel pour la planétologie comparée. Détectée initialement par TTV (variation des temps de transits) depuis le sol, puis confirmée par **Spitzer** et par spectroscopie de transit avec le **HST**, la découverte de cet exosystème planétaire est révélatrice de la complémentarité des grands télescopes au sol (ESO) et des télescopes spatiaux. De même, pour la découverte d'exoplanètes par imagerie directe les données de l'instrument Sphère du VLT (Very Large Telescope, ESO, Chili) seront complémentaires des mesures dans l'infrarouge moyen du nouveau télescope spatial **JWST** lancé en 2021. D'ores et déjà, les données acquises par Sphere combinées à celles d'autres grands télescopes, comme Alma, fournissent une caractérisation détaillée de la physique des disques proto- et post-planétaires qui révolutionne notre compréhension des processus complexes de formation planétaire.

1.3.3 Exobiologie martienne et des petits corps

Dans la mission **ExoMars 2016**, la communauté scientifique française est principalement impliquée dans les instruments Cassis et ACS (Atmospheric Chemistry Suite) de la sonde **TGO**. Des scientifiques ont été sélectionnés par l'ESA en tant que *guest scientists et interdisciplinary scientists*. Les deux instruments Nomad (Belgique) et ACS (Russie) ont pour objectif de détecter et cartographier les composés carbonés présents dans l'atmosphère martienne à l'état de traces (Fig. 5).

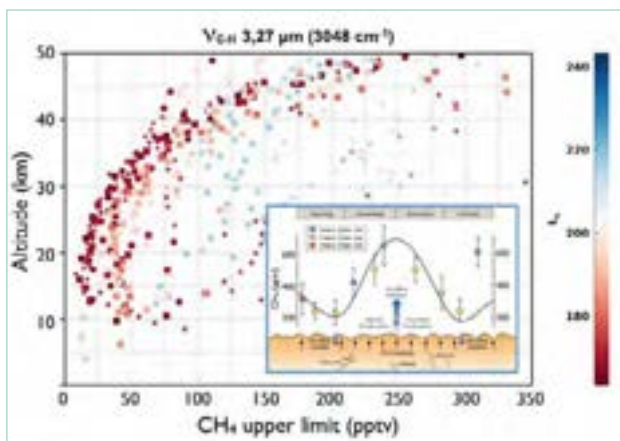


Fig. 5 : Relevé des mesures infrarouge à 3,270 µm des vibrations d'élongation C-H du méthane par l'instrument ACS de TGO en 2018 (D'après O. Korabiev, A. C. Vandaele, F. Montmessin et al., *Nature* 2019: 568, 517-520). En cartouche, les mesures réalisées au sol par l'instrument Sam (GC-MS) de Curiosity dans le cratère Gale en 2014, montrant un fond de méthane atmosphérique (env. 1 pptv) présentant des variations saisonnières.

© Webster et al., Science, 2018
.....

Aucune trace de méthane n'a été détectée par les instruments ACS et Nomad. Leur très grande sensibilité impose une concentration en méthane (s'il est présent)

de l'atmosphère martienne nécessairement très faible (< 0,05 pptv). En revanche, SAM a identifié, dans le cratère Gale, des émissions importantes et locales de méthane (10 pptv) et dans le site Cumberland des molécules aromatiques chlorées dont la matière originelle est indigène aux échantillons argileux. Ces molécules chlorées (dichlorobenzène, méthylchloropropane) sont produites dans l'instrument par halogénéation à chaud de la matière organique indigène par les perchlorates présents dans le sol martien. SAM a également mis en évidence des composés organiques soufrés fixés ou pontés dans les feuillets d'argile.

La mission **Rosetta** a alimenté le débat sur l'apport, par les astéroïdes et les comètes, de molécules organiques élaborées (acides aminés, alcanes, hydrocarbures aromatiques polycycliques...) sur la Terre primitive. De nombreux composés organiques associés aux grains cométaires présents dans la coma de 67P ont été identifiés par les deux spectromètres de masse Cosima et Rosina embarqués sur la sonde **Rosetta**. L'instrument Rosina a notamment confirmé la présence en phase gazeuse d'un acide aminé élémentaire, la glycine, alors que l'instrument Cosima a fourni des résultats remarquables sur les abondances respectives du carbone, de l'oxygène, de l'azote et de l'hydrogène dans les grains de poussières de la comète. Il a été possible d'en déduire que la matière organique de haut poids moléculaire est une composante importante (45% en masse, et plus de 60% en volume) des grains cométaires.

1.3.4 Protection planétaire

L'organisation internationale de la protection planétaire évolue. Le sous-comité à la protection planétaire de la NASA a été mis en suspens. L'officier de protection planétaire de la NASA qui résidait et travaillait au siège de la NASA a été remplacé par un universitaire. Le PPWG (*Planetary Protection Working Group*) de l'ESA poursuit ses travaux régulièrement et alimente les réflexions du panel de protection planétaire du COSPAR. La gouvernance du panel de protection planétaire du COSPAR a été aussi profondément revue avec des représentants des nommés par les pays participants au lieu d'une participation volontaire d'associés du COSPAR. Les décisions sont prises et formulées de façon formelle et approuvées par le Conseil du COSPAR.

Depuis le dernier SPS, un programme européen a fédéré une réflexion sur la protection planétaire des objets du système solaire externe (*Planetary Protection of the Outer Solar System*). Les préconisations sont en cours d'adoption par le PPP (*Panel on Planetary Protection*) du COSPAR. Enfin, des scientifiques français ont participé activement aux travaux préparatoires et aux réunions du PPP du COSPAR qui ont menés à la catégorisation de la mission **MMX** (*Unrestricted Earth Return*).

2 RECOMMANDATIONS DU GROUPE

2.1 RECOMMANDATIONS POUR LA R&T

Au-delà de l'intérêt que le groupe reformule sur le déploiement rapide du CosmOrbitrap et l'analyse massive à très haute résolution de molécules organiques complexes ou de sels ioniques, les recommandations en R&T du groupe portent sur l'identification des technologies instrumentales émergentes et les verrous technologiques en termes d'instrumentation pour :

- Des systèmes de prospection et collecte d'échantillons en profondeur
- L'imagerie haute résolution des exoplanètes, c.-à-d. coronographie
- L'exploration in situ des mondes « océans » et l'analyse de composés polaires par des méthodes de chromatographie liquide
- Pour des nano-charges utiles légères et sacrificiables pour des prospections étendues de corps célestes, p. ex. caméra multispectrale ultracompacte.

2.2 INTÉRÊT POUR LES NANO-CHARGES UTILES

Les nanosatellites ont fait leur apparition il y a une dizaine d'années et sont construits par assemblage de briques standardisées contenant les systèmes de service (contrôle d'attitude, énergie, radiocommunication...) et des composants standards miniaturisés. L'évolution rapide des charges utiles légères et compactes en imagerie et spectrométrie doit inciter à envisager davantage, des utilisations diversifiées de nano-charges utiles génériques et sacrificiables dans l'exploration planétaire.

2.3 RECOMMANDATIONS POUR L'EXPLORATION MARTIENNE ET LE RETOUR D'ÉCHANTILLONS

La feuille de route élaborée en 2017 par les groupes thématiques système solaire/Soleil, héliosphère, magnétosphères/exobiologie, exoplanètes et protection planétaire donne le cadre des priorités scientifiques de cette exploration.

La mission européenne **ExoMars 2016** et la mission **Mars Science Laboratory (MSL)** avec le véhicule *Curio-*

Fig. 6 : Recommandations pour la R&T du groupe thématique exobiologie, exoplanètes et protection planétaire.

Techniques /instruments	Verrous	Actuel	Avenir
Analyse haute résolution de composés organiques et biochimiques	Spatialisation de la chromatographie liquide ultra-hautes pressions (UPLC) et couplage au CosmOrbitrap	MEMS CosmOrbitrap Biopuces	ULPC Préparative et électrospray
Instruments et algorithmes pour la détection d'exoplanètes	Imagerie à haut contraste ($\ll 10^{-9}$ @ qq 0,01") pour détection d'exo-terres ou d'exo-Jupiters froides	Contraste 10^{-5} - 10^{-4} @ 0,4-1,8"	Coronographe full ou half dark hole - Imagerie directe - spectroscopie et polarimètre UV
Instruments spatiaux compatibles avec la quarantaine	Briques technologiques d'instruments spatiaux compatibles avec les analyses biologiques et géologiques en confinement BSL4 étendu	Mini P4 (QUESA)	Instruments sol conformes aux recommandations de protection planétaire pour la quarantaine
Nano-charges utiles sacrificiables pour sondes en orbite ou in situ (exploration, prospection, collecte d'échantillons)	Imageur générique multispectral (Vis, NIR, Fluo), ultra-léger ($\ll 200g$). Détection et localisation de matières minérales ou organiques d'intérêt.	Matrice 2D de micro-filtres de Bayer (22x22 μ m ²)	Caméras multispectrales ultralégères refroidies à matrices 16 bandes entre 400 et 1 200nm.
Exploration et forages profonds (Mars, lunes océans...)	Diagraphie spectrale et temporelle pour l'analyse d'échantillons en profondeur - composition métallique et teneur en eau en temps réel (forage ou cutlogging)	Savoir-faire industriel français en diagraphie	Sondes neutrons pulsées et pilotées - intérêt pour un démonstrateur sur la Lune

sity nous fournissent actuellement des données inestimables sur le contexte géologique et géochimique de la planète Mars dont beaucoup ont un grand intérêt pour l'exobiologie. La réussite de la mission **ExoMars 2020** avec une charge utile instrumentale capable d'étudier l'habitabilité de la planète et de chercher des traces de matière organique et qualifier leur l'origine biotique, est essentielle pour la communauté exobiologique française et européenne. Néanmoins, le retour d'échantillons martiens (MSR) reste la priorité pour l'exobiologie et la planétologie, malgré toutes les difficultés techniques d'une telle mission. Dans ce domaine, les questions de protection planétaire seront abordées avec une vision pragmatique des enjeux de l'exploration.

Le projet MSR mené par les USA offre une opportunité essentielle à l'Europe afin qu'elle prenne une place importante (*enabling partner*) dans cette mission internationale de retour d'échantillons martiens. Les analyses *ex situ* (c.-à-d. dans les laboratoires terrestres) offriront une adaptabilité et une sensibilité infiniment supérieures à celles des instruments embarqués. Les échantillons qui seront amenés sur Terre en 2031 seront soumis à un strict régime de quarantaine. C'est durant cette phase que seront effectuées en conditions confinées des analyses approfondies pour la détection de traces de vie et l'évaluation des risques biologiques. Ultérieurement s'ils sont déclarés sans danger, ils seront placés et gérés par des centres de curation. La participation des équipes françaises aux analyses en quarantaine et sur des échantillons « libérés », est donc essentielle et doit être soutenue. Sans préjuger des résultats obtenus en quarantaine, la découverte d'une trace de vie sous quelque forme que ce soit sera décisive et âprement discutée. Il est indispensable de disposer d'un second centre de référence pour effectuer des répliques d'analyse afin de s'affranchir des biais opérationnels éventuels, consolider les résultats et in fine faciliter la prise de décision politique de levée de quarantaine. Le développement d'un centre de quarantaine (*Sample Receiving Facility*) en Europe, en ligne avec les recommandations du CERES et du CPS, semble absolument nécessaire.

- Préparer techniquement et scientifiquement les contributions aux futures missions de retour d'échantillons martiens et aux analyses biogéochimiques pendant la phase de quarantaine.
- Élargir le champ des compétences requises pour l'analyse des échantillons en quarantaine. Solliciter toutes les communautés françaises compétentes (médecins, agronomes, biochimistes, virologues, écologues...) dans l'étude des interactions biotiques et abiotiques dans les organismes et écosystèmes terrestres.
- Contribuer à l'élaboration de centres de quarantaine/curation en France et en Europe afin de préparer l'accueil de tout type d'échantillons extra-terrestres.

2.4 RECOMMANDATIONS POUR LA CARACTÉRISATION DES EXOPLANÈTES

Les missions actuelles et en cours de développement explorent la population des exoplanètes dans son ensemble, et en définissent les caractéristiques principales (masse, rayon, paramètres orbitaux, luminosité, atmosphère).

Aujourd'hui, avec une chronologie de missions exceptionnelle (Fig. 5), pour faire face au flux de données, la communauté exoplanètes devra s'organiser pour optimiser l'utilisation des moyens sols et spatiaux disponibles et choisir, pour les nouvelles missions, des champs d'observations garantissant une synergie avec les observations passées ou à venir. Il convient de trouver, en partenariat avec l'INSU, les moyens de :

- Soutenir le travail expérimental théorique et les analyses des flots de données fournis par les observatoires spatiaux actuels et à venir dans la prochaine décennie
- Mettre en place une politique de distribution cohérente des données entre les volets sol et espace des missions.

En assurant le premier relevé spectroscopique systématique des atmosphères d'exoplanètes en transit ou éclipse, la mission M4 **Ariel** est la première priorité et bénéficiera des observations des missions précédentes. **Cheops**, **Plato 2.0** ainsi que d'autres observations spatiales ou à partir du sol fourniront en effet un catalogue de cibles de premier choix pour la caractérisation par spectroscopie des transits (spectres d'absorption) et des éclipses (spectres d'émission) par **Ariel**. De même l'observation de microlentilles gravitationnelles, avec **Euclid**, détectera des populations d'exoplanètes d'habitables à froides, et de toutes masses, un domaine non couvert par les autres méthodes de détection.

Les nouveaux concepts d'imagerie directe spatiale très ambitieux sont en pleine évolution, en particulier grâce à un fort soutien du CNES en R&T. Le coronographe spatial proposé dans le cadre de la mission d'opportunité **WFIRST** constitue une première étape pour la caractérisation des exoplanètes et de leur atmosphère en lumière réfléchie.

La communauté française doit préparer sa participation à des observatoires d'envergure comme **Luvoir** ou **HabEx** (*Flagship*, NASA) qui vise à étudier des planètes analogues à celles du système solaire, leur atmosphère et leurs lunes, notamment par imagerie directe, coronographie ou spectropolarimétrie UV à très haute résolution (**Pollux**).

- Poursuivre l'effort entrepris pour (i) peupler l'univers des exoplanètes avec les missions **Tess** et **Plato 2.0** (ii) caractériser l'atmosphère des exoplanètes avec les missions : **JWST** et **Ariel**.
- Travailler avec l'INSU pour garantir une complémentarité optimale des moyens d'observation depuis le sol et l'espace des exoplanètes.
- Soutenir **WFIRST** et les missions dédiées l'imagerie directe des exoplanètes pour se préparer à une participation à **Luvoir** ou **HabEx** sur le long terme.
- Préparer les futures missions de détection des exoplanètes avec d'autres méthodes et concepts instrumentaux qui ont déjà acquis un niveau de maturité élevé : coronographe, microlentilles gravitationnelles, spectropolarimétrie UV.
- Fédérer les communautés planétologiques et exobiologiques françaises pour participer à des missions d'opportunités sur les lunes « océans »
- Dresser un état des lieux, des savoir-faire français dans le domaine de l'exploration des mondes sous-marins (Ifremer)

2.5 RECOMMANDATIONS POUR L'EXPLORATION DES LUNES OCÉANS DES PLANÈTES GÉANTES

L'exploration des lunes glacées commencée avec la mission **Cassini-Huygens** va se poursuivre avec les missions **Juice** (JUper ICy moon Explorer - 2022) de l'ESA et **Europa Clipper** de la NASA. La mission **DragonFly** sur Titan et les projets de missions d'échantillonnage du panache d'Encelade et d'exploration de la surface d'Europe reposeront en grande partie sur des analyses in situ qui pourront s'appuyer sur le développement d'instruments innovants ou de briques technologiques, soutenus par la R&T CNES comme CosmOrbitrap.

La mission **Juice** (JUper ICy moon Explorer - 2022) a pour objectif d'étudier l'évolution de Jupiter et de ses lunes : Ganymède, Callisto et Europe. L'identification depuis l'orbite des conditions physico-chimiques régnant en surface ou de sub-surface (océan profond) des lunes affinera le spectre des déterminants de leur habitabilité éventuelle. Ces données serviront à concevoir des modèles pour certaines planètes extrasolaires ou d'autres satellites potentiellement habitables comme Encelade.

La préparation de ces futures missions nécessite également un accompagnement par des simulations en laboratoire, modélisations théoriques et expérimentales. En particulier, pour préparer au mieux l'analyse de futures données orbitales et préparer les futurs instruments d'analyse in situ, il est crucial de synthétiser et de caractériser en laboratoire des matériaux analogues (analogues organiques pour Titan et Encelade, mélange sels-glaces pour Europe, etc.).

- Préparer l'exploration à long terme des lunes océans et glacées Europe et Encelade – Soutenir la contribution à **DragonFly**, pour l'exploration de la chimie de l'atmosphère de Titan

3. CONCLUSION

Après plus de 15 ans d'attente, les exobiologistes français vont enfin voir la réalisation de la première mission d'exploration de l'ESA **ExoMars** dédiée à la recherche de traces de vie et d'habitats dans le sous-sol martien. Sur la prochaine décennie, les avancées scientifiques majeures seront portées par les missions de collecte in situ et d'analyse ex situ d'échantillons martiens (**Mars 2020** et **MSR**). Pendant au moins 15 ans, les planétologues auront à leur disposition une quantité élevée de relevés d'exoplanètes candidates à l'habitabilité grâce à un large panel de télescopes spatiaux (**Plato 2.0**, **Ariel**...), complétés par des observations en imagerie directe et à haute résolution depuis le sol (VLT/Sphere) et l'espace (**JWST**). En attendant, le déploiement de cette complémentarité des moyens espace/sol est essentielle pour explorer la diversité des systèmes exoplanétaires. A plus long terme, les nouvelles problématiques dans le périmètre exobiologie, exoplanètes et protection planétaire seront portées par des missions d'exploration des satellites glacés des planètes géantes du système solaire externe (**Juice** et **DragonFly**) et l'imagerie et la spectrométrie à haute résolution des exoplanètes à la recherche de biosignatures atmosphériques ou surfaciques éventuelles.

La consolidation du concept d'habitabilité dans toutes ses dimensions : astronomiques, physiques, chimiques, biologiques et écologiques, apparaît clairement comme un thème essentiel pour le mandat des futurs groupes de travail. Cette notion intéresse toutes les facettes de l'exobiologie de la surface de Mars aux exoplanètes en passant par les océans des satellites glacés.

Dans ce panorama, la mission **MSR** offre un cadre scientifique et technique inédit en associant deux défis, l'un technologique pour la collecte et le convoyage d'échantillons de roches entre Mars et la Terre, l'autre scientifique et technique par le déploiement d'analyses biologiques de très haute précision dans des laboratoires respectant les contraintes de protection planétaire les plus strictes. Les exigences techniques et scientifiques du protocole de quarantaine dépassant largement le cadre des compétences disponibles à l'INSU, les communautés scientifiques d'autres instituts INSB, INEE, INC voire de l'INSHS, et d'autres organismes, compétents notamment en virologie, bio-

chimie, médecine, agronomie, épidémiologie ou en sociologie des risques (INSERM, INRA, Institut Pasteur...), doivent donc être incitées à participer à cette mission exceptionnelle.

Au-delà de ces considérations scientifiques structurantes de **MSR**, la mise au point et la construction d'un

centre de quarantaine et de curation européen sera un formidable moteur d'innovation pour des savoir-faire industriels européens. La France a de nombreux atouts pour être à la tête d'un consortium d'états européens prêt à accompagner la NASA dans cette mission ambitieuse afin de donner toute sa dimension à l'investissement européen.

3.1. SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

Objectifs/Observations	Questions scientifiques	Cadre	Missions/Actions
Retour d'échantillons martiens	Identifier des traces ou formes de vie et détecter des biomarqueurs en conditions confinées (quarantaine)	Multilatéral NASA/ESA	Stratégie de collecte et d'analyse en quarantaine – Solliciter toutes les compétences disponibles
Préparation aux analyses d'échantillons extra-terrestres		ESA – CNES France	Construction de Facilités de Quarantaine et Curation en France (ou Europe)
Détection et caractérisation systèmes extrasolaires	Identifier et (M, R, atmosphère) d'exoplanètes géantes chaudes et telluriques tempérées	ESA – NASA	Soutien à Ariel, WFIRST/Luvoir, HaBeX Imagerie à haut contraste, microlentilles, spectro polarimètre UV
Observation et détection des exoplanètes	Identifier et (M, R, atmosphère) d'exoplanètes géantes chaudes et telluriques tempérées	INSU/CNES	Complémentarité télescopes Sol et spatiaux (Plato 2.0 + JWST + Sphere). Interprétation des données spectroscopiques
Analyses in situ et expérimentation ex situ	Déterminer (observation + modélisation) les planètes potentiellement habitables	INSU/CNES	Préparation de missions – astrophysique de laboratoire
Exploration des lunes glacées	Compréhension des processus de formation des matières organiques	Multilatéral NASA/ESA	Juice + Missions avec atterrisseurs (DragonFly...)
Observation des Interactions Etoiles - MIS	Caractérisation des habitats de (sub)-surface – Chimie prébiotique	Multilatéral/ESA	Spectroscopie polarimétrie MIR au FIR

Sous le trait rouge les recommandations convergentes avec des objectifs scientifiques dans le périmètre des groupes système solaire et astronomie astrophysique.

GROUPE DE TRAVAIL THÉMATIQUE SOLEIL HÉLIOSPHÈRE MAGNÉTOSPHÈRES

Kader Amsif (thématicien), Elvira Astafyeva, Frédéric Auchère, Frédéric Baudin, Sébastien Bourdarie, Carine Briand, Sacha Brun, Sébastien Célestin, Vincent Génot, Matthieu Kretzschmar, François Leblanc (président), Alexis Rouillard, Fouad Sahrao.

Les grandes questions scientifiques abordées dans le cadre de la thématique Soleil, héliosphère et magnétosphères (SHM) couvrent l'ensemble des problématiques liées aux relations entre notre étoile et le système solaire. Cela commence par l'étude de la structure interne du Soleil, par l'étude de l'origine de la couronne solaire, son chauffage et l'accélération du vent solaire, sur le déclenchement et la propagation des phénomènes éruptifs solaires et des particules énergétiques solaires, et enfin par l'étude de la propagation du vent solaire et des mécanismes de chauffage de celui-ci.

Cela commence par l'étude de la structure interne du Soleil, par l'étude de l'origine de la couronne solaire, son chauffage et l'accélération du vent solaire, sur le déclenchement et la propagation des phénomènes éruptifs solaires et des particules énergétiques solaires, et enfin par l'étude de la propagation du vent solaire et des mécanismes de chauffage de celui-ci.

Ces thèmes de recherche amènent une partie de la communauté scientifique à étudier l'interaction du vent solaire et des événements énergétiques solaires avec les magnétosphères intrinsèques ou induites des objets du système solaire, et en tout premier lieu avec la magnétosphère terrestre. Tous les aspects de cette interaction sont abordés comme par exemple, la formation des différentes régions de la magnétosphère, les mécanismes les déstabilisant comme les phénomènes de reconnexion à la magnétopause ou de déclenchement d'orages magnétiques depuis la queue magnétosphérique, d'accélération des particules dans les zones aurorales jusqu'au couplage avec l'ionosphère, voire avec la basse atmosphère.

L'ensemble de ces travaux amène logiquement notre communauté à s'impliquer de plus en plus dans les questions de météorologie de l'espace, en tant que physiciens mais aussi avec une volonté de promouvoir de nouveaux outils et des moyens d'observations susceptibles d'améliorer nos diagnostics.

En étudiant l'ensemble Soleil-objets planétaires, notre discipline est logiquement amenée à aborder des questions de physique fondamentale et à traiter de nombreuses questions communes aux autres thématiques des sciences de l'univers. Par exemple, des travaux d'observation et d'analyse des mécanismes de dissipation de l'énergie par des phénomènes turbulents dans le vent solaire (ou dans notre magnétosphère ou d'accélération des particules dans les zones aurorales magnétosphériques et dans l'atmosphère solaire) peuvent faire progresser notablement notre compréhension de ces phénomènes de physique fondamentale, applicable à d'autres domaines comme les lasers ou les tokamaks.

En exobiologie et planétologie, une partie de la communauté SHM cherche à comprendre ce qui rend viable une atmosphère planétaire. En astrophysique, en extrapolant notre compréhension actuelle de l'interaction entre notre planète et notre étoile, aux autres objets du système solaire, nous contribuons à décrire le rôle d'une étoile sur l'évolution d'un objet planétaire et nous caractérisons l'environnement de ces objets. De par le développement de nouvelles techniques d'observation, l'identification de nouveaux observables et le développement de nouvelles méthodes d'analyse combinant un grand ensemble de données et de mesures d'origine très variée, notre communauté est amenée à résoudre des problématiques souvent nouvelles en sciences de l'univers.

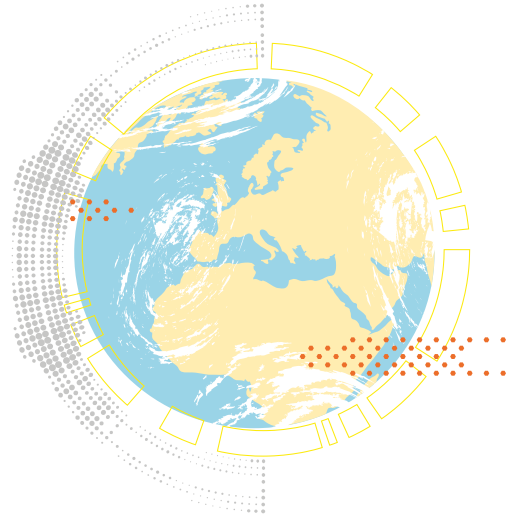
Une partie de notre communauté s'intéresse à l'ionosphère, non seulement comme lieu ultime des perturbations provenant de la magnétosphère et de son interaction avec notre étoile mais également comme région

en relations étroites avec l'ensemble des couches atmosphériques. Plusieurs projets scientifiques de notre communauté dans les années à venir ont pour objet d'étudier les effets du forçage solaire sur notre atmosphère mais également d'étudier tous les phénomènes se propageant de la basse atmosphère jusque dans l'ionosphère.

Enfin, par sa connaissance de notre Soleil et ses capacités d'observer, d'analyser et de modéliser les perturbations énergétiques solaires se propageant dans le système solaire, notre communauté contribue à aider notre société à accéder à l'espace, à développer des instruments pour son exploration et à en anticiper les risques potentiels pour les infrastructures industrielles, tant dans l'espace qu'au sol.

1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2014

1.1. BILAN PROGRAMMATIQUE DEPUIS SPS 2014



Voici le résumé des priorités du GT SHM en 2014 :

Axe scientifique prioritaire	P0 Une mission M4 ESA	P1 Missions d'opportunité	P1 Une mission S2 ESA/CAS	Missions à long terme
Régions nouvelles		INTERHELIOPROBE	Sport	PHOIBOS, SOLARIS, URANUS
Régimes nouveaux		OHMIC, EDDIE	Tor	vol en formation
Relations Soleil-Terre	ALFVEN ou TWINS	EASCO, ESCAPE	Instant, SWUSV	OISVA
R&T	miniaturisation et phase 0 pour spectro-imageur			

Le constat est simple puisqu'aucune des quatre missions identifiées à l'époque n'a été engagée :

- La mission **Interhelioprobe** russe qui semblait possible à l'époque a très rapidement été repoussée par l'agence spatiale russe,
- Le CNES a décidé en 2015, pour des raisons budgétaires, de ne pas s'engager sur la mission S2,
- Enfin, la mission **Twins**, rebaptisée **Thor**, a été proposée en réponse à l'AO M4 et sélectionnée en phase A compétitive mais a échoué à passer la dernière étape.
- Tandis que la mission **Alfven** n'a pas réussi à être sélectionnée en phase A compétitive pour l'AO M5.

Clairement, le format « petite mission » du programme obligatoire de l'ESA (*call-F* par exemple) peut offrir, dans certain cas, un cadre pour les priorités scientifiques de notre thématique. Malheureusement, pour le moment, la France a décidé de ne participer à ce type de missions qu'à un niveau symbolique. Or, les perspectives dans le cadre du programme *Cosmic Vision* de l'ESA étant très limitées au cours du prochain quinquennat, les seules perspectives nouvelles pour notre communauté seront à travers la participation à des missions d'opportunité ou à ce type de mission. Il est donc important pour le GT SHM que la France reconsidère sa participation aux petites missions.

1.2. PHYSIQUE DU SOLEIL ET DE L'HÉLIOSPHÈRE

L'étude du Soleil et de sa variabilité continue de progresser grâce en particulier à l'analyse des données provenant des missions **Soho**, **Stereo**, **SDO**, **Picard**, **Rhessi** et **Iris** souvent associées à des modélisations et des observations sol (télescope solaire Themis, instruments radio de Nançay et Nançay Radiohéliographe). Nous n'évoquons ici que quelques résultats allant du Soleil interne au déclenchement et à la propagation des phénomènes éruptifs solaires dans le milieu interplanétaire.

Grâce à la durée exceptionnelle de la mission **Soho**, la détection des modes g (pour gravitation) est plus proche que jamais comme l'indiquent plusieurs études. En effet, une annonce de détection de ces modes longs-temps recherchés est parue mais a été depuis remise en question. Détecter ces oscillations de faible amplitude, qui renseignent sur le cœur du Soleil, a été possible en combinant les 22 ans d'observations de l'instrument **Golf**. Si cette détection est confirmée, il en ressortirait que le cœur du Soleil tourne ~4 fois plus vite que l'enveloppe radiative.

Des progrès majeurs sur les processus de dynamo fluide à l'origine du magnétisme solaire ont également été obtenus. Il a notamment été montré comment les interactions non linéaires au sein du Soleil permettent d'établir un cycle magnétique avec un renversement de la polarité du champ sur une période proche de 11 ans. Associé à la compréhension du magnétisme solaire et de ses nombreuses manifestations de surface, un travail systématique sur l'origine de la complexité des taches solaires via l'émergence de flux magnétique et le rôle de l'hélicité dans le déclenchement des éruptions et des éjections de masse coronales (CMEs) a été mené. Concernant les phénomènes éruptifs majeurs, il a aussi été montré que ces éruptions étaient associées à la formation/présence d'une structure magnétique pouvant évoluer vers une instabilité soit éjective, soit confinée.

Bien qu'arrêté en 2014, les données du satellite **Picard** ont continué à être exploitées et ont permis de mieux contraindre le spectre solaire et sa variabilité. Dans le domaine de la physique solaire à haute énergie, la première comparaison des sites d'émissions X observés par **Rhessi** avec des cartes de courants électriques photosphériques déduites des mesures de champ magnétique vectoriel de **SDO/HMI** a permis de souligner le rôle de ces courants et de la reconnexion magnétique pour l'accélération des électrons dans la couronne solaire.

Les données de **Soho** et **SDO** ont fait faire des avancées significatives sur le chauffage de la couronne solaire. La

découverte et la modélisation de pulsations de grande période (plusieurs heures) dans les boucles de champ magnétique (Fig. 1) ont montré que ces pulsations sont la signature d'un état dit de « non-équilibre thermique », un cycle limite de remplissage/vidage des boucles magnétiques qui cherchent un équilibre sans pouvoir le trouver. Ces nouvelles observations indiquent de manière indubitable que dans ces cas de pluie coronale et pulsations EUV, le chauffage des boucles est très stratifié et quasi-constant.



Fig. 1 : Pulsations d'intensité et pluie coronale périodique observée avec SDO/AIA.

© Auchère et al., The Astrophysical Journal, 2018
.....

La communauté s'est également investie dans de nouveaux projets d'étude de l'atmosphère solaire, avec les vols de la fusée sonde **Clasp**. **Clasp** est une expérience dont l'objectif est de dériver le champ magnétique dans les couches élevées de l'atmosphère solaire à partir de mesures spectro-polarimétriques de la raie Lyman alpha de l'hydrogène neutre (121,6 nm), ce qui a été démontré lors du vol en 2015.

Ces dernières années ont également vu une progression de l'assimilation des données satellitaires dans les modèles de variabilité solaire, de vent et d'éruptions solaires. Des techniques de triangulation appliquées sur les données de **Stereo**, **Soho** et **SDO**, combinées avec une modélisation de la couronne, ont permis d'obtenir les propriétés 3-D du choc associé à la propagation des éjections de masse coronales (CMEs) de la couronne au milieu interplanétaire et d'étudier l'origine des particules solaires énergétiques.

La communauté SHM est fortement impliquée dans la mission **Parker Solar Probe** (NASA), pour laquelle la France est le seul pays non américain à fournir une contribution. La préparation de **Solar Orbiter** (lancement en 2020, ESA) a représenté une activité importante des laboratoires. Ces deux missions ont été préparées par de nombreuses études du plasma héliosphérique se basant sur les données des missions spatiales comme **Cluster**, **Themis**, **Wind**, **Helios** et des simulations numériques. Une attention particulière a été portée sur le rôle des fluctuations Alfvéniques dans la zone inertielle de la turbulence, dont l'amplitude augmente en se rapprochant du Soleil, ainsi que sur l'influence des ondes, des instabilités du plasma et les structures

cohérentes aux échelles ioniques et électroniques sur le spectre de turbulence ou l'influence des fluctuations compressibles sur le taux de chauffage turbulent dans les vents solaires lents et rapides. Les services d'observations STORMS (<https://stormsweb.irap.omp.eu/doku.php>), CDPP (<http://www.cdpp.eu/>) et MEDOC (<https://idoc.ias.u-psud.fr/MEDOC>) ont ainsi défini et suivi le développement d'un logiciel appelé l'outil de propagation (<http://propagationtool.cdpp.eu/>) qui permet de corrélérer des données d'imagerie (p. ex. Stereo, SDO, Soho) aux mesures in situ dans l'héliosphère.

1.3. ENVIRONNEMENTS TERRESTRE ET PLANÉTAIRES

1.3.1. Magnétosphère terrestre

Concernant la magnétosphère terrestre et le vent solaire proche, la mission **Cluster** a permis de nouvelles avancées dans la compréhension de l'interaction de la magnétosphère avec le vent solaire. Par exemple, l'exploration de la magnétosphère interne a pu expliquer l'origine du bruit équatorial ou l'exploration des petites échelles de la turbulence dans le vent solaire a été permise grâce aux séparations d'à peine quelques kilomètres entre deux satellites. L'exploitation des données de la mission **Themis/Artemis** s'est poursuivie avec l'étude de la queue de la magnétosphère, du vent solaire proche et son interaction avec la Lune. Comme illustré par la Fig. 2, le taux de chauffage turbulent dans la magnétogaine est environ 100 fois supérieur à celui dans le vent solaire. Une loi reliant taux de chauffage et nombre de Mach sonique a pu être établie et pourra être appliquée à des objets astrophysiques plus lointains.

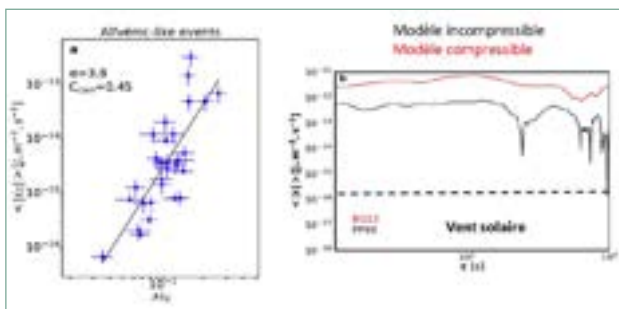


Fig. 2 : 1^{ère} estimation du taux de chauffage turbulent dans la magnétosphère terrestre à l'aide des données Cluster et Themis.

© Hadid et al., Phys. Rev. Lett, 2018
.....

L'actualité a été marquée par le lancement de la mission Magnetospheric MultiScale (MMS) de la NASA en 2015 dans laquelle la communauté française a des contributions instrumentales. Cette mission donne une moisson de nouveaux résultats sur la reconnexion magnétique, sur les processus d'accélération et de chauf-

fage du plasma, ainsi que sur les structures turbulentes à très petite échelle.

Par ailleurs **Taranis** doit être lancé en 2020 et permettra d'observer, depuis l'orbite basse, des TGF (*Terrestrial Gamma-ray Flash*), de brèves, environ 100 μ s, et intenses bouffées de rayons gamma résultant de la production de rayonnement par des électrons de haute énergie dans des nuages orageux.

On peut noter l'utilisation simultanée des données **Swarm** et celles du Radar EISCAT du Svalbard ainsi que l'étude des variations ionosphériques et thermosphériques dues à l'orage magnétique du 22-23 juin 2015 en utilisant des récepteurs GNSS et les données des trois satellites **Swarm**.

Des mesures des paramètres ionosphériques peuvent être aussi utilisées pour la détection des catastrophes naturelles, des tremblements de terre, des tsunamis, des éruptions volcaniques générant des perturbations ionosphériques via des ondes acoustiques et de gravité.

1.3.2. Magnétosphères planétaires

À l'instar de la magnétosphère terrestre, le travail d'exploration des magnétosphères planétaires (Mars, Saturne, Jupiter et Mercure) a été marqué par plusieurs événements importants.

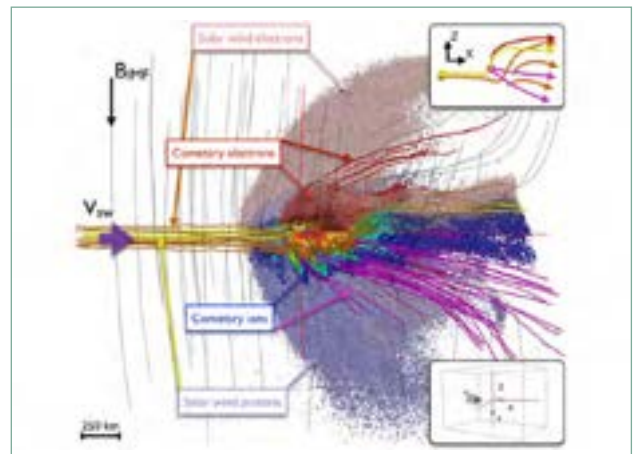


Fig. 3 : Illustration 3D du comportement de quatre espèces fluides lors de l'interaction du vent solaire avec la comète 67P avec une activité faible.

© Deca, et al., Phys. Rev. Lett, 2017
.....

La mission **Cassini** a été l'occasion d'observer d'autres formes de couplage autour de Titan. La fin de la mission **Cassini** en 2017, soldée par un plongeon dans l'atmosphère de Saturne a permis notamment une première caractérisation in situ de l'ionosphère de la planète. La mission **Maven** (NASA) obtient depuis 2015 d'excellentes mesures de la magnétosphère induite de Mars et dans son environnement proche. L'exploitation de **Mars**

Express a continué avec en particulier des résultats sur la dynamique des frontières de la magnétosphère induite de Mars sur plus d'un cycle solaire. La mission **Juno**, insérée en orbite autour de Jupiter en 2016 permet, elle, de mieux comprendre les processus d'émission d'ondes radio de l'environnement plasma jovien.

L'exploration d'autres objets du système solaire offre l'opportunité d'observer d'autres formes de couplage entre magnétosphère, ionosphère et atmosphère. Par exemple, les missions d'observation de l'environnement martien, comme **Mars Express** ou **Maven**, ont mis en évidence l'échappement atmosphérique permanent induit par l'interaction entre le vent solaire et l'atmosphère/ionosphère de Mars.

Comme illustré par la Fig. 3, la mission **Rosetta** a mis en évidence les processus physiques à l'origine de l'apparition d'une ionosphère cométaire et d'une magnétosphère induite.

BepiColombo lancée en octobre 2018 poursuit nominativement son voyage, et s'insérera autour de Mercure en décembre 2025. La communauté française y est fortement impliquée au niveau instrumental. Enfin les développements instrumentaux continuent à être menés avec succès dans le cadre de la mission **Juice** (Jupiter Icy Moon Explorer) dont le lancement vers Jupiter est prévu en 2022 et une insertion en orbite en 2029.

1.4. MÉTÉOROLOGIE DE L'ESPACE

La Météorologie de l'Espace (ME) vise in fine à la prévision de l'impact d'événements solaires sur l'environnement spatial de la Terre et les infrastructures industrielles. Plusieurs bilans des atouts observationnels, numériques et techniques fournis par la communauté SHM ont été récemment publiés.

1.4.1. Au service des utilisateurs

Suite à la dynamique mise en place par la communauté SHM et des discussions au sein du GCME (Groupe de Coordination en Météorologie de l'Espace), la France a décidé de contribuer au volet 3 du programme *Space Situational Awareness* (SSA) de l'ESA, qui fédère les activités de ME en Europe.

La communauté SHM mène de nombreuses coopérations avec les utilisateurs de la ME :

- L'Observatoire de Paris s'est impliqué dans la création du centre météorologique expérimental FEDOME de l'Armée de l'Air exploitant les données issues d'observatoires sols et spatiaux,
- Une coopération entre l'Observatoire de Paris, l'avia-

tion civile et l'IRSN existe depuis presque 20 ans pour faire fonctionner SIEVERT (<https://www.sievert-system.org>) qui permet de calculer les doses de radiations reçues par le personnel navigant,

- Des indices solaires ont été développés récemment par le LPC2E pour les besoins opérationnels, en particulier l'orbitographie (<http://spaceweather.cls.fr>),
- Un consortium de Météo France, ESSP, CLS, coordonné par la DGAC, a répondu avec succès à un AO de l'OACI pour un service mondial de ME au bénéfice de l'aviation civile (consortium France, Canada, Australie et Japon).
- Notre communauté développe des instruments sol et des services visant à améliorer les prévisions en ME et labellisés par l'INSU comme Action Nationale d'Observation 6 (<http://www.insu.cnrs.fr/node/1234>).

1.4.2. Des modèles scientifiques reconnus

Voici quelques résultats des progrès en ME réalisés par la communauté française :

- L'assimilation des données solaires visant la prévision des éruptions CMEs,
- Le déploiement de nouveaux modèles de l'ionosphère permettant une description à la fois locale et globale,
- La prévision de l'amplitude du prochain cycle solaire.

Les premières prévisions du vent solaire à 1 AU sont maintenant possibles à partir de modèles physiques simulant le plasma de la photosphère à 1 AU. Au travers du projet **Swift**, le modèle physique de vent solaire MULTI-VP (fig. 4) fournit des prévisions du plasma solaire et interplanétaire du Soleil à la Terre tout comme le modèle 3D MHD.

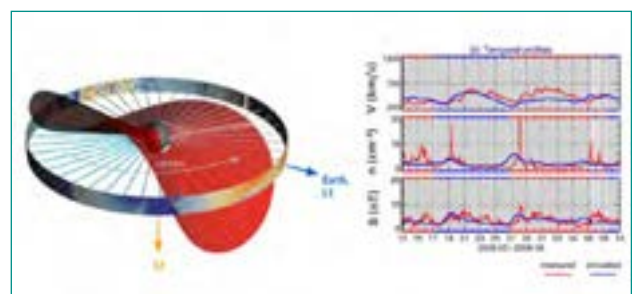


Fig. 4 : Gauche : simulations du vent solaire obtenues à partir du modèle MULTI-VP. Le bandeau de couleur représente la distribution en longitude de la vitesse du vent solaire (bleu= 300 km/s, orange= 600 km/s). Droite : comparaison des propriétés du vent solaire à la Terre du modèle MULTI-VP avec les mesures in situ d'OMNI.

© Pinto et Rouillard, *The Astrophysical Journal*, 2017

1.4.3. Une nouvelle structure française OFRAME

Plusieurs membres de la communauté SHM ont participé aux discussions avec les utilisateurs et les grands organismes au sein du groupe de travail Météorologie de l'Espace (GTME) animé par le CNES. Un nouveau Groupe de Coordination en Météorologie de l'Espace (GCME) du CNES a pris le relais et vise à offrir un lieu d'échange entre les responsables du CNES en ME, les instances nationales, industriels et chercheurs. Afin de structurer la recherche française, l'INSU, le CNES, le CEA et l'ONERA ont créé en 2017 l'Organisation Française pour la Recherche Appliquative en Météorologie de l'Espace (OFRAME).

L'OFRAME (<http://www.meteo-espace.fr/>) vise à fédérer les activités de ME au sein de la communauté scientifique française. La communauté SHM est très impliquée dans l'organisation des réunions-clés en ME comme la « *European Space Weather Week* », le *Journal of Space Weather and Space Climate*, l'organisation d'ateliers dédiés aux problématiques de la ME au sein de la communauté SHM, des réunions ME avec Météo France, le CNES (réunions du COMET) et la DGAC.

2. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

2.1. PHYSIQUE DU SOLEIL ET DE L'HÉLIOSPHÈRE

L'étude du fonctionnement et de la variabilité de notre étoile et de comment celle-ci contrôle le milieu interplanétaire est un enjeu majeur tant pour comprendre les processus fondamentaux à l'œuvre dans les milieux astrophysiques que pour nos sociétés. Les missions **Parker Solar Probe** (PSP) et **Solar Orbiter** (SolO) permettront une étude approfondie des processus fondamentaux qui gouvernent l'héliosphère en observant le Soleil au plus près et en reliant les événements solaires et leurs signatures dans l'héliosphère. La France est fortement impliquée dans ces deux missions, notamment dans PSP qui mesure in situ les paramètres du plasma lorsqu'il est au plus proche du Soleil. Ces mesures seront complétées par celles de Solar Orbiter qui mesurera les paramètres du plasma tout le long de son orbite et réalisera également des mesures de télédétection au plus proche du Soleil. Globalement, l'étude de comment le Soleil contrôle l'héliosphère nécessitera l'analyse croisée de données issues de différentes sources, ce qui nécessitera l'utilisation de plusieurs

outils en développement en France (CDPP, MEDOC) ainsi que de modèles numériques de déclenchement et propagation des transitoires solaires. A plus long terme, le projet de mission **Icarus** vise à s'approcher à 1 rayon solaire ou plus de notre étoile ; il bénéficie actuellement d'une étude avec le soutien du PASO. Une telle mission permettrait de mesurer le chauffage et l'accélération du plasma au plus proche de la source.

2.1.1. Quelles sont les causes internes de la variabilité solaire à long terme ?

Le champ magnétique qui gouverne l'héliosphère prend sa source à l'intérieur du Soleil. L'héliosismologie est un des outils indispensables pour comprendre la dynamique et sa cyclicité. Si l'instrument PHI de SolO pourra sonder les couches externes, l'instrument **Golf** à bord de **Soho** ne permet pas de confirmer la détection des modes dits de gravité qui sont l'outil idéal pour sonder le cœur du Soleil. **Solo** permettra des progrès notables en permettant des visées jusqu'à 35 degrés de latitude solaire, mais pendant des durées très limitées. L'observation des pôles du Soleil pendant de longues périodes reste donc une priorité à l'avenir. Le projet de mission **Solaris** sera proposé dans le cadre de l'appel d'offres Midex de la NASA en septembre 2019. Ce projet propose d'embarquer un magnétomètre, un imageur EUV et un coronographe sur une orbite polaire.

2.1.2. Comment fonctionnent les couplages et la dynamique de l'atmosphère solaire ?

Le premier point constitue le principal objectif de la mission japonaise de physique solaire **Solar-C** (JAXA). Le deuxième point nécessite la connaissance du champ magnétique coronal. Un coronographe permettant des mesures du champ magnétique coronal a été développé à l'IAS testé et validé avec la fusée sonde **Clasp**. La prochaine étape est le projet **Masc**, qui propose d'implémenter un coronographe permettant pour la première fois des mesures systématiques du champ magnétique coronal.

2.1.3. Comment le Soleil contrôle l'héliosphère ?

Une des thématiques émergentes de ces dernières années est l'étude de la turbulence aux échelles sub-ioniques et électroniques et son rôle dans le chauffage turbulent des particules, notamment les électrons dans le vent solaire. Ce sujet, qui nécessite de distinguer les variations temporelles et spatiales, revêt un intérêt pour d'autres plasmas astrophysiques que ceux de l'héliosphère. Cette thématique faisait partie des objectifs scientifiques de la mission **Thor**.

2.2. ENVIRONNEMENTS TERRESTRE ET PLANÉTAIRES

2.2.1. Quel est le rôle de la turbulence et de la reconnexion aux plus petites échelles du plasma ?

Les données des missions spatiales multipoints **Cluster**, **Themis** et plus récemment **MMS** ont fait considérablement avancer la compréhension des processus plasmas dans différentes régions de la magnétosphère terrestre. Parmi ces processus on peut citer la reconnexion magnétique, la turbulence, l'accélération des particules et la physique des chocs. Cependant, la nature intrinsèquement multi-échelles de ces phénomènes montre les limites des mesures actuelles. La mission **MMS** sonde maintenant les plus petites échelles, mais perd l'information sur le contexte global (échelles fluides ou ioniques). Ces raisons étaient à l'origine de la proposition des missions multipoints et multi-échelles **Cross-Scale** et **Eido-Scope** aux AO M1 et M2 de l'ESA, qui n'ont pas été sélectionnées, essentiellement pour des raisons de coût. Ceci oblige la communauté à se tourner vers des concepts multi-satellites moins coûteux, comme les plateformes nanosatellites. La communauté a ainsi répondu à l'AO F1 de l'ESA avec deux missions multi-satellites dédiées à la magnétosphère terrestre (**Prospero**) et au vent solaire proche (**Debye**).

2.2.2. Qu'est ce qui régit les processus d'accélération dans les régions aurorales ?

Comprendre la nature des processus d'accélération dans la zone aurorale en lien avec les processus d'émissions radio terrestres (ou planétaires) était un des objectifs de la mission **Alfvén**. Elle a été proposée aux AO M3, M4 et M5 de l'ESA mais n'a pas été retenue. Des projets similaires ont été proposés aux Etats-Unis sous le nom d'**Ohmic** qui devrait être proposée dans le cadre du prochain AO MIDEX de la NASA.

2.2.3. Quelle est la dynamique des mécanismes de déclenchement des sous-orages magnétosphériques ?

Un nouveau concept de mission multipoints a été proposé récemment pour étudier en 3D les processus de reconnexion et déclenchement des sous-orages dans la queue de la magnétosphère. Il s'agit du projet **Theia** qui est une mission à deux satellites pour compléter la mission **Themis**.

2.2.4. Quelles sont les processus qui régissent la dynamique des magnétosphères planétaires ?

Les émissions radios de basse fréquence donnent accès aux mécanismes d'accélération des particules très

énergétiques dans les zones aurorales des magnétosphères des planètes géantes de notre système solaire et dans la couronne solaire. Une mission d'interférométrie radio, **Noire**, constituée d'un réseau de nanosatellites a été étudiée en phase 0 par le PASO CNES. Le but principal est d'accéder à des gammes de fréquence quasi-inexplorées (1 MHz-30 MHz) en apportant de la résolution spatiale à ces observations radio.

Concernant les environnements planétaires, le succès des missions multipoints dans l'exploration de la magnétosphère terrestre incite fortement à adopter la même approche s'agissant des nouveaux projets d'exploration planétaire. La mission **BepiColombo** devrait en partie combler cette lacune. Comprendre comment une planète comme Mars réagit à des conditions solaires extrêmes d'un point de vue magnétosphérique et atmosphérique, passe par le déploiement simultané de plusieurs plateformes, pour suivre des paramètres du vent solaire en amont, observer la structure et la réactivité de la magnétosphère martienne à ces paramètres et caractériser simultanément leurs impacts sur la haute atmosphère martienne et son ionosphère. C'est l'objectif du projet de mission Rensem en phase 0 au PASO. Pour les petits corps du système solaire, la communauté a répondu à l'AO F1 en proposant la mission **Comet Interceptor** multi-satellites dédiée à l'étude de l'environnement d'une comète. Comet Interceptor a été sélectionnée en juin 2019 et représente donc une opportunité unique pour notre communauté de réaliser une première observation multipoints autour d'une comète et de son interaction avec le vent solaire.

Pour les géantes glacées, Uranus et Neptune sont probablement la prochaine étape-clé de l'exploration planétaire dans le système solaire externe. La communauté SHM possède une large gamme d'instruments bien adaptés qu'il faut soutenir pour participer à la future mission **Flagship** NASA dédiée aux géantes glacées.

2.2.5. Quel est l'effet du forçage solaire sur l'ionosphère terrestre ?

L'observation de l'ionosphère a été l'objet de relativement peu de missions spatiales ces dernières années et les liens entre la structure et composition de cette région de notre atmosphère et les différents forçages solaires restent mal connus. Il existe certes de nombreux observatoires au sol et depuis l'espace de l'ionosphère. Mais, la composition chimique, la structure 3D et sa dynamique ne sont connus temporellement et spatialement que de façon parcellaire. Le projet de mission **Daedalus** soumis à l'ESA se propose de mesurer in situ la basse thermosphère et l'ionosphère terrestre tandis que l'idée de mission **Nuam** se propose d'utiliser un réseau de nanosatellites pour cartographier l'ionosphère terrestre. De la même manière, la mission nanosatellite **Circus** souhaite tester une nouvelle approche

pour sonder l'ionosphère terrestre. Enfin, le projet de mission **Fate** se propose de caractériser l'échappement ionosphérique induit par l'interaction de notre planète avec le Soleil.

2.2.6. Quels sont les effets des TGF et TLE dans l'atmosphère et le proche environnement spatial ?

En lien avec la mission CNES **Taranis**, des projets de ballons complètent les mesures satellites : **Oreo** (Observation du Rayonnement Énergétique dans les Orages) sur Ballon sondes et **Halesis** (mesure de la signature infrarouge des événements transitoires lumineux, TLEs), pour étudier in situ les processus d'accélération d'électrons dans les nuages d'orages et les effets des TLE dans la haute atmosphère. Cette forme de collaboration entre GT SHM et GT Atmosphère météo et climat du TOSCA fait partie des stratégies de recherches sur des sujets interdisciplinaires tel que celui de l'électricité atmosphérique.

2.3. MÉTÉOROLOGIE DE L'ESPACE (ME)

Les activités de la communauté SHM en ME évoluent dans un contexte complexe et en évolution rapide. Une réponse à ces changements a été la création de l'OFRAME (section 1.4.3) qui vise à organiser la communauté scientifique dans le but de répondre de manière visible, efficace et structurée aux sollicitations du monde académique, aux organismes publics nationaux et internationaux et aux industriels pour lesquels la ME représente aujourd'hui un enjeu technique, scientifique et économique.

2.3.1. Soutenir le développement de nouveaux services et collaborations (Centre opérationnel OACI*)

De nombreuses activités visant à mettre à disposition en temps réel les observations, modèles et outils utiles pour la ME vont se poursuivre. L'OFRAME va aussi poursuivre ses activités visant à identifier les nouveaux besoins des utilisateurs comme, par exemple, les effets de radiations ou de freinage sur les satellites, sur les systèmes de positionnement, les transmissions HF ou les réseaux électriques. Compte-tenu de la sélection récente de la France dans un consortium international fournissant des prévisions en ME pour l'OACI, nous étudierons, avec le soutien de Météo France et des entreprises privées impliquées dans ce soutien à l'OACI, le développement d'un centre de ME opérationnel. Par ailleurs, de nombreux projets en commun avec les industriels (Thalès Alenia Space, ESSP, CLS) et les instances nationales (DGAC, OACI, DGA) sont déjà en

cours et plusieurs outils issus de la recherche fondamentale vont, par ce biais, transiter vers le domaine applicatif très prochainement. La ME a besoin d'autres financements dédiés à la ME et répondra aux appels d'offre du CNES (SHM/ITT), de l'ANR, de l'ESA et des programmes européens. Ces financements sont essentiels pour poursuivre la structuration des activités en ME.

2.3.2. Participer au volet 4 SSA et participer scientifiquement au projet de mission Lagrange

L'ESA étudie dans le cadre du programme SSA la mise en place d'un observatoire en aval de l'orbite terrestre au point de Lagrange L5 (mission nommée Lagrange). La pertinence d'une telle mission pour suivre les orages solaires de faibles et moyennes amplitudes depuis le Soleil jusqu'à la Terre a déjà été démontrée par les sondes Stereo. La mission Lagrange se profile comme une future mission phare du programme ESA-SSA. L'implication de la France dans le prochain volet 4 ESA-SSA est donc absolument vital pour la poursuite de toute la dynamique mise en place en France ces dernières années. Afin de répondre aux besoins sociétaux exprimés par l'industrie et les instances nationales nous recommandons donc un investissement conséquent visant à améliorer les observations et la modélisation du système Soleil-Terre et la modélisation de ce milieu au travers des programmes existants, en particulier le programme ESA-SSA.

2.3.3. Développer des nanosatellites et une instrumentation dédiée

Les micro/nano satellites dans l'environnement terrestre proche offrent aussi un potentiel de mesures extrêmement important pour la ME. Ces technologies nécessitent néanmoins des développements techniques importants, à travers l'étude de nouvelles technologies et la miniaturisation de l'instrumentation embarquée ou le maintien de vols en formation de tels essaims. Les difficultés rencontrées pour la mise en place d'accéléromètres mesurant les mouvements de la thermosphère témoignent des challenges techniques typiquement rencontrés. La communauté SHM a développé plusieurs instruments miniaturisés capables d'équiper de telles missions (comme les instruments particules **Ambre**, **Idee** et **Icare**). Des développements instrumentaux dédiés à la ME pourraient exploiter les nouvelles technologies spatiales et complèteraient la couverture des mesures des milieux et des interfaces. Une fois de plus, nous recommandons donc très fortement une participation au volet 4 du SSA visant à positionner la France sur une participation aux futurs projets spatiaux de l'ESA.

2.4. SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

Pour l'étude du transfert de l'énergie du Soleil vers les magnétosphères planétaires et en particulier vers celle de notre planète, il apparaît clairement que la première étape à franchir dans les années prochaines est de parfaire notre vision des transferts d'énergie des plus grandes échelles du transport de l'énergie, les échelles fluides, aux plus petites échelles de dissipation de cette énergie, les échelles électroniques, en passant par les échelles intermédiaires ioniques. Pour cela, seul un concept de mission multipoints est à même de permettre de résoudre simultanément, avec une résolution temporelle adéquate, ces trois échelles spatiales. Plusieurs régions-clés pourraient être couvertes par cette mission, en tout premier lieu, le vent solaire proche de notre magnétosphère, ou/et les régions d'accélération du plasma ionosphérique dans les zones polaires aurorales et/ou les régions de reconnexion dans la queue magnétosphérique ou au niveau du choc terrestre. Une telle mission doit donc associer au minimum quatre plateformes et idéalement 12 plateformes. Elle apparaît comme indispensable pour aller au-delà de nos connaissances actuelles de l'environnement plasma terrestre et de son interaction avec notre étoile. C'est pour cela que le GT SHM a souhaité la classer parmi ses priorités P0.

Pour la physique solaire, pouvoir observer à distance le Soleil en améliorant les résolutions spatiale, spectrale et temporelle apparaît aujourd'hui comme la priorité pour les cinq prochaines années. C'est le concept de la mission JAXA **Solar-C** en phase A compétitive actuellement qui a pour objectifs de résoudre la dynamique et les petites échelles par imagerie et spectroscopie, mesures indispensables pour une meilleure compréhension de la physique solaire. Cette mission et la participation instrumentale française envisagée ont été classées comme prioritaires (P0) par le GT SHM. On retiendra également les concepts de mission pour l'observation des régions polaires solaires, région-clé pour comprendre le magnétisme solaire (par exemple le projet de mission **Solaris**).

La première priorité met par ailleurs en évidence le besoin crucial d'anticiper une contribution de type nanosatellite de la France aux missions SHM avec éventuellement des applications en météo de l'espace. Nous souhaitons donc mettre en priorité P0 le développement d'une mission démonstratrice de la faisabilité de mesures plasma in situ et champs à partir d'une petite plateforme. Les nouveaux concepts de mission dans notre domaine intègrent désormais systématiquement la fourniture d'un ensemble de nanosatellites, mais souvent avec des calendriers courts impliquant des niveaux de maturité très élevés. Acquérir une ca-

pacité nationale d'une telle fourniture est donc stratégique pour notre communauté. Pour cela, nous pensons nécessaire d'étudier, de développer et éventuellement de réaliser un prototype de nanosatellite dédié à la mesure in situ. Cela implique notamment de résoudre un certain nombre de verrous technologiques (mât, EMC, spin...) au niveau plateforme mais également au niveau instrumentation (miniaturisation).

Cette priorité P0 est d'autant plus justifiée que nous avons classé en priorité P1, une mission de mesure des paramètres magnétosphériques sur petite plateforme dans les environnements magnétosphériques planétaires. Un tel concept a comme intérêt de démontrer la faisabilité des mesures plasma (mesure 3D particules et des champs électromagnétiques au minimum) sur petite plateforme tout comme de valider l'exploration en réseau d'un objet lointain. A l'aide d'au moins deux plateformes, elle aura vocation à résoudre l'ambiguïté spatio-temporelle associée aux missions d'exploration des magnétosphères planétaires actuelles qui s'appuient sur une seule plateforme (à l'exception de la mission **BepiColombo** vers Mercure). La mission **Comet Interceptor** est à ce titre une opportunité unique pour notre communauté d'observer en plusieurs points l'interaction d'un objet planétaire autre que notre Terre avec le vent solaire.

De plus, les nanosatellites apparaissent extrêmement prometteurs pour l'exploration de notre environnement, mais également pour son suivi et des applications à la météorologie de l'espace nécessitant une capacité de suivi temporel et de couverture spatiale. La région la plus mal observée aujourd'hui est l'ionosphère terrestre, développer un concept de nanosatellite dédié à son observation systématique nous semble donc tout à fait nécessaire, d'où le classement en priorité P1. Pouvoir observer cette région de notre atmosphère en plusieurs points simultanément et sur des échelles de temps longues permettrait en effet d'aborder la question du forçage solaire à l'échelle du globe et de fournir les informations nécessaires pour la météorologie de l'espace.

Enfin, le GT SHM a classé deux missions/objectifs scientifiques au niveau P2, parce que ce sont des missions ou objectifs scientifiques qui sont importants pour la communauté. Il s'agit du projet de mission **M*** d'exploration des géantes glacées et de leur environnement magnétosphérique d'une part, et d'autre part le sondage sismique de notre étoile pour confirmer ou infirmer la détection des modes-g par **Soho**.

Pour conclure cette synthèse des priorités du GT SHM, une partie des efforts de notre communauté au cours des cinq prochaines années sera aussi dédiée au développement de nouveaux concepts instrumentaux. Parmi les concepts nouveaux émergents les plus stratégiques

pour la communauté, nous souhaitons mettre en avant les efforts pour faire évoluer la filière magnétomètre à induction vers des concepts plus intégrés et couvrant une plus grande gamme spectrale, la miniaturisation des spectromètres de masse et énergie pour permettre

une réduction des ressources nécessaires mais également améliorer la couverture angulaire et temporelle de ce type d'instrument et le développement de nouveaux concepts optiques comme les surface de Fresnel ou les miroir en SiC pour l'observation du Soleil.

Thème scientifique	Type de mesure/ d'observables	Cadre de réalisation ⁽¹⁾	R&T associée
<i>Résoudre la dissipation aux plus petites échelles turbulentes dans le vent solaire proche, l'accélération des particules dans la magnétosphère terrestre, la reconnexion magnétique et la physique du choc magnétosphérique</i>	Observations simultanées des échelles fluide, ionique et électronique	ESA, NASA, JAXA	
<i>Comprendre le magnétisme coronal et la dynamique de l'atmosphère solaire</i>	Observations spectroscopiques et polarimétriques à haute résolution du Soleil	ESA, NASA (Solaris), JAXA (Solar-C)	
<i>Développer un prototype de nanosatellite adapté à la caractérisation des plasmas spatiaux</i>	Exploration in situ des plasmas spatiaux à partir de nanosatellites	CNES	Etudes PASO nanosatellite et miniaturisation de l'instrumentation plasma
<i>Comprendre la dynamique des environnements planétaires et cométaires</i>	Mesure multi-points dans les magnétosphères planétaires	ESA (Comet Interceptor), JAXA, NASA (Rensem)	
<i>Sonder l'ionosphère de manière systématique à l'aide de concepts de plateformes nanosatellite à vocation météorologie de l'espace</i>	Mesure in situ multi-points de l'ionosphère	ESA (Circus, Nuam)	
<i>Comprendre la dynamique des magnétosphères des géantes glacées</i>	Explorer les magnétosphères des géantes glacées	ESA, NASA (M*)	
<i>Comprendre la structure interne du Soleil</i>	Observation sismique	ESA, NASA	

(1) Une partie significative des missions identifiées correspondent à des missions d'opportunités ou à des « petites » mission (type classe F de l'ESA), auxquelles le GT SHM souhaite donc que la France puisse contribuer.

GROUPE DE TRAVAIL THÉMATIQUE SCIENTES DE LA MATIÈRE

Harold Auradou, Hervé Combeau, Renaud Delannay, Christophe Delaroche (thématicien), Pascale Domingo, Thierry Duffar, Eric Falcon (président), Pierre Haldenwang, Anke Lindner, Jean-Baptiste Manneville.

Les grandes questions en sciences de la matière, traitées en micropesanteur

Les Sciences de la matière s'intéressent aux propriétés physiques de la matière à des échelles mésoscopiques, intermédiaires entre les échelles microscopiques et macroscopiques. Tandis que ces deux dernières sont bien décrites par la physique quantique et atomique d'une part, et la physique classique d'autre part, les phénomènes d'organisation de la matière aux échelles intermédiaires sont encore mal connus, notamment lors de ses changements d'états. Et il faut généralement faire appel à la physique non-linéaire et à la physique statistique d'états hors d'équilibre pour modéliser ces phénomènes.

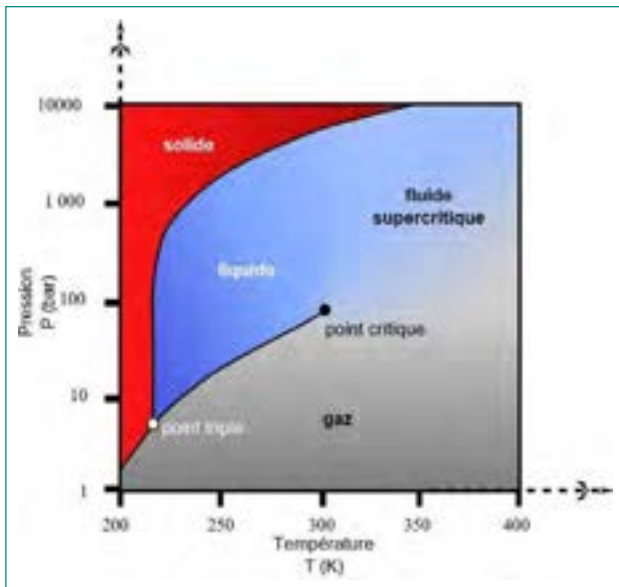


Diagramme de phase du dioxyde de carbone.

© Marc Jacobs, 2005
.....

Soumise à la gravité Terrestre, la matière s'organise selon des mécanismes induits par la pesanteur, tels que la convection, la pression hydrostatique, la sédimentation ou le drainage. Ces mécanismes masquent, ou modifient fortement, la nature des états de la matière. Pour connaître les propriétés universelles qui régissent les

états de la matière, et leurs transformations associées, il est donc nécessaire de s'affranchir de la pesanteur. Le CNES offre aux laboratoires scientifiques la possibilité de réaliser des expériences hors contraintes de gravité et ainsi de mettre en évidence des phénomènes inattendus où toutes les propriétés physiques peuvent s'exprimer.



Station spatiale internationale.

© Nasa
.....

Ces dernières années ont vu des avancées significatives dans la connaissance des propriétés fondamentales de la matière notamment grâce à la maturité acquise pour développer des instruments dédiés aux vols paraboliques et à l'ISS mais aussi par l'utilisation des moyens puissants de simulations numériques utilisant notamment la simulation en champ de phase, les architectures parallèles et les processeurs graphiques.

Cette dernière période depuis le séminaire de prospective de La Rochelle a permis l'observation de phénomènes nouveaux et leurs modélisations théoriques à l'aide de ces nouvelles puissances de calcul. Les propriétés dynamiques et statistiques de l'auto-organisation de la matière sont ainsi mieux comprises, notamment dans l'étude des états supercritiques, de l'évaporation, de la solidification ou de la combustion.

1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2014

Les scientifiques utilisateurs de la micropesanteur issus de différents laboratoires de physique sont regroupés au sein d'un Groupement de Recherche du CNRS (GdR), le GdR Micropesanteur Fondamentale et Appliquée. Le GdR a été renouvelé (pour la cinquième fois) pour cinq ans en 2018. Il compte plus de 150 chercheurs du CNRS, du CEA et des Universités. Tous se réunissent chaque année pour discuter de leurs résultats et avancées scientifiques.

La période écoulée a vu notamment la réalisation du programme de l'instrument **Déclic** dans l'ISS en coopération avec la NASA et aussi l'utilisation de l'instrument **Fluidics** installé dans l'ISS dans le cadre du projet PROXIMA.

En partenariat avec l'ESA, dans le cadre du programme ELIPS intégré aujourd'hui dans E3P sous le nom de SciSpace, les chercheurs français ont participé activement au sein des équipes de recherche organisées par l'ESA pour effectuer leurs expériences dans l'ISS ou en fusée sonde.

Nous présentons ci-dessous un bilan des activités menées dans les laboratoires du GdR et donnerons dans la section 2 les éléments de prospective correspondants pour les cinq années à venir.

1.1. MATIÈRE MOLLE ET FLUIDES COMPLEXES

La matière molle et les fluides complexes regroupent les mousses et émulsions, les granulaires et cristaux liquides ainsi que les écoulements fluides et tissus biologiques. Sous gravité Terrestre, les causes de l'organisation de ces matériaux sont masquées. La micropesanteur permet de révéler les forces faibles en jeu et de recalibrer les modèles numériques qui prévoient leur évolution. Bien que très en amont des applications, ces recherches touchent de nombreux domaines comme l'industrie minière et alimentaire, les cosmétiques, la santé.

1.1.1. Mousses et émulsions

Les mousses et gels sont deux types de solides désordonnés. Les mousses liquides sont des dispersions de gaz dans une phase aqueuse qui peut-être un fluide complexe comme une émulsion (dispersion d'huile

dans l'eau) ou encore une dispersion de particules colloïdales. Sur Terre, la gravité conduit au drainage rapide de l'eau et au crémage des gouttes d'huile ou à la sédimentation des particules. Très rapidement, les mousses deviennent « sèches » avec, dans le cas des mousses de fluides complexes, un fort gradient vertical de densité. Les expériences en microgravité constituent une opportunité unique d'étudier le comportement des mousses « humides », en particulier au voisinage de la transition de blocage (dit de *jamming*) où la mousse passe d'un comportement solide à celui d'un liquide « bulleux ». L'enjeu est important pour les nombreuses applications : lors de leur fabrication, les mousses passent par le stade de liquide bulleux, dont le comportement n'a jamais pu être étudié sur Terre.

Les dispersions de particules colloïdales (browniennes, taille inférieure au micron), sont soit des gels avec des particules attractives, soit des verres avec des particules répulsives. Sur Terre, les contraintes dues au poids de ces particules ont un impact important sur la dynamique, voir l'existence même du système ; contraintes que la microgravité permet de supprimer. Le but est d'étudier la dynamique microscopique des verres et gels sollicités mécaniquement et en particulier lorsque la contrainte (ou la déformation) imposée dépasse le seuil d'écoulement ou est répétée dans le temps (essais de fatigue).

1.1.2. Milieux granulaires

La physique des milieux granulaires et des suspensions est un domaine où l'absence de gravité permet de faire progresser la compréhension des processus en jeu dans les dynamiques collectives d'ensembles de particules. Cette dynamique est tributaire du mouvement brownien pour les particules inférieures au micron, de forces extérieures imposées (contraintes, pression, champ électrique ou magnétique...) et de la sédimentation. Cette dernière est difficilement contrôlable sur Terre dans la mesure où elle implique l'utilisation de conditions d'isodensité qui réduisent drastiquement les domaines d'étude. Pour s'en affranchir l'ISS offre les conditions idéales.

Dans le domaine des granulaires, les expériences en microgravité sont souvent les seules permettant d'affirmer ou de confirmer les prédictions obtenues par simulation numérique. L'instrument **Vipgran** de l'ESA destiné à l'ISS, auquel le CNES participe activement, est en cours de développement pour l'étude du comportement des milieux granulaires (des régimes dilués à denses). Plusieurs résultats nouveaux ont été obtenus à l'aide d'un prototype en vol parabolique. L'existence d'une ségrégation entre de deux types de grains a été observée pour la première fois en microgravité et l'origine de la transition d'un « gaz » granulaire vers un amas dense de grains, lorsque leur nombre augmente,

a été comprise. Ces résultats ouvrent la possibilité d'étudier la formation des agrégats de type protoplanétaire aussi bien que le démon de Maxwell en physique statistique.

Dans un domaine voisin, l'écoulement de suspensions concentrées concerne de nombreux matériaux comme les ciments, les peintures, les composites fonctionnels, les céramiques, etc. et des procédés de mise en forme basés sur l'extrusion de ces pâtes dans des moules ou via les imprimantes. La gravité joue là aussi un rôle important car même une sédimentation sur la distance d'un diamètre de particule (de l'ordre du micron) est suffisante pour désolidariser la pâte des parois ou provoquer l'agrégation entre particules. On observe alors, dans certaines conditions d'écoulement, la formation d'agrégats de particules en contact frictionnel qui bloquent l'écoulement. Ce blocage peut être contrôlé par l'application d'un champ magnétique qui compense la gravité.

1.1.3. Biophysique

Les propriétés du sang et des interactions avec l'endothélium qui recouvre l'intérieur des vaisseaux sanguins est étudiée en collaborations entre laboratoires de physique, de biologie et de chimie. Ils visent à élucider les mécanismes fondamentaux (structuration, margination, agrégation) en utilisant les moyens d'accès à la microgravité pour s'affranchir de la sédimentation et dériver des lois générales prenant en compte les propriétés mécaniques variables des globules rouges ou des microcapsules.

Le couplage sang/signalisation biochimique est simulé dans l'étude de la circulation du sang dans des réseaux complexes (agrégats, transport d'oxygène, partition hématocrite...) avec analyse de la signalisation biochimique (calcium et ATP qui est un nucléotide fournissant l'énergie nécessaire aux réactions chimiques).

Le dysfonctionnement endothélial est étudié en analysant les effets de la digestion enzymatique du glyco-calyx (brosse de bio-polymères couvrant la paroi endothéliale) sur l'interaction de corpuscules sanguins. La digestion enzymatique mime l'effet de l'activité de l'amylase (augmentée en microgravité d'après des mesures sur des astronautes russes).

La culture cellulaire et l'ingénierie tissulaire utilise la manipulation acoustique. La micropesanteur permet de valider les principes de création et de structuration spatiale d'agrégats de particules biologiques. La technique a été récemment améliorée en ajoutant une illumination spécifique des objets en lévitation.

1.1.4. Cristaux liquides

Dans le domaine des fluides complexes, les propriétés d'auto-organisation de la matière sont abordées par une nouvelle approche qui consiste à tirer parti des défauts topologiques d'un film de cristaux liquides. Ces défauts contrôlent de nombreuses propriétés de la matière condensée. En introduisant des nanoparticules dans ces cristaux liquides, on induit un piégeage des nanoparticules dans les défauts topologiques dont on peut suivre ensuite l'évolution. Ces défauts, de par leur taille et leur nature, orientent les nanoparticules dans leur déplacement et on peut ainsi contrôler l'assemblage de nanoparticules. La micropesanteur permet ici d'étirer des films liquides minces sans courbure.

1.2. ÉTATS ET TRANSITIONS D'ÉTAT DE LA MATIÈRE

L'étude fondamentale des transitions d'état, de l'état solide au domaine supercritique, conduit à se placer sur les points de transition et à observer le changement d'état de la matière en se maintenant sur ce point. Ce champ de recherche s'applique par exemple à la fabrication de matériaux métalliques de haute performance, aux échangeurs thermiques ou encore, pour ce qui concerne le domaine supercritique, à l'extraction des huiles essentielles ou à la valorisation de la biomasse.

1.2.1. Solidification

La solidification concerne le changement d'état de la matière d'un état liquide à un état solide. Les projets d'expériences de solidification en micropesanteur sont nombreux en France. Grâce à l'action du CNES, de grands succès reconnus internationalement ont été obtenus, lors d'expérimentations préparatoires au sol et pendant les campagnes de vols paraboliques, de fusées sondes et dans l'ISS. Notre compréhension de la formation des micro- et macro-structures de solidification a pu ainsi évoluer de manière spectaculaire. La croissance des cristaux et les instabilités morphologiques associées sont, en impesanteur, gouvernées uniquement par la diffusion de solutés et de chaleur, couplée à la réponse des interfaces solide-liquide. On explore ainsi les fondements de la formation des microstructures dans un contexte de physique non-linéaire des structures hors équilibre et on met en relief des phénomènes sensibles aux mouvements du fluide. Les microstructures de solidification sont la trace figée dans le solide de cette dynamique d'interface mobile. Elles déterminent les propriétés des matériaux ainsi élaborés. La recherche amont en solidification a un très fort impact industriel, notamment grâce aux simulations numériques pour lesquelles les équipes françaises sont à la pointe dans ce domaine.

Des alliages modèles se solidifient comme les métaux, mais ont l'avantage d'être optiquement transparents et de fondre à des températures faciles d'accès. Ils permettent d'observer en temps réel la morphologie de l'interface solide-liquide. L'insert DSI de l'instrument **Declic** est un projet en coopération CNES/NASA pour l'étude de la dynamique de modifications de forme cellulaire ou dendritique (alliages dilués). On obtient des résultats spectaculaires et inédits sur la sélection microstructurale et la dynamique d'ordre/désordre sous l'influence de distorsions du champ thermique ou de la cristallographie (compétition de grains, "cellules solitaires").

Des équipes du GdR participent aussi activement aux projets de l'ESA dans ce domaine :

L'instrument **Transparent alloys**, installé début 2018 dans la *Microgravity Science Glovebox* (MSG) de l'ISS, a été conçu sur la base d'une méthode optique développée à l'INSP. Il permet l'observation in situ de la dynamique des structures de front de solidification biphasée (croissance couplée) dans les alliages « eutectiques ».

Le succès a été total : performances de l'appareil, tenue en service des échantillons et nouveaux résultats scientifiques. Pour la première fois expérimentalement, une transition morphologique entre fibres et lamelles a été mise en évidence. Une prochaine campagne doit avoir lieu début 2020, avec des échantillons « à gradient » et des alliages ternaires. L'analyse par simulations numériques est réalisée par le groupe de Mathis Plapp au LPMC. Ce groupe a développé de nouveaux codes de champ de phase pour inclure les effets d'anisotropie interfaciale.

La solidification à haute température des métaux est étudiée dans l'instrument **XRMON** et vise l'étude in situ de la croissance dendritique colonnaire ou équiaxe dans des échantillons d'alliages aluminium-cuivre par radiographie X en temps réel. Une première expérience a été réalisée en fusée sonde. Tandis que les vols paraboliques ont révélé une transition colonnaire-équiaxe par variation de pression hydrostatique lors des changements de gravité.

Les expériences **Cetsol**, à bord de l'ISS, ont aussi donné des résultats sur la transition colonnaire-équiaxe abruptes ou graduelles qui ont pu être analysés finement grâce aux simulations numériques.

L'insert **Micast** (SIMAP) étudie les possibilités de contrôle de la convection dans le métal en fusion par action d'un champ magnétique. Le SIMAP collabore à la modélisation de l'expérience de référence au sol et développe de nouveaux modèles de croissance mixte colonnaire-équiaxe.

1.2.2. Evaporation et ébullition

Les activités sur la matière à l'état diphasique (liquide-gaz) sont menées par cinq laboratoires qui s'intéressent aux gouttes et aux bulles avec ou sans tension active. On étudie les phénomènes impliqués dans l'évaporation, le comportement des ponts capillaires et leur rupture et les régimes d'évaporation pulsants hautement ordonnés.

L'expérience **Rubi** de l'ESA coordonnée par l'IMFT est destinée à l'étude de l'ébullition sur site isolé, sous écoulement ou avec champ électrique. L'expérience sera lancée sur l'ISS en juillet 2019. Elle sera en opération pendant quatre mois. La croissance et le détachement des bulles seront filmés à l'aide d'une caméra rapide et la distribution de température à la surface de l'élément chauffant sera mesurée par une caméra infrarouge.

La vaporisation est le changement d'état d'un liquide à un gaz. Il peut généralement prendre la forme d'une ébullition ou d'une évaporation. L'objectif des recherches est de quantifier les effets des instabilités provoquées par les différences de densité. Ces phénomènes physiques de base sont présents dans de nombreux processus d'échange thermique. Concrètement, il s'agit par exemple d'évaluer les transferts de masse ou les transferts thermiques.

Ainsi pour les problématiques d'évaporation, il s'agit de préciser les mécanismes de l'évaporation du ménisque d'une goutte placée dans une phase gazeuse. Les expériences en microgravité permettent d'étudier hors perturbation la ligne de contact liquide-vapeur-solide qui joue un rôle fondamental dans le processus d'évaporation. En effet, l'évaporation est fortement couplée aux conditions limites et aux phénomènes se déroulant sur le bord de la goutte : diffusivité thermique et mouillabilité du substrat, phase gazeuse à l'interface de la goutte.

Le phénomène opposé de condensation est aussi regardé de près, il est présent dans de nombreux domaines techniques, y compris dans les applications spatiales. Une connaissance accrue permettrait par exemple d'optimiser la captation d'eau en milieu aride.

Pour le transfert de puissance, plusieurs techniques sont étudiées et parmi elles, les boucles fluides (monophasiques ou diphasiques) qui permettent un fort transfert. L'intérêt des boucles diphasiques est l'utilisation astucieuse de la chaleur de vaporisation qui permet de réduire les débits de masse et d'avoir des transferts de chaleur sur une plage étroite de température assurant une régulation précise. Cependant, la mise en œuvre de ces deux types des boucles se heurte à un manque crucial de connaissances importantes pour le

dimensionnement. L'objectif des recherches menées en micropesanteur est, par déduction, d'apporter une meilleure compréhension des effets de la gravité sur la turbulence et l'organisation des écoulements diphasiques par exemple dans une conduite tubulaire.

1.2.3. Fluides supercritiques

La température au point critique concerne le point du diagramme des phases où la coexistence des phases liquide et vapeur se termine. Au-dessus de cette température, les propriétés physiques d'un fluide supercritique (densité, viscosité, diffusivité) sont alors intermédiaires entre celles du liquide et celles du gaz, tandis que d'autres divergent (tension de surface, compressibilité, etc.).

En micropesanteur, les recherches sur les fluides placés au voisinage du point critique s'affranchissent de perturbations liées à la gravité. L'instrument **Declic** et ses inserts scientifiques leur a été dédié.

L'insert **Ali** a permis de paramétrer l'équation d'état universelle et de mettre en évidence l'importance de l'écart à la densité critique dans les comportements asymptotiques de type Ising à une proximité du point critique jusque-là inexplorée. Les fluctuations critiques ont été observées pour la première fois en direct dans l'espace.

Une avancée significative dans la compréhension et la caractérisation des lois d'accrochage des bulles sur les parois chaudes a aussi été réalisée grâce à l'insert **Ali**. Cela a permis de mieux appréhender la transition souvent catastrophique qui conduit à l'établissement d'un film de vapeur isolant à la surface des échangeurs. Les lois d'accrochage ainsi définies vont dans un proche avenir permettre d'optimiser un nouveau type d'échangeur très prometteur que sont les PHP ou Tubes pulsés oscillants.

L'insert **HTI** est dédié à l'étude du comportement de l'eau supercritique. Un effort technologique conjoint et soutenu des équipes CNES/CNRS et NASA a permis de maîtriser le passage à l'état supercritique de l'eau et de caractériser les effets de la présence de sels dans l'eau. En effet les sels sont les produits de combustion de la matière organique dans l'eau supercritique et il est important de mesurer les effets de leur accumulation locale sur la combustion. Ce mode de combustion, dite combustion froide, nécessite une faible énergie en comparaison d'une combustion classique et accélère les vitesses de réactions chimiques entraînant la décomposition très rapide de la matière organique.

1.3. INSTABILITÉS, TRANSFERTS ET ONDES

Ce champ de recherche regroupe la combustion et l'organisation des liquides face à un apport d'énergie sous différentes formes. L'objectif de recherche est lié à la transition énergétique et à la compréhension des phénomènes météorologiques.

1.3.1. Combustion

Les objectifs de la recherche scientifique sur la combustion en microgravité sont essentiellement d'accroître les connaissances sur les phénomènes fondamentaux de combustion, puis d'utiliser les résultats de la recherche pour faire progresser les technologies liées à la maîtrise de la combustion.

Les processus de combustion en gravité terrestre sont généralement fortement influencés par la convection naturelle. La recherche en microgravité permet de mener de nouvelles expériences dans lesquelles les écoulements et la sédimentation induits par la gravité sont pratiquement éliminés. Un environnement stationnaire propice à des résultats plus symétriques simplifie l'approche scientifique. Cela facilite les comparaisons avec les résultats de la modélisation numérique et avec les théories. On peut ainsi mettre en évidence des flux électrostatiques faibles ou la thermocapillarité et la diffusion. Enfin, l'élimination des perturbations causées par les forces de flottabilité peut augmenter la durée des expériences, permettant ainsi l'examen des phénomènes à plus grande échelle temporelle.

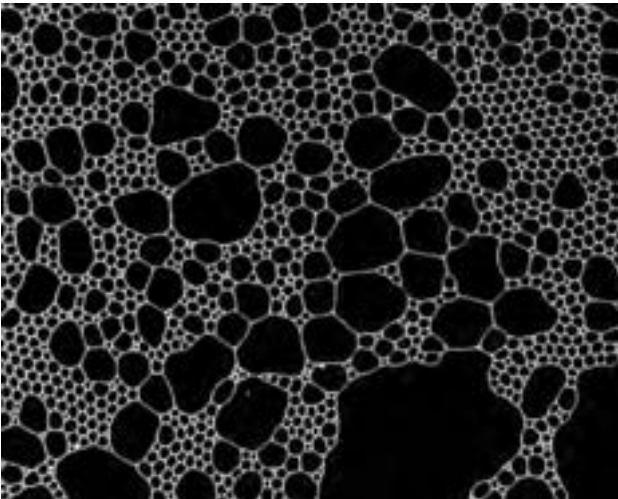
Au niveau international, différentes équipes de recherche travaillent sur ces problématiques de combustion en microgravité, avec une forte représentativité de la part des États-Unis et du Japon. L'Europe est faiblement active, sauf en France où trois équipes sont soutenues par le CNES. La première concerne les recherches sur la combustion diphasique (spray combustibles), avec un volet expérimental, et un volet de simulation numérique, et la seconde concerne les études en combustion solide sur des flammes de diffusion et sur la production des suies.

1.3.2. Interfaces hydrodynamiques

La turbulence d'ondes concerne l'étude des propriétés dynamiques et statistiques d'un ensemble d'ondes en interaction non linéaire. Sur le plan fondamental, c'est une configuration dans laquelle le spectre d'énergie peut être prédit analytiquement dans la limite d'interactions faibles. Les applications sont diverses et concernent par exemple, les vagues à la surface des océans, les ondes d'Alfvén dans les plasmas astrophysiques ainsi que de nombreux dispositifs expé-

mentaux dont l'étude a connu un fort développement au cours de ces dix dernières années. L'intérêt de la microgravité est de permettre l'étude des ondes capillaires à la surface d'un fluide sans effet parasite des ondes de gravité et également de pouvoir travailler avec une couche de fluide à symétrie sphérique, ce qui permet de s'affranchir des réflexions d'ondes sur des parois latérales toujours présentes au laboratoire. Les expériences qui ont eu lieu en vols paraboliques et à bord de l'ISS (instrument **Fluidics**) ont montré un bon accord avec les prédictions théoriques de la turbulence faible.

L'étude d'ondes à l'interface entre un liquide et sa vapeur au voisinage du point critique liquide-vapeur permet de varier les paramètres intervenant dans la relation de dispersion des ondes et d'examiner les conséquences sur la propagation et l'atténuation des ondes.



Mûrissement et coalescence de mousses liquides

© Emilie Foret
.....

2. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

2.1. MATIÈRE MOLLE ET FLUIDES COMPLEXES

2.1.1. Mousses et émulsions

A court terme, l'enjeu est la préparation des échantillons pour la micropesanteur basée sur des expériences préliminaires au sol en cours depuis plusieurs années.

Ces expériences sont réalisées grâce à des instruments originaux qui couplent rhéologie et diffusion de la lumière (diffusion multiple pour les mousses). Pour les mousses, le but est d'élucider les dynamiques de vieillissement (mûrissement et coalescence), pour les gels et verres, d'étudier la dynamique microscopique sous sollicitation mécanique. Des expériences dans l'ISS sont prévues à partir de 2019 avec l'instrument **Foam-C** de l'ESA pour les mousses et avec le *Light Microscopy Module* de la NASA pour les gels, puis l'instrument de diffusion de la lumière **Colis** de l'ESA sera utilisé pour les gels et les verres.

A moyen/long terme, les objectifs sont les suivants :

- Caractérisation et compréhension de la dynamique lors de la transition vitreuse (verres) ou de jamming (gels et mousses), ainsi que du rôle des contraintes gravitationnelles.
- Compréhension de l'origine microscopique de la transition solide-fluide qui découle d'une sollicitation externe pour les gels et verres. Pour les mousses, cette étude était prévue, mais n'a pu être mise en œuvre dans **Foam-C** (projet REFOAM) du fait de restrictions budgétaires à l'ESA.

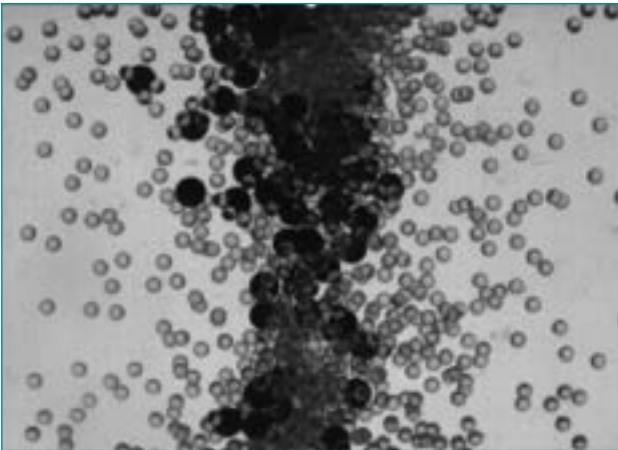
Les retombées seront multiples, outre la clarification des transitions vitreuses et de *jamming* sur le plan fondamental, les applications bénéficieront d'une compréhension plus fine des mécanismes responsables de la défaillance de matériaux désordonnés. Les procédés de fabrication des mousses pourront être optimisés, ce qui permettra par exemple de réaliser (après solidification) des matériaux nouveaux pour la construction ou la santé (biocompatibles).

2.1.2. Milieux granulaires

Les expériences à venir, menées en vol parabolique, devraient permettre de clarifier le rôle de la gravité sur les interactions particule-paroi et inter-particulaires ainsi que ses conséquences sur l'écoulement de suspensions. Dans le cas des granulaires secs, la participation au projet **Vipgran** de l'ESA devra se poursuivre jusqu'à la réalisation des expériences prévue de 2021 à 2024 dans l'ISS. L'excellent niveau de microgravité permettra d'étudier des régimes inaccessibles sur Terre comme la dynamique de relaxation d'un granulaire (lorsque l'excitation est stoppée), la rhéologie d'un granulaire proche du seuil de la transition de blocage (*jamming*), ainsi que la propagation du son dans un granulaire sans pression de confinement des grains dues à leur poids. Enfin, déplacer un granulaire sur Terre est aisé par l'intermédiaire de la gravité, mais devient un défi majeur en impesanteur : l'application de vibrations au milieu au sein d'une cellule semi-cloisonnée serait une solution et répondrait aussi à des questions ouvertes en physique statistique des systèmes hors d'équilibre.

2.1.3. Biophysique

L'étude du dysfonctionnement endothélial (interaction globules rouges/paroi des vaisseaux sanguins) se poursuivra en vol parabolique puis dans l'ISS par des expériences sur réseau microfluidique. Elle comprendra l'évaluation de l'effet de la digestion enzymatique de la brosse de bio-polymères couvrant la paroi interne



des vaisseaux sanguins.
Granulaires

© from <https://doi.org/10.1063/1.5034061>
.....

La culture cellulaire et l'ingénierie tissulaire permettront de valider les principes de création et de structuration spatiale d'agrégats de particules à l'aide d'illumination spécifique d'objets en lévitation acoustique.

A long terme ces techniques de lévitation acoustique en gravité artificielle permettront de générer des constructions biologique 3D. La perspective est donc de valider une culture cellulaire sur plusieurs heures/jours dans la station spatiale.

Le projet d'instrument **Pivo** (Photoacoustique In vivo) qui permet une mesure indirecte et non-invasive de la vitesse de sédimentation devra effectuer une campagne de vol parabolique en 2019/2020 afin de tester le dispositif sur un circuit micro-fluidique simulant un réseau sanguin. A plus long terme cet instrument assisté par simulation numérique permettra de remonter à la statistique spatiotemporelle d'agrégats de globules rouges.

2.1.4. Cristaux liquides

Le but sera de poursuivre les travaux engagés sur l'assemblage de nanoparticules sur des films de cristaux liquides dans le cadre d'expériences programmées dans l'ISS, en coopération avec la NASA et en utilisant des campagnes de vols paraboliques dans le cadre d'une coopération avec le DLR qui s'intensifie.

2.2. ÉTATS ET TRANSITIONS D'ÉTAT DE LA MATIÈRE

2.2.1. Solidification

La recherche sur les matériaux modèles transparents se poursuivra avec l'insert **DSI-R2** de **Declic** dans lequel une modification de l'insert permettra d'effectuer une mesure de température directe de l'interface solide-liquide. Cela permet d'explorer la carte des morphologies en fonction des paramètres de contrôle.

De nouveaux projets seront proposés qui concernent le contrôle adaptatif utilisant une micromanipulation par chauffage local au laser et la solidification de cristaux facettés.

Le projet **Transparent alloys** devra tirer bénéfice de l'implantation en cours de moyens de calcul utilisant des cartes graphiques (GPU). Cela conduira à une démultiplication (deux ordres de grandeur d'après les récents tests) de l'efficacité des simulations.

La participation à **XRMON** devra se poursuivre pour mettre en évidence les interactions diffusives entre cristaux en croissance, et pour montrer des effets d'inversion du sens de la solidification par rapport à la gravité.

Pour **Cetsol** et **Micast** il faudra prendre en compte les nouvelles exigences relatives aux expériences de solidification dans l'espace qui ont été formulées en 2017 et transmises par les partenaires à l'ESA.

2.2.2. Évaporation et ébullition

La campagne d'essai de l'instrument **Rubi** qui arrive dans l'ISS en juillet 2019 devra permettre de recalibrer les modèles de transport d'énergie en diphasique. A plus long terme, on attend le développement de l'expérience **ESA Flow Boiling** à laquelle on participera activement.

A terme, les équipes vont chercher à avancer plus encore sur le mouillage et l'évaporation de fluides complexes. Avec un œil attentif sur le déplacement de la ligne triple aux premiers instants de l'étalement en fonction de la nature des substrats en passant d'hydrophiles à hydrophobes. Enfin, il faudra poursuivre les nouvelles recherches qui s'intéressent depuis peu à la transposition de la microfluidique en situation de microgravité.

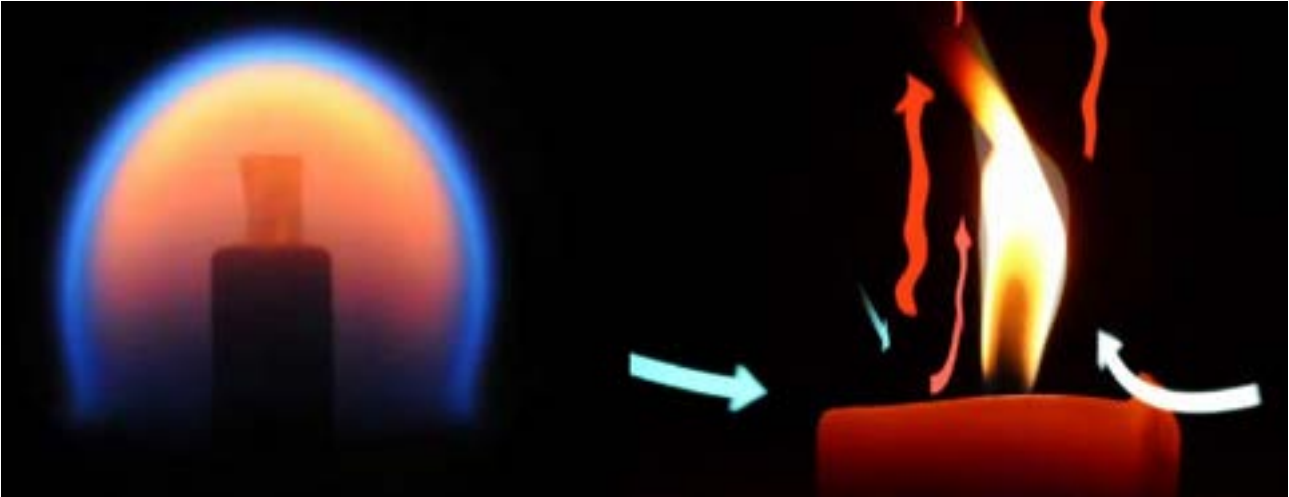


Image composite

© ESA
.....

2.2.3. Fluides supercritiques

Afin de répondre aux nouvelles exigences scientifiques et techniques, les différentes configurations expérimentales permettront de travailler en flux et seront miniaturisées. L'objectif est de poser les bases du traitement de la matière organique dans l'eau supercritique. Cela a un intérêt certain pour la neutralisation des déchets toxiques, la valorisation de la biomasse et, en particulier, pour les futures missions d'exploration habitées qui nécessitent des moyens de traitements embarqués. C'est en vue de ces futures applications que le CNES et la NASA ont convenu de poursuivre ce programme de recherche en développant un nouvel insert **SCWO** pour le programme **Declic-Évolution**.

L'insert **Scow** de **Declic-Évolution** sera ainsi utilisé pour poursuivre les études des flammes hydrothermales de combustion froide dans la perspective d'un processus de traitement continu avec séparation et récupération des produits de combustion : eau pure, sels, CO₂ valorisable.

Il est aussi recommandé d'utiliser cet insert pour l'étude de la chiralité des molécules produites par la combustion hydrothermale pour étayer l'hypothèse d'une origine de la vie à grande profondeur sur les dorsales océaniques à haute température.

2.3. INSTABILITÉS, TRANSFERTS ET ONDES

2.3.1. Combustion

Tant pour l'étude de la combustion solide que pour celle des sprays liquide, l'accès simultané à l'ensemble des

informations produites par les diagnostics développés en vol parabolique constitue une première et laisse entrevoir des perspectives extrêmement prometteuses.

L'introduction d'un certain nombre de processus physiques supplémentaires non pris en compte par les modèles actuels permettrait un apport significatif dans la prédiction de la combustion des sprays et des solides. La validation préalable des modèles proposés nécessite une comparaison minutieuse avec des expériences mettant en jeu ces différents processus pour des conditions thermodynamiques proches de celles rencontrées dans les applications industrielles.

Les travaux de recherche se poursuivront notamment via des coopérations bilatérales afin de pouvoir effectuer des mesures sur les temps longs auxquelles seules les stations spatiales donnent accès.

Ces travaux permettront d'aborder les questions de sécurité relatives aux incendies, notamment à bord des engins spatiaux.

2.3.2. Interfaces hydrodynamiques

L'activité à court terme va consister à étudier l'influence d'autres paramètres, tels que la rotation d'ensemble du fluide sur la turbulence d'ondes.

A moyen terme, les régimes d'équilibre statistique que nous avons observés pour les ondes à échelle plus grande que celle du forçage seront étudiés quantitativement. Il faudra dans ce cas considérer des quantités au-delà des spectres, telles que les corrélations à deux temps en deux points. Il sera également intéressant de pouvoir poursuivre ces expériences à bord de l'ISS en utilisant une méthode d'excitation des ondes plus appropriée.

A plus long terme, il sera intéressant d'étendre les études au voisinage du point critique liquide-vapeur au régime diphasique, c'est-à-dire à des configurations impliquant un brouillard de gouttes liquides dans sa vapeur ou des bulles de vapeur dans le liquide (nouvel insert **Aerosol**). Un problème fondamental est de déterminer comment les échanges de chaleur latente liés à la transition liquide-vapeur agissent sur l'atténuation des ondes acoustiques. Plus intéressant sur le plan des applications potentielles est d'arriver à amplifier une onde par un bon phasage des échanges de chaleur. Ces études concernent le problème général de couplage entre écoulement et transition de phase qui peut jouer un rôle important en turbulence diphasique. Des applications potentielles peuvent concerner la physique des nuages.

2.4. OBJECTIFS TRANSVERSES SOCIÉTAUX

Les sciences de la matière telles qu'étudiées en micropesanteur sont une recherche fondamentale des propriétés physique de la matière qui se situe très en amont de la recherche et développement, et des applications. Néanmoins, ces travaux étudient des questions posées par des problèmes sociétaux d'actualité, pour lesquels les organismes de recherche appellent à contribuer.



Légende à venir

© Picture-alliance/dpa
.....

La transition énergétique nécessaire ouvre plusieurs voies de recherche pour mieux utiliser les énergies fossiles et limiter les émissions carbonées et pour sécuriser les sources d'énergie alternatives. Ainsi, la micropesanteur se met au service du stockage du CO₂ dans les aquifères profonds en contribuant à l'optimisation et à la quantification des phénomènes de diffusion. Nous participons à la détermination des conditions idéales de combustion. Et nous menons aussi de

nombreux travaux sollicités par l'industrie nucléaire et les énergies alternatives pour en sécuriser et en optimiser la production.

Les recherches sur la combustion froide dans l'eau supercritique, sans émission de NO_x, permettront de détruire les déchets organiques dangereux, de retraiter les boues industrielles et de valoriser la biomasse.

En matière de santé, la suppression des forces hydrostatiques dans les vaisseaux sanguins permet de mieux comprendre les mécanismes de la circulation et les interactions entre les globules rouges et les parois qui régissent les réactions inflammatoires et les mécanismes auto-immunitaires. De plus, l'absence de gravité permet de mieux maîtriser les mécanismes de croissance des tissus biologiques en vue de produire et de réparer des organes affectés. Enfin, nous participons à la recherche des moyens de dispersion dans le corps humain de substances actives encapsulées dans des objets biomimétiques.

Les rapports du GIEC identifient depuis plusieurs années le manque de connaissance sur le fonctionnement des nuages et les transferts d'énergie qui s'y déroulent. Les applications aidant à l'amélioration des modèles climatiques et aux prédictions météorologiques sont tirées des recherches sur la turbulence et la nucléation de l'eau (nouvel insert **Aerosol**).

Toutes ces recherches utilisant la micropesanteur, trouvent des résultats qui sont évidemment directement applicables à la physique dans l'espace. De nombreuses applications à l'industrie spatiale et à l'exploration spatiale peuvent en tirer bénéfice.

Mais en amont de toutes ces applications, la micropesanteur trouve son maximum d'intérêt dans la recherche fondamentale des propriétés physiques de la matière, notamment les propriétés d'auto-organisation qui se produisent lors des changements de phase et qui en régissent les propriétés mécaniques, thermiques, électriques de la matière.

2.5. SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

2.5.1. Priorités du programme de recherche en science de la matière

Dans les années qui viennent, nous soutiendrons la continuation du programme **Declic-Evolution** dont les nouveaux inserts sont en phase A. Les recherches qui sont faites dans ces inserts scientifiques sélectionnés en coopération avec la NASA ne pourraient pas être effectuées en dehors de l'ISS. Ces recherches ne sont

pas prises en compte à notre connaissance par les autres agences spatiales et c'est une vraie spécificité française. De plus ce programme est approuvé par la NASA qui s'est engagé à transporter l'instrument et les inserts dans l'ISS.

Les sujets de recherches du programme **Declic-Evolution** sont :

- Le paramétrage des équations d'état universelles des fluides supercritiques : insert **Ali** existant
- La solidification de matériaux modèles transparents : insert **DSI** existant auquel il faut ajouter une sonde de température
- La combustion froide dans l'eau supercritique : nouvel insert **Scow**
- La nucléation de l'eau : nouvel insert **Aerosol**

Pour les deux nouveaux inserts, nous donnons une priorité à **Aerosol**.

Pour les futurs projets, nous soutiendrons les propositions d'instrument en physique fondamentale pour lesquelles la micropesanteur est incontournable. En priorité, nous souhaiterions pouvoir développer un instrument adapté à l'étude de la turbulence d'ondes.

En seconde priorité, pour les projets futurs, nous soutiendrons les projets interdisciplinaires. En effet, la micropesanteur est un des rares lieu où les échanges entre physiciens et biologistes sont facilités. Le CNES a ici une possibilité unique de favoriser ces rencontres et de décroiser ces disciplines. Il nous semble nécessaire de soutenir cette spécificité.

Au-delà des sciences de la matière, nous soutiendrons aussi les projets trans-thématiques où nous pourrions apporter un soutien fondamental à la santé, la météorologie, la climatologie, la planétologie... en apportant des modèles construits sur les propriétés universelles, hors gravité, de la matière.

2.5.2. Sélection des propositions de recherche

Entre atomes, molécules ou particules subatomiques, les interactions électrostatiques ou nucléaires dominent et la micropesanteur ne modifie pas le comportement de ces assemblages. Par contre, et essentiellement en mécanique des fluides, quand l'échelle de longueur typique est grande devant la longueur capillaire, la gravité déforme la matière et brise la symétrie haut/bas de l'interface compliquant ainsi les études et la modélisation des phénomènes étudiés. En particulier, au voisinage du point critique où la compressibilité diverge, le fluide va se stratifier sous son propre poids. De même, une bulle d'air dans un liquide, sur Terre, va toujours remonter à la surface. Par conséquent, pour sélectionner une proposition de recherche en micropesanteur, on s'intéresse aux nombres sans dimension qui régissent

le phénomène à étudier. Si ces nombres ne peuvent pas être retrouvés par un astuce expérimentale au sol, l'accès à la micropesanteur sera accordé.

Les nombres de Bond, Grashof, Rayleigh, Reynolds... sont des exemples de grandeurs sans dimension quantifiant le rôle respectif de la gravité/capillarité, de la gravité/viscosité, de la convection/diffusion, de l'inertie/viscosité... et qui vont ainsi permettre de déterminer l'intérêt des propositions. Si les nombres sans dimension issus des équations du problème ne contiennent pas la gravité g , alors la microgravité n'est clairement pas nécessaire. Dans le cas contraire, les propositions à retenir seront celles où l'influence de g sera significative dans ces nombres, et où on ne pourra pas simuler la diminution de g dans ce nombre par le changement d'un autre paramètre. En effet, s'il suffit de diminuer la taille des gouttes, de travailler avec deux fluides iso-densité, ou avec de faibles gradients de température, les expériences au sol seront privilégiées, à condition de pouvoir rester dans une gamme des paramètres où les mesures ne sont pas affectées.

Aujourd'hui les phénomènes nécessitant une étude en micropesanteur ont bien été identifiés et nombreux sont les cas où seule la présence de deux milieux de densité très différentes permet d'accepter la proposition de recherche, sous réserve que les perturbations inhérentes aux moyens d'accès disponibles ne dépassent pas l'amplitude des phénomènes à observer.



Declic installé à bord de la Station Spatiale Internationale.

© NASA/2009
.....

2.5.3. Tableau de synthèse

Type de mesure/ d'observables	Cadre de réalisation	Engagement	R&T associée	Thème scientifique
AUTO-ORGANISATION DE LA MATIÈRE				
Condensation de l'eau et influence de la turbulence sur la nucléation de l'eau	Declic-Evo (NASA) Insert Aerosol	Projet engagé avec la NASA En phase 0 au CNES	/	<i>Condensation de l'eau Transfert d'énergie</i>
Solidification des matériaux	Declic-Evo (NASA) Insert DSI-R2	Projet engagé avec la NASA En phase A au CNES	Sonde de température rétractable	<i>Structure des matériaux</i>
Combustion de la matière organique dans l'eau supercritique	Declic-Evo (NASA) Insert Scow	Projet engagé avec la NASA En phase 0 au CNES	Microfluidique	<i>Propriétés de l'eau supercritique</i>
Transfert d'énergie dans les fluides supercritiques	Declic (NASA) Insert Ali	Insert disponible Non prioritaire pour la NASA	/	<i>Equations d'état</i>
Turbulence d'ondes	CNES	à engager	/	<i>Turbulence</i>
PROPRIÉTÉS UNIVERSELLES DE LA MATIÈRE				
Matière molle et fluides complexes, états et transitions d'état	ESA SciSpace	Projets engagés A soutenir	/	<i>Propriétés de la matière</i>
Propriétés de la matière où la micropesanteur est absolument nécessaire	/	à engager en fonction des propositions de recherche	/	<i>Science fondamentale de la matière</i>
INTER ET TRANSDISCIPLINARITÉ				
Projets inter et transdisciplinaires	/	A poursuivre ou à engager	/	<i>Santé, exobiologie, climat, météo</i>



GROUPE DE TRAVAIL THÉMATIQUE SCIENCES DE LA VIE ET EXPLORATION HUMAINE DE L'ESPACE

Audrey Bergougnyan, Fabrice Bertile, Stéphane Blanc, Lionel Bringoux, Eugénie Carnéro,
Angèle Chopard, Jean-Pol Fripiat, Guillemette Gauquelin-Koch (thématicienne), Valérie Legué,
Jean-Luc Morel (président), Hervé Normand, Guillaume Py, Laurence Vico, Olivier White.

Si l'exobiologie s'attache à concevoir les formes de vie dans un contexte différent de celui de la Terre, la biologie spatiale s'attèle, quant à elle, à comprendre et modéliser les adaptations du vivant d'origine terrestre dans le contexte d'un voyage spatial pour donner à l'espèce humaine les moyens d'une exploration des mondes extraterrestres les plus proches comme la Lune ou Mars.

Dans les règnes végétal et animal, des caractéristiques adaptatives ont pu être sélectionnées en fonction des conditions climatiques ou des milieux de vie ou territoires déterminant parfois une ou des caractéristiques majeures des espèces. L'exploration spatiale induit de très importants changements environnementaux capables de modifier durablement le fonctionnement des êtres vivants qui, jusqu'alors, ont évolué lentement pour s'adapter à des modifications environnementales. L'exploration spatiale est donc une modification drastique environnementale qui nécessite un accompagnement pour maîtriser au mieux ses conséquences sur les organismes. La biologie spatiale s'applique donc à comprendre les phénomènes induits par les changements de milieu de vie des explorateurs de l'espace.

Depuis le premier vol habité par un être vivant, il est clairement apparu que le confinement des êtres vivants dans un espace clos, la modification gravitaire et l'exposition à des rayonnements particuliers constituaient les principales altérations du milieu de vie. Si le confinement permet un contrôle des conditions de vie, il représente également une limitation des mouvements, une réduction d'interactions avec l'environnement, mais aussi un excellent modèle de la sédentarité qui touche l'être humain depuis une époque récente (à l'échelle de l'évolution) et en cela la biologie spatiale apporte régulièrement son expertise et émet des concepts sur ce « mal du siècle ». Les rayonnements auxquels seront potentiellement exposés les équipages et les êtres vivants qui les entoureront sont complexes et d'intensités variables, il faut modéliser ceux reçus pendant les trajets et lors des séjours lunaires voire martiens. Ces travaux de modélisation sont de ce fait extrêmement complexes mais participent également à la compréhension des mécanismes de réaction du vivant à des expositions accidentelles ou médicales à certains types de radiations. Enfin les modifications gravitaires si elles sont les plus évidentes et sans doute les plus étudiées par les chercheurs en biologie spatiale, n'en restent pas moins une source de positionnements conceptuels pour comprendre l'adaptation du vivant à des conditions de vie particulières, à des changements brusques de milieu de vie. Enfin comme toutes les études scientifiques après avoir interrogé les effets de chaque paramètre séparément, la biologie spatiale interroge les effets de l'addition de ces différents facteurs.

Finalement la biologie spatiale tisse des liens entre la biologie fondamentale, la physiologie humaine et les sciences environnementales, car si le vivant se modifie dans l'espace, la diversité du vivant sur Terre, permet d'imaginer, en prenant inspiration des stratégies particulières mises en place par certaines espèces, des stratégies applicables à l'être humain pour lutter contre les effets physiopathologiques délétères liés à l'exploration spatiale. Le but de ces études est certes d'assurer la santé et le maintien des performances nécessaires au bon déroulement d'un vol spatial ou à la construction de la future base lunaire, mais aussi la récupération de fonctions normales une fois les équipages de retour sur Terre.

Le CNES crée la synergie indispensable avec les autres agences spatiales dans un cadre européen ou international pour offrir des moyens singuliers pour la biologie, offrant ainsi des outils pour s'affranchir de la gravité qu'il s'agisse de capsules récupérables, ballons ou vols paraboliques, mais aussi des moyens de simulation au sol originaux permettant de modéliser les perturbations du vivant terrestre lors de missions d'exploration de l'espace.

1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2014

Reprise des recommandations du séminaire de la Rochelle

- Renforcer la recherche sur les aspects fondamentaux des contraintes évolutives liées à la gravité
- Développer des aspects opérationnels pour les vols de longue durée et l'exploration par l'étude des risques radiobiologiques et psychologiques, une réévaluation des approches de contremesures intégrées.
- Rendre plus visible les apports de la bio-astronautique en santé humaine
- Développer des moyens et des plateformes au sol et en vol.

Le bilan de ces cinq dernières années est particulièrement riche 1/d'avancées notoires et inattendues qui conditionnent le suivi des équipages sur le long terme tout en améliorant les connaissances fondamentales, et 2/ du développement de nouveaux moyens d'étude comme l'immersion sèche pour une simulation au sol de la microgravité. Les domaines de recherche ayant considérablement progressé concernent le tissu osseux, la physiologie des plantes, le tissu musculaire, l'immunité et les conséquences des altérations métaboliques.

1.1. L'IMMERSION SÈCHE : UN MODÈLE POUR REPRODUIRE LES CONSÉQUENCES PHYSIOLOGIQUES DE LA MICROGRAVITÉ OU DE L'INACTIVITÉ PHYSIQUE.

Ce modèle a été développé par le CNES et a été l'occasion d'un plan de recherche concerté sans précédent dans la communauté française de recherche en biologie spatiale de ces dernières années. En effet, pour valider ce modèle il était nécessaire de regrouper des expertises permettant d'étudier conjointement, sur les sujets volontaires, un maximum de paramètres tels que le remodelage osseux, la structure musculaire, l'innervation somatosensorielle, l'autorégulation de la circulation cérébrale, la douleur lombaire, etc.

Sur la première session d'immersion sèche de trois jours concernant 12 sujets, les scientifiques ont pu pro-

duire 12 publications permettant de définir globalement que l'immersion sèche est un bon modèle pour reproduire la symptomatologie rencontrée chez les spationautes lors de la phase précoce du vol. Ainsi l'immersion sèche devient un modèle de premier choix pour valider des contremesures permettant de limiter la mise en place de symptômes physiopathologiques liés au vol spatial. En effet après trois jours d'immersion sèche apparaissent les premiers symptômes de déconditionnement cardiovasculaire et musculaire et les voies du remodelage osseux sont également perturbées.

Ce modèle a pu également confirmer le rôle endocrine chez l'humain. Ces travaux et modélisations sur l'animal ont permis d'émettre l'hypothèse selon laquelle une action sur cette phase précoce et rapide de modifications de la physiologie pourrait limiter les effets délétères du vol spatial sur la santé des équipages.

Une deuxième campagne s'est achevée en 2019 pour tester une première contremesure, utilisée par une partie des équipages de l'ISS (brassards ou *thigh cut-offs*) afin de valider le modèle. De la même façon un regroupement de plusieurs équipes de recherche a permis une étude la plus exhaustive possible de l'efficacité et de la pertinence de cette contremesure. L'immersion sèche, installée à la clinique spatiale du MEDES, va entrer dans le catalogue des moyens mis à disposition par l'ESA pour la recherche biomédicale spatiale.

Ce modèle pourra tout aussi être exploité comme un outil de recherche pour investiguer les effets de l'inactivité qui représente aujourd'hui une question majeure de santé publique. Il ouvre également des perspectives importantes pour l'étude des mécanismes conduisant à la modification des pressions intraoculaires et intracrâniennes qui sont sans doute à l'origine d'altérations de la perception lors du vol spatial qui s'ajoutent au désordre vestibulaire.

1.2. LA PERTE OSSEUSE DES OS NON-PORTEURS POST-VOL

En effet, le suivi post-exposition au vol spatial avait permis de mettre en évidence que la perte osseuse des os porteurs (membres inférieurs) se compensait très lentement : la règle qui se dessine prédit qu'un temps de récupération acceptable est égal à deux fois la durée du vol (EDOS1). Lors de ces cinq dernières années, cela a été également confirmé par des approches sur le modèle murin exposé au vol spatial (expérience **Bion M1**) chez qui une perte osseuse sans récupération immédiate après le vol a pu être mise en évidence. De plus cette perte osseuse a pu être mise en relation avec une augmentation des mécanismes de résorption et une invasion graisseuse de la moelle osseuse, tissu

contenant les cellules souches du système immunitaire entre autres.

Lors du suivi post-vol sur un temps plus long, il est apparu qu'une perte osseuse apparaissait trois mois environ après le retour sur Terre dans les os non-porteurs (membres supérieurs) suggérant que des mécanismes moléculaires sont affectés par la microgravité après un retour à la normogravité puisque les marqueurs sériques de formation et de résorption osseuse diminuent. Cela ouvre de nouvelles perspectives de recherches évidentes, nécessitant des approches globales sur la durée après les vols spatiaux mais aussi relance l'intérêt de la modélisation chez l'animal pour comprendre ces phénomènes. Il s'agit là d'une découverte majeure.

1.3. DÉSORDRES MÉTABOLIQUES LIÉS AU VOL SPATIAL

Le vol spatial se traduit par une réduction drastique de l'activité physique pouvant entraîner le développement de troubles métaboliques comme l'insulino-résistance ou les dyslipidémies dont le rôle est de plus en plus évident dans des pathologies liées à la sédentarité au sol (obésité, diabète, hypertension artérielle ou comme facteur de risque de psychopathologies). Les moyens proposés par la recherche en biologie spatiale sont décisifs dans la compréhension de ces mécanismes induits par la sédentarité puisque les sujets lors d'aliments ou d'immersion sèche et les équipages des vols spatiaux ont une réduction d'activité physique dans le dispositif expérimental.

Ils permettent également d'étudier les mécanismes de récupération puisqu'après l'exposition à l'inactivité, les sujets retrouveront une activité nominale. Les équipages à ce titre représentent une population certes réduite mais toute particulière puisqu'il s'agit de sujets physiquement entraînés qui subissent lors des vols une réduction drastique de leur activité. Dans ce contexte, plusieurs protocoles pour analyser les voies du métabolisme chez ces sujets ont été mis en place ces dernières années et produisent une grande quantité de données qui permettront non plus d'avoir une analyse corrélative mais une analyse causale et contrôlée (les apports nutritionnels étant fixés par le protocole).

Ces études métaboliques apportent et continueront d'offrir de nouvelles voies de recherche pour comprendre les mécanismes sous-tendant ces réponses métaboliques délétères des vols spatiaux de longues durées. Des travaux conduits sur la souris soumise au vol spatial (**Bion M1**) ont permis de confirmer les perturbations métaboliques mesurées ou suspectées chez l'être humain, en particulier un métabolisme ralenti et

une augmentation du stress oxydant. Il est à noter que ces expériences ont également démontré que le temps de récupération de ces paramètres est plus long que prévu initialement confirmant des travaux américains portant sur la fonction cardiovasculaire et les travaux français sur le tissu osseux.

1.4. DÉGÉNÉRESCENCE TISSULAIRE ET MICROGRAVITÉ

Le tissu osseux comme le tissu musculaire peut entrer en dégénérescence par des modifications phénotypiques des cellules qui le composent et/ou une invasion de cellule grasseuse (adipocyte). Ces mécanismes sont aujourd'hui au cœur d'une problématique de biologie et de médecine régénérative. Lors de ces dernières années les équipes françaises de recherche en biologie spatiale ont apporté des résultats importants grâce aux modèles de microgravité réelle ou simulée. L'expérience **Adiposteo**, conduite lors d'un vol SpaceX a permis de démontrer qu'un conditionnement pré-vol de cellules souche humaine par manipulation de la programmation mécanique est un nouveau moyen de contrecarrer les effets de la microgravité.

1.5. INFILTRATION GRAISSEUSE DANS LE TISSU MUSCULAIRE

Comme dans la moelle osseuse, le tissu musculaire subit une infiltration grasseuse due à l'existence des progéniteurs adipocytaires qui ont été caractérisés dans les modèles de simulations microgravitaires chez l'être humain (alitement prolongé et immersion sèche) ou les rongeurs (suspension par le train postérieur). Des acteurs moléculaires ayant été mis en évidence, cela a permis de proposer de les cibler pour tenter de nouveaux modèles de contremesures dans le domaine spatial mais également dans le cadre de la médecine post-traumatique ou dans la sédentarité liée à l'âge.

1.6. LA QUALITÉ DE LA RÉPONSE IMMUNITAIRE EST MODIFIÉE PAR LE VOL SPATIAL

S'il est admis que la réponse immunitaire en réaction à des agents pathogènes est affectée par le vol spatial, les mécanismes de la réponse immunitaire altérés par les différentes composantes du vol n'étaient que peu décrits. Par la modélisation chez l'animal, il avait été démontré que l'immunisation en vol conduisait à l'expression d'une réponse immunitaire différente de celle induite au sol suggérant des altérations des mé-

canismes de la production des anticorps. La maturation des lymphocytes B, cellules productrices des anticorps, est effectuée dans la moelle osseuse.

Lors de ces dernières années, l'effort a donc été porté sur l'analyse des modifications de la lymphopoïèse B induit par le vol spatial sur les souris provenant du vol **Bion M1**. Comme pour les modèles sol de modification gravitaire, il apparaît des altérations qui pourraient entraîner une réponse immunitaire inadaptée comme cela est observé dans des conditions de stress socio-environnementaux. De plus, une altération des mécanismes de réarrangements des gènes qui codent la séquence protéique des anticorps a pu être mise en évidence confirmant, chez l'humain exposé au vol spatial, une modification drastique de la nature des anticorps produits et par conséquent une modification de la réponse immunitaire à l'exposition à des pathogènes dont il faudra tenir compte pour les vols de longue durée.

1.7. L'IMPACT DU VOL SPATIAL SUR LE FONCTIONNEMENT CÉRÉBRAL

Si aujourd'hui les perturbations vestibulaires induites par une variation d'intensité de la gravité (microgravité et hypergravité) sont bien connues, il ne reste pas moins qu'une compréhension accrue de leurs conséquences sur l'exécution d'une action est toujours nécessaire. Dans ce domaine la modélisation chez l'animal a permis de mieux décrire les phénomènes par la réduction des moyens de compensations dont l'être humain est capable en fonction de son niveau d'entraînement préalable.

Le modèle animal a également permis d'investiguer des modifications induites par le changement gravitaire à des niveaux cellulaires et moléculaires. Ainsi, l'hypergravité induit-elle une modification de l'expression du génome dans l'hippocampe, zone cérébrale d'intégration des données contextuelles pour l'établissement de la mémoire des événements. Si un certain nombre de ces modifications sont semblables là aussi à celles observées lors d'un stress, seulement quelques-unes semblent spécifiques au changement gravitaire, ouvrant une voie de recherche sur le rôle des protéines codées par ces gènes dans les fonctions cérébrales.

1.8. PHYSIOLOGIE VÉGÉTALE

La capacité des plantes à assurer un port érigé a pris le nom de gravitropisme puisque l'axe de croissance du végétal suit la direction du vecteur gravitaire. Des travaux antérieurs, eux aussi financés par le CNES,

avaient permis de définir que les racines des plantes pouvaient détecter des variations fines de la gravité (de l'ordre de 10⁻⁴ g). Ces travaux se sont poursuivis pour montrer que les plantes étaient tout aussi voire plus sensibles à des phénomènes d'inclinaisons pour une intensité constante de gravité. Cette nouvelle donnée a pu être acquise grâce à l'interaction de chercheurs en physique et en biologie.

Après plusieurs reports des expériences en vol, le programme consistant à caractériser les modifications de l'expression des protéines dans les plantes a abouti à une publication permettant ainsi de proposer une cartographie des cibles moléculaires et des voies de transduction affectées par le vol spatial. Ces travaux se sont poursuivis par la recherche d'une contremesure pour limiter certains impacts du vol spatial sur la croissance des végétaux. Par des approches moléculaires semblables, il a été montré que l'éclairage en lumière rouge pouvait réduire les effets du stress subi par la plante lors du vol spatial. Ces aspects sont également fondamentaux pour la survie des équipages car il faudra très vraisemblablement assurer la culture de végétaux en vol pour répondre aux aspects nutritionnels.

1.9. LA QUESTION DES CONTREMESURES RESTE ENTIÈRE

Lutter contre les effets du vol spatial sur la physiologie et permettre un retour en bonne santé nécessite de développer des contremesures aux effets de la microgravité, des rayonnements et du confinement que subissent les équipages. Depuis maintenant presque trois décennies, des contremesures de type « exercice » ont été testées sans démontrer une efficacité globale. Mais depuis quelques années, des contremesures de type « compléments alimentaires » sont testées, dont ces dernières années des cocktails de différentes molécules connues pour agir sur les mécanismes délétères de l'oxydation cellulaire ou les fonctions énergétiques cellulaires. Les équipes françaises au travers d'études collaboratives ont pu montrer que si ces cocktails amélioreraient un nombre important de paramètres physiologiques, leur action n'était sans doute pas assez complète pour assurer une protection parfaite des fonctions physiologiques.

Un espoir certain vient des travaux conduits sur la détermination des facteurs qui protègent les tissus de l'ours lorsque celui-ci hiberne et qui lui permettent de ne pas présenter de grave déficit suite à son inactivité de plusieurs mois. En effet, l'ours ne présente pas de perte de masse et de force musculaire ni de densité osseuse après trois mois d'inactivité, contrairement à l'humain. Ainsi la prise en compte de la réponse à

des stress environnementaux par des espèces vivantes dans des conditions extrêmes a donc permis d'identifier une nouvelle voie pour une contremesure originale et efficace : un facteur sérique (dont la nature précise reste encore à définir) présent chez l'ours uniquement lors de l'hibernation est capable de stimuler la synthèse protéique de cellules musculaires humaines en culture, suggérant que ce facteur pourrait bloquer la dégénérescence musculaire. Une fois identifié ce facteur pourra être testé sur des modèles animaux pour évaluer son pouvoir de contremesure.

Enfin, le pouvoir radioprotecteur des contremesures doit être évalué sur des cellules en cultures afin d'évaluer leurs effets sur les mécanismes de réparations de l'ADN. C'était le but du projet **Praxitele** qui se poursuit avec le projet **Bernadotte**.

1.10. INSTRUMENTS UTILISÉS

Les sciences de la vie et l'exploration humaine de l'espace utilisent des moyens spatiaux comme l'ISS, les capsules récupérables (vol **Bion**), et les vols paraboliques (ces derniers ont un intérêt pour qualifier des instruments de mesure utilisables pour les vols spatiaux) mais aussi des moyens sols comme l'alitement prolongé, l'immersion sèche, la station Concordia mais aussi la centrifugation pour l'être humain ou la suspension par le train arrière pour les modèles animaux pour mimer les effets de la microgravité, enfin des systèmes RPM permettant d'annuler le vecteur gravitaire ont été mis dans un système d'irradiation à Toulouse pour accueillir des modèles végétaux ou cellulaires (système MARS-SIMULATOR).

Ces instruments ont été développés en étroite collaboration entre le CNES et les équipes de recherche impliquées dans les programmes de recherche. Par exemple, si l'immersion sèche a été entièrement développée à l'initiative du CNES, ce modèle répondait à la demande des scientifiques de trouver un moyen d'étudier chez l'homme les effets induit rapidement après la mise en place de la simulation de la microgravité.

1.11. IMPLÉMENTATION D'INSTRUMENTS DE SUIVI ET DE DIAGNOSTIC

Un **échographe** a été monté dans l'ISS et a pu être testé dans une configuration de suivi vasculaire des spationautes avec une commande depuis le sol par un médecin-imageur. Il est prévu de faire évoluer ce système pour mesurer d'autres paramètres en routine afin d'alimenter les bases de données recueillies sur les équi-

pages et grâce à son pilotage à distance, il deviendra en cas de besoin un outil de diagnostic dans la perspective de vols de très longue durée ou d'établissement de présence humaine sur la Lune.

L'instrument de suivi cardiovasculaire **Cardiospace1** a été livré et a été opérationnel dans la station chinoise Tiangong2, il a permis un suivi longitudinal de la fréquence cardiaque et de la pression artérielle des équipages de la station.

EveryWear est un assistant personnel numérique de collecte de données physiologiques et médicales des astronautes lors des missions spatiales (suivi nutritionnel, données des capteurs portés, questionnaires dynamiques, messagerie médicale, etc.). Il est installé dans l'ISS et a été développé par le CNES et MEDES. Il se présente sous la forme d'une application pour iPad et d'un serveur de transfert bord/sol. Cet outil s'enrichit de façon régulière depuis la mission PROXIMA de Thomas Pesquet. Il permet aussi d'autonomiser la gestion de la santé des astronautes.

1.12. LA VISIBILITÉ DES RECHERCHES SPATIALES

Comme les périodes précédentes, la communauté française a un très bon niveau, si le nombre de publications n'a pas augmenté, il se maintient et des articles à très fort impact ont été produits adressant des questions fondamentales de sciences de la vie ou de médecine en plus de répondre à des problématiques purement spatiales. Il est notable que le soutien du CNES permet la publication d'avancées conceptuelles dans les sciences de la vie (par exemple sur les invasions grassieuses des tissus, la réponse du végétal à l'inclinaison, les effets des radiations ou les mécanismes adaptatifs des espèces vivant en milieux extrêmes). Il s'agit de résultats dont les impacts scientifiques et sociétaux sont souvent tout aussi importants que ceux directement en lien avec la santé des équipages et l'exploration spatiale.

La biologie spatiale reste un domaine permettant une interaction forte entre le citoyen et les personnels de recherche, en témoignent les participations des chercheurs dans les fêtes de la science, musées de sciences et autres rencontres y compris en relation avec les sociétés locales d'astronomie. De plus, les tutelles des laboratoires mettent en avant ces recherches dans leur communication scientifique à destination des citoyens.

2. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

2.1. COOPÉRATIONS INTERNATIONALES

Celles-ci s'intensifient grâce aux moyens originaux mis en place par le CNES pour la biologie spatiale comme l'immersion sèche qui permettent aux équipes françaises impliquées dans ces programmes d'être plus attractives. La stratégie de collaboration s'établit soit à l'initiative du CNES dans le cadre des accords généraux de coopération entre agences spatiales (avec la Chine ou la Russie par exemple) soit par l'intermédiaire de collaboration des équipes scientifiques impliquées dans les projets de recherches spatiales (avec les Emirats Arabes Unis).

Cardiospace2 sera mis en place dans la station chinoise, l'échographe est également fonctionnel dans l'ISS depuis le vol de Thomas Pesquet.

Les collaborations internationales avec la Russie vont s'intensifier autour du vol **Bion M2** (MTB2) et de **Cardiomed**. L'étude du gravitropisme au niveau cellulaire en partenariat avec des équipes allemandes et du DLR sera développée. Une collaboration avec les Emirats Arabes Unis s'est également installée autour des alitements prolongés sur des aspects de biologie cellulaire et enfin une collaboration avec l'Australie dans le cadre des études des effets des radiations sur les cellules humaines.

La collaboration avec la Suède sur le modèle de l'ours hibernant est maintenant parfaitement installée et soutient une recherche de premier plan sur les mécanismes de maintien phénotypique musculaire.

Afin de maintenir un équipage en bonne santé pour assurer le bon déroulement de la mission, il est nécessaire de comprendre les bases de l'adaptation aux conditions de l'exploration spatiale, qui rappelons-le, est conditionnée par des contraintes de microgravité, de rayonnement et d'un confinement inhabituel et obligatoire. Pour conserver des capacités cognitives, immunitaires et motrices performantes chez l'être humain ; il est nécessaire de poursuivre l'étude des mécanismes physiologiques et des interactions des systèmes de l'échelle de l'organisme à celle de la cellule. Cela nécessite de collecter un grand nombre de données tant sur les sujets humains que sur les modèles animaux et végétaux, avant de mettre ces données en interrelations pour définir ou affiner des concepts régissant les mécanismes fondamentaux de la physiologie.

Ces études ont pour but également d'assurer pour les équipages un retour à la vie terrestre dans les meilleures conditions possibles tout en limitant les perturbations physiologiques délétères pendant le vol. Les études des effets de la contrainte gravitaire doivent se poursuivre en incluant des aspects aujourd'hui peu étudiés comme la douleur, la mémoire et la prise de décision, mais aussi en poursuivant l'investigation sur la perception de la gravité tant dans le règne végétal que le règne animal. La mise en place d'un séminaire de travail pour augmenter la portée des travaux des équipes françaises par le partage des données, la méta-analyse et l'établissement de collaborations internationales. Enfin, si aujourd'hui nous disposons des outils nécessaires pour étudier séparément les effets du confinement microgravité et rayonnement, il devient utile maintenant de trouver les moyens d'étudier les interactions potentielles de ces trois facteurs pouvant affecter le vivant.

2.2. ÉTUDIER LA PHYSIOLOGIE VÉGÉTALE POUR COMPRENDRE LES MÉCANISMES DE RÉPONSES AU STRESS DES PLANTES EXPOSÉES AU VOL SPATIAL

Il est nécessaire de caractériser l'action combinée des rayonnements cosmiques et de la microgravité sur le développement des plantes et cela sur un et plusieurs cycles de vie (générations) des plantes en mesurant principalement les effets liés au stress oxydatif, les impacts sur le cycle cellulaire, les dommages sur l'ADN et ses mécanismes de réparation.

Les recherches précédentes ont montré que le développement des végétaux, cultivés pour une consommation par les équipages, est altéré, ce qui risque d'avoir des conséquences sur la quantité et la qualité de l'alimentation. Il est donc nécessaire de définir des plantes d'intérêt agronomique et déterminer (1) si elles restent propres à la consommation malgré les stress subis qui induisent une forte accumulation de polyphénols, (2) et si elles sont capables de tenir « debout » et de pouvoir s'ancrer dans le sol. Il sera donc nécessaire de mettre au point des dispositifs permettant la production de végétaux dans un contexte de vol spatial, dispositif permettant de stimuler le gravitropisme pour assurer la croissance des plantes et leur fructification correctes (assurant des apports nutritionnels en adéquation avec les besoins des équipages).

2.3. MODÉLISER CHEZ L'ANIMAL LES CHANGEMENTS GRAVITAIRES AU SOL POUR FAIRE DE BION M2 (MTB2) UNE EXPÉRIENCE DE PORTÉE VOIRE DE RUPTURE CONCEPTUELLE.

Pour mesurer leurs impacts sur les processus de cognition (mémorisation, consolidation des souvenirs et rappels des informations acquises) et de prise de décision ; mais aussi les atteintes possibles des fonctions cérébrales par modification de la régulation de la pression intracrânienne, facteur de risque impliqué dans des dysfonctionnements des fonctions cérébrales (de la perception à l'action). Pour établir les altérations moléculaires du déconditionnement musculaire, osseux, immunitaire, cardiovasculaire et cérébral, cette mission Bion M2 (MTB2) permettra également de mieux comprendre les mécanismes de mort ostéocytaire pouvant rendre compte de l'absence de récupération du squelette et ceux des infiltrations graisseuses engendrant la perte musculaire et les troubles métaboliques associés.

2.4. CRÉER DES JUMEAUX NUMÉRIQUES AUX ASTRONAUTES

Cette idée exploite les données déjà recueillies pour créer un modèle des effets osseux du vol spatial qui pourra être appliqué aux données particulières de chaque spationaute, puis la comparaison du modèle et des données recueillies post-missions permettront de prédire la récupération (ou l'absence de récupération) propre à chaque sujet mais aussi de découvrir des spécificités propres à des individus dont les mécanismes de récupérations s'éloignent de ce modèle.

2.5. MESURER LES EFFETS IMMUNITAIRES DE L'ISOLEMENT/ CONFINEMENT SUR L'ÊTRE HUMAIN (EXPÉRIENCES ESA/CONCORDIA)

Les effets biologiques induit par le confinement sont facilement modélisables chez l'animal de laboratoire mais complexes dès qu'il s'agit de sujets humains. Pour traiter cette question, la base antarctique Concordia est parfaitement adaptée. Aujourd'hui les études sur le système immunitaire sont bien avancées grâce à la facilité d'accès à ce dernier chez l'humain. C'est pourquoi, ce type d'étude est soutenu par l'ESA qui a retenu un projet franco-allemand.

2.6. ÉTUDIER LE MICROBIOTE INTESTINAL

Le microbiote intestinal est aujourd'hui un sujet d'étude important car celui-ci semble avoir un rôle essentiel dans le maintien de l'homéostasie de l'individu, cependant celui-ci est particulièrement sensible au stress, et en cela il pourrait participer au déconditionnement immunitaire observé lors des vols spatiaux. Les impacts de la microgravité et du confinement, deux facteurs de stress présents lors des vols spatiaux, seront testés sur la nature du microbiote en lien avec les modifications du système immunitaire, au travers d'une collaboration franco-américaine. Le groupe de travail sera vigilant dans ce domaine à assurer la mise en relation d'équipes partageant ce type d'approches comme dans les autres domaines de recherche telles que les recherches concernant le métabolisme.

2.7. ÉTUDIER L'IMPACT DES RAYONNEMENTS SPATIAUX SUR L'ADN

Poursuivre l'étude de l'impact des rayonnements spatiaux sur les mécanismes de réparation de l'ADN sur cellules d'origine humaine (Projet mettant en jeu l'exploitation de ballons sonde).

2.8. IDENTIFIER DES MOLÉCULES ISSUES DE LA BIODIVERSITÉ IMPLIQUÉES DANS LE DÉCONDITIONNEMENT PHYSIOLOGIQUE SUBI

Poursuivre l'identification des molécules issues de la biodiversité pouvant apporter des connaissances fondamentales et appliquées au déconditionnement physiologique subi lors de l'exploration spatiale par l'identification moléculaire des facteurs sériques produits par l'ours hibernant ayant un effet protecteur contre le déconditionnement musculaire

2.9. POURSUIVRE LA RECHERCHE DE CONTREMESURES EFFICACES CONTRE LES EFFETS PRÉCOCES DU VOL SPATIAL

Une collaboration des équipes sur les modèles humains et animaux est indispensable afin de caractéri-

ser l'ensemble des effets (métaboliques, hormonaux, musculo-squelettiques, cardiovasculaire, neuronaux et immunitaires), en se focalisant sur des contremesures « spatialisables » et peu chronophages pour les équipages. Développer de nouvelles approches de type exercice physique ayant moins d'impacts possibles sur la dépense énergétique. Dans ce domaine, développer la collaboration des équipes françaises en proposant des analyses multifactorielles avec les moyens spécifiques de microgravité simulée qui représentent des modèles uniques de déconditionnement rapides et contrôlés des fonctions physiologiques.

Si les mécanismes de l'infiltration graisseuse du muscle sont bien étudiés aujourd'hui, le rôle du tissu conjonctif a été en partie délaissé, cet aspect fera partie des projets à venir puisque celui-ci souvent présenté comme un simple tissu de soutien est particulièrement important dans la physiologie des tendons et de l'enthèse.

Il reste à comprendre les mécanismes précoces du déconditionnement musculaire ou cardiovasculaire pouvant rendre compte d'un processus qu'il paraît difficile à ralentir ou à stopper.

Poursuivre l'acquisition de données et l'apport de nouveaux instruments de mesures (échographe à haute fréquence d'imagerie) dans l'ISS auprès des équipages en accompagnant et incitant les équipes françaises à participer aux appels à projets de l'ESA.

2.10. REDÉFINIR LES AXES DE RECHERCHES EN NEUROSCIENCES

Prendre en compte les fonctions cognitives, les systèmes de perceptions sensorielles, la gestion émotionnelle au niveau comportemental mais aussi au niveau des réseaux neuronaux centraux et végétatifs, de leur reprogrammation et du couplage neurovasculaire.

2.11. POURSUIVRE LES ÉTUDES DE BIOLOGIE CELLULAIRE ET MOLÉCULAIRES POUR DISSÉQUER LES MÉCANISMES D'ADAPTATION AUX CONDITIONS DU VOL SPATIAL

(Réponses cellulaires aux radiations et aux changements gravitaires) et comme moyen de validation de contremesure (facteurs sérique provenant d'ours).

Insister sur les modèles de récupération post-exposition au vol spatial pour assurer la santé des futurs équipages après leurs missions. Pour le vol **Bion M2**

(MTB2), les équipes françaises proposent une augmentation du temps de récupération (au moins égale au temps de vol) pour valider les hypothèses émises à la suite du premier vol, mais aussi de focaliser une recherche par une approche méta-omique de l'expression du génome des modifications épigénétiques et post-transductionnelles sur le plus grand nombre d'organes possible afin de cartographier les régulations métaboliques inter-organes (muscle, foie, tissu adipeux, rate, pancréas, etc.). Enfin une focalisation sur le cerveau par ces approches permettrait de définir les potentielles modifications des fonctions cérébrales de la perception à l'action motrice ou cognitive. Les hypothèses liées aux changements gravitaires seront aussi adressées sur la plateforme d'hypergravité.

Mettre en place une recherche permettant de proposer aux équipages des exercices en réalité virtuelle pour agir sur le maintien de la perception de l'environnement.

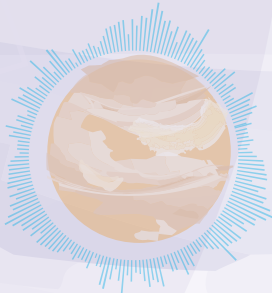
Les perspectives énoncées ci-dessus peuvent se regrouper sous une liste de recommandations réduites :

- Accroître les performances des vols de modèles animaux (MTB2/ESA) avec une nécessaire synergie avec les études chez l'Humain
- Développer les moyens d'exposition pour la radiobiologie sur l'ensemble des modèles (cellules animaux végétaux)
- Poursuivre le développement de méthodes innovantes d'investigation du vivant (échographie à haute résolution pour l'humain et l'animal, réalité virtuelle, analyse à haut débit, utilisation de l'intelligence artificielle dans l'analyse des données et le suivi individuel des équipages)
- Intégrer l'environnement de vie dans le traitement des données pour adopter un suivi individualisé des sujets des équipages et tester des outils du support vie pour en définir les effets biologiques.

2.12. SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

Type de mesure/ d'observables	Cadre de réalisation	Priorité	R&T associée	Thème scientifique
Immersion sèche Alitement prolongé (Bed rest)	ESA Collaborations de recherche	P0	/	<i>Phase précoce de l'adaptation à l'espace Recherche de contremesure efficace</i>
Modèles animaux Modèles végétaux	BION M2 (MTB2) (ESA/Russie) Flumias (DLR)	P0	/	<i>Bases cellulaires et moléculaires de l'adaptation au vol spatial</i>
Préparation de l'exploration humaine	DLR/ESA ESA/Australie ESA/Chine/Russie ISS/ESA/NASA	P1	/	<i>Adaptation du végétal comme source alimentaire Radiobiologie Outils diagnostic/suivi (Cardiomed Cardiospace Echo) Suivi post-mission Perturbations cognitives</i>
Exploration humaine	/	P2	/	<i>Support vie/Environnement Prise de risque/intelligence artificielle</i>

GROUPES TRANSVERSES



GROUPE DE TRAVAIL TRANSVERSE TECHNOLOGIE

Jean Philippe Berger, Bruno Cugny, Eric Defer, Thérèse Donath, Marc Ferrari (expert invité),
P. Kern (co-président), Cécile Langlade, Christophe Laporte (expert invité), André Laurens (expert invité),
Luc Lefebvre (expert invité), Pierre Emmanuel Martinez, Francis Pressecq,
Olivier Puig (expert invité), Isabelle Sagnes, Pierre Gilles Tizien (co-président).

Le spatial est synonyme d'un environnement relativement hostile qui nécessite le développement de technologies adaptées.

Par ailleurs, actuellement émerge un besoin pour certains domaines, de disposer de mesures multipoints ainsi que de fortes capacités de revisite. Cette tendance conduit à envisager des missions basées sur des concepts de constellations qui pour être accessibles nécessitent une miniaturisation et des procédés de fabrication en séries permettant de réduire significativement les temps de réalisation et les coûts mais aussi d'assurer une bonne reproductibilité des performances.

En outre, les missions scientifiques continuent d'adresser des questionnements pointus qui requièrent des performances aux limites de l'état de l'art et induisent des instruments de complexité croissante. Pour répondre à ces enjeux, le spatial doit innover en s'appuyant sur les technologies et des méthodes de réalisation qui émergent dans d'autres secteurs d'activités en évaluant leur potentiel pour les besoins des missions spatiales à venir. L'adaptation de ces innovations aux contraintes spécifiques du spatial est à évaluer ainsi que leurs capacités à améliorer les performances des futurs systèmes tout en répondant au besoin de minimiser coûts et durées de développement.

Dans cette optique, nous avons cherché au sein du groupe de travail à identifier les technologies émergentes susceptibles d'ouvrir des perspectives d'innovation et de progrès dans le développement des charges utiles scientifiques.

Compte tenu du champ technique potentiellement très large à traiter et afin d'éviter d'établir une liste exhaustive mais difficilement exploitable de toutes les technologies à soutenir pour préparer les missions de demain, l'approche proposée est d'identifier quelques lignes de force c'est-à-dire des domaines technologiques présentant un caractère générique susceptible d'avoir un apport transformant significatif pour la conception de futurs instruments scientifiques avec un horizon de maturité vers 2025. Nous avons choisi de faire ressortir une dizaine de thèmes pour permettre de déployer une dynamique constructive et efficace sur quelques années. Bien entendu une telle attention qui pourra mener à des actions volontaristes par le biais d'un accompagnement significatif de R&T, ne doit pas obérer le soutien à d'autres techniques jugées centrales et déjà bien identifiées dans le contexte des développements actuels.

Dans le cadre de cette réflexion, nous proposons également de favoriser une approche *bottom-up* (ou *techno push*) visant à amener à la connaissance des équipes projets proposant des missions spatiales, des techniques ou technologies disruptives susceptibles d'apporter des solutions en terme de performance, de miniaturisation, de durée de développement ou de coût p. ex., incluant la production de petites séries. Parmi les préoccupations figure le besoin de limiter autant que possible le recours au sur-mesure par l'utilisation et l'adaptation de filières technologiques génériques.

La vision *top-down* sur les besoins de technologies spécifiques requises pour de futurs instruments est assurée par les sorties des groupes de travail thématiques TOSCA et CERES. Le groupe de travail la R&D pour les moyens du futur mis en œuvre dans le cadre de la prospective CNRS-INSU astronomie-astrophysique apporte par ailleurs une vision complémentaire précieuse.

Dans la mesure où un groupe de travail spécifique au domaine Numérique et Données a également été constitué dans le cadre du séminaire de prospective scientifique du CNES, les techniques inhérentes à ces domaines (big data, intelligence artificielle, etc.) ne seront pas traitées directement dans ce document, mais seront abordées au travers de leur implémentation et apports dans les traitements bords.

1. RÔLE DE LA R&T

Les activités de R&T ont toujours constitué un pilier essentiel de la préparation des programmes spatiaux. Dans un contexte où la compétition internationale s'accroît et où de nouveaux acteurs émergent, maintenir et consolider l'excellence française dans le domaine des sciences spatiales passe nécessairement par un programme de R&T ambitieux. Cependant, dans un contexte de ressources humaines et financières contraintes, il convient de cibler les efforts de R&T principalement dans les domaines sur lesquels nous disposons d'atouts techniques originaux et innovants par rapport à la concurrence internationale, en alliant à la fois prise de risque et efficacité. Cette stratégie a jusqu'à présent permis à la France d'être un acteur important des projets scientifiques dans le cadre des programmes européens de l'ESA et des principales agences spatiales internationales.

L'apport du programme R&T et démonstrateur du CNES, dans le positionnement de la France sur certaines missions pionnières et innovantes illustre ce propos.

1.1. SWOT, ALTIMÈTRE LARGE FAUCHÉE

Pour l'altimétrie à large fauchée, le développement dès 2009 du démonstrateur des deux chaînes de réception interférométrique (le cœur analogique) de l'instrument **KaRin** de la mission **Swot**, a contribué à convaincre la NASA et le JPL d'associer le CNES et les scientifiques français au développement de l'altimètre pour les impliquer dans l'établissement des bilans de performances. Cet investissement a aussi contribué à développer au CNES et à Thales Alenia Space, une expertise unique en Europe, facilitant ainsi grandement le positionnement français pour la préparation en cours (phase A CNES **WISA** en forte coordination avec l'ESA) de la première composante européenne qui intégrera un altimètre à fauchée (**Copernicus NG/Sentinel 3-Topo**).

1.2. MICROCARB, SPECTROMÈTRE DISPERSIF

Sur la base de son expertise sur les sondeurs infrarouges, le CNES a contribué à la définition du spectromètre statique infrarouge de la mission **MicroCarb**. La réalisation de cet instrument compact a pu être envisagée suite à des travaux de R&T menés à partir de 2010 sur la démonstration de faisabilité de réseaux échelle gravés répondant à des spécifications sévères. Ce développement mené avec la société Jobin-Yvon, lui a

permis d'étoffer son catalogue de produits et d'offrir une alternative européenne aux produits américains.

1.3. CHEMCAM, SUPERCAM

Dans les années 2000, le CNES a entrepris avec la société Thalès Laser la spatialisation d'un laser miniaturisé répondant aux besoins de *Laser Induced Breakdown Spectrometry* (LIBS). Ce développement a permis à l'instrument **ChemCam** proposé par l'IRAP d'être embarqué sur la mission NASA **Mars Science Laboratory**. L'effort R&T maintenu pour valoriser ce développement et améliorer les performances du laser, a conduit à la sélection de l'instrument **SuperCam** (LIBS + Raman) sur la mission NASA **Mars 2020**.

1.4. MICROCAMÉRA 3D+

En 2015, le CNES démarre une R&T pour développer pour des missions de planétologie, une micro-caméra générique et intégrée, basée sur des capteurs d'images *Complementary Metal Oxide Semiconductor* matriciels commerciaux. Suivie par un programme démonstrateur, cette micro-caméra développée par la société 3D+, a été sélectionnée par le projet **SuperCam**, le satellite étudiant **Eyesat** et le rover **MMX** du CNES. Au vu des performances, du niveau de maturité et du coût de ce produit, la société SODERN a sollicité le soutien R&T du CNES, pour réaliser à partir de cette micro-caméra des senseurs stellaires bas coût, nommés Auriga, pour répondre à l'appel d'offre du projet de constellation OneWeb visant un accès internet spatial. Par ce soutien, SODERN a été sélectionné pour fournir plus d'un millier de senseurs stellaires. Parallèlement, la société 3D+ sollicitée pour la fourniture de ces micro-caméras par de multiples acteurs du spatial, a engagé une nouvelle R&T CNES visant une version plus performante.

1.5. RETOUR D'EXPÉRIENCE

L'excellence française dans le domaine des sciences spatiales est indéniable et reconnue internationalement. Toutefois, l'arrivée de nouveaux pays accroît la concurrence mais peut également ouvrir de nouvelles opportunités. Pour rester attractifs et crédibles, il faut disposer d'un programme de R&T ambitieux pour préparer les concepts instrumentaux originaux et innovants par rapport à la concurrence internationale. La R&T doit constituer une priorité dans la stratégie du CNES et des laboratoires scientifiques. Le CNES doit y consacrer un budget compatible des ambitions nationales. Les laboratoires et le CNES doivent maintenir un niveau de ressources humaines pérenne sur la préparation du futur, niveau ne devant pas fluctuer significativement au gré des contraintes projets.

2. IDENTIFICATION DES LIGNES DE FORCE

2.1. MOYENS ET PLATEFORMES TECHNOLOGIQUES

La communauté spatiale et plus particulièrement le CNES et l'INSU ont commencé à s'intéresser aux micro/nano technologies pour les systèmes spatiaux au milieu des années 90. Le retour d'expérience de ces 20 années de veille active ponctuées d'activités de recherche et de développement est mitigé : les composants/instruments imaginés, basés sur les micro/nano technologies, sont aujourd'hui réalité et utilisés (switch RF, accéléromètres, gyroscope, capteurs...), mais uniquement dans le secteur non spatial. Les raisons principales sont le coût de développement des produits (plusieurs dizaines de M€), la nécessité de disposer de fonderies suffisamment souples d'emploi et le fait que les fonctions visées même si elles apportent un gain significatif pour les missions spatiales peuvent avoir recours à des technologies alternatives plus conventionnelles. Il existe cependant un créneau pour l'utilisation des micro/nano technologies à des fins spatiales : les dispositifs ne nécessitant pas de développements technologiques spécifiques et lourds, et donc réalisables sur les filières existantes. Hormis ce créneau couvrant toutefois un nombre important d'applications, l'utilisation des Micro Electro Mechanical System (MEMS) et Micro Opto Electro Mechanical System (MOEMS) dans le spatial doit reposer principalement sur des produits commerciaux.

En revanche un gain conséquent est escompté par la réalisation de systèmes instrumentaux à base de micro technologies, en termes d'encombrement bien entendu, mais aussi pour simplifier fortement les phases d'Assemblage, Intégration et Test (AIT) en utilisant des composants intégrant un nombre important de fonctions, notamment en optique.

L'offre en micro-technologies en France repose sur un ensemble de plateformes technologiques académiques pilotées par le CNRS et le CEA, regroupées au sein du réseau RENATECH et sur une offre plus discrète de quelques PME essaimées par les laboratoires de recherche.

2.1.1. Plateformes technologiques académiques

La France dispose d'un réseau distribué de plateformes technologiques de micro et nano-fabrication avec 15000 m² de salles blanches réparties sur six sites et

une main d'œuvre technique d'environ 400 personnes soutenant les activités de recherche en micro & nano-technologies allant de la recherche fondamentale aux applications industrielles.

Ces plateformes sont organisées par le réseau RENA-TECH (CNRS-INSIS) et le CEA-Leti. Elles bénéficient du programme Recherche Technologique de Base (RTB) soutenu par l'ANR depuis 2004 pour ses investissements. En tant qu'infrastructures nationales de recherche, ces plateformes sont un pilier-clé de la Stratégie Nationale de Recherche et d'Innovation (SNRI) permettant à la France de maintenir sa position dans le domaine des nano-technologies.

Ce réseau se concentre autour de quatre domaines technologiques stratégiques (micro & nano électronique/spintronique, MEMS/NEMS/MOEMS & acoustique, photonique, micro & nano pour la biologie) et un domaine transverse (caractérisation/instrumentation).

Ces plateformes sont un outil indispensable à la recherche académique mais restent en partie ouvertes pour des recherches très appliquées, voire la réalisation de démonstrateurs à plus haut *Technological Readiness Level* (TRL) à des fins industrielles ou applicatives. C'est dans ce cadre qu'elles sont utilisées parfois pour les besoins spatiaux (Diodes Schottky THz et sub THz en coopération étroite entre C2N et LERMA pour l'instrument *Submillimeter Wave Instrument* (SWI) de la mission **Juice**). Cependant, les impératifs de qualité et de fiabilité des matériels spatiaux sont difficilement conciliables avec la réalité de ces plateformes : TRL insuffisants, traçabilité, maintien d'une technologie dans le temps long du spatial (typiquement 15 ans). Ce dernier point pose aussi la question de la pérennité des moyens humains et matériels dans le temps.

Cette offre de fonderie se concentre surtout sur les aspects *front-end*, objets de recherche dans les laboratoires scientifiques. Les échanges entre ces laboratoires scientifiques et les laboratoires spatiaux, plus largement la communauté spatiale, restent limités induisant une méconnaissance de l'expertise des uns et des besoins des autres. Il est nécessaire de faciliter l'accès aux centrales technologiques académiques, principalement par un renforcement des liens entre les instituts INSIS et INP du CNRS et les concepteurs d'instruments spatiaux (CNES, CNRS-INSU, CEA...).

2.1.2. Plateformes techno industrielles

Le paysage industriel français en matière de micro-technologie est très restreint : seuls trois industriels sont capables de fournir des prestations compatibles avec les exigences du spatial sans toutefois maîtriser la chaîne complète de la valeur, à l'exception de TRONICS qui maîtrise toutes les technologies né-

cessaires mais dans le domaine restreint de l'inertiel. FreqSys s'est spécialisé dans les technologies non silicium pour capteurs et AirMEMS dans les MEMS RF. Pour les plus gros volumes, les fonderies du groupe ST microelectronics commencent à s'ouvrir.

Au niveau européen, l'offre est un peu plus large, surtout côté allemand (Instituts Fraunhofer) ou suisse (CSEM et IMT Neuchâtel). On peut aussi noter la présence d'une fonderie réellement ouverte et industrielle en Hollande (Fonderie historique Philips). Cependant, plus la fonderie est industrielle, plus il est difficile d'accéder pour de petites séries caractéristiques du besoin spatial et la compétitivité industrielle rend difficile l'accès aux informations sur les procédés technologiques. De plus, sur ces fonderies, le ticket d'entrée pour la réalisation d'un composant spécifique est de plusieurs millions d'euros.

2.1.3. Intégration système des micro-technologies

L'utilisation des micro-technologies dans les équipements spatiaux passe par une intégration faisant appel à des techniques peu ou pas maîtrisées voire absentes des plateformes technologiques académiques. On peut citer p. ex. les techniques de packaging, la connectique, les interfaces optiques, l'électronique durcie ainsi que les interfaces mécaniques. Dans le cas des plateformes industrielles, ces techniques existent mais ne sont généralement pas compatibles de l'environnement spatial et demandent un effort de qualification. La solution bien souvent utilisée consiste alors à faire appel au cas par cas à des capacités *back-end* chez des industriels du spatial (HCM, 3D+...) et à des technologies durcies qualifiées pour la partie électronique. Plus localement, au sein des laboratoires du réseau RENATECH, des liens de sous-traitance existent. Au cas par cas les laboratoires spécialistes de l'instrumentation, parfois associés à des PME, ont pu aussi développer un savoir-faire très spécifique pour adresser cette question de l'intégration système, notamment pour la photonique en interférométrie et en spectroscopie.

Ce besoin étant général aux dispositifs nano/micro technologiques, il est souhaitable de soutenir la mise en place avec l'appui de RENATECH ou d'une autre infrastructure d'une capacité pérenne d'intégration/encapsulation des micro-technologies compatible avec les exigences du spatial.

2.2. FABRICATION ADDITIVE (FA)

La fabrication additive est une technologie en plein essor dans de nombreux secteurs. Le spatial y voit de forts intérêts : optimisation performance-masse, réduction d'interfaces, fonctionnalisation, prototypage,

simplification des phases d'AIT, etc. Toutefois, cette technologie doit encore monter en maturité pour devenir industrialisable et une normalisation est nécessaire afin d'accompagner concepteurs et fabricants.

2.2.1. Formalisation de règles de design, de conception, de vérification et de test

L'optimisation topologique permet la répartition de matière dans un volume alloué afin de converger vers la forme et la fonctionnalité souhaitées en fonction de critères prédéfinis (masse, tenue, raideur, *Design for Demise* pour problématique Loi relative aux Opérations Spatiales, etc.). Il faut donc développer des moyens et méthodes de modélisation et d'optimisation qui devront être partagés.

Les pièces issues de FA ne sont généralement pas utilisables en l'état et nécessitent des post traitements thermiques ou de finition. Dans le cas des pièces métalliques, les post traitements et les recettes traditionnellement mises en œuvre peuvent se trouver inopérants voire dégrader les pièces. De nouveaux traitements adaptés sont actuellement en développement.

Les formes complexes accessibles avec la FA ne peuvent être contrôlées par les moyens conventionnels sans des surcoûts importants. Les méthodes de spécifications devront donc évoluer du fait que les normes ISO ne sont pas adaptées à ce nouveau procédé de fabrication pour encadrer les géométries définies sans tolérance. Par ailleurs ces nouvelles méthodes de fabrication engendrent des défauts spécifiques que les nouvelles méthodes d'investigation mettent en exergue sans qu'on puisse aujourd'hui quantifier leur réelle nocivité. Les techniques de contrôle non destructif doivent donc être adaptées à ces nouvelles structures et les critères d'acceptation réétudiés. L'utilisation de contrôle in situ lors de la fabrication des pièces ainsi que le recours élargi à de la simulation des procédés sont également des voies d'anticipation en cours de développement.

2.2.2. Caractériser les matériaux utilisables en FA

De manière à assurer la fiabilité des pièces par FA, il est essentiel de garantir la qualité des matériaux utilisés, notamment la poudre, tout autant que les paramètres machine sélectionnés pour la production. En fonction de l'application, il s'agit de contrôler la production d'une poudre de qualité, de prévoir la criticité de chaque type de défaut et de définir un seuil d'acceptabilité pour garantir les propriétés des pièces finales fabriquées. La possibilité de recycler les poudres doit également être considérée.

Les premières applications en série de pièces aéronautiques ont amené une prise de conscience et un début

de standardisation de l'ensemble du processus qui va ainsi gagner en maturité et fiabilité industrielles.

De nombreux matériaux sont disponibles avec des niveaux de maturité variés, notamment pour des applications spatiales. L'impression 3D de plastiques se décline sous de multiples variations et souffre d'un manque de caractérisation des matériaux obtenus ainsi que d'une méconnaissance des propriétés des matériaux utilisés. La technologie évolue vers des matériaux de plus en plus techniques pouvant potentiellement répondre aux contraintes du spatial. La fabrication additive de polymères reste une option à analyser sérieusement. Certains matériaux métalliques, comme le titane, sont compatibles avec les procédés de FA, d'autres comme l'aluminium ne le sont pas en l'état. De nombreuses études théoriques et expérimentales en lien avec les fondeurs sont en cours pour développer de nouvelles nuances d'alliages, en particulier d'aluminium dédiées à la FA.

Concernant les matériaux céramiques, le nitrure et le carbure de silicium sont, p. ex., deux matériaux possédant des propriétés intéressantes pour la réalisation d'instruments optiques. Leur utilisation pour des pièces structurales, en lieu et place de métaux tels que l'Invar, permet un gain de masse de l'ordre de 60%, sans sacrifier la stabilité dimensionnelle. Les usinages de finition de ce type de pièces sont particulièrement longs, délicats et coûteux avant comme après frittage. Ces pièces sont souvent sur le chemin critique du planning projet avec un fort risque d'engorgement des moyens spécifiques utilisés. D'autre part l'alumine bien que possédant des performances moindres fait l'objet de nombreuses discussions sur des pièces non structurales car son utilisation en FA est bien plus mûre. La fabrication additive appliquée à ce type de matériaux autoriserait la construction de formes complexes voire non usinables conventionnellement en une seule opération.

L'utilisation de multi-matériaux en FA est aujourd'hui délicate. Une juxtaposition de procédés est possible mais amène une augmentation des temps et coûts de fabrication et une perte de précision. Le recours à une technologie unique, adaptée à tous les matériaux serait nécessaire mais aujourd'hui peu réaliste. Dans le cas de l'association de plusieurs matériaux de même type (métalliques, polymères) les stratégies de fabrication et les exigences de recyclage contraignent encore largement la liberté de formes possibles.

2.3. MATÉRIAUX ET STRUCTURE

Les matériaux restent un enjeu essentiel dans le processus d'innovation. Les avancées dans le domaine permettent régulièrement de dépasser les verrous technologiques ou apporter de l'innovation linéaire. Le sujet est extrêmement riche. Au-delà du matériau lui-même qu'il soit structurel, fonctionnel ou les deux, les matériaux sont présents dans les produits mais aussi dans les processus de production où on les retrouve en matière première, semi finis ou finis. Les procédés de fabrication associés sont également à considérer dans les avancées car ils peuvent apporter une modification des méthodes de conception menant à des gains techniques importants. Ce changement doit rester un point de vigilance qu'il faut accompagner afin de continuer de proposer des solutions cohérentes pour les missions spatiales.

S'il n'est pas identifié de rupture technologique à proprement parler dans le domaine des matériaux, il faut assurer une veille sur les développements qui sont conduits dans les laboratoires et leur prise en compte dans l'industrie notamment automobile ou aéronautique synonyme de montée en maturité. Pour les applications structurales, les thermoplastiques ou les composites thermodurcissables peuvent être considérés comme des alternatives très intéressantes. Les matériaux actifs (piézoélectrique, alliage à mémoire de forme) constituent également un domaine d'intérêt pour le spatial pour la réalisation d'actionneurs et de systèmes de déploiement d'appendices. Notons également l'émergence de la technique d'impression 4D, qui consiste à doter l'impression 3D d'une quatrième dimension : le temps. Les pièces imprimées changent de forme et se transforment dans le temps.

Ce panorama incite donc à exploiter le potentiel de la fabrication additive 3D et 4D, en s'appuyant sur des centres d'expertise et de production du domaine. Il sera utile à terme de viser une labellisation spatiale de tels centres.

2.3.1. Contrainte norme REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals)

La réglementation européenne Reach impose des contraintes à prendre en compte lors du choix des matériaux, des composants mécaniques et des procédés qui sont utilisés dans les projets spatiaux. Le règlement a pour objectif d'enregistrer et évaluer les substances chimiques produites ou importées dans l'Union Européenne, et procéder à des interdictions d'utilisation. Ce règlement impacte tous les domaines industriels. Au-delà des restrictions imposées, cette réglementa-

tion apparaît néanmoins comme un levier d'innovation, imposant par la disparition de matériaux et procédés critiques, de proposer de nouveaux designs et nouvelles approches.

2.3.2. Structures

L'étude des structures déployables complexes est un axe de recherche important pour de nombreuses applications. Pour les plateformes et dans le cadre de la miniaturisation des systèmes, on peut mentionner le cas des générateurs solaires disposant de compacité au lancement et d'une surface utile maximale en orbite afin d'apporter plus de puissance électrique.

Concernant les charges utiles, les antennes sont des cibles historiques de ces technologies, dont les solutions techniques restent à fiabiliser. Sur des concepts plus prospectifs, les télescopes déployables sont étudiés à plusieurs titres tout en visant la miniaturisation : instruments à haut niveau de performance embarquables sur de plus petites plateformes, production en série de dispositifs compacts éventuellement au détriment de la performance optique, compatibles des programmes de constellations p. ex..

La mise à distance de capteurs, notamment scientifiques, pour éviter la perturbation électromagnétique induite par la plateforme est un besoin critique pour les charges utiles embarquées sur de petites plateformes. En effet, les contraintes (encombrement, motorisation passive, stabilité, raideur des harnais...) sont actuellement problématiques pour les technologies usuelles. L'effort est à poursuivre car les concepts étudiés n'ont pas encore atteint le TRL requis pour répondre aux besoins.

2.4. CHAÎNE DE DÉTECTION

2.4.1. Les besoins à adresser

Pour répondre aux besoins des missions scientifiques spatiales, il est nécessaire de disposer de détecteurs et d'électroniques de lecture souvent à la limite des performances actuellement accessibles, couvrant les bandes allant des rayons gamma, X, UV, visible, infra-rouge (1,8 à 18 μm) jusqu'au submillimétrique avec des gammes de sensibilité, de dynamiques et cadences d'échantillonnages qui peuvent être très étendues suivant les types de mesure et les environnements d'acquisition : mode comptage de photons pour missions astronomie et lidar ou forts flux de photons en environnement terrestre p. ex..

La chaîne de détection contraint la plupart du temps fortement le bilan de performances des instruments

scientifiques. Le plan focal, pouvant intégrer plusieurs matrices de détecteurs et leurs électroniques, nécessite très souvent un refroidissement jusqu'à quelques dizaines de Kelvin voire quelques dizaines de mK pour assurer la performance et limiter le bruit instrumental. Des efforts de développement sont aussi à mener pour l'optimisation du plan focal (géométrie, nombre de détecteurs, électroniques, interfaces thermiques...). Son environnement représente également un enjeu critique pour atteindre la performance et limiter la consommation et la taille de l'instrument.

Par ailleurs, l'intégration de fonctions évoluées directement sur le pixel (numérisation/comptage de photons, polarisation, filtrage, les micro-obturbateurs, calcul *in pixel*, temps de vol, sources intégrées...) constitue un axe de progrès prometteur à soutenir. Par exemple, atteindre des opérations en mode comptage de photons à très haute cadence, éventuellement directement *onchip*, répondrait à des exigences plus contraignantes en termes de sensibilité, de dynamique de signal pour des missions astronomie, d'interférométrie à fort contraste, de lidar ou de forts flux de photons en environnement terrestre.

2.4.2. Limiter les développements de composants spécifiques

La production de matrices de détecteurs nécessite une succession de couches/étapes technologiques sophistiquées incluant circuit de détection (couche photosensible), circuit de lecture, amincissement, filtre, antireflet, boîtier hermétique avec fenêtre transparente, *flex*, etc. La maîtrise et la reproductibilité de la technologie sont incontournables pour garantir la performance (sensibilité, linéarité, courant d'obscurité, vitesse de lecture...). Pour les applications spatiales, la filière technologique doit garantir la tenue à un environnement sévère et offrir une accessibilité sur la durée du développement d'une mission.

Le retour d'expérience des projets en cours nous enseigne que l'utilisation d'un composant industriel disponible sur étagère (CMV 4000 pour microcaméra 3D+, composant standard IR Lynred moyennant évaluation spécifique et sélection) peut répondre aux besoins tout en étant a priori plus sûr et moins onéreux que le développement d'un détecteur à façon. Dans ce dernier cas, l'optimisation des performances (longueur d'onde de coupure, sensibilité, format...) conduit à reprendre certaines couches technologiques sensibles ce qui affecte la fiabilité du procédé de fabrication induisant souvent retards et surcoût.

A contrario, dans certains cas, il est essentiel de pouvoir disposer sur étagère des technologies les plus critiques aux plus hautes performances, avec un niveau de maturité permettant une production en série suffi-

samment grande pour en consolider le modèle économique. Pour l'infrarouge, la consolidation d'une filière française est primordiale. L'augmentation significative du besoin, notamment pour l'instrumentation sol pour les très grands télescopes en cours de construction (plusieurs dizaines de matrices 4k x 4k commandées récemment par l'ESO pour la première génération des instruments Extremely Large Telescope), doit conduire à revoir le recours au seul fournisseur américain actuel. Ce besoin correspond à la production actuelle de Lynred pour ses principales applications commerciales en technologie HgCdTe.

Dans le domaine du visible et de l'infrarouge, il convient de continuer à anticiper les développements pour initier ou sécuriser les briques technologiques les plus critiques des projets en incluant les aspects packaging et en orientant ces efforts vers les technologies génériques (limitation de variantes) répondant aux applications principales du sol et du spatial. De tels efforts visent à servir d'effets de levier pour mobiliser ultérieurement les budgets conséquents (Europe, régions, montage interministériels) qui sont indispensables pour la mise en place de nouvelles filières adressant un marché commercial (cf efforts déployés pour le développement du détecteur Alpha de Lynred équivalent de l'H2RG de Teledyne).

Pour les autres bandes spectrales, compte tenu de l'absence d'une filière industrielle ou d'un véritable marché identifié répondant aux besoins très spécifiques de la science spatiale, et des constantes de temps des projets susceptibles de les utiliser, on privilégiera la production de composants via les centrales technologiques nationales clairement identifiées, tout en maintenant une veille sur les composants disponibles sur étagère. Toutefois, l'effort est à concentrer sur des technologies pour lesquelles la France dispose d'une expertise à l'état de l'art international et où la concurrence est limitée.

Les filières de composants offrant des synergies sol-espace sont à privilégier pour les applications à caractère scientifique en particulier.

2.4.3. Coordinations inter-organismes

Pour la détection dans l'infrarouge et le visible, on s'appuie principalement sur des moyens industriels lourds (Lynred, ST Microelectronics) qui nécessitent un niveau d'investissement que le spatial seul n'est pas en mesure de soutenir. Il est indispensable de renforcer une coordination des organismes nationaux pour fédérer les efforts budgétaires de développement de détecteurs.

Pour les programmes nationaux ou à caractère opérationnel européens (Copernicus), on privilégiera une solution nationale ou européenne : Lynred, ST Microe-

lectronics avec des conceptions maîtrisées au niveau français pour la performance et le durcissement. Pour des missions à caractère plus scientifique et sous réserve de non disponibilité d'équivalents au niveau national, on pourra mettre en œuvre des détecteurs développés à l'étranger.

2.5. OPTIQUE

Dans le domaine optique, des développements ont été engagés depuis quelques années pour accroître la maturité de certaines briques technologiques présentant un potentiel important d'amélioration de la performance, de la fiabilité ou de la compacité des nouvelles générations d'instruments. Il faut poursuivre cet effort.

2.5.1. Free form

Les optiques *free form* offrent la possibilité de réaliser des combinaisons optiques plus compactes mais également plus complexes. Elles ont déjà fait leur apparition dans certains concepts instrumentaux spatiaux en cours de développement au CNES mais également dans d'autres agences. Cependant certains progrès doivent être réalisés pour tirer pleinement profit de ces technologies :

- Amélioration des outils de conception (simulation optique sur système complexe),
- Moyens de réalisation et de duplication à développer/améliorer,
- Méthodes de caractérisation à consolider,
- Coopération industrie/laboratoire à renforcer.

2.5.2. Lidar : favoriser la simplification et la fiabilisation de ces instruments

Le développement des lidars spatiaux, constitue toujours un défi technique bien que plusieurs instruments spatiaux soient déjà en opération. Les retours d'expérience pointent le besoin de solutions alternatives afin notamment d'améliorer la fiabilité de certaines briques et dé-contraire les exigences de performances de différents sous-ensembles : sources laser, détection, peignes de fréquence, filtrage du fond, ...

2.5.3. Poursuivre les développements autour de l'imagerie à très haut contraste

Les futures générations de télescopes spatiaux, notamment pour la caractérisation des atmosphères des exoplanètes, nécessiteront des techniques d'imagerie à très haut contraste. La France pionnière dans ce domaine, dispose d'une expertise à l'état de l'art s'appuyant sur une recherche coordonnée de plusieurs laboratoires scientifiques. Il faut poursuivre l'accompa-

nement de cette dynamique, notamment sur les domaines suivants :

- Optique adaptative haut contraste (senseur et correcteur de front d'onde),
- Détection à haute dynamique,
- Méthodes coronographiques,
- Traitement du signal,
- Composants optiques à très haute qualité de surface,
- Techniques de couplage haut contraste/haute résolution spectrale.

2.5.4. Photonique

Le CNES a permis il y a deux décades l'émergence de la R&D en astrophotonique pour l'interférométrie optique multi-télescopes. Cette technologie qui permet une très forte intégration de fonctions sur une même puce optique éventuellement associée à des fonctions de filtrage a bénéficié à deux instruments majeurs sols au VLTI : **Pionier** (2010) et **Gravity** (2016). Ces succès ont mené récemment à l'utilisation de circuits photoniques pour l'imagerie par redistribution de pupille dans les télescopes simples. D'autres développements ont conduit à la réalisation de systèmes similaires pour la spectroscopie. Le TRL et la mise en œuvre (interface notamment) pour un contexte spatial restent à consolider mais le potentiel pour le haut contraste ou la simplification/compacité des instruments mérite d'être suivi, en considérant p. ex. :

- La photonique moyen infrarouge,
- L'émergence de la photonique 3D,
- L'intégration système multifonctions, notamment fonctions actives (modulateur de phase p. ex.).

2.6. TECHNOLOGIE POUR ESSAIM ET INSTRUMENT

2.6.1. L'approche nanosatellite

Cette approche rend accessible la programmation de missions multi-satellites : constellations, essaims, satellite mère-filles, qui sont des concepts pouvant offrir les observations requises pour une science originale. Au-delà de l'impact sur le coût, ces concepts mission peuvent apporter de nouvelles approches système, de la réactivité, et aussi un gain de performance et de la résilience.

Certaines fonctionnalités sont alors requises pour leur faisabilité :

- Commande/contrôle du système en essaim et autonomie,
- Liaison inter-satellite et protocoles réseau à fortes

- contraintes opérationnelles,
- Échanges de données et/ou traitements distribués,
- Localisation et connaissance de la géométrie relative de la formation,
- Horloge distribuée sur l'ensemble de l'essaim,
- Dynamique orbitale collective (p. ex. maintien de la formation, anticollision).

En fonction des objectifs de la mission tout ou partie de ces techniques seront nécessaires avec des niveaux de performances variables (p. ex. dépendant de la longueur d'onde d'observation).

2.6.2. Les opportunités et les enjeux

Les principales opportunités concernent d'une part la miniaturisation favorisée par l'exploitation de technologies développées pour d'autres secteurs d'activités et leur spatialisation, et d'autre part la disponibilité de calculateurs spatiaux et *Commercial Off The Shelf* (COTS) augmentant énormément les capacités de traitement bord et de mémoire disponible.

Les principaux enjeux quant à eux, relèvent de la réalisation de petites/moyennes séries et de l'intercalibration des paramètres constitutifs de la performance, aussi bien instrumentaux, que satellite ou système, conduisant à établir une physique de la mesure à l'échelle de l'essaim.

2.7. TRAITEMENT À BORD

2.7.1. Capacités de calcul et mémoire bord

Les calculateurs spatiaux, pour plateforme ou charge utile, connaissent actuellement une révolution sans précédent. De nouveaux composants durcis aux radiations permettront à court terme de multiplier les capacités de traitement par un facteur 20 à 40 et ainsi autorisent des traitements à bord plus complexes. Ces nouveaux processeurs, basés sur des cœurs ARM, ainsi que de nouveaux composants programmables européens de type *Field Programmable Gate Arrays* (FPGA) offriront dès 2020 des capacités de traitements démultipliées.

Pour les missions où le coût est un critère essentiel (nanosatellites), les méthodes de qualification et les techniques de mitigation logicielles et matérielles des composants industriels COTS permettent d'envisager leur utilisation pour des missions spatiales et d'offrir des capacités d'un ordre de grandeur encore supérieur au prix d'une perte de disponibilité maîtrisée. Le stockage à bord ne devrait plus être un facteur limitant avec des capacités de plusieurs Tbits et des débits en entrées/sorties de plusieurs Gbits/s. Notons également que les liaisons numériques rapides de nouvelle gé-

nération permettront des échanges inter-équipements jusqu'à 10 Gbits/s. Cette puissance de calcul accrue couplée à un hyperviseur logiciel gérant le partitionnement spatial et temporel de la ressource informatique permet déjà de développer des concepts avioniques très intégrés autorisant la co-localisation de plusieurs traitements sur un seul ordinateur en apportant des gains substantiels en consommation et masse.

2.7.2. Autonomie et traitements avancés

Il existe de nombreuses recherches qui ont augmenté la maturité des algorithmes de perception artificielle, de compréhension des scènes, de planification et de décision voire d'extraction de causalités. A la base de ces fonctions améliorées, ce sont les algorithmes d'apprentissage artificiel, ou machine ou encore automatique qui ont poursuivi leur essor. On distinguera :

- L'apprentissage symbolique où les informations et les règles qui le structurent sont fournies directement par des experts sous des formes plus moins précises.
- L'apprentissage statistique où les connaissances sont à structurer ou difficiles à structurer et reposent simplement sur un échantillon d'exemples représentatifs de la relation recherchée. Plusieurs techniques algorithmiques sont exploitées pour construire un modèle d'approximation sans une connaissance explicite du domaine. Les plus utilisées sont les réseaux de neurones formels et les arbres de décision.

Dans le domaine de la commande et du contrôle, les travaux se sont poursuivis notamment sur la commande non linéaire robustifiée pour tenir compte de comportements non linéaires comme le ballonnement d'ergols liquides dans les réservoirs, ou encore le pilotage de systèmes orbitaux redondants. Ces traitements peuvent être utilisés plus ou moins profondément dans la conception de la mission spatiale, de sa préparation (p. ex. extraction d'une FTM instrument) jusqu'à la gestion routinière de la mission elle-même (calibration voire inter-calibration, traitement de données, contrôle/commande), du *back-end* instrument jusqu'aux traitements bord sans parler de leurs apports aux traitements réalisés au sol (éventuellement a posteriori). Notons également que l'autonomie de décision et des traitements bord avancés sont incontournables pour certains concepts mission tel que le vol en essaim ou celui d'un instrument réparti sur plusieurs satellites.

2.7.3. Opportunités et enjeux

La convergence actuelle de l'augmentation des capacités de calcul bord, du stockage mémoire et de la disponibilité de traitements avancés offrent de nouvelles opportunités aux concepteurs de missions spatiales scientifiques telles que :

- Accroissement de la réactivité de la mission aux informations perçues, en augmentant l'intelligence bord donc l'autonomie à différents niveaux : plateforme, instrument, mission elle-même,
- Amélioration de la performance dans différentes phases de la mission : conception, déroulé, exploitation,
- Diminution du coût via la miniaturisation et la possible répartition de fonctions sur plusieurs nanosatellites.

Ces perspectives n'exonèrent pas des difficultés potentielles associées aux éléments suivants :

- Utilisation de capteurs spatialement et spectralement de plus en plus performants, fournissant donc des volumes toujours croissants de données,
- Maîtrise de l'interprétation des décisions prises en autonomie (notamment en apprentissage bord),
- Utilisation de communications inter-satellites dans le cas d'une mission multiplateformes,
- Gestion de la perte d'informations (dans le cas où il est choisi de ne pas redescendre l'ensemble des données au sol) et impossibilité de bénéficier d'un possible incrément de traitement au sol,
- Gestion de la défaillance d'un des composants dans un système multivecteurs.

Pour le concepteur de missions spatiales scientifiques, la rupture dans ce domaine ne se situe donc pas forcément au seul emploi de technologies (capacité de calcul, mémoire bord et traitements) qui ont progressé. La rupture doit se faire aussi en exploitant ces technologies pour changer radicalement les compromis système traditionnellement appliqués :

- Nouvelle répartition des traitements entre bord et sol → plus d'intelligence à bord, donc plus d'autonomie,
- Nouvelle répartition des traitements entre satellites d'un essaim ou d'un vol en formation → vers une intelligence répartie,
- Apprentissage en cours de mission sur les données acquises (à bord ou au sol) → vers une agilité mission contrôlée.

Cette rupture potentielle dans la conception des missions spatiales nécessite donc une appropriation de ce panorama matériel et logiciel. Pour cela, les concepteurs peuvent s'appuyer sur les outils génériques développés par le CNES : calculateurs, logiciel de vol générique, superviseur logiciel, méthodologie d'évaluation de qualification et techniques de mitigation pour composant COTS, etc.

2.8. CONCEPTS INSTRUMENTAUX INCLUANT CALIBRATION

2.8.1. Tendances observées

Dans les domaines de l'instrumentation optique et micro-ondes plusieurs tendances se dessinent :

- La conception de missions permettant l'obtention de nouveaux observables (grandeurs géophysiques originales) ou quête de la sensibilité et de la résolution ultimes. Elle nécessite le développement et la mise en œuvre de technologies complexes et coûteuses (grands télescopes, optique active, lasers, antennes déployables, métrologie spécifique interne à l'instrument) pour des missions basées sur des satellites relativement lourds (pour l'astronomie **JWST**, **Euclid**, **Athena**, **Lisa** et pour l'observation de la Terre **Swot**, **Skim**, missions lidars...). Pour ces missions à caractère scientifique et à l'état de l'art, la durée de développement et les coûts s'accroissent, les missions plus faciles ayant déjà été réalisées.
- La conception de versions simplifiées et/ou miniaturisées de capteurs déjà éprouvés pour augmenter la densité spatio-temporelle des mesures compatibles de plus petites plateformes (gamme nanosat à microsat). Elle peut bénéficier assez directement des réductions de coût (plateforme et lancement) amenées par le *Newspace*, dans des domaines assez variés : observation de la Terre (imagerie à forte revisite), radio-occultation *Global Navigation Satellite System* (GNSS), nanomagsat, missions SHM, exploration planétaire avec nanosats compagnons...

Pour l'optimisation de ce type de mission, un des éléments-clés est la capacité à relâcher la contrainte au niveau instrument unitaire tout en s'assurant que la mesure produite va amener de l'information nécessaire pour l'amélioration de la performance du grand système (vérification nécessaire via la réalisation d'*Observing System Simulation Experiments* pour application météo p. ex.). Simplification et miniaturisation des instruments passent par un relâchement de certaines spécifications de performance (p. ex. mesures considérées comme compléments intelligents aux autres capteurs des missions opérationnelles). Elles imposent aussi la revisite des concepts instrumentaux et des technologies utilisées (optiques *free-form*, photonique, réintégration des marges de dimensionnement via approche multi-métiers, optimisation plans focaux, antennes, ampli faible bruit...). Les back-ends instrumentaux (acquisition, traitement, compression) bénéficient directement des progrès accomplis dans le domaine grand public notamment sur la puissance de calcul embarqué avec des capacités et consommations en baisse.

- La conception d'instrumentation réparti sur plusieurs satellites avec des exigences de contrôle et/ou de

synchronisation entre satellites volant en formation (**Noire**, **Ulid**, **Lisa**, **Grice**, etc.). La performance accessible par la configuration de l'essai impose la connaissance précise de la position des satellites et une capacité à synchroniser très précisément les mesures pour en exploiter les différences de phase. Plusieurs options sont à examiner suivant les précisions recherchées (optique/micro-ondes) et le contexte orbital. Il est également nécessaire d'identifier les besoins d'échanges de données/mesures entre les satellites de l'essai pour garantir la capacité à former la mesure de l'instrument réparti (p. ex. ensemble des fonctions de visibilité dans le cas de la synthèse d'ouverture micro-onde).

- Face à l'apparition de composants/processeurs bord offrant des puissances de calcul fortement accrues, il convient de poursuivre l'exploration de ce potentiel pour le calcul à bord : réactivité pour optimisation de la prise de vue (détection de nuages), compression bord intelligente, reconnaissance d'objets... via des simulations d'ensemble voire de la démonstration en vol (satellites, ballon, avions, drones).

2.8.2. Enjeux technologiques

Autour de ces diverses tendances, un certain nombre d'enjeux technologiques et démarches apparaissent et il convient d'amplifier leur prise en compte :

- Disposer de simulateurs de performances de la chaîne de mesure (mono ou multi-satellites) assez tôt dans le cycle de conception pour décloisonner les métiers et optimiser les spécifications.
- Disposer de ressources financières et humaines pour le développement de prototypes fonctionnels (projet exploratoire) d'instruments ou sous-systèmes, favorisant l'usage de technologies disruptives/innovantes et assurant simultanément une montée de la maturité système. Une démonstration vol (techno et/ou système) peut s'avérer opportune pour certains concepts.
- Revisiter la démarche de conception/réalisation/test (fabrication additive, ingénierie concurrente, numérisation, IA, instruments répartis...) en s'appuyant tant que faire se peut sur des technologies disponibles spatialisables/spécialisées. A ce titre, l'ingénierie système basée modèles se généralise et apporte une nouvelle approche en se focalisant sur l'utilisation et l'échange de modèles comme vecteur d'information. Cette approche présente de nombreux avantages comme la gestion des transitions entre les niveaux d'ingénierie (p. ex. système, chaîne fonctionnelle, équipement) ou la traçabilité des exigences, les liens entre exigences et avec les solutions techniques. Elle optimise également les phases de conception préliminaire, notamment dans leur durée en favorisant un travail plus interactif des intervenants de différents métiers.

- Adresser la problématique de la fabrication de petites séries d'instruments pour les constellations ou les essais, notamment quant à l'organisation de leur réalisation.
- Renforcer et standardiser les moyens de caractérisation/validation de composants standard (COTS, petites séries, ...) au sein des laboratoires scientifiques en s'appuyant sur l'expertise du CNES.
- Assurer l'étalonnage de la mesure :
 - L'utilisation de prototypes fonctionnels des chaînes de mesure doit identifier suffisamment tôt les besoins de métrologie spécifique et d'étalonnage.
 - Pour que les mesures complémentaires amenées par les missions *low-cost* soient utiles et correctement exploitées il est indispensable de connaître avec précision les fonctions de transfert instrumentales (précisions, biais instrumentaux liés à l'environnement, étalonnages radiométriques spécifiques...).
 - Étalonner les briques de base, éventuellement sur des moyennes séries (composants, sous-systèmes) et identifier les besoins spécifiques liés à l'inter-étalonnage entre capteurs, notamment pour les constellations.

2.9. PRIORITÉS R&D TOSCA ET CERES

Les retours des groupes thématiques précisent certains axes de développement objets de travaux de R&T. Il ne ressort pas de ligne de force particulière ce qui est logique compte tenu du spectre d'observables à considérer nécessitant un nombre varié de technologies à développer, sans qu'un besoin particulier ne puisse être mis en exergue, si ce n'est l'accélération du besoin de miniaturisation des instruments. Les axes de travaux proposés seront communiqués aux services techniques du CNES pour favoriser leur prise en compte dans le programme R&T/démonstrateur et seront considérés par les comités de sélection comme des sujets de fort intérêt pour les thématiques scientifiques.

2.10. TECHNIQUES DE TRAITEMENTS SOL ET ARCHIVAGE DES DONNÉES

Concernant les techniques liées aux traitements massifs des données et aux architectures associées, le besoin de mener des développements technologiques spécifiques pour le spatial n'apparaît pas particulièrement, mais plutôt la nécessité d'une appropriation des méthodes et outils mis en œuvre dans le monde du numérique et une adaptation de ceux-ci aux problématiques de la donnée spatiale afin de favoriser son exploitation

aussi bien pour les besoins scientifiques que sociétaux. La R&T, comme par le passé, peut contribuer à cette appropriation mais les enjeux autour de la valorisation de la donnée, qui vont bien au-delà du secteur spatial, nécessitent un effort beaucoup plus conséquent au niveau national et même européen. En effet, il convient de disposer d'infrastructures pérennes et indépendantes permettant le traitement et l'archivage de ces données qui constituent un patrimoine scientifique et sociétal. Rappelons que la France et l'Europe ont fortement investi pour la mise en place d'infrastructures spatiales à l'état de l'art mondial qui représentent également une source de développement économique considérable.

3. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

3.1. UNE R&T PLUS AMBITIEUSE

Recom 1 : La R&T doit constituer une priorité dans la stratégie du CNES et des laboratoires scientifiques. Le CNES doit y consacrer un budget compatible des ambitions nationales. Les laboratoires et le CNES doivent maintenir un niveau de ressources humaines pérenne sur la préparation du futur, niveau ne devant pas fluctuer significativement au gré des contraintes projets.

Recom 2 : Accompagner la montée en maturité au niveau système instrument des concepts de mesures originaux et innovants en réalisant des prototypes fonctionnels (démonstrateurs). Envisager une démonstration vol (technologique ou système) lorsque la démonstration de la performance ne peut pas être faite au sol.

3.2. AUTOUR DE L'ACCÈS AUX PLATEFORMES DE MICRO-TECHNOLOGIES ET DE LA DISPONIBILITÉ DE FILIÈRES DE DÉTECTEUR

Recom 3 : Accompagner la valorisation de l'expertise des centrales technologiques académiques pour une meilleure intégration des micro-technologies dans les instruments.

- Faciliter l'accès aux centrales technologiques académiques par un renforcement des liens entre les instituts INSIS et INP du CNRS et les concepteurs d'ins-

truments spatiaux (CNES, CNRS-INSU, CEA, ...).

- Soutenir la mise en place avec l'appui de RENATECH, ou d'une autre infrastructure, d'une capacité pérenne d'intégration/encapsulation des micro-technologies qui soit compatible des exigences du spatial.

Recom 4 : Par un renforcement de la coordination des organismes nationaux, accompagner en anticipation des futurs projets, l'émergence de filières technologiques stabilisées ou maîtrisées, répondant aux besoins de la détection scientifique notamment dans le domaine de l'infrarouge (Swir ou thermique). Dans certains cas, comme p. ex. l'astronomie, la technologie peut couvrir les besoins sol et espace, offrant ainsi des perspectives de volumes significatifs et réguliers par rapport aux besoins spatiaux.

3.3. AUTOUR DE LA MINIATURISATION ET DES PETITES PLATEFORMES

Recom 5 : Investir dans la miniaturisation des instruments tout en garantissant un niveau de performances conforme aux enjeux scientifiques de façon à maximiser les opportunités d'emport.

Cette recommandation inclut la prise en compte des contraintes accrues par les dimensions réduites des plateformes sur les composants (*ElectroMagnetic Compatibility*, thermique, radiations, systèmes de déploiement, ...).

Recom 6 : L'émergence de nouvelles techniques d'ingénierie, basées sur l'utilisation de technologies favorisant l'intégration, la fonctionnalisation et la numérisation, nécessite un accompagnement par la formation (cours CNES de Techniques et Technologies des Véhicules Spatiaux, Action Nationale de Formation CNRS-INSU et CNRS-MITI) et par la mise en réseau (COMMunautés d'ExperTs, réseaux spécifique CNRS-INSU) mais également par l'expérimentation via le développement de prototypes fonctionnels (démonstrateurs).

On s'attachera particulièrement à :

- Introduire de nouvelles méthodes de conception multi-métiers et outils associés en s'appuyant si nécessaire sur les expertises du CNES, ou de certains centres spatiaux universitaires,
- Assurer une veille auprès des centres de recherche académiques et industriels menant des réflexions et des expérimentations sur ces nouvelles méthodologies en vue de les expérimenter dans les équipes de développement,
- Exploiter le potentiel de la fabrication additive 3D et 4D, en s'appuyant sur des centres d'expertise et de production du domaine. Il sera utile de viser à terme une labellisation spatiale de tels centres.
- Développer l'autonomie des satellites et des instruments, en tirant parti de l'accroissement des capacités des calculateurs bord et de la mémoire embarquée (gestion de l'énergie, stratégie de communication, choix automatique de modes d'observation, traitement de données et intelligence à bord).

Recom 7 : Investir dans la physique de la mesure basée sur une approche système (multi-capteurs/instruments répartis) pour anticiper les opportunités de flottes de petites plateformes (essais, constellations, vaisseaux mère/filles). L'inter-calibration des différents paramètres entrant dans la performance globale du système nécessitera une vigilance particulière.

Recom 8 : Conduire une réflexion sur l'organisation à privilégier au sein des laboratoires et/ou dans l'industrie pour la réalisation de petites séries.

GROUPE DE TRAVAIL TRANSVERSE SCIENCE ET OBSERVATION DANS LE CONTEXTE DU NEWSPACE ET DES NANOSATELLITES

Nabila Aghanim, Jean-Philippe Berger, Denis Blumstein, Pierre Bousquet, Céline Calleya, Cyril Crevoisier, Emmanuel Dartois, Christophe Delaroche, Laurent Dusseau, Michel Faup (co-président), Marc Ferrari, Raphael Garcia, Martin Giard (co-président), Hubert Halloin, Jean-Marie Hameury, Daniel Hestroffer, Laurence Hubert-Moy, Etienne Lecoarer, Gauthier Hulot, Pierre Kern, Sylvestre Lacour, Juliette Lambin, André Laurens, Luc Lefebvre, Marie-José Lefevre, Matthieu. Kretzschmar, Jean-François Mahfouf, Aurélie Marchaudon, Joao-Pedro Marques, Jean-Louis Monin, Franck Montmessin, Laurent Polidori, Bernard Rosier, Frédéric Seyler, Christian Sirmain, Jean-Claude Souyris, Pierre-Gilles Tizien, Laurent Vigroux.

1. MÉTHODOLOGIE

Ce groupe de travail mis en place par le CNES et le CNRS-INSU a rassemblé trois types d'expertises complémentaires : expertise scientifique (membres de chacun des groupes de travail thématique), expertise nanosatellite et charges utiles miniaturisées (membres de chacun des centres spatiaux universitaires (CSU) ou étudiants (CSE) ayant un lien avec la communauté scientifique et expertise en construction et opérations spatiales (ingénieurs du CNES). Nous avons mené nos travaux de septembre 2018 à juin 2019, période pendant laquelle nous nous sommes réunis cinq fois en séance plénière. Pour alimenter notre réflexion nous nous sommes appuyés sur notre propre expertise ainsi que sur les contributions de la communauté scientifique : 36 contributions reliées à notre sujet dont environ 24 propositions de missions (sur un total d'environ 220 contributions à cet exercice de prospective). Enfin, pour une meilleure compréhension des intérêts et enjeux industriels, nous avons auditionné un grand constructeur spatial et une startup du *Newspace*. Sur la même question, nous avons aussi eu accès à une cartographie du paysage européen des constructions nanosatellites commandée par le CNES à un cabinet privé.

Certaines activités du groupe ont donné lieu à la mise en place de sous-groupes dédiés : bilan scientifique nanosatellites, état des lieux – état de l'art et analyse technique, centres spatiaux universitaires et étudiants. L'analyse scientifique des missions proposées, et leur mise en priorité éventuelle, ont été faites indépendamment par les groupes de travail thématiques com-

pétents, dans le cadre du CERES et du TOSCA. Nous avons bénéficié par ailleurs des recommandations du groupe OFRAME (Organisation Française de Recherche Appliquative en Météorologie de l'Espace) qui a ainsi manifesté un fort intérêt prospectif pour le déploiement de constellations de petits satellites.

2. CONTEXTE ET DYNAMIQUE

Au tournant du siècle, deux mouvements distincts prennent corps aux USA : le *Newspace* et ce qui deviendra bientôt une dynamique mondiale de nanosatellites.

Le *Newspace* correspond à une stratégie de « cyber dominance » et de « *space dominance* » qui s'appuie sur une coopération étroite entre entités institutionnelles, universitaires, scientifiques et privées. La démarche consiste à :

- Réduire les coûts d'accès à l'espace et l'exploration spatiale,
- Favoriser le développement de petits satellites et l'innovation,
- Elargir le marché (NASA, commercial, Défense) en réduisant la place des acteurs hors USA,
- S'appuyer sur internet et le numérique pour bénéficier des technologies et des processus de développement,

- « Verticaliser » le secteur à travers les GAFAs (leurs données et leurs réseaux).

Approximativement à la même période, en 1999, l'Université Polytechnique de Californie et l'Université de Stanford créent un standard pour permettre à leurs étudiants de concevoir et développer à moindre coût des satellites de 1 à 10 kg dans la perspective de leur mise en orbite. Rapidement, le standard, qui donne une définition précise des caractéristiques que les développeurs doivent satisfaire avant le lancement, est adopté au niveau mondial. Un écosystème mondial, à la croisée entre enseignement, laboratoire et industrie, voit le jour. Plus qu'une filière, c'est un esprit qui se généralise : développement incrémental, recours aux technologies issues de secteurs terrestres où elles ont déjà été durcies, prise en compte des apports de chacun pour bénéficier d'une dynamique collective.

La dynamique foisonnante qui caractérise le secteur spatial actuel est l'aboutissement de ces deux mouvements qui se fertilisent après 20 ans de mise en œuvre et voient l'arrivée de nouveaux acteurs, entrepreneurs souvent issus ou en lien avec le monde de l'économie numérique, qui développent des produits spatiaux en dehors des circuits historiques et mobilisent des in-

vestissements majoritairement privés (estimés à 4 Md\$ pour l'année 2017). Cette mutation est rendue possible grâce à du transfert de personnels, de technologies et de savoir-faire des partenaires institutionnels historiques, à des promesses d'achat de service ou de données, à un nouvel élan économique autour du spatial, contribuant depuis l'orbite à l'appétit d'hyper-connectivité de nos sociétés modernes, avec des constellations d'observation ou de télécommunications quadrillant la planète depuis l'espace et une aspiration de la jeune génération à une action militante qui va de l'entrepreneuriat (floraison de start-up) au développement des logiciels, équipements en open source et même désormais à la science ouverte.

L'impact au niveau mondial est impressionnant :

- Foisonnement des acteurs privés qui voient aussi la science comme une part de marché potentielle et pourraient déstabiliser le domaine en faisant basculer d'un mode coopératif (coopérations autour de l'échange de données) à une économie de service où l'accès à la donnée brute ne serait plus garanti à tous,
- Explosion du nombre de projets « *smallsats* » : on prédit 2 500 satellites de moins de 50 kg lancés avant 2023. La gamme dépasse le domaine des nanosatel-

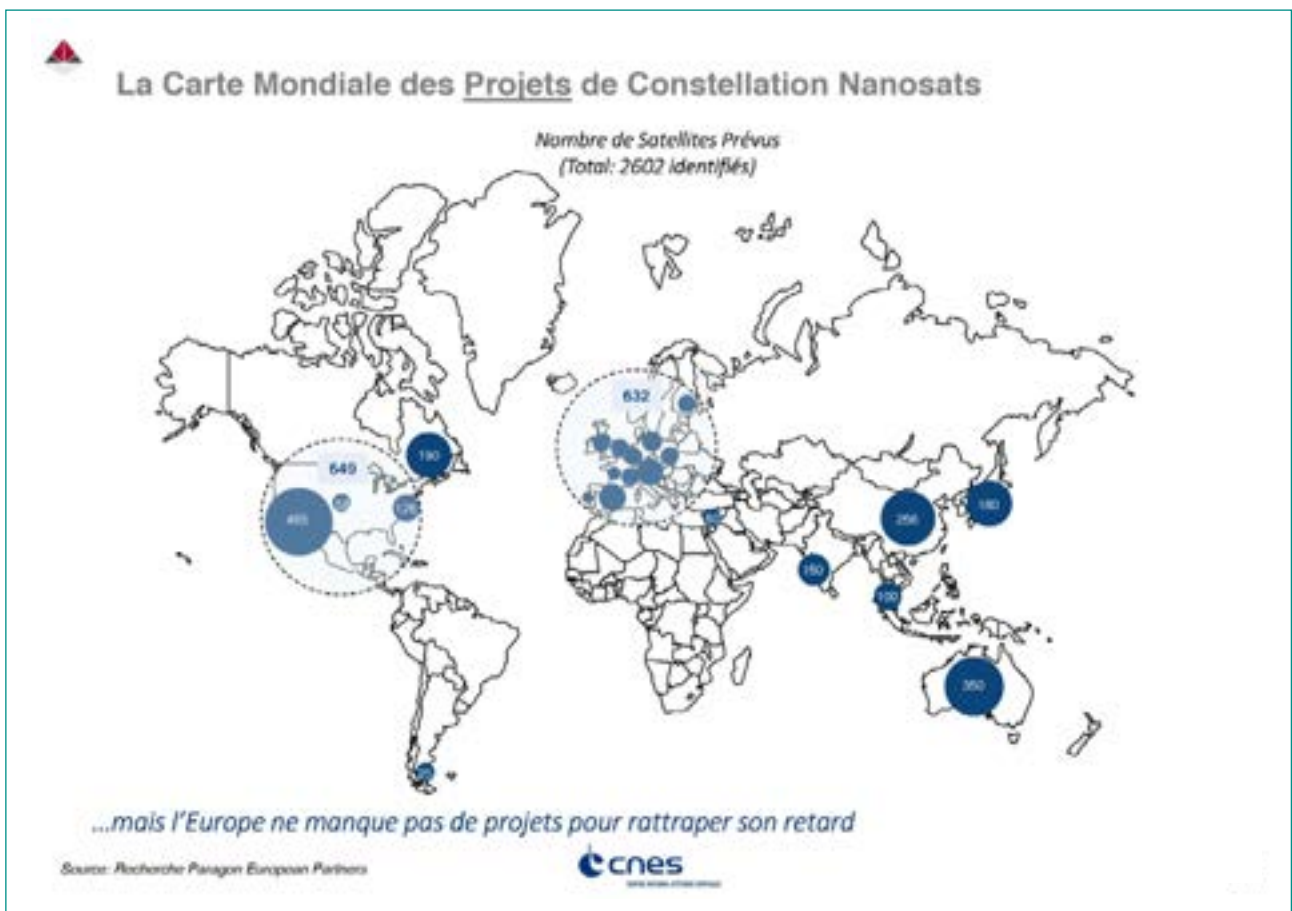


Fig. 1 : Cartographie mondiale des projets de constellations Nanosats.

lites pour englober les microsattelites jusqu'à 200 kg. Ceux-ci bénéficient de l'effort d'industrialisation rendu possible par l'émergence des mégaconstellations et de l'héritage de technologies miniaturisées et déployables étudiées pour les cubesats (mises à l'échelle de satellites plus gros pour atteindre des performances annoncées impressionnantes),

- Mise en place d'un mode de développement et de déploiement incrémental : validation de concept à bas coût sur un satellite précurseur, montée en puissance sur un premier de série, amélioration progressive dans des systèmes orbitaux opérationnels qui deviennent de fait hétérogènes,
- Miniaturisation des technologies (mettant à profit l'héritage des secteurs terrestres),
- Nouveaux concepts instrumentaux rendus envisageables : les charges utiles peuvent être éclatées sur plusieurs satellites réunis au sein d'un réseau pour accéder à une performance pertinente tout en restant sur des satellites de petite taille, la mesure physique peut être obtenue par le concours de systèmes à grand nombre de satellites pour augmenter la résolution temporelle ou spatiale de l'observation.

Dès lors une réflexion de prospective scientifique nationale doit prendre en compte les problématiques suivantes :

- Préserver l'accès aux données brutes et aux métadonnées permettant de les caractériser en terme de physique de la mesure (problématique de calibration et de connaissance des conditions de leur acquisition dans le cas d'apports multiples à une même mesure),
- Mettre à profit les ambitions des acteurs privés : héritage des technologies développées, accès à des fonds spéculatifs privés en complément des fonds publics,
- Envisager la possibilité de missions de courte durée favorisant l'innovation à faible coût (utilisation de composants sur étagère : COTS),
- Repenser la stratégie de mesure pour tirer bénéfice de la miniaturisation des satellites et de leur coût modéré : mesure répartie sur plusieurs satellites (instrumentation fractionnée réduisant la complexité individuelle pour la reporter au niveau système, séparation des fonctionnalités dans des concepts de type mère-fille), coopération où un acteur apporte un satellite parmi N, augmentation de la résolution temporelle ou spatiale,
- Contribuer à la dynamique technique d'ensemble : amélioration des performances des dispositifs miniaturisés, généralisation des dispositifs de déploiement, gestion de la complexité en intégrant l'intelligence artificielle et l'intelligence collective.

L'Europe est partie plus tard que l'Amérique, mais elle dispose d'ores et déjà d'un tissu actif d'acteurs privés et institutionnels (cf. Fig. 1) qui lui donne le potentiel de se développer dans ce secteur en fonction des initiatives à venir.

3. BILAN SCIENTIFIQUE DES NANOSATELLITES

Les missions scientifiques utilisant des nanosatellites sont apparues au cours des dix dernières années mais elles sont encore peu nombreuses. Nous en avons recensé 24 qui ont été lancées. Elles ont donné lieu à environ une centaine d'articles dont le plus grand nombre présente les développements techniques. Une vingtaine d'articles présente des résultats scientifiques, la moitié d'entre eux concernant la mission **CYGNSS** (Cyclone Global Navigation Satellite System). Toutefois, la validation en vol de nombreux concepts instrumentaux ces cinq dernières années et le foisonnement d'idées novatrices dans quasiment tous les domaines des sciences de la Terre et de l'univers, laissent envisager une future « explosion » de résultats, en particulier dans les domaines Soleil, héliosphère, magnétosphères (SHM) et atmosphère. Cette impression est confortée par la longue liste de missions nanosatellites à vocation scientifique qui seront lancées dans les trois prochaines années.

3.1. ASTRONOMIE ET PHYSIQUE FONDAMENTALE

Aucun résultat scientifique de premier plan n'est à noter pour l'instant dans ce domaine. Côté astronomie, seule la constellation internationale de six nanosatellites **Brite** (BRiGht-star Target Explorer) a permis d'obtenir des données d'oscillations de luminosité d'étoiles massives. Côté physique fondamentale, les exigences en termes de métrologie peuvent être un frein important pour un recours à la technologie nanosatellites (la gamme des microsattelites, comme **Microscope**, paraît ainsi plus adaptée).

3.2. PLANÉTOLOGIE ET EXOPLANÈTES (EXPLORATION PLANÉTAIRE, MÉTÉORES, MICROGRAVITÉ)

Là non plus, il n'y a pas encore de résultat majeur à noter, mais l'utilisation de nanosatellites est récente et en pleine évolution avec des objectifs scientifiques bien identifiés, passant souvent par un besoin de démonstration technologique préalable. Les développements actuels en orbite concernent surtout la détection de transit d'exoplanètes. Deux missions ont été lancées, **PicSat** (France, Beta Pictoris b) et **Asteria** (Arcsecond Space Telescope Enabling Research in Astrophysics)

(USA, 55 Canc). Si **PicSat** n'a pas donné de résultat scientifique, ni atteint tous ses objectifs technologiques, la mission **Asteria** a atteint ses objectifs de démonstration technologique, sa durée de vie nominale et a observé un transit. Plusieurs projets sont en cours de réalisation pour des missions en orbite lunaire et un lancement important est prévu en juin 2020 avec la mission **EM-1** de la NASA qui déploiera 13 cubesats indépendants autour de la Lune. Enfin, quelques missions de nanosatellites interplanétaires sont à l'étude en *stand-alone*, ou en accompagnement de missions déjà acceptées (programme NASA Discovery). On peut particulièrement noter le succès de croisière jusqu'à Mars des nanosatellites **MarCO**. L'utilisation de 15 auxiliaires déployables actifs ou passifs (rovers, impacteurs, cibles pour le prélèvement d'échantillons, caméra *free-flyer*...) pendant la mission **Hayabusa 2** en cours est aussi assez remarquable.

3.3. SOLEIL, HÉLIOSPHÈRE, MAGNÉTOSPHÈRES

Les résultats scientifiques intéressants se situent soit dans l'observation du rayonnement solaire, soit dans l'étude des ceintures de radiation dans la magnétosphère interne et proviennent de nanosatellites quasiment tous d'origine américaine et en orbite basse (LEO : *Low Earth Orbit*). Pour l'étude du Soleil, deux nanosatellites, **NorSat-1** et **CSIM**, sont dédiés à la mesure de l'irradiance solaire totale et fonctionnent de manière satisfaisante même si aucun résultat n'a pour l'instant été publié. Deux autres, **MinXSS-1** et **-2** ont effectué des mesures d'irradiance spectrale dans le domaine des rayons X afin de mieux caractériser les éruptions solaires. Des résultats notables ont aussi été obtenus dans les ceintures de radiation avec les missions **CSSWE**, **Firebird2** et **Elfin-A**. Quelques résultats marquants ont été obtenus sur les propriétés, la structure spatio-temporelle et l'origine des *microburst* d'électrons dans les ceintures de radiations avec la paire de nanosatellites **Firebird2** et sur l'origine par mécanisme de Crand et la limite supérieure en énergie des électrons de la ceinture de radiation interne avec **CSSWE** (qui a fait l'objet d'une publication dans *Nature*). Une large partie de ces résultats a été cependant obtenue grâce à l'utilisation conjointe de données d'autres instruments scientifiques (satellites comme **Van Allen Probes**, ballons comme **Barrel** ou même nanosatellite privé **Aerocube-6**), ouvrant la voie vers l'utilisation d'essaims de nanosatellites pour assurer une bonne couverture spatio-temporelle depuis l'espace des phénomènes étudiés. Du côté de l'ionosphère, les concepts instrumentaux généralement plus complexes à miniaturiser, le besoin de bonnes stabilisation et restitution d'attitude ou le déploiement de bras rendent nécessaires des validations en vol poussées des instruments,

en comparant par exemple les résultats à des modèles éprouvés (champ magnétique ou densité électronique). On peut citer dans cette catégorie les missions **Dice bi-satellites**, **Cinema**, **Hoopoe** et **ExoCube**, leurs succès permettent d'envisager l'utilisation de tels instruments aussi dans la magnétosphère externe ou le vent solaire. Le seul résultat notable dans le domaine ionosphère est la caractérisation des propriétés des irrégularités ionosphériques dans le cadre de la mission **Rax-2** où les pulses émis par des radars incohérents au sol sont captés à bord à l'aide d'un récepteur radio dans la gamme UHF.

3.4. ATMOSPHÈRE ET OCÉAN

Côté atmosphère, deux thématiques scientifiques principales ont pour l'instant émergé : la prévision numérique du temps (PNT) et le suivi des gaz à effet de serre (GES). Côté PNT, en parallèle au développement du programme Cosmic par la NASA, diverses entreprises se sont positionnées sur la fourniture de paramètres thermodynamiques de l'atmosphère à partir de données de radio-occultation GPS, faisant ressortir la question de l'achat des données par les centres de PNT. La mission **CYGNSS** (cf. Fig. 2) pour l'observation des cyclones tropicaux a proposé un concept de base très innovant, avec des produits « vent » intéressants mais à améliorer. Elle a aussi mis en évidence que l'inter-calibration est un verrou pour l'utilisation opérationnelle de constellations de nanosatellites. Divers prototypes, embarquant des radars ou des radiomètres micro-ondes pour l'étude de l'évolution des nuages, ont été lancés courant 2018 : **RainCube**, **Tempest-D**, ou encore **Tropics** font l'objet d'un fort intérêt de la communauté.

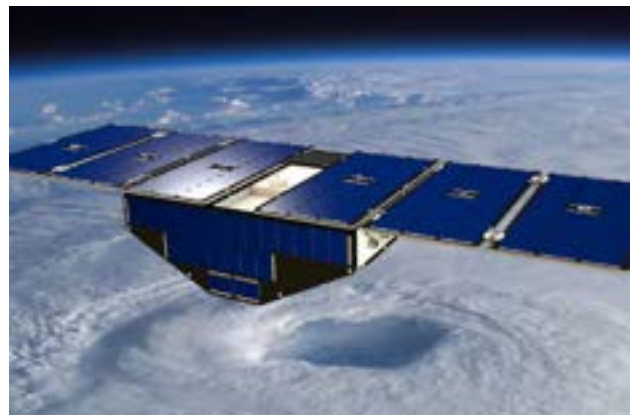


Fig. 2 : Vue d'artiste de l'un des huit satellites CYGNSS capables de cartographier la vitesse des vents au cœur des tempêtes tropicales par l'analyse de la diffusion des signaux GNSS sur la surface des océans. Cette constellation a été développée par l'Université du Michigan sous contrat NASA pour un coût total de l'ordre de 152 M\$.

© NASA
.....

Côté GES, deux entreprises se sont positionnées sur la détection de fuite de méthane à partir de mini-satellites, tel **GHGSat-D**. Ces mesures, d'accès payant, ne sont encore que sporadiques et ne présentent pas une précision suffisante pour réaliser des estimations de flux. Côté Océan, il faut noter le lancement récent, en décembre 2018, d'un premier nanosatellite de démonstration pour une mission essaim appelée **Socon** et dédiée à la couleur de l'océan.

4. ETAT DES LIEUX TECHNIQUE DES NANOSATELLITES

4.1. LE PAYSAGE TECHNIQUE SATELLITE ET SYSTÈME

La combinaison de la dynamique *Newspace* et de la miniaturisation des technologies (héritage des secteurs terrestres) est à l'origine d'un foisonnement des acteurs et des produits, avec pour résultat une offre pléthorique et en évolution permanente, ce qui rend l'établissement d'un catalogue impossible et inutile.

Pour les cas typiques (missions en LEO, inclinaisons et heures locales classiques, sans contraintes spécifiques), un éventail de solutions est disponible aujourd'hui en Europe : sous-systèmes et équipements (structure, SCAO, énergie, télécoms, avionique, propulsion), plateformes et intégrateurs, accès à l'espace (capacité lanceur et *brokers*). Des solutions avancées apparaissent (aux USA en particulier), auxquelles il serait possible de recourir si toutefois la question de l'indépendance européenne ne se posait pas.

Pour autant, un effort constant est à mener pour rendre possibles des missions plus spécifiques, introduisant des contraintes instrumentales pointues (compatibilité électromagnétique, pointage ultrafin), les missions en espace lointain (contraintes de durée de vie dues à la croisière, contraintes d'énergie, de température, de télécoms, de tenue aux radiations), l'accès aux orbites GEO ou HEO (mise à poste longue dans les ceintures de radiations), les cas d'orbites « rares » ou de constellations pouvant nécessiter un lancement dédié. Un effort particulier est à faire sur les dispositifs de déploiement (antennes, mâts, panneaux solaires, radiateurs...). Pour ces missions plus exigeantes certaines solutions sont déjà disponibles aux Etats-Unis (exemple de l'antenne grand gain en bande X des cubesats **MarCO** du JPL qui ont relayé la descente d'**InSight** sur Mars) mais pas encore en Europe.

Une autre direction d'efforts doit résider dans la miniaturisation des charges utiles, pouvant nécessiter de changer le principe de mesure, une réduction homothétique risquant de modifier radicalement le domaine de mesure, la sensibilité ou la bande passante.

4.2. LE PAYSAGE INDUSTRIEL

Partant des acquis du programme pédagogique Janus (*Jeunes en Apprentissage pour la réalisation de Nanosatellites au sein des Universités et des écoles de l'enseignement Supérieur*) est un programme CNES qui a pour objectif de promouvoir le spatial auprès des étudiants des écoles et universités françaises à des fins pédagogiques et technologiques. Démarré en 2012 et doté d'un budget de 4,5 millions d'euros il a formé 2000 étudiants et a participé à la dynamique de création des CSU/CSE en soutenant en partie certains de leur projet, le CNES a d'abord soutenu l'émergence d'un écosystème nanosatellites à travers des actions de R&T sur des équipements pour passer ensuite au soutien à une filière industrielle (gamme 12U – 27 U) à travers le projet **Angels** et bientôt à une filière industrielle (3U) à travers un futur projet de surveillance du spectre électromagnétique.

Les grands maîtres d'œuvre du spatial sont virtuellement absents de ce créneau, probablement parce que le chiffre d'affaires représenté par le marché des nanosatellites est trop petit en regard de leurs organisations, coûts de fonctionnement, objectifs de retour sur investissement et de rendement financier.

Par ailleurs, l'initiative privée pour déployer la constellation de télécommunication Oneweb a été l'occasion de mettre en place au niveau national une chaîne de production de petits satellites à coûts réduits (un soutien public adapté a été débloqué pour aider cette initiative).

Pour les nanosatellites, on se trouve donc en présence de deux types d'acteurs :

- Des startups, le plus souvent créées spécifiquement sur le créneau des nanosatellites, positionnées en tant que « *space mission provider* » et très visibles (le terme *space mission provider* englobe toutes les activités nécessaires à mettre en service une mission spatiale, des études préliminaires aux opérations en vol, en passant par la maîtrise d'œuvre satellite et l'approvisionnement du service lancement mais à l'exception du développement de la charge utile),
- Des PME du spatial traditionnel, plutôt positionnées en tant qu'équipementiers et bien moins visibles.

Le business model des startups est très axé sur les constellations applicatives. Si ce marché se concrétise, on assistera à une probable croissance de l'offre. Dans tous les cas, l'écosystème va se sédimenter ouvrant la

voie à une dynamique qui peut permettre à des PME issues du spatial traditionnel de se positionner.

5. CENTRE SPATIAUX UNIVERSITAIRES ET ÉTUDIANTS (CSU/CSE)

Environ la moitié des centres se situe en Ile de France, l'autre moitié se déployant au sud de la France de Nice à Toulouse, en passant par Grenoble, Marseille et Montpellier. Les centres spatiaux universitaires ont tendance à s'appuyer sur les compétences techniques et scientifiques des laboratoires spatiaux, alors que ceux développés au sein des grandes écoles s'appuient souvent sur des startups et laboratoires technologiques. Ces centres spatiaux, dont une partie ne disposait pas de compétences spatiales auparavant, bénéficient aussi de fondations ou partenariats avec de grandes entreprises du spatial implantées à proximité. L'objectif principal de tous ces centres est pédagogique, avec aussi des objectifs de développement technique et scientifique pour la majorité d'entre eux.

Une partie non négligeable des CSU/CSE a développé ses propres compétences et s'affiche potentiellement comme un nouvel acteur du spatial. C'est notamment le cas du CSU de Montpellier qui a déjà lancé trois nanosatellites (**Robusta 1A**, **1B** et **MTCUBE**). Avec **PicSat** (C2ERES), **X-cubesat** (Ecole Polytechnique), **AmicalSat** (CSUG) et **EntrySat** (CSUT), le nombre total de nanosatellites lancés par ces centres se monte à sept, sachant qu'un lancement supplémentaire est imminent : **EyeSat** développé par le CNES sera lancé avant la fin de l'année 2019. Sur l'ensemble des centres environ 15 projets sont en développement et c'est un total de neuf nanosatellites, tous de taille inférieure ou égale à 3U, qui devrait être lancé d'ici fin 2020.

La plupart des centres spatiaux, à l'exception du C2ERES, a bénéficié d'un soutien matériel et en terme d'expertise technique de la part du programme Janus du CNES. Leurs ressources humaines sont toutefois relativement limitées vis-à-vis des besoins pour les futurs projets spatiaux scientifiques (un total d'environ 20 ETP pour l'ensemble des personnels permanents impliqués dans les centres spatiaux) car dimensionnées et adaptées aux objectifs pédagogiques (encadrement d'environ 400 à 500 étudiants chaque année). Cette fragilité des ressources humaines rend problématique la pérennisation des compétences développées. Elle s'ajoute à des difficultés financières puisque, même si les coûts de construction et de lancement

des nanosatellites sont réduits par rapport à ceux des constructions et opérations spatiales traditionnelles, ils sont largement au-delà des possibilités de financement des établissements en charge.

Par ailleurs, sur le plan scientifique, on observe qu'à l'exception des CSU dans lesquels sont impliqués un ou des laboratoires spatiaux, les choix de projet faits par les centres spatiaux pédagogiques sont souvent découplés des grandes questions scientifiques des communautés utilisatrices des mesures spatiales ou des défis technologiques associés.

Certaines des priorités affichées par cet exercice de prospective nécessitant clairement le développement de solutions à base de petits satellites, il nous paraît indispensable d'optimiser les modes d'interaction de la communauté scientifique avec les CSU/CSE en proposant :

- De compléter les objectifs pédagogiques propres à chaque CSU/CSE par des objectifs de missions nanosatellite plus en phase avec les besoins en terme de recherche scientifique et/ou de développement technologique,
- Une synergie plus grande entre centres spatiaux, laboratoires et entreprises en ce qui concerne le développement technologique associé aux projets nanosatellites, afin d'éviter le foisonnement d'actions redondantes ou la fin prématurée de projets par faute de moyens et/ou de compétences.

Même si les projets scientifiques seront les moteurs naturels pour la mise en œuvre effective de ces synergies, nous proposons de les anticiper en organisant, dans la continuité de cette prospective, un atelier nanosatellite dans le cadre des seize ateliers-défis de la prospective en cours du CNRS-INSU. Cet atelier devra associer tous les acteurs académiques du domaine : centres spatiaux, CNES et laboratoires de recherche (cf. recommandation R6) pour discuter de la meilleure manière d'atteindre ces objectifs.

6. PERSPECTIVES POUR LES CINQ PROCHAINES ANNÉES

Parmi les différentes petites plateformes associées au phénomène du *Newspace* (nano/microsatellite et plateforme mini-satellite à faible coût de récurrence du type OneWeb), c'est clairement le format nano/microsatellite sur-mesure qui a les faveurs de la communauté scientifique. L'utilisation des plateformes mini-satellites industrielles issues des développements pour les projets de constellation internet globale (par exemple Ioda chez Airbus) n'a pour l'instant que très peu d'écho dans nos laboratoires, sans doute en raison de leur trop grande rigidité et des surcoûts importants lorsqu'il faut les adapter pour répondre aux exigences scientifiques.

Les nanosatellites par contre ouvrent clairement la voie à de nouveaux concepts de missions scientifiques. Il peut s'agir de missions de démonstration au moyen d'un satellite isolé en orbite basse, de constellations et essais de nanosatellites en orbite basse, en orbite éloignée ou géostationnaire, autour de la Lune, d'une planète (Mars) ou d'un petit corps du système solaire (comètes et astéroïdes).

La constellation et l'essaim apportent des possibilités d'observation et de mesure totalement inédites par rapport aux missions classiques : la constellation car elle offre des mesures in situ ou de télédétection à haut degré d'échantillonnage spatial et/ou temporel ; l'essaim car il permet de concevoir des systèmes d'observation à instrumentation fractionnée ou répartie dont la performance d'ensemble dépasse très largement la performance de chacun des éléments (par exemple en interférométrie), et qui de surcroît peuvent offrir une robustesse par rapport à la perte de l'un des nanosatellites constitutifs. ***Il s'agit en fait d'échanger de la fiabilité/durée de vie individuelle contre de la robustesse au niveau système, de la performance individuelle contre l'amélioration de paramètres système.***

Une variante des architectures multi-points (essaim, constellation) consiste en des concepts de type mères-filles permettant au moyen d'un satellite « mère » d'apporter la logistique nécessaire au déploiement de quelques petits satellites autour d'une planète ou d'un petit corps du système solaire, ou bien des concepts de type « compagnon » dans lesquels un petit satellite accompagne une mission interplanétaire classique pour la compléter.

Même s'il ne s'agit plus de missions *low cost*, la science (ou l'application) étant au premier plan avec de forts

enjeux et une exigence de performance, il est à noter que ces concepts permettent la coopération d'acteurs multiples (p. ex : par apport d'un satellite parmi N) et des stratégies de développement ou de déploiement incrémental.

Ces différents concepts induisent des directions de travail :

- Sur les échelles de temps : cibler des durées de développement de 0,5 à 2 ans, durée de vie de 2 à 5 ans puis à 7 ans,
- Sur les organisations : fabrication en série, déploiement incrémental, prise en compte des enjeux sur les autres éléments du système (réseaux et antennes sol, segment sol et opérations, LOS, lancement),
- Pour le développement de solutions et capacités à l'échelle du système : inter-calibration, co-ingénierie science et système, *Swarm technologies* (réseau, échange de données et traitement distribué, localisation et connaissance de la géométrie de l'essaim, temps commun, dynamique orbitale collective).



Nanosatellite Angels en essais chez Gerac.

© CNES/LE BRAS Gwennaw, 2018
.....

Nous présentons ci-dessous les différentes perspectives scientifiques mises en avant par les groupes thématiques et qui font appel à des solutions à base de nanosatellites (cf. liste thèmes et projets en Fig. 3).

Groupes de Travail	Thèmes scientifiques	Observations	Missions	Type de mission nanosatellite
Atmosphère	Nuages (microphysique et dynamique)	Imagerie 3D visible et micro-onde	C3IEL, C2OMODO	Train LEO
Atmosphère, Océan, Surfaces	Humidité des sols, salinité de surface	Interférométrie micro-onde passive en bande L	Ulid	Essaim LEO
Océan, Terre solide, Surfaces continentales	Déplacement des masses : océan, glaces, continents, et Terre interne.	Champ de gravité terrestre	Marvel	Essaim LEO & MEO
Océan	Dynamique océanique de surface	Reflet du soleil	Glistero	Satellite unique LEO
Surfaces continentales	Hydrologie continentale	Altimétrie nadir en bande Ka	Smash	Constellation LEO
Terre solide, SHM	Terre interne, manteau, croûte, Magnétosphère	Champ magnétique de précision	NanoMagSat	Constellation LEO
Astronomie	Localisation des sources transitoires de haute énergie	Chronométrie des sursauts gamma	Cubesat GRB	Constellation LEO
Exobio-exoplanètes	Biologie en environnement spatial	Expériences de biologie		Satellite unique LEO
Exobio-exoplanètes	Exploration planétaire	Spectroscopie, imagerie, biocapteurs		Nanosatellites d'accompagnement
Système solaire	Petits corps	Imagerie, spectro., sondage grav. & RF	Hera, mission F ESA, ZhengHe CNSA	Nanosatellites d'accompagnement
SHM, système solaire	Environnement de Mars	Particules et champs	Rensem	Constellation martienne
SHM	Magnétosphère terrestre et météo de l'espace	Particules et champs	Nuam, Circus	Constellation LEO

Fig. 3 : thèmes scientifiques et projets nanosatellites priorités par les groupes de travail thématiques.

6.1. SATELLITES ISOLÉS ET DÉMONSTRATIONS

La plateforme nanosatellite en orbite basse permet de réaliser des expériences de biologie ou de physique en conditions spatiales. Parmi celles-ci, ce sont les expériences de biologie qui sont scientifiquement les plus pertinentes. Elles semblent réalisables sans difficulté particulière, à faible coût, dans des délais courts, et éventuellement dans le cadre de projets pédagogiques.

Il est aussi possible de développer des nouveaux systèmes instrumentaux ou capteurs et d'en faire une première démonstration sur une plateforme nano/microsatellite en astronomie, en observation de la Terre ou pour les télécommunications. Celles qui offrent les perspectives scientifiques les plus intéressantes, comme par exemple l'astronomie UV (projet **Castor**), et la mesure de la figure de réflexion du soleil sur la surface océanique (projet **Glistero**) pourront être soutenues par des actions de R&T avec des perspectives de démonstration effective dans les cinq ans.

Par ailleurs, tout premier élément d'un projet de constellation (cf. sections 6.2 et 6.3 ci-après) constitue de fait une démonstration et rentre dans cette catégorie. Les priorités dans le domaine SHM mettent en évidence le besoin crucial d'anticiper une contribution de type nanosatellite de la France aux missions SHM et à des applications en météo de l'espace. Les nouveaux concepts de mission dans ce domaine intègrent en effet désormais systématiquement la fourniture d'un ensemble de nanosatellites, mais souvent avec des calendriers courts impliquant des niveaux de maturité très élevés. Il faut donc démarrer rapidement le développement d'une mission démonstratrice de la faisabilité de mesures plasma in situ et champs à partir d'une petite plateforme. Acquérir une capacité nationale d'une telle fourniture est stratégique. Pour cela, il faut étudier, développer et éventuellement réaliser un prototype de nanosatellite dédié à la mesure in situ. Cela implique notamment de résoudre un certain nombre de verrous technologiques (mât, compatibilité électromagnétique, spin...) au niveau plateforme mais également au niveau instrumentation (miniaturisation).

Dans cette catégorie se rangent aussi deux propositions singulières qui ont émergé pendant les travaux du groupe de prospective. L'une consiste à embarquer des sources radiofréquences sur un nanosatellite qui participerait à l'étalonnage du réseau d'observation basse fréquence de l'observatoire sol SKA. La seconde consiste en un nanosatellite de photométrie stellaire de très haute précision afin de préparer les éphémérides de la mission **Ariel** (transits exoplanétaires). Chacun étant un élément d'accompagnement d'une grande infrastructure ou mission, c'est dans ce cadre qu'ils doivent être mûris et éventuellement décidés.

Les budgets nécessaires pour ces projets s'échelonnent de quelques centaines de milliers d'euros à quelques millions d'euros selon le degré de complexité du développement et l'objectif recherché.

6.2. CONSTELLATIONS OU ESSAIS EN ORBITE BASSE

C'est de toute évidence la catégorie la plus riche, la plus accessible et celle qui présente un fort potentiel pour l'utilisation des plateformes nano/microsatellites à des fins scientifiques dans les cinq à dix prochaines années. Le petit satellite, en constellation ou en essaim, ouvre des possibilités tout à fait inédites pour déployer des systèmes d'observation d'intérêt scientifique majeur : la constellation car elle permet le déploiement de mesures in situ multipoints (SHM) et des observations spatiales à très haute répétitivité (météo, atmosphère, océans, Terre solide) ; l'essaim car il permet de réaliser un système d'observation distribué ayant des performances allant bien au-delà de celles du satellite unique (interférométrie radio et micro-ondes, interféromètre gravitationnel, localisation de sources transitoires).

Dans le domaine de l'observation de la Terre, les priorités mises en avant par les groupes thématiques concernent :

- Atmosphère : étude de la dynamique de développement des nuages convectifs avec un train de deux ou trois satellites (projets **C3IEL** et **C2OMODO**),
- Surfaces continentales : interférométrie micro-onde passive (**Ulid**) et réflectométrie radar pour l'hydrologie continentale (**Smash**),
- Terre solide : mesures de haute précision du champ magnétique terrestre (**NanoMagSat**),
- Océan et Terre solide : mesure du géoïde terrestre (**Marvel**, éventuellement en association avec **Grace**).

Dans le domaine des sciences de l'univers il s'agit de :

- Météorologie de l'espace : mesures multipoints de l'ionosphère terrestre (constellation incluant jusqu'à 72 nanosatellites, projets **Circus** et **Nuam**),
- Astronomie : alerte et localisation des sursauts gammas (constellation de huit nanosatellites, **Cubesat GRB**).

Ces systèmes d'observation sont pour la plupart techniquement accessibles. Ils peuvent être développés de façon incrémentale avec des étapes de démonstration à un ou quelques satellites lancés dans les cinq prochaines années et la possibilité d'un système complet déployé avant dix ans.

Dans le domaine de l'observation de la Terre, il existe clairement des intérêts industriels, et/ou spéculatifs, et

donc des possibilités de financement en partenariat public-privé. Certaines missions analysées sont par exemple porteuses à la fois d'un intérêt scientifique certain (même s'il n'est pas priorisé au plus haut niveau par les groupes thématiques) et de fortes potentialités en terme de développement d'applications et de services associés tout en étant d'un niveau de maturité technologique accessible dès aujourd'hui. C'est, par exemple, ce type de missions relativement peu coûteuses que cherche à promouvoir le programme *Earth Venture* de la NASA ou le challenge *Smallsats* de l'ESA.

Les budgets nécessaires pour développer ces systèmes d'observation en orbite basse s'échelonnent de quelques centaines de milliers d'euros pour un développement de capteur miniaturisé, un million d'euro pour un ou deux nanosatellites de démonstration, et plusieurs dizaines de millions d'euros pour un train, un essaim ou une constellation complète.

6.3. CONSTELLATIONS OU ESSAIS EN ORBITE HAUTE, GÉOSTATIONNAIRE, LUNAIRE OU MARTIENNE

Les systèmes multi satellites (essaims, constellations plus ou moins importantes, concepts mère-filles) ont aussi vocation à se déployer au-delà de l'orbite basse : en orbite haute, pour les études magnétosphériques et la météorologie de l'espace, en orbite géostationnaire, pour un interféromètre à ondes gravitationnelles, autour de la Lune, pour un grand interféromètre radio basses fréquences et pour un concept d'observatoire des rayons cosmiques des ultra-hautes énergies, et autour de la planète Mars, pour l'étude de son environnement ionisé et de ses interactions avec le vent solaire.

Les systèmes d'observation de ce type identifiés par les groupes thématiques sont les suivants :

- Constellation magnétosphérique pour la météorologie de l'espace,
- Constellation autour de la Lune pour un grand interféromètre radio basses fréquences (**SLFRI, Noire** cf. Fig. 4),
- Constellation ou concept mère-filles autour de Mars pour l'étude de son environnement spatial ionisé (**Rensem**).

Ces projets sont par nature beaucoup plus ambitieux que ceux en orbite basse car ils nécessitent des moyens importants en terme de lancement, de désorbitation, de communications et de système de posi-

tionnement. Il est donc probable qu'ils suivront des schémas de développement plus en ligne avec le spatial traditionnel, les coûts de déploiement importants incitant peu à la prise de risque.

Les budgets à envisager pour réaliser ces missions restent du même ordre que pour une mission classique. Cependant seul le nanosatellite est à même de rendre budgétairement faisables ces missions multi-satellites.

6.4. PETITS SATELLITES INTERPLANÉTAIRES

L'utilisation de petits satellites est envisagée aussi pour accompagner des missions vers les planètes ou vers les petits corps du système solaire, à la façon des deux nanosatellites **MarCO** qui ont accompagné la mission **InSight** vers la planète Mars en 2018 afin de relayer sans délais vers la Terre la télémétrie du module de descente sur la planète. Ceux-ci peuvent être les éléments d'un système d'observation déployé pour l'imagerie ou la spectroscopie de l'objet planétaire, mais aussi pour la gravimétrie ou le sondage radiofréquence dans le cas d'un petit corps, ou alors ils peuvent venir ajouter une fonctionnalité à la mission pour un coût additionnel modéré et une prise de risque raisonnée. Des missions basées sur des sondes de petit format (< 50 kg) *stand alone* sont aussi envisageables vers la Lune, Venus, les astéroïdes géocroiseurs et Mars.

Le surcoût associé au petit satellite « compagnon » d'une mission planétaire est de l'ordre de 10 M€ si l'on se réfère à l'exemple de la mission **MarCO-InSight**.

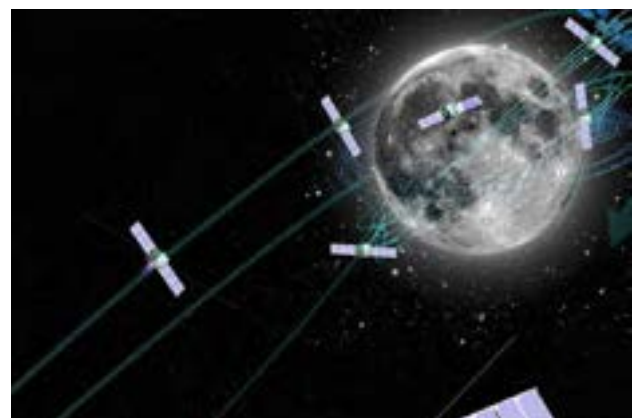


Fig. 4 : Représentation artistique d'un interféromètre radio-astronomique basses fréquences autour de la Lune.

© Projet OLFAR Pays Bas
.....

7. RECOMMANDATIONS

A l'issue de ses travaux, le groupe de travail retient comme fait majeur qu'il convient d'investir dans la filière nanosatellite pour la science :

- Les nanosatellites sont parfois le seul moyen pour réaliser des missions scientifiques prioritaires,
- Ils ont un potentiel important qui justifie un investissement significatif du CNES à court / moyen terme, tant pour lever un certain nombre de verrous technologiques que pour la réalisation des missions qui seront mises en avant par les groupes thématiques.

Les recommandations qui suivent ont pour objet de préciser les conditions dans lesquelles cet engagement devrait se faire.

7.1. R1 : REPENSER ET RENFORCER LA NOTION DE DÉMONSTRATION

Il faut repenser le concept de démonstration dans un contexte de développement/déploiement incrémental ou de schéma économique *Newspace* :

- Le concept de démonstration technologique peut être conçu en plusieurs étapes complémentaires dont les premières n'atteignent pas toujours les objectifs d'une mission réelle.
- Pour le déploiement d'un grand nombre de satellites récurrents, le démonstrateur doit être compris comme un prototype pré-opérationnel dont la série est prévue financièrement et techniquement dans un développement parallèle légèrement décalé.

7.2. R2 : GÉRER LES PROJETS DE MANIÈRE AGILE DANS UN MODE DÉMONSTRATIF ET SPÉCULATIF

La notion de prise de risque doit être revue pour les systèmes pouvant bénéficier de la dynamique nouvelle.

Au niveau technique :

- Réutiliser les technologies disponibles sur le marché dans les premières phases de démonstration même si leurs performances sont en deçà de ce que requiert la mission finale,
- Revoir le concept retenu au vu des résultats intermédiaires,
- Envisager des constellations hybrides (plusieurs ni-

veaux technologiques dans un même système opérationnel),

- Adapter les modes de décision, de suivi et de développement au cas des missions satellitaires à bas coûts.

Au niveau économique :

- Envisager un partenariat public/privé équilibré dès la phase initiale du projet.

7.3. R3 : METTRE EN PLACE UN PLAN DE DÉVELOPPEMENT DE TECHNOLOGIES CAPACITANTES ET UN PLAN D'ÉVALUATION DES TECHNOLOGIES DISPONIBLES SUR LE MARCHÉ

Pour être un acteur de premier rang dans le domaine, il convient de disposer des technologies capacitantes (les autres technologies peuvent provenir des autres acteurs) en mettant en place un plan d'action ambitieux :

- Miniaturisation des équipements,
- Concepts de mesure nouveaux, adaptés aux faibles volumes,
- Dispositifs de déploiement (antennes, télescopes, mâts, puissance, thermique...)
- *Swarm technologies* (littéralement : « technologies d'essaim », c'est à dire incluant les problématiques de réseau, d'échange de données et traitement distribué, de localisation et de connaissance de la géométrie de l'essaim, de temps commun, de dynamique orbitale collective).

Cette recommandation s'inscrit en cohérence avec les travaux du groupe de travail transverse technologie.

7.4. R4 : DÉVELOPPER DES MÉTHODES ET OUTILS D'ANALYSE SYSTÈME POUR DES SYSTÈMES RÉPARTIS, COMPLEXES OU HÉTÉROGÈNES

La performance d'une mission répartie relève de paramètres instrumentaux et de paramètres techniques à l'échelle du système (voire du système de systèmes). Nous recommandons de développer des méthodes et outils d'analyse système sur un cas de mission dimensionnant impliquant des acteurs émanant des secteurs

scientifiques, techniques et académiques. Ce travail pourrait déboucher sur des développements de simulations de type OSSE (Observing System Simulation Experiment).

7.5. R5 : DÉFINIR DES MODALITÉS DE DÉPLOIEMENT INCRÉMENTAL DES SYSTÈMES RÉPARTIS COMPLEXES

Le développement des constellations pour des missions scientifiques exige une évolution culturelle radicale à laquelle il faut œuvrer de manière collective :

- Penser le programme dans une dynamique de déploiement incrémental,
- Expliciter les objectifs mission associés aux différentes étapes,
- Négocier l'accès pérenne à la donnée brute, aux fonctions de transfert, aux conditions d'acquisition.

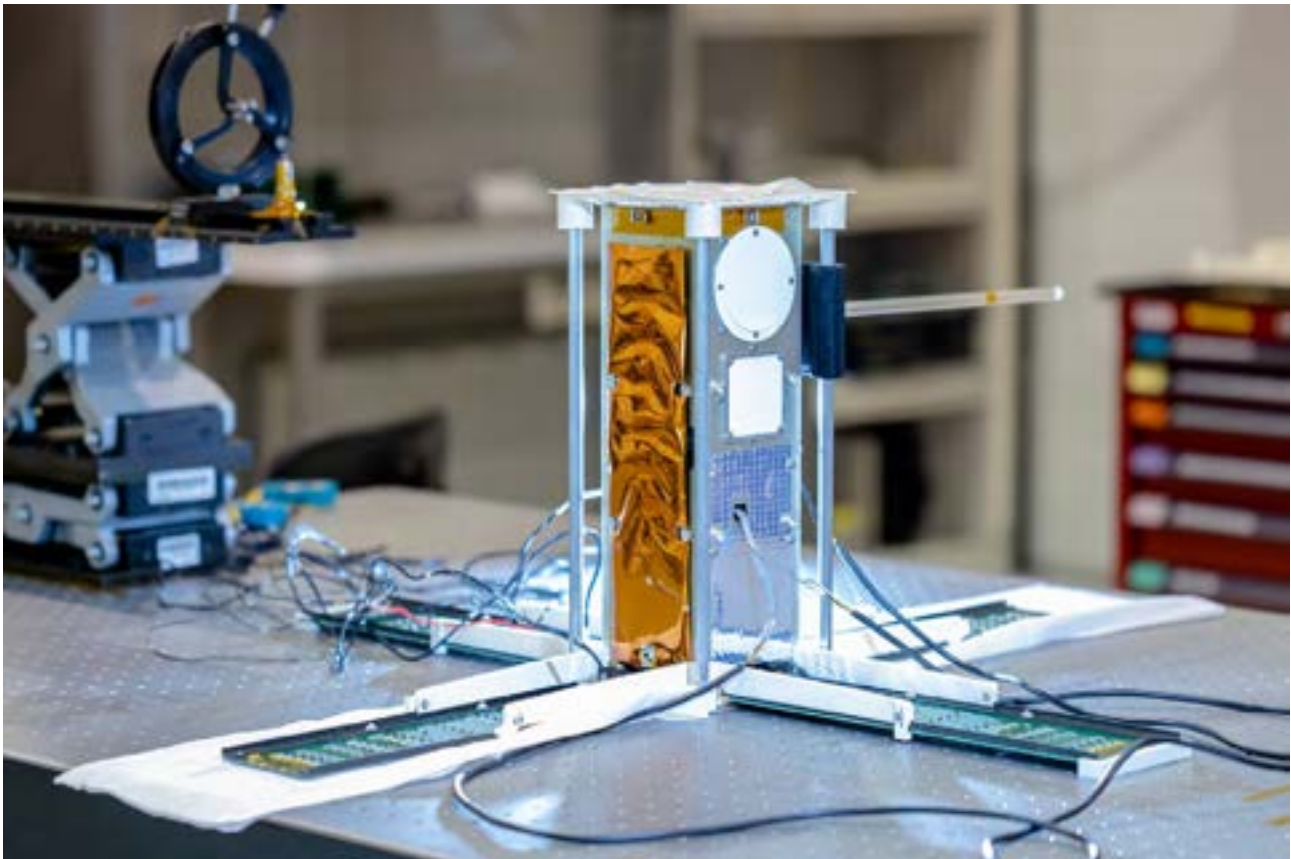
7.6. R6 : FAVORISER LA STRUCTURATION NATIONALE DES ACTIONS SCIENTIFIQUES DES CENTRES SPATIAUX ÉTUDIANTS

Il convient d'optimiser le mode d'interaction au niveau national :

- Les laboratoires doivent pouvoir s'appuyer de manière adaptée sur les compétences et savoir-faire des agences, de l'industrie et des centres spatiaux étudiants,
- Les centres spatiaux étudiants doivent clarifier leur positionnement présent et futur,
- Il faut organiser un forum national annuel, partager les outils et les méthodologies pour limiter les actions redondantes.

Cette démarche pourra être initiée à l'occasion du défi #12 « Nanosatellite » de l'exercice de prospective transverse du CNRS-INSU, à réaliser en partenariat avec le CNES.

Les annexes produites par le groupe Newspace et nanosats peuvent être consultées sur le site : <https://sps2019.com/rapports/>



Modèle de vol du nanosatellite Eye-Sat.

© CNES/TRONQUART Nicolas, 2019
.....

GROUPE DE TRAVAIL TRANSVERSE NUMÉRIQUE ET DONNÉES

Françoise Genova, Jean-Marie Hameury, Patrice Henry, Laurence Hubert-Moy, Frederic Huynh, Francois Jocteur-Monrozier, Didier Juvin, Catherine Lambert (co-présidente), Thierry Levoir (co-président), Stéphane Requena, Hervé Roquet, Vincent Toumazou, Denis Veynante.

1. CONTEXTE GÉNÉRAL

La dernière décennie a été marquée par l'émergence et la mise en œuvre du concept de « Science Ouverte », qui est, comme le rappelle le Plan National pour la Science Ouverte publié en 2018, la diffusion sans entrave des publications et des données de la recherche, s'appuyant sur l'opportunité que représente la mutation numérique, et induisant une démocratisation de l'accès aux savoirs, utile à la recherche, dont elle augmente l'efficacité, à la formation, à l'économie et à la société.

Concernant les données spatiales, aux volumétries en perpétuelle croissance, les agences spatiales et les acteurs des grands programmes spatiaux doivent faire face aux défis du numérique et en particulier :

- Aux problématiques d'ouverture du spatial guidées par les applications scientifiques et les utilisations par les acteurs du numérique,
- A la mise en œuvre de moyens et de plateformes de stockage, de traitement et retraitement (incluant des nouvelles technologies comme l'intelligence artificielle), adaptés aux besoins de communautés.

Il est aussi à noter que les données spatiales utilisées dans des contextes de coopérations techniques et scientifiques sont devenues des atouts majeurs au plan diplomatique dans les relations internationales : les données apportées par les agences spatiales couplées à d'autres sources d'informations (données in situ, expertises thématiques, modèles) apportées par les partenaires constituent des éléments majeurs pour construire des programmes de coopération durable.

L'ESA joue un rôle majeur au niveau européen, en diffusant par exemple les données des missions du programme obligatoire, qui sont un élément important du paysage scientifique du spatial pour les sciences de l'univers. Il en est de même avec EUMETSAT et le programme Copernicus de l'Union Européenne pour le suivi de l'environnement.

Les développements des usages scientifiques des données spatiales dans le contexte de la science ouverte supposent la mise en œuvre, domaine par domaine, des principes FAIR (F = *findable*/faciles à trouver, A = accessible, I = interopérable, R = réutilisable) pour les données de la recherche. Les communautés scientifiques doivent jouer un rôle central pour la « FAIRisation » des données et des services. L'interopérabilité au niveau technique et au niveau sémantique est un élément majeur de la science ouverte. On ne peut plus traiter la diffusion des données des seules missions opérées par le CNES sans imaginer une approche multi-missions, également capable de prendre en compte des données provenant de sources extérieures (observations télescopiques au sol, aéroportées ou in situ), au moins en termes d'interopérabilité. Par ailleurs, les données doivent être accompagnées des informations, y compris les algorithmes, permettant de les comprendre et de les réutiliser.

Par ailleurs, les données spatiales sont aujourd'hui au cœur de l'expansion d'un secteur aval générateur de croissance et de création d'emplois. A titre d'exemple, doté d'une politique de la donnée ouverte, le programme européen Copernicus devrait permettre la création de dizaines de milliers d'emplois dans la décennie à venir, 1 euro investi dans le programme par l'Union Européenne rapportant, selon diverses études, de 4 à 10 euros de revenu sur la chaîne de la valeur ajoutée. L'émergence de ce qu'il est commun de nommer un écosystème du spatial a fait apparaître, dans ce secteur d'activité, de nouveaux acteurs aux côtés des acteurs scientifiques historiques. Qu'ils soient utilisateurs finaux, intermédiaires, privés, publics, prescripteurs, développeurs, opérateurs de services, ces nouveaux entrants ont exprimé des besoins qui ont bouleversé le paysage. Les données spatiales, les systèmes d'accès et de traitement n'y échappent pas.

Dans ce contexte, le CNES doit faire évoluer son approche centrée sur l'ensemble satellite-capteurs-technologies vers une logique prenant en compte, dès l'origine, les données et les besoins de leurs utilisateurs.

Cette approche devrait être structurée sur le long terme autour d'une filière centrée sur les besoins des communautés scientifiques, tout en prenant en compte dans la mesure du possible les besoins d'autres utilisateurs afin de bénéficier d'éventuelles mutualisations des efforts. Le support expert joue un rôle fondamental pour la mise à disposition des données, leur gestion et leur utilisation.

2. ÉTAT DES LIEUX

2.1. EXISTANT

2.1.1. Données

Dans le domaine des sciences de l'univers, les années à venir verront le lancement de nombreuses missions qui produiront à court et moyen terme un flot important de données à traiter. Plus encore que le volume des données, la complexité des traitements est un enjeu qui doit être correctement anticipé. Comme l'expérience de **Planck** l'a montré, les grands relevés, nécessitent le traitement conjoint d'un grand ensemble de données sol et spatiales, ce qui est un défi majeur. Il faut également continuer les efforts pour définir et faire évoluer les standards nécessaires à la « FAIRisation » des données pour prendre en compte les caractéristiques des données issues des différentes missions et l'utilisation conjointe avec les données des télescopes sol. Cela va continuer à mobiliser la communauté scientifique et les laboratoires et il est clair que les besoins ne vont pas décroître, bien au contraire. Ces questions ne peuvent pas être traitées au niveau national uniquement et l'ESA est un partenaire incontournable.

En observation de la Terre, la quantité de données produites quotidiennement et disponibles pour les utilisateurs ne cesse de croître. Les données sont multi-satellites, multi-sources et de complexité croissante en terme de traitement/retraitement en fonction des besoins de plus en plus diversifiés des utilisateurs. C'est en particulier le cas pour le programme Copernicus et de la prochaine mission **Swot**. Les acteurs français et le CNES en particulier disposent d'une longue expérience de mise à disposition des données pour des applications scientifiques et opérationnelles. C'est notamment le cas en océanographie. Autour de la filière radar altimétrique des milliers d'utilisateurs disposent librement des données spatiales via le service AVISO pour des usages non-commerciaux de façon continue depuis les années 90. Dans le même ordre d'idées, sur la filière de l'imagerie, le CNES dispose avec les missions **Spot** d'une mine de données consi-

dérable dont la licence est toutefois différente.

D'importants efforts ont été engagés depuis des années pour structurer les développements et usages scientifiques des données, produits et services en créant des pôles de données et de services dans le cadre de l'Infrastructure de Recherche inter-organismes Data Terra - Système Terre (feuille de route nationale). Autre exemple : la plateforme PEPS mise en place par le CNES permet de faciliter l'accès aux données des satellites **Sentinel**.

Par ailleurs, ces nouveaux usages font appel à des données spatiales mais aussi sol, aéroportées et in situ, voire des données issues de modèles, mélangeant dans certains cas des thématiques différentes.

Cet accroissement du flot de données s'est accompagné d'un développement durant la dernière décennie de l'interopérabilité des catalogues de données, et du développement de standards de normalisation et de procédures pour faciliter utilisations et échanges, avec en sciences de l'univers, l'International Virtual Observatory Alliance (IVOA) et les alliances mises en place dans les domaines de la planétologie et de la physique héliosphérique, et des avancées comme le standard *OpenSearch GEO* ainsi que l'initiative INSPIRE pour l'observation de la Terre. Les efforts doivent être poursuivis en s'appuyant sur les communautés pour renforcer la mise en œuvre de données FAIR.

La qualité et la pérennité des données sont également des éléments essentiels pour leur réutilisation. Elles exigent un travail supplémentaire, qui doit être pris en compte tout au long de leur cycle de vie, et l'intervention d'experts.

2.1.2. Infrastructures

Les infrastructures numériques ont dû être adaptées aux bouleversements autour des données décrites ci-dessus. La généralisation du big data, du *Cloud Computing* et plus récemment l'introduction de l'intelligence artificielle ont ouvert de nouveaux horizons pour traiter des volumes de données impossibles à imaginer il y a seulement quelques années. Tant côté français qu'international, les initiatives se multiplient sur de nouvelles capacités et infrastructures de traitements des données notamment spatiales et ce bien au-delà du mandat des seules agences spatiales, du CNES en particulier.

En Europe, l'initiative EuroHPC vise à mettre à disposition des capacités de calcul/traitement de classe Exascale à horizon 2022/23 tandis que EOSC proposera au-dessus de cette couche fédérée calcul/data/réseau des services interopérables d'accès aux données, données générées notamment par les infrastructures de la feuille de route européenne ESFRI.

En France, le MESRI a entrepris dans le cadre du comité de pilotage InfraNum une démarche de rationalisation des infrastructures numériques pour la recherche autour de datacentres régionaux labellisés (typiquement un à deux par région) et de quatre centres nationaux (CINES, IDRIS et TGCC, qui hébergent aujourd'hui les calculateurs de GENCI, opérateur national HPC, et le CC-IN2P3). Le plan stratégique 2019-2023 de GENCI, voté en mars 2019, prévoit le développement de nouveaux services autour des données instrumentales, en complément des moyens/services de données computationnelles actuels.

Dans la réflexion que mène le CNES dans le cadre de la prospective scientifique, l'écosystème national et européen des infrastructures de traitement et de stockage doit être pris en compte.

Le virage que doivent prendre les infrastructures précédemment citées est d'intégrer la gestion des données, ce qui est d'une nature complètement différente de celle du seul calcul haute performance où il faut gérer des demandes d'allocation de moyens de calcul et de stockage sur un temps relativement court. Pour la gestion des données, produits et informations dérivées, il s'agit d'assurer une gestion sur du long terme de données multi-sources et volumineuses, avec potentiellement une garantie des performances d'accès spécifiques à chaque type de données. Il faudra également définir les limites d'un modèle « public » pour la recherche vis à vis des besoins « privés » pour des services commerciaux.

Associés à ces infrastructures, il faut aussi apporter des services de formation et d'expertise (optimisation de codes, gestion des données, expertise sur les données selon les thématiques) indispensables à l'utilisation efficace de ces moyens et données. L'accompagnement d'experts est nécessaire à la mise à disposition des données, à leur préparation pour leur pérennisation, et en support à leur utilisation.

2.2. POLITIQUE DES DONNÉES

Les initiatives prises par les Etats mais aussi à l'échelle de l'Europe tendent vers une politique de données ouvertes et de science ouverte, qui est aussi mise en œuvre par de plus en plus de communautés utilisatrices.

Compte tenu de l'éventail considérable à traiter dans le périmètre de ce groupe de travail, il n'est pas envisageable d'appliquer une politique unique d'accès aux données. Et compte tenu des enjeux qu'une telle variété de données sous-tend (distribuer de tels volumes de données nécessitant de dimensionner des infrastructures d'accompagnement avec parfois des questions de

souveraineté et/ou de concurrence), un travail précis doit être envisagé, pour définir les utilisateurs, les données, les structures d'accompagnement (infrastructures et expertise humaine) et les politiques qui s'y appliquent.

Dans un contexte de forte compétitivité entre l'Europe et le reste du monde, il conviendra de distinguer les usages scientifiques et commerciaux pour définir les politiques appliquées aux accès aux données et aux accompagnements (par exemple expertise, infrastructures de calcul...).

2.3. BESOINS EXPRIMÉS

Pour ce qui concerne l'observation de la Terre, les principaux enjeux en termes d'accès, de traitement et d'analyse des données s'articulent comme suit :

- **Le besoin d'accéder à des longues séries temporelles de données** : l'obtention de ces longues séries pose des problèmes de continuité et de consistance des données comme le recalage de différents capteurs, boucher les trous d'observation, assurer le stockage long terme des données et métadonnées avec possibilités de ré-analyses périodiques ce qui suppose aussi le stockage des données d'étalonnage et des algorithmes, catalogage, etc....
- **La complémentarité données satellitaires, sols, aéroportées et in situ ainsi que la diversité des sources d'information** : quel que soit le problème géophysique abordé, sa résolution nécessite généralement d'avoir recours à des données spatiales et in situ de nature variée, issues de nombreux domaines (atmosphère, océan, surfaces continentales, Terre solide, biodiversité et société) et à des échelles géographiques (local, régional, global selon les capacités d'agrégation) adaptées aux problématiques, dans des contextes inter-organismes (CEA, CNES, CNRS-INSU, IFREMER, INRA, IRD, Météo-France, etc...). L'implémentation des standards d'interopérabilité, la mise en place de portails facilitant l'accès aux diverses données, services et outils constituent un enjeu déterminant. L'implication des communautés scientifiques garantit la qualité, la traçabilité des processus et la mobilisation d'une expertise autour des données et leurs usages. La mise en place de l'IR Data Terra à partir des quatre pôles de données et de services pour le système Terre est une première contribution majeure, à renforcer, pour répondre à ces défis. L'IR Data Terra a décidé de mettre en place des revues régulières des pôles. La première, qui portait sur le Pôle AERIS, a été conclue en avril 2019.
- **Liens données/calcul** : Les masses de données utilisées dans les modèles sont de plus en plus importantes, notamment liées au développement de l'assi-

milation de données. Cela pose des questions sur le lien et la logistique des données entre accès aux données et calcul. En dehors de la recherche, le problème se pose de façon encore plus aigüe pour toute activité demandant du temps quasi-réel (comme l'opération de modèles de prévisions assimilant des données spatiales). Il y a donc conjonction d'intérêts sur ce sujet entre différents acteurs.

- **Dimension internationale** : En observation de la Terre, le chercheur va chercher l'information là où elle se trouve et pas uniquement dans les données nationales ou même européennes. Il a donc besoin de ponts faciles et cela pose la question de la dimension « seulement » nationale des portails d'accès. A l'inverse, l'impact des données nationales dépend en grande partie de la facilité avec laquelle elles sont accessibles pour des chercheurs d'autres pays. Là encore, les pôles de données ont un rôle majeur à jouer pour faciliter l'accès aux données dans les deux sens. Au-delà de la recherche stricto sensu, ces problématiques interrogent directement la production des services environnementaux.

Les enjeux en terme numérique se concentrent sur :

- Evidemment des besoins de calcul importants pour rester compétitif, notamment en matière de modélisation du climat mais plus largement en ce qui concerne les *Earth System models*.
- Dans certains domaines, les flux de données sont tels qu'il est absolument nécessaire de faire appel à des méthodes de traitement, identification, classification automatiques proches des données. C'est clairement un domaine où la perception des problèmes par les communautés concernées est claire mais pour lesquels leur formulation concrète et plus encore les méthodologies de résolution sont balbutiantes. Les méthodes dites « d'intelligence artificielle » sont évidemment une approche permettant de répondre à ces questions : elles permettent l'exploration évolutive de grandes données et apportent de nouvelles perspectives et capacités prédictives. Cependant, il est important de noter que l'IA demeure un simple outil qui doit être utilisé avec les principes physiques et l'interprétation scientifique. L'un des principaux défis est d'exploiter pleinement la puissance des nouvelles technologies comme l'intelligence artificielle en collaboration avec les nouveaux acteurs de l'écosystème. Reste à identifier comment et avec qui faire ce travail et à dimensionner les infrastructures en fonction de ces nouveaux besoins, sans aucun doute en développant des collaborations et rapprochements avec les communautés des sciences de l'ingénieur et de l'IA qui ne sont pas aujourd'hui assez directement impliquées dans le spatial et ses applications.
- Par ailleurs, l'utilisation des données passent aujourd'hui souvent par les modèles au travers d'interpolation, d'assimilation ou d'inversion. Les méthodes

existent mais peuvent sans doute être optimisées sous l'angle de la résolution numérique. Mais le problème central tourne autour de la façon de définir de façon rigoureuse mais réaliste les incertitudes des mesures et des modèles. De même, l'usage de plus en plus répandu de méthodes basées sur des simulations d'ensemble nécessite également de développer des approches numériques solides sur divers points, notamment sur la définition des poids des différents membres de l'ensemble.

- Les simulations *end-to-end* en grand nombre (plusieurs milliers pour une précision de quelques pourcents) sont indispensables pour tester la fiabilité des modèles et établir les incertitudes et sont dimensionnantes pour les besoins en calculs et outils informatiques.

Elles doivent comprendre :

- La simulation à partir des modèles physiques
- La simulation des données à partir du signal simulé et d'un modèle de l'instrument et des observations (par exemple au travers d'*Observing System Simulation Experiment*),
- L'injection de ces données simulées dans les logiciels d'analyse.

Cela multiplie les besoins en calcul, stockage, capacité de liaison par plusieurs milliers et devient dominant dans l'estimation des besoins.

- Les applications scientifiques d'aujourd'hui requièrent des traitements en flux continu (*end-to-end workflow*). Il est devenu essentiel d'orchestrer et de programmer les phases de traitements, d'analyse, d'IA et de calcul HPC au travers d'un continuum d'infrastructures. Les problématiques de logistiques de données (spatiales et in situ) sont devenues cruciales.
- Enfin beaucoup de difficultés résultent du fait que les lois d'agrégation spatiale de certains paramètres ne sont pas ou pas correctement maîtrisées (ce qui est souvent responsable de ce que l'on nomme « les problèmes d'échelle »). Les données spatiales seules (au travers de diverses résolutions) ou combinées à des données sols peuvent constituer une base de données permettant d'avancer sur ces questions. Là encore, des outils mathématiques performants, non linéaires, seraient utiles.
- La question ici est comment apporter des compétences numériques supplémentaires dans la communauté ? Est-il vraiment possible d'impliquer la communauté des mathématiques appliquées et comment ? Quelle serait une politique volontariste et incitative dans ce domaine ? Comment (peut-être est-ce plus réaliste ?) intensifier la formation des géophysiciens à ces méthodes numériques (par exemple au travers d'écoles d'été, cours spécialisés, *workshop* dédiés...)?

Dans le domaine des sciences de l'univers, les besoins dimensionnants et les évolutions dans le domaine sont les suivants :

- Besoin d'associer et de traiter en même temps des données de provenances diverses, et pas uniquement spatiales. C'est par exemple le cas des données **Euclid** qui devront être associées aux données **LSST** (Large Synoptic Survey Telescope, télescope de 8m installé au Chili qui couvrira tout le ciel visible en trois jours). Ces données peuvent aussi être des données obtenues à d'autres longueurs d'onde ou utilisant d'autres messagers que les photons. Cela peut être également des données provenant de satellites similaires (données multipoints pour l'observation des magnétosphères par exemple). Les missions exoplanétaires à venir à court terme (**Cheops**, **Plato**) nécessiteront l'acquisition d'un volume considérable de données sol, mais le traitement des données sol et spatiales n'aura pas à être simultané.
- Emergence de la variable temps – ce qu'on appelle « *time domain astronomy* » - qui induit une dimension supplémentaire dans les données. Le **LSST** fournira un million d'alertes par nuit, qu'il faudra hiérarchiser et gérer.
- Nécessité de référencements divers pour, par exemple, les calibrations radiométriques, spectrales, la génération de données auxiliaires (comme la cartographie en surface des planètes) et les bases de données associées.
- Besoin de mesures de grande précision, car on recherche des effets très fins (polarisation du CMB, *weak lensing*, sensibilité pour la recherche de gaz trace dans les atmosphères planétaires, etc.), alors que les incertitudes peuvent être dominées par les incertitudes et erreurs systématiques (mal connues) plus que par la statistique.
- Besoin de maintenir ouvert un espace de découvertes (de nombreuses découvertes majeures ont été fortuites). Le spectre électromagnétique a largement été exploré même si d'autres domaines s'ouvrent (ondes gravitationnelles par exemple). Cependant de grandes masses de données existent, de plus en plus profondes et détaillées, qui demandent à être analysées en détail. Il faut donc se doter de la capacité d'identifier, dans des volumes de données croissants, des classes d'objets ou de comportements, ainsi que des objets ou des comportements anormaux qui méritent une étude détaillée.
- Besoin d'analyser simultanément de très grands jeux de données (cf. **Planck**, **Gaia**, **Euclid**, **Mars Express**, **TGO**, etc.). On ne peut pas, dans ces cas segmenter les observations en les traitant indépendamment les unes des autres.

A noter que les volumes de données spatiales sont largement plus faibles que celles qui seront issues des moyens au sol, le flux des données spatiales étant limi-

té par la télémétrie. Le **LSST** fournira 500 PB d'images de plusieurs dizaines de milliards d'objets observés plus d'un millier de fois chacun et **SKA** poussera ces limites bien au-delà. Par contre, la complexité des données spatiales peut largement dépasser celle des données sol.

Les enjeux en terme numérique se concentrent sur :

- **Besoin de maintenir et développer des archives ouvertes, facilement accessibles et interopérables.** Il faudrait de plus faire le lien entre publications et données. Une évolution actuelle pour les archives est le changement de paradigme en cours : on ne va plus télécharger les données d'une archive pour les analyser en local, mais les archives vont évoluer en donnant la possibilité d'uploader ses propres codes de traitement. Une approche est de faire l'analyse sur les serveurs de l'archive et de rapatrier seulement les résultats. C'est en phase prototype à l'ESA et cela a été réalisé au CNES avec PEPS.
- **Besoin de développer des simulations *end-to-end*,** incluant la modélisation numérique du signal astrophysique attendu, la simulation précise des données produites par ce signal, et l'analyse de ces données simulées. Cela suppose une excellente connaissance de l'instrument, et donc un lien étroit entre les équipes de développement instrumental et d'analyse des données. Ces simulations sont essentielles pour calibrer les développements instrumentaux ; elles génèrent de gros jeux de données ayant une problématique de *data mining* similaires aux données d'observation ; enfin elles permettent de préparer l'assimilation de données par les modèles.
- **Besoin de développer des outils d'analyse automatique issus de l'intelligence artificielle** (« *machine learning* », « *deep learning* »), en circonvenant la difficulté que ces outils ne peuvent être utilisés comme des boîtes noires, mais qu'on doit systématiquement chercher à comprendre la physique sous-jacente aux résultats de l'analyse automatique. Les codes peuvent être publics, mais la logique du modèle de classification généré par ledit code n'est pas évidente à identifier et à interpréter. A noter que ces outils peuvent être plus performants sur les données brutes, d'où d'éventuelles contraintes sur les données archivées. Ceci implique une grande maîtrise des données et de leur pérennisation ; mais les catalogues d'événements peuvent aussi être indispensables pour certaines analyses basées sur le « *machine learning* ». Des approches hybrides de modélisation entre physique ou probabilités et apprentissage issu des données devront être étudiées.
- **Besoin d'identifier les besoins communs entre missions,** beaucoup de prétraitements s'appuient sur les mêmes méthodologies, pour la création éventuelle de pôles de compétences spécifiques dans le traitement des données et pour diffuser les méthodes employées

pour la manipulation des grands jeux de données afin d'éviter de refaire ce que d'autres ont déjà fait.

Il faut noter que pour les domaines qui s'ouvrent (ondes gravitationnelles par exemple), l'expérience en matière d'analyse des données est limitée, les prédictions des modèles très incertaines et une flexibilité importante est indispensable.

Il apparaît des convergences entre les besoins des sciences de l'univers et l'observation de la Terre notamment autour des liens données/calcul, de l'intelligence artificielle et des simulations *end-to-end*.

2.4. RÔLE DU CNES

Le rôle du CNES est déjà très important, tant pour la prise en compte des données de ses missions que pour le soutien qu'il a apporté et qu'il apporte à la mise en place des centres et des pôles de données et de services des domaines observation de la Terre et sciences de l'univers. Il a par exemple été à l'origine des réflexions et a contribué fortement à la mise en place des centres d'expertises puis des pôles de données et de services en observation de la Terre. Il doit intégrer encore plus dans ses activités l'existence d'autres données spatiales, sol et in situ, qui sont nécessaires aux problématiques de recherche, à la pleine valorisation des données spatiales et aux enjeux liés aux multi-usages par les communautés scientifiques. Il y a beaucoup de partenaires impliqués au niveau national, européen et international, en plus de l'INSU qui doit rester un partenaire privilégié.

Dans la définition des missions, la phase d'exploitation mais également d'archivage doit être mieux intégrée dès les phases initiales d'un projet ou d'une mission. En effet, l'exploitation de données repose sur une interaction forte entre le CNES et les laboratoires. Dans ce cas, l'exploitation ne peut être totalement déléguée à d'autres opérateurs. Dans le cas d'une délégation de cette mission à d'autres opérateurs, le CNES devra de toute façon s'assurer régulièrement que l'exploitation se déroule conformément à ce qui est planifié.

Plus généralement, avec une tendance forte vers la politique de données accessibles et gratuites, la donnée de base perd de sa valeur et celle-ci est remplacée par la valeur ajoutée liée à l'exploitation de la donnée et les services qui en découlent. Comment intégrer cela dans la stratégie du CNES en termes d'exploitation et de valorisation ? Il serait naturel que le CNES se pose la question de son positionnement en tant que coordinateur dans la chaîne de production de l'information dans la mesure où ses compétences système associées à celles des laboratoires lui permettraient d'être acteur de la production de données à très haute valeur ajoutée.

3. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

Sur les bases des éléments précédents et des travaux menés par le groupe de travail, des recommandations sont proposées selon quatre axes principaux, qui sont détaillés dans les sections ci-dessous.

3.1. PLACER LES DONNÉES AU CENTRE DE LA STRATÉGIE ET DES PROGRAMMES

La réflexion sur les données est à mener dans le cadre des futures missions, notamment celles qui pourraient être identifiées par les groupes TOSCA et CERES, complétée d'un cadre plus large incluant également les missions actuellement exploitées par le CNES ainsi que les données prises en compte dans d'autres cadres, par exemple par l'ESA, par des centres de données et de services ou des pôles de données et de services au sein de l'infrastructure de recherche Data Terra.

Les données anciennes seront également prises en compte. Elles peuvent être précieuses, en particulier pour les longues séries temporelles et les études de variabilité. Ce point est reconnu depuis longtemps en sciences de l'univers, et de plus en plus dans le domaine observation de la Terre. La réflexion sera donc également étendue aux jeux de données historiques du CNES (**Spot Heritage**, filière **Topex-Jason...**) en particulier lors de la conduite de campagnes de retraitement de séries temporelles longues.

L'exercice de spécification des données – notamment pour la préparation de nouvelles missions – nécessite la prise en compte des besoins formulés par les utilisateurs cibles dès lors que l'on entend proposer des produits adaptés à ces besoins. Sans aller jusqu'à un exercice formel de « *user requirements* » continu comme dans le cas du programme Copernicus, des procédures de collectes de spécifications sont certainement à définir.

Les utilisateurs utilisent de plus en plus des données traitées, en particulier lorsqu'ils ne sont pas spécialistes de l'instrument utilisé, un cas appelé à se développer dans le contexte science ouverte. Cependant, certains ont besoin de partir des données brutes. En fonction des catégories d'utilisateurs, les spécifications pourront porter sur les niveaux de traitements mais aussi le délai de traitement après acquisition (pour des besoins quasi temps réel par exemple) ou toute autre caractéristique.

Tout en restant dans le cadre de ses missions, le CNES pourra alors dans une approche système définir les caractéristiques de la mission (instruments, schéma d'opérations en vol, segment sol, délai et niveau de traitement...) prenant en compte les besoins des utilisateurs cibles.

La qualité des données et de leur traitement sont aussi des éléments essentiels. Les questions liées aux activités de Cal/Val, de définition des métriques et d'algorithmie seront donc à traiter mission par mission mais également dans un cadre plus global afin d'atteindre un niveau de qualité homogène.

Si la tendance d'ouverture des données et les règles héritées des initiatives telles que l'open science semblent clairement s'imposer dans le paysage, il n'en demeure pas moins qu'une politique unique des données et d'accès aux supports semble impossible à mettre en place du fait de l'hétérogénéité des jeux de données considérés. Dans certains cas, une politique similaire à la *Free, Full & Open Data Policy* de Copernicus semble possible et préférable alors que pour d'autres jeux de données, des contraintes de licence restent valides. Les conditions d'accès et d'utilisation des données mais aussi des infrastructures et accompagnements en support sont à aborder dans le cadre des politiques d'accès aux données et aux services en support. Les principes devront être conformes à la réglementation en vigueur et cohérent avec ce qui se fait « autour du CNES ».

S'il paraît à ce stade difficile de définir clairement ces politiques qui ne seront peut-être pas identiques d'une mission à l'autre, il pourrait être utile de définir leur périmètre et les principes qui doivent sous-tendre la définition des politiques. Périmètre et principes pourraient être communs à l'ensemble des missions couvertes par cette prospective ce qui offrirait aux utilisateurs une meilleure lisibilité et compréhension des conditions. Si toutes les données n'auront pas la même politique d'accès (il en va de même pour les structures en support), elles devront partager une même procédure de définition de la politique et les mêmes critères. Les types d'utilisateurs cibles pourront notamment être pris en considération. Enfin, dans le cadre de plateformes multi-missions intégrant/partagées avec des missions de tiers, l'application et/ou l'adaptation des licences respectives est à considérer, en fonction éventuellement des catégories d'utilisateurs.

Il est primordial pour un utilisateur quel qu'il soit de compter sur un accès au sens large à des données. La mise à disposition et la pérennité sont donc à préciser pour la donnée, ainsi que celles des supports et des politiques de données liées.

PLACER LES DONNÉES AU CENTRE

Evoluer de l'approche centrée sur l'ensemble satellite-capteurs-technologies vers une logique intégrant les données et leurs usages dès le début des projets

R1. Recenser les missions à inclure dans le périmètre des bases de données mises à disposition.

Le recensement éclairera le plus largement possible les caractéristiques des missions, leur catalogue de données associé et les communautés d'utilisateurs cibles.

R2. Identifier et prendre en compte les besoins des utilisateurs scientifiques dès le démarrage des projets.

Ces besoins pourront être pris en compte pour définir les données et produits ainsi que les caractéristiques des futures missions.

R3. Prendre en compte le segment sol et les supports à mettre en place sur le long terme au CNES et chez les partenaires, en termes d'infrastructures et d'expertise, dès les phases initiales des projets.

R4. Définir des politiques d'accès aux données contextualisées et aux algorithmes et des critères pour définir ces politiques suivant les différents types de données et d'utilisateurs.

Une procédure et des critères communs à tous les jeux de données et toutes les missions seront décrits afin de définir précisément la politique d'accès aux données et aux supports qui s'appliquera aux différentes catégories d'utilisateurs cibles.

R5. Structurer le cadre de préservation à long terme en tenant compte des différentes parties prenantes et prendre les décisions au cas par cas.

Il conviendra de structurer le cadre de décision de préservation long terme et de prise en charge technique. La réflexion est à mener au cas par cas sur les données à conserver, y compris après la fin de la mission, et dans quelles conditions les conserver (rôle du CNES, de l'ESA, des autres parties prenantes – cf. le Centre de Données astronomiques de Strasbourg pour la dissémination FAIR des données CoRoT, IR Data Terra).

R6. Reconnaître, valoriser et structurer les compétences et les fonctions des personnels impliqués dans les activités liées à la gestion et la mise à disposition des données y compris l'expertise thématique.

Cela concerne des profils variés incluant les compétences en informatique, en algorithmique et en « data stewardship », y compris pour les chercheurs.

3.2. VISION NATIONALE ET EUROPÉENNE AUTOUR DES MOYENS

Les besoins en calcul pour le traitement des données mais aussi pour le stockage et l'archivage augmentent de façon continue. Cela n'est pas seulement lié à l'augmentation du volume des données, mais aussi, par exemple, au fait que dans certains cas le traitement demande des simulations massives, ou qu'il faut périodiquement ré-analyser les données. Dans le même ordre d'idées, les modèles de prévision à court terme nécessitent des calculs haute performance et une dissémination des résultats en temps réel ou semi-réel.

Le stockage des données et un accès rapide à celles-ci constituent également un défi important. Dans certains cas, l'importance des données (en volume, en valeur et en vitesse de traitement attendu) et le type d'analyse à réaliser suggère de co-localiser calcul et stockage des données. L'exercice InfraNum du MESRI qui vise à rationaliser les moyens informatiques du ministère propose de répondre à ce défi avec la mise en place de *datacenters* nationaux et régionaux labellisés. Par ailleurs, l'expertise sur les données est essentielle, mais ne doit pas nécessairement être localisée au même endroit que les moyens de calcul haute performance et de stockage. Les évolutions possibles doivent être discutées au cas par cas. Une interface avec les scientifiques est à mettre en place, la valeur ajoutée du CNES étant justement de savoir faire le lien entre différentes communautés. Les pôles de données pourraient avoir un rôle en apportant un support sur les nouvelles compétences nécessaires.

Toujours au niveau national, le rôle possible de la TGIR GENCI, et l'organisation spécifique à mettre en œuvre pour qu'elle puisse jouer ce rôle, en associant en particulier le CC-IN2P3 et le CINES, est à prendre en compte dans cette démarche de mutualisation. Les initiatives à venir devront être aussi coordonnées avec celles qui émergent au niveau européen et international. Des initiatives majeures (EuroHPC, EOSC...) doivent être intégrées dans cette réflexion globale.

L'extraction d'information peut faire appel aux technologies émergentes de l'intelligence artificielle (déjà prises en compte côté ESA avec le projet AI4EO et côté français avec le projet PIE AI4GEO qui implique acteurs publics et privés). A ce stade, il apparaît un besoin de collaborations avec des spécialistes acceptant de travailler sur des cas concrets. Cette nécessaire inflexion sera possible à la condition de déployer un cadre favorable : prise en compte de ces travaux dans le cadre des projets ; R&D préparatoire avec appel d'offre ; partage cross-disciplinaire d'expérience et de connaissances ; liens à créer avec les communautés de l'IA et les Ins-

tituts interdisciplinaires d'intelligence artificielle (3IA) notamment ; ...

Dans le contexte de la science ouverte, la FAIRisation des données est un enjeu majeur pour l'ensemble des champs scientifiques. Dans le domaine des sciences de l'univers, l'International Virtual Observatory Alliance définit les standards d'interopérabilité des données astronomiques, qui sont utilisés par les archives des télescopes sol et spatiaux. Certains de ces standards sont réutilisés dans le domaine de la planétologie, qui s'est organisé avec la mise en place de l'International Planetary Data Alliance, tout comme, tout récemment, le domaine de la physique héliosphérique avec l'International Heliophysics Data Environment Alliance. En observation de la Terre, les efforts doivent être poursuivis pour compléter les initiatives existantes pour assurer la « FAIRisation » des données au niveau nécessaire pour les besoins des communautés scientifiques.

INSCRIRE LE CNES DANS L'ÉCOSYSTÈME NATIONAL ET EUROPÉEN AUTOUR DES MOYENS DE TRAITEMENT ET DE STOCKAGE

Evoluer d'une logique de moyens spécifiques au spatial vers une approche partagée avec nos partenaires et les communautés utilisatrices

R7. Estimer les besoins à cinq ans en calcul/stockage/ qualité de service, comme base pour l'identification des acteurs et des mesures à mettre en place.

Cette action sera menée en inscrivant le CNES dans la mutualisation des moyens au niveau national, vers une stratégie de plateforme de services distribués incluant le rapprochement des données et des traitements.

R8. Apporter un soutien aux discussions internationales sur les cadres disciplinaires d'interopérabilité pour mettre en œuvre la « FAIRisation » des données.

La mise en place d'un cadre international de partage des données au niveau disciplinaire est le point de départ essentiel de la « FAIRisation » des données. Le CNES doit continuer à soutenir ces initiatives (GEO, CEOS, IVOA, IPDA, etc.).

R9. Créer des liens avec l'écosystème de l'intelligence artificielle.

3.3. RENFORCER LA STRATÉGIE AUTOUR DES PÔLES DE DONNÉES

Bien connaître ses utilisateurs cibles est primordial pour optimiser l'utilisation des missions et des données associées et pour bien répondre à leurs besoins. C'est pourquoi un travail de cartographie précis de ces utilisateurs est à réaliser. Dans le même temps, il convient de répertorier les données validées et disponibles. Toute cette démarche pourra bénéficier de l'expérience et du cadre des pôles de données dont la stratégie pourra être renforcée si nécessaire.

Pour chaque mission, à tout le moins pour les grands thèmes (océan, Terre solide, ...), il sera utile de disposer d'une taxonomie des grandes catégories d'utilisateurs. Les utilisateurs cibles devront notamment être identifiés dans la mesure où ils pourront être associés dans les activités liées à la définition des jeux de données et des catalogues.

La réflexion est sans doute à mener dans le cadre d'un accès et d'une utilisation des données par des scientifiques d'une part, et d'autre part, et dans un autre contexte, par des acteurs non scientifiques, issus par exemple du secteur privé des services avuls. Sur le cas des scientifiques, en sciences de l'univers comme en observation de la Terre, il convient de faire une distinction entre les utilisateurs experts du domaine et les autres qui auront besoin de supports supplémentaires pour utiliser les données spatiales.

RENFORCER LA STRATÉGIE AUTOUR DES PÔLES DE DONNÉES DANS UN CONTEXTE EUROPÉEN

Mieux structurer l'accès aux données et aux services

R10. Mettre en place un catalogue de référence des données et des services, incluant le support des spécialistes du domaine (thématique et traitement dont IA), en clarifiant la localisation des données, qui peuvent se trouver au CNES ou dans des centres de données extérieurs, et la politique d'accès aux données et services, définie selon la recommandation R4.

Dans certains cas, les données sont dupliquées et accessibles à partir de plusieurs services. Dans d'autres, les utilisateurs pensent que deux services fournissent les mêmes données alors que cela n'est pas le cas. Il est important de fournir un catalogue de référence répertoriant l'ensemble des données avec les informations nécessaires pour optimiser la réutilisation des données et donnant des liens vers celles-ci.

R11. En concertation avec le CNRS-INSU, définir les dispositifs (pôles de données et services ou autres) à mettre en place, en précisant leur périmètre, dans le

domaine des sciences de l'univers et ceux à renforcer dans le domaine de l'observation de la Terre.

Cette concertation doit prendre en compte l'IR CDS, les ANO AA et les résultats du projet EUROPLANET. Pour structurer le dispositif, il faut clarifier la localisation des données et des services (par ex. les données des Key Programmes d'Herschel qui sont dispersées dans plusieurs SNO AA doivent être recensées).

3.4. PARTAGER LES BONNES PRATIQUES

Les données sont un élément essentiel de l'impact des projets et de la science ouverte. L'un des trois axes du Plan National pour la Science Ouverte publié par le MESRI en juillet 2018 consiste à structurer et ouvrir les données de la recherche :

« Notre ambition est de faire en sorte que les données produites par la recherche publique française soient progressivement structurées en conformité avec les principes FAIR (Facile à trouver, Accessible, Interopérable, Réutilisable), préservées et, quand cela est possible, ouvertes. »

Cette importance doit être reconnue par toutes les parties prenantes des projets CNES, et les mesures nécessaires mises en œuvre et valorisées, à la fois pour les données existantes et pour celles des nouvelles missions. Plus généralement, toutes les données disponibles devront être mises à disposition le plus largement possible.

Au-delà du type d'observation, se pose la question du niveau de traitement qui reste à définir en fonction des catégories d'utilisateurs cibles. Faut-il aller jusqu'au niveau 1, 2, ou supérieurs ? Ce point devra être tranché pour les différentes missions comme expliqué dans les sections ci-dessus.

Les efforts pour mieux appréhender voire maîtriser les nouvelles technologies (calcul haute performance, big data, IA, modélisation orientée données...) pourront être concertés voire mutualisés en se rapprochant des communautés spécialistes de ces sujets. Il serait intéressant de mettre en place des ateliers spécifiques, des formations dédiées (in situ ou à distance avec des MOOCS ou des SPOCs) ou des universités d'été.

Par ailleurs, la certification des entrepôts de données devient un élément essentiel de l'écosystème mis en place en support à la science ouverte. C'est par exemple l'une des recommandations prioritaires du rapport final et du plan d'action produits en 2018 par le groupe d'experts sur les données FAIR de la Commission Européenne :

« *Data services must be encouraged and supported to obtain certification, as frameworks to assess FAIR services emerge. Existing community-endorsed methods to assess data services, in particular CoreTrustSeal (CTS) for trusted digital repositories, should be used as a starting point to develop assessment frameworks for FAIR services. Repositories that steward data for a substantial period of time should be encouraged and supported to achieve CTS certification.* »

Le plan national pour la science ouverte inclut également « engager un processus de certification des infrastructures de données ». CoreTrustSeal constitue un premier niveau de certification international, interdisciplinaire et reconnu.

PARTAGER LES BONNES PRATIQUES

Maximiser l'utilisation des données avec des méthodes à l'état de l'art

R12. Rendre accessibles les données que le CNES conserve ainsi que celles de ses partenaires en les proposant avec un identifiant et des niveaux de traitement adaptés aux utilisateurs cibles et en assurant l'interopérabilité.

*La mise à disposition des données **Pléiades** à l'arrêt du programme doit être anticipée, en impliquant le TOSCA pour l'expression des besoins scientifiques.*

R13. Intégrer aux projets un plan de gestion et préservation des données.

La production et la mise en œuvre d'un plan de gestion des données, initié dès le début du projet, doivent être rendues obligatoire. Les projets doivent prévoir et recevoir le financement correspondant.

R14. Inciter les centres de données et de services à candidater à la certification CoreTrustSeal, le cadre de certification du CNES étant par ailleurs à définir parmi les standards CoreTrustSeal ou CEOS et LTDP.

R15. Déployer des efforts mutualisés autour des outils mathématiques (traitements spécifiques, IA, ...) et de la formation.

GROUPE DE TRAVAIL STRATEGIE SPATIALE POUR LA SCIENCE

Jean-Loup Puget, Gilles Bergametti, Jean-Claude Souyris, Olivier La Marle, Christian Sirmain, Jean-Marie Hameury, Jean-Louis Monin, Cyril Crevoisier, Juliette Lambin, Martin Giard, Pierre Kern

Ce texte résulte des discussions menées au sein du groupe stratégie pour la science, au sein des groupes de travail thématiques et transverses et des échanges qui ont eu lieu lors des ateliers préparatoires au Séminaire de Prospective. Il a aussi pris en considération les conclusions des auditions des laboratoires spatiaux. Il adresse les recommandations sur la stratégie du CNES pour la science en essayant de prendre notamment en compte le contexte et les évolutions attendues dans le domaine spatial à moyen et long termes.

1. UN CONTEXTE EN ÉVOLUTION RAPIDE

Le spatial au service de la science s'est depuis toujours attaché à satisfaire une soif naturelle de connaissances du monde perceptible, toujours plus vaste. Cette science a trait pour beaucoup à la compréhension du fonctionnement du système Terre avec ses nombreuses implications sociétales (climat, biodiversité, pollution, risques naturels) mais elle nous interpelle aussi fortement avec des questions fondamentales et philosophiques ayant rapport à nos origines (formation de la Terre et du système solaire, apparition de la vie, origine de l'univers, lois de la physique...). Les observations depuis l'espace, que ce soit pour l'astronomie ou pour la Terre ont été reconnues très tôt comme des apports indispensables aux progrès de la connaissance, notamment pour le nouveau point de vue qu'elles offraient et par l'accès à des observables auparavant inaccessibles. On pourrait faire une liste interminable de ces apports du spatial à l'accroissement des connaissances. On se contentera ici d'en citer quelques-uns, récents, emblématiques et surtout porteurs de leçons pour l'avenir, objet de ce travail.

La mission **Planck** a mesuré les anisotropies du fond cosmologique micro-onde. Ces mesures sont essentielles car ces anisotropies reflètent les fluctuations quantiques de la densité d'énergie dans l'univers primordial qui ont donné naissance à toutes les structures qui peuplent l'univers aujourd'hui (les galaxies et leur distribution dans la toile d'araignée cosmique). **Planck** a permis de vérifier les prédictions génériques du modèle standard de la cosmologie et du paradigme de la

phase d'inflation qui accélère l'expansion primordiale de l'univers. La fin de l'inflation coïncide avec la création de la radiation et de la matière à partir de l'énergie du champ inflationnaire, et donne une origine physique au « Big Bang ». La plupart des prédictions génériques de l'inflation ont été vérifiées par les données de la mission **Planck**. Il est intéressant de noter la coïncidence des prédictions de l'inflation avec celle du boson de Brout-Englert-Higgs. Ce boson est de même nature que le champ inflationnaire nécessaire au Big Bang.

Il faut noter que cette mission européenne est venue après un siècle durant lequel toutes les expériences clé de la cosmologie ont été américaines et que c'est finalement grâce à une technologie originale de réfrigérateur à dilution spatialisable provenant d'un laboratoire de physique qu'elle a pu être réalisée. Il y a là une première leçon à retenir pour l'avenir sur les technologies générées hors des laboratoires spatiaux. Il faut organiser une veille technologique très ouverte.

L'arrivée de la sonde **Rosetta** de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) près de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko a également été une première majeure dans le domaine de l'exploration spatiale. Notamment, l'atterrissage du module **Philae** sur la comète a été un tour de force technologique des équipes de l'ESA en ouvrant la voie aux retours d'échantillons de petits corps du système solaire. Cette mission était risquée (elle a été choisie en 1983 dans le cadre du programme Horizon 2000 !). Les résultats scientifiques qui découlent d'une telle mission sont multiples. On peut citer à titre d'exemple l'anomalie isotopique du xénon de l'atmosphère terrestre (le U-Xénon), au regard de celle de la comète suggérant que la composition de l'atmosphère terrestre primitive était à 20 % cométaire et 80 % chondritique et donc que les comètes du même type

n'auraient que faiblement contribué à la formation de la Terre. Il faut faire une certaine proportion de missions risquées !

Enfin les cinq dernières années ont aussi vu l'apparition d'un nouveau porteur d'information prédit par la relativité générale mais jamais observé auparavant : les ondes gravitationnelles. La détection de ces ondes a été faite par les détecteurs au sol LIGO¹ (USA), mais l'étape suivante en termes de détecteurs d'ondes gravitationnelles sera réalisée dans l'espace avec la mission européenne **Lisa**². En 2017, les observations spectaculaires de l'onde gravitationnelle engendrée par la fusion de deux étoiles à neutrons en un trou noir par LIGO et VIRGO³ a provoqué un sursaut de rayonnement gamma puis de rayons X détecté par des détecteurs spatiaux. Ces rayonnements sont venus une seconde et demi après la fin de l'onde gravitationnelle qui marque la formation du trou noir. Les ondes gravitationnelles sont sorties au travers de la matière ultra dense qui entourait encore le trou noir alors que les rayons X et gamma ont été libérés dans l'éjection d'une partie de la matière, phénomène connu sous le nom de « kilo nova ». La mission **Lisa** qui était proposée dans *Cosmic Vision* en 2005 sera lancée vers 2030 mais on sait aujourd'hui avec ces observations qu'elle ouvrira la voie à une nouvelle astronomie.

L'appropriation par la communauté scientifique française de l'outil spatial est révélatrice d'une ambition qui vise à comprendre le monde qui nous entoure dans sa globalité. Aussi est-il logique que ces grands enjeux scientifiques soient largement mondialisés et que les priorités de la recherche française intègrent fortement cette dimension de coopération internationale. Ainsi, l'implication conjointe de la communauté française et du CNES avec la NASA dans la conception et la réalisation des filières **Topex-Poseidon**⁴ puis **Jason**⁵ a conduit à l'acquisition de données altimétriques très précises qui ont permis notamment de démontrer la non-linéarité de l'augmentation du niveau de la mer au cours du temps et en particulier son accélération significative entre 1993 et 2017. Dans la continuité de cette filière, la mission **Swot**⁶ aura la capacité, grâce à un radar interférométrique à large fauchée, de mesurer le niveau des eaux continentales (lacs et grands fleuves).

La recherche spatiale est également un générateur d'informations exceptionnelles pour répondre aux besoins de la société dans des domaines aussi variés que la météorologie, la topographie, l'agriculture, la prévision et la gestion des risques... Récemment, l'instrument **lasi**⁷ développé par le CNES en collaboration avec EUMETSAT⁸ dans le cadre des missions météorologiques opérationnelles **Metop**⁹ a permis, une fois ses données assimilées dans les modèles, de significativement améliorer la prévision météorologique. Mais le même instrument a aussi permis de documenter

de façon unique la composition de l'atmosphère et de cartographier pour la première fois les principales sources d'ammoniac, toutes reliées à des activités anthropiques, majoritairement à la production de fertilisants et à l'agriculture intensive, soulignant à nouveau, si besoin était, que mission opérationnelle et résultats scientifiques majeurs ne sont pas incompatibles.

Mais, au-delà de satisfaire notre soif de connaissances et de contribuer à répondre à des enjeux sociétaux, la science spatiale est aussi, pour les pays en ayant la capacité, une vitrine politique et une façon de démontrer leur savoir-faire technologique de haut niveau. Il suffit de voir comment aujourd'hui des pays comme la Chine ou les Etats-Unis utilisent l'exploration spatiale comme un outil de démonstration de leur puissance respective.

¹ Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

² Laser Interferometer Space Antenna, mission visant à constituer un gigantesque interféromètre optique à partir de 3 satellites disposés selon un triangle équilatéral de 2,5 millions de kilomètres de côté

³ Interféromètre de Michelson européen isolé des perturbations extérieures (miroirs et instrumentation suspendus, faisceaux laser sous vide) et dont chacun des bras mesure trois kilomètres de long

⁴ Satellite permettant de réaliser des mesures altimétriques radar développé conjointement par la NASA et le CNES et lancé en 1992

⁵ Jason/Ocean Surface Topography Mission ou OSTM pour la NASA

⁶ Surface Water and Ocean Topography, mission en collaboration NASA-CNES

⁷ Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge

⁸ Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques

⁹ Metop est constituée d'une série de trois satellites en orbite polaire dont l'objectif principal est de fournir des observations essentielles à la prévision météorologique

1.1. DE NOUVEAUX ACTEURS

Le domaine du spatial, depuis son émergence il y a plus d'un demi-siècle, a toujours été caractérisé par une forte dynamique d'évolution portée notamment par des innovations techniques continues, financées jusqu'à présent exclusivement par les pouvoirs publics. Le CNES, une des premières agences spatiales créées, a clairement joué un rôle majeur dans l'histoire du spatial.

Ces réussites, nombreuses et répétées, ont aussi établi le niveau de qualité technique et de fiabilité des lanceurs et des systèmes orbitaux (notamment ceux du CNES) et des champs d'application toujours plus larges se sont ouverts pour les technologies spatiales. Des acteurs privés se sont donc progressivement positionnés au cours des dernières années sur des domaines jugés potentiellement économiquement rentables à court ou moyen termes avec comme ambition principale de fournir des offres de lanceurs, de systèmes orbitaux ou de services découlant d'observations spatiales au meilleur

coût. Même si les annonces concernant la réduction du coût des lancements et des infrastructures spatiales qui pourraient résulter de l'action de ces compagnies peuvent apparaître aujourd'hui encore comme très optimistes, elles ouvrent néanmoins le monde du spatial à de nouveaux acteurs, y compris institutionnels, notamment dans des pays de plus petite taille que ceux qui le dominaient jusqu'à présent. Bien évidemment, ces évolutions majeures impactent en retour de façon significative le positionnement des acteurs historiques du spatial.

1.2. UN CHANGEMENT DE DIMENSION DANS LE MONDE DES DONNÉES

Parallèlement à ces évolutions d'acteurs, le domaine du spatial est confronté à une évolution encore plus rapide que celle précédemment mentionnée pour les infrastructures spatiales : celle qui concerne le domaine des données. En effet, les ambitions scientifiques, les progrès des instruments d'observation et les besoins sociétaux ont conduit (et vont conduire encore plus dans les prochaines années) à une explosion du volume d'observations avec de nouveaux paramètres mesurés et des capteurs dotés de canaux de détection bien plus nombreux et mieux résolus.

De plus, les exigences de la recherche scientifique spatiale induisent également une complexité accrue du traitement des observations : les méthodes d'extraction statistique des signaux pertinents et de post-traitement adaptés à ce nouveau type de données nécessitent, dans de nombreux cas, de faire appel à des procédures itératives qui deviennent rapidement très lourdes en besoin de calcul et requièrent des capacités de transmission de données importantes dès lors que le nombre d'observations acquises s'accroît fortement.

Le nouveau porteur d'information que sont les ondes gravitationnelles (une dizaine d'événements à mi 2019) permet d'illustrer immédiatement ce problème. L'univers étant extrêmement transparent pour ces ondes, il y a un fond stochastique d'ondes gravitationnelles primordiales remontant d'une part à la phase d'inflation et d'autre part jusqu'à la formation des premiers objets et donc de paires liées gravitationnellement dans l'univers. L'étude détaillée de ce fond demandera de reprendre et de corrélérer l'ensemble des données issues des divers détecteurs.

Par ailleurs, la mise à disposition en libre accès des données spatiales institutionnelles (« open science ») fait, notamment dans le domaine de l'observation de la Terre, que la donnée de base perd beaucoup de sa valeur, celle-ci se trouvant de plus en plus transférée

dans l'information géophysique au sens large, c'est-à-dire dans la valeur ajoutée liée à l'exploitation scientifique de la donnée d'observation. La production de cette information pertinente nécessite de plus en plus d'hybridation de données provenant de différentes sources, c'est à dire à la fois de différents capteurs spatiaux mais également de données in situ, d'outils de modélisation, et ceci au moyen d'algorithmes originaux aussi bien pour répondre aux questions scientifiques qu'aux besoins sociétaux. L'arrivée dans le domaine spatial d'acteurs privés spécialistes du big data (en particulier les GAFA) dans des secteurs jusqu'à présent réservés à la recherche scientifique fondamentale ou applicative est inévitable et doit faire partie intégrante de toute réflexion stratégique. Ces évolutions impliqueront nécessairement de repenser la stratégie et le positionnement du CNES et de ses partenaires (universités, grands organismes de recherche, centre nationaux de calcul, agences de moyens publiques) en termes de bases de données et de politique de valorisation des données produites.

1.3. L'INNOVATION : UN ATOUT A PRÉSERVER

La science a toujours été un des moteurs de l'innovation technologique et instrumentale dans le domaine spatial. Les questions scientifiques qui émergent challengent en effet souvent nos possibilités techniques en faisant appel à de nouvelles données observables ou en nécessitant des améliorations de précision ou de résolution accessibles seulement au travers de concepts instrumentaux totalement nouveaux. A titre d'exemple, la plupart des grandes questions scientifiques, notamment dans le domaine des sciences de l'univers, nécessitent des détecteurs de plus en plus sensibles impliquant, pour certains, de les refroidir à des températures inférieures à 1 K.

Par ailleurs, certains besoins d'observations pérennes, notamment ceux requis pour caractériser l'évolution du climat et de l'environnement ou remplir certains des Objectifs de Développement Durable (ODD) affichés par l'ONU pour 2030 sont, aujourd'hui, largement repris par l'Europe au travers de programmes ESA, EU-METSAT ou plus récemment Copernicus¹⁰. Ceci devrait offrir la possibilité de concentrer encore davantage l'action du CNES sur la préparation du futur, élément stratégique essentiel dès lors que les développements réalisés en recherche et technologie ne débouchent souvent sur la réalisation d'une mission qu'une décennie plus tard.

¹⁰ Programme européen de surveillance de la Terre dont l'objectif est de doter l'Europe d'une capacité opérationnelle et autonome d'observation de la Terre.

On pourrait voir un risque pour le CNES dans ces évolutions rapides et, en particulier, pour la place de la Science au CNES. Mais ces évolutions peuvent aussi être une opportunité si l'on sait tirer profit des atouts que représentent l'expérience et l'excellence française acquises dans ce domaine : la combinaison des savoir-faire complémentaires du CNES et des laboratoires scientifiques est probablement unique et doit permettre de continuer à développer des produits à très haute valeur ajoutée, qu'il s'agisse d'instruments, de concepts de mission ou de données.

2. LES TECHNOLOGIES CRITIQUES DU FUTUR

Il faut renforcer les programmes de R&T sélectionnés par les réponses à AO en les complétant par l'identification des besoins potentiels à long terme fait par une structure de veille science/technologie associant les comités scientifiques CNRS-CERES-TOSCA et un groupe ad-hoc du CNES. Dans ce contexte, il est évidemment essentiel de veiller à maintenir sur le long terme un bon équilibre entre d'une part les filières d'observations dans lesquelles le CNES est fortement engagé qui sont les missions assurant la continuité d'une mesure pour des études d'évolutions mais reposant sur un progrès uniquement incrémental, et d'autre part l'implication dans des filières technologiques nouvelles conduisant à la mise en œuvre d'instrumentations réellement innovantes.

2.1. QUELS CHOIX TECHNOLOGIQUES POUR LES MISSIONS DE DEMAIN

L'innovation en R&T instrumentale se fait aujourd'hui par un appel d'offre suivi d'une sélection. Ce mécanisme partant de la base des chercheurs est efficace en particulier pour les R&T nécessaires pour des missions en phase O ou A. Ce mécanisme, indispensable doit évidemment être préservé. Mais, en complément, les stratégies de long terme concernant des filières technologiques d'excellence à maintenir et/ou à développer sans avoir obligatoirement de mission programmée et en vue dans le paysage immédiat doivent être renforcées. Les développements de R&T instrumentale émergent dans les équipes instrumentales des laboratoires spatiaux mais souvent associées à des laboratoires de physique, chimie, ingénierie qui, s'ils ne sont pas soutenus de façon continue pendant un temps assez long peuvent perdre leur intérêt.

Quelques filières d'excellence technologiques ou au contraire des technologies susceptibles d'être nécessaires à long terme et pouvant relever d'un tel mécanisme peuvent être identifiées dans les réponses de la communauté et dans les rapports des groupes de travail.

Les accéléromètres basés sur l'interférométrie atomique sont une technologie avancée pouvant servir les communautés de physique fondamentale et de sciences de la Terre (géoïde). De même et comme mentionné précédemment, l'altimétrie satellitaire, notamment dans sa version interférométrique, est une des filières françaises d'excellence qui demande à être maintenue. Les lidars ont fait l'objet de développements continus dans des laboratoires français et ces techniques actives seront certainement très utilisées dans l'avenir, notamment par les filières de satellites d'observation de la Terre. Le problème est ainsi une question de partage de savoir-faire entre les laboratoires, le CNES et l'industrie.

Les détecteurs infrarouges, au regard de leurs applications nombreuses (civiles aussi bien que militaires) constituent un enjeu stratégique. Les USA sont très souvent en avance sur l'Europe et le reste du monde et dominant le marché, notamment pour les détecteurs à bas flux et à bas bruit. Au regard des investissements requis et des retours possibles, les industriels européens sont aujourd'hui réticents à s'engager dans les développements nécessaires, au point même de ne pas répondre parfois aux appels d'offre. Une politique publique, sans doute européenne, inscrite sur du long terme serait probablement de nature à générer des conditions plus favorables à leur engagement.

La cryogénie spatiale est aussi une spécialité où la France a beaucoup d'atouts aussi bien dans l'industrie que dans les laboratoires de recherche. Elle devrait faire l'objet d'une analyse et d'une programmation des besoins à long terme.

Pour certains besoins scientifiques bien identifiés, il apparaît que des missions multi-satellites constituées de nanosatellites de coût individuel raisonnable sont une option intéressante. Cela va nécessiter de travailler activement sur les technologies de communications entre satellites d'un essaim ou entre ceux-ci et un satellite mère.

Enfin, les missions interplanétaires vont exiger une autonomie encore plus importante, bien au-delà de ce qui existe aujourd'hui. Il faut garder à l'esprit que les progrès qui devront être réalisés en robotique et en informatique embarquée auront des retombées industrielles et sociétales importantes. Il faut aussi noter que ces missions, comme celles impliquant des rovers

martiens qui adressent, entre autres, la question fondamentale de l'exobiologie, ont un impact sur le grand public souvent comparable à celui des vols habités. Des missions comme **Curiosity**¹¹ ou **Rosetta**¹² l'ont très bien démontré.

Ces exemples, bien évidemment non exhaustifs des besoins, permettent d'illustrer l'équilibre qui devra être trouvé entre les différents types d'actions de R&T dans les années à venir.

Les recommandations qui suivent proposent, quant à elles, une réflexion sur de nouveaux outils institutionnels pouvant améliorer les actions de R&T pilotées par le CNES dans un cadre pluri-organismes et dans une prospective à long terme.

¹¹ Curiosity est un rover qui a atterri sur Mars en 2012 dans le cadre de la mission NASA Mars Sample Laboratory (MSL) dans laquelle le CNES et la communauté française sont très impliqués

¹² Sonde européenne qui a orbité autour de la comète Churyumov-Gerasimenko afin de l'analyser, mais aussi larguer à sa surface un atterrisseur (Philae) chargé d'étudier la composition de son sol

2.2. RENFORCER LES CAPACITÉS INDUSTRIELLES EN INNOVATION DE TECHNOLOGIES POUR L'INSTRUMENTATION SPATIALE EN LIAISON AVEC LES ORGANISMES DE RECHERCHE PUBLICS

Pour des raisons d'indépendance et de compétitivité des industriels européens, il est également essentiel de soutenir la R&T industrielle concernant les composants stratégiques même si des technologies existent ailleurs. Ceci permet de s'affranchir d'éventuelles contraintes du type IEOGAR (International Traffic in Arms Regulations) et de se prémunir contre d'éventuelles surcoûts et allongements des délais de livraison de composants étrangers. Le CNES est impliqué dans divers programmes, notamment européens, ayant cette finalité.

2.3. RENFORCER NOS CAPACITÉS EN MATIÈRE D'INNOVATION INSTRUMENTALE DANS LES LABORATOIRES

Le développement d'une instrumentation très nouvelle, en sciences de l'univers et en sciences de la Terre requiert bien évidemment des compétences de haut niveau, souvent très spécifiques. L'absence depuis plusieurs années de tout programme multi-orga-

nismes d'envergure significative visant à supporter de l'innovation instrumentale dédiée aux sciences de la Terre et de l'univers n'a pas aidé à l'émergence d'une nouvelle génération d'instrumentalistes : elle a non seulement réduit progressivement notre capacité à développer des missions scientifiques très novatrices mais a aussi rendu plus difficile d'attirer dans notre communauté des chercheurs instrumentalistes venant de laboratoires de physique ou d'ingénierie alors que leur apport est réellement essentiel. Un exemple parmi d'autres est la physique du signal, domaine dans lequel la communauté des sciences de la Terre et de l'univers a clairement besoin de se renforcer. L'existence d'un tel programme permettrait donc de lancer de vrais défis instrumentaux, de donner un cadre de travail lisible aux instrumentalistes motivés par les sciences de la Terre et de l'univers et offrirait également par ricochet des perspectives scientifiques nouvelles d'utilisation des porteurs de classe intermédiaire (ballon, drone, avion, nanosatellite...).

On rajoutera que, dans nos domaines, les commissions de recrutement de chercheurs sont thématiquement fléchées et donc le plus souvent composées de membres se sentant chargés de recruter de bons chercheurs sur ces thématiques mais forcément moins sensibles à la dimension instrumentale de la recherche (d'autant que celle-ci fait de plus en plus appel à des disciplines différentes : physique, chimie, biologie...). Ceci rend très difficile le recrutement de chercheurs ayant un profil de concepteur d'instruments nouveaux. Pour pallier à cette difficulté, il pourrait être envisagé dans les organismes ayant à voir avec les sciences de la Terre et de l'univers, la création d'une commission de recrutement dédiée au développement d'instrumentation innovante, ayant en son sein, à côté de quelques spécialistes des thématiques scientifiques au fait des besoins scientifiques, des spécialistes en instrumentation et en systèmes d'observation. Un modèle existe, de telles sections ayant été mises en place au CNRS pour favoriser le recrutement de chercheurs développant des approches interdisciplinaires.

Enfin, la diminution subie ces dernières années du nombre et mais aussi du niveau d'expérience des personnels de support technique dans les laboratoires, notamment les chefs de projet et experts techniques, est telle qu'elle amène le CNES à s'interroger sur l'option d'une réalisation plus fréquente qu'actuellement des instruments dans l'industrie. Le recours aux CDD n'a fait qu'augmenter ces dernières années, y compris pour couvrir trop souvent des besoins pérennes que le faible nombre d'ouvertures de concours ne permettait pas de satisfaire. Ce point concerne au premier chef les laboratoires du domaine des sciences de l'univers au sein desquels beaucoup d'instruments sont encore développés. Si le transfert vers l'industrie peut se justifier pour tout ou partie de certains instruments, cela ne

doit se faire qu'en préservant une capacité d'innovation instrumentale dans les laboratoires et en leur conservant la maîtrise des tests de validation des instruments (tests qu'ils sont plus à même de conduire jusqu'aux limites des instruments, souvent bien au-delà des spécifications nominales que ne le ferait un industriel qui se contentera de satisfaire les spécifications du cahier des charges). Ceci dit, et quoi que l'on fasse, toute diminution des ressources humaines en instrumentation dans les laboratoires, tant au niveau chercheur qu'ingénieur, finira par impacter directement le niveau d'ambition de la recherche spatiale française.

La diminution continue dans les laboratoires du nombre de chefs de projets et de chercheurs ayant une formation d'instrumentalistes, souvent à l'origine de concepts de missions innovantes, est très inquiétante. Le CNES se doit de rapporter auprès des organismes de recherche concernés ce problème. Les procédures permettant le recrutement de chercheurs instrumentalistes devraient notamment être revues. Des cadres programmatiques inter-organismes doivent être dédiés au développement instrumental innovant.

2.4. ACCUEILLIR EN FRANCE UN CENTRE EUROPÉEN DE RÉCEPTION ET D'ANALYSE D'ÉCHANTILLONS EXTRA-TERRESTRES (Y COMPRIS MARTIENS)

Le domaine de la planétologie et de l'exobiologie touche à des questions parmi les plus fondamentales (évolution des planètes, existence de vie extraterrestre, origine de la vie sur Terre). Les retours sur Terre d'échantillons de Mars et d'autres petits corps programmés pour les prochaines décennies constituent une formidable perspective de découvertes scientifiques. En effet, comparé aux mesures in situ qui sont réalisées avec des instruments optimisés pour des contraintes de charge et d'énergie imposées, des échantillons ramenés sur Terre pourront être étudiés avec les techniques analytiques les plus performantes et devraient donc offrir des informations bien plus riches sur la composition de la matière organique ou sur les structures minérales présentes. L'Europe est fortement engagée dans le programme Mars Sample Return (MSR) pour lequel elle devrait fournir une contribution comprenant la sélection d'échantillons via l'instrument Supercam¹³, la fourniture du rover qui ira récupérer les échantillons qui auront été collectés et le vaisseau de retour.

La distribution de ces échantillons ne se fera que lorsqu'ils auront été certifiés sans danger et cette certification ne sera obtenue qu'après des études préliminaires menées dans des installations spécialisées et dédiées. Disposer d'une installation permettant de mettre en quarantaine des échantillons martiens et disposant de facilités analytiques de haut niveau permettant d'analyser tout type d'échantillons extra-terrestres renforcerait notablement les possibilités d'accès rapide à ces échantillons et donc de découvrir d'éventuelles traces de vie présentes ou passées. Cela permettrait également de dupliquer les analyses nécessaires à la certification dont on n'imagine pas qu'elle puisse reposer sur les seuls résultats d'un unique centre. Il s'agit évidemment d'un investissement majeur, financièrement équivalent à une mission de taille moyenne, uniquement envisageable dans un cadre européen et multidisciplinaire. Mais il s'agit aussi d'un investissement à longue durée de vie qui permettra à l'Europe d'être pleinement partie prenante de découvertes majeures à fort impact sociétal. Un tel projet donnerait aussi un cadre très motivant pour le développement de méthodes analytiques innovatrices et à très hautes performances dont on peut facilement imaginer le bénéfique au-delà du seul domaine planétaire. Une installation ad hoc capable de réceptionner des échantillons martiens et disposant de capacités analytiques (en physique, chimie, biologie) au meilleur niveau mondial permettrait à l'Europe d'occuper la place qui doit être la sienne dans ces missions de retour d'échantillons. La France, de par ses compétences reconnues en planétologie, exobiologie et minéralogie, semble particulièrement bien placée pour accueillir une telle installation.

Compte tenu de l'intérêt scientifique et stratégique à moyen terme de disposer en Europe d'un centre de réception permettant la mise en quarantaine et l'analyse d'échantillons extra-terrestres, et notamment martiens, le CNES doit recommander aux autorités françaises pertinentes de porter un tel projet auprès de l'Europe, de se proposer pour l'accueillir et de mettre en place les moyens de renforcer encore les compétences analytiques dans les domaines biologique, chimique et minéralogique.

¹³ SuperCam : instrument faisant suite à Chemcam, ensembles de spectromètres IR et Raman permettant une analyse minéralogique après ablation laser

3. LA NOUVELLE DIMENSION DES DONNÉES

3.1. DES DONNÉES À L'INFORMATION

C'est aujourd'hui une évidence que la production des informations pertinentes pour tout problème géophysique, environnemental ou astronomique posé va nécessiter de plus en plus de combiner des données de nature variée. L'interprétation finale des données spatiales fait de plus en plus appel à leur hybridation avec des données sol variées tant sur le plan disciplinaire (données chimiques, physiques, biologiques, sociétales), sur le plan géographique (local, régional, global selon les capacités d'agrégation), sur leur nature (données de réseau, aéroportées, de campagnes...) ou encore institutionnel (provenant d'organismes divers : CNRS, CEA, IFREMER, IGN, INRA, IRD, Météo-France, ONERA... pour se limiter aux seuls partenaires nationaux). En effet, et même si le rôle de la donnée spatiale ne fait que croître, les questions abordées ne se résolvent que très rarement de façon totalement satisfaisante avec les seules données spatiales : si celles-ci jouent un rôle majeur de par leur répétitivité et leur couverture spatiale, ou de la nécessité d'aller au-dessus de l'atmosphère pour y avoir accès, elles doivent être associées à des données in situ complémentaires (plus précises, parfois mieux résolues verticalement malgré leur caractère souvent ponctuel) et à des modèles numériques dans lesquels elles seront assimilées ou confrontées. Les problèmes associés à ces besoins multi-sources sont nombreux, au premier rang desquels se trouvent évidemment l'interopérabilité, l'accès par portail unique aux diverses données, etc. Il impose aussi une présence d'expertise autour de ces données et notamment de positionner correctement cette expertise (souvent liée à un laboratoire) par rapport à la gestion/distribution des données.

Dans le domaine des sciences de la Terre, le développement de questionnements scientifiques de plus en plus systémiques et l'existence d'enjeux sociétaux impliquant d'évaluer les impacts des changements environnementaux ou ceux résultant d'aléas dans divers milieux de façon conjointe, s'imposent et dimensionnent différemment les besoins en termes d'accès et de combinaison de données. Un exemple nouveau de ce type d'organisation, par sa vocation mondiale, est le SCO (Space Climate Observatory) qui affiche comme ambition d'utiliser des données satellitaires, combinées à des données régionales et des capacités de modéli-

sation afin de comprendre et mesurer les impacts du changement climatique à différentes échelles.

La mise en place des pôles de données, dans laquelle le CNES a joué un grand rôle, puis leur intégration dans l'Infrastructure de Recherche Data Terra ont, entre autres, pour objectif de gérer les diverses contraintes mentionnées ci-dessus.

Pour la physique solaire et pour les plasmas interplanétaires deux pôles nationaux de données ont été créés, en particulier au vu de leurs implications environnementales. Au regard des enjeux, leur mise en place doit être complétée et les moyens liés aux ambitions assignées à ces pôles doivent être correctement dimensionnés, et les partenariats finalisés, en particulier en prenant en compte le fait que les missions majeures dans ces secteurs sont des missions ESA.

Pour l'astronomie, le Centre de Données de Strasbourg est unique en Europe pour avoir développé un archivage des données associées aux objets astrophysiques et des outils et méthodes de mises à disposition des utilisateurs des données et de services pour leur manipulation.

Pour les missions du programme obligatoire de l'ESA (astronomie, planétologie, physique fondamentale, exploration), l'équivalent des pôles de données est mis en œuvre par l'ESA pour l'archivage et la distribution des données brutes et finales au sens des produits élaborés par les équipes ayant conduit ces missions.

Aujourd'hui les grandes masses de données résultent d'une part des observatoires pour lesquelles chaque observation a été demandée par une équipe de chercheurs et versée dans une base de données utilisable par la communauté scientifique après un certain temps, et d'autre part des missions d'astronomie ciblées **Planck**, **Gaia** ou **Euclid** aujourd'hui, **Ariel**, **Bepi-Colombo** et **Lisa** dans le futur. Ces missions ont des objectifs scientifiques spécifiques et difficiles à atteindre sans utiliser la totalité (ou au moins une grande fraction) des données disponibles de plusieurs missions. Ceci est bien illustré par la cosmologie pour laquelle les observations de la mission spatiale **Euclid** et au sol de LSST qui adressent le problème majeur de l'énergie noire, ou SKA pour le fond d'ondes gravitationnelles, sont dépendantes des résultats de **Planck** pour le cadre spatio-temporel et les paramètres cosmologiques.

Il faut comprendre en détail les effets systématiques et, si ceux-ci dominent le bruit, construire des simulations dites « end to end » de façon à caractériser leur correction et les résidus de ces effets systématiques. Il faut aussi séparer les différentes contributions qui composent l'image sur le ciel avec, des émissions d'avant ou d'arrière plans dues aux émissions de notre galaxie

et parfois du système solaire.

Ces séparations de composantes sont complexes et demandent des spécialistes d'autres thématiques que l'astronomie. Elle laisse des résidus non gaussiens qui ne permettent pas d'utiliser les approches analytiques de la vraisemblance. Il faut alors faire des simulations massives (plusieurs milliers) pour évaluer les incertitudes sur les résultats. L'utilisation des données est alors liée à l'accès aux simulations développées par ceux qui ont construit et testé les instruments. Une telle situation change par plusieurs ordres de grandeur la quantité de données à manipuler.

Les besoins en simulations end-to-end s'accroissent avec la sensibilité des détecteurs. Les résultats finaux ne sont atteints qu'en utilisant conjointement les données acquises par les missions et les simulations massives de ces données. Les puissances de calcul nécessaires sont du niveau des centres de calcul nationaux et plus probablement européens et pas de centres de calcul dédiés. Pour les données des missions de ce type mais menées hors cadre ESA, il n'y a pas de cadre défini et les données sont archivées et traitées de façon ad-hoc au cas par cas par les agences nationales maîtres d'ouvrage de ces missions.

Dans les sciences de l'univers, les missions d'exploration du système solaire n'ont en pas encore de problème de quantité de données et pas non plus de problème de simulations mais cela risque fort de changer dans les décennies à venir avec MSR, les missions vers les planètes glacées du système solaire extérieur et la combinaison avec les mesures sur les exo-systèmes planétaires.

Les observatoires spatiaux (**HST**, **XMM-Newton**, **Herschel**, **JWST**...) ont en gros les mêmes problèmes que les grands observatoires au sol et les données sont accessibles par un petit nombre de portails communs. Les logiciels de traitement sont là aussi développés par les équipes qui ont construit et testé les instruments. Les observations demandées par un observateur sont livrées par l'observatoire. Cette organisation est bien rodée et ne semble pas nécessiter d'être révisée.

Si ces efforts d'organisation, de structuration et de mise à disposition des données nationales sont essentiels, ils doivent cependant être vus que comme une étape, certes indispensable, vers une structuration du même type à l'échelle européenne. L'échelle européenne est en effet la seule capable de répondre aux offres privées qui émergent de la mise à disposition de données d'origine variées et de moyens de calcul (*voir par exemple l'offre Google Earth Engine ou Google Sky*). Un cadre naturel pour cela pourrait être trouvé au sein du Programme *Copernicus*. L'ESA est en effet engagée avec l'Union Européenne dans le domaine de la valori-

sation des données spatiales de ce programme au travers des DIAS (Data and Information Access Services), « plateforme destinée à faciliter le développement de services applicatifs par et pour des utilisateurs finaux, privés comme publics, et faire ainsi entrer de plein pied les données satellitaires dans l'économie digitale ». Il faudra néanmoins veiller à ce que les bases de données envisagées dans ce programme, très liées aux services, ne conduisent pas à sectoriser trop fortement les différents domaines scientifiques.

La mise en œuvre de l'Infrastructure de Recherche Data Terra et des pôles de données qui y concourent doit être accélérée et les moyens ad hoc pour atteindre les objectifs fixés doivent être dégagés. En parallèle, il est indispensable de conduire les actions permettant de faire émerger au niveau européen un ensemble offrant des services compétitifs en moyens de calcul et de bases de données environnementales.

Pour l'astronomie et la physique fondamentale il faudra définir les responsabilités respectives du CDS, de l'ESA, des agences nationales et de l'Union Européenne en archivage et mise à disposition des données mais plus encore en services associés.

3.2. LES MOYENS DE CALCUL NÉCESSAIRES

Comme mentionné précédemment, le volume de données issues d'observations spatiales explose. A titre d'exemples, l'archive des données d'observation de la Terre à l'ESA s'élèvera à 20 Po¹⁴ en 2020 et Copernicus générera 5 Po/an. L'archive liée aux satellites **Spot**¹⁵ (depuis 1985, de **Spot 1** à **Spot 5**) représente trente millions de scènes et un volume d'environ 15 Po. La mission d'astrométrie **Gaia** qui a mesuré les mouvements propres d'1,7 milliard d'étoiles a nécessité une puissance de calcul de 6 Teraflops/sec sur un cluster de 6 000 cœurs.

Par ailleurs, le traitement de ces données fait de plus en plus appel à leur combinaison avec des données de réseau sol (par exemple la combinaison de mesures multi-longueurs d'onde de **Planck**¹⁶ et **Wise**¹⁷ avec le CFHT¹⁸; les données du télescope spatial **Euclid**¹⁹ avec celle du Large Synoptic Survey Telescope (LSST); combinaison de données multi-longueurs d'onde d'ozone troposphérique avec des données de surface...). Ces données sol, indispensables à l'analyse des données spatiales, demandent aujourd'hui, elles aussi, des capacités de calcul et de stockage exceptionnelles : par exemple, le

LSST produira près de 15 To par nuit et le projet SKA²⁰ qui devrait être opérationnel vers 2024 générera des flux de données de l'ordre du To par seconde. De très grandes capacités de calcul associées à des méthodes de traitement de haut niveau seront donc nécessaires pour exploiter ces masses de données (analyse des données haute performance ou HPDA). Il faudra aussi anticiper les évolutions attendues des types d'architecture de calcul (GPU, calcul vectoriel...) pour développer des algorithmes de calcul compatibles.

Comme nous l'avons vu, dans les domaines de l'astronomie et de la physique fondamentale, les problèmes sont liés à la complexité des traitements et à la nécessité de recourir aux simulations pour déterminer les incertitudes et donc répéter de nombreuses fois le traitement sur des données simulées (**Planck**, **Euclid**). Ceci rend nécessaire l'appel à des centres de calcul nationaux ou européens.

Il n'est, par ailleurs, guère envisageable d'imaginer transférer ces énormes masses de données de façon régulière entre centre de réception de données, pôles de données et centre de calcul. En conséquence, la proximité physique entre centres de données et centres de calcul va devenir indispensable. Il semble aussi établi que les besoins en calcul requis par le traitement de données massives provenant de différentes sources seront suffisamment importants à relativement court terme pour ne pouvoir être envisagés qu'au niveau de centres de calcul nationaux (par exemple Genci²¹) voire européens (par exemple au travers de EuroHPC²² ou de l'infrastructure European Grid Initiative). Cela nécessite de réfléchir rapidement au possible positionnement des données et/ou pôles de données au sein même de ces centres de calcul et à la façon de maintenir le lien nécessaire avec les centres d'expertise que sont les laboratoires.

Dans ce contexte, les technologies qui augmentent les capacités d'autonomie et de calcul embarquées deviennent également critiques. Elles permettent d'accroître le nombre de détecteurs en optimisant la répartition entre volume et flux des données à transmettre et les moyens de calcul au sol.

Même si les poids respectifs que représentent, dans la problématique de données, les questions liées à la volumétrie, à la complexité des traitements de la donnée satellitaire, à l'hybridation de ces données spatiales avec des observations sol ou des modèles, diffèrent selon que l'on s'intéresse aux sciences de l'univers ou aux sciences de la Terre, il faut garder en tête leur caractère générique et les risques qu'un manque d'anticipation ferait peser sur ces sciences.

Disposer d'une puissance de calcul compétitive est une nécessité absolue au regard des flux de données attendus et de l'appel à des simulations massives des observations et des effets instrumentaux. Un rapprochement des bases de données et des outils de traitement avec les centres de calcul de niveau national et plus encore européen est indispensable à moyen terme. Ceci implique aussi d'envisager avec ces centres les évolutions technologiques à venir dans le domaine des calculateurs et d'évaluer leurs conséquences potentielles sur la structure des algorithmes de traitement de données.

¹⁴ Petaoctet

¹⁵ Spot : Satellite Pour l'Observation de la Terre, filières de satellites imageurs à haute résolution (visible)

¹⁶ Satellite européen qui a analysé le fond diffus cosmologique rayonnement dans le domaine micro-onde montrant l'Univers tel qu'il était 380 000 ans après le Big Bang

¹⁷ Wide-Field Infrared Survey Explorer, télescope spatial américain qui observe l'ensemble du ciel dans l'infrarouge

¹⁸ Canada-France-Hawaii Telescope, télescope optique et infrarouge de 3,58 mètres situé à 4200m d'altitude à Hawaï

¹⁹ Télescope spatial de l'Agence Spatiale Européenne observant en lumière visible et dans le proche infrarouge qui devrait être lancé vers 2022

²⁰ Square Kilometre Array, radiotélescope géant qui et couvrira une gamme de longueurs d'onde allant d'environ 50 MHz à plus de 20 GHz

²¹ Grand équipement national de calcul intensif

²² Euro HPC : projet High Performance Computing qui consiste à mutualiser les moyens des pays européens pour construire et partager des supercalculateurs de classe exaflopique

3.3. DES BESOINS EN MÉTHODES NUMÉRIQUES DE TRAITEMENT

De façon complémentaire, les sciences mathématiques et informatiques ont un rôle essentiel à jouer dans les développements de méthodologie de traitement et d'analyse de données et dans l'optimisation des modèles à mettre en regard des données afin de transformer les données brutes en connaissances scientifiques directement utilisables.

Les chaînes linéaires de traitement, de plus en plus sophistiquées, produites par des acteurs séparés ne suffisent plus pour répondre à la demande d'informations élaborées et complexes qui nécessitent la combinaison de données provenant d'origines multiples. De même, les méthodes classiques de traitement de données divisées en niveau de données produites par des groupes soutenus par des agences différentes (CNES, grands centres de recherche, laboratoires universitaires), que l'on pourrait qualifier de façon caricaturale de

« manuelles », deviennent clairement inadaptées aux traitements demandés et le recours à des méthodes automatiques est inévitable : l'utilisation de méthodes dérivées de l'intelligence artificielle (apprentissage profond, adaptation de domaine, approche non supervisée, recours à des simulations massives, réduction de la dimensionnalité des données,...) apparaît comme incontournable.

Les algorithmes de simulation font appel à des représentations statistiques qui utilisent des techniques nouvelles en mathématiques appliquées quand les incertitudes ne sont plus gaussiennes. Les simulations de milieux turbulents par exemple posent des problèmes similaires, avant plans interstellaire turbulents et en sciences de la Terre.

Enfin, la production de données à forte valeur ajoutée nécessite, au-delà de la mise en place de bases de données organisées mêlant données sol et spatiales, le développement d'algorithmes de plus en plus complexes, d'abord pour traiter puis pour pouvoir inter-opérer des données n'ayant pas les mêmes dimensionnalités et enfin pour les assimiler dans des modèles.

C'est un domaine où la perception des problèmes par les communautés concernées est très claire mais pour lesquels la formulation concrète et plus encore les méthodologies de résolution sont en cours d'élaboration. Pour couvrir ces besoins, des compétences scientifiques nouvelles dans le domaine des mathématiques appliquées doivent être convoquées. Il existe déjà des initiatives intéressantes (par exemple le GDR CNRS MADICS²³ ou l'initiative Mathématiques et Complexité du Système Terre²⁴) dont certaines actions sont clairement orientées vers le traitement des données spatiales en sciences de la Terre ou en astrophysique et desquelles il est indispensable de se rapprocher plus formellement que par la simple participation volontaire et individuelle de chercheurs.

Les évolutions attendues dans le domaine des données imposent de mettre en place une politique volontariste du CNES, des organismes de recherche et des tutelles gouvernementales autour des enjeux en informatique et mathématiques appliquées.

²³ Groupement de recherches : Masses de Données, Informations et Connaissances en Sciences

²⁴ Atelier prospectif supporté par l'ANR, hébergé par l'Institut Henri Poincaré et soutenu par l'Institut National des Sciences Mathématiques et de leurs Interactions (INSMI/CNRS)

4. LE PARTENARIAT, UN ATOUT A CULTIVER

4.1. LES LIENS AVEC LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE

La communauté académique joue un rôle majeur dans la définition, la réalisation et l'exploitation des missions spatiales. Nombre de missions qui ont été de grandes réussites n'auraient pu être réalisées, ni même parfois imaginées, sans la contribution de la communauté scientifique. Ce partenariat, historique, est un atout majeur de la politique spatiale française.

Néanmoins, les niveaux d'intervention de la communauté scientifique sont assez différents selon les domaines concernés. Si en sciences de l'univers, nombre de laboratoires ont conservé des capacités de réalisation de charges utiles ou a minima de production et tests de composants et sous-systèmes de ces charges utiles, ces mêmes charges utiles sont, en sciences de la Terre, très majoritairement réalisées dans l'industrie, notamment en raison de l'émergence progressive de filières permettant à l'industrie d'élaborer un modèle économique viable. Le corollaire de cela a été une diminution continue de la capacité de réalisation d'instruments dans les laboratoires des sciences de la Terre. En contrepartie, ceux-ci sont très fortement impliqués dans le traitement des données, leur exploitation scientifique et leur valorisation, y compris parfois jusqu'à la réalisation de démonstrateurs de services.

Les activités des chercheurs sont soutenues par le CNES dans le cadre de l'APR²⁵ dont l'objectif principal est de préparer au mieux les missions en développement et de faire rayonner les missions en exploitation. Dans un contexte très international et concurrentiel, ce soutien est essentiel pour maintenir et/ou développer l'expertise des équipes françaises et les aider à jouer un rôle de premier plan dans les résultats futurs de la mission.

²⁵ Appel à Proposition de Recherche du CNES, programme de préparation et d'accompagnement scientifique des projets

4.2. LE PARTENARIAT INTER-ORGANISMES

Le CNES n'a pas de laboratoire de recherche en propre mais travaille en partenariat avec les laboratoires de recherche placés sous la tutelle d'universités ou d'organismes publics. Aujourd'hui, le système d'organisation

de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (ESR) rend le partenariat inter-organismes plus compliqué à mettre en œuvre qu'il ne l'a été dans le passé alors que les évolutions des questionnements scientifiques (notamment vers les problèmes d'interfaces et d'interactions) et des méthodes imposent encore davantage la mise en commun des techniques, des données, des ressources et des compétences de divers organismes. Si le CNES veut s'assurer de la pleine valorisation des données qu'il contribue à produire, son partenariat avec les organismes de recherche doit être prolongé jusqu'au niveau de la production de l'information visée et ne pas s'arrêter à la seule fourniture de la donnée spatiale qualifiée et géo-référencée. Ce genre de positionnement est particulièrement urgent à mettre en place en sciences de la Terre où à la fois l'existence de nombreuses données in situ et une demande sociétale forte sur des informations environnementales précises rend cette co-construction absolument nécessaire. Mais cela est également vrai en sciences de l'univers où de plus en plus de missions nécessitent une forte interaction entre réseaux sol et observations spatiales pour délivrer des informations scientifiques pertinentes. Dans le contexte actuel, il est indispensable d'utiliser toutes les possibilités de coopération inter-organismes existantes, voire d'en inventer de nouvelles, lorsque cela est nécessaire.

Le partenariat inter-organismes est une clé de voûte de l'excellence spatiale française. L'évolution des questionnements, notamment la nécessaire combinaison des données spatiales avec des données sol et des modèles, nécessite de revisiter ce partenariat. En particulier, le CNES doit se sentir non seulement responsable de la production de la donnée spatiale mais également concerné par sa valorisation sous forme d'information finale.

4.3. LA DIMENSION EUROPÉENNE

Le CNES n'a pas la capacité financière pour être le prescripteur unique de missions scientifiques. Une grande mission dont le CNES assurerait seul, sans partenaires internationaux, l'essentiel (plateforme, charge utile, lancement et exploitation) atteindrait un coût correspondant à plusieurs années du budget de la science, même avec une ambition scientifique limitée. Les futures grandes missions du CNES verront donc nécessairement le jour soit sous la forme de coopérations négociées avec d'autres agences, soit sous la forme d'un support à des consortia scientifiques qui soumettent des propositions à de grandes agences prescriptrices comme cela est déjà le cas pour les missions du programme obligatoire de l'ESA.

Les grands projets spatiaux nécessitent donc pour leur réalisation un cadre de coopération internationale établi. Pour la communauté française, c'est d'abord à l'échelle européenne que doit être définie une politique spatiale d'envergure. A ce titre, l'ESA, EUMETSAT et la Communauté Européenne constituent les cadres naturels pour développer des missions ambitieuses et innovantes inscrites dans des cadres programmatiques définis et structurés (*Cosmic Vision, Earth Explorer, Copernicus...*).

La contribution de la France aux missions de l'ESA est de tout premier plan, notamment en sciences de l'univers. Concernant le programme Earth Explorer, la contribution nationale a été très importante dans des missions comme **Smos, Cryosat, Swarm** ou encore **Biomass**.

Néanmoins, il faut noter que les dernières sélections ont été moins favorables de ce point de vue, la participation française aux missions sélectionnées ou présélectionnées étant assez limitée. Une analyse des réussites passées dans ce programme permettra sans doute d'identifier les processus permettant à la communauté française de faire à nouveau émerger des concepts instrumentaux innovants et de contribuer à établir des consortia européens de qualité autour de ces propositions. Par ailleurs, s'il s'avérait que les missions *Earth Explorer* sélectionnées n'adressaient pas des questions scientifiques considérées par la communauté française comme prioritaires, cela nécessiterait évidemment de s'interroger sur les raisons de telles divergences d'intérêt.

La place particulière de l'Europe dans le partenariat international doit naturellement être réaffirmée : au regard du nouveau contexte très concurrentiel du spatial et des perspectives scientifiques nouvelles et porteuses de découvertes majeures qu'offrent par exemple le retour d'échantillons martiens, les missions cosmologiques ou l'observation de la Terre, il est essentiel que l'ESA dispose des moyens nécessaires pour maintenir, voire renforcer, sa position d'agence spatiale de premier plan.

Néanmoins, renforcer les moyens alloués à l'ESA, notamment ceux liés au programme obligatoire, n'a de sens que si cela est accompagné d'une augmentation raisonnable du budget propre du CNES. En effet, il est indispensable que le CNES dispose des moyens nécessaires pour contribuer efficacement aux charges utiles du programme obligatoire tout en conservant une capacité suffisante pour le partenariat bi ou multi-latéral.

4.4. LE PARTENARIAT BI (MULTI) LATÉRAL

Par ailleurs, une des forces et des missions du CNES, résultant à la fois de ses compétences technologiques et de l'excellence de la communauté scientifique française, est sa capacité à être partenaire de grandes missions bilatérales portées par des agences étrangères comme la NASA, Roscosmos, la JAXA, la CNSA, l'ISRO... Les instruments **ChemCam**²⁶ et **Sam**²⁷ ou le sismomètre **Seis**²⁸ embarqués respectivement sur les missions **Curiosity** et **InSight**²⁹ de la NASA et les programme **Svom**³⁰, **CFosat**³¹ avec la Chine, **Jason** avec le JPL sont de bons exemples de la réussite de telles coopérations. A côté de la contribution française à l'ESA, il est donc indispensable de pouvoir continuer de disposer des moyens de conduire de telles coopérations à très fort retour sur investissements, tant sur le plan scientifique qu'en terme de valorisation du savoir-faire français.

Enfin, les nouvelles approches d'accès au spatial issues du NewSpace (dont on a vu qu'il a l'ambition de contribuer à réduire le coût de l'accès à l'espace) amènent de nouveaux pays à se positionner dans le domaine spatial. L'ambition de ces nouveaux « entrants » est variée visant aussi bien le développement d'applications sociétales (observation de la Terre, télécommunications, navigation...) qu'un développement économique dans le domaine ou encore un rayonnement accru sur la scène internationale. Dans ce cadre, le CNES est régulièrement sollicité pour soutenir l'action diplomatique, économique et stratégique de la France avec ces nouveaux pays au travers de partenariats.

Ceci a conduit à ce que certaines missions à vocation scientifique ont pu parfois être décidées en dépit d'un niveau de priorité scientifique modérée dans les recommandations du CPS. Cette dimension diplomatique étant incontournable, il est nécessaire de réfléchir en amont à des sujets de coopération scientifique couvrant un spectre large en terme de type de coopération (missions, démonstrateurs, développements technologiques, formation, traitements des données...) qui puissent être proposés comme objet de partenariat et faire que cette coopération puisse se développer dans un cadre aussi gagnant-gagnant que possible.

Le SCO (Space Climate Observatory) est un outil qui permettra de développer des collaborations avec les grandes puissances du spatial sur ce besoin sociétal majeur par l'échange de données de haut niveau en sciences de la Terre et l'optimisation du dispositif mondial en minimisant les duplications. Il permettra aussi de fournir à nombre de pays émergents dans le domaine spatial, des données et des algorithmes de traitement leur permettant de conduire des études d'impact du changement global aux échelles locale ou régionale.

²⁶ ChemCam (pour Caméra Chimique), analyseur spectral induit par ablation laser permettant de déterminer la composition élémentaire des roches

²⁷ Sample Analysis at Mars, ensemble de trois instruments (spectromètre de masse quadrupolaire, chromatographe en phase gazeuse (GC), spectromètre à diode laser)

²⁸ Sismomètre conçu par l'Institut de Physique du Globe de Paris et fourni sous maîtrise d'œuvre du CNES

²⁹ Mission martienne de la NASA visant à étudier la structure interne de la planète

³⁰ SVOM (Space Variable Objects Monitor) est une mission franco-chinoise qui a pour objectif de détecter les sursauts gamma et d'en déterminer les caractéristiques

³¹ CFOSAT (China-France Oceanography SATellite) est une mission franco-chinoise dont l'objectif est de mesurer les vents et les vagues à la surface des océans.

5. LA FORMATION AUX SCIENCES ET APPLICATIONS SPATIALES

Comme mentionné précédemment, le marché autour du spatial se développe faisant clairement du spatial un secteur porteur de croissance et créateur d'emplois. Il existe notamment un réel potentiel de création d'emplois dans les services et applications liés au spatial. On notera à cet effet que certains pays (comme le Royaume-Uni) ont déjà décidé de faire porter leur effort dans le domaine du spatial principalement sur le segment aval, c'est-à-dire celui des applications à forte valeur marchande. Dans ce contexte, il y a une nécessité à développer/renforcer les filières de formation aux métiers du spatial ou à ceux en lien avec le traitement des données spatiales.

Les liens du CNES avec l'enseignement supérieur concernent principalement la recherche et il s'agit souvent de liens reposant davantage sur la tutelle CNRS des UMR que sur les établissements d'enseignement supérieur en tant que tels. Actuellement, les interventions du CNES en terme de formation concernent donc essentiellement la formation pour et par la recherche : chaque année, le CNES attribue une centaine d'allocations de recherche (thèses et post-doctorats) à des étudiants en sciences en co-financement avec d'autres institutions ou acteurs privés, notamment des PME.

Néanmoins, dans le nouveau contexte, le CNES doit renforcer sa visibilité dans le monde académique et sensibiliser davantage les étudiants et futurs ingénieurs aux enjeux du spatial.

La multiplication récente des Campus Spatiaux Universitaires (CSU) traduit une sensibilisation plus grande des IDEX, regroupements d'universités et d'écoles d'ingénieurs, aux formations de haut niveau et débouchés potentiels qu'offrent les sciences spatiales.

La dimension « formation » de ces campus spatiaux universitaires doit être accompagnée à la fois par le MESRI et par les acteurs institutionnels et privés du spatial si l'on veut former les spécialistes des sciences spatiales dont on va avoir besoin tant pour développer les projets scientifiques de demain que pour assurer leur valorisation.

C'est sans doute notamment le rôle du CNES de faciliter la mise en réseau de ces CSU. De façon plus générale, cela implique que le CNES établisse des relations plus directes et institutionnalisées, focalisées sur la formation, avec les universités et les écoles d'ingénieurs. L'accent mis sur les nanosatellites dans ces campus universitaires ne doit pas faire oublier le potentiel de formation par les stages offerts au sein des équipes projet des grandes missions spatiales qui offrent une formation à la conduite de grands projets internationaux. Cette voie déjà exploitée doit être renforcée.

5.1. L'ORGANISATION ET LE FONCTIONNEMENT

5.1.1. Organisation des projets

Compte-tenu du retour d'expérience et des enjeux à venir, notamment au regard de l'envergure de certaines missions, une procédure permettant une concertation bien en amont du montage des projets doit être mise en place au niveau national. Cette concertation qui devrait déboucher sur un plan d'implémentation du projet considéré devrait concerner d'une part les différents organismes et tutelles impliqués (depuis le concept de mission jusqu'à la valorisation des données) et d'autre part les laboratoires parties prenantes de la mission. L'objectif est de pouvoir construire très tôt une contribution nationale concertée, correctement dimensionnée et visant à optimiser les implications des équipes, l'utilisation des ressources nationales et de bien prendre en compte toute la chaîne d'actions, notamment la phase d'exploitation dont le dimensionnement réel est souvent trop tardif. Ceci devrait également limiter la fragilité potentielle que peut constituer le morcellement des contributions françaises lors du montage d'un projet international. Des contributions coordonnées à l'échelle nationale devraient également permettre de limiter les contributions extérieures d'opportunité mal appropriées alors qu'existent des expertises maîtrisées au niveau national.

Les directeurs de laboratoires ont, par ailleurs, souligné, à juste titre, l'intérêt qu'il y avait à se partager les tâches en fonction des spécificités propres aux différents laboratoires. Une telle approche, basée sur des centres de compétences identifiés, pourrait effectivement permettre de maintenir le potentiel humain des laboratoires au-dessus des seuils critiques indispensables pour mener des projets d'envergure à forte valeur ajoutée.

Lors de la mise en place des projets, et lorsque cela est possible, la constitution d'une équipe intégrée laboratoire/CNES constituerait un atout certain, non seulement pour les interactions technologiques mais également afin d'optimiser les circuits d'information et de décision lors du déroulement du projet. Les réticences sur les équipes intégrées, basées sur une colocation devraient être dépassées au vu du développement des méthodes de communication et de travail à distance.

5.1.2. Les modes d'intervention du CNES

Avec l'accélération et la complexification du paysage spatial, il est nécessaire de renforcer le partage stratégique au niveau national entre le CNES et ses partenaires, mais également entre les laboratoires de manière à avoir une politique spatiale française concertée.

L'animation de ces étapes préalables indispensables repose sur le rôle clé des équipes thématiques du CNES (« thématiciens »), qui suivent le cycle complet d'une mission, de l'incubation (R&T/APR), au développement et à l'exploitation.

Les missions se construisent à travers les phases préliminaires du développement projet (phases O et A). Avec ses partenaires, le CNES y mobilise ses experts techniques et ses analystes financiers. Dans cette phase, le CNES confronte plusieurs critères :

- 1) l'intérêt scientifique
- 2) Le caractère innovant des technologies mises en jeu
- 3) l'opportunité de coopération internationale, en lien avec la plupart des grandes agences internationales, mais également avec les pays émergents
- 4) les enjeux de maintien de compétences françaises publiques et privées
- 5) les contraintes de réalisation liées à la soutenabilité financière (en dépenses externes du développement à l'exploitation) et à la soutenabilité en personnel (RH CNES et laboratoires, y compris les compétences clés).

En amont des propositions et en lien avec la recommandation précédente, **la préparation de chaque priorité majeure issue du SPS doit être concertée au niveau national de manière proactive** pour se donner les meilleures chances d'aboutir.

5.1.3. Les recours à l'industrie

L'industrie du spatial, notamment les acteurs français, est maintenant d'une grande maturité. **Les grands industriels maîtres d'œuvre sont adaptés à la réalisation de projets très bien spécifiés** et à risques technologiques maîtrisés. Pour les objets plus originaux ou plus innovants, donc plus difficiles à développer, le CNES peut être amené à prendre la maîtrise d'œuvre en s'appuyant sur des PME spécialisées, afin d'assumer directement les risques.

Par ailleurs, il existe une offre variée d'assistance technique, souvent spécialisée (par exemple dans les domaines mécanique, thermique ou électrique) avec laquelle il serait judicieux de développer des **logiques de partenariat**, en élargissant l'assiette d'intervention de ces réseaux partenaires, par exemple dans le domaine de l'intégration et des tests.

Pour accompagner le transfert de savoir-faire des laboratoires vers l'industrie, et assurer la construction de la confiance indispensable aux différentes parties, il faut permettre aux laboratoires d'acquérir la visibilité nécessaire sur les développements industriels afférents aux concepts issus de ces laboratoires. Cette condition de confiance est un élément crucial dans l'élaboration de logiques de partenariat triangulaire plus marquées entre laboratoires, industriels et CNES. Dans cette perspective, des scientifiques issus des laboratoires peuvent être intégrés dans les équipes de suivi industriel CNES ou dans l'industrie pour le suivi de certaines réalisations. Ces médiateurs scientifiques, utilisés en consultance et sans rôle opérationnel, pourraient aider à résoudre les difficultés rencontrées lors des transferts technologiques et identifier quelles améliorations de performance sont possibles tout en respectant le cadre d'un contrat industriel.

5.1.4. L'intervention des labos spatiaux

Sans remettre en cause le rôle des laboratoires spatiaux dans l'instrumentation scientifique et leur rôle clé dans les propositions de concepts innovants et la réalisation de prototypes sol, il semble que plusieurs chantiers seraient profitables :

- 1) Etudier au cas par cas **l'industrialisation des filières d'instruments les plus utilisés** (exemple sondes magnétiques, spectromètres) en prévoyant éventuellement que des scientifiques puissent aider l'industriel dans le cadre d'une consultance en dépassant la notion de propriété d'un concept instrumental. Cette pratique est la plus employée dans le domaine de l'observation de la Terre.
- 2) **Mutualiser les moyens d'intégration et de tests** en bannissant le financement ou la mise à niveau de moyens pour lesquels des alternatives existent dans

d'autres laboratoires, en associant les différentes tutelles aux décisions selon un principe de subsidiarité (en lien avec la dynamique du Groupement d'Intérêt Scientifique PARADISE).

- 3) **Renforcer la validation des prévisions des laboratoires** pour mieux anticiper d'éventuels problèmes liés à la surcharge des équipes, comme par exemple des besoins financiers supplémentaires ou des supports techniques imprévus.
- 4) **Garantir le respect du référentiel de qualité**, notamment pour les réalisations matérielles liées aux modèles de vol, y compris les moyens sol. On peut songer à mettre en place une labellisation « spatiale » régulièrement vérifiée.

Dans ces conditions cette spécificité et richesse françaises que constituent les laboratoires spatiaux pourra être maintenue, voire amplifiée. **Le CNES doit maintenir sa confiance dans le rôle des laboratoires spatiaux et être prêt aux efforts collectifs nécessaires pour affronter une exigence qui évolue et contrôler les risques qu'elle induit.**

5.1.5. Les exploitations

Le succès des missions se traduit par les publications qu'elles suscitent, soit directement, soit indirectement par la production de données utiles à plusieurs thématiques. Traditionnellement, les phases initiales d'exploitation se partagent au début entre coûts opérationnels et coûts d'analyse des données et finissent par ne concerner que les coûts d'analyse, notamment lorsque la mission ne produit plus de données.

La durée de vie parfois maintenant très longue de certaines missions a suscité des inquiétudes de financement, mais c'est aussi une opportunité. En réalité, les plus gros postes de dépenses concernent des développements logiciels dans le cadre de missions en cours ou à venir.

Une réflexion sur les outils logiciels utilisés en exploitation pourrait aboutir à des réductions de coûts en répondant aux questions suivantes :

- 1) **La recherche systématique d'outils communs** à plusieurs missions, avec les maintenances, montées de versions qu'ils impliquent, est-elle justifiée par rapport à des développements dédiés plus simples ?
- 2) Le développement des outils d'exploitation peut-il devenir collaboratif ? C'est-à-dire, à partir d'une description d'interface et d'objectifs, **faire appel à des contributeurs volontaires** dont la seule rétribution serait la satisfaction de voir leur proposition acceptée et utilisée ?

- 3) **Quelles règles appliquer aux demandes de financement** des laboratoires vers le CNES concernant les exploitations, notamment lorsqu'il s'agit de prolonger l'exploitation d'une mission. Des règles peuvent être proposées pour la part de financement CNES : recours à des publications gratuites, limite des frais de missions par personne, limite du pourcentage de RH effectué sur contrat financé par le CNES.

Enfin, comme nous l'avons abordé précédemment, les besoins croissants en simulations massives, en archivage qui deviennent parfois l'élément dimensionnant (climatologie, fond diffus cosmologique) devront faire l'objet d'une réflexion collective dédiée autour de l'avenir des pôles de données.

5.1.6. Les relations européennes

Le partenaire principal du CNES en termes de programme scientifique est évidemment l'ESA, avec laquelle les relations institutionnelles sont très fortes et bien codifiées (programme scientifique obligatoire, programme d'observation de la Terre, etc. Les programmes scientifiques de l'ESA sont le premier poste de dépenses du CNES en matière scientifique, mais ils offrent un effet de levier important. Quelques pistes permettraient d'améliorer l'efficacité du processus et d'amplifier l'effet de levier :

- 1) **La gestion précoce, par des équipes d'ingénierie système**, par exemple mixtes entre ESA et CNES, des interfaces entre les consortia scientifiques et les industriels, afin d'éviter la juxtaposition tardive de réflexions aboutissant à des incompatibilités.
- 2) **La reconnaissance de la maturité des processus du CNES et de ses partenaires**, et notamment de la pertinence de son plan qualité et de sa capacité à organiser des revues.
- 3) **Un mécanisme permettant à l'ESA de financer les parties des contributions nationales qui sont d'une maturité suffisante, par exemple au stade des modèles de vol**, Ceci permettrait d'augmenter l'effet de levier et de focaliser l'effort du CNES sur sa capacité d'innovation. La nécessité actuelle de financer le modèle de vol augmente considérablement le coût des innovations portées par le CNES.

On note aussi, le rôle majeur de l'UE dans des programmes comme Copernicus ou Galileo, dont les données fournies sont de plus en plus utilisées par la communauté scientifique française.

5.1.7. Les relations avec les agences

Le CNES entretient des relations bilatérales avec quasiment toutes les agences. Selon les cas, les possibilités de coopération sur des missions scientifiques sont d'emblée très politiques ou bien basées sur les réponses à appels à propositions. Dans ce dernier cas, on pourra chercher à ce que, en préalable de discussions bilatérales, l'information du CNES soit totale concernant les velléités de participation de scientifiques français à des consortia formés pour ces appels à propositions. **Une règle saine serait que les scientifiques français qui envisagent une participation en informent le CNES en même temps que la direction de leur unité dès le premier contact, faute de quoi leur proposition devrait vivre sans support technique, ni organisationnel ni financier du CNES et des organismes partenaires.**

5.1.8. Fonctionnement du comité des programmes scientifiques (CPS)

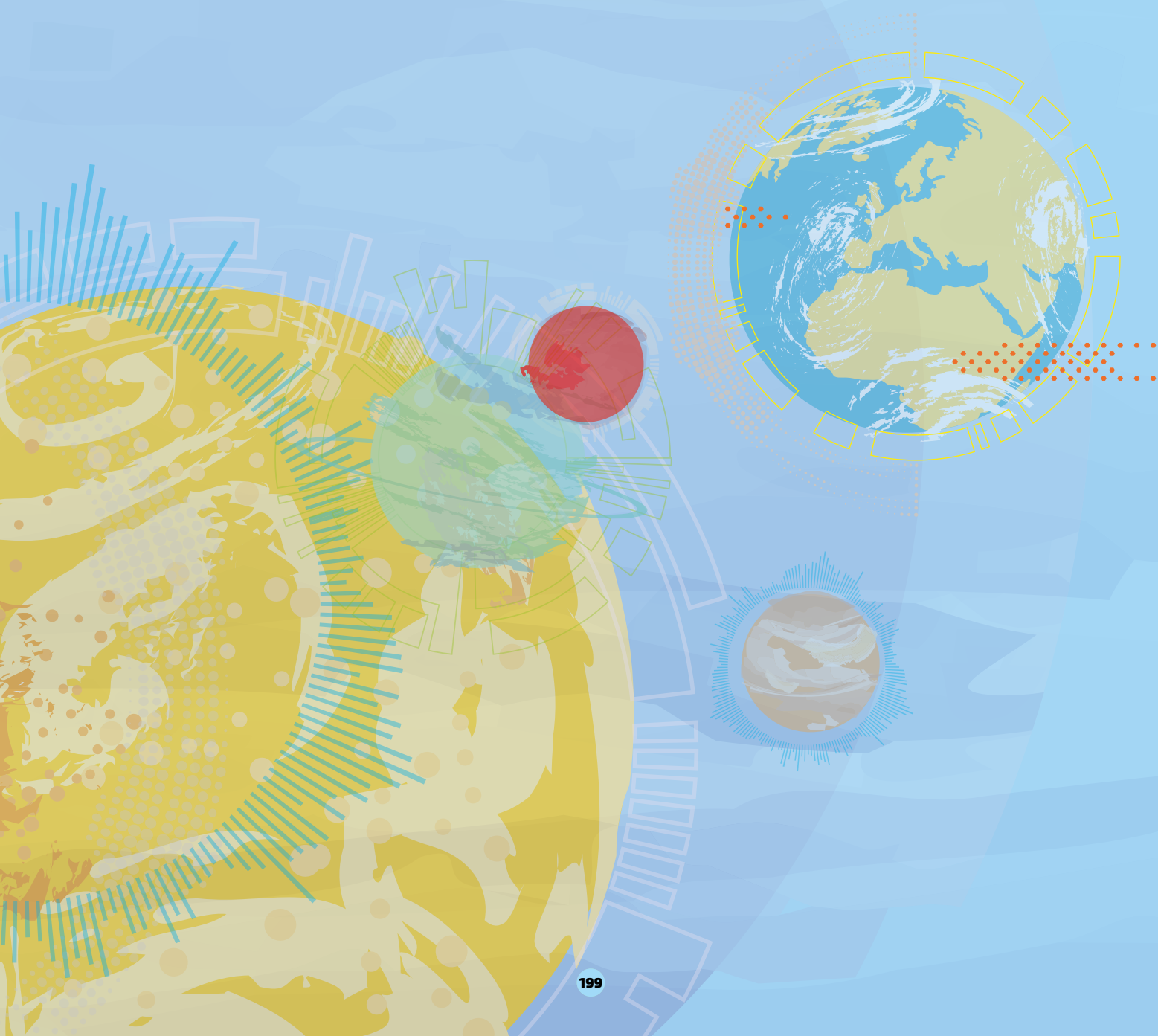
Le CNES doit être en capacité de proposer au CPS des scénarios montrant les conséquences, tant financières qu'en ressources humaines, d'une décision de mission sur les missions prioritaires restant dans le paysage. Les conseils scientifiques (CERES, TOSCA, CPS) peuvent proposer un scénario prioritaire et demander au CNES l'étude de scénarios alternatifs ne remettant pas fondamentalement en cause les capacités budgétaires prévisibles du CNES. Ce processus étant achevé, il revient à la direction du CNES de prendre une décision aussi consensuelle que possible, en prenant en compte l'intérêt scientifique mais également les autres paramètres, souvent nombreux, qui peuvent exister.

La communauté nationale, au travers des complémentarités construites entre son agence spatiale et les organismes de recherche a une forte capacité d'innovation, tant dans le domaine instrumental que dans celui de la production de données à forte valeur ajoutée, ce qui est un atout majeur dans ce contexte évolutif. Pour être saisies et plus encore concrétisées, surtout dans un marché devenu concurrentiel, les nouvelles opportunités qui apparaissent devront être accompagnées par une impulsion politique forte, un soutien des pouvoirs publics volontariste et à la mesure des enjeux, au moins en phase avec ceux déployés par les autres acteurs majeurs du spatial à l'échelle internationale. Actuellement, les ressources du CNES consacrées aux activités scientifiques sont au mieux stables en euros courants et celles des grands organismes de recherche partenaires généralistes (comme le CNRS ou les universités) ou thématiques (Météo-France, Ifremer, IGN, CEA...) sont, pour certains, en diminution et de ce fait insuffisantes pour permettre de tirer le plein bénéfice du partenariat original que CNES et organismes ont su construire au cours des cinquante dernières années.

En conclusion, le challenge à relever consiste à répondre aux évolutions rapides qui affectent le domaine spatial pour en tirer le meilleur profit. Ces évolutions doivent conduire à faire de la science spatiale un axe majeur de développement pour les décennies à venir au sein du CNES. Il a vocation, avec ses partenaires, à proposer à ses tutelles de fédérer les multiples contributions évoquées dans cette prospective scientifique.



CONCLUSION



Le Séminaire de Prospective Scientifique (SPS) qui vient de s'achever est la conclusion d'un long travail préparatoire qui s'est étendu sur plus d'un an et qui a fortement mobilisé la communauté scientifique ainsi que les personnels de diverses directions et sous-directions du CNES. L'essentiel de la réflexion a porté sur les questionnements scientifiques qui apparaissent comme prioritaires et potentiellement porteurs d'avancées majeures dans les prochaines années. Mais ce SPS s'est aussi attaché à conduire une analyse des évolutions récentes du monde spatial et des conséquences qui pouvaient en découler pour la science.

Au niveau scientifique, les grandes questions avaient été identifiées dans la décennie précédant ce séminaire et les principales missions qui seront réalisées dans les cinq à dix, voire quinze prochaines années sont, de fait, déjà définies. Elles sont souvent la concrétisation d'une réflexion programmatique internationale dans laquelle les divers acteurs français du spatial ont joué un rôle important. Plus rarement (vu le temps de développement des expériences spatiales), de nouvelles questions ou inflexions marquantes dans quelques thématiques majeures sont néanmoins apparues.

Ainsi, dans le domaine des Sciences de l'Univers, le SPS a souligné à nouveau le rôle structurant du programme scientifique obligatoire de l'ESA. Ce programme ne couvre cependant pas certaines thématiques importantes pour lesquelles les équipes françaises ont des compétences à la fois scientifiques et instrumentales. Il a donc été rappelé qu'il fallait réserver une place substantielle aux collaborations bi ou multilatérales hors ESA et ce sera le rôle du CPS d'y veiller.

Si aucune grande question nouvelle n'a émergé, deux domaines scientifiques déjà identifiés lors du précédent SPS à La Rochelle (et même avant) sont aujourd'hui mûrs pour prendre une place grandissante au cours de la décennie à venir : les missions comme **Euclid**, **Lisa** et **Athena** dédiées à l'étude du lentillage et des ondes gravitationnelles (y compris celles associées aux phases inflationnaires de l'Univers) et de la population des trous noirs vont permettre de tester une physique nouvelle (comme la nature de l'espace-temps), grâce à des observations qui vont très au-delà de ce qu'on peut observer en laboratoire.

De même, les missions scientifiques dédiées à l'étude des exoplanètes et plus largement des exo-systèmes stellaires telles que programmées dans le cadre de l'ESA (**Cheops**, **Plato**, **Ariel**) ouvrent des champs de recherche nouveaux autour de l'habitabilité planétaire et des déterminants de l'organisation des systèmes stellaires. La recherche des origines de la vie et des premières traces de vie si difficiles à identifier sur Terre reste naturellement un enjeu majeur. À côté des missions d'exploration in situ du système solaire (comme **Juice** à l'ESA ou **MMX** et **Hayabusa** dans le cadre bi-latéral) une participation française active au retour d'échantillons, notamment martiens, dans le cadre du programme d'exploration E3P est une forte priorité. Pour cela, le SPS a recommandé que la communauté nationale œuvre pour convaincre l'Europe de développer un centre de curation, traitement et analyse de ces échantillons.

Il est à noter que nombre des missions évoquées précédemment feront appel pour leur exploitation scientifique à de nombreuses observations réalisées depuis le sol. Le SPS s'est inquiété de l'absence de mécanisme programmatique clair permettant de prendre en compte dans ces missions cette nécessité d'observations réalisées par des observatoires majeurs (ESO, ALMA, ...). Il est souhaitable qu'à l'avenir une coordination formelle des agences concernées en amont des décisions de réalisation de mission soit mise en place.

Dans le domaine des Sciences de la Terre, un besoin rappelé depuis de nombreuses années est celui visant à assurer la continuité dans le temps des mesures d'un certain nombre d'observables indicateurs des évolutions des milieux sous l'effet des changements globaux, et notamment climatique. Ce suivi est essentiel pour cerner la dynamique de ces évolutions et tenter d'anticiper au mieux leurs impacts. Les dix dernières années ont été marquées par la mise en place opérationnelle du programme Copernicus qui permet d'assurer cette continuité d'observations. Associé au programme spatial d'EUMETSAT, l'ensemble des variables pour lesquelles la continuité de mesures est assurée est très satisfaisant. Le savoir-faire français, en altimétrie, imagerie, spectroscopie... a beaucoup contribué à la mise en opération de ces satellites. Naturellement, le SPS soutient les nouvelles phases de développement de ces programmes et souhaite que l'implication française dans la mise en place de ces missions au travers des expertises acquises reste très forte.

Par ailleurs, en Sciences de la Terre, plus que l'accès à de nouveaux observables, c'est l'amélioration des résolutions spatiales, temporelles et spectrales qui sera dimensionnant pour le futur. En effet, les questions scientifiques émergentes font une large place à la prise en compte des effets d'intermittence, aux rôles des événements extrêmes ou des hétérogénéités spatiales dans les tendances observées. De même, l'étude des interfaces entre milieux (côtier/littoral, milieux urbain/rural...), entre écosystèmes impose, elle aussi, des résolutions toujours plus fines. Enfin, les impacts des changements globaux s'évaluent à des échelles aussi proches que possible de l'échelle des organisations humaines. Pour répondre à ces améliorations souhaitées, des développements technologiques innovants tant sur les instruments que sur les systèmes de vol vont être nécessaires.

Comme mentionné précédemment, le SPS a également conduit une réflexion spécifique sur les évolutions du monde du spatial et ses implications sur la nature des missions elles-mêmes, mais également sur les aspects situés en amont et en aval des missions.

Les missions les plus novatrices dépendent très souvent de la capacité à mettre en œuvre des technologies nouvelles répondant aux besoins exprimés (parfois depuis longtemps !) d'une nouvelle mesure. Pour répondre au mieux à cela, il faut étendre les activités de recherche et technologie (R&T) à des communautés scientifiques situées au-delà du périmètre classique des laboratoires thématiques de la recherche spatiale (i.e., physique, chimie, biologie, ingénierie, informatique, mathématiques appliquées...). Des filières technologiques existent et il sera essentiel d'être en mesure d'identifier celles qu'il est nécessaire de soutenir, même en l'absence de mission pouvant les utiliser à un horizon immédiat, sous peine de perdre des compétences difficilement remplaçables. Cela demandera d'élargir la diffusion des appels d'offres R&T vers les communautés mentionnées précédemment et probablement d'envisager d'émettre un appel d'offre R&T dédié spécifiquement aux aspects mathématiques, numérique et informatique.

Les nanosatellites ont fait l'objet d'une réflexion particulière visant à identifier dans quelles configurations ces vecteurs pourraient être en mesure de réaliser des missions d'intérêt scientifique. Les vols en formation ou les essaims de nanosatellites offrent des possibilités de mesures très originales dans le domaine de l'observation de la Terre ou de la planétologie. Ces stratégies multisatellites sont apparues comme les plus intéressantes pour la recherche.

Le domaine des données est quant à lui au centre de beaucoup d'enjeux et en très forte évolution : la volumétrie des données explose, le traitement requis pour passer de l'observation à la donnée est de plus en plus complexe et consommateur de ressources et l'information recherchée nécessite de plus en plus de combiner ou hybrider les données spatiales entre elles ou avec des observations autres, le plus souvent depuis le sol et/ou de les associer à des modèles, souvent via des techniques d'assimilation.

Ainsi, les missions demandant toujours davantage de sensibilité, il sera nécessaire de recourir de plus en plus souvent à des arbitrages de concepts de mission, notamment pour la mesure de certains paramètres instrumentaux extrêmement difficiles à conduire au sol et dont la détermination ne pourra se faire qu'en vol en utilisant à la fois les redondances dans les données acquises et des méthodes d'apprentissage profond permettant de les extraire de ces données en vol. Cela nécessite par exemple des simulations dites end-to-end intégrant une modélisation des instruments et réalisations Monte Carlo pour analyser les incertitudes.

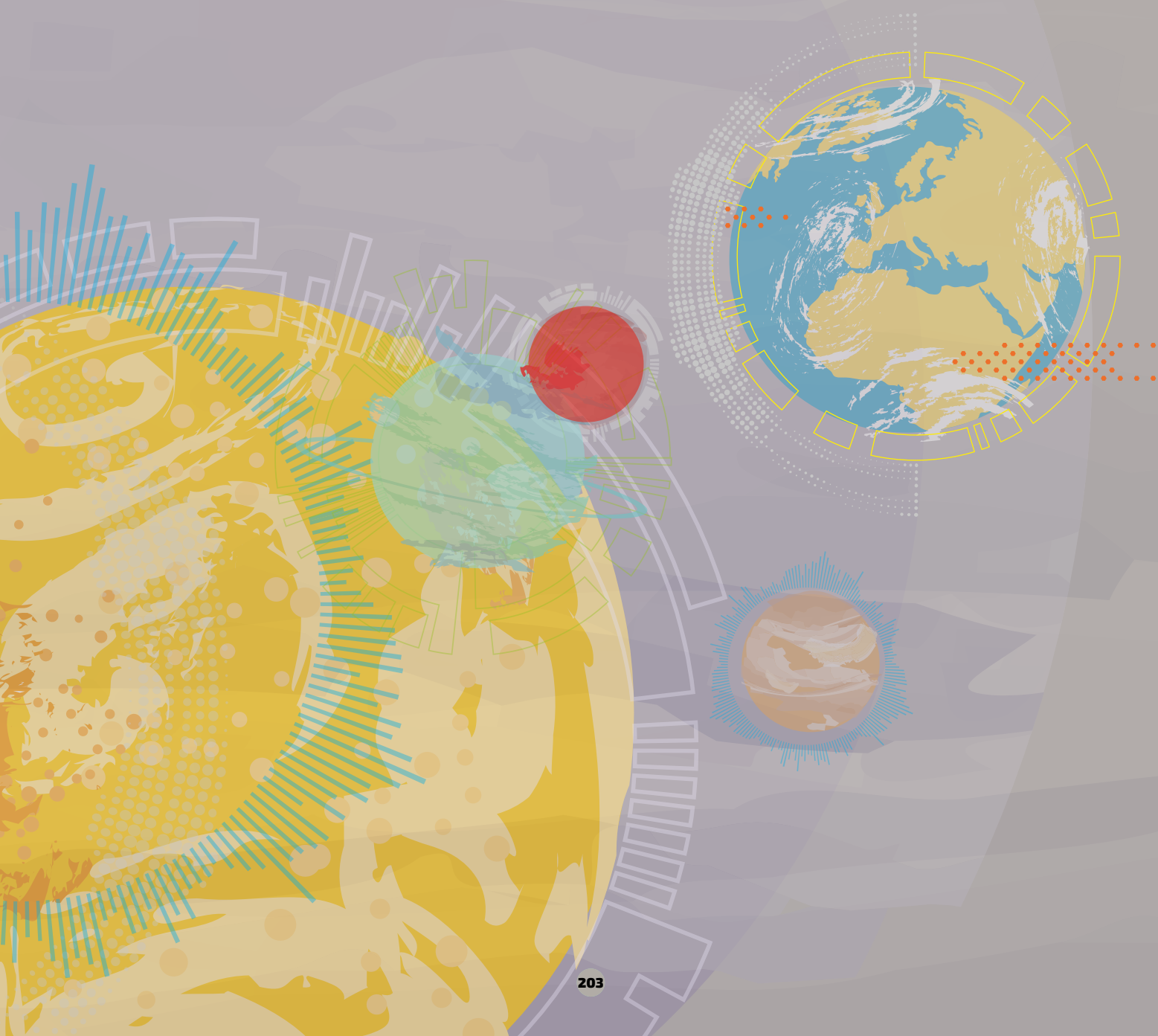
Par ailleurs, notamment dans le domaine des sciences de l'environnement, l'accès ouvert aux données publiques et l'existence de marchés potentiels pour des produits de prévision et gestion des risques, de surveillance réglementaire ou d'aménagements du territoire ont fait émerger des acteurs nouveaux, en particulier privés, ce qui ne va pas aller sans poser quelques questions de souveraineté. L'ensemble de ces éléments a conduit le SPS à définir ce domaine des données comme un chantier prioritaire tant dans les domaines techniques, numériques, informatiques qu'organisationnels.

Ces évolutions demanderont d'avoir recours à des centres de calcul de grande rapidité et capacité en mémoire qui ne pourront probablement être que des centres nationaux ou européens. Il semble également indispensable d'établir, mission par mission, une organisation de la chaîne de traitement permettant de prendre en compte d'une part la nécessité de proximité liée à un besoin de traitement des données brutes par les instrumentalistes pour les opérations, et d'autre part les besoins des analyses scientifiques qui ne peuvent se faire que sur des grands centres de calcul et de données multi-thématiques. Cela suppose d'associer dès les phases d'étude tous les acteurs impliqués dans une mission (y compris sa phase d'exploitation).

Enfin, beaucoup des éléments évoqués ci-dessus vont nécessiter des moyens humains (en nombre et compétence) et matériel qui risquent souvent de dépasser les moyens qu'un seul organisme de recherche peut mettre en œuvre seul. Le partenariat, à différents niveaux (i.e., entre organismes nationaux, au niveau européen et au niveau mondial) va devoir être renforcé et probablement sur des bases de coopération revues car nécessitant plus de partage et de mise en commun. Quelques initiatives de ce type ont déjà été mises en place et vont dans le bon sens (infrastructure nationale de pôles de données DataTerra ou encore le SCO, Observatoire Spatial du Climat au niveau international). Mais les enjeux sont tels qu'ils nécessitent d'aller encore bien plus loin dans la construction de ces partenariats, le CNES devant, pour sa part, s'assurer de la bonne marche de l'ensemble de la chaîne allant de l'observation à la production de l'information scientifique.

On voit que les années qui viennent vont dessiner un nouveau paysage du spatial. Dans ce contexte, la recherche, au travers de son potentiel d'innovation technologique et scientifique, aura un rôle essentiel à jouer dans le positionnement du CNES et de ses partenaires. Nous espérons que les réflexions conduites dans cet exercice de prospective scientifique y contribueront efficacement.

ANNEXES



ANNEXE 1

Synthèse de l'appel à contributions

L'exercice de prospective 2019 a débuté avec la publication le 6 août 2018 d'un appel à contributions du CNES ouvert à toute proposition originale et à tout type d'investigation pertinente en lien avec l'outil spatial. Au 22 octobre, date de clôture de l'appel, 222 contributions avaient été reçues, proposées par 177 chercheurs différents issus de 64 laboratoires appartenant à 14 organismes de recherche. En fonction du ou des sujets abordés, chacune d'entre elles a ensuite été affectée au(x) groupe(s) de travail concerné(s) (thématique et/ou transverse), qui l'a ensuite analysée, avec l'aide d'experts du CNES si nécessaire.

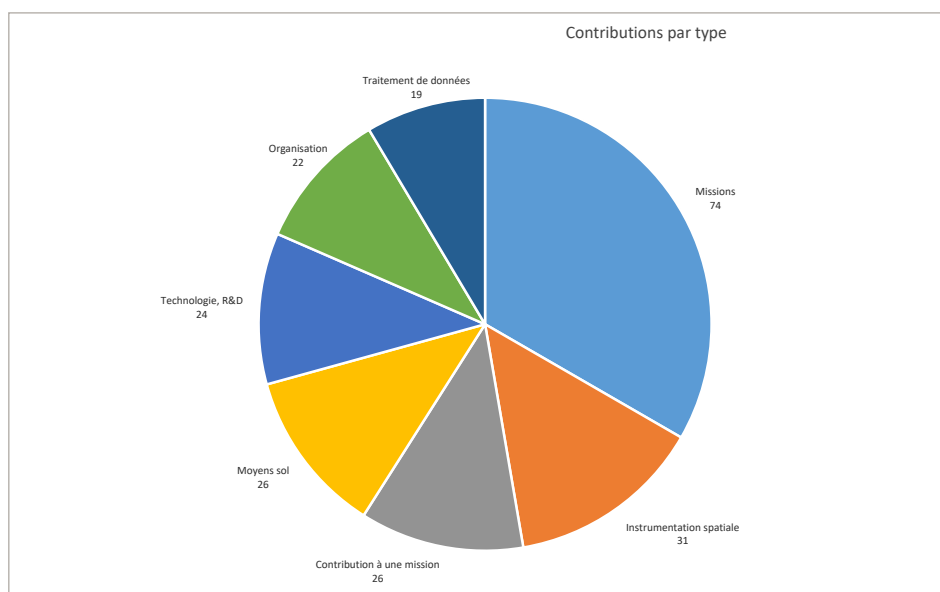


Fig. 1 : Répartitions des contributions selon les thématiques.

© CNES/LA MARLE Olivier, 2019
.....

Les contributions portent autant sur des missions, que sur des activités technologiques ou des aspects organisationnels, comme le montre la figure 2.

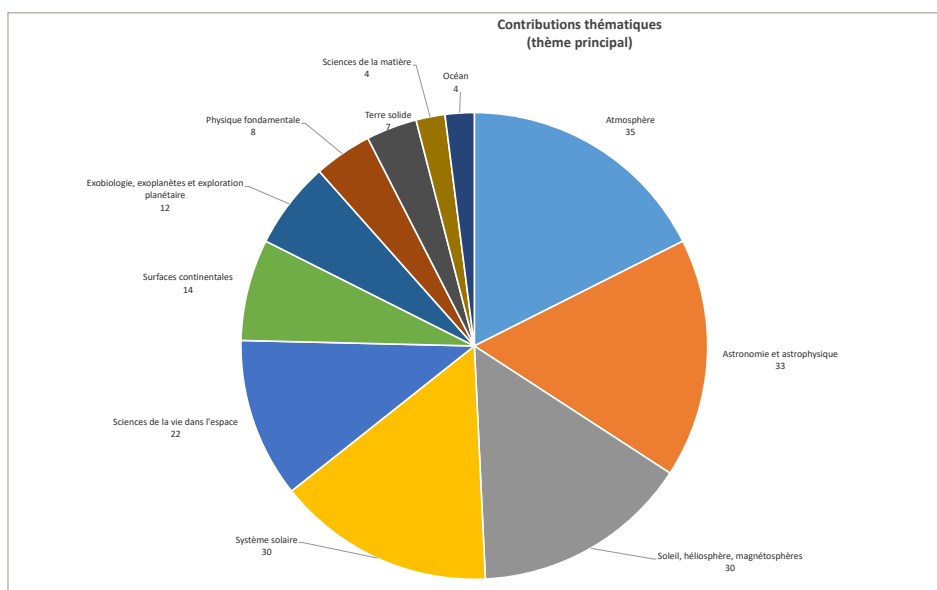


Fig. 2 : Type de contributions reçues. La catégorie « Moyens sol » inclut les moyens aéroportés. La catégorie « Missions » inclut les missions spatiales (y compris nanosatellites), les expériences en microgravité et les expériences sous ballon.

© CNES/LA MARLE Olivier, 2019
.....

Les contributions ont ainsi constitué des entrées importantes pour le travail des groupes dont la synthèse des réflexions figure dans les 17 rapports publiés mi-juillet 2019.
 Une réponse personnalisée synthétisant l'analyse du ou des groupes concernés a été envoyée à chaque auteur de contribution et à son directeur d'unité.

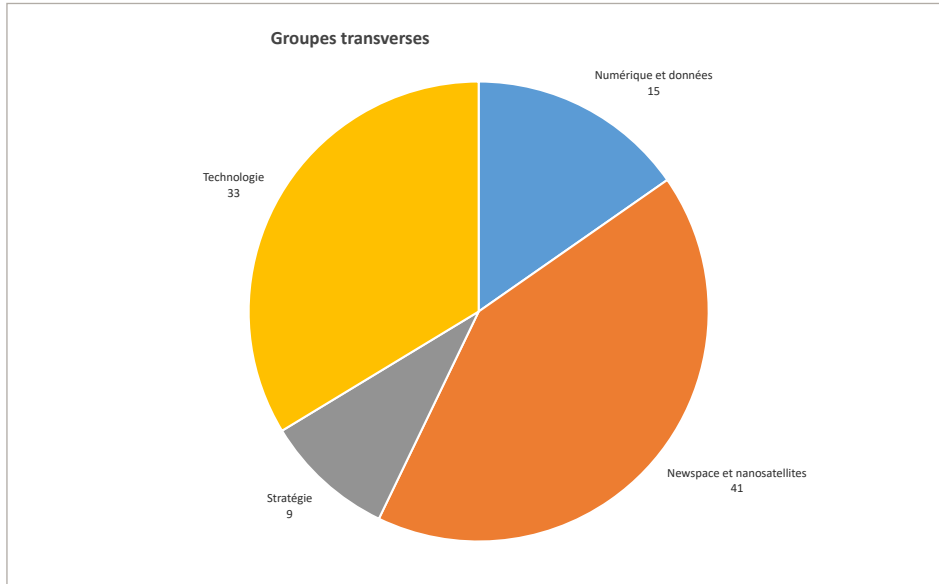


Fig. 3 : Volumétrie des contributions concernant les groupes transverses.

© CNES/LA MARLE Olivier, 2019

ANNEXE 2

Auditions des laboratoires

Dans le cadre de la prospective, un groupe de travail conjoint CNES-organismes a été mis en place afin d'évaluer l'adéquation entre les estimations des ressources financières et humaines requises et le potentiel des principaux laboratoires impliqués dans le spatial, avec pour mandat :

- Ecouter les équipes de direction des laboratoires quant à leurs perspectives programmatiques, aux évolutions attendues notamment en termes d'effectifs techniques et à leurs conséquences sur les futurs programmes,
- Proposer des mesures issues d'une synthèse des principales remontées et visant à accompagner les évolutions jugées nécessaires.

Dix-huit directeurs de laboratoires choisis au vu du volume de leurs activités en partenariat avec le CNES ont été auditionnés par le groupe en janvier 2019 (AIM, APC, CESBIO, IAP, IAS, IPAG, IPGP, IRAP, LAB, LAM, LATMOS, LEGOS, LESIA, LISA, LMD, LPC2E, LPP, LSCE), sur la base d'une liste de questions qui leur avait été préalablement envoyée.

Le groupe a synthétisé ces échanges en une série de recommandations, présentée aux directeurs de laboratoires auditionnés début juillet 2019, et résumées ci-dessous.

- **Une politique spatiale concertée :**
 - Mettre en place un partage au niveau national avec et entre les laboratoires du premier cercle (laboratoires spatiaux) sur la vision programmatique et les hypothèses. Par exemple, échanger régulièrement sur les évolutions programmatiques, les priorités de coopération internationale, etc.
- **Des montages de projet anticipés et optimisés :**
 - Mettre en place une préparation concertée au niveau national pour chaque priorité programmatique forte issue du séminaire du Havre, avec un porteur pour la préparation (type chef de projet en proximité du scientifique porteur), pour leur donner le maximum de chances de réussite, et pour préparer au plus tôt une organisation cohérente et optimisée au niveau national.
 - Orienter les montages projets à l'échelle nationale en réseau voire en équipes intégrées (entre CNES et laboratoires, et/ou entre laboratoires).
- **Des ressources et des compétences suivies :**
 - Veiller à la préservation des compétences cœur de métier, des expertises rares, de leur valorisation.
 - Construire une vision solidaire et partagée entre laboratoires tenant compte de leurs compétences respectives, leur stratégie, les enjeux programmatiques et l'organisation, avec une attention particulière pour les segments sols et les exploitations dont la complexité va croissant.
- **Des évolutions technologiques préparées :**
 - Assurer la veille pour identifier les technologies et les savoir-faire pour l'avenir, identifier les technologies de rupture et les préparer.
- **Des partenariats maîtrisés :**
 - Optimiser l'articulation avec les autres organismes et les universités, composer avec un environnement mouvant (newspace) et de nouvelles collaborations (pays émergents...). Préciser le rôle du CNES, entre agence de moyens, partenaire scientifique...

- **Exploitation scientifique :**

- Identifier et renforcer dès le début d'un projet les ressources nécessaires pour son exploitation scientifique, incluant les éventuels besoins en moyens sol complémentaires. Renforcer le suivi de l'ensemble des missions en incluant le suivi des ressources humaines et financières, par exemple dans le cadre de revues d'exploitations conjointes.

Le groupe a également relevé des suggestions d'amélioration dans le fonctionnement de l'appel à propositions de recherche (APR) et du programme de thèses du CNES :

- Clarifier les périmètres respectifs des différentes sources de financement, entre APR, projets CNES décidés, programme R&T, Programmes Nationaux de l'INSU...
- Clarifier et rendre plus efficace les processus : règles d'attribution et de sélection, retour aux proposant, durée d'instruction des dossiers, financements pluriannuels.
- Décloisonner les financements et les thématiques.
- Thèses CNES : certains laboratoires mentionnent des difficultés liées au principe du cofinancement (difficultés pour trouver le complément de financement, phasage des calendriers de sélection respectifs...).

ANNEXE 3

Synthèse des ateliers et restitution finale

Lors du séminaire de restitution, une après-midi a été consacrée à des ateliers afin que les experts rassemblés puissent réfléchir ensemble et proposer des modalités de mise en œuvre de certaines recommandations proposées dans les synthèses des groupes.

Dix ateliers ont ainsi rassemblé entre 20 et 30 participants.

Deux animateurs ont préparé et conduit chaque atelier, et ont fourni en fin de séance des éléments de conclusions. Ces derniers ont été rassemblés et présentés lors de la journée finale du séminaire.

Nous fournissons ici un bref résumé des thématiques abordées dans les différents ateliers qui se sont déroulés pendant le séminaire, ainsi que la présentation de la restitution finale qui reprend les principales recommandations. Rappelons qu'à contrario des chapitres précédents, qui étaient le fruit de travaux de groupes de travail constitués préalablement au séminaire et qui visaient ainsi à une certaine exhaustivité de leur thème, cette annexe a pour ambition de tracer les éléments abordés en présentiel lors du séminaire, fournissant ainsi un retour immédiat et non structuré sur les sujets abordés. Cette « matière brute » sera exploitée par la suite dans l'initiation des actions pour la mise en œuvre des recommandations du séminaire.

Atelier n°1 : Financement de la recherche spatiale

Animateurs : Athena COUSTENIS et Jean-Paul BERTHIAS

Le budget spatial institutionnel géré par le CNES ne permet pas de répondre positivement à l'ensemble des besoins de la communauté, et l'écart entre ce qu'il serait souhaitable et ce qu'il est possible de faire va grandissant. Dans ce contexte il est indispensable de se tourner vers de nouvelles sources de financements pour la recherche spatiale. Les guichets potentiels sont nombreux sur les plans national et européen, public, privé ou autres. L'objectif de l'atelier est de partager les expériences positives ou négatives.

Atelier n°2 : Infrastructures ballon, avion, drones, HAPS

Animateurs : Frédéric PAROL et Pierre TABARY

La communauté française développe, maintient et déploie depuis des années maintenant des avions (Safire) et des ballons au service de diverses thématiques scientifiques. Ces vecteurs sont très utilisés pour la préparation et la validation de missions spatiales. On a vu ces dernières années un rapprochement entre les avions et les ballons, avec des participations croisées dans les comités scientifiques correspondants, la volonté d'aller vers des instruments interopérables et l'organisation de campagnes intégrées combinant sol – avions – ballons. A cela s'ajoutent les nouvelles opportunités offertes par le développement des HAPS (High Altitude Pseudo Satellites) et des drones. L'atelier vise à travailler sur la valorisation et la pérennisation des infrastructures françaises existantes, de proposer des synergies entre ces moyens et mieux associer ces plateformes aux travaux de développement instrumental en France et en Europe.

Atelier n°3 : Données et numérique

Animateurs : Vincent TOUMAZOU et Pierre BRASSEUR

Le Groupe de Travail « Données et Numérique » a identifié 15 recommandations qui sont structurées selon 4 axes majeurs dans le document préparatoire à l'atelier :

- Evoluer de l'approche centrée sur l'ensemble satellite-capteurs-technologies vers une logique aussi centrée sur les données et leurs usages,
- Evoluer d'une logique de moyens spécifiques au spatial vers une approche partagée avec nos partenaires et les communautés utilisatrices,

- Mieux structurer l'accès aux données et services,
- Maximiser l'utilisation des données avec des méthodes à l'état de l'art.

L'objectif de l'atelier est d'identifier la criticité de chaque recommandation, la communauté qu'elle implique, les modalités pour identifier les moyens requis pour sa mise en œuvre, les éventuels verrous à sa réalisation.

Atelier n°4 : Exploitations

Animateurs : Monique ARNAUD et François JOCTEUR-MONROZIER

Les missions envisagées à court et moyen termes vont impliquer des flux de données notablement plus importants et souvent associés à une complexification du traitement des données brutes nécessitant de nouvelles expertises. Dans ce contexte, le coût des exploitations va nécessairement croître à l'avenir, cette tendance étant inscrite dans la durée. En parallèle, beaucoup de missions vont au-delà de leur durée de vie initiale, et leurs données restent pertinentes bien après la fin de la mission, ce qui génère un surcoût d'exploitation et d'accès aux données, rarement pris en compte lors du dimensionnement des missions. L'atelier vise à aborder la façon de mieux anticiper et dimensionner les coûts d'exploitation, étudier les modes de financement possible et la gestion des extensions, et regarder comment assurer une expertise pérenne dans les métiers associés.

Atelier n°5 : Enseignement

Animateurs : Michel DIAMENT et Laurence MONNOYER-SMITH

Les sciences spatiales reposent en grande partie sur les capacités d'innovation des chercheurs et des ingénieurs. Il est donc nécessaire d'attirer des étudiants parmi les meilleurs vers ces domaines et de favoriser leur capacité créative. En parallèle de ce besoin récurrent des sciences spatiales, le marché du spatial s'ouvre au privé. Une forte demande par les entreprises privées de personnels formés aux sciences spatiales devrait être associée à cette ouverture. Ces évolutions actuelles appellent des réflexions sur les formations, au-delà des cursus existants dans les formations orientées vers les applications du domaine spatial et à proposer des formations ad hoc. L'émergence de Centres Spatiaux Universitaires est l'occasion de s'interroger sur les compétences et les nouveaux besoins nécessaires. Par ailleurs, l'appropriation de connaissances scientifiques liées ou non au spatial par la population et les décideurs constitue un enjeu pour la communauté scientifique.

Atelier n°6 : Les modes d'intervention dans les projets scientifiques spatiaux

Animateurs : Jean-Marie HAMEURY et Juliette LAMBIN

Les recommandations du groupe stratégie soulignent le besoin de renforcer le partage stratégique entre le CNES et ses partenaires, mais également entre les laboratoires de manière à avoir une politique spatiale française concertée. La plupart des évolutions majeures qui se dessinent et qui interpellent le CNES vont nécessiter de mettre en œuvre des solutions, des outils qui dépassent les possibilités du seul CNES. Il se trouve que pour leur très grande majorité ces évolutions concernent dans des termes très voisins les autres organismes scientifiques. Il y a donc à la fois nécessité et opportunité de renforcer, voire de réinventer, le partenariat inter organismes, non seulement pour mettre en commun des moyens mais aussi pour assurer une cohérence et une efficacité des messages vers les ministères. Le cadre pour mener de telles actions inter organismes (fortes et opérationnelles) n'est pas bien établi aujourd'hui.

Atelier n°7 : Partenariat CNES - Laboratoires

Animateurs : Martin GIARD et Philippe LIER

Le « Groupe Transverse Stratégie » a conduit des interviews des laboratoires spatiaux qui ouvrent un certain nombre de recommandations pour mieux travailler ensemble. Cet atelier vise à approfondir ces réflexions, notamment en développant quelques idées de départ :

- Equipes « intégrées » CNES-laboratoires : dans quel cadre et comment ?
- Mise en commun des ressources laboratoires, comment ?
- Montage de projet : comment renforcer cette étape ?
- Quelle gouvernance pour le partenariat CNES-Labos ?
- Responsabilités et engagements mutuels
- Place de l'industrie dans le partenariat CNES-Labos ?

Atelier n°8 : Les partenariats - les relations avec l'industrie

Animateurs : Pierre KERN et Patrick CASTILLAN

Les programmes de réalisations d'instruments pour le spatial s'appuient sur des relations tripartites entre le CNES, les laboratoires, en lien avec leurs tutelles, et le monde de l'industrie. De façon historique, si les laboratoires sont fortement impliqués dans la réalisation des instruments pour l'observation de l'univers, ce sont plus souvent les industriels qui portent les développements d'instruments pour l'observations de la Terre, l'importante valeur ajoutée des laboratoires dans ce cas étant dans la définition de la mission et dans l'exploitation de la donnée.

L'équilibre actuel doit être réévalué à l'aune des évolutions en cours : méthodes de conception/réalisation, montée en compétence de certaines entreprises ou partenaires économiques, évolution des laboratoires notamment en terme de ressources humaines, et surtout évolution du besoin des missions scientifiques. L'atelier se propose de travailler sur les apports attendus des 3 partenaires (labo, CNES, industrie) en vue d'étayer ou compléter les recommandations des différents groupes pour remplir les missions qui nous incombent.

Atelier n°9 : Technologie

Animateurs : Christophe SALOMON et Céline ANGELELIS

En matière de R&T, le maintien d'un équilibre entre les différents objectifs identifiés dans le groupe de travail « Technologie » est un exercice délicat et doit procéder au final d'une déclinaison de la stratégie du CNES et des laboratoires scientifiques. Questions posées à l'atelier :

- Comment définir et maintenir un équilibre entre les R&T induites par les projets en préparation et celles destinées à faire émerger des technologies de rupture ?
- L'émergence de ces technologies de rupture pourrait-elle être favorisée par l'élargissement de la communauté scientifique au-delà des laboratoires thématiques spatiaux bien connus, en impliquant par exemple des laboratoires d'ingénierie, de physique, de chimie, de biologie, de mathématiques appliquées et d'informatique, qui agiraient en lien avec les premiers ?
- Si oui, comment établir les contacts et monter des actions avec ces laboratoires ?
- A ce stade, quelles technologies émergentes pourraient constituer les filières technologiques d'excellence voire, dans une démarche de techno-push, donner des clés pour des missions spatiales nouvelles ?

Atelier n°10 : Europe

Animateurs : Cyril CREVOISIER et Aurélien CARBONNIERE

L'espace est un domaine hautement stratégique et prioritaire pour l'Union Européenne qui lui dédie un budget en hausse constante. Afin de demeurer un partenaire international de premier plan et d'être un leader mondial dans le domaine de la R&DT, l'UE favorise l'excellence scientifique, la compétitivité et l'innovation par la promotion d'une meilleure coopération et coordination entre les différents acteurs. Cet atelier « Europe » vise à échanger sur la relation de la communauté nationale avec le développement de la politique de recherche spatiale en Europe et de son implication dans les différents programmes européens :

- Comment mieux s'impliquer dans le développement des stratégies et politiques européennes de recherche spatiale (ex. EC, ESA, EUMETSAT, Copernicus) ?
- Comment mieux organiser l'effort de recherche national pour répondre collectivement à des enjeux européens et globaux ?
- Comment mieux coordonner/organiser l'effort européen vis-à-vis de l'exploitation des longues séries de données issues de l'observation spatiale ?

PLANCHES DE RESTITUTION FINALE PRÉSENTÉES LE 10 OCTOBRE 2019



Comment pourrions-nous traiter les recommandations ?

- Programmer des missions spatiales et les réussir
- Mieux faire ce qu'on fait déjà
- Se projeter dans le futur
- Quels moyens
- Avec qui ?

Merci aux animateurs des ateliers !

N°	Atelier	Animateurs
1	Financement de la recherche spatiale	Athéna COUSTEMIS + Jean-Paul BERTHIAS
2	Infrastructures ballon, avion, drone	Frédéric FAROL + Pierre TABARY
3	Données et numérique	Vincent TOUMAÏDOU + Pierre BRASSEUR
4	Exploitations	Monique ARNAUD + JOCEUR-MONROZIER
5	Enseignement	Michel DIAMENT + Laurence MONNOYER-SMITH
6	Les modes d'intervention dans les projets scientifiques spatiaux	Jean-Marie HAMEGURY + Juliette LAMBIN
7	Les partenariats CNES - laboratoires	Martin GIARD + Philippe LIER
8	Les partenariats - les relations avec l'industrie	Pierre KERN + Patrick CASTILLAN
9	Technologie	Christophe SALOMON + Céline ANGELELIS
10	Europe	Cyril CREVOISIER + Aurélien CARBONNIÈRES



Programmer des missions spatiales et les réussir

- **Modes d'interventions, partenariat à travailler « en amont »**
 - Modèles différents selon la thématique Univers ou Observation de la Terre, on ne va pas essayer de faire un modèle unique.
 - Formaliser systématiquement le montage des projets en amont, entre les différents partenaires (CNES, labos, industrie, etc.), et bien définir la chaîne de responsabilités.
 - Suivi managérial du mode de fonctionnement sur les phases ultérieures du projet jusqu'à son exploitation.
 - S'assurer de la reconnaissance du travail de l'ensemble des acteurs
- ⇒ **Peut conduire à passer plus de temps en phase amont pour consolider**
- **Placer la donnée « aussi » au centre**
 - Data Management plan dans les phases amont
- **Apport des avions/ballons/drones pour les missions spatiales**
 - Augmenter la visibilité de l'offre française à l'ESA et à EUMETSAT et la positionner dans les plans de Cal/Val des missions

SPS Le Havre | 8-10 octobre 2019

Juliette Lambin: Comment pourrions-nous traiter les recommandations?

3



Mieux faire ce qu'on fait déjà

- **Relations CNES-labos-industrie**
 - Améliorer l'intégration CNES-labos: échanges/visites de personnel dans les deux sens.
 - Explicitation des enjeux et contraintes de chaque partenaire, formalisation et suivi
- **Ballons/avions/drones: feuilles de routes**
 - Court-terme: ballons /FdR nationale des infrastructures
 - 2022: avion/ballons/drones sur feuille de route européenne ESFRI
- **Financement: mieux faire connaître Connect by CNES à la communauté scientifique**
 - prise de contact entre les scientifiques et les industriels non spatiaux
- **Techno / filière nanosat: structuration en cours non lisible, perte d'opportunités**
 - Coordination et suivi CNES => apport d'expertise vers les labos et universitaires
- **Thèses, en particulier la question des cofinancements**
 - Revoir le processus et/ou proposer tout ou partie de financements pleins

SPS Le Havre | 8-10 octobre 2019

Juliette Lambin: Comment pourrions-nous traiter les recommandations?

4



Se projeter dans le futur

- **Techno: élargir les problématiques technologiques au-delà de l'écosystème habituel**
 - ouverture plus large à la communauté scientifique et la communication qui lui est associée.
- **Avions/ballons/drones:**
 - Relancer un programme de développement instrumental pour l'ensemble des possibilités d'emport (avions/ballons/drones/autres).
 - Vers une stratégie nationale pour les « gros » drones pour la recherche
- **Données:**
 - rôle pivot du GENCI pour les besoins à 5 ans; projets cibles pour besoins en IA (formation, application, recherche).
- **Europe: être pro-actifs ! PFUE 2022**
 - Voie traditionnelle et portes latérales
- **Enseignement: développer la culture scientifique spatiale**
 - Via fraction APR? ressources existantes
 - Avions/ballons
 - SHS

SPS Le Havre | 8-10 octobre 2019

Juliette Lambin: Comment pourrions-nous traiter les recommandations?

5



Quels moyens ?

- **Recours à des guichets « non spatiaux »: partage d'expérience**
 - Il serait intéressant que le CNES les collecte et les partage.
- **Financements européens**
 - H2020 pour les exploitations: besoin de coordination Agences – UE en amont
 - Coordination organismes pour un support aux montages d'affaires européens
- **Ressources humaines**
- Besoins de RH... critiques sur les profils instrumentalistes, de la réponse aux AO à la connaissance instrumentale
 - Pistes: organismes « moins » scientifiques, laboratoires mixtes avec industrie?
- Formation: Aller chercher des gens formés à une discipline non liée au spatial
 - Actions courtes et thématiques pour créer une dynamique

SPS Le Havre | 8-10 octobre 2019

Juliette Lambin: Comment pourrions-nous traiter les recommandations?

6



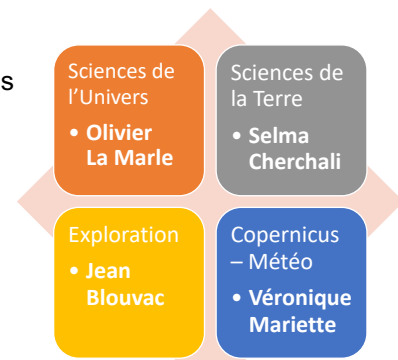
Avec qui ?

- **Coordinations CNES-Labos:**
 - Formaliser des rencontres CNES-Labos à différents niveaux pour partager une stratégie commune, au niveau des DUs, et au niveau DIA/organismes.
 - CIO régulier au niveau des directeurs d'instituts
 - Un des premiers points à l'ordre du jour pourrait être une discussion sur la répartition des tâches CNES/Labos/industrie
 - Inciter le CNRS à faire croître sa "cellule spatiale" qui devrait pouvoir interagir directement avec le CNES
- **Universités / grandes écoles**
 - Proposition d'un GT d'état des lieux pour aller vers un réseau d'universités spatiales et/ou , Groupe Espace à la CPU?



Quelques compléments

- **Programmer des missions spatiales et les réussir**
 - « multi-paramètre »: créer les conditions de réalisation des missions
 - Equilibre préparation – performance - exploitation
- **Mieux faire ce qu'on fait déjà**
 - Réorganisation DIA au CNES
- **Se projeter dans le futur**
 - Ménager l'équilibre court terme / long terme
 - Lien avec les autres prospectives
- **Quels moyens**
 - Responsables de programme CNES pour proposer une **synthèse, optimisation** à l'échelle des programmes européens (programme boards)
- **Avec qui**
 - Rôle clé des thématiciens au CNES, des groupes TOSCA, CERES, SdV...
 - Pas que le CNES => restitutions à venir aux partenaires



4 programmes



Le mot de la fin

- Et maintenant, à nous tous de faire vivre cette prospective « ensemble »...

de former une « équipe de France » sur la scène européenne et internationale...

mais plus important de former une « équipe de science » du spatial !



Jason-2 : dernière TC aujourd'hui
20 juin 2008 – 10 octobre 2019



ANNEXE 4

Les participants

AGHANIM Nabila	OSUPS - Observatoire des Sciences de l'Univers Paris Sud
AKAMATSU Silvère	INSP - Institut des NanoSciences de Paris
AMEN Laurence	CNES/DCO
AMSIF Kader	CNES/DIA/SE
ANGELELIS Céline	CNES/DIA/PF
ARBEILLE Philippe	CERCOM - CEntre Recherche COeur Maladies vasculaire
ARNAUD Monique	AIM - Astrophysique Instrumentation Modélisation
ARNAUD Nicolas	CNRS/INSU
ARNOULD Jacques	CNES/DCO
AUCHERE Frederic	IAS - Institut d'Astrophysique Spatiale
BAGHDADI Nicolas	Irstea - Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
BARDE Sébastien	CNES/DNO/SC
BARRET Didier	IRAP - Institut de recherche en astrophysique et planétologie
BEGUE Agnès	TETIS - Territoires, Environnement, Télédétection
BEN HASSEN Bouthaina	CNRS/INSU
BENABED Karim	IAP - Institut d'Astrophysique de Paris
BENEZETH Isabelle	MESRI - Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation
BENTAMY Abderrahim	Ifremer
BERGAMETTI Gilles	LISA - Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes
BERGER Jean-Philippe	IPAG - Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble
BERGER Sylvie	CNES/DCO
BERGOUIGNAN Audrey	IPHC - Institut pluridisciplinaire Hubert Curien
BERNARDEAU Francis	IAP - Institut d'Astrophysique de Paris
BERTHIAS Jean-Paul	CNES/DSO/DA
BESSON Claudine	ONERA
BEUZIT Jean-Luc	LAM - Laboratoire d'Astrophysique de Marseille
BIAGIOTTI Magali	CNES
BIVER Nicolas	LESIA - Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique
BLANKE Bruno	CNRS/INSU
BLOUVAC Jean	CNES/DIA/SE
BLUMSTEIN Denis	CNES/DSO/SI
BOCCALETTI Anthony	LESIA - Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique
BOISNARD Laurent	CNES/DNO/OT
BONNEFOND Pascal	SYRTE - Systèmes de Référence Temps-Espace
BORDE Pascal	LAB - Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux
BOUSQUET Philippe	LSCE - Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement
BOUSQUET Pierre	CNES/DSO/SC
BOUTIN Jacqueline	LOCEAN - Laboratoire d'océanographie et du climat
BOUTTE Pierre	CNES/DPI
BOUYER Philippe	LP2N - Laboratoire Photonique, Numérique et Nanosciences
BOY Jean-Paul	GRGS - Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale
BRASSEUR Pierre	IGE - Institut des Géosciences de l'Environnement

BRUDIEU Patrice	MESRI - Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation
BRUN Sacha	AIM - Astrophysique Instrumentation Modélisation
BRUTIN David	IUSTI - Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels
BUCHLIN Eric	IAS - Institut d'Astrophysique Spatiale
CALISTI Annette	P2IM - Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires
CAMPAN Mireille	JAXA PARIS OFFICE
CARBONNIERE Aurélien	CNES/DIA/TEC
CASOLI Fabienne	Observatoire de Paris
CASSE Fabien	APC - Astroparticules et Cosmologie
CASTILLAN Patrick	CNES/DSO/OT
CATALA Claude	Observatoire de Paris
CAVALIER Fabien	LAL - Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire
CHALON Gilles	CNES/DSO
CHAMBON Philippe	CNRM, Météo-France
CHERCHALI Selma	CNES/DIA
CHIAVASSA Florence	CNES/DCO
CHRISTENSEN Nelson	ARTEMIS - Laboratoire d'Astrophysique Relativiste, Théories, Expériences, Métrologie, Instrumentation, Signaux
CLAUD Chantal	OVSQ - Observatoire Versailles Saint Quentin-en Yvelines
CLEDASSOU Rodolphe	IN2P3
CLERBAUX Cathy	LATMOS - Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales
COLL Patrice	LISA - Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes
COSTERASTE Josiane	CNES/DIA
COTTIN Hervé	LISA - Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes
COUDE DU FORESTO Vincent	LESIA - Observatoire de Paris
COUSTENIS Athena	LESIA - Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique
CREVOISIER Cyril	LMD - Laboratoire de Météorologie Dynamique
DABAS Alain	CNRM, Météo-France
DAMBRINE Gilles	CNRS/INSIS
DE VIRON Olivier	LIENSs - Littoral, Environnement et Sociétés
DECOURCHELLE Anne	AIM - Astrophysique Instrumentation Modélisation
DEDIEU Gérard	CESBIO - Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère
DEFER Eric	LA - Laboratoire d'Aérodynamique
DEGRAVE Martine	CNES/DIA/SE
DELACOURT Christophe	IUEM - Institut Universitaire Européen de la Mer
DELANNAY Renaud	IPR - Institut de Physique de Rennes
DELAROCHE Christophe	CNES/DIA/SE
DELCOURT Dominique	LPC2E - Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace
DELEFLIE Florent	IMCCE - Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides
DENIEL Carole	CNES/DIASE
DESERT François-Xavier	IPAG - Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble
DIAMENT Michel	IPGP - Institut de Physique du Globe de Paris
DOMINGO Pascale	CORIA - Complexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochimie
DRILLET Yann	MERCATOR
DUBOURG Vincent	CNES/DSO/BL
DUCROCQ Véronique	CNRM, Météo-France
DUFOUR Gaëlle	LISA - Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes
DUFOURC Erick	CNRS
DUMARCHEZ Jacques	LPNHE - Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Energies
ENCRENAZ Therese	LESIA - Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique
FALCON Eric	CNRS - MSC - Université Paris Diderot
FAUP Michel	CNES/DIA/AE

FAUVE Stéphane	ENS/LPS - Laboratoire de Physique Statistique
FERRANDO Philippe	AIM - Astrophysique Instrumentation Modélisation
FERRO-FAMIL Laurent	IETR - Institut d'Électronique et de Télécommunications de Rennes
FLAMANT Cyrille	LATMOS - Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales
FLAUD Jean-Marie	MESRI - Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation
FLORES Hector	GEPI - Galaxies, Etoiles, Physique et Instrumentation
FOGLIZZO Thierry	AIM - Astrophysique Instrumentation Modélisation
FONTAINE Dominique	LPP - Laboratoire de Physique des Plasmas
FORGET François	LMD - Laboratoire de Météorologie Dynamique
FOUQUET Thomas	CNES/DIA
FRATTER Claude	CNES/DIA
FRAY Nicolas	LISA - Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes
GANACHAUD Alexandre	LEGOS - Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales
GASCOIN Simon	CESBIO - Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère
GASNAULT Olivier	IRAP - Institut de recherche en astrophysique et planétologie
GAUQUELINKOCH Guillemette	CNES/DIA/SE
GENOVA Françoise	ObAS - Observatoire Astronomique de Strasbourg
GERIN Maryvonne	CNRS/INSU
GIARD Martin	CNRS/INSU
GIEBELS Berrie	CNRS/IN2P3 - Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules
GLEYZES Alain	CNES/DSO/OT
GODIN-BEEKMANN Sophie	LATMOS - Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales
GOSSET Marielle	GET - Géosciences Environnement Toulouse
GREFF Marianne	IPGP - Institut de Physique du Globe de Paris
GUAY Philippe	CNES/DPI
GUILLOT Stéphane	Isterre - Institut des sciences de la Terre
GUINLE Joëlle	CNES
GUTSCHER Marc-André	LGO - Laboratoire Géosciences Océan
HAEFFELIN Martial	IPSL - Institut Pierre Simon Laplace des sciences de l'environnement
HALDENWANG Pierre	AMU - Aix-Marseille Université
HAMEURY Jean-Marie	ObAS - Observatoire Astronomique de Strasbourg
HEBRARD Guillaume	IAP - Institut d'Astrophysique de Paris
HENRY Patrice	CNES/DNO/OT
HUBERT-MOY Laurence	LETG - Littoral - Environnement - Télédétection - Géomatique
HULOT Gauthier	IPGP - Institut de Physique du Globe de Paris
HURET Nathalie	OPGC - Observatoire de physique du globe de Clermont-Ferrand
HUYNH Frédéric	IRD - L'Institut de recherche pour le développement
JEGOU Fabrice	LPC2E - Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace
JOCTEUR-MONROZIER F.	CNES/DNO
JOURDAN Olivier	LaMP - Laboratoire de Météorologie Physique
JUVIN Didier	CEA/DAM
KALATHAKIS Flora	CNES/DF/GO/TL1
KECKHUT Philippe	LATMOS - Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales
KERN Pierre	CNRS/INSU
KERR Yann	CESBIO - Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère
KNODLSEDER Jürgen	IRAP - Institut de recherche en astrophysique et planétologie
KRETZSCHMAR Matthieu	LPC2E - Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace
KUBIK Philippe	CNES/DSO/SI
LA MARLE Olivier	CNES/DIA
LABONNOTE Laurent	LOA - Laboratoire d'Optique Atmosphérique
LAGOUARDE Jean-Pierre	INRA - Institut National de la Recherche Agronomique
LAMBERT Catherine	CERFACS - Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique

LAMBIN Juliette	CNES/DIA/TEC
LANDRAGIN Arnaud	SYRTE - Systèmes de Référence Temps-Espace
LAUDET Philippe	CNES/DIA/SE
LAURENS André	CNES/DIA/PF
LAURENT Caroline	CNES/DSO
LAVERGNE Laurence	IRAP - Institut de recherche en astrophysique et planétologie
LAY Philippe	CNES/DSO
LE FRANC Jean-Pascal	CNES/DPI
LE GOFF Roland	Sodern
LE RAY Didier	INCIA - Institut de Neurosciences Cognitives et Intégratives d'Aquitaine
LE TRAON Pierre-Yves	MERCATOR
LE TREUT Hervé	IPSL - Institut Pierre Simon Laplace des sciences de l'environnement
LEBLANC Francois	LATMOS - Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales
LEMAGNER Frédéric	CNES/DPI
LEMELLE Laurence	LGLTPE - Laboratoire de Géologie de Lyon : Terre, Planètes et Environnement
LEPONCIN-LAFITTE Christophe	SYRTE - Systèmes de Référence Temps-Espace
LEVOIR Thierry	CNES/DNO
LEVY Marina	LOCEAN - Laboratoire d'océanographie et du climat
LIER Philippe	CNES/DSO/SC
LIFERMANN Anne	CNES/DIA/SE
LOISEAU Annick	ONERA/LEM - Laboratoire d'étude des microstructures
LOPES Louise	CNES/PF
LOUARN Philippe	IRAP - Institut de recherche en astrophysique et planétologie
LOZACH Myriana	CNES/DIA/SE
LUBAC Bertrand	EPOC - Environnements et Paléoenvironnement Océaniques
MAGLIONE Mario	ICMCB - Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux
MAIGNAN Fabienne	LSCE - Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
MAISONGRANDE Philippe	CNES/DIA/SE
MAKSIMOVIC Milan	LESIA - Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique
MANDEA Mioara	CNES/DIA/SE
MARCHAUDON Aurelie	IRAP - Institut de recherche en astrophysique et planétologie
MARIETTE Véronique	CNES/DIA/SE
MARQUES Joao	IAS - Institut d'Astrophysique Spatiale
MARSAL Olivier	CNES/DNO/OT
MASSONNET Didier	CNES/DIA/SE
MEYSSIGNAC Benoît	LEGOS - Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales
MICHEL Patrick	OCA/Lagrange
MOCQUET Antoine	LPGN - Laboratoire de Planétologie et Géodynamique
MONIN Jean-Louis	CNES/DIA/SE
MONNOYER-SMITH Laurence	CNES
MONTMESSIN Franck	LATMOS - Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales
MORANCAIS Didier	AIRBUS DEFENCE AND SPACE
MORBIDELLI Alessandro	OCA/Lagrange
MOREL Jean-luc	IMN - Institut des maladies neurodégénératives de Bordeaux
MOTTE Frédérique	IPAG - Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble
MOUNIER Yvonne	Université de Lille
MUSTIN Christian	CNRS / LIEC
NAZARE Julie Anne	CRNH - Centre de Recherche en Nutrition Humaine
NEINER Coralie	LESIA - Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique
OHANESSIAN Gilles	CNRS
OLLIVIER Marc	IAS - Institut d'Astrophysique Spatiale
OMONT Alain	IAP - Institut d'Astrophysique de Paris

PAILLET Jerome	Ifremer
PANET Isabelle	IPGP - Institut de Physique du Globe de Paris
PAPINEAU Nicole	CNRS
PAROL Frederic	LOA - Laboratoire d'Optique Atmosphérique
PASCAL Robert	IBMM - Institut des Biomolécules Max Mousseron
PATHIER Erwan	ISterre - Institut des Sciences de la Terre
PAVY-LE-TRAON Anne	Université de Toulouse
PELLARIN Thierry	IGE - Institut des Géosciences de l'Environnement
PENDUFF Thierry	IGE - Institut des Géosciences de l'Environnement
PEROUX Céline	LAM - Laboratoire d'Astrophysique de Marseille
PERRIN Guy	CNRS/INSU
PETITBON Isabelle	CNES/DIA/SE
PETY Jérôme	IRAM - Institut de Radioastronomie millimétrique
PIAT Michel	APC - Astroparticules et Cosmologie
PICARD Ghislain	IGE - Institut des Géosciences de l'Environnement
PIERANGELO Clemence	CNES/DSO/SI/SA
PLOUGONVEN Riwal	LMD - Laboratoire de Météorologie Dynamique
POIVERT-BECQ Frédérique	CNES/DIA
POLIDORI Laurent	CESBIO - Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère
PONTAUD Marc	CNRM, Météo-France
PORQUET Delphine	LAM - Laboratoire d'Astrophysique de Marseille
PRADEILLES Frédéric	CNES/DNO
PRESSECQ Francis	CNES/DSO/AQ
PRIETO Eric	LAM - Laboratoire d'Astrophysique de Marseille
PUGET Jean-Loup	IAS - Institut d'Astrophysique Spatiale
PUISSANT Anne	LIVE - Laboratoire Image Ville Environnement
QUANTIN Cathy	LGLTPE - Laboratoire de Géologie de Lyon : Terre, Planètes et Environnement
RABIN Gilles	CNES/DIA
RAIZONVILLE Philippe	CNES/DPI/LI
RAVETTA François	LATMOS - Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales
REBOURGEARD Philippe	CEA/IRFU
RENAULT Cécile	LPSC - Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie
REYLE Céline	OSU THETA, UTINAM
ROCARD Francis	CNES/DIA/SE
ROQUET Hervé	CNRM, Météo-France
ROSIER Bernard	ONERA
ROUJEAN Jean-Louis	CESBIO - Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère
ROUSSEL Jean-François	ONERA
SAGNES Isabelle	CNRS/INSIS
SALOME Marie-Claude	CNES/DCO
SALOMON Christophe	LKB - Laboratoire Kastler Brossel
SCHMITT Didier	ESA - Directorate Exploration Robotique et Humaine
SCHOEPP-COTHENET Barbara	BIP - Bioénergétique et Ingénierie des Protéines
SCOT Gael	CNES/DF
SEGALEN Loïc	OSU Ecce Terra
SEGERS Philippe	GENCI
SEMELIN Benoit	LERMA - Laboratoire d'Etudes du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique et Atmosphères
SIRMAIN Christian	CNES/DIA
SOUYRIS Jean-Claude	CNES/DIA
SUCHET Lionel	CNES/DGD
SYLVESTRE-BARON Annick	CNES/DIA/SE

TABARY Pierre	CNES/DIA/SE
TAGGER Michel	ANR-DGPIE
TASTET Pierre	CNES/DSO/AQ
TAWNEY Timothy	NASA
THEBAULT Erwan	LPGN - Laboratoire de Planétologie et de Géodynamique de Nantes
THIEBAULT Stéphanie	MNHN - Muséum National d'Histoire Naturelle
TISON Céline	CNES/DSO/SI
TIZIEN Pierre-Gilles	CNES/DIA/VT
TOPLIS Michael	OMP - Observatoire Midi-Pyrénées
TOUMAZOU Vincent	CNES/DNO
TRAINEAU Jean-Claude	ONERA
TUCKEY Philip	SYRTE - Systèmes de Référence Temps-Espace
TUSSEAU Marie-Hélène	MESRI - Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation
ULTRE-GUERARD Pascale	CNES/DPI
VALORGE Christophe	Thales Alenia Space
VARGAS André	CNES/DSO/BL
VAUTARD Robert	LSCE - Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
VERDIER Nicolas	CNES/DSO/DA
VERGANI Susanna	GEPI - Galaxies, Etoiles, Physique et Instrumentation
VIBERT Laurent	CNRS/INSU
VIDAL Pierre-Paul	CNRS, Université Descarte, SSA
VIGNOLLES Cécile	CNES/DIA/SE
VISO Michel	CNES/DIA/SE
VUITTON Véronique	IPAG - Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble
WEBER Christiane	TETIS - Territoires, Environnement, Télédétection
WOLF Peter	SYRTE - Systèmes de Référence Temps-Espace
WOZNIAK Hervé	CNAP Astronomie



Participants au Séminaire Prospective Scientifique 2019

© CNES/FISHER Antoine, 2019