



SÉMINAIRE DE  
**PROSPECTIVE  
SCIENTIFIQUE**

**SAINT-MALO**  
**08 AU 10 | 20**  
**OCTOBRE | 24**



**« L'imagination est plus importante que la connaissance.  
Car la connaissance est limitée, tandis que l'imagination embrasse  
le monde entier, stimulant le progrès, engendrant l'évolution. »**

Albert Einstein (1879 – 1955)

Dans le domaine de la prospective spatiale, l'imagination joue un rôle fondamental. Si nos connaissances actuelles nous permettent d'appréhender et de mieux comprendre le monde qui nous entoure, c'est notre capacité à rêver au-delà des frontières connues, à explorer l'inconnu, à repousser les limites qui alimente les découvertes de demain. C'est précisément dans cet esprit de vision et d'audace que le Cnes organise, tous les cinq ans, son Séminaire de prospective scientifique (SPS), sous l'égide du Comité des programmes scientifiques (CPS) et dans le contexte de l'agence de programme recherche spatiale créée cette année et portée par le Cnes.

Ce séminaire revêt une importance stratégique majeure. Il constitue un moment clé pour tracer les grandes lignes de l'avenir des sciences spatiales en France. C'est un cadre exceptionnel où la communauté scientifique, en étroite collaboration avec le Cnes et ses partenaires, se réunit pour évaluer les progrès réalisés depuis le dernier séminaire qui s'est tenu au Havre en 2019, et pour identifier les priorités ainsi que les enjeux qui définiront la recherche spatiale dans les décennies à venir.

Les discussions et travaux de ce séminaire s'articulent autour de plusieurs thématiques cruciales, qui touchent aussi bien aux sciences de l'univers qu'à l'exploration spatiale et à l'observation de la Terre. Ces thèmes sont portés par les différents groupes thématiques des comités Ceres et Tosca. Le comité Ceres couvre une grande diversité de domaines scientifiques, à savoir :

- **Astronomie et astrophysique ;**
- **Physique fondamentale ;**
- **Soleil, héliosphère, magnétosphères ;**
- **Système solaire ;**
- **Exobiologie, exoplanètes, protection planétaire ;**
- **Sciences de la matière ;**
- **Sciences de la vie.**

Parallèlement, le comité Tosca se penche sur des thématiques tout aussi essentielles, parmi lesquelles figurent :

- **Terre solide ;**
- **Océan ;**
- **Surfaces continentales ;**
- **Atmosphère.**

En plus de ces groupes thématiques, des groupes spécifiques ont été constitués pour aborder des défis émergents et structurer la réflexion autour de sujets stratégiques. Cette année, ces groupes se sont particulièrement concentrés sur des thématiques novatrices et critiques, telles que :

- Le **bilan et les perspectives des moyens humains et matériels** nécessaires pour la science de demain ;
- Les **cadres des futures missions internationales**, qui nécessitent une coopération toujours plus étroite entre les nations et les agences spatiales ;
- La **relation entre NewSpace et science**, dans un contexte où le secteur privé joue un rôle croissant dans le domaine spatial ;
- La **réduction de l'empreinte environnementale** des activités scientifiques spatiales, un enjeu devenu central à l'heure de la transition écologique.

Un groupe de réflexion final a synthétisé ces différents apports sous un thème global : « **Une stratégie intégrant tous les possibles : quels moyens pour quelles ambitions ?** ». Ce thème vise à poser la question des ressources nécessaires pour réaliser les ambitions que nous nourrissons en matière de recherche et d'exploration spatiales, tout en tenant compte des défis économiques et environnementaux actuels.

Le séminaire de Saint-Malo est l'aboutissement de plusieurs mois de travail intensif, initié dès mars 2023. Il repose sur les analyses approfondies des groupes thématiques et spécifiques, mais également sur un appel à contributions lancé par le Cnes. Cet appel a permis à l'ensemble de la communauté scientifique de proposer des idées nouvelles, des objectifs de recherche ambitieux et des expériences spatiales novatrices.

Le présent rapport compile les réflexions libres de chaque groupe de travail. Il constitue une véritable feuille de route pour orienter les activités scientifiques futures du Cnes et de la recherche spatiale en France, tout en intégrant les impératifs de durabilité, de coopération internationale, et en prenant en compte l'émergence des nouveaux acteurs du spatial, en particulier les entreprises privées. Ces réflexions se traduisent par une synthèse de recommandations endossées par le CPS (cf. chapitre « Synthèse des réflexions »). Ces recommandations définiront les grandes lignes de la programmation scientifique du Cnes à moyen et long terme. L'agence de programme, et notamment son comité des partenaires, facilitera leur mise en œuvre.

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à toutes celles et ceux qui ont participé activement à cette réflexion collective. Nous remercions chaleureusement les membres des comités Ceres et Tosca, ainsi que leurs présidents respectifs, pour leur travail exemplaire, ainsi que les membres des groupes spécifiques pour leurs contributions précieuses, les experts scientifiques issus de nos partenaires et du Cnes, les responsables thématiques du Cnes, ainsi que toutes les personnes ayant répondu à l'appel à contributions. Un remerciement particulier s'adresse aux membres du CPS et à leurs présidents successifs, Gilles Bergametti et Jean-Marie Hameury, pour leur dévouement et leur implication durant ces dix-huit mois de préparation.

Enfin, nous tenons à saluer la résilience dont la communauté scientifique spatiale a fait preuve au cours des dernières années, marquées par des crises sans précédent. Malgré ces défis, l'engagement, la créativité et la capacité à envisager l'avenir avec optimisme nous permettent aujourd'hui d'avancer avec confiance. Nous disposons désormais de toutes les clés pour bâtir ensemble l'avenir de la recherche spatiale en France, en Europe, et au-delà.

Nous remercions une fois encore toute la communauté scientifique spatiale pour sa contribution exceptionnelle à ce processus, et nous sommes convaincues que les fruits de ce séminaire permettront de tracer une voie ambitieuse et durable pour l'exploration et la connaissance de l'Univers, de notre Système solaire et de notre Planète.

**Pascale Ultré-Guérard et Mioara Manda,**  
*Direction de la stratégie du Cnes*

## **INTRODUCTION** .....

# **SOMMAIRE**

### **SCIENCES DE LA TERRE**

SYNTHÈSE DU TOSCA .....	6
TERRE SOLIDE.....	23
OCÉAN.....	32
SURFACES CONTINENTALES .....	44
ATMOSPHÈRE .....	58

### **SCIENCES DE L'UNIVERS, MICROPESANTEUR ET EXPLORATION**

SYNTHÈSE DU CERES .....	70
PHYSIQUE FONDAMENTALE.....	85
ASTRONOMIE ET ASTROPHYSIQUE .....	95
SOLEIL HÉLIOSPHERE MAGNÉTOSPHÈRES .....	106
SYSTÈME SOLAIRE.....	118
EXOBILOGIE, EXOPLANÈTES, PROTECTION PLANÉTAIRE .....	128
SCIENCES DE LA VIE ET EXPLORATION HUMAINE DE L'ESPACE .....	139
SCIENCES DE LA MATIÈRE.....	148

### **LES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES AU CNES** .....

### **LES ACTIVITÉS DE R&T**.....

### **GROUPES SPÉCIFIQUES**

QUELS MOYENS POUR LA SCIENCE DE DEMAIN : BILAN ET PERSPECTIVES.....	175
QUEL CADRE POUR LES MISSIONS INTERNATIONALES DE DEMAIN ?.....	186
SCIENCE ET NEW SPACE .....	196
RÉDUCTION DE L'EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE DES ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES SPATIALES .....	209

### **SYNTHÈSE DES RÉFLEXIONS : UNE STRATEGIE INTEGRANT TOUS LES POSSIBLES : QUELS MOYENS POUR QUELLES AMBITIONS ?** .....





# SCIENCES DE LA TERRE



# COMITE TOSCA (TERRE SOLIDE, OCÉAN, SURFACES CONTINENTALES, ATMOSPHÈRE)

A. Bégué, J. Boutin, A. Carbonnière, R. Cattin, P. Chambon, S. Cherchali, C. Crevoisier (Président sortant Tosca), A. Dabas, C. Deniel, A. Deschamps, O. de Viron, Y. Faugère, S. Gascoin, S. Le Gac, P.Y. Le Traon (Président entrant Tosca), P. Maisongrande, F. Perosanz, A. Sylvestre Baron

La Terre est un système complexe dont les différentes composantes (atmosphère, océan, cryosphère, surfaces continentales, terre solide) interagissent les unes avec les autres par le biais de processus géologiques, physiques, chimiques et biologiques qui se déroulent sur un large éventail d'échelles spatiales et temporelles et qui sont, de surcroît, influencées par l'activité humaine. La compréhension du système Terre nécessite une approche globale pour observer et comprendre ses différentes composantes et leurs interfaces, couplages et interactions (Fig. 1). La plupart des grandes questions scientifiques se trouve à ces interfaces ce qui nécessite des approches scientifiques intégrées entre les différentes composantes et disciplines.

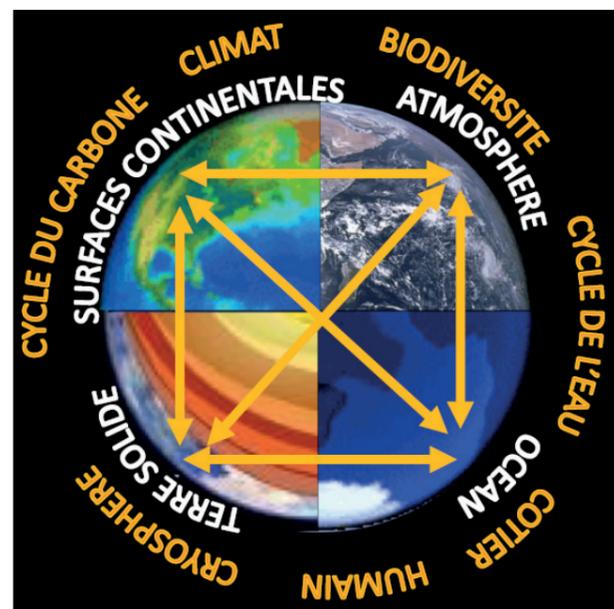


Fig. 1. L'observation du système Terre, de ses composantes et interactions.

Les sciences en observation de la Terre visent à comprendre et prévoir l'évolution de la planète, à distinguer les effets induits par l'homme de la variabilité naturelle et à mieux comprendre et anticiper les risques et aléas sur les activités humaines dans

une très grande diversité de milieux. Elles traitent de l'évolution des grands cycles climatiques (énergie, eau, biogéochimie) et des stocks et flux entre les différentes composantes du système terrestre. Les recherches menées portent sur les processus physiques et biogéochimiques, les mécanismes complexes de rétroaction, les interactions d'échelle et les mécanismes d'échanges et de couplage entre l'atmosphère, l'océan, la cryosphère et les surfaces continentales ; elles s'attachent également à comprendre les mécanismes de formation et d'évolution de la Terre solide, sa composition et sa structure thermique, sa dynamique interne, la génération du champ magnétique terrestre et les couplages avec ses enveloppes externes.

Le sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) indique clairement que des changements sans précédent sont en train de se produire dans le climat de la Terre. Depuis la publication de ce rapport, les indicateurs clés sur l'état de la planète (Fig. 2) montrent une accélération nette des changements et imposent des mesures fortes d'atténuation et d'adaptation. On parle à juste titre d'une urgence climatique. L'année 2023 a ainsi été une année de tous les records au niveau de la température mondiale et de l'océan. Les impacts sur les écosystèmes et la biodiversité qui sont soumis à d'autres pressions humaines (e.g. augmentation de la population, pollution) sont majeurs comme le rapporte l'IPBES (Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques). Les trois crises que sont le changement climatique, la perte de biodiversité et la pollution menacent la mise en œuvre des objectifs de développement durable et créent ainsi une pression énorme sur les sociétés. Ces enjeux sociétaux majeurs sont reconnus aux plus hauts niveaux politiques : agenda 2030 des Nations Unies et objectifs de développement durable, les COP (Conférence des Parties) climat et biodiversité et plus récemment les conférences des Nations

Unies sur l'océan. Répondre à ces enjeux sociétaux grâce à des mesures d'atténuation et d'adaptation au changement climatique, de réduction des pollutions et de l'effet des activités humaines nécessite des approches basées sur la science afin d'apporter les solutions les plus adaptées. L'observation de la Terre y joue un rôle prépondérant.

Si les satellites d'observation de la Terre sont des outils indispensables et uniques, la compréhension du système Terre nécessite une approche intégrée s'appuyant sur les observations tant satellites qu'in-situ et sur la modélisation. Les observations spatiales permettent une vision globale et répétée

à haute résolution spatiale. Les observations in-situ et mesures sol jouent un rôle essentiel pour la validation et la calibration des mesures satellitaires et pour l'observation de paramètres clés non observables par satellites (e.g. intérieur de l'océan) avec des fréquences d'acquisition complémentaires. La modélisation est fondamentale pour expliquer les phénomènes, intégrer les observations satellites et in-situ pour décrire l'état de la planète, prévoir son évolution pour des échéances allant de quelques semaines, à la saison ou à plus long terme (prévisions décennales, projections climatiques) et développer des scénarios (jumeaux numériques).

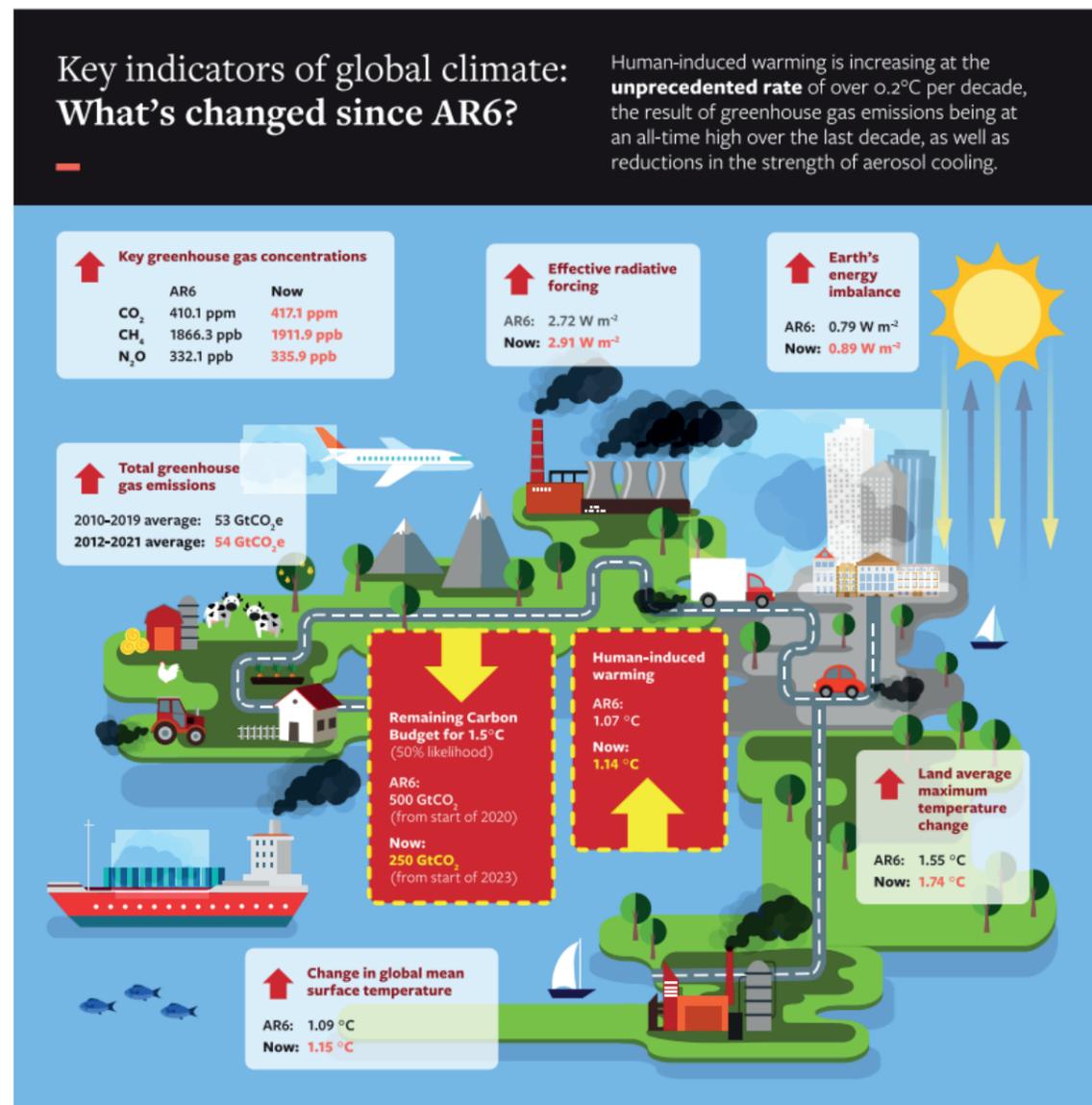


Fig. 2. Evolution des indicateurs climatiques depuis la publication du sixième rapport du GIEC (Forster et al., 2023).

Le Tosca intègre toutes les thématiques en Science de la Terre et s'appuie sur 4 groupes thématiques couvrant les compartiments du système Terre et leurs interfaces, couplages et interactions : Terre Solide, Océan, Surfaces Continentales, Atmosphère.

# 1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

## 1.1 AVANCÉES SCIENTIFIQUES

Le SPS2019 mettait en avant 3 grands défis pour l'Étude et l'Observation de la Terre : améliorer la compréhension du système Terre (cycle de l'eau, cycles biogéochimiques, cryosphère et côtier/littoral), détecter et quantifier les changements globaux (changement climatique, anthropisation, dynamique et la forme de la Terre), identifier et quantifier les enjeux environnementaux et les risques (objectifs de développement durable, pollution atmosphérique, événements extrêmes et biodiversité). Répondre à ces défis supposait d'assurer la continuité des mesures et l'exploitation de longues séries temporelles, d'améliorer la résolution spatiale et temporelle et d'utiliser en synergie des mesures issues d'une ou plusieurs missions spatiales, en combinaison avec des mesures in-situ ou aéroportées.

La continuité des mesures est impérative pour suivre les variables essentielles renseignant sur les changements globaux, cerner la dynamique de ces évolutions et tenter d'anticiper au mieux leurs impacts. Elle doit s'accompagner d'un suivi et de la maîtrise des mesures elles-mêmes, gage de la qualité des données géophysiques finales. A ce titre, la mission **Calipso** a permis sur ses 17 années d'opération (2006-2023) un suivi unique des nuages et des aérosols qui a notamment conduit à la mise en évidence de différents processus de rétroaction climatique tel l'effet de « stabilité », ou effet « d'Iris » qui consiste en la rétractation de la surface des enclumes des nuages lors d'un réchauffement local. Grâce à leur exceptionnelle stabilité spectrale et radiométrique (de l'ordre du centième de Kelvin par an), suivie au jour le jour par le Cnes, Eumetsat et les laboratoires, les trois instruments **Iasi** ont permis le suivi de seize variables essentielles pour l'atmosphère sur 17 années comme un seul instrument, faisant de celui-ci la référence internationale pour l'infrarouge thermique.

Les équipes françaises ont également joué un rôle majeur en pilotant la réanalyse des mesures de géodésie spatiale qui a mobilisé des dizaines d'équipes dans le monde pour le traitement des données des quatre techniques, qui couvrent des périodes de 28 ans (**Doris**), 27 ans (**GNSS**), 41 ans (**VLBI**) et 38

ans (**SLR**). Ce travail a abouti à l'ITRF2020 (International Terrestrial Reference Frame), qui est la réalisation la plus performante à ce jour en termes de couverture, de densité, de précision et de stabilité, avec une précision de l'origine long-terme et de l'évolution temporelle évaluées respectivement à 5 mm et 0,5 mm/an.

La combinaison du programme Copernicus et du programme de météorologie opérationnelle d'Eumetsat, pour lesquels les filières d'excellence françaises contribuent fortement à la mise en opération des satellites, permet de disposer désormais d'une continuité d'observations sans précédent d'un grand nombre de variables essentielles pour l'étude du système Terre. Ainsi, l'extension de la série d'altimétrie de précision (**Topex/Poseidon, Jason-1, 2 et 3**) avec le lancement de **Sentinel-6** en novembre 2020 et les efforts continus de retraitement des données passées, d'amélioration des algorithmes et de caractérisation des erreurs a mis en évidence une accélération nette ( $\sim 0,08$  mm/an<sup>2</sup>) de la montée du niveau moyen des mers qui atteint maintenant plus de 4 mm/an. Au-delà, la communauté scientifique française a apporté des contributions de premier plan sur l'analyse et l'interprétation des données altimétriques combinées aux données gravimétriques (**Grace** et **Grace-FO**) et in-situ (**Argo**) pour le suivi du niveau moyen des mers et du déséquilibre énergétique de la planète. Ces travaux ont confirmé l'accélération significative de l'élévation du niveau de la mer depuis 1993 qui est essentiellement due à une perte de masse accélérée des calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique. Ce type de combinaison multi-capteurs a également conduit à améliorer la connaissance du bilan hydrologique pluriannuel des grands bassins versants tels que l'Amazonie ou le Congo ainsi que de l'hydrodynamique des estuaires. Les données fournies par **Sentinel-1 et -2**, en combinaison avec les missions **Smos** ou **Pléiades** sont également à la base de nombreuses avancées dans le domaine de la cryosphère, dans l'estimation des volumes d'irrigation ou dans l'étude de l'humidité des sols.

L'amélioration des résolutions spatiales, temporelles et spectrales est essentielle pour répondre à diverses questions scientifiques telles que les

hétérogénéités spatiales dans les tendances observées, les événements extrêmes ou encore l'étude des interfaces entre milieux (côtier/littoral, milieux urbain/rural...) et entre écosystèmes. Le lancement de **Swot** en décembre 2022 marque ainsi une révolution pour l'étude des fines échelles océaniques qui jouent un rôle primordial dans le transport d'énergie et de matière. Pour ces études, la donnée spatiale reste la seule observation à la fois globale et à haute résolution. Dans le cadre de la Calibration/Validation (Cal/Val) de **Swot**, plus de vingt campagnes océanographiques internationales ont été coordonnées par les équipes françaises autour du monde sur l'année 2023, illustrant l'effet levier de telles actions pour fédérer des programmes internationaux d'envergure. Concernant la cartographie des surfaces continentales, des progrès significatifs ont été faits sur la classification des classes agricoles (passage de 2 types de culture été/hiver à 8 classes de cultures annuelles) dans les cartes d'occupation du sol qui comprennent désormais 24 classes à l'échelle nationale. Des études sont en cours sur la cartographie saisonnière et en temps quasi-réel, sur l'utilisation combinée de séries **Sentinel-2** et d'images à très haute résolution spatiale telles que **Pléiades** ou **Spot 6/7**. La cartographie des zones littorales a également fait l'objet de travaux spécifiques, comme l'étude du risque d'inondation dans les deltas asiatiques.

La disponibilité croissante de données à haute résolution spatiale a également favorisé une inflexion scientifique vers l'étude de l'impact des activités humaines sur les grands cycles biogéochimiques en donnant accès aux échelles métriques à décimétriques auxquelles les hommes interagissent avec leur environnement (par exemple l'impact des pratiques agricoles sur le stock de carbone des sols). Tirant parti des progrès en Intelligence Artificielle (IA) pour répondre à des enjeux opérationnels ou résoudre des questions écologiques complexes, le suivi des écosystèmes terrestres fait appel à l'ensemble des domaines de la télédétection pour la cartographie, la caractérisation et le suivi de la biodiversité des espèces et des habitats. Les cinq dernières années ont également marqué une évolution dans l'étude des événements extrêmes et particulièrement des séismes pour lesquels l'utilisation conjointe de mesures **Sentinel-1** et **GNSS** a permis d'améliorer la compréhension des séismes lents, qui durent de

quelques semaines à quelques mois, et la répartition des hétérogénéités frictionnelles le long des zones de subduction.

Un cas d'étude particulièrement intéressant permet de mettre en lumière la transversalité des questions adressées dans l'étude du système Terre reliant enveloppes internes et externes : l'éruption du Honga-Tonga du 15 janvier 2022. Les ondes générées se sont propagées dans le sol, et dans l'atmosphère jusqu'à l'ionosphère. L'empreinte des perturbations atmosphériques a été caractérisée à l'échelle planétaire par des réseaux de mesures au sol, à bord de satellites (**Goes**, **GNSS**, **IASI**, **Pléiades**, **Sentinel-1 et -2**) ou de plateformes aéroportées (**Stratéo-2**), démontrant l'apport d'analyses interdisciplinaires pour étudier la réponse impulsionnelle des enveloppes fluides planétaires (atmosphère, océan) à une éruption d'une intensité exceptionnelle.

## 1.2 BILAN SUR LES PRIORITÉS ET RECOMMANDATIONS DU SPS2019

Le contexte programmatique des cinq dernières années a connu de profonds bouleversements : contexte budgétaire national difficile ayant entraîné une pause dans le développement ou l'implémentation de plusieurs missions, indisponibilité des lanceurs européens (Ariane 6 et Vega C) et de Soyuz ayant pour conséquence le retard dans le démarrage de certains programmes, développement des programmes de l'Esa et du programme Copernicus, irruption de nouveaux acteurs du spatial soutenus notamment par France2030, sans oublier la Covid.

### 1.2.1 BILAN SUR LES MISSIONS DE HAUTE A TRÈS HAUTE PRIORITE

Le tableau ci-dessous dresse le bilan des missions classées en haute à très haute priorité lors du SPS2019. Les missions de moindre priorité sont détaillées dans le rapport des groupes thématiques. Prenant en compte la modification du paysage spatial, le classement retenu en 2019 affichait une séparation claire entre grosses et petites missions, ces dernières reposant sur l'usage de nanosatellites.

Mission	Objectifs scientifiques	Travaux effectués	Etat actuel / Nouveau cadre éventuel
<b>Très haute priorité</b>			
<b>Trishna</b>	Stress hydrique des écosystèmes, zones urbaines, côtier	Température de surface	Phase-C, lancement prévu en 2026 en partenariat avec l'Isro
<b>Mescal/ACCP</b>	Spéciation des aérosols	Phase-0, non retenue par la Nasa	Discussion pour participation à <b>Caligola</b> en partenariat avec Asi et Nasa.
	Nuages convectifs et précipitation	Phase-0 puis A	Phase-A <b>C2omodo/AOS</b> en partenariat avec la Nasa
<b>Haute priorité (grosses missions)</b>			
<b>Marvel</b>	Champ de gravité	Phase-0, concept étudié en partenariat avec DLR, Esa, Nasa mais non retenu	<b>Magic/NGGM</b> en phase B1 dans un cadre Esa/Nasa
	Système de référence		<b>Genesis</b> dans le cadre du programme NAV de l'Esa
<b>Skim</b>	Mesure à haute fréquence des vagues et des courants de surface	Phase-0 Cnes puis phase-A Esa (EE9), proposition Stream à EE11	<b>Odysea</b> acceptée pour la phase A compétitive à Nasa EE
<b>Biodiversity</b>	Variables essentielles pour la biodiversité à petite échelle	Phase-0 hyperspectral. Galeone (eaux côtières et continentales) non retenue à EE12	-
<b>Haute priorité (petites missions)</b>			
<b>C3iel</b>	Nuages convectifs et événements extrêmes par NanoSat	Phase-0/A/B, avec mise en sommeil suite au contexte budgétaire	Phase-C, lancement prévu en 2027, en partenariat avec l'Isa
<b>Ulid/Smos-Next</b>	Salinité, humidité des sols et épaisseur des glaces fines	Phase-0/A. Fresch non retenue à EE12	-
<b>NanoMagSat</b>	Etude du champ magnétique terrestre	Phase-0/A	Décidé dans le cadre du programme Scout de l'Esa
<b>DAMONA</b>	Hydrologie haute résolution	Phase-0 Smash	En cours d'étude dans le cadre FR2030

Le bilan des cinq dernières années est mitigé et s'explique en grande partie par le contexte budgétaire national difficile qui a vu la pause ou l'arrêt de certains développements. Grâce à la mobilisation forte de la communauté scientifique et des équipes du Cnes, qu'il convient de saluer, plusieurs priorités scientifiques identifiées lors du SPS2019 ont néanmoins pu être redémarrées et sécurisées. La moitié des hautes priorités (P0) et la majorité des priorités moindres (P1) du SPS2019 n'ont pu, en revanche, aboutir.

Quatre missions en priorité haute ont trouvé un cadre de développement. La mission infrarouge thermique **Trishna**, affichée prioritaire depuis une vingtaine d'années, est passée fin 2019 en Phase-C dans le cadre d'une coopération avec l'Isro. Au-delà de l'objectif initial d'étude des écosystèmes terrestres qui repose sur une communauté nationale dynamique et structurée, une composante océan de **Trishna** s'est progressivement structurée. Autre priorité de longue date, la mission de gravimétrie **Marvel** répondait à deux objectifs majeurs :

accès à une connaissance précise du système de référence et observations du champ de pesanteur à haute résolution. Bien que le concept proposé n'ait finalement pas été retenu, la mission a trouvé un double débouché, d'une part, par la sélection inattendue de la mission **Genesis** dans le cadre du programme Navigation de l'Esa et, d'autre part, par la préparation de la mission **Magic/NGGM** de l'Esa et de la Nasa. Le Cnes et la communauté française sont associés à ces deux missions. Du côté des nanosats, après un arrêt de son développement pour raisons budgétaires, la mission **C3iel** est finalement passée en Phase-C en 2024 pour un lancement en 2027, et la mission **NanoMagSat** pour l'étude du champ magnétique terrestre a été retenue début 2024 par l'Esa dans le cadre du 2<sup>e</sup> volet de son programme Scout.

Seconde très haute priorité du SPS2019, la mission **Mescal** visait la spéciation des aérosols grâce à l'apport d'une voie UV sur un lidar américain de l'observatoire de l'atmosphère **ACCP**. À la suite d'un arbitrage budgétaire de la Nasa, le concept

a été abandonné tout comme l'emport d'un lidar sur l'orbite inclinée de la constellation. La mission **C2omodo**, P1 du SPS2019, visant l'étude des systèmes convectifs par un train de radiomètres micro-ondes, a alors été proposée et retenue, assurant non seulement la participation française au comité directeur de cet observatoire international de la prochaine décennie rebaptisé **AOS**, mais assurant également l'accès de la communauté française à l'ensemble de la chaîne de données.

De nombreuses missions sont actuellement en compétition dans le cadre de différents programmes internationaux dont le résultat devrait être connu courant 2024. Concernant l'observation à haute fréquence des courants de surface océaniques, suite à la non-sélection des missions **Skim** (finaliste EE9) et **Stream** (non retenu à l'appel EE11 car considérée hors limite budgétaire), la mission **Odysea** a été proposée et retenue à l'appel Earth Explorer de la Nasa. Concernant l'étude de la salinité, de l'humidité des sols et de l'épaisseur des glaces fines, la mission démonstrateur d'un concept de 3<sup>e</sup> génération de radars en bande-L **Ulid** a fait l'objet d'un arrêt brutal en 2021 qui a entraîné un recentrage des études de Phase A autour d'un concept de 2<sup>e</sup> génération **Smos-HR** dont est tiré le concept **Fresch** soumis mais non retenu malgré une très bonne évaluation à l'appel EE12 de l'Esa. Le Cnes a soutenu des travaux visant à promouvoir le développement d'un satellite hyperspectral côtier. Enfin, le concept d'une mission d'hydrologie à haute revisite temporelle à l'aide d'une constellation de nanosats **Smash** (ex-Damona) est en cours d'évaluation dans le cadre du programme France2030.

### 1.2.2 BILAN DES TRAVAUX AU NIVEAU EUROPÉEN

Au niveau de l'Esa, le Cnes a apporté son soutien aux équipes françaises participant à des missions Earth Explorer (EE). Depuis le dernier SPS, la mission **Aeolus** (EE5) a été lancée avec succès et a fortement impliqué la communauté française. Ses trois années d'exploitation ont démontré sa capacité à améliorer notre connaissance du champ de vent, notamment sous les tropiques et dans la basse stratosphère où la convection induit des circulations de grande échelle, avec un impact très important sur la qualité des prévisions de vent des modèles globaux via l'assimilation. Eumetsat a proposé à

ses états membres une suite opérationnelle (programme **EPS-Aeolus**) à l'horizon 2030. La mission **EarthCare** (EE6) a été lancée avec succès en mai 2024 ; les travaux de préparation ont bénéficié de l'expertise reconnue internationalement de la communauté scientifique nationale sur l'exploitation des mesures actives pour l'étude des nuages et des aérosols. Les travaux de préparation des prochaines missions EE soutenus par le Cnes ont porté sur le développement de **Biomass** (EE7), sur l'exploitation des futures mesures de la fluorescence de la mission **Flex** (EE8) pour étudier le stress hydrique de la végétation, et sur les études de spectroscopie dans l'infrarouge lointain pour la mission **Forum** (EE9). Enfin, le Cnes a soutenu les travaux préparatoires des missions **Wivern**, forte priorité du groupe Atmosphère lors du SPS2019 afin de réaliser la première mesure du vent à l'intérieur des nuages, l'une des deux missions finalistes pour une possible sélection EE11, et des missions proposées à EE12 sur la thématique du bilan radiatif (**Eco**) et de la salinité à haute résolution (**Fresch**).

Au-delà de cet accompagnement des équipes françaises, le Cnes a porté les priorités françaises lors de la conférence ministérielle de 2022 définies en articulation avec le programme national : une contribution ambitieuse au programme enveloppe **Future EO**, véritable colonne vertébrale du programme européen pour toute la chaîne de valeur depuis l'amont jusqu'à l'aval, incluant les Earth Explorers (EE), ainsi que les programmes d'accompagnement **Climate Space** et **Sentinel User Preparation**. La sous-souscription du programme Future EO par les Etats Membres lors de la dernière ministérielle est néanmoins préoccupante et risque de limiter les possibilités de mettre en place des missions EE innovantes et ambitieuses dans le futur. Une réflexion sur la possibilité de mettre en place une nouvelle catégorie de missions EE de plus grandes ampleurs mais plus espacées dans le temps est à mener. Enfin, il est à noter que, bien que soutenu par la communauté, divers programmes Esa visant à l'exploitation des missions spatiales ont vu une participation de la communauté nationale en-deçà des attentes. Une première analyse fait ressortir que la complexité des réponses et le manque d'accompagnement administratif sont des freins importants à la participation des équipes françaises.

Au niveau du programme européen des satellites

météorologiques opérationnels Eumetsat, le Cnes a accompagné les équipes françaises dans le développement des programmes **EPS-SG** (orbite polaire) et **MTG** (orbite géostationnaire) dont le démarrage a été retardé suite à l'indisponibilité des lanceurs européens. En particulier, la préparation du sondeur infrarouge hyperspectral **Iasi-NG** développée par le Cnes pour être embarqué sur les trois satellites **Metop-SG-A** a été finalisée. Cette mission prendra la suite de **Iasi**, référence internationale pour l'observation dans l'infrarouge, afin de poursuivre sur 20 années le suivi des paramètres thermodynamiques essentiels à la prévision numérique du temps, mais aussi de nombreuses variables 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 celles fournies par une suite d'instruments embarqués sur la même plateforme, tels le polarimètre **3MI** (nuages et aérosols) et **Sentinel-5** (qualité de l'air). L'utilisation en synergie de l'ensemble de ces instruments permettra de mieux caractériser la composition atmosphérique. L'étude de la variation diurne sera quant à elle assurée par les instruments embarqués sur **MTG-I** et **MTG-S**, ce dernier portant les instruments **IRS** et **Sentinel-4** pour lesquels la communauté française a été impliquée dans la préparation.

Le programme Copernicus de l'Union Européenne (UE) a positionné l'Europe à la pointe de la surveillance globale de la planète en s'appuyant sur une composante spatiale à long terme (les missions Sentinel), des observations-in situ et des services de suivi et de prévision pour le climat, l'océan, la composition chimique de l'atmosphère, les terres continentales et la surveillance des risques. Depuis le dernier SPS, le Cnes a accompagné la définition et la mise en œuvre du programme Copernicus en portant les priorités et demandes françaises dans la définition du programme, en défendant la continuité des missions Sentinel d'intérêt pour la communauté nationale tout en soutenant l'implication des laboratoires français dans les groupes missions et les travaux d'exploitation des données. C'est notamment le cas pour l'étude et le suivi des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (mission **CO2M**) et de l'évapotranspiration et de la température de surface (mission **LSTM**) dont les missions

**MicroCarb** et **Trishna** sont des précurseurs. Des consultations larges de la communauté nationale ont permis une co-construction des priorités françaises pour l'implémentation des Sentinel-NG Generation. Ceci a notamment conduit à la sélection de l'altimétrie à large fauchée pour la mission **Sentinel-3-NG-Topo**, illustrant le passage réussi dans ce programme opérationnel de suivi de l'environnement de missions amont innovantes issues de décennies de recherche.

### 1.2.3 BILAN SUR LES AVIONS ET BALLONS

Une très haute priorité du SPS2019 concernait le renouvellement du jet haute altitude de l'unité Safire. Grâce à une forte mobilisation des différents acteurs, le budget nécessaire a été sécurisé début 2024, pour une mise en service envisagée vers 2030. L'arrêt de l'exploitation du Falcon 20 en février 2022 a logiquement entraîné une forte augmentation de la sollicitation de l'ATR 42 ces dernières années, conduisant ponctuellement à des chevauchements incompatibles de campagnes et a affaibli les possibilités de cal/val des missions spatiales dont le lancement est prévu prochainement (**EarthCare**, **MicroCarb**, **Iasi-NG**, etc.). La mise en service rapide du nouveau jet reste ainsi une priorité.

Plus généralement, un peu plus d'une vingtaine de campagnes reposant sur la flotte d'avions de recherche de l'unité Safire ont été réalisées au cours des cinq dernières années en lien avec le spatial. Regroupant au total une cinquantaine de laboratoires, ces campagnes ont couvert une large gamme de thèmes scientifiques : gaz à effet de serre anthropiques, cycle de l'eau et des nuages, qualité de l'air, aérosols mais aussi température de surface de l'océan et des continents. Les moyens Safire ont également été sollicités pour la validation de diverses missions spatiales (**Aeolus**, **Cfosat**, **GNSS**, **Iasi**) ou la préparation de futures missions (**Merlin**, **MicroCarb**, **Trishna**, **Scarbo**<sup>1</sup>).

Concernant le programme ballons, les priorités identifiées lors du SPS2019 ont été suivies. Les campagnes StratoSciences reposant sur les Ballons Stratosphériques Ouverts (BSO) ont été poursuivies annuellement et se sont inscrites dans le projet européen **Hemera**. Une quarantaine d'expériences issues de 13 pays ont ainsi été réalisées, avec une pro-

duction scientifique régulière et un élargissement de la communauté utilisatrice des moyens ballons vers de nouvelles thématiques (nuages, électricité atmosphérique) ou de nouveaux développements instrumentaux. Au-delà du cadre de coopération avec le Canada et la Suède pour l'utilisation des bases de Timmins et de Kiruna, un accord de coopération a été signé en 2021 et 2023 entre le Cnes et l'Agence spatiale brésilienne afin de mettre en place un site équatorial de lancement, une priorité de longue date de la communauté nationale. Deux grands projets structurants se sont fortement appuyés sur le programme ballon : d'une part, **Stratéole-2**, pour l'étude de la haute troposphère-basse stratosphère à l'aide de ballons pressurisés atmosphériques, avec 2 campagnes réalisées (2019 et 2021) ; d'autre part, l'initiative **Magic** combinant lors de 6 campagnes annuelles ballons stratosphériques ouverts, ballons légers dilatables, avions de recherche et instruments au sol pour l'étude des gaz à effet de serre. Enfin, l'intégration des ballons dans les plans de cal/val des missions spatiales a été renforcée, que ce soit sur le site d'Aire sur l'Adour (lâcher régulier de ballons légers dilatables au passage de satellite d'intérêt) : **Iasi**, **Sentinel-5P**, **Oco-2**, **Calipso**) ou lors de campagnes BSO.

La mise en place de l'infrastructure nationale des aéronaves instrumentés pour la recherche **In-Air** a été fortement soutenue par la communauté nationale afin de faciliter la réalisation de campagnes de mesure reposant sur l'exploitation conjointe des avions et des ballons, en plus des mesures sols ou satellites, comme l'ont montré des premières campagnes structurantes (Magic ou Euc4a).

### 1.2.4 BILAN SUR LES DONNÉES

Depuis le dernier SPS, l'infrastructure de recherche Data Terra s'est fortement structurée autour de grands projets tel que le projet Equipex+ Gaia Data, afin de permettre d'accélérer l'extraction, l'analyse, la diffusion et l'usage intelligent des données, des indicateurs et des modèles issus des services/systèmes nationaux et internationaux d'observation. L'infrastructure de recherche est fondée sur quatre pôles de données et services correspondant à chacun des quatre grands compartiments du système Terre (Aéris, Odatis, ForM@Ter et Theia) dont le fonctionnement s'est peu à peu homogénéisé et auxquels s'est rajouté en 2024 le pôle national de données Biodiversité (PNDB). La mise en cohérence

des différents pôles reste néanmoins à consolider. La définition d'une feuille de route scientifique est également à finaliser afin d'inscrire pleinement Data Terra dans les priorités nationales spatiales.

De nouveaux usages des données spatiales se sont développés. Au cours des cinq dernières années, les services « Aval » ont connu un essor particulier, avec la mise en place de programmes (**Swot-Aval**, etc.) visant à une utilisation des données de missions spatiales orientée vers les services, en s'appuyant, à des degrés divers, sur les travaux de recherche menés depuis de nombreuses années dans les laboratoires. En réponse aux recommandations du SPS2019, une action spécifique CNRS-Cnes a été lancée afin de stimuler le développement de méthodes innovantes de traitement, d'analyse et d'exploitation scientifique de données spatiales, y compris pour la préparation de futures missions. Enfin, l'analyse de l'essor de nouveaux entrants, via notamment le programme France2030, pose la question de l'apport à la science de programmes orientés vers les marchés autour d'entreprises privées. Plus généralement, le succès de ces différents programmes dépendra très fortement de la qualité des données, de l'accès aux données, de la complémentarité et de l'interopérabilité de toute nouvelle donnée par rapport à l'existant.

Créé en juin 2019, le Space Climate Observatory (Sco) qui regroupe désormais 47 signataires et 26 pays s'est progressivement structuré autour des questions d'adaptation au changement climatique, avec l'objectif de faciliter le passage des travaux de recherche d'une phase de démonstration à un service opérationnel. Cependant, le périmètre du Sco vis-à-vis de l'appel à projet de recherche annuel du Cnes reste à préciser étant donné le nombre de projets qui traitent encore principalement de questions de recherche ce qui illustre le besoin constant d'interactions entre la recherche et l'opérationnel pour un projet applicatif donné.

### 1.2.5 BILAN SUR L'ACCOMPAGNEMENT DES MISSIONS SPATIALES

L'appel à projet de recherche annuel du Cnes et le programme des thèses et des post-docs apportent un soutien essentiel aux activités spatiales et restent fortement plébiscités par les laboratoires, que ce soit pour la préparation des missions futures, l'exploitation des données ou le lien vers les

1 Space CARBOn Observatory H2020 project

applications. Ces dernières années ont vu l'apparition de thèmes émergents (dynamique forestière, impacts de l'homme sur l'environnement, biodiversité, émissions anthropiques, ...) et l'augmentation des demandes liées aux nouvelles approches algorithmiques. Cette augmentation des demandes de soutien s'accompagne cependant d'une forte inquiétude sur les ressources humaines disponibles dans les laboratoires qui apparaissent sous-dimensionnées au regard des nombreuses missions prévues à court terme, en particulier dans le domaine de la physique de la mesure, de l'analyse de la donnée et de la conception instrumentale.

Depuis le SPS2019, le Tosca a renforcé ses échanges

## 2. PRIORITÉS SCIENTIFIQUES

Les capacités d'observation de la Terre doivent impérativement se développer dans les années à venir pour améliorer notre connaissance et compréhension du système Terre et répondre aux nouveaux défis sociétaux posés par l'accélération du changement climatique, du déclin de la biodiversité et de la pollution. Il s'agit, en particulier, de mieux comprendre l'évolution du climat et des grands cycles climatiques (eau, énergie, biogéochimie) et de surveiller et anticiper les points de bascule du système climatique. L'efficacité et les effets des politiques d'atténuation doivent être mesurés et il faut quantifier et comprendre les impacts du changement climatique afin de guider les stratégies d'adaptation au changement climatique. Suivre et comprendre l'évolution de la biodiversité et caractériser l'exposition, la vulnérabilité et la dynamique des socio-écosystèmes revêt des enjeux de connaissance et sociétaux essentiels. De nombreuses questions scientifiques concernent également la dynamique de la Terre solide et son interaction avec les enveloppes externes que sont l'atmosphère, l'océan, la cryosphère et l'hydrosphère. Enfin, il est indispensable de mieux caractériser et anticiper les événements extrêmes, les risques et aléas naturels.

Les priorités scientifiques du Tosca ont été définies en cohérence avec les différentes prospectives nationales (e.g. CNRS-Insu, Inee, Météo-France, Ifremer) et en prenant en compte les prospectives européennes (Esa, Eumetsat) et internationales (e.g.

avec l'ensemble des partenaires académiques nationaux (CNRS-Insu-OA/Sic/TS, Inee, Météo-France, Onera, CEA, IRD, Ifremer, etc.) lors des réunions du comité, à l'occasion des comités inter-organismes organisés pour chaque mission réalisée dans un cadre national ou bilatéral, ou encore lors des sept revues d'extension de missions (**Calipso, Cfosat, Jason-2, Megha-Tropiques, Saral, Smos, Venµs**) pour lesquelles l'évaluation scientifique a été harmonisée. Des ateliers structurants ont été également mis en place avec la communauté nationale sur divers sujets (Copernicus, hydrologie, méthane, lidar atmosphérique) afin de co-construire la feuille route du spatial en Etude et Observation de la Terre.

Nasa, Geo). Les questions sélectionnées sont naturellement celles pour lesquelles l'observation de la Terre apporte ou peut apporter une contribution majeure.

Ces priorités ont été rassemblées en six thèmes transversaux déclinés ensuite en priorités scientifiques. Elles s'appuient sur les priorités et questions scientifiques détaillées par chacun des groupes Tosca en les synthétisant et les priorisant dans une vision système Terre :

- Thème 1 : Variabilités et cycles climatiques
- Thème 2 : Couplage, interfaces et interactions d'échelles
- Thème 3 : Continuum Terre mer
- Thème 4 : Socio-écosystèmes et biodiversité
- Thème 5 : Prévision, jumeaux numériques et aléas
- Thème 6 : Interactions Terre interne et enveloppes externes

### 2.1 VARIABILITÉS ET CYCLES CLIMATIQUES (T1)

Des changements sans précédent sont en train de se produire dans le climat de la Terre. Comment le **climat va-t-il évoluer dans les prochaines décennies et quels sont les probabilités de points de bascule** ou changements irréversibles de certaines variables climatiques ? Quels sont les processus sous-jacents et comment détecter les risques de franchissements de points de bascule, les anticiper, fournir des éléments à la société pour mieux s'y préparer ? Répondre à cet enjeu requiert de

maintenir et d'optimiser des séries d'observations longues pour les variables climatiques essentielles. De nouvelles missions vont venir éclairer les recherches sur le cycle de l'eau (**Swot, Trishna, Cimr, Cristal**), le cycle du carbone (**Flex, Biomass**) et l'estimation des flux des GES (**MicroCarb, CO2M, Merlin, Iasi-NG, Sentinel 5P** et **5**). Il restera cependant des défis pour parvenir à **fermer le bilan hydrologique aux échelles spatiales de la gestion de l'eau**. La **variation régionale du stock d'eau souterraine** reste également la grande inconnue du cycle de l'eau terrestre. Aux échelles de temps climatiques, l'incertitude principale sur l'amplitude et la rapidité de la hausse du niveau des océans est liée à l'évolution des calottes polaires. Il est primordial de mieux comprendre **l'évolution des propriétés internes de la calotte Antarctique** où les modèles glaciologiques divergent significativement en raison d'effets non-linéaires (points de bascule) dans leur réponse au forçage climatique.

Notre compréhension de certains processus clés liés au cycle de l'eau reste également incomplète. C'est le cas notamment pour les **mécanismes de formation des nuages et les processus de convection profonde dans l'atmosphère**. Il s'agit de comprendre comment le mélange et les propriétés des aérosols anthropiques et naturels agissent sur les processus de formation des nuages, leurs propriétés radiatives et les précipitations, et comment améliorer notre compréhension de la convection profonde. L'activité convective peut être notamment caractérisée par la vitesse verticale et les flux de masse. A ce jour, ces deux variables ne sont pas mesurées à l'échelle globale ce qui est un élément bloquant pour la modélisation de ces phénomènes.

Un autre axe de recherche concerne le bilan radiatif de notre planète. L'étude de son évolution intègre les effets combinés de l'évolution des concentrations de GES dans notre atmosphère et les différents effets de rétroactions au sein du système Terre. Comment **mesurer suffisamment précisément le déséquilibre énergétique radiatif de la Terre** pour fournir un indicateur supplémentaire de l'efficacité des politiques climatiques ?

### 2.2 COUPLAGES, INTERFACES ET INTERACTIONS D'ÉCHELLES (T2)

La compréhension de la planète en tant que sys-

tème couplé nécessite des mesures à l'interface air-mer, là où l'océan rencontre l'atmosphère. Dans cette zone de transition entre l'océan et l'atmosphère, les nuages se forment, les tempêtes se déclenchent, le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère est absorbé par l'océan et les nutriments sont transportés dans les écosystèmes océaniques. **Il est nécessaire de mieux comprendre ces interactions, ce qui nécessite une mesure simultanée du vent de surface, des courants de surface** et idéalement des vagues. En l'absence de mesures de courants de surface, les détails de ces couplages nous échappent encore, et des controverses sur la physique sous-jacente demeurent non résolues.

Les plateaux continentaux et les zones en bord de glace sont soumis à de fortes variations de salinité, via les apports d'eau douce par les fleuves ou la fonte des glaces. Les zones polaires subissent des variations très rapides avec des rétroactions sur le climat de l'ensemble de la planète. De nombreuses inconnues subsistent : **où, quand, par quels mécanismes les flux d'eau douce pénètrent-ils dans l'océan ? Comment influencent-ils la stratification des couches de surface de l'océan, et comment les forts gradients de densité qu'ils induisent participent-ils à la circulation côtière et polaire ? Comment l'export des eaux peu salées vers le large par la dynamique tourbillonnaire structure-t-elle la distribution des salinités à méso échelle**, avec des conséquences sur les échanges océan-atmosphère de chaleur, d'énergie et de gaz et sur la circulation océanique ?

Les interfaces entre les différentes composantes du système Terre sont des zones d'échanges (e.g. chaleur, eau, nutriments) qui se produisent sur une vaste gamme d'échelles spatio-temporelles qui interagissent entre elles. La compréhension et la modélisation de ces couplages aux différentes échelles est un enjeu scientifique majeur. L'observation et la modélisation de la submésoscale ont mis en évidence le rôle important des fines échelles sur la dynamique océanique. **Mieux comprendre et prendre en compte les couplages entre cette dynamique océanique petite échelle et la grande échelle**, et avec la biogéochimie marine nécessite de poursuivre et améliorer les observations à fine échelle. L'observation **des interactions entre nuages et aérosols et de la convection à fine échelle est également importante pour caractéri-**

ser les interactions “multi-échelles” et leur rôle sur le mélange des aérosols, la convection et la circulation atmosphérique globale.

### 2.3 CONTINUUM TERRE MER (T3)

Les régions côtières et littorales subissent de plus en plus l'influence des changements de l'océan global, des forçages atmosphériques et des apports continentaux fortement anthropisés avec des conséquences sur les écosystèmes diversifiés qu'elles abritent. **Quels sont les flux terre-mer (eau, matière, chimie), leurs interactions avec la dynamique côtière et l'océan ouvert, et comment répondre aux enjeux de l'adaptation et de la gestion des risques dans les zones littorales et côtières ?** Suivre et prévoir leur évolution nécessite de mieux comprendre leur dynamique, les interactions entre les processus physiques, la biogéochimie, les sédiments et la distribution des polluants en lien avec les activités humaines, mais aussi une continuité d'observations depuis les bassins versants jusqu'à l'océan côtier (de la côte au talus) et l'océan profond. L'approche considérant ainsi le continuum continent-océan est mieux à même d'estimer les variations de volume d'eau, les flux et les différentes composantes de la circulation ainsi que leur variabilité spatiale et temporelle.

### 2.4 SOCIO-ECOSYSTEMES ET BIODIVERSITÉ (T4)

L'étude des systèmes socio-écologiques et de leur capacité d'adaptation souffre du manque de données à l'échelle territoriale où se nouent les interactions entre les espèces vivantes. **La caractérisation de l'exposition, la vulnérabilité et la dynamique des socio-écosystèmes en réponse aux changements globaux doit impérativement progresser.** La cartographie biophysique et anthropique des surfaces continentales à cette échelle nécessite de l'imagerie métrique et de l'imagerie à grande richesse spectrale - en complément des séries temporelles d'images **Sentinel** - afin de répondre au besoin de caractériser la distribution et l'abondance des espèces végétales, la fragmentation des habitats, la phénologie et les variables biophysiques de la végétation, les zones côtières et urbaines et les eaux continentales.

De nombreuses questions scientifiques demeurent également sur l'évolution de la biodiversité marine en réponse aux changements globaux. **Améliorer la compréhension de la biogéochimie marine et de son couplage avec la physique est nécessaire pour mieux comprendre l'évolution de la production primaire, des échelons trophiques plus élevés et plus généralement la biodiversité marine.** Cette meilleure compréhension doit servir à identifier et suivre les «hotspots» écologiques pour soutenir les politiques d'exploitation et conservation durables notamment avec le développement d'aires marines protégées.

### 2.5 PRÉVISION, JUMEAUX NUMÉRIQUES ET ALÉAS (T5)

De nouvelles observations sont nécessaires pour **améliorer la prévision du temps, de l'océan et des glaces de mer et accompagner l'évolution des modèles et le développement des jumeaux numériques** à très haute résolution (kilométrique à l'échelle globale, centaine de mètres à l'échelle locale). Il est nécessaire, en particulier, **d'améliorer la prévision des événements extrêmes** tels que les cyclones, canicules, sécheresses, vagues de chaleur marines, inondations, submersions côtières et blooms d'algues toxiques. Le développement de nouvelles observations spatiales, leur complémentarité avec les mesures in situ, rend indispensable leur synthèse via des modèles numériques et des techniques d'intelligence artificielle de plus en plus performantes. La qualification des données avant leur intégration dans les modèles est un point essentiel.

**Anticiper les aléas naturels** (séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, instabilités gravitaires) est un enjeu majeur ; il s'agit d'identifier les processus en jeu et de détecter des signaux précurseurs, peu fréquents et de faible amplitude, souvent mélangés à des signaux pouvant être associés à des perturbations de surface, naturelles ou anthropiques. Dans ce contexte, l'observation et la modélisation des composantes des risques environnementaux (aléas, exposition et vulnérabilité) doit se faire à des résolutions spatiales et temporelles compatibles et inter-opérables.

### 2.6 INTERACTIONS TERRE INTERNE ET ENVELOPPES EXTERNES (T6)

L'étude des interactions Terre interne – enveloppes externes est une thématique pluridisciplinaire. Les recherches associées concernent entre autres, **les rétroactions entre l'ajustement isostatique et la fonte récente des calottes glaciaires, les transferts de masse à la surface de la Terre, l'évolution du niveau de la mer, l'occurrence des séismes**, la déformation crustale produite par des variations du niveau des nappes phréatiques, les effets du volcanisme sur la chimie atmosphérique et le bilan ra-

diatif ou les interactions entre les champs magnétiques d'origine interne et externe et leur effet sur l'atmosphère et le monde vivant.

Pour ces recherches, la réalisation d'un **repère de référence terrestre aussi précis et stable que possible est indispensable.** La cible à atteindre en termes de précision et stabilité de l'ITRF, telle que mise en avant par l'Association Internationale de Géodésie, est une exactitude de 1 mm et une stabilité de 0,1 mm/an.

## 3. PROSPECTIVE ET SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

### 3.1 CONTEXTE PROGRAMMATIQUE

Le programme Copernicus est un changement de paradigme pour l'observation de la Terre en Europe. Copernicus a positionné l'Europe à la pointe de la surveillance globale de la planète en s'appuyant sur le développement d'une composante spatiale à long terme (les missions Sentinel), des observations in situ et des services de suivi et de prévision pour le climat, l'océan, la composition chimique de l'atmosphère, les terres continentales et la surveillance des risques. Le développement plus récent des programmes Destination Earth de l'UE et Digital Twin Earth de l'Esa en s'appuyant sur les nouvelles capacités de services cloud et moyens HPC (High Performance Computing) apportent de nouvelles capacités de modélisation du système Terre et de développement de scénarios pour mieux guider les décisions pour une gestion durable de la planète.

La composante spatiale de Copernicus va monter en puissance dans les prochaines années avec le programme Sentinel Expansion et Sentinel NG. Copernicus devrait opérer plus de 20 satellites en post 2030. Eumetsat va, quant à lui, procéder au renouvellement complet de la flotte de satellites d'observation de la Terre pour les programmes **EPS-SG** (orbite polaire) et **MTG** (orbite géostationnaire). Un nombre important de missions scientifiques Earth Explorer de l'Esa avec une implication forte de la communauté nationale concernent parallèlement cette prospective : **Earthcare, Biomass, Flex, Forum, Harmony, Cairt** ou **Wivern** (EE11), EE 12.

Dans ce contexte, le Cnes doit être une force de proposition et de développement pour des missions scientifiques ou des concepts innovants pouvant être ou non intégrés à terme dans les programmes d'observation à long terme de Copernicus et d'Eumetsat. Il doit rester un acteur majeur dans la définition et la mise en œuvre de Copernicus en collaboration avec l'Esa et Eumetsat et accompagner la participation des laboratoires français. L'implication du Cnes dans la mission **Swot** est un excellent exemple du rôle spécifique du Cnes vis-à-vis de missions en rupture technologique, à forts enjeux scientifiques et en amont de programmes d'observation à long terme.

### 3.2 PRIORITÉS MISSIONS SPATIALES

Les priorités pour les missions spatiales sont basées sur les six thèmes transverses et les questions scientifiques prioritaires associées. Celles-ci intègrent l'analyse des manques par rapport aux missions déjà décidées ou en vol notamment dans le contexte Copernicus, Eumetsat et Esa Earth Explorer. Ces priorités concernent principalement les missions portées par le Cnes seul ou dans le cadre d'accords bilatéraux. Elles incluent également des recommandations pour les missions menées dans le cadre de Copernicus (UE), du programme Esa Earth Explorer ou d'Eumetsat. Elles se déclinent selon un ou plusieurs axes : continuité des mesures, amélioration de la précision des mesures, amélioration des résolutions spatiales et temporelles, mesures

de nouveaux paramètres, mesures simultanées de plusieurs paramètres.

Les priorités majeures sont organisées selon leur rattachement à un thème prioritaire en indiquant leurs contributions éventuelles à d'autres thèmes.

### 3.2.1 CADRE CNES OU BILATÉRAL

#### Thème 1 : Variabilités et cycles climatiques

- **C2omodo / AOS.** La mission C2omodo portée par le Cnes comme contribution instrumentale à l'observatoire AOS est basée sur les observations d'un tandem de radiomètres micro-ondes. Elle répond au besoin de mieux documenter à l'échelle globale la dynamique interne de la convection atmosphérique profonde. Ce thème avait été soulevé lors de la prospective 2019, et la communauté souhaite indiquer à nouveau le caractère prioritaire de la mission C2omodo au sein de l'observatoire international AOS. La mission Caligola de l'Agence Spatiale Italienne menée dans le cadre du programme AOS pourrait présenter des caractéristiques intéressantes pour la spéciation des aérosols et la biogéochimie marine grâce à son lidar embarqué. Il sera important que la communauté française soit en bonne position pour exploiter ces données bien qu'aucune contribution instrumentale française ne soit envisagée.
- **Smash.** Le Tosca rappelle son soutien fort à la mission **Smash** pour l'hydrologie à haute revisite qui peut être mis en œuvre à très court terme dans le cadre des projets constellations de type Newspace. Avec des observations journalières de cotes d'eau des rivières, lacs et réservoirs via une constellation d'altimètres radar nadir compacts, **Smash** va permettre de réduire les incertitudes sur le cycle de l'eau et répondre à des enjeux applicatifs majeurs.

#### Thème 2 : Couplages, interfaces et interactions d'échelles

- **Odysea.** Le concept proposé pour la mission **Odysea** est un radar Doppler en bande Ka avec une très large fauchée permettant une couverture quasi-journalière des courants de surface, une variable océanique essentielle qui n'est pas encore mesurée depuis l'espace et qui joue un

rôle clé pour l'analyse des couplages océan/atmosphère. **Odysea** comble une lacune importante dans le suivi des vents et des courants océaniques, et changera la donne en permettant de mieux comprendre comment l'océan et l'atmosphère échangent des gaz, de la chaleur et de l'énergie. C'était une priorité majeure de la prospective 2019.

- **Smos-HR.** Avec des mesures de la salinité de surface avec une résolution de ~10 km et une précision de 0.2 g/kg (facteur 5 d'amélioration par rapport à **Smos**), **Smos-HR** permettra d'observer environ 90 % de la surface des plateaux continentaux et les structures tourbillonnaires jusqu'à 60° de latitude qui ne sont pas observables avec les missions actuelles ou prévues. Cette mission doit permettre de mieux comprendre **les flux d'eau douce dans les échanges entre l'océan, l'atmosphère et la cryosphère et le rôle associé de la dynamique tourbillonnaire.** **Smos-HR** permettra aussi de décrire l'humidité du sol à 10 km de résolution et contribuera à l'étude de l'hydrologie des bassins versants, l'estimation des précipitations et de l'évapotranspiration (thème 1) et la prévision numérique du temps (thème 5).
- **StratoFleet.** La documentation des couplages entre phénomènes d'échelles variées, en particulier le mélange des aérosols, la convection et la circulation atmosphérique globale, nécessite à la fois des observations globales depuis l'espace, mais aussi des observations locales pour analyser les processus à fine échelle. Une zone de l'atmosphère particulièrement concernée par ces interactions multi-échelles est la haute troposphère et la basse stratosphère tropicale qui est le théâtre de phénomènes physiques très importants pour notre compréhension du climat global. Ce nouveau programme ballon est proposé pour fournir ces nouvelles observations à fine échelle grâce à des ballons stratosphériques pressurisés à durée de vie accrue. Un cadre international intéressant pour soutenir ces travaux serait le programme suborbital **AOS**.

#### Thème 4 : Socio-écosystèmes et biodiversité

- **Biodiversity.** La priorité est d'améliorer les capacités d'observation au service de l'étude des socio-écosystèmes. **Biodiversity** déjà proposé

en priorité majeure lors de la prospective 2019 est un système d'imagerie hyperspectrale à haute résolution spatiale (10 m) qui a pour objectif d'assurer le suivi de plusieurs variables essentielles (distribution, abondance des espèces et état) de la biodiversité terrestre et l'état de santé d'écosystèmes emblématiques (forêts tropicales, savanes...). Les caractéristiques de cet imageur hyperspectral à haute résolution répondent également au besoin de caractériser les milieux côtiers (bathymétrie, classification des petits fonds marins et des habitats), la pollution industrielle (panaches de quelques gaz ou d'aérosols), les milieux urbains (occupation du sol plus précise) et la géologie (détection de minéraux sur des roches nues).

#### Priorités substantielles

Le Tosca note le manque d'une mission pour le suivi et la prévision des vagues (**Cfosat-NG**) et l'étude des couplages océan/atmosphère (thème 2, thème 5). C'est une priorité substantielle. Le Cnes est encouragé à analyser les opportunités de cadre bilatéral pour développer une telle mission. La même remarque s'applique à la mission optique stéréoscopique **4D Earth** qui vise une couverture systématique, globale et mensuelle des terres émergées à 2 m de résolution avec quatre bandes spectrales afin de caractériser en 3D les impacts des activités anthropiques et les risques associés (thèmes 4 et 6). Il est fortement recommandé, par ailleurs, d'instruire dans le cadre d'une perspective à plus long terme (post SPS2024) le développement de la mission **Swot-Loac** (Land Ocean Aquatic Continuum) qui vise à quantifier **les flux terre-mer (eau, matière, chimie) et leurs interactions avec la dynamique côtière et l'océan ouvert** (thème 3).

### 3.2.2 CADRE EUROPE

#### Thème 1 : Variabilités et cycles climatiques

**Missions Copernicus : Sentinel, Sentinel Expansion et Sentinel New Generation (NG).** Assurer une continuité des mesures des variables climatiques essentielles est une **priorité majeure** (thème 1). Les missions Sentinel assurent en partie la surveillance régulière de ces variables et continueront sur la prochaine décennie. Les missions futures **Sentinel Expansion** viendront grandement compléter pour le suivi des GES, de l'Arctique et des calottes gla-

ciaires. A plus long terme (post 2032) des améliorations seront apportées avec le programme **Sentinel NG**. Il est important que les besoins de la communauté scientifique soient bien pris en compte dans ces évolutions. Des réunions de concertation entre le Cnes, les groupes Tosca et la communauté scientifique nationale devront être régulièrement organisées pour dégager les priorités françaises. A ce stade la communauté s'est mobilisée avec succès sur le design de **S3-NG-Topo**. Des discussions sont en cours sur le design de **S3-NG-Opt** pour l'amélioration des résolutions spectrales de l'instrument couleur de l'eau et sur le design du **S2 NG** pour le suivi à haute résolution des surfaces continentales et l'océan côtier. Un point de vigilance est souligné quant à l'évolution de la mission de référence altimétrique (**S6 NG**) afin de garantir et d'améliorer sa précision pour le suivi du niveau moyen et comme référence des autres missions altimétriques.

#### Thème 5 : Prévision, jumeaux numériques et aléas

**Cmim** (Constellation de MIni sondeurs pour la Météorologie). Il s'agit de répondre aux besoins des futurs modèles de prévision numérique du temps avec une observation à très haute fréquence (revisite < 3 heures) des processus dans les basses couches de l'atmosphère. La phase 0 **Cmim** a permis d'explorer des synergies entre sondeurs hyperspectraux dans l'infrarouge et sondeurs micro-ondes répondant au besoin d'observation dans les basses couches de l'atmosphère. Le comité recommande au Cnes de démarrer rapidement une Phase-A afin de construire une proposition de systèmes d'observation (au niveau instrument et au niveau architecture de constellation), pour une potentielle implémentation future dans la programmation d'Eumetsat.

**S3-NG-Topo.** Avec le choix d'un instrument d'altimétrie à large fauchée, cette mission va grandement améliorer le suivi et la prévision de la circulation océanique (thème 5), l'étude du cycle de l'eau et du continuum terre mer (thème 1, thème 3). Son développement va s'appuyer sur l'expérience de **Swot** ce qui nécessite une implication forte du Cnes en interaction avec l'Esa.

#### Thème 6 : Interactions entre la Terre interne et ses enveloppes externes

**Genesis.** Genesis est une mission décidée de l'Esa du programme FutureNAV pour le positionnement précis. L'objectif est de permettre la réalisation du référentiel terrestre avec une précision de 1 mm et une stabilité à long terme de 0,1 mm/an (thème 6). Via son soutien à la mission **Genesis**, le Tosca recommande le financement du projet **Doris-Neo** car les récepteurs **Doris** qui font partie des instruments embarqués font face à un problème d'obsolescence.

**Magic** repose sur un concept de constellation avec un double tandem de satellites gravimétriques. Les améliorations attendues des performances d'un facteur environ 10 par rapport aux missions **Grace (-FO)** étendront considérablement le champ des applications pour l'étude de la « Terre solide », et pour les thématiques « Surfaces continentales » et « Océan ». À titre d'illustration, les données **Magic** permettront de chercher des signaux précurseurs de séismes de magnitude 7.5 et plus (environ 55 évènements sur 10 ans), au lieu de 8.5 et plus (environ 1-2 évènements sur 10 ans) avec **Grace (-FO)** (thème 5). Des impacts majeurs sont aussi attendus sur les thématiques océan, surfaces continentales et climat (e.g. stocks d'eau souterraine, calottes glaciaires, circulation océanique, échanges de masses d'eau, niveau de la mer, bilan énergétique de planète) (thème 1).

**Carioqa.** L'objectif de **Carioqa** est de tester un accéléromètre atomique dans l'espace afin d'ouvrir la voie à des missions gravimétriques spatiales ambitieuses basées sur l'interférométrie à atomes froids à l'horizon 2035.

#### Priorités substantielles

Le **développement d'une mission géostationnaire couleur de l'océan est une priorité Tosca depuis plusieurs prospectives.** Le Tosca recommande qu'un cadre programmatique d'une telle mission soit discuté avec Eumetsat. Le comité Tosca recommande au Cnes de soutenir la participation des équipes françaises à la préparation des missions **Wivern** (observations des vents au cœur des nuages à 1 km de résolution) (thèmes 1 et 5), **Eco** (mesure du déséquilibre énergétique de la planète) (thème 1) et **Cryorad** (mesures micro-onde basse fréquence (0.4-2 GHz) afin d'établir le profil de température des calottes polaires et suivre la salinité

dans les mers froides) (thème 1) proposées dans le cadre du programme Earth Explorer de l'Esa.

### 3.3 PRIORITES R&T

#### Technologies Lidar

Un besoin important en R&T se dégage autour des technologies lidar pour différentes applications en atmosphère (spéciation des aérosols, mesures de GES), océanographie (couleur de l'océan, bathymétrie) et pour les surfaces continentales (écosystèmes forestiers). Il est prioritaire de poursuivre les actions de R&T autour de cette technologie afin que ce type d'instrumentation puisse être proposé dans divers cadres programmatiques de manière plus aisée.

#### Concepts agiles haute résolution

Le recours à des missions hyperspectrales à très haute résolution spatiale semble incontournable pour la quantification des émissions anthropiques de GES. En réponse à ces nouveaux défis, l'amélioration des détecteurs dans le proche et le moyen infra-rouge et de l'agilité des plateformes ainsi que la miniaturisation pour des perspectives de constellations sont des pistes à investiguer.

### 3.4 NEWSPACE

De nouveaux acteurs du secteur privé se positionnent comme producteurs de données et services d'observation de la Terre. Il faudra organiser un suivi de l'évolution de ces propositions de constellation New Space, partager les résultats des premières qualifications et analyses des données et synthétiser l'apport de ces constellations pour la recherche. La qualité des mesures qui seront produites étant un point capital pour leur utilisation pour la recherche, les efforts de calibration/validation seront essentiels. Les politiques de partage des données devront être également clairement explicitées et discutées.

### 3.5 PRIORITES INFRASTRUCTURES IN-SITU ET ACTIVITÉS CAL/VAL

Les réseaux d'observation in-situ via la mise à disposition de données qualifiées et précises jouent un rôle essentiel pour les activités Cal/Val et pour maintenir la qualité des mesures satellitaires. Le Cnes doit continuer de soutenir les Infrastructures

de Recherche (IRs) en observation et Services Nationaux d'Observation (SNOs) qui jouent un rôle très important au niveau national en lien avec les actions au niveau européen et au niveau international.

Dans ce contexte, un soutien à **l'infrastructure In-Air** regroupant avions de recherche, ballons et drones est essentiel pour la validation de nombreuses missions spatiales dont le lancement est prévu dans les prochaines années (e.g. **MicroCarb, Iasi-NG, C3iel, AOS**). Il est recommandé, en particulier, aux tutelles de Safire de préparer dès maintenant le renouvellement de l'avion ATR.

Un soutien à la coordination nationale de l'observation de l'océan **Fr-oos** (French Ocean Observing System) et aux IRs et SNOs associés est également nécessaire afin de s'assurer que les besoins présents/futurs de Cal/Val des missions océan (e.g. **Sentinels, Swot, Odysea, Smos-Hr**) soient pris en compte.

Le Tosca recommande, par ailleurs, le déploiement de **l'Observatoire Géodésique Géophysique Fondamental (OG<sup>2</sup>F)** de Tahiti, infrastructure unique dans le Pacifique Sud, combinant les quatre techniques géodésiques, indispensable pour améliorer la couverture du système de référence terrestre et complémentaire à la mission **Genesis**. La réalisation d'une station SLR (Satellite Laser Ranging) française de nouvelle génération est l'enjeu principal de cette priorité majeure du Tosca.

Le Tosca soutient enfin le projet de mission ballon **GravMagBallon** qui permettra d'acquérir des données magnétiques et gravimétriques entre 10 et 30 km d'altitude et ainsi aborder l'évolution court terme (< année) de la surface de la Terre à des échelles régionales et d'améliorer l'imagerie des structures lithosphériques.

### 3.6 EXPLOITATION DES DONNÉES ET PLATES FORMES CLOUD/HPC

Le Cnes doit continuer de soutenir les équipes françaises pour des actions innovantes sur le développement des algorithmes et sur la qualification, le traitement et l'analyse des données en particulier via les techniques d'intelligence artificielle et le lien vers la modélisation. Le retraitement des longues

séries de données multi-capteurs pour l'ensemble des variables climatiques essentielles (ECVs), la qualification des incertitudes et l'exploitation scientifique de ces séries temporelles est une composante essentielle des études sur le climat. Ces travaux sont organisés dans le cadre programme Esa Climate Space en lien avec le programme Copernicus pour les aspects opérationnalisation. Le Cnes a joué et doit continuer de jouer un rôle majeur en amont de ces actions pour assurer un retraitement continu et à l'état de l'art des données (par exemple pour le retraitement à l'état de l'art des missions altimétriques).

La quantité de données spatiales disponibles va considérablement augmenter au cours des prochaines années ouvrant de nouvelles opportunités de repousser les frontières de la connaissance. L'exploitation de ces données nécessitera un accès facilité aux données (niveaux 1&2) et produits (niveaux 3&4) avec outils et moyens de calcul adaptés aux traitements massifs, l'assimilation et l'utilisation de l'intelligence artificielle. Au niveau national, cela nécessitera une montée en puissance de Data Terra. Une cohérence entre ses 4 pôles thématiques (Aeris, ForM@Ter, Odatis, Theia) et le nouveau pôle sur la biodiversité (Pndb) devra être assurée pour soutenir les études transdisciplinaires dans le cadre d'une approche système Terre. Vis-à-vis de l'utilisateur scientifique, il faudra veiller à bien définir et expliquer les services fournis par Data Terra et la complémentarité avec ceux fournis par les plateformes européennes Copernicus Data Ecosystem, WEkEO, services Copernicus, DestinE, DTE.

### 3.7 ACCOMPAGNEMENT DE LA RECHERCHE SPATIALE

En regard du nombre de missions actuelles ou futures (nouvelles missions portées par le Cnes ou en bilatéral, nouvelles missions du programme Copernicus, nouvelles missions Earth Explorer, renouvellement des satellites d'Eumetsat, développement du New Space) **un renforcement du support aux équipes françaises** impliquées dans la préparation des futures missions et l'exploitation des données des missions en vol est indispensable, notamment en postes 'statutaires' (chercheurs, ingénieurs) dans les laboratoires.

## 4. CONCLUSION

Les priorités majeures pour des missions spatiales et ballons sont résumées dans le tableau ci-dessous. Le tableau sépare les missions à développer par le Cnes seul ou en bilatéral et les missions déjà engagées ou à engager dans un cadre européen (Esa, UE/Copernicus, Eumetsat) qui sont d'une priorité majeure pour le Cnes et nécessitent une implication du Cnes pour s'assurer de leur bonne réalisation. La priorité majeure pour les infrastructures in-situ/sol est également rappelée.

Missions dans un cadre CNES ou bilatéral		
Questions scientifiques	Observable	Cadre actuel de développement
Comment se forment et se développent les nuages en fonction de leur environnement ? (thème 1)	Flux de masse	<b>C2omodo / AOS</b> (Phase B0)
Quelles interactions entre les processus atmosphériques des grandes aux petites échelles ? (thème 2)	Multi variables	<b>StratoFleet</b> (Héritage Stratéole)
Comment les couplages courant-vents influencent les échanges air-mer ? (thème 2)	Courants globaux	<b>Odysea</b> Présélectionné NASA EE
Comment la salinité structure les tourbillons et les échanges terre-océan-glace ? (thème 2). Humidité des sols et prévision numérique du temps (thème 1, thème 5).	Salinité haute résolution, Humidité des sols	<b>Smos-HR</b> Phase A Cnes réalisée
Exposition, vulnérabilité et dynamique des socio-écosystèmes en réponse aux changements globaux (thème 4)	Biodiversité de la végétation, santé des plantes, milieux côtiers	<b>Biodiversity</b>
Cycle de l'eau à l'échelle des besoins de la gestion en eau (thème 1)	Cotes d'eau journalières rivières, lacs, réservoirs	<b>Smash</b> France2030
Missions dans un cadre européen : ESA, UE/ Copernicus et Eumetsat		
Questions scientifiques	Observable	Cadre actuel de développement
Comment mieux observer l'atmosphère pour améliorer la prévision météorologique ? (thème 5)	Température, Humidité	<b>Cmim</b> (Phase 0 CNES)
Amélioration du référencement géodésique (thème 6)	Positionnement millimétrique	<b>Genesis</b> , mission Esa FutureNAV. Démarrage phase ABCD en 2024
Mieux comprendre la dynamique interne de la planète, événements extrêmes et les interactions entre Terre interne et enveloppes externes (thème 6, thème 1)	Champ de pesanteur	<b>Magic</b> , mission Esa-Nasa. Démarrage Phase-B1 en 2024
Démonstrateur instrumentation spatiale (thème 6). Intérêt en physique fondamentale	Champ de pesanteur	<b>Carioqa</b> , phase-A lancée en janvier 2024
Prévision océanique, cycle de l'eau (thème 5, thème 1, thème 3)	Niveau de la Mer	<b>S3NG-Topo</b>
Infrastructures sol		
Amélioration du référencement géodésique (thème 6)	Positionnement millimétrique	<b>Observatoire Géodésique Géophysique Fondamental de Tahiti</b>

## 5. REFERENCES

Forster, P. M., et al. (2023). Indicators of Global Climate Change 2022: annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence, Earth Syst. Sci. Data, 15, 2295–2327, <https://doi.org/10.5194/essd-15-2295-2023>.

Pascal Allemand, Sylvain Bonvalot, Rodolphe Cattin (président entrant), Patrick Charlot, Olivier de Viron (président sortant), Michel Diament, Bénédicte Fruneau, Marianne Greff, Lydie Gailler, Nicolas Gillet, Marion Jaud, Cécile Lasserre, Mioara Manda, Isabelle Panet, Laurent Métivier, Erwan Pathier, Félix Perosanz (thématicien Cnes), Lucie Rolland, Séverine Rosat, Alvaro Santamaria, Lucia Seoane, Erwan Thébault, Guy Wöppelmann

Basée sur des sciences fondamentales, la thématique « Terre solide » a pour objectif l'étude de notre planète, i.e. sa formation et son évolution, sa composition, sa dynamique interne et les couplages avec les enveloppes externes que sont l'atmosphère, les océans, la cryosphère et l'hydrosphère. Parallèlement à ces enjeux scientifiques, elle relève des défis sociétaux majeurs : le suivi du changement climatique (niveau des mers, fonte des glaces), les besoins et la transition énergétiques (hydrocarbures, géothermie), les ressources en eau et en minerais (construction, batterie, high-tech), et les risques naturels (instabilité gravitaire, séisme, tsunami, volcan).

Dans ce contexte, les observations spatiales sont incontournables. Leur caractère global, homogène et de précision continuellement accrue, permet de compléter les mesures au sol. De plus, elles fournissent un suivi temporel continu et fréquent du système Terre avec, pour certaines, des archives couvrant plusieurs décennies. À titre d'exemple, on peut mentionner :

- les observations géodésiques qui permettent d'étudier les variations de rotation de la Terre et de fournir un référentiel mondial,
- les missions magnétiques et gravimétriques qui

contribuent à caractériser la composition et la forme de notre planète, éléments clés pour étudier sa dynamique,

- les mesures altimétriques qui fournissent des informations sur les reliefs terrestres, les glaciers et le niveau des océans,
- les données d'imagerie qui permettent de mesurer les mouvements associés aux aléas naturels et aux transferts de masse.

Couvrant des échelles spatiales et temporelles complémentaires, les mesures au sol, les acquisitions drones, bateaux et aéroportées, et les observations spatiales sont analysées conjointement. Seule une telle démarche, couplée à une approche combinant différents types de données, permet de compenser la difficulté liée à l'absence d'observation directe de l'intérieur de la Terre. L'analyse et l'interprétation de ces jeux de données complexes et hétérogènes nécessitent des développements numériques et des moyens de calcul conséquents. La communauté est fortement impliquée dans ces développements avec le soutien du Cnes via le pôle ForM@Ter de l'infrastructure de recherche Data Terra, les appels à projets et les financements de thèses et postdocs.

## 1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

### 1.1 PRINCIPAUX RÉSULTATS SCIENTIFIQUES

#### 1.1.1 NOUVEAU RÉFÉRENTIEL INTERNATIONAL

Pour décrire et modéliser le fonctionnement de notre planète, il est indispensable de définir un système de référence terrestre. Les campagnes de réanalyse des mesures de géodésie spatiale ont

mobilisé des dizaines d'équipes dans le monde et ont abouti à l'ITRF2020 (International Terrestrial Reference Frame, 2020 realization), qui est la réalisation la plus performante à ce jour en termes de couverture, de densité, de précision et de stabilité. Les équipes françaises ont joué un rôle majeur, en traitant l'ensemble des données des quatre techniques, qui couvrent des périodes de 28 ans (DORIS<sup>1</sup>), 27 ans (GNSS<sup>2</sup>), 41 ans (VLBI<sup>3</sup>) et 38 ans (SLR<sup>4</sup>),

1 Doppler Orbitography by Radiopositioning Integrated on Satellite.

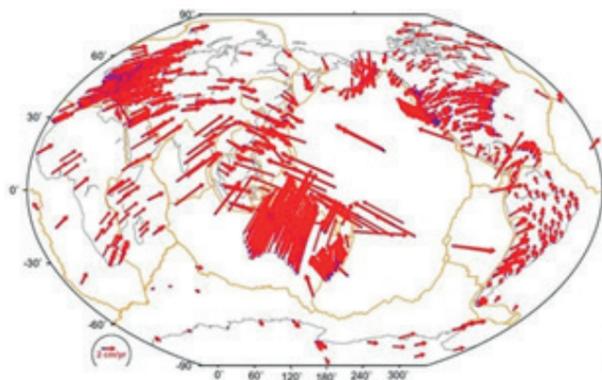
2 Global Navigation Satellite System qui intègre les systèmes GPS (Global Positioning System, Etats-Unis), GLONASS (Global Navigation Satellite System, Russie), BDS (BeiDou Navigation Satellite System, Chine) et Galileo (Europe).

3 Very Long Baseline Interferometry.

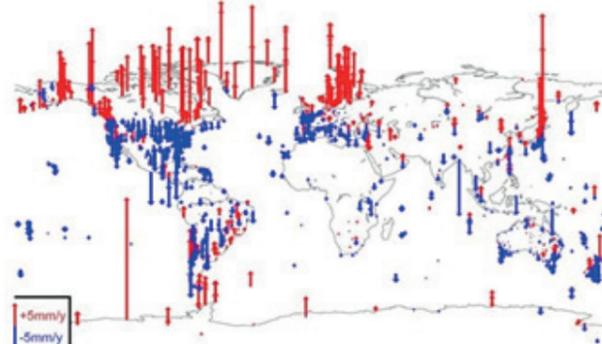
4 Satellite Laser Ranging.

et en pilotant l'ITRF2020. Cette nouvelle version (Fig. 1) apporte des améliorations significatives, en intégrant les mouvements non-linéaires des stations liés aux variations saisonnières et aux déformations post-sismiques. La précision de l'origine long-terme de l'ITRF2020 et son évolution temporelle sont évaluées respectivement à 5 mm et 0,5 mm/an, comparables au précédent ITRF mais en étant plus robuste et précis car intégrant plus de sites sur une période de temps plus longue.

(a) Vitesses horizontales



(b) Vitesses verticales



**Fig. 1. Référentiel terrestre international.** Vitesses horizontales (a) et verticales (b) des sites de l'ITRF2020 ayant une erreur formelle inférieure à 1 mm/an. © Altamimi et al. (2023).

### 1.1.2 DYNAMIQUE DE LA TERRE

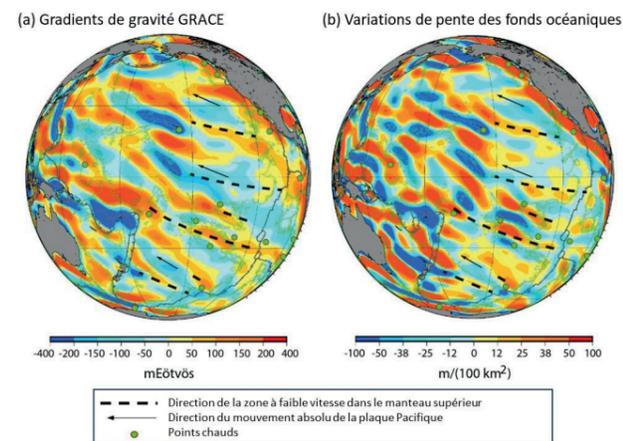
Complémentaires des mesures au sol, les observations spatiales magnétiques (**Swarm**<sup>5</sup>) et gravimétriques (**GRACE**<sup>6</sup> (-FO<sup>7</sup>), **GOCE**<sup>8</sup>) permettent d'imaginer l'intérieur de la Terre et ainsi mieux comprendre son fonctionnement.

Les secousses magnétiques enregistrées sur les

vingt dernières années ont été reliées à des ondes hydro-magnétiques de période interannuelle se propageant dans le noyau. Ce résultat a des répercussions tant sur notre compréhension de la dynamique du noyau que sur la géodynamique globale comme la présence ou non d'une couche stratifiée à la surface du noyau. L'analyse des observations des champs gravimétrique, magnétique et des mesures de la rotation terrestre indiquent une oscillation périodique de 6 ans. Les deux dernières ont été reliées à la dynamique du noyau ; l'origine du signal gravimétrique, et son lien aux autres observables, reste ouverte.

Des ondulations périodiques de longueur d'onde d'environ 2 000 km dans le champ de gravité et la topographie des fonds océaniques ont été mises en évidence (Fig. 2). Ces ondulations alignées avec le mouvement actuel des plaques, dans les océans Pacifique et Indien, coïncident avec des zones sismiques lentes dans le manteau supérieur. Ces observations suggèrent la présence d'une convection thermo-chimique secondaire sous les bassins océaniques et l'existence d'une zone de transition étendue.

Les données satellitaires et les mesures au sol ont également permis des avancées à l'échelle lithosphérique, comme la mise en évidence de variations latérales de géométrie des structures le long de l'arc Himalayen, potentielles barrières à la propagation d'une rupture sismique.



**Fig. 2. Dynamique mantellique.** Ondulations alignées avec la direction absolue du mouvement de la plaque Pacifique dans (a) les gradients de gravité longitudinaux filtrés à 1100 km et (b) les dérivées secondes de la topographie des fonds océaniques. © Panet et al. (2022).

### 1.1.3 AMÉLIORATION DU SUIVI ET DE LA COMPRÉHENSION DES ÉVÈNEMENTS EXTRÊMES

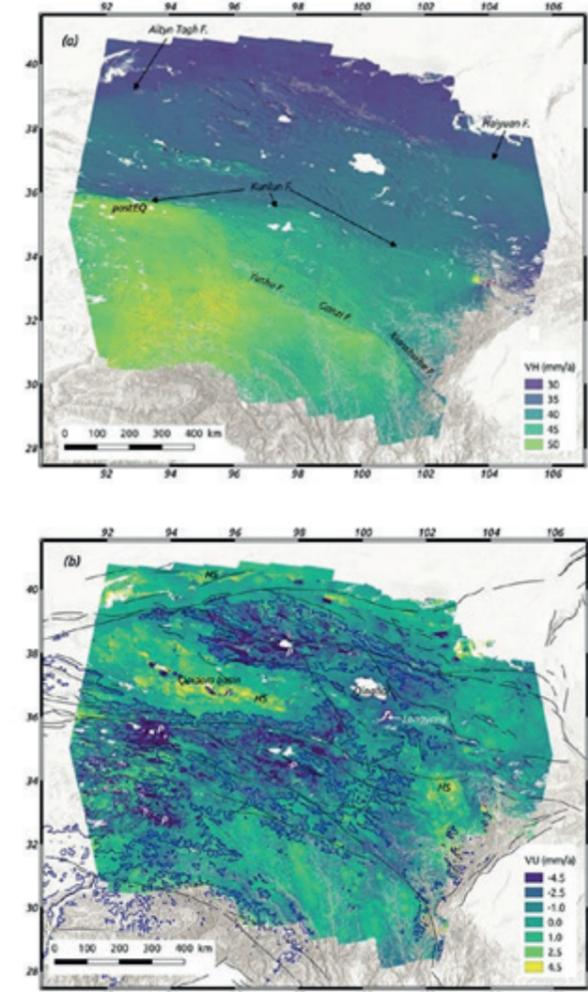
Les cinq dernières années marquent une évolution dans l'étude des événements extrêmes. Si les approches classiques ont montré leur efficacité pour caractériser rapidement des séismes (Teil, Haïti, Grèce, Turquie-Syrie, Maroc), de nouvelles études se sont focalisées sur la déformation avant et après ces événements extrêmes. L'utilisation conjointe de mesures InSAR<sup>9</sup> **Sentinel-1** et GNSS a permis d'améliorer la compréhension des séismes lents et la répartition des hétérogénéités frictionnelles le long des zones de subduction. En domaine continental, à l'échelle de l'arc Alpin, les mesures InSAR suggèrent une vitesse de surrection pouvant atteindre localement plusieurs mm/an. La mise en place du service FLATSIM<sup>10</sup> a permis d'obtenir des séries temporelles de déplacement, sur de larges zones géographiques pouvant dépasser le million de km<sup>2</sup>. À l'échelle de l'Est-Tibet (Fig. 3), le champ de vitesse horizontale apparaît comme largement dominé par le signal inter- et post-sismique le long de grandes failles décrochantes, alors que le champ vertical est principalement affecté par des processus de surface liés à la dégradation du pergélisol et aux fluctuations hydrologiques interannuelles.

Présenté dans la prospective 2019, la possibilité de détecter des signaux gravimétriques pré-sismiques court-terme (environ 2 mois) d'origine profonde a été confirmée au cours de ce quinquennal. Ces signaux reflètent probablement une déformation des plaques subduites dans le manteau supérieur, dont la migration vers la surface pourrait avoir contribué à créer des conditions favorables au déclenchement et à la propagation de ruptures géantes.

L'éruption volcanique de Hunga Tonga et les séismes de Sulawesi et de Turquie-Syrie ont également marqué la période récente en permettant de décrire la chronologie des émissions d'énergie volcanique ou sismique brutalement injectée dans l'atmosphère via la mesure du contenu électronique total extrait des données GNSS.

<sup>9</sup> Interferometric Synthetic Aperture Radar.

<sup>10</sup> ForM@Ter LARge-scale multi-Temporal Sentinel-1 InterferoMetry.



**Fig. 3. Déplacement sur l'ensemble de l'Est-Tibet.** Champs de vitesse de déplacement horizontal (à gauche) et vertical (à droite) obtenu par l'analyse massive de séries temporelles InSAR **Sentinel-1** générées par le service FLATSIM. © Lemrabet et al. (2023).

### 1.1.4 SURFACE DE LA TERRE : UNE ZONE D'INTERACTIONS ENTRE TERRE INTERNE ET ENVELOPPES EXTERNES

Longtemps limités à l'étude de l'intérieur de la Terre, les contours scientifiques « Terre solide » évoluent en prenant de plus en plus en compte les interactions avec les enveloppes externes. L'oscillation périodique de 6 ans décrite dans la section 1.1.2 pose la question d'un lien entre dynamique du noyau et variations climatiques interannuelles.

La comparaison du champ de vitesse global de l'ITRF2020 avec les variations d'ellipticité du géoïde a montré l'impact prépondérant de la fonte des glaces liée au dérèglement climatique sur les déformations globales de la Terre de ces vingt dernières

<sup>5</sup> Constellation de trois satellites.

<sup>6</sup> Gravity Recovery and Climate Experiment.

<sup>7</sup> Follow-On.

<sup>8</sup> Gravity field and Ocean Circulation Explorer.

années. Une analyse détaillée des mesures GNSS a démontré l'influence du chargement apériodique atmosphérique et océanique, pouvant atteindre 1,5 mm/an sur la composante verticale des séries temporelles.

La possibilité de disposer de données topographiques de résolution métrique via la mission **Pléiades**, a permis des avancées significatives en géomorphologie. Les données gravimétriques **GRACE (-FO)** ont été utilisées pour détecter la charge sédimentaire à l'embouchure de grands fleuves.

## 1.2 BILAN PROGRAMMATIQUE

### 1.2.1 RETOURS SUR LES PRIORITÉS 2019 DE MISSIONS SPATIALES

Deux missions spatiales étaient prioritaires lors de la prospective du Havre :

- la mission **MARVEL** avait pour double objectif d'améliorer (1) le suivi du champ de pesanteur et (2) la stabilité du système de référence terrestre, pour atteindre une précision millimétrique en positionnement par l'équipement d'un ou plusieurs satellites des quatre techniques géodésiques : SLR, DORIS, VLBI, GNSS ;
- la seconde priorité affichée était la mission magnétique **NanoMagSat**. Cette mission était un projet de 3 nanosatellites visant à compléter les observations de la mission **Swarm**. Deux des trois satellites à orbite inclinée, mais circulaire, devaient permettre une meilleure couverture temporelle locale et un meilleur suivi des variations temporelles globales rapides du champ géomagnétique.

Pour la mission **MARVEL**, une phase-0 a été réalisée mais la proposition a finalement été abandonnée au bénéfice d'une plus grande implication des chercheurs français dans la mission gravimétrique **MAGIC** et la mission de positionnement **GENESIS** (voir chapitre 3).

Le projet **NanoMagSat** a été définitivement validé en mars 2024. Cette mission permettra l'étude du champ magnétique interne (noyau et lithosphère), des courants électriques circulant dans l'ionosphère, tant globalement que localement, des signaux magnétiques produits par des courants magnétosphériques à grande échelle, des couplages entre la magnétosphère et l'ionosphère, la caractérisation du signal magnétique des marées océa-

niques et ceux des courants induits dans le manteau terrestre.

### 1.2.2 RETOURS SUR LES AUTRES PRIORITÉS

Le groupe thématique avait également donné des recommandations concernant les infrastructures au sol, l'instrumentation et l'accès aux données et aux moyens de calcul :

- l'observatoire de Tahiti est un site de référence géodésique fondamental, régi par une convention entre la Nasa, le Cnes et l'université de la Polynésie française. Il regroupe un ensemble d'observations géodésiques et géophysiques (station laser, stations DORIS et GNSS, gravimètre, sismomètre). Il est labellisé « site instrumenté » par le CNRS. Il a contribué à toutes les réalisations de l'ITRF et fournit des données à cinq services internationaux. Suite au constat de manque d'infrastructure VLBI dans le Pacifique sud, la communauté géodésique internationale (AIG) a soutenu le projet d'un nouvel observatoire géodésique combinant les quatre techniques géodésiques fondamentales, crucial pour améliorer la couverture du système de référence terrestre. Cet observatoire serait doté d'une station de télémétrie laser nouvelle génération (SLR) et d'une antenne VLBI, qui doit être financée par la Nasa, en complément d'autres instruments (GNSS, DORIS), dans un cadre collaboratif international ;
- La gravimétrie quantique a ouvert une nouvelle voie pour mesurer de façon inédite les variations spatiales et temporelles du champ de pesanteur par des mesures absolues et à haute résolution temporelle (> 1Hz) ;
- le développement du pôle ForM@Ter était une priorité pour répondre aux besoins liés à l'accès aux données d'archives (multi-capteurs et multi-agences) et aux moyens de calculs.

Depuis 2021, le projet d'observatoire géodésique et géophysique fondamental de Tahiti a été relancé. La Nasa a confirmé son souhait d'installer sur le site une antenne VLBI. L'attribution d'une parcelle du domaine a été validée par le territoire, cependant le financement du projet reste à consolider.

Sous l'impulsion de la commission européenne, les agences spatiales française et allemande ont initié le projet **CARIOQA** de spatialisation d'un accéléromètre quantique dont la phase A a démarré en 2024.

Le pôle ForM@Ter est devenu un acteur incon-

tournable de la communauté. Fortement soutenu par le Cnes et le CNRS. Ce pôle met aujourd'hui à disposition un catalogue de données. Il offre des services de visualisation des données GNSS et de calcul à la demande des déformations du sol. Il permet un accès simplifié et unique à plusieurs sites de

## 2. PRINCIPALES QUESTIONS, DÉFIS SCIENTIFIQUES ET SOCIÉTAUX

Quatre grands enjeux structurent la recherche « Terre solide » : le référencement géodésique (TS.1), la géodynamique interne (TS.2), les aléas naturels (TS.3), et les interactions Terre interne – enveloppes externes (TS.4).

### 2.1 AMÉLIORATION DU RÉFÉRENCEMENT GÉODÉSIQUE (ENJEU TS.1)

La géodésie spatiale joue un rôle central dans de nombreuses applications scientifiques et sociétales grâce au référencement précis de points fondamentaux matérialisés par les stations DORIS, GNSS, SLR et VLBI dans le repère de référence ITRF. Elle permet de quantifier les déformations de la Terre et est cruciale pour la détermination de l'évolution du niveau moyen des mers. La réalisation d'un repère de référence terrestre aussi précis et stable que possible est indispensable. La cible à atteindre pour les futurs ITRF, telle que mise en avant par l'association internationale de géodésie, est une exactitude de 1 mm et une stabilité de 0,1 mm/an. Il faut donc gagner un peu plus d'un demi ordre de grandeur par rapport à la situation actuelle (ITRF2020) pour répondre aux exigences fixées. Atteindre cet objectif passe par une amélioration des infrastructures au sol, du lien entre les quatre techniques de mesure, ainsi que de la modélisation et des méthodes de traitement de données combinées.

### 2.2 MIEUX COMPRENDRE LA DYNAMIQUE INTERNE DE NOTRE PLANÈTE (ENJEU TS.2)

L'absence de mesure directe de l'intérieur de notre planète implique que de nombreuses questions de premier ordre sur sa dynamique interne demeurent ouvertes : quelle est la structure thermique et compositionnelle de la Terre ? Quelles sont les interactions entre les couches solides de la Terre et son

données et d'outils de calculs portés notamment par les infrastructures de recherche Epos-France et Data Terra et les services nationaux d'observation (INSU-CNRS).

noyau fluide ? Quelle est la dynamique du noyau externe à courte échelle de temps ? La dynamique du noyau peut-elle affecter le climat ? Quelle est la viscosité de la couche à la limite noyau-manteau ? Quelle est la nature de la convection mantellique ? Quels sont les couplages entre les plaques plongeantes et le manteau ?

Les défis scientifiques sont nombreux et concernent l'imagerie à haute résolution spatiale, la capacité à séparer les différentes sources magnétiques, géodésiques et gravimétriques (superficielles et profondes, externes et internes), la mise en œuvre de méthodes pour interpréter conjointement des observations variées.

La plupart des sources magnétiques ne peuvent être mises en évidence que par une accumulation de données sur un temps long (correspondant au moins au cycle solaire) et parfois à des altitudes et des échelles variées afin d'amplifier le rapport signal sur bruit des structures et de les séparer des signaux transitoires. De même en gravimétrie, il est indispensable d'acquérir des observations permettant de distinguer les signaux court-terme (hydrologie, séisme) et long-terme (structure) à différentes altitudes. Atteindre ces objectifs requiert des observations spatiales pérennes sur plusieurs décennies et des mesures au sol, par drone et embarquées (bateau, avion, ballon).

### 2.3 AMÉLIORATION DU SUIVI ET DE LA COMPRÉHENSION DES ÉVÈNEMENTS EXTRÊMES (ENJEU TS.3)

Mieux estimer les aléas naturels liés aux événements extrêmes (séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, instabilités gravitaires) reste un défi scientifique majeur pour la communauté « Terre solide ». L'enjeu sociétal est évident, et malgré d'intenses recherches menées depuis plusieurs décennies, de nombreuses questions demeurent ouvertes : Quels

sont les processus menant à la rupture sismique ou au glissement gravitaire ? Quelle est l'influence des déformations aismiques et transitoires sur l'état de contrainte des zones de faiblesses ? Quelles sont les interactions entre glissements lents le long des failles et séismes ? Comment améliorer le suivi temporel haute fréquence des éruptions volcaniques ? Quels sont les mécanismes physiques permettant le suivi des tsunamis depuis l'espace ?

Pour l'ensemble des aléas, le principal défi consiste en la détection de signaux précurseurs ou initiateurs, par nature peu fréquents et de faible amplitude, souvent mélangés à des signaux pouvant être associés à des perturbations de surface, naturelles ou anthropiques. Du point de vue des observations spatiales, cela implique des temps de revisite fréquents, et l'acquisition de séries temporelles longues et précises permettant de discriminer l'origine des signaux observés.

Pour répondre à ce défi, il est indispensable de combiner des observations acquises à différentes altitudes (sol, aéroportée, spatiale) et de nature variée (sismologique, géodésique, thermique, gravimétrique, ionosphérique).

## 2.4 VERS UNE VISION INTÉGRÉE DES INTERACTIONS ENTRE TERRE INTERNE ET ENVELOPPES EXTERNES (ENJEU TS.4)

L'étude des interactions Terre interne – enveloppes externes constitue une thématique pluri-

# 3. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

## 3.1 MISSIONS SPATIALES ET BALLONS

Aucune mission d'imagerie n'est indiquée dans ce paragraphe. Le groupe souligne cependant l'importance pour la communauté de maintenir une forte vigilance sur les programmes Copernicus afin qu'ils restent en adéquation avec ses besoins, notamment sur les paramètres, la fréquence d'acquisition et la qualité des images.

### 3.1.1 4D-EARTH

Le groupe soutient le projet de mission **4D-Earth** qui permettra un suivi de l'évolution de la topographie des terres émergées, élément indispensable pour aborder les enjeux TS.3 et TS.4. Cette mission pérennisera les observations de type **Pléiades** ou

disciplinaire émergente. Les recherches associées concernent entre autres, les rétroactions entre l'ajustement isostatique et la fonte récente des calottes glaciaires, les transferts de masse à la surface de la Terre et l'occurrence des séismes, la déformation crustale produite par des variations du niveau des nappes phréatiques, les effets du volcanisme sur la chimie atmosphérique et le bilan radiatif, ou les interactions entre les champs magnétiques d'origine interne et externe et leur effet sur l'atmosphère et le monde vivant.

Les enjeux sociétaux sont considérables et requièrent des recherches originales sur la séparation des sources et le développement d'approches combinant des mesures multi-thématiques, multi-techniques et multi-solutions. À titre d'exemple, l'analyse conjointe des observations spatiales des champs magnétiques et gravimétriques, et des mesures de la rotation terrestre indiquent une oscillation périodique de 6 ans liée à la dynamique du noyau (voir section 1.1.2). Une période similaire a également été détectée pour plusieurs paramètres caractérisant les enveloppes externes comme le taux de variation du niveau moyen des mers, la température moyenne de surface, les précipitations, le bilan de masse des glaciers et calottes glaciaires, ou le stockage d'eau. Cette corrélation peut être fortuite, mais peut également suggérer un couplage entre Terre interne et climat, dont les mécanismes sont aujourd'hui largement méconnus.

**CO3D.** Cette mission est décrite en détail dans la thématique « Surface continentale ».

### 3.1.2 CARIOQA (COLD ATOM RUBIDIUM INTERFEROMETER IN ORBIT FOR QUANTUM ACCELEROMETRY)

**CARIOQA** est un projet du programme Horizon Europe, financé par la commission européenne, et piloté par le Cnes et l'agence spatiale allemande (DLR). L'objectif est d'embarquer et de tester un accéléromètre atomique dans l'espace. Il permettra de démontrer les caractéristiques clés de l'interférométrie atomique spatiale, telles que des temps d'interrogation de plusieurs secondes et la compensation active des rotations. Cette démonstration technologique ouvrira la voie à des missions

spatiales ambitieuses basées sur l'interférométrie à atomes froids, permettant ainsi de préparer les missions gravimétriques à l'horizon 2035. La phase A de ce projet a démarré en 2024. L'intérêt pour la communauté « Terre solide » est la possibilité d'accéder à des mesures absolues et globales du champ de pesanteur et de ses gradients.

### 3.1.3 GENESIS (GALILEO INNOVATIVE SPACE SERVICE SOLUTION)

**GENESIS** est une mission Esa du programme FutureNAV pour le positionnement précis. Cette mission multi-techniques en géodésie, combinant GNSS, DORIS, SLR, et VLBI, doit permettre un bond en avant de la qualité du référentiel terrestre et, plus globalement du positionnement et des applications qui en dépendent. L'objectif est de permettre la réalisation du référentiel terrestre avec une précision de 1 mm et une stabilité à long terme de 0,1 mm/an, selon les recommandations des instances internationales (enjeu TS.1). La mission **GENESIS** a été approuvée en 2022. Cependant, parmi les instruments embarqués, les récepteurs DORIS font face à un problème d'obsolescence des composants électroniques. Via son soutien à la mission **GENESIS**, le groupe recommande le financement du projet **DORIS-NEO** de développement d'un nouveau récepteur qui permettra d'équiper les futures missions en proposant des performances étendues.

### 3.1.4 MAGIC (MASS-CHANGE AND GEOSCIENCES INTERNATIONAL CONSTELLATION)

Le groupe soutient fortement la mission **MAGIC**. Par rapport aux missions précédentes, l'amélioration des performances de **MAGIC** repose sur un concept de constellation avec un double tandem de satellites gravimétriques, là où **GRACE (-FO)** sont des tandems simples. Il est prévu que l'une des deux paires de satellites soit implémentée par l'Esa, et l'autre dans le cadre d'un partenariat Nasa/DLR. Chaque tandem est formé de deux satellites se poursuivant sur la même orbite basse. La mesure de la distance inter-satellite, effectuée grâce à un lien laser, est sensible aux variations du champ de pesanteur entre les deux satellites, tandis que des mesures accélérométriques permettent la correction précise des contributions des forces non-gravitationnelles. Les deux tandems sont placés sur des orbites d'inclinaisons différentes, ce qui est un

facteur clé dans la réduction des artefacts d'aliasing dans les géoïdes obtenus, en plus de l'augmentation de la fréquence d'échantillonnage temporel par rapport à un simple tandem. En effet, ces inclinaisons différentes permettent d'améliorer l'isotropie des mesures d'inter-distances, celles-ci ne se faisant pas seulement dans une direction approximativement Nord/Sud mais aussi selon des directions obliques. Il en résulte une amélioration attendue des performances d'un facteur environ 10. À titre d'illustration, les données **MAGIC** permettront de chercher des signaux précurseurs de séismes de magnitude 7.5 et plus (environ 55 événements sur 10 ans), au lieu de 8.5 et plus (environ 1-2 événements sur 10 ans) avec **GRACE (-FO)**. L'augmentation de la fréquence d'acquisition, l'amélioration des performances et la pérennisation des observations du champ de pesanteur étendra considérablement le champ des applications pour l'étude de la « Terre solide » (enjeux TS.2, TS.3 et TS.4), mais également pour les thématiques « Surface continentale » et « Océan ». Approuvée en 2022, cette mission fait face à des difficultés de budget côté Esa. Le démarrage de la phase-B1 a eu lieu en 2024 et celui de la phase-B2 reste à valider à l'automne 2024.

### 3.1.5 NANOMAGSAT

**NanoMagSat** a pour objectif contractuel avec l'Esa d'avoir une constellation en opération pour au moins 3 ans à partir de début 2028. Au-delà de cette date, le groupe souligne l'importance de maintenir et de renforcer cette constellation de manière pérenne (enjeux TS.2, TS.3 et TS.4), via la possibilité de relancer des satellites comparables à bas coût.

### 3.1.6 GRAVMAGBALLON

Le groupe considère comme prioritaire le projet de mission ballon **GravMagBallon** qui permettra d'acquérir des données magnétiques et gravimétriques entre 10 et 30 km d'altitude et ainsi aborder l'évolution court terme (< année) de la surface de la Terre à des échelles régionales et d'améliorer l'imagerie des structures lithosphériques. L'objectif de cette mission Cnes est également le déploiement d'instruments innovants associés à la gravimétrie quantique ou au magnétomètre MAM (Miniaturized Absolute scalar and self-calibrated vector Magnetometer) respectivement développés pour les missions **CARIOQA** et **NanoMagSat**. Ces mesures combleront une zone de lacune d'observations et

seront clés pour mieux séparer les sources des signaux magnétiques et gravimétriques (enjeux TS.2, TS.3 et TS.4).

### 3.2 AUTRES PRIORITÉS

#### 3.2.1 INFRASTRUCTURES SOL

Le groupe recommande le déploiement de l'Observatoire Géodésique Géophysique Fondamental de Tahiti, infrastructure unique dans le Pacifique Sud, combinant les quatre techniques géodésiques, indispensable pour améliorer la couverture du système de référence terrestre, d'autant que la station VLBI est actuellement garantie sur le principe par un financement de la Nasa. La réalisation d'une station SLR française de nouvelle génération est un enjeu majeur de ce projet. Cette infrastructure est complémentaire de la mission **GENESIS** (enjeu TS.1).

#### 3.2.2 RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT

Développés tout au long de la dernière décennie, les gravimètres absolus quantiques au sol permettent d'envisager la possibilité de leur spatialisation. Positionnés au centre de masse d'un satellite ils deviennent des accéléromètres ultra-précis et surtout absolus qui permettent de séparer les accélérations gravitationnelles et non-gravitationnelles que subit un satellite (mission du type **GRACE** ou **NGGM**). En couplant ces instruments par paire à bord d'un même satellite, ils permettent aussi de

## 4. CONCLUSION

Le groupe a souhaité mettre en avant des priorités favorisant le renforcement des expertises scientifiques et l'émergence d'idées nouvelles au sein de la communauté « Terre solide ». Les recommandations sont faites avec un souci d'efficacité, mais également de sobriété et de responsabilité vis-à-vis du dérèglement climatique. Ainsi, le groupe soutient

faire une mesure directe du gradient de gravité (mission du type **GOCE**). La communauté française est actuellement à la pointe du développement de ce type d'instrument. Le groupe réaffirme l'importance de soutenir le développement de ces capteurs innovants, notamment dans le cadre de la mission **CARIOQA**.

En magnétisme, la principale évolution à court terme consiste à reprendre la conception d'un magnétomètre d'observatoire terrestre autonome dont les mesures permettront de compléter les données satellitaires. Les premiers travaux sur ce sujet, menés dans le cadre de plusieurs actions R&T pour la mission **Swarm**, puis combinés aux progrès réalisés en préparation de **NanoMagSat** sur le MAM offrent d'intéressantes perspectives.

#### 3.2.3 DONNÉES ET CALCULS

L'exploitation, la distribution et l'archivage des données doivent être un élément clé de la structuration de la communauté « Terre solide ». C'est un point critique sur les questions transverses (enjeu TS.4). Cela passe par un accès facilité aux données et des moyens de calculs adaptés aux traitements massifs, à l'inversion et à l'assimilation. L'utilisation pertinente des ressources en intelligence artificielle devra être au cœur de cette structuration. Le groupe soutient donc le renforcement et l'extension du Pôle ForM@Ter en relation avec l'infrastructure de recherche Data Terra.

un nombre limité de missions spatiales, adossées à des collaborations internationales et répondant à des besoins d'une large communauté allant au-delà des contours de la thématique « Terre solide ». Dans le tableau suivant les recommandations sont hiérarchisées par ordre de priorité décroissante.

Questions scientifiques	Observable	Cadre actuel de développement	Priorité	Remarques
TS.2, TS.3 et TS.4	Champ gravimétrique	MAGIC, mission Esa-Nasa. La phase-B2 doit être validée à l'automne 2024.	Majeure	Couvre les besoins d'une large communauté, permet une extension temporelle aux missions GRACE (-FO) avec une précision inégalée.
TS.1	Positionnement millimétrique	Observatoire Géodésique Géophysique Fondamental de Tahiti.	Majeure	Complémentaire de la mission <b>GENESIS</b> .
TS.1	Positionnement millimétrique	<b>GENESIS</b> , mission Esa FutureNAV approuvée en novembre 2022. Démarrage ABCD en 2024. Requiert le soutien au projet <b>DORIS-NEO</b> .	Majeure	Soutenue par la Nasa et le comité international GNSS des Nations Unies. Lancement prévu en 2028.
TS.2, TS.3 et TS.4	Champ magnétique et gravimétrique	<b>GravMagBallon</b> , mission Cnes.	Majeure	Préparation mission <b>CARIOQA</b> .
Démonstrateur instrumentation spatiale.	-	<b>CARIOQA</b> , phase-A lancée en janvier 2024, Cnes, DLR, Commission Européenne, Airbus Defence and Space, GMV and FORTH/PRAXI.	Majeure	R&T Capteur quantique. Préparation des missions scientifiques opérationnelles post- <b>MAGIC</b> . Intérêt en physique fondamentale.
TS. 3 et TS.4	Suivi de la surface des terres émergées	<b>4D-Earth</b> , mission Cnes.	Substantielle	voir thématique « Surface continentale ».
TS.2, TS.3 et TS.4	Champ magnétique	<b>NanoMagsat</b> , mission Scout Esa.	-	Constellation de trois satellites. Les lancements débuteront en 2027.

## 5. RÉFÉRENCES

Altamimi, Z., Rebischung, P., Collilieux, X., Métivier, L., & Chanard, K. (2023). ITRF2020: An augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions. *Journal of Geodesy*, 97(5), 47, <https://doi.org/10.1007/s00190-023-01738-w>.

Lemrabet, L., Doin, M.-P., Lasserre, C., & Durand, P. (2023). Referencing of continental-scale InSAR-derived velocity fields: Case study of the eastern Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128, e2022JB026251. <https://doi.org/10.1029/2022JB026251>.

Panet, I., Greff-Lefftz, M., & Romanowicz, B. (2022). Dense mantle flows periodically spaced below ocean basins. *Earth and Planetary Science Letters*, 594, 117745, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117745>.

Nadia Ayoub, Pascal Bonnefond, Jacqueline Boutin (Présidente groupe Océan entrant), Aurélien Carbonniere (thématicien côtier/cryosphère marine Cnes), Hervé Claustre, Casimir de Lavergne, Francesco d'Ovidio, Yann Drillet, Yannice Faugère (thématicien océan entrant Cnes), Cedric Jamet, Alexei Kouraev, Pierre-Yves Le Traon (Président groupe Océan sortant), Bertrand Lubac, Frédéric Nouguier, Ludivine Oruba, Annick Sylvestre-Baron (thématicienne océan sortant Cnes).

De nombreuses questions scientifiques demeurent sur notre compréhension du fonctionnement de l'océan, ce qui requiert de faire progresser les connaissances sur son évolution globale, ses couplages avec l'atmosphère, les zones polaires, le rôle des fines échelles océaniques, ses interfaces avec la surface terrestre, ses propriétés physiques, biogéochimiques et écologiques. Comprendre, surveiller et prévoir l'état de l'océan s'appuie sur la complémentarité entre mesures spatiales, in-situ et modélisation numérique. Outre le besoin de continuité d'observations spatiales, de nouvelles observables, des résolutions spatio-temporelles accrues et de nouveaux outils pour combiner ces larges ensembles d'informations (e.g. jumeaux numériques) sont nécessaires pour répondre à ces enjeux de connaissance, mieux évaluer le rôle de l'océan sur le climat et l'évolution de la biodiversité marine, et mieux guider les politiques environnementales et les mesures d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. Les mesures in-situ permettent d'étalonner et de valider les mesures spatiales, d'apporter la dimension verticale, de documenter davantage de paramètres, et de donner un contexte historique à long terme. La modélisation permet de synthétiser ces informations via l'assimilation de données, de faire des prévisions à l'échelle de quelques mois, voire de plusieurs décennies, ou encore de développer des jumeaux numériques.

L'océan joue un rôle majeur sur le climat. Il stocke environ 90% de l'excès de chaleur reçu par la planète en raison de l'accroissement du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et un quart des émissions de CO<sub>2</sub> générées par les activités humaines. Il est aussi le ré-

## 1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

Les recherches présentées dans le bilan se déclinent autour de cinq thèmes prioritaires (climat, côtier et littoral, fines échelles, biogéochimie et

ceptacle d'énormes flux d'eaux douces, intensifiés par la fonte des glaces, et celui de multiples contaminants rejetés dans la mer via les fleuves. Ces apports engendrent des changements majeurs dans l'océan (e.g. réchauffement des océans, niveau de la mer, oxygène dissous, acidification) mettant en péril ses écosystèmes. De plus, l'occurrence d'événements extrêmes s'est multipliée avec un impact direct sur les océans, comme les vagues de chaleur marine, des submersions côtières, des phénomènes de blanchissement des coraux, des blooms exceptionnels de phytoplancton, ou la prolifération anormale des sargasses ...

En réponse à ces enjeux majeurs, de nouvelles initiatives internationales aux plus hauts niveaux politiques ont été lancées, e.g. la décennie (2021-2030) des sciences océaniques des Nations Unies, le One Ocean Summit à Brest en 2022, la COP15 biodiversité en 2022 avec l'adoption d'un cadre mondial visant à créer un réseau mondial d'aires marines protégées (AMP) couvrant 30 % de l'océan d'ici à 2030 et l'adoption d'un traité historique sur la conservation et l'utilisation durable de la biodiversité marine en haute mer (BBNJ) en 2023. La Conférence des Nations Unies sur l'Océan (UNOC) en 2025 à Nice sera un événement politique majeur pour soutenir la mise en œuvre de l'Objectif de Développement Durable 14 : Conserver et utiliser durablement les océans, les mers et les ressources marines pour le développement durable.

écologie marine, et zones polaires), en tirant profit d'outils transverses (océanographie opérationnelle et intelligence artificielle).

## 1.1 LE CLIMAT

La communauté scientifique française a apporté des contributions de tout premier plan sur le suivi du niveau moyen des mers et du déséquilibre énergétique de la planète, par l'analyse et l'interprétation des données altimétriques combinées aux données gravimétriques et in-situ.

L'extension de la série d'altimétrie de précision (**T/P, Jason-1, 2 et 3**) avec le lancement de **Sentinel-6** en novembre 2020 et les efforts continus de retraitement des données passées, d'amélioration des algorithmes et de caractérisation des erreurs a mis en évidence une accélération nette ( $\sim 0,08$  mm/an<sup>2</sup>) de la montée du niveau moyen des mers qui atteint maintenant plus de 4 mm/an.

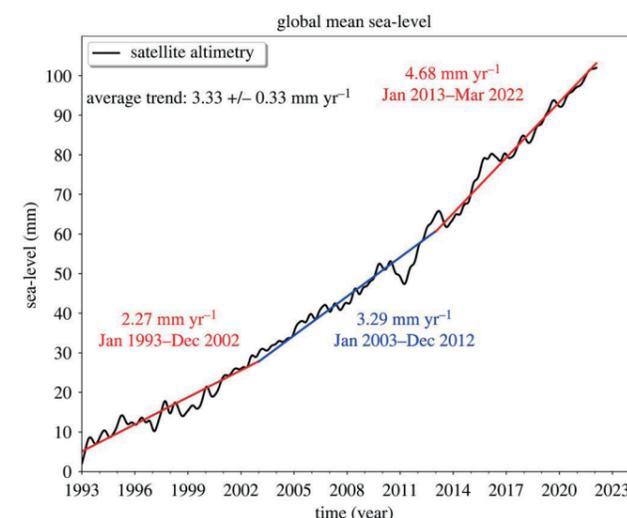


Fig. 1. Evolution du niveau moyen des mers de 1993 à 2022 (Cazenave et Moreira, 2022).

Combinées aux données Argo et à la nouvelle version des données de gravimétrie spatiale (**Grace et Grace-Fo**), les données altimétriques permettent de fermer le bilan du niveau de la mer sur la période complète 1993-2022. La fermeture du bilan depuis 1993 montre que l'accélération observée dans la hausse du niveau de la mer s'explique essentiellement par une accélération de la perte de masse des calottes Antarctiques et Groenlandaises. L'accélération de l'augmentation du contenu en chaleur de l'océan joue aussi un rôle mais dans une moindre mesure.

## 1.2 LE CÔTIER ET LE LITTORAL

Il est essentiel d'évaluer, comprendre et anticiper la vulnérabilité des systèmes côtiers, en particulier

dans le contexte du changement climatique. Les données satellitaires sont un outil essentiel pour une approche à la fois locale mais également globale.

La variabilité spatio-temporelle des paramètres biogéochimiques autour des côtes françaises a bénéficié d'un projet fédérateur qui a permis d'évaluer différents algorithmes de corrections atmosphériques et bio-optiques à partir des données de couleur de l'océan **Sentinel-2 et -3**, en synergie avec les services d'observation in situ. Les produits générés permettent d'observer la zone côtière à moyenne (300m) et haute résolution (10m), par ex. pour la surveillance de la qualité des eaux.

La bathymétrie, la topographie en zones intertidales et l'évolution du trait de côte sont des paramètres clés de l'étude des environnements côtiers. Des avancées majeures ont été réalisées sur leur estimation et sur le suivi quasi-opérationnel du trait de côte à partir des images **Sentinel-1, -2, Venus, Pléiades et Landsat**. Les positions du trait de côte entre 1993 et 2019 combinées au niveau de la mer altimétrique et à des modèles numériques globaux ont permis de révéler que les littoraux sont impactés par trois principaux facteurs eux-mêmes liés à El Niño: le niveau de la mer, les vagues océaniques et les rivières (Fig. 2).

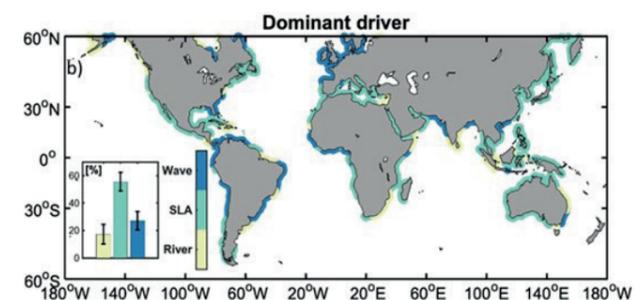


Fig. 2. Relation entre variation (1993-2019) du trait de côte et les facteurs hydrodynamiques (niveau de la mer, les vagues océaniques et les rivières) (Almar et al. 2023).

L'observation des propriétés des vagues et des vents forts est critique pour vérifier ou contraindre les modèles de submersion en cas de tempête ou cyclone, qui est un des risques majeurs pour les populations vivant dans les zones littorales. La mission **Cfosat** a permis de mesurer le spectre des vagues dans des longueurs d'onde inaccessibles aux mesures SAR ( $\sim <200$ m), améliorant la description du couplage vent-vagues notamment dans les cy-

clones et à l'approche de la glace. Les observations **Smos** ont permis la mise en évidence d'un renforcement des forts cyclones lors de leur passage au-dessus de zones dessalées (e.g. panaches de fleuves), lié à des rétroactions océan-atmosphère.

Les mesures de hauteur de mer à la côte ont été raffinées par un retraitement adapté des formes d'onde côtières des mesures à haute résolution (300 m) des missions **Jason-1, -2, -3**. Ce retraitement a permis d'analyser les variations à moins de 8 km de la côte par rapport à celles du large sur les 20 dernières années.

En préparation à l'exploitation des données **Swot** dans les estuaires et zones littorales, des simulations numériques de l'hydrodynamique (avec ou sans assimilation) et l'instrumentation de zones littorales pour la phase de Cal/Val (côtes Normandes

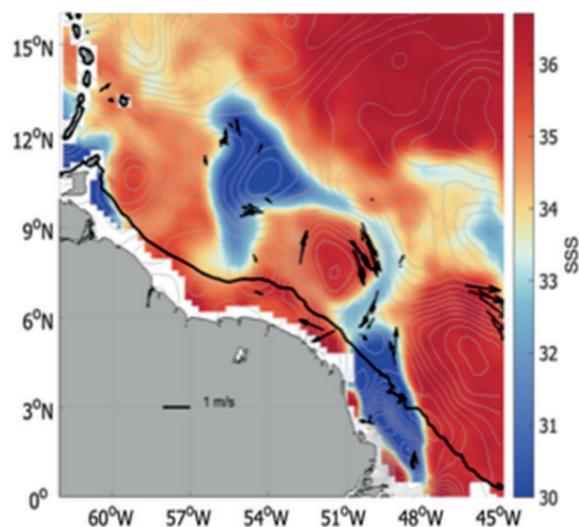
en France) ont été mises au point.

### 1.3 LES FINES ÉCHELLES SPATIO-TEMPORELLES

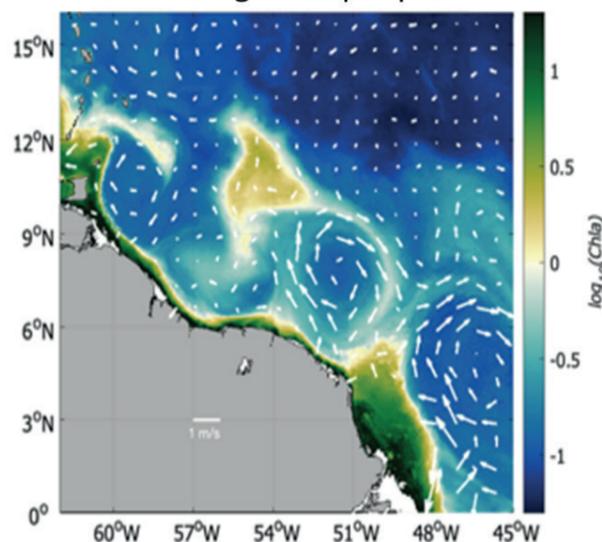
On parle de fines échelles océaniques pour des structures telles que tourbillons et filaments de méso- et sous-méso-échelle et ondes internes avec des tailles typiques de 1-100 km. Pour ces études, la donnée spatiale reste la seule observation à la fois globale et à haute résolution.

Ce régime joue un rôle primordial dans le transport d'énergie et de matière ainsi que dans la modulation des processus biogéochimiques et écologiques, comme montré en combinant salinités de surface **Smos**, Chlorophylle-a (Chl-a) et courants géostrophiques dérivés des mesures altimétriques (Fig. 3).

a) Salinité (SMOS+SMAP) et vitesses de bouées dérivantes



b) Chl-a et courants géostrophiques

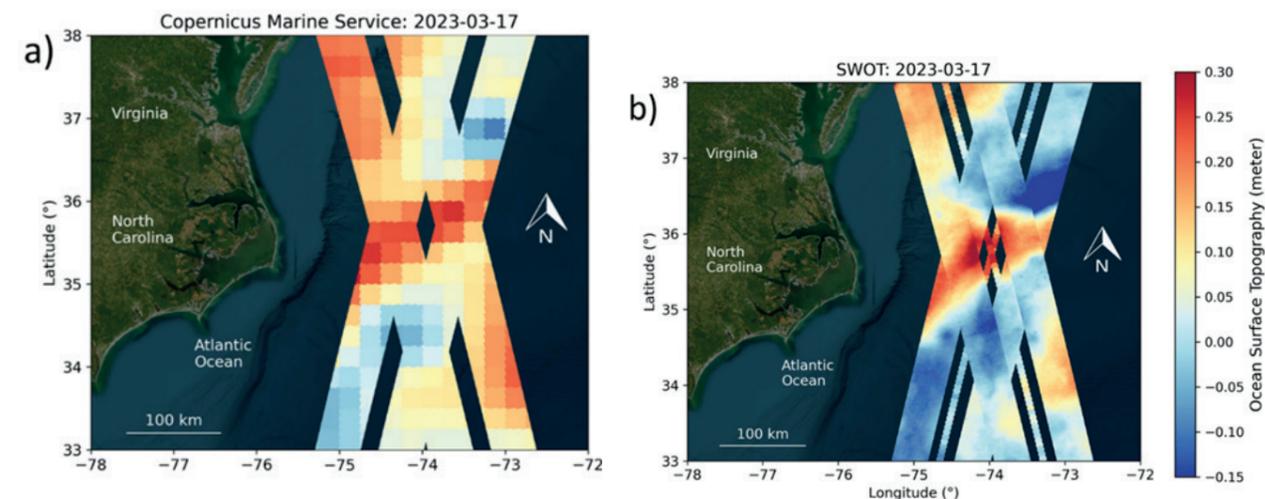


**Fig. 3.** Evolution d'un patch d'eau douce enrichi en chlorophylle se détachant du panache de l'Amazonie au large de la Guyane (Olivier et al., 2024).

Afin de mieux comprendre la nature des signaux qui seraient observés dans la gamme méso- et sous-méso-échelle, des études préparatoires à la mission **Swot** ont porté sur la marée interne et ses interactions avec la circulation océanique. Elles ont permis de mettre au point des simulations réalistes à haute résolution forcées par la marée à l'échelle régionale, du bassin océanique et globale.

En 2023, plus de vingt campagnes océanographiques se sont coordonnées autour du monde

dans le cadre de la Cal/Val **Swot** (<https://www.swot-adac.org>). Cette ambitieuse initiative multisites, coordonnée par les équipes françaises et fortement soutenue par le Cnes, montre bien l'effet levier de telles actions pour fédérer des programmes internationaux d'envergure. Les premières observations **Swot** montrent un potentiel exceptionnel pour l'étude des fines échelles, avec une amélioration de la résolution spatiale par un facteur 10 (Fig. 4).



**Fig. 4.** Comparaison entre l'anomalie de hauteur de la mer détectée à partir de mesures a) altimétriques nadir 1D (produit 0,25° du Copernicus Marine Service, basé sur 7 satellites altimètres nadir) et b) 2D Swot. Ce dernier détecte beaucoup mieux les fines échelles. (Dibarboure, 2024)

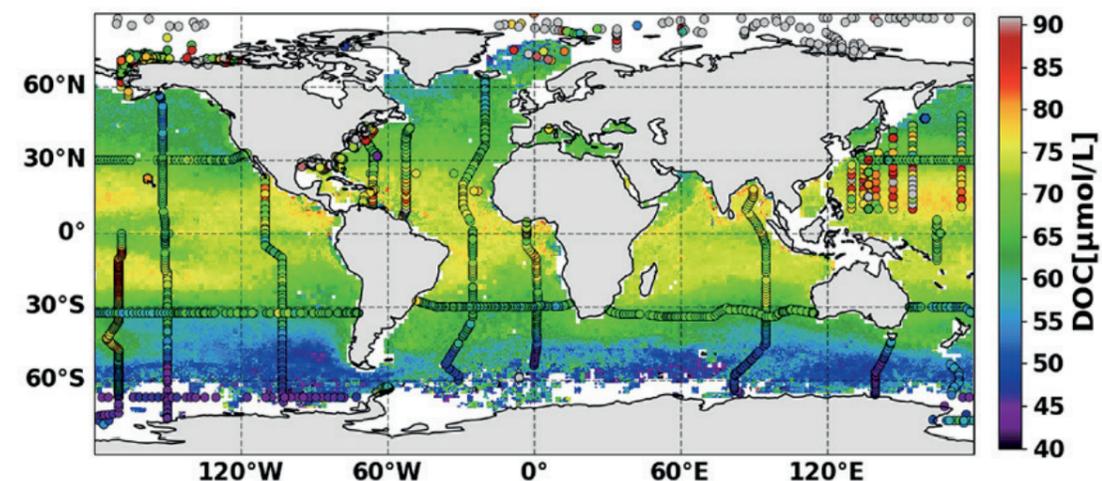
### 1.4 LA BIOGÉOCHIMIE ET L'ÉCOLOGIE MARINE

La compréhension de la biogéochimie, de l'écologie marine, et de leur couplage avec la physique de l'océan, du global au côtier, notamment au niveau du cycle du carbone a été un des axes prioritaires de recherche.

De longues (> 20 ans) séries continues d'observations satellitaires de Chl-a ont permis de déconvoluer la variabilité de la biomasse du phytoplancton sur des échelles spatiales ou temporelles inédites. Derrière la variabilité saisonnière (associée au bloom de phytoplancton) la variabilité de la Chl-a à l'échelle globale apparaît davantage dominée par des fluctuations à haute fréquence (<3 mois)

et petites échelles spatiales (<50 km) que par des fluctuations basse-fréquence, ce qui était le paradigme dominant jusqu'alors. Des efflorescences de phytoplancton plus précoces (une à deux semaines) et deux à trois fois plus intenses ont été mises en évidence dans les zones frontales.

La quantification du carbone organique dissous (DOC) de surface, plus grand réservoir de carbone organique dans l'océan, a été améliorée par la prise en compte, avec un réseau neuronal artificiel (ANN), de l'historique de paramètres physiques de la couche de surface, ce qui a permis de mieux estimer les différents compartiments du carbone organique (Fig. 5).



**Fig. 5.** Distribution du carbone organique dissous à la surface de l'Océan (Bonelli et al., 2022). Les cercles représentent les observations in situ

## 1.5 LES ZONES POLAIRES

Les zones polaires subissent des changements majeurs bien plus rapides que l'océan global (phénomène d'amplification polaire). Alors que la disparition de la banquise arctique estivale semble maintenant inéluctable, la banquise antarctique connaît à son tour une déstabilisation soudaine avec de probables conséquences majeures sur la stabilité de la calotte glaciaire et le niveau de la mer.

Les principaux résultats concernent le suivi de l'épaisseur de la banquise et de la neige. Ce n'est

qu'avec l'arrivée de l'altimétrie Synthetic Aperture Radar (SAR) avec **CryoSat-2 (CS2)** que des mesures fiables d'épaisseur de glace ont pu être réalisées. Avec une technique d'intelligence artificielle (IA), il a été possible de reconstituer une série homogène sur 30 ans du volume des banquises Arctique et Antarctique (Fig. 6) en étalonnant successivement **Envisat, ERS-2 et ERS-1** sur **CS2**. Les séries d'épaisseur de neige sur la banquise ont également pu être étendues par bi-fréquence altimétrique (**CS2/Ku** et **Saral/Ka**) à l'Antarctique et des techniques combinant **CS2** et **IceSat-2** sont actuellement en développement.

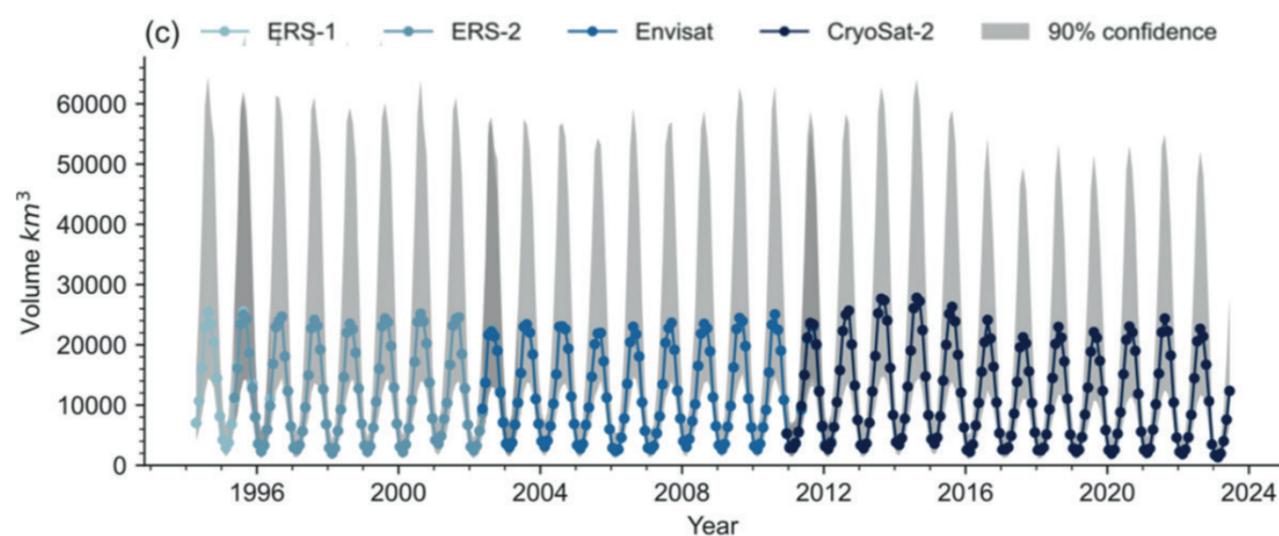


Fig. 6. Première observation spatiale sur 30 ans des variations de volume de la banquise Australe (Bocquet et al. 2024).

Les salinités mesurées par **Smos** ont mis en évidence des cellules d'eau douce issues de la fonte de la glace et de panaches de fleuve en océan Arctique, avec de très forts contrastes interannuels sur plus de 10 ans, en relation avec les courants de surface et les vents.

L'observation de la couleur de l'océan a permis de mieux cerner l'évolution des flux biogéochimiques dans l'océan Arctique. L'augmentation du débit des grands fleuves arctiques et la fonte du permafrost ont ensemble conduit à une augmentation du flux de carbone organique terrestre vers l'océan Arctique.

## 1.6 L'OCÉANOGRAPHIE OPÉRATIONNELLE

Les systèmes de réanalyse, d'analyse et de prévision

océanique permettent aujourd'hui de représenter et de prévoir l'évolution de l'état de l'océan pour une large diversité de variables, de processus à des échelles spatiales et temporelles très variées. Cette thématique s'est fortement structurée ces dernières années en Europe dans le cadre du service marin de Copernicus avec une forte contribution d'acteurs français et avec un lien fort avec l'océanographie spatiale et les projets soutenus par le TOSCA.

Les systèmes d'analyse et de prévision mis en place et opérés aujourd'hui permettent d'assimiler une grande variété de données spatiales (niveau de la mer, température de surface, hauteur significative des vagues, spectres de vagues, concentration, épaisseur et vitesses de déplacement de la glace, couleur de l'océan) aux échelles globales, régionales et côtières.

## 1.7 L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Des méthodes d'IA, mises en place à partir de données satellitaires (e.g. topographie de surface, couleur de l'océan) fournissent de nouvelles solutions génériques et démontrent ou suggèrent des gains de performance significatifs (notamment en termes d'échelles résolues et processus pris en compte) pour une grande variété de problèmes de traitement des données (interpolation spatio-temporelle, downscaling, débruitage, fusion données multi-sources, segmentation et classification de structures géophysiques).

Des méthodes d'apprentissage profond ont ainsi été utilisées afin de fusionner des images satellitaires ayant des bandes spectrales et des résolutions spatiales différentes, notamment **Sentinel-2** et **-3** et pour l'étude des zones côtières à partir de données satellitaires de la couleur de l'océan.

## 1.8 ALGORITHMIQUE, EXPLOITATION ET PÔLES DE DONNÉES

Soutien des équipes algorithmiques et support aux Science Team internationales. La communauté s'est organisée autour de groupes mission fortement soutenus par le TOSCA. Ils sont fondamentaux pour coordonner les activités océan au niveau national, avec une ouverture forte de ces groupes à l'international via notamment des appels à proposition dédiés, permettant de renforcer le rayonnement de la communauté française.

Exploitation des données. Le retraitement des longues séries de données multi-capteurs, la qualification des incertitudes et l'exploitation scientifique de ces séries temporelles est une composante essentielle des études sur le climat. Ces travaux sont organisés via le programme Esa Climate Space auquel le CNES participe activement en mobilisant la communauté scientifique nationale qui est leader dans les domaines clés que sont l'étude du niveau de la mer, l'état de la mer et la salinité de surface. Le Cnes a joué et doit continuer de jouer un rôle majeur en amont de ces actions pour assurer un retraitement continu et à l'état de l'art des données.

Pôle de données. Une évolution majeure du paysage des plateformes numériques pour le spatial et les services a vu le jour. Au niveau national, l'IR Data Terra et ses quatre pôles, dont ODATIS pour

l'océan et le domaine côtier, se sont structurés, des centres d'expertises ont été créés.

## 1.9 RETOURS SUR LES PRIORITÉS 2019 DE MISSIONS SPATIALES

Les missions **Cimr** et **Cristal** proposées dans le cadre du programme Copernicus Sentinel Expansion étaient des priorités fortes (P0) afin d'assurer une continuité (et des améliorations) des mesures micro-ondes de température, de salinité, et d'épaisseur de glace de mer et répondre aux enjeux majeurs de l'observation en Arctique. Ces missions sont maintenant décidées et la communauté française est bien impliquée dans leur mise en place via la participation aux 'Mission Advisory Groups' (MAGs) et à des activités préparatoires soutenues par l'Esa et le Cnes.

Le développement de l'altimétrie à fauchée est une révolution en océanographie et le TOSCA avait recommandé une démarche pro-active pour inclure l'altimétrie à fauchée **Wisa** (P0) dans le scénario à long terme de Copernicus (**Sentinel-3-NG-Topo (S3NG-Topo)**). La communauté française s'est fortement engagée dans le MAG **S3NG-Topo** et le Cnes dans les discussions avec la Commission Européenne et l'Esa afin de promouvoir ce choix. On ne peut que se réjouir des décisions récentes du choix d'une constellation d'altimètres à fauchée pour **S3NG-Topo** (post 2032).

Le groupe avait soutenu en priorité P0 une mission courant de surface. Le concept **Skim**, qui a fait l'objet d'une phase 0 Cnes et d'une phase A Esa, n'a pas été retenu en phase finale Earth Explorer 9 (EE9) bien qu'ayant été très bien évalué. La proposition **Stream** soumise à Esa EE11, malgré une évaluation scientifique très favorable, n'a pas été retenue (budget hors limite). La proposition **Odysea**, qui reprend une bonne partie du concept radar de **Stream**, a été soumise à l'appel Explorer de la Nasa en 2023 et acceptée pour une phase A.

Le groupe avait mis en priorité forte P0 le développement d'une mission géostationnaire couleur de l'océan (**Geo-Ocapi**, phase A terminée au CNES en 2016) couvrant au moins l'Europe mais aucun cadre programmatique n'a été identifié.

Des priorités P1 avaient été mises sur **Smos-hr, Trishna, Marvel:**

- **Smos-hr** a fait l'objet d'une étude de Phase A étendue entre 2020 et 2022. Une réponse à Esa EE12 a été soumise en 2023, avec un concept (**Fresch**) inspiré des études **Smos-hr** visant une salinité à résolution de ~10 km, a été bien évaluée mais n'a finalement pas été retenue ;
- Une composante océan de **Trishna** s'est structurée dans le cadre du TOSCA afin de définir et optimiser des algorithmes de température côtière et des données de référence pour la cal/val ;
- Le groupe mission **Marvel** s'est reconfiguré fin 2020 et contribue à la prochaine mission de gravimétrie du champ variable Nasa/Esa **Magic** (Mass-Change and Geosciences International

Constellation).

### 1.10 ACCOMPAGNEMENT DE LA RECHERCHE SPATIALE

Le Cnes a continué de bien soutenir via le TOSCA les équipes françaises. Cet accompagnement est essentiel pour la préparation des missions futures, la réussite des missions en vol et de leur exploitation scientifique et du lien vers les applications. Le bilan est très positif et la communauté nationale reste compétitive sur ces sujets et force de proposition. La situation est cependant fragile car certaines compétences clés dans les laboratoires reposent souvent sur quelques individualités.

## 2. LES QUESTIONS ET DÉFIS EN OCÉANOGRAPHIE

S'appuyant sur les différentes prospectives scientifiques nationales et internationales sur l'océan et le climat et sur le bilan et les avancées depuis la dernière prospective (voir section 1), les questions scientifiques et sociétales suivantes ont été identifiées:

### 2.1 COUPLAGES VENTS-COURANTS-VAGUES (ENJEU O.1)

Alors que les conditions météorologiques extrêmes devraient s'intensifier à l'avenir, la façon dont s'opèrent les couplages dynamiques à l'interface océan-atmosphère demeurent mal connus, car mal contraints par les observations existantes. Les interactions entre les courants, les vents et les vagues modifient les flux de chaleur et de CO<sub>2</sub> entre l'océan et l'atmosphère, orientent les tempêtes, déplacent les positions des principaux courants, influencent les cycles de l'oscillation australe El Niño, les vagues de chaleur marines et l'évolution rapide des zones marginales de glace. Cependant, en l'absence de mesures de courants de surface, les détails de ces couplages nous échappent encore, et des controverses de longue date sur la physique sous-jacente demeurent non résolues.

### 2.2 SALINITE A FINE ECHELLE LIÉE AUX APPORTS D'EAU DOUCE ET

### RETROACTIONS (ENJEU O.2)

Les plateaux continentaux et les zones en bord de glace sont soumis à de fortes variations de salinité, via les apports d'eau douce par les fleuves ou la fonte des glaces. Les zones polaires subissent des changements bien plus rapides que l'océan global, avec des rétroactions sur le climat de l'ensemble de la planète. Mais de nombreuses inconnues subsistent : où, quand, par quels mécanismes les flux d'eau douce pénètrent-ils dans l'océan ? Comment influencent-ils la stratification des couches de surface de l'océan, et comment les forts gradients de densité qu'ils induisent participent-ils à la circulation côtière et polaire ? Comment l'export des eaux peu salées vers le large par la dynamique tourbillonnaire structure-t-elle la distribution des salinités à méso échelle, avec des conséquences sur les échanges océan-atmosphère de chaleur, d'énergie et de gaz et sur la circulation océanique.

### 2.3 CONTINUUM TERRE-OCEAN (ENJEU O.3)

Les régions côtières subissent l'influence des changements de l'océan global et des apports continentaux fortement anthropisés avec des conséquences sur les écosystèmes diversifiés qu'elles abritent. Quels sont les flux terre-mer (eau, matière, chimie), leurs interactions avec la dynamique côtière et l'océan ouvert, et comment répondre aux enjeux

de l'adaptation et de la gestion des risques dans les zones côtières ? Suivre et prévoir leur évolution nécessite de mieux comprendre leur dynamique, les interactions entre les processus physiques, la biogéochimie, les sédiments et la distribution des polluants, mais aussi une continuité d'observations depuis les bassins versants jusqu'à l'océan côtier (de la côte au talus continental) et l'océan profond. L'approche considérant ainsi le continuum continent-océan est mieux à même d'estimer les variations de volume d'eau, les flux et les différentes composantes de la circulation ainsi que leur variabilité spatiale et temporelle.

### 2.4 EVOLUTION DE LA POMPE BIOLOGIQUE DE CARBONE ET DE LA BIODIVERSITÉ MARINE (ENJEU O.4)

Améliorer l'observation de la biogéochimie marine, du global au côtier, est nécessaire notamment pour mieux comprendre l'évolution du cycle du carbone, de la production primaire, des échelons trophiques plus élevés et plus généralement de la biodiversité marine. Quel est le rôle des fines échelles océaniques sur la biologie ? Comment les changements des propriétés thermodynamiques, dynamiques et optiques de la banquise affectent-ils la biogéochimie, et in fine le réseau trophique marin ? Comment identifier et suivre les « hotspots » écologiques pour soutenir les politiques d'exploitation et conservation durables ? Identifier les régions les plus vulnérables aux perturbations anthropiques, surveiller l'évolution de la biologie dans les aires marines protégées relativement à d'autres régions, surveiller les changements qui auront des effets néfastes sur les écosystèmes marins, est nécessaire pour accompagner la définition des politiques d'exploitation et conservation durables, et pour es-

## 3. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

Les missions d'océanographie spatiale relevant de cette prospective seront menées dans le cadre de coopérations bilatérales entre le Cnes et des agences internationales, et des programmes Copernicus de l'Union Européenne et Earth Explorer de l'Esa. Les priorités de la communauté océan ont été définies selon une analyse du paysage et des manques vis à vis des priorités scientifiques (section 2). Elles concernent les missions en préparation.

timer l'efficacité des mesures de protection mises en œuvre et les besoins futurs.

### 2.5 VARIABILITÉS, TENDANCES ET POINTS DE BASCULE DU SYSTÈME CLIMATIQUE (ENJEU O.5)

L'océan est en pleine mutation. Induira-t-il des points de bascule ou changements irréversibles de certaines variables climatiques susceptibles de modifier le rôle de l'océan vis à vis de l'évolution du climat, ou l'occurrence d'événements extrêmes ? Quels sont les processus sous-jacents et comment détecter les risques de franchissements de points de bascule, les anticiper, fournir des éléments à la société pour mieux s'y préparer ? Répondre à cet enjeu requiert de comprendre les voies menant aux points de bascule, de maintenir et optimiser des séries d'observations longues de variables climatiques essentielles.

### 2.6 AMÉLIORER LES ANALYSES ET PRÉVISIONS DE L'OCÉAN, ACCOMPAGNER LE DÉVELOPPEMENT DES JUMEAUX NUMÉRIQUES (ENJEU O.6)

La multiplication des observations spatiales, les mesures in situ qui fournissent des informations complémentaires cruciales (e.g. sous la couche de surface), mais sont fortement sous-échantillonnées, rend indispensable leur synthèse via des modèles numériques, qu'il est important de faire évoluer, et des techniques d'IA, de jumeaux numériques, de plus en plus performants. Le maintien d'observations systématiques régulières est également un besoin pour les services océaniques (Copernicus Marine Service).

### 3.1 MISSIONS SPATIALES : CADRE BILATÉRAL OU A DÉFINIR

#### 3.1.1 ODYSEA

**Odysea** vise à mesurer, pour la première fois depuis l'espace, le courant océanique de surface total sur l'océan global (enjeu O.1). C'est la **priorité majeure**. Le concept proposé est un radar Doppler en bande Ka à très forte incidence (55°), de façon à limiter

la perturbation des mesures par les vagues, avec une très large fauchée couvrant 86% de l'océan global chaque jour, permettant une précision sur la mesure de courant de 40 cm/s dans des pixels de 2.5 km. **Odysea** est en phase A au Cnes, et la réponse au call 'Explorer' de la Nasa a été sélectionnée en mai 2024 pour une phase A compétitive (4 missions sélectionnées ; 2 missions choisies courant été 2025 ; lancements 2030-2032). **Odysea** est complémentaire à la mission **Harmony** (Esa EE10, sélectionnée) qui devrait caractériser les courants à plus haute résolution spatiale mais sans couverture globale et avec des revisites bien moins fréquentes (~10 jours).

### 3.1.2 SMOS-HR

L'autre **priorité majeure** est la mesure de la salinité sur l'océan global à ~10 km de résolution (Enjeu O.2). Avec une résolution de ~10 km, **Smos-hr** permettrait d'observer environ 90 % de la surface des plateaux continentaux (contre environ 50 % avec **Smos/Smop**) et les structures tourbillonnaires jusqu'à 60° de latitude. **Smos-hr** portera un interféromètre radiométrique en bande L avec un réseau d'antennes optimisé pour la haute résolution. Avec une revisite tous les 1 à 3 jours selon la latitude, la précision sur des salinités hebdomadaires à 15 km de résolution serait inférieure à 0.2 g/kg (précision actuellement atteinte sur des salinités hebdomadaires à 50 km de résolution). Une phase A a été menée au Cnes avec succès, mais un cadre programmatique reste à trouver.

### 3.1.3 SWOT-LAND OCEANIC AQUATIC CONTINUUM (LOAC)

La mission **Swot-loac** vise à estimer les flux d'eau et de ses constituants en réalisant simultanément des mesures de hauteur, courants totaux et vagues à très haute résolution (O(100 m)) sur l'ensemble du continuum continent-océan (Enjeu O.4). Compléter les mesures d'élévation, telles qu'elles peuvent être déduites avec **Swot**, avec des mesures de vitesse de courants totaux fournirait toutes les composantes dynamiques des courants et une information concomitante sur les volumes et courants, donc sur les flux. Une forte revisite temporelle sera rendue possible sur la topographie en optimisant les paramètres de la mission (très large fauchée, orbite) de manière coordonnée avec les missions **S3NG-Topo** et **S6-NG**. C'est une **priorité substantielle**, en discussion avec la **Nasa**.

### 3.1.4 LIDAR MARIN PROFILEUR

Des mesures de la couleur de l'eau par Lidar marin profileur permettraient d'inventorier la variabilité de paramètres bio-optiques et biogéochimiques sur les premières dizaines de mètres (Enjeu O.4), de jour comme de nuit, et aux hautes latitudes (pendant les hivers polaires) au contraire des mesures couleur de l'eau par capteurs multi-spectraux passifs. Les observations spatiales de couleur de l'eau LIDAR ont été démontrées, notamment par la mission **Calipso** (Cnes/Nasa). L'ajout d'une bande de fréquence dans le bleu (470-480 nm) aux lidars spatiaux permettrait d'accéder à de plus grandes profondeurs dans les eaux du large. La mission **Caligola** (Asi, IT) en formation avec **AOS** (en cours de développement, Nasa avec contribution Cnes), pourrait fournir des profils verticaux dans l'océan. Le groupe recommande de veiller à ce que les caractéristiques de cette mission satisfassent les besoins pour l'observation marine. C'est une **priorité substantielle**. A des fins de démonstration, le groupe recommande la réalisation d'un démonstrateur aéroporté ou sur bateau.

### 3.1.5 CFOSAT-NG

Poursuivre et améliorer les mesures des propriétés des vagues est nécessaire (Enjeu O.1). Un radar inspiré de la mission franco-chinoise **Cfosat**, avec une visée proche nadir, permettrait de mesurer outre le spectre des vagues et le vent, une mesure du courant total de surface mais sur une fauchée de ~500 km. C'est une **priorité substantielle**. Le cadre programmatique pour **Cfosat-NG** reste à trouver.

### 3.1.6 GALENE

La proposition **Galene** vise à réaliser des mesures caractérisant les écosystèmes aquatiques côtiers, la pollution aquatique (e.g. plastiques, nappes de pétrole) et les fonds marins (enjeux O.3 et O.4), avec une synergie de trois capteurs : un capteur hyperspectral, une caméra panchromatique, un polarimètre multi-angulaire multispectral. Elle constitue un volet océanique complémentaire à la mission **Biodiversity** et son capteur hyperspectral dont les caractéristiques (résolution spectrale, rapport signal à bruit) sont moins adaptées au milieu aquatique. Néanmoins, le contexte programmatique dans des domaines proches thématiquement ou techniquement est très riche avec de nombreuses autres missions actuellement en développement (**Chime**, **S3-NG optique**, **Biodiversity**), ou mises en

priorité depuis plusieurs années (Geostationnaire couleur de l'eau). En conséquence, c'est une **priorité mineure**.

## 3.2 MISSIONS SPATIALES : CADRE EUROPEEN

Nous exposons ci-après des missions en cours de développement, qui répondent à des besoins exprimés par la communauté nationale, et qu'il est important de soutenir.

### 3.2.1 MISSIONS COPERNICUS

Assurer une continuité des mesures des variables climatiques et océaniques essentielles est une **priorité majeure** (enjeu O.5). Les missions Sentinel (**S1**, **S2**, **S3** et **S6**) assurent en partie la surveillance régulière de ces variables et continueront sur la prochaine décennie. Les missions des futurs programmes Sentinel Expansion (**Cimr**, **Cristal**, **Chime**, **Lstm**) puis Sentinel NG viendront grandement les compléter et les améliorer. La détection des différents types fonctionnels de phytoplancton, sera notamment améliorée avec l'utilisation d'instruments couleur de l'eau hyper-spectraux. Le développement de l'altimétrie à large fauchée sur la mission **Sentinel-3-NG-Topo** pour observer l'océan global est une **priorité majeure** et nécessite une implication forte du Cnes pour assurer l'héritage **Swot**.

### 3.2.2 COULEUR DE L'EAU GÉOSTATIONNAIRE.

La réalisation d'une mission géostationnaire couleur de l'océan sur l'Europe, telle que **Geo-Ocapi** en priorité forte lors des précédentes prospectives, reste une **recommandation majeure**. Elle permettrait d'observer et mieux comprendre des phénomènes à évolution rapide liés, en particulier, à la dynamique côtière ainsi que l'étude du fonctionnement à petite échelle temporelle de l'écosystème (Enjeux O.3 et O.4). Une part de plus en plus grande de l'océan sera couverte par des missions géostationnaires, avec les missions **Goci-1** et **2**, et les missions américaines **Glimr** (Nasa, lancement 2026) et **Geoxo** (Noaa, post 2032)), mais les côtes européennes resteront non couvertes. Une insertion sur les futures plates-formes Meteosat (4<sup>ème</sup> génération) doit être poussée.

### 3.2.3 CRYORAD

La mission radiométrique **Cryorad** propose de combiner une gamme étendue de fréquences (0.5-2GHz) pour mesurer la salinité dans les eaux très froides (enjeu O.2) où la sensibilité de la mesure à 1.4GHz à la salinité diminue. Cette alternative potentiellement intéressante mais très exploratoire n'a pas encore été testée, et a motivé une implication de la communauté océan française dans la proposition **Cryorad**, coordonnée par l'IFAC (Italie), acceptée en phase 0 à Esa EE12.

### 3.2.4 NNGM/MAGIC, GENESIS ET DORIS NEO

Le groupe TOSCA Océan soutient fortement les recommandations portées par le groupe TOSCA Terre Solide sur la mission Nasa/Esa **NNGM/Magic** pour la mesure du champ de gravité terrestre et ses variations. Les performances attendues (améliorations d'un facteur 10 par rapport à **Grace** et **Grace Fo**) auront des impacts majeurs pour les études sur les échanges de masses d'eau, le niveau de la mer, le bilan énergétique de planète. Le groupe soutient également l'amélioration du système de référence terrestre (mission Esa Future Navigation **Genesis**) et du système de positionnement (**Doris Neo**) pour optimiser la précision des mesures altimétriques.

## 3.3 ALGORITHMIQUE, EXPLOITATION ET PÔLES DE DONNÉES

Soutien des équipes algorithmiques et support aux Science Team internationales. Du fait de la proximité des thématiques, il serait souhaitable à l'avenir de rapprocher les équipes scientifiques Swot océan et OSTST (Ocean Surface Topography Science Team).

Exploitation des données. Le retraitement de données existantes et le développement de nouvelles approches d'inversion sont essentiels afin d'améliorer les précisions ou développer de nouvelles observables. Dans un contexte où le volume des données et le nombre d'observables augmentent, les méthodes d'IA sont appelées à prendre de plus en plus d'importance tant pour optimiser les traitements et analyses de données, que pour les combiner à l'information fournie par la modélisation, soit par assimilation de données, soit via l'utilisation de jumeaux numériques.

Pôle de données. Les centres d'expertises concentrent un savoir-faire national dans un domaine particulier (ex. sur la couleur de l'eau). Il est nécessaire de les accompagner pour une meilleure intégration dans le paysage national de la recherche.

### 3.4 COMPLEMENTARITE OBSERVATIONS IN-SITU ET SATELLITAIRES

Le maintien des observations in situ et de leur contrôle qualité à haut niveau est un point clé dont dépend in fine la qualité des mesures satellitaires et pour lesquels les IR et Services Nationaux d'Observation (SNOs) jouent un rôle très important au niveau national en lien avec les actions au niveau européen et au niveau international. La mise en

## 4. CONCLUSION

Les priorités sont résumées ou à identifier ci-après pour les **coopérations bi-latérales**:

Questions scientifiques	Observable	Cadre actuel de développement	Priorité	Recommandation
O.1	Courants et vents globaux	<b>Odysea</b>	Majeure	phase A1 Cnes en cours (jusqu'à juillet 2025) "Kick off" phase A Nasa Juin 2024 Bilatéral CNES-NASA à soutenir
O.2	Salinité haute résolution	<b>Smos-hr</b>	Majeure	Phase A Cnes réalisée- Cadre à trouver
O.3	Topographie, courants, vagues, continuum terre-mer	<b>Swot loac</b>	Substantielle	En discussion Cnes Nasa
O.4	Profils verticaux couleur de l'eau (particules, chl-a) de jour, de nuit et durant l'hiver polaire	Lidar marin profiléur ( <b>Caligola / AOS</b> )	Substantielle	Veiller à un concept instrumental adapté aux mesures marines
O.1	Vagues, Courants, vents	<b>Cfosat-NG</b>	Substantielle	Cadre à trouver
O.3 et O.4	écosystèmes aquatiques côtiers, pollution aquatique, et fonds marins	<b>Galene</b>	Mineure	Cadre à trouver

place du cluster d'infrastructures d'observations Fr-OOS (French Ocean Observing System) qui apporte une coordination nationale de l'observation océan à long terme va permettre de traiter ces questions de façon coordonnée.

### 3.5 ACCOMPAGNEMENT DE LA RECHERCHE SPATIALE

En regard du nombre de missions actuelles ou futures (Cnes ou bilatéral, Copernicus, Esa, filière du New Space) un renforcement du support aux équipes françaises impliquées dans la préparation des futures missions et l'exploitation des données des missions en vol est indispensable, notamment en postes 'statutaires' (chercheurs, ingénieurs) dans les laboratoires.

Les recommandations pour les missions menées dans un **cadre européen** avec une participation nationale importante sont résumées ci-après:

Questions scientifiques	Observable	Cadre actuel de développement	Priorité	Recommandation
O.5	Niveau de la mer Large fauchée	<b>Sentinel-3-NG-Topo</b>	Majeure	Accompagnement du Cnes nécessaire pour sécuriser les développements et valoriser les avancées Swot
O.3 et O.4	Couleur de l'eau géostationnaire	<b>Geo-Ocapi</b> (phase A Cnes terminée)	Majeure	A recommander sur futurs Meteosat
O.5	Champs de gravité terrestre	<b>Esa/Nasa Magic</b> (phase B1 ESA)	Majeure	A soutenir pour passage phase C/D
O.5	Positionnement	<b>Genesis et Doris Neo</b>	Majeure	Essentiel pour précision altimétrique
O.2 et O.5	Salinité en eaux froides	<b>Cryorad</b> phase 0 compétitive EE12	Substantielle	Fort potentiel pour les hautes latitudes

## 5. REFERENCES

- Almar, R. et al. (2023) Influence of El Niño on the variability of global shoreline position. Nat Commun14, 3133. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38742-9>.
- Bocquet M., S. Fleury, F. Rémy, F. Piras (2024), Arctic and Antarctic sea ice thickness and changes from observations between 1994 and 2023, submitted to JGR-Oceans.
- Bonelli, A. G., Loisel, H., Jorge, D. S., Mangin, A., d'Andon, O. F., & Vantrepotte, V. (2022), A new method to estimate the dissolved organic carbon concentration from remote sensing in the global open ocean. Remote Sensing of Environment, 281, 113227.
- Cazenave A, Moreira L. (2022), Contemporary sea-level changes from global to local scales: a review. Proc. R. Soc. A478:20220049. <https://doi.org/10.1098/rspa.2022.0049>.
- Dibarboure et al. (2024) Blending 2D topography images from SWOT into the altimeter constellation with the Level-3 multi-mission DUACS system, EGU sphere [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1501>.
- Olivier et al. (2024), Late summer northwestward Amazon plume pathway under the action of the North Brazil Current rings, Remote Sensing of Environment, 307, 114165, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114165>.

## GRUPE THEMATIQUE

# SURFACES CONTINENTALES

Mélanie Becker, Agnès Bégue (Présidente sortante), Sylvain Biancamaria, Xavier Briottet, Céline Calleya (thématicienne Cnes), Thibault Catry, Jérôme Chave, Samuel Corgne, Sophie Fabre, Pierre-Louis Frison, Simon Gascoin (Président entrant), Olivier Hagolle, Valentine Bourgeoises, Aude Lemonsu, Delphine Leroux (thématicienne Cnes), Fabienne Maignan, Philippe Maisongrande (thématicien Cnes), Albert Olioso, Mireille Paulin (thématicienne Cnes), Thierry Pellarin, Charlotte Pelletier, Anne Puissant, Anne Richer-de-Forges, Jean-Louis Roujean, Aurélien Sacotte (thématicien Cnes), Kamel Soudani, Maguelonne Teisseire

Atténuer et s'adapter au changement climatique, préserver les écosystèmes tout en garantissant la sécurité alimentaire et le bien-être de la population mondiale sont des défis majeurs qui nous imposent de mieux comprendre le fonctionnement des surfaces continentales afin de participer à la mise en place et à l'évaluation de nouvelles stratégies de gestion durable et de partage des ressources.

Les surfaces continentales occupent une place particulière au sein du système Terre en raison de leur grande diversité. Par rapport à l'océan ou l'atmosphère, on connaît très mal les propriétés physiques élémentaires de ce compartiment situé entre la roche mère et l'atmosphère aussi appelé « zone critique ». Cette fine pellicule à la surface des continents est le siège d'une multitude de processus biogéochimiques complexes qui sont de surcroît largement influencés par l'activité humaine. Cette influence anthropique met à mal les approches basées uniquement sur les lois de la physique et renforce le besoin d'observations satellitaires pour mieux contraindre les modèles de fonctionnement de la surface continentale. Hétérogénéité et discontinuités spatiales sont des caractéristiques fondamentales de la surface continentale qui imposent des observations très diversifiées et à haute résolution spatiale (voire temporelle).

Depuis 2019, notre capacité d'observation des surfaces continentales a nettement progressé grâce à l'allongement des séries de mesures de missions emblématiques (e.g. **SMOS**, **Sentinel-1** (S1), **Sentinel-2** (S2), **SPOT**, **Landsat**, **MODIS**, **Pléiades**, **GRACE**), la mise à disposition des données de nouvelles missions (**Venus** 2017, **ICESat-2** et **GEDI** 2019, **Pléiades-Néo** 2021, **SWOT** fin 2022) et la montée en charge de la constellation **Planet**. La communauté scientifique française s'est activement préparée à l'arrivée des données des futures missions **BIOMASS**, **CO3D** et **FLEX** en 2025, et **TRISHNA** en 2026. L'observation de la Terre (OT) étant loin de répondre à tous les besoins, de nombreuses avancées scientifiques s'appuient sur l'intégration

des données spatiales avec des données in situ et des outils de modélisation de plus en plus sophistiqués. Ce triptyque OT/modèle/donnée est maintenant renforcé par l'émergence de nouvelles sources, comme les données textuelles des médias numériques ou le *crowd sourcing*, et des outils issus de l'Intelligence Artificielle (IA).

Grâce à ces données et outils en plein essor, la connaissance des surfaces continentales a progressé sur de multiples fronts de recherche en sciences de la Terre, science du vivant, sciences des données et sciences humaines, en partie grâce à des approches pluridisciplinaires prometteuses et à la mise en place de passerelles entre la recherche et des partenaires publics et privés. Ce partenariat cherche encore son mode de fonctionnement malgré une attente très forte de la société et des réussites notables durant ce quinquennat.

## 1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

Les projets soutenus par le groupe Surfaces Continentales (SC) s'appuient principalement sur l'accompagnement et l'exploitation des missions spatiales du Cnes et celles du programme Copernicus (**S1** et **S2** principalement). Ceci a permis à la communauté SC de jouer un rôle actif dans le développement de nouveaux produits au service des scientifiques et des gestionnaires. La disponibilité croissante de données à haute résolution spatiale a également favorisé une inflexion scientifique vers l'étude de l'impact des activités humaines sur les grands cycles biogéochimiques. Enfin, la communauté SC a également su tirer parti des progrès en IA pour répondre à des enjeux opérationnels ou résoudre des questions écologiques complexes.

Ces avancées scientifiques sont présentées ci-après par grands compartiments du système Terre (Fig. 1) - le système Terre avec l'étude des cycles de l'eau et du carbone aux échelles globales et régionales (domaine de l'atténuation) et les systèmes socio-écologiques avec l'étude des milieux naturels et anthropisés aux échelles locales et régionales (domaine de l'adaptation) - et leurs multiples interactions.

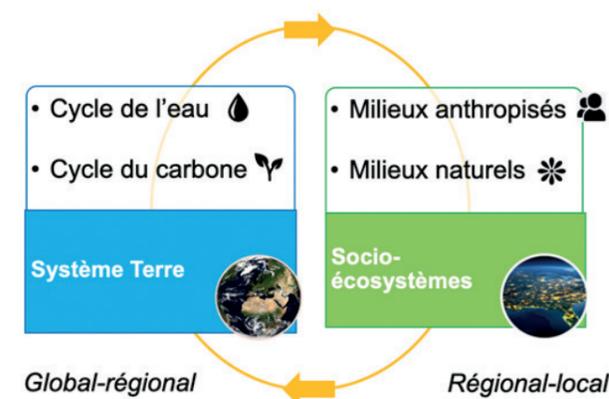


Fig. 1. Les grands compartiments étudiés dans le groupe Surfaces Continentales et leurs interactions.

### 1.1 LES PRINCIPAUX RÉSULTATS SCIENTIFIQUES

#### 1.1.1 CYCLE DE L'EAU

L'étude du cycle de l'eau a été stimulée par la préparation des missions SWOT et TRISHNA. Ces deux « locomotives » ont favorisé des avancées fondamentales utiles pour l'estimation du débit

des rivières et de l'évapotranspiration depuis l'espace. L'évapotranspiration est une variable clé qui couple le bilan d'eau et le bilan d'énergie de la surface continentale. Pour le calcul de l'évapotranspiration et du stress hydrique à haute résolution avec TRISHNA, des progrès dans la caractérisation des effets directionnels dans l'infrarouge thermique ont été réalisés grâce à l'utilisation de données in situ, aéroportées ou satellitaires déjà disponibles (ECOSTRESS, Landsat). Ces données ont permis de tester et améliorer des algorithmes pour le calcul de l'évapotranspiration sous des climats variés. L'introduction d'un bilan d'énergie dans le modèle de transfert radiatif DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) représente un atout majeur pour la poursuite de ces activités.

La préparation de la mission **SWOT** lancée fin 2022 a conduit à l'amélioration de méthodes de calcul de débit par télédétection, d'assimilation des hauteurs d'eau dans des modèles hydrauliques et hydrologiques et de variation de volume d'eau. En parallèle, des efforts de Cal/Val se sont poursuivis permettant d'enrichir les bases de données altimétriques de nombreux lacs et rivières, ainsi que des zones estuariennes et littorales. Ces données ont permis de mettre en évidence le déclin global du stock d'eau dans les lacs naturels et artificiels au cours des trente dernières années.

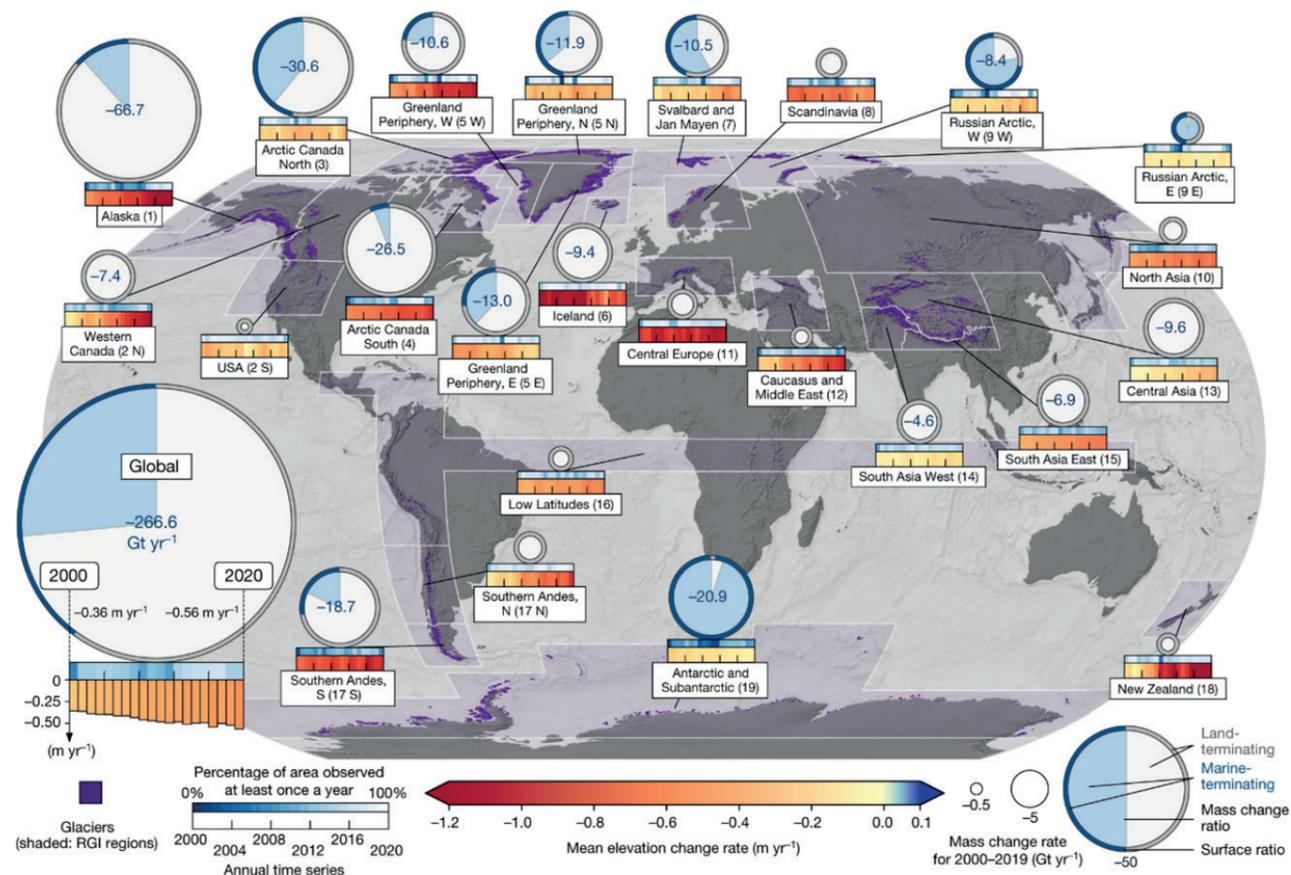
L'observation de l'humidité du sol à différentes résolutions reste un champ de recherche très dynamique qui mobilise différentes techniques de mesure (micro-ondes passives/actives, optique multi/hyper spectrale). Le travail de plusieurs laboratoires a permis d'améliorer les produits issus de la mission **SMOS** (2009) qui sont aujourd'hui essentiels dans les séries longues d'humidité du sol globales reconstruites par fusion multicapteurs. A plus haute résolution, des progrès ont été réalisés dans l'estimation des volumes d'irrigation par combinaison de données **S1** et **S2**. Des études plus fondamentales ont permis d'améliorer la modélisation de la réflectance spectrale et directionnelle de sols rugueux pour différents taux d'humidité.

Notre connaissance du bilan hydrologique pluriannuel des grands bassins versants tels que l'Amazonie ou le Congo progresse grâce à la combinaison des

surfaces en eau dérivées des capteurs optique ou micro-onde avec les hauteurs d'eau obtenues par altimétrie et la mesure du stock d'eau total par gravimétrie. De même, la connaissance de l'hydrodynamique des estuaires progresse grâce à ce type de combinaison d'observations multicapteurs.

Les données **S1**, **S2** et **Pléiades** sont utilisées dans le domaine de la cryosphère pour étudier l'étendue du manteau neigeux, la présence d'eau liquide, la vitesse d'écoulement des glaciers et les changements de volumes de glace ou de neige. L'APR a permis le développement d'un algorithme désormais opérationnel pour cartographier l'enneigement dans le cadre du programme Copernicus

Land. Des méthodes d'assimilation de données ont été développées pour tirer parti de ces données satellitaires variées, y compris les futures données **TRISHNA** (fin 2026) pour le calcul des ressources en eau d'origine nivale. Enfin, un résultat majeur est le bilan de masse des glaciers entre 2000 et 2019 - établi à l'échelle globale par le traitement d'images stéréoscopiques **ASTER** - qui a permis d'observer l'accélération de la perte de masse des glaciers et de quantifier leur contribution à la hausse du niveau des océans (Fig. 2. Evolution du bilan de masse des glaciers entre 2000 et 2019 à partir d'images stéréoscopiques ASTER (Hugonnet et al., 2021).2).



**Fig. 2.** Evolution du bilan de masse des glaciers entre 2000 et 2019 à partir d'images stéréoscopiques ASTER (Hugonnet et al., 2021).

### 1.1.2 CYCLE DU CARBONE

L'étude du cycle du carbone s'est poursuivie à travers de nombreux projets, souvent liés aux impacts du changement climatique. Ces projets traitent essentiellement des milieux forestiers et s'appuient sur le suivi de traits fonctionnels afin de définir des modèles de biomasse adaptés, empiriques ou physiques. Les données **S2** ont notamment été utilisées pour estimer les principaux attributs biophysiques et écologiques tels l'indice foliaire, la teneur en

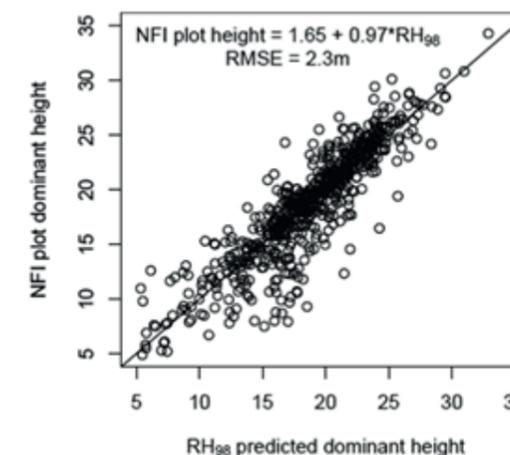
chlorophylle, la masse spécifique, la diversité structurale, etc., dans des contextes bioclimatiques variés (méditerranéen et tropical). Le traitement des formes d'ondes des données **GEDI** a montré l'efficacité de ce signal pour estimer avec précision les hauteurs d'arbres (Fig. 3) et pour informer sur la distribution verticale de la végétation ; ces observables sont utilisées soit en combinaison avec les données de l'inventaire forestier national pour produire des résultats à des échelles plus fines, soit

seules pour entraîner des réseaux de neurones basés sur des données **S1** et **S2** et produire des cartes de hauteurs à l'échelle du massif des Landes ou de la France, ou pour calculer le volume de bois de plantations d'eucalyptus au Brésil. Pour mieux comprendre le lien entre le signal Lidar et les propriétés structurales du couvert, des méthodes ont été développées pour pouvoir simuler le signal **GEDI** par le modèle de transfert radiatif 3D DART en milieu forestier complexe.

A l'échelle globale, l'étude des flux et stocks de carbone des plantes terrestres bénéficie de la préparation des missions **FLEX**, **BIOMASS** et de la mission **SMOS**. La mesure par **FLEX** de la fluorescence émise par la végétation permettra d'affiner le calcul de la production primaire brute (GPP). L'APR a soutenu un volet instrumental qui a permis d'obtenir des mesures actives et passives in situ (sol, aéroportées) et des études de modélisation qui ont montré que la GPP était plus précise car mieux contrainte, lorsque les données satellitaires **TROPOMI** SIF (Solar Induced chlorophyll Fluorescence) étaient assimilées dans un modèle de surfaces continentales. Les études préparatoires de la mission **BIOMASS** ont permis d'évaluer des approches multicapteurs (ALOS, **S1**, **S2**, **GEDI**) pour le développement de produits tels que la biomasse aérienne, la hauteur des arbres, la dynamique forestière et les perturbations, dans des forêts tropicales et tempérées, plus particulièrement dans les zones géographiques non couvertes par **BIOMASS**. Les travaux ont également porté sur l'assimilation des produits de **BIOMASS** dans les modèles dynamiques de peuplement et de surfaces continentales. A partir de données expérimentales acquises sur le site de Paracou en Guyane, il a été montré qu'il faut privilégier les acquisitions satellitaires du matin et en saison sèche pour tirer parti de la synergie des observations SAR (Synthetic Aperture Radar) en bandes P, L et C afin d'estimer la biomasse et l'état hydrique de la végétation.

Concernant le volet agricole, des travaux sur l'estimation des biomasses des cultures sous contrainte climatique ont montré l'impact des pratiques agricoles sur le potentiel de stockage de carbone dans les sols. Les études récentes en cartographie des sols par modélisation statistique montrent également l'amélioration de l'estimation du contenu en matière organique des sols lorsque les données **S1**-**S2** sont utilisées.

Enfin, des études ont montré l'apport de **S2** et **Landsat** pour estimer les flux de carbone organique dissout dans les grands fleuves arctiques.



**Fig.3.** Comparisons des hauteurs d'arbres mesurées par l'Inventaire Forestier National et estimées à partir de données GEDI en Sologne (Zhang et al. 2022)

### 1.1.3 MILIEUX ANTHROPISÉS

Concernant la cartographie des surfaces continentales, des progrès significatifs ont été réalisés dans la production annuelle des cartes d'occupation du sol - notamment en ce qui concerne la nomenclature (24 classes à l'échelle nationale) et la précision des cartes - grâce à de nouveaux algorithmes et à des stratégies d'entraînement des modèles de classification de la chaîne Iota<sup>2</sup> (Infrastructure pour l'Occupation des sols par Traitement Automatique). Des études sont en cours sur la cartographie saisonnière et en temps quasi-réel, sur l'utilisation combinée de séries **S2** et d'images à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) telles que **Pléiades** ou **Spot6/7** (chaîne Moringa), sur la cartographie d'éléments structurants du paysage (contours parcelles...) et le zonage paysager. Portée par la demande, la cartographie de l'usage des sols s'est développée avec notamment des résultats sur la cartographie des pratiques (calendriers culturels, irrigation avec **S2** et **S1**, cultures intermédiaires, jachères...) ouvrant la voie à l'amélioration des modèles de production agricole et une meilleure évaluation de la résilience des systèmes.

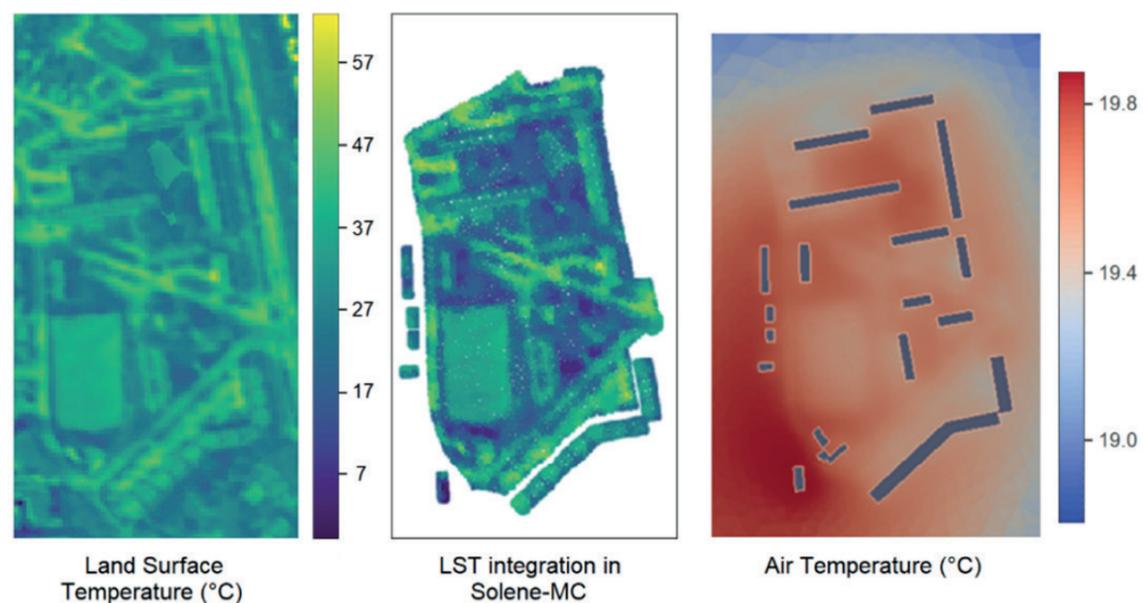
Pour l'urbain, les travaux sur l'apport de l'imagerie satellitaire multisources se sont poursuivis à différentes échelles (tache artificialisée, quartiers, objets urbains) via différentes approches : analyse

texturale d'images optiques et radar THRS (chaîne FOTOTEX) pour la cartographie des habitats informels au Brésil, segmentation sémantique d'images **Spot-6/7** et *Deep Learning* pour la cartographie annuelle des bâtiments en France à 1,5 m de résolution, exploitation d'imagerie aéroportée hyperspectrale et multitemporelle pour la cartographie des espèces arborées en milieu urbain.

Enfin, en hydrologie, la cartographie fine des retenues d'eau et la connaissance des pratiques agricoles (calendrier cultural et irrigation) ont été utilisées pour améliorer la modélisation du stockage en eau des retenues.

La combinaison des cartes d'occupation et d'usages des sols (OS/US) avec des modèles thématiques permet d'accéder à de nouveaux indicateurs, en lien avec les sciences humaines et sociales (SHS). La cartographie des habitats hébergeant des vecteurs de maladie (e.g. dengue) et la caractérisation des facteurs environnementaux associés aux épidémies ont gagné en maturité si bien que les facteurs environnementaux issus de l'OT et associés aux épidémies font désormais parties intégrantes

d'outils opérationnels (Arbocarto) et de systèmes d'alerte en santé (ClimHealth) ; d'autres travaux ont montré le lien entre couleur de l'eau, matières en suspension et présence de bactéries dans les eaux continentales en Afrique de l'ouest, ou étudié le lien entre sécurité alimentaire, santé des populations et données hétérogènes (images, données climatiques, OS/US, textes...) ; enfin, grâce à la mobilisation de la communauté urbaine dans la préparation de la mission **TRISHNA** (campagnes aéroportées sur Toulouse), de nouvelles métriques ont été proposées pour estimer le confort thermique à l'échelle du quartier et identifier les populations vulnérables (Fig. 4). Des travaux ont été initiés sur le foncier, via la cartographie des investissements à grande échelle au Sénégal à partir de métriques de changement issues de séries temporelles NDVI **MODIS**, et sur le lien entre dynamique de population et évolution des paysages en milieu rural à Madagascar avec **S2**. Enfin, la communauté a commencé à se structurer autour de l'imagerie (THRS 2D et 3D, Lidar) au service du patrimoine culturel avec un premier séminaire en novembre 2023.



**Figure 4.** Combinaison de données thermiques aéroportées à haute résolution et du modèle Solène-MicroClimat pour relier la mesure de température de surface à la température de l'air et au confort thermique dans l'espace extérieur (d'après Bouyer et al., 2022).

### 1.1.4 MILIEUX NATURELS

Les milieux étudiés sont la forêt (tropicale, méditerranéenne), les prairies et savanes, les zones humides et les eaux de surface ; ils sont caractérisés sous l'angle de leur état, de leur biodiversité et de

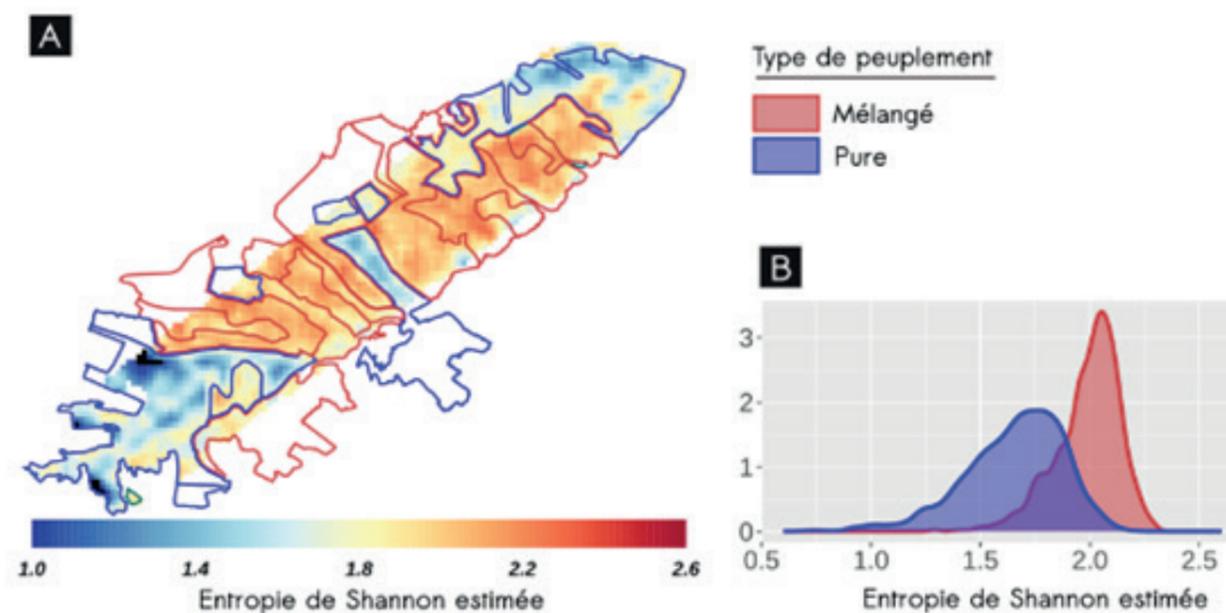
leur gestion par l'homme.

Le suivi des écosystèmes terrestres fait appel à l'ensemble des domaines de la télédétection pour la cartographie, la caractérisation et le suivi des espèces et des habitats. De nombreux travaux basés

sur l'analyse de séries temporelles radar (**S1**, diffusiomètres), de données lidar (**GEDI**, **ICESat-2**), optiques (**S2**) et hyperspectrales portent plus spécifiquement sur les forêts et la réalisation d'inventaires forestiers. Le dépérissement des forêts, dû au stress hydrique ou aux attaques sylvosanitaires, fait l'objet d'une attention particulière dans les projets ; l'état de santé des arbres est appréhendé via l'estimation de traits fonctionnels à partir de données hyperspectrales et d'inversion de modèles de transfert radiatif, et des outils basés sur la détection d'anomalies dans des séries temporelles d'images **S2** sont en cours de développement pour proposer un système de surveillance opérationnel à l'échelle des massifs. Les zones humides sont également étudiées à travers le suivi des mangroves,

que ce soit leur cartographie ou leur rôle dans les cycles du carbone et de l'eau.

Sur la biodiversité, des travaux ont montré le lien existant entre des métriques de diversité spectrale calculées à partir de données hyperspectrales et la diversité taxonomique de systèmes tropicaux et tempérés (Fig. 5. Carte (A) et distribution des valeurs (B) de l'entropie de Shannon estimée sur le site de Fabas par BioDivMapR, un outil de cartographie de la biodiversité, à partir de données hyperspectrales Hypspex aéroportées (Lang et al., 2023).) ; de même, la prise en compte d'indices spectraux issus de séries temporelles **S2** dans les modèles de distribution des espèces animales (mammifères, oiseaux, batraciens) permet d'améliorer fortement leurs performances.



**Fig. 5.** Carte (A) et distribution des valeurs (B) de l'entropie de Shannon estimée sur le site de Fabas par BioDivMapR, un outil de cartographie de la biodiversité, à partir de données hyperspectrales Hypspex aéroportées (Lang et al., 2023).

Concernant l'exploitation des écosystèmes, le suivi de la déforestation en zone tropicale a été particulièrement mis en avant à partir de données **S1**. Le suivi phénologique des prairies en moyenne montagne est fait à partir de séries temporelles **S2** et **MODIS**. Des travaux émergent mettant en évidence la restauration des écosystèmes au Sahel grâce à l'installation de petits aménagements hydrauliques sur la végétation (programme de la Grande Muraille Verte), et la réhabilitation de sites miniers pollués en France grâce à l'introduction de nouvelles espèces.

Enfin, plusieurs travaux sur la caractérisation des eaux de surface ont été réalisés à partir de don-

nées optiques **S2** et **Landsat**, et une chaîne de traitement d'estimation de la couleur des eaux a été transférée à Theia ouvrant la voie à son utilisation opérationnelle.

## 1.2 BILAN PROGRAMMATIQUE

### 1.2.1 MISSIONS SPATIALES

Depuis 2019, l'offre en matière d'observables et de précision de ces observables (fréquence de mise à jour et précision spatiale) a continué d'augmenter grâce à l'exploitation en routine des missions en cours (i.e., **Sentinel**), la prise en main de nouvelles missions (**Venüs** en 2017, **Pléiades-Néo** en

2021, **SWOT** fin 2023) et le déploiement opérationnel des constellations massives de nano-satellites (**Planetscope**).

Trois missions avaient été classées prioritaires par le groupe SC en 2019 pour améliorer nos connaissances sur les cycles de l'eau et du carbone (**TRISHNA** et **SMOS-HR/ULID**) et sur la diversité des écosystèmes (**BIODIVERSITY**) ; à ce jour, seule la mission franco-indienne (Cnes/Isro) **TRISHNA**, pour le suivi des conditions hydriques des agro-écosystèmes, est assurée avec un lancement prévu à partir de 2026. Les missions **SMOS-HR**, pour la mesure de l'humidité des sols et de l'épaisseur optique de la végétation, et **BIODIVERSITY**, une mission hyperspectrale pour mieux caractériser les espèces végétales, n'ont pas abouti et sont de nouveau soumises à la prospective 2024. La plupart des missions positionnées en 2<sup>ème</sup> priorité - **SENTINEL-HR** (*Sentinel-Haute Résolution*), **SMASH** (*SMALL Satellites for Hydrology*) et **MARVEL** (*MAss and Reference Variations for Earth Lookout*) - ont été resoumises à l'appel à idées du SPS2024.

### 1.2.2 AUTRES PRIORITÉS

En ligne avec les recommandations du SPS2019, les projets multicapteurs et multiscalaires sont en augmentation ; au triptyque habituel télédétection - modèles de surface - données in situ, s'ajoutent aujourd'hui les sciences participatives et l'IA. Sur ce dernier point, les contributions méthodologiques des outils basés sur l'IA restent peu développées dans les propositions APR, ce qui pose la question de l'appropriation effective de ces outils par la communauté. De plus, l'utilisation de l'IA nécessite souvent des calculateurs puissants et du *Cloud Computing* ; les opérateurs privés de type *Google Earth Engine* sont à ce jour peu utilisés par la communauté scientifique nationale qui préfère se tourner vers les centres nationaux et les méso-centres publics.

La plupart des recommandations concernant la structuration et le fonctionnement de la communauté scientifique formulées lors du dernier SPS ont été suivies, en grande partie grâce au pôle de données et de services pour les surfaces continentales Theia. Theia a continué à se structurer depuis 2019 autour d'une vingtaine de Centres d'Expertise Scientifiques (CES) avec en appui 4 Centres de Données et de Services (CDS) et un réseau d'Animation Régionale (ART). Une dizaine d'ateliers thématiques et/ou régionaux rassemblant scientifiques et ac-

teurs territoriaux ont été organisés depuis 2021 afin de présenter les produits et retours d'expériences, et d'identifier de nouveaux besoins. Le pôle Theia a également fortement contribué à la mutualisation des traitements des données de télédétection et des données in situ par le développement de plusieurs catalogues et/ou interfaces de visualisation, et propose depuis 2023, un appel à projet pour accompagner la diffusion de jeux de données et la mise en production de chaînes de traitement développées dans les laboratoires.

L'APR continue de jouer un rôle fédérateur pour la structuration de la communauté scientifique, en soutenant les CES de Theia. L'APR a également un effet structurant sur la communauté scientifique autour des missions, avec notamment des actions Cal/Val (**TRISHNA**, **SWOT**, **SMOS**, **BIOMASS**) et la mutualisation des sites de mesures au sol, et autour des thématiques (e.g. Milieux urbains). Avec la participation de 57 laboratoires en 2023, l'APR demeure un guichet privilégié par la communauté scientifique SC, simple et efficace, qui peut être mobilisé comme tremplin pour des projets nationaux (ANR, PEPR) ou internationaux de plus grande envergure.

Le quinquennat est marqué par de nombreuses incitations pour étendre l'usage de la donnée spatiale en lien avec les entreprises. Dans le cadre du volet spatial du programme France 2030, un premier appel d'offres *Fast Track* dédié à l'hydrologie a permis la sélection de services dédiés au suivi des surfaces, des hauteurs et de la qualité de l'eau, et la détection des surfaces irriguées, à partir de méthodes issues de recherches menées par les laboratoires dans le cadre de l'APR. Créé en juin 2019, le SCO (Space Climate Observatory) est complémentaire des projets APR en termes de maturation technologique (recherche, démonstration, puis service opérationnel ; Fig. 6). Dans la réalité, la chaîne technologique est rarement unidirectionnelle, ce qui conduit à une diversité de connexions entre SCO et APR - mutualisation des moyens, retour de questions scientifiques ou techniques vers l'APR pour lever des points durs ou évaluer les résultats - et nécessite une bonne circulation de l'information entre les parties.

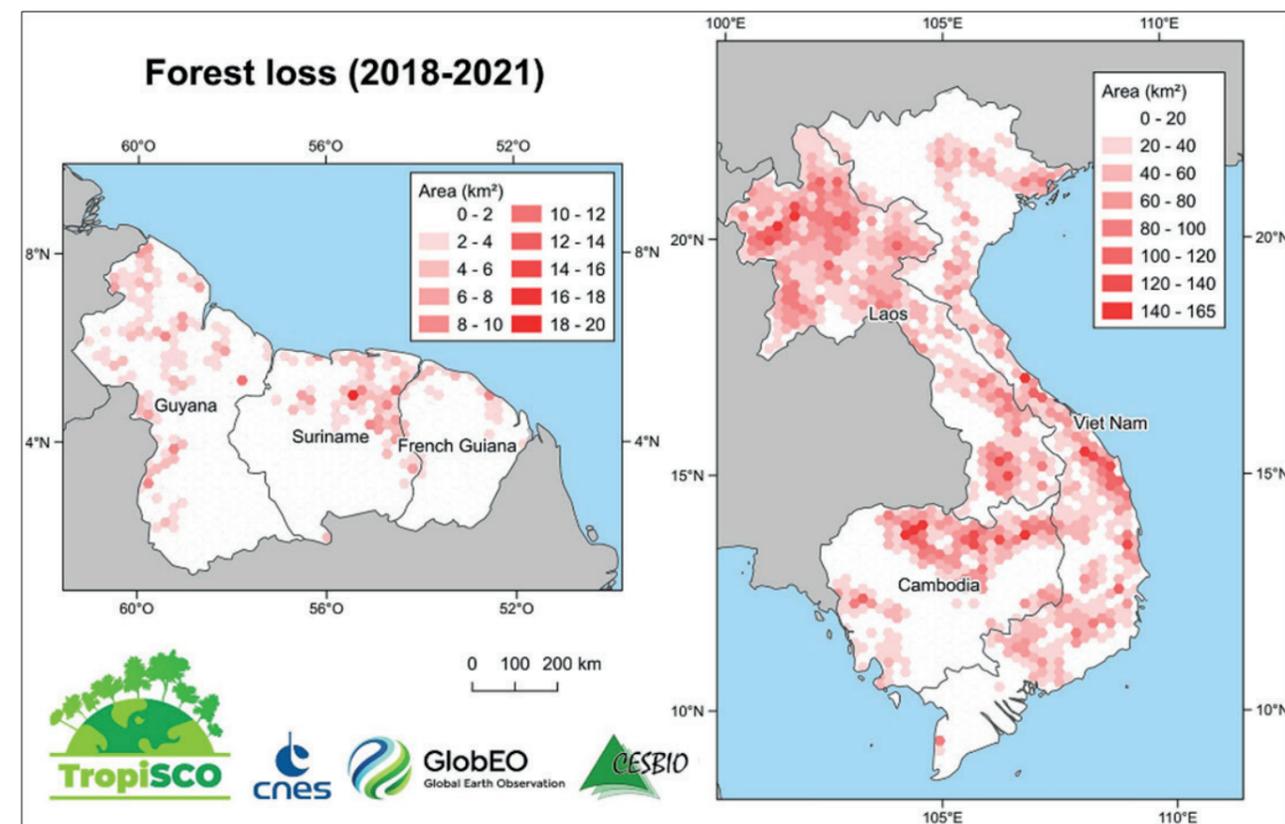


Fig. 6. Exemples de production du projet TropiSCO : Déforestation sur l'Asie et le Plateau des Guyanes de 2018 à 2021 à partir de séries Sentinel-1 (d'après Mermoz et al., 2020).

L'incitation au montage de projets en partenariat Public-Privé vient sans doute combler un retard français dans le domaine, mais son caractère « à marche forcée » inquiète la communauté scientifique qui a parfois du mal à percevoir la logique des différents appels d'offre et s'inquiète de la baisse des moyens et du déséquilibre de l'attractivité privé / public. Les chercheurs sont soucieux de la durabilité de leur activité sur le long terme et souhaitent à ce titre l'aménagement de mécanismes de rétroaction en contrepartie des transferts de savoir-faire. Les accords de partenariats et licences d'exploitation revêtent donc une importance particulière, et doivent garantir la compatibilité *Open Source* avec les *business models* des entreprises. Les programmes bilatéraux du Cnes menés en partenariat avec les autres agences spatiales (Nasa / **SWOT**, Isa / **Venus**, Isro / **TRISHNA** ; Photo 1), en complément des programmes Esa (**BIOMASS**), constituent l'ossature de la collaboration internationale. A cela, il faut ajouter depuis 2019 :

- la contribution de la recherche française au programme européen Copernicus avec l'ajout d'une nouvelle série de produits (*Fractional Snow Cover*, niveaux d'eau des lacs et des rivières v2 en temps quasi-réel) au portfolio du *Copernicus Land Mo-*

*onitoring Service* ; la participation au programme *Framework Programme Agreement on Copernicus User Uptake* dédié à la promotion de l'utilisation des données Sentinel ; la participation au Ceos (*Ecosystem Extent Task Team*) avec notamment la co-publication d'un *white paper* sur les types d'observations satellitaires utiles aux EBV (*Essential Biodiversity Variables*).

- la participation de scientifiques français aux MAGs de l'Esa pour préparer les Sentinel NG, et les Sentinel Expansion (**LSTM**, **CIMR** et **CHIME**). Cela a permis notamment d'harmoniser l'heure de passage et la couverture géographique de **LSTM** et de la mission **SBG** de la Nasa et de permettre à l'hydrologie continentale de devenir un objectif prioritaire de **S3NG-T** au même titre que l'étude des océans.

La majorité des projets financés par l'APR concerne des sites d'étude hors du territoire français ; souvent coconstruits avec des partenaires du Sud Global en réponse à des besoins de recherche ou opérationnels bien identifiés, ces projets comportent des volets de transfert et de formation.



**Photo 1.** Travail collaboratif Cesium-Isro sur une parcelle de riz à Ahmedabad (Inde), site d'étude des effets directionnels thermiques. Photo Marc Oliver-Soulayrol.

## 2. PRINCIPALES QUESTIONS, DEFIS SCIENTIFIQUES ET SOCIETAUX

Les grands compartiments décrits en Fig.1 sont porteurs de questions scientifiques propres qui sont résumées ci-dessous. Un autre défi scientifique des prochaines années sera d'intégrer des observations directes et indirectes de l'empreinte anthropique sur les stocks d'eau et de carbone des surfaces continentales, avec de nombreuses questions liées à la comptabilité des échelles spatiales et temporelles.

### 2.1 CYCLE DE L'EAU

Grâce aux nouvelles données **SWOT** et **TRISHNA**, notre connaissance du cycle de l'eau continental fera un bond de géant au cours du prochain quinquennal. **S3NG-T**, qui devrait être composé de 2 altimètres à large fauchée et lancé après 2030, prolongera les avancées initiées par **SWOT**. Ces missions contribueront à réduire le nombre d'inconnues dans l'équation bilan du cycle de l'eau continentale jusqu'à des échelles spatiales fines compatibles avec celles de la gestion des ressources en eau. Néanmoins, il reste des défis considérables pour parvenir à fermer le bilan hydrologique aux échelles spatiales de la gestion de l'eau. En premier lieu, la variabilité spatiale des précipitations est encore très mal contrainte dans de nombreuses régions du globe (Q1). La variation régionale du stock d'eau souterraine reste la grande inconnue du cycle de l'eau terrestre (Q2). C'est pourquoi **NGGM** (au sein de la constellation **MAGIC**) est extrêmement important et doit être soutenu auprès de l'Esa. La méconnaissance du stock de neige dans les régions de montagne limite notre capacité à éta-

blir des diagnostics fiables des ressources en eau disponibles en amont des bassins versants (Q3). Par ailleurs, avec 2 à 3 mesures en moyenne tous les 21 jours, la mission **SWOT** restera insuffisante pour capturer les fluctuations hautes fréquences des hauteurs d'eau dans les cours d'eau, les lacs et les zones humides (Q4) ; cette revisite limitée est également inadaptée pour l'étude des crues et inondations, alors que le changement climatique conduit à augmenter leur fréquence et intensité. Mieux modéliser ces aléas hydrologiques dépendra aussi des progrès dans la description des précipitations, du manteau neigeux et de l'humidité du sol à haute résolution.

Enfin, aux échelles de temps climatiques, l'incertitude principale sur l'amplitude et la rapidité de la hausse du niveau des océans est liée à l'évolution des calottes polaires. Il est primordial de mieux comprendre l'évolution des propriétés internes des calottes Antarctique et Groënland où les modèles glaciologiques divergent significativement en raison d'effets non-linéaires (points de bascule) dans leur réponse au forçage climatique (Q5).

### Cycle de l'eau

Questions scientifiques	Observables
Q1 Variabilité spatiale des précipitations	- Précipitations - Humidité du sol
Q2 Variations du stock d'eau souterraine	- Variation du champ de pesanteur
Q3 Variations du stock de neige	- Equivalent en eau - Hauteur du manteau neigeux
Q4 Variations du stock d'eau de surface	- Volumes d'eau - Débit - Pratiques culturelles
Q5 Variation du stock de glace	- Vitesse d'écoulement - Variation du champ de pesanteur - Température - Topographie

### 2.2 CYCLE DU CARBONE

Notre connaissance du cycle rapide du carbone continental devrait aussi progresser considérablement avec le lancement de deux missions dédiées au suivi de la végétation (**FLEX**, **BIOMASS**). **BIOMASS** apportera des données clés pour estimer les stocks de carbone dans les forêts tropicales où les capteurs actuels saturent. **FLEX** permettra de mieux comprendre la réponse de la photosynthèse au changement climatique y compris en régions agricoles.

Néanmoins la plus grande incertitude actuelle dans le cycle du carbone est la variation du stock de carbone dans le sol (racines, mycorhize, etc.) (Q1). La biomasse racinaire peut être estimée indirectement à travers des relations allométriques mais pour cela des mesures précises et denses de la structure en trois dimensions des forêts sont nécessaires et font encore défaut malgré les progrès considérables réalisés grâce aux lidar **ICESat-2** et **GEDI**.

### Cycle du carbone

Questions scientifiques	Observables
Q1 Variation du stock de carbone dans le sol	- Structure 3D des forêts (biomasse racinaire) - Couleur du sol
Q2 Evolution du pergélisol	- Température du sol - Phase de l'eau du sol - Changement de topographie
Q3 Carbone des eaux continentales	- Concentration en carbone organique dissous - Blooms
Q4 Réponse de la végétation aux perturbations	- Variables biophysiques

Une incertitude majeure concerne également l'évolution du pergélisol sous l'effet du changement climatique (Q2). Le relargage du carbone organique stocké dans ces sols gelés pourrait accentuer significativement la hausse de la température atmosphérique planétaire (+0,7°C si 10 % du pergélisol de l'hémisphère nord dégèle). Pour fermer le bilan carbone des bassins versants arctiques et tropicaux il est important de réduire l'incertitude sur les flux de carbone organique dissous car les mesures in situ font défaut dans ces régions clés (Q3). A l'échelle globale, il est indispensable de continuer à surveiller la réponse de la végétation aux changements globaux : via la photosynthèse la surface continentale absorbe un tiers des émissions humaines de gaz à effet de serre. L'efficacité de ce puits de carbone dépendra de la réponse de la végétation aux perturbations climatiques et pressions anthropiques avec le risque de franchir des points de bascule en cas d'extrêmes climatiques (Q4).

## 2.3 SOCIO-ÉCOSYSTÈMES

L'enjeu actuel majeur est de quantifier les impacts des changements climatiques, démographiques, économiques, sanitaires et/ou sécuritaires sur les sociétés et les écosystèmes, et d'évaluer leur réponse à ces perturbations. Quelle est la capacité

biophysique et socio-économique des sociétés à s'adapter à ces changements globaux ? Quel est le rôle de la biodiversité dans la résilience des écosystèmes face à ces perturbations ? Quels sont les effets des stratégies d'adaptation sur la trajectoire des systèmes ? Est-on capable d'identifier des points de non-retour ?

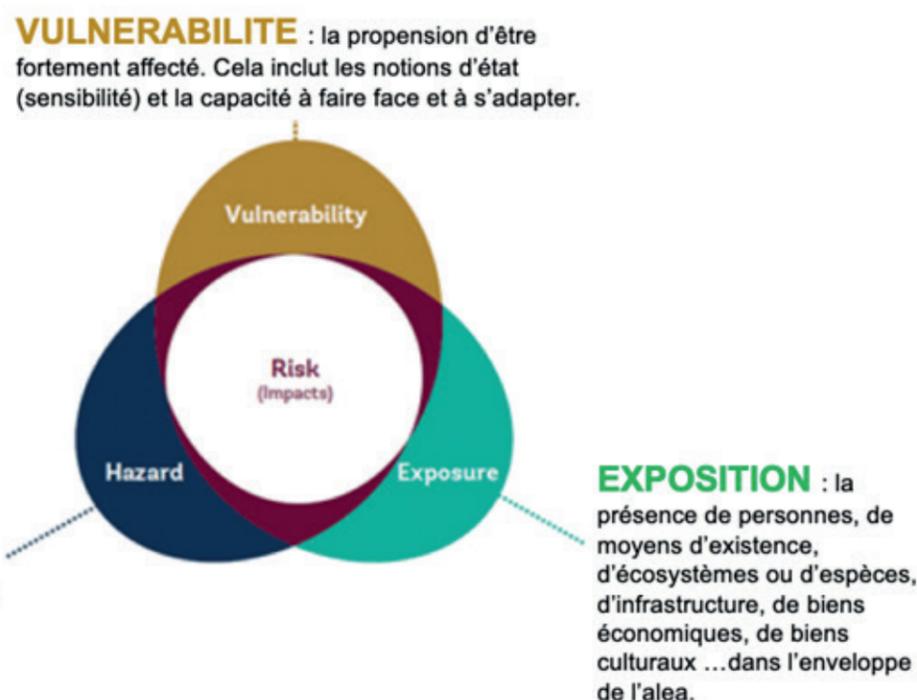


Figure 7. Schéma de la gestion du risque (d'après IPCC 2014).

La réponse à ces nombreuses questions passe par la cartographie précise (l'exposition) des socio-écosystèmes dans toute leur diversité (Q1), et par la caractérisation de leur vulnérabilité (Q2) et de leur dynamique (Q3). L'observable clé de l'exposition (Fig. 7) est la cartographie de l'occupation et de l'usage des sols (OS/US). Notre connaissance de la biodiversité des milieux naturels et des pratiques humaines liées à l'agriculture, à l'habitat, à la gestion des milieux passe par de nouvelles sources de données (à haute résolution spatio-temporelle, hyperspectrales, lidar) et de modèles (i.e. analyse paysagère). Les observables liés à la vulnérabilité (Fig. 7) décrivent quant à eux l'état des milieux naturels (santé des arbres, qualité de l'eau, des sols...) ou anthropisés (diversification agricole, moyens d'existence, morphologie urbaine...), et la dynamique de ces milieux en termes de changement d'OS/US (déforestation, déprise agricole...), ou de trajectoire (dégradation ou restauration).

Malgré d'énormes progrès récents dans la descrip-

tion des SC, grâce notamment aux données Copernicus, l'étude des socio-écosystèmes souffre encore du manque de données à l'échelle territoriale où se nouent les interactions entre les espèces vivantes. Les impacts des changements globaux et les modalités d'adaptation (aménagement du territoire, changement de pratiques) sont eux aussi fortement liés au contexte géographique et socio-économique local. La cartographie biophysique et anthropique des SC à cette échelle (e.g. contour des parcelles, détection des haies, infrastructures) nécessitent de l'imagerie « métrique », ouverte et disponible en tout point du globe, en complément des séries temporelles **S2** (Q1) qui informent sur la phénologie des surfaces. Pour cartographier la biodiversité terrestre il est nécessaire de caractériser les propriétés spectrales et 3D du couvert végétal jusqu'à l'échelle de l'arbre (Q2). Des indicateurs indirects liés à la biodiversité et aux conditions socio-économiques des populations peuvent être dérivés d'images optiques de nuit à haute résolution spatiale (Q2) et de l'analyse des paysages (Q1).

Enfin, pour étudier les perturbations et les points de non-retour il est nécessaire de disposer de séries temporelles homogènes et prétraitées, dont seront

dérivées des métriques représentatives des processus de surface et de la résilience des systèmes (Q3).

### 👤 Socio-écosystèmes

Questions scientifiques	Observables
Q1 Exposition	- Occupation des sols et biodiversité - Usage des sols - Paysages en 3D
Q2 Vulnérabilité	- Etat des milieux naturels (végétation, sol, eau) et biodiversité - Etat biophysique et socio-économique des milieux anthropisés
Q3 Dynamique	- Changements d'occupation/usage des sols - Métriques de type de changement

## 3. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

### 3.1 MISSIONS SPATIALES

Compte tenu du fait que des missions majeures vont venir éclairer le cycle de l'eau (**SWOT, S3NG-T, TRISHNA**) et le cycle du carbone (**FLEX, BIOMASS**) dans les prochaines années, le groupe SC préconise de développer prioritairement les capacités d'observation au service de l'étude des socio-écosystèmes. En particulier il est désormais crucial de mieux caractériser la biodiversité et l'usage des sols à très haute résolution pour comprendre les interactions spatio-temporelles entre sociétés et écosystèmes naturels. Le groupe a identifié les projets **BIODIVERSITY** et **4D-Earth** comme des atouts pour progresser dans ce domaine. **BIODIVERSITY** est un système d'imagerie hyperspectrale à haute résolution spatiale (10 m). Le projet **BIODIVERSITY** vise à couvrir une centaine de sites pour démontrer l'apport de l'imagerie hyperspectrale haute résolution pour caractériser la biodiversité et l'état de santé d'écosystèmes emblématiques (forêts tropicales, savanes...). Cette mission, grâce à sa haute résolution spatiale (10 m) combinée à une voie panchromatique (2.5 m) permettra de mieux analyser et caractériser les surfaces hétérogènes non accessibles avec la future mission Copernicus CHIME (30 m). Ce concept répond aussi à des besoins pour la caractérisation des milieux côtiers (bathymétrie, classification des petits fonds marins et des habitats côtiers), de la pollution industrielle (panaches de quelques gaz ou d'aérosols), des milieux urbains (occupation du sol plus précise) ou en géologie (détection de minéraux sur des roches nues). Quant à **4D-Earth**, il s'agit d'un projet de mission optique stéréoscopique qui vise une couverture systéma-

tique, globale et mensuelle des terres émergées à 2 m de résolution avec quatre bandes spectrales. Vis-à-vis de **CO3D**, l'apport de **4D-Earth** réside dans cette couverture globale et ces observations périodiques fréquentes, avec des données libres et gratuites. En complément aux satellites S2 ou **S2NG**, les données de **4D-Earth** permettront d'atteindre l'échelle pertinente pour caractériser les impacts des activités anthropiques et les risques associés, avec un suivi multi-temporel unique des changements en 3D, qu'ils soient d'origine humaine (constructions, déforestation), tellurique (glissements de terrain, volcans) ou climatique (fonte des glaciers et calottes polaires). Comme montré en phase 0, les données **S2NG** et **4D-Earth** pourront être fusionnées pour fournir des séries temporelles combinant la revisite de **S2NG** (3 jours) et la résolution de **4D-EARTH** (2 m). Le groupe voit une forte complémentarité entre **BIODIVERSITY** et **4D-Earth**, ainsi qu'avec le projet **S2-NG** qui devrait offrir une couverture multispectrale globale à 5 m de résolution avec une revisite de 3 jours. Enfin, pour étudier les trajectoires de ces socio-écosystèmes, le développement de produits *Analysis Ready* issus de l'OT est indispensable.

En parallèle le groupe SC recommande de soutenir activement les projets qui permettent de réduire les incertitudes sur le cycle de l'eau. A cet égard, trois projets de missions proposent des concepts déjà matures techniquement. Le projet **SMASH** vise à fournir des observations journalières de cotes d'eau des rivières, lacs et réservoirs via une constellation d'altimètres radar nadir compacts. Ce concept peut être mis en œuvre à très court

terme par le biais du *NewSpace*. Le projet **FRESCH** vise à répondre à des enjeux scientifiques variés aux interfaces océan-terre-glace grâce à un radiomètre en bande L. Ce projet permettrait de décrire l'humidité du sol à 10 km de résolution, ce qui améliore significativement la résolution de **SMOS** et **SMAP**. Le projet **CRYORAD** a pour objectif le suivi de la cryosphère polaire et propose d'exploiter des mesures micro-onde basse fréquence dans un large spectre (0,4-2 GHz) pour établir le profil de température des calottes polaires. Enfin le groupe note l'intérêt d'assurer la continuité des mesures altimétriques des côtes d'eau de surface à travers **S3NG-T** et **SWOT-LOAC**.

Pour progresser dans notre compréhension du cycle du carbone le groupe recommande de soutenir la maturation technique et scientifique de deux projets novateurs. Le projet **GREEN LEAF** (*Lidar for Earth And Forests*) qui avait déjà bénéficié d'une phase 0 (2012-14) et d'une phase Expérimentation-Validation avant phase A coordonnée par le PASO (2016-18), a pour objectif la caractérisation, le suivi et la préservation des écosystèmes forestiers. Il s'appuie sur un lidar couplé à un imageur THRS. Considérant les avancées scientifiques majeures permises par **GED1** et **ICESat-2** et les points limitants de ces missions NASA, cette proposition affirme le besoin et la possibilité de mesurer avec une résolution verticale inégalée et un échantillonnage optimisé la structure de la végétation au niveau global pour la première fois. A plus long terme, le projet **GEOHYSAR** vise à caractériser l'état hydrique du sol et de la végétation via un système SAR hybride très innovant entre un tandem en orbite géosynchrone et des émetteurs d'opportunité en orbite basse.

### 3.2 AUTRES PRIORITÉS

La quantité de données spatiales disponibles va continuer d'exploser au cours du prochain quinquennal ouvrant de nouvelles opportunités de repousser les frontières de la connaissance. A titre d'exemples, les années à venir offriront une diversité de données radar SAR sans précédent en termes de longueurs d'ondes (X, C, L ; S et P venir) offrant un potentiel inégalé pour l'estimation de la biomasse des écosystèmes, et la caractérisation de l'humidité des sols et de la végétation ; la mise à disposition au niveau 2 des millions d'images SPOT

acquises entre 1986 et 2015 permettrait de compléter l'existant pour mieux étudier cette période charnière où l'empreinte de l'homme sur les écosystèmes est devenue globale. Dans ce contexte le développement d'une infrastructure distribuée de calcul dédiée au traitement de données spatiales ouverte aux scientifiques est une urgence. Le centre de calcul du Cnes et d'autres centres de données répartis sur le territoire, sont intégrés dans l'IR Data Terra afin de faciliter le croisement de données hétérogènes. Le développement de ces centres de calcul partagés est la condition sine qua non de l'émergence de jumeaux numériques, tout en garantissant la souveraineté des recherches de la communauté nationale et en limitant l'impact environnemental.

Les sites des services d'observations structurés (Insu, Inrae, IRD...) sont utiles pour la cal/val des missions spatiales, et inversement ils peuvent bénéficier des produits OT dérivés.

Le potentiel de l'IA à explorer des données massives et hétérogènes doit continuer à être exploré, en associant des équipes pluridisciplinaires.

Enfin, le groupe recommande que l'APR soit davantage diffusée, notamment auprès de laboratoires non spatiaux ; l'ouverture aux SHS avec la création d'un nouveau groupe thématique va dans ce sens.

## 4. CONCLUSION

Questions scientifiques	Observables	Cadre actuel de développement (chronologie*)	Priorité scientifique	Recommandation
 Impact des changements globaux sur les socio-écosystèmes	Q1. Biodiversité Q2. Santé des plantes	<b>BIODIVERSITY</b> , Cnes (T1)	<b>P0</b>	
	Q1. Occupation/usage du sol HR Q1. Paysage 3D	<b>4D-Earth</b> (T1)	<b>P0</b>	
 Réduire les incertitudes sur le cycle de l'eau	Q1. Humidité du sol 10 km	<b>SMOS-HR</b> , Cnes (T1)	P1	
	Q4. Hauteur d'eau journalière	<b>SMASH</b> , Newspace (T0)	P1	
	Q5. Température interne des calottes	<b>CRYORAD</b> , EE12 (T1)	P1	
 Réduire les incertitudes sur le cycle du carbone	Q1. Structure 3D du couvert	<b>GREEN LEAF</b> (T1)	P2	Phase 0 à actualiser
	Q4. Cycle diurne de la végétation	<b>GEOHYSAR</b> (T2)	P2	Phase 0

\* T0, T1, T2 : priorité chronologique liée à la maturité technique

Le groupe rappelle que le soutien du groupe à ces missions est conditionné à la **diffusion ouverte des produits**.

## 5. LES RÉFÉRENCES

Bouyer B., Rodler A., Roupioz L., Guernouti S., Musy M., Briottet, X. (2022), Apport de la télédétection dans la modélisation numérique du microclimat urbain à l'échelle du quartier, 30<sup>ème</sup> congrès annuel de la Société Française de Thermique (SFT) 2022, May 2022, Valenciennes, France.

Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounas B., Nuth C., Girod L., Farinotti D et al. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592, 726–731.

IPCC (2014). Summary for policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field C.B., Barros V.R., Dokken D.J. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.

Lang M., Ferriere M., De Boissieu F., Briottet X., Fabre S., Sheeren D., Féret J.-B. (2023), Cartographie de la diversité spécifique forestière des milieux tempérés à partir d'imagerie hyperspectrale. In: Badard T., Pouliot J., Noucher M., (Eds), M.V.-O. (Eds.), Spatial Analysis and GEOmatics (SAGEO 2023), Québec, Canada, pp. 107-121.

Mermoz S., Bouvet A., Kolec T., Ballère M., Le Toan T. (2021), Continuous Detection of Forest Loss in Vietnam, Laos, and Cambodia Using Sentinel-1 Data. *Remote Sensing*, 13(23), 4877.

Zhang S., Vega C., Deleuze C., Durrieu S., Barbillon P., Bouriaud O., Renaud J.P. (2022). Modelling forest volume with small area estimation of forest inventory using GEDI footprints as auxiliary information. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*, 114, Article 103072.

Philippe Chambon (président), Frédéric Chevallier, Juan Cuesta, Alain Dabas (président sortant), Carole Deniel (thématicienne), Adrien Deschamps (thématicien), Fabrice Jégou, Lilian Joly, Laurent Labonnote, Cécile Mallet, Nathalie Philippon, Fred Szczap, Solène Turquet

**Objectifs scientifiques.** L'analyse des phénomènes atmosphériques est cruciale pour mieux comprendre notre système climatique. La compréhension des cycles des gaz à effet de serre (GES), contributeurs clés au changement climatique, demeure encore insuffisante de même que la compréhension des mécanismes qui influencent la formation des nuages et des précipitations en lien avec la charge en aérosols dans l'atmosphère. Les composés chimiques réactifs ont aussi un impact, direct et indirect, sur le climat et la qualité de l'air nécessitant d'être mieux documenté. Améliorer nos connaissances sur ces sujets permettent également de répondre à certains défis auxquels notre société est confrontée. En particulier, notre capacité à nous adapter au changement climatique dépend de notre aptitude à mieux anticiper les conséquences des phénomènes extrêmes tels que les tempêtes, les fortes précipitations, les canicules et sécheresses, les éruptions volcaniques, les méga-feux... L'observation de la Terre depuis l'espace est un outil essentiel pour avancer sur ces problématiques, en synergie avec les mesures depuis la surface, les mesures par ballons et avions dites « mesures suborbitales » et la modélisation numérique du système Terre.

## 1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

### 1.1 AÉROSOLS, GAZ RÉACTIFS ET QUALITÉ DE L'AIR

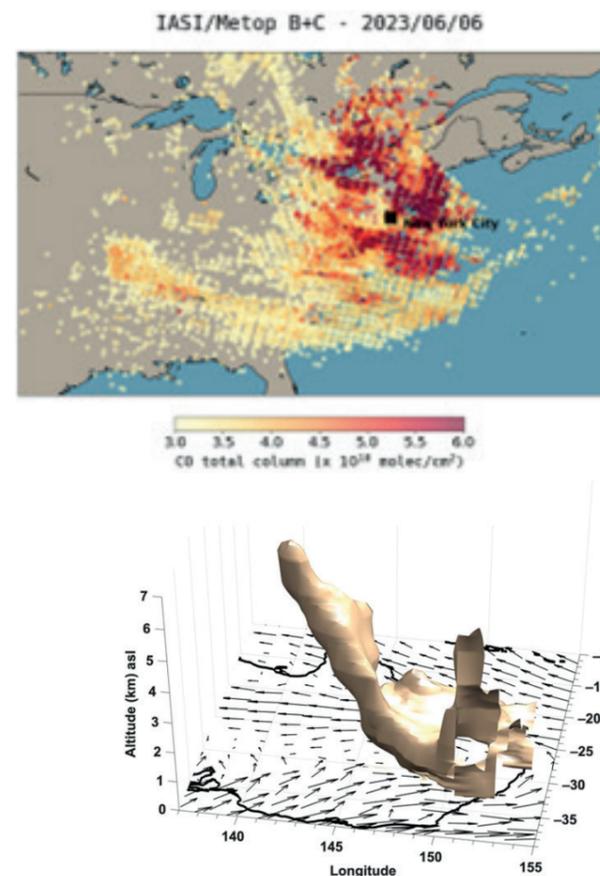
Les processus de transformation et la répartition spatiale, notamment verticale, des principaux polluants que sont l'ozone, les aérosols et leurs précurseurs, sont encore imparfaitement connus. La pollution par ces composés est une menace pour la santé humaine.

Ces dernières années, l'observation spatiale des polluants a beaucoup progressé grâce au développement de chaînes d'inversion, à partir d'un ou plu-

**Contexte.** Les années à venir verront une forte croissance du volume des données spatiales disponibles avec la montée en puissance du programme Copernicus, et le renouvellement complet de la flotte de satellites d'observation de la Terre d'EUMETSAT. Ceci va obliger les acteurs à se concentrer sur le traitement, la modélisation et l'exploitation des données ainsi que sur la définition de besoins en observations complémentaires aux observations spatiales, telles que celles exploitant les moyens de la nouvelle Infrastructure de recherches IN AIR (Infrastructure Nationale des Aéronefs Instrumentés pour la Recherche). Il est également probable que nous franchissions un cap dans le domaine des sciences de l'environnement avec l'avènement de l'intelligence artificielle (IA) qui permet des traitements complexes d'énormes quantités de données de manière très rapide et automatique. Cette révolution technologique passera par un effort continu de mise à disposition des données FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) que le pôle de données atmosphériques AERIS, maintenant largement utilisé par la communauté, anticipe.

sieurs capteurs en synergie. Ainsi, il est maintenant possible de produire des cartes de la concentration en  $NH_3$  à partir des données du sondeur IASI, et d'observer comment celle-ci varie à l'échelle locale, en lien par exemple avec les activités agricoles.

D'immenses feux de forêts ont également défrayé la chronique avec la question de leur attribution dans un contexte de changement climatique. Ces feux ont fait l'objet d'études spécifiques allant de la caractérisation des émissions (panaches) au transport à longue distance avec leur impact sur la qualité de l'air (Fig. 1).



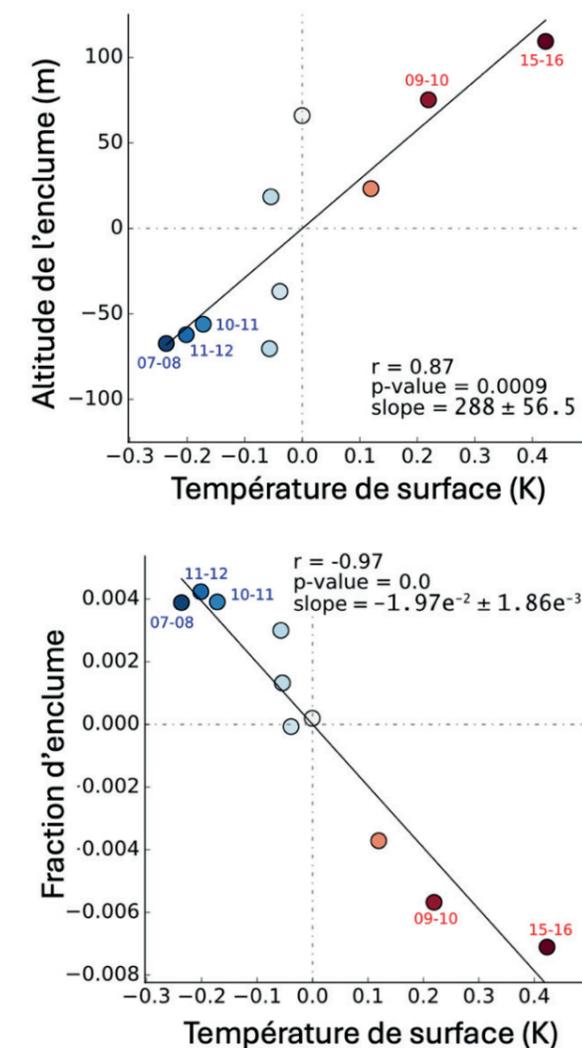
**Fig. 1 :** (gauche) Concentration en monoxyde de carbone (CO) mesurée par les instruments IASI à bord des satellites MetOp-B et MetOp-C, montrant l'impact des feux sur la qualité de l'air de la ville de New-York. Crédit : Cathy Clerbaux (LATMOS/IPSL). (droite) Cartographie tridimensionnelle des panaches de feux de forêt australiens et leur injection dans l'atmosphère à l'échelle journalière, observée pour la première fois par le capteur satellitaire TROPOMI (Sentinel 5P). © Lemmouchi et al., 2022.

### 1.2 NUAGES, CONVECTION ET PRÉCIPITATIONS

Les nuages jouent un rôle fondamental dans le bilan radiatif du système climatique et plusieurs missions clés pour leur étude seront lancées dans un avenir proche. Par exemple, les équipes françaises ont déjà réalisé de nombreux travaux pour préparer l'exploitation des données des MetOp-SG (2025) et du radar-lidar de la mission EarthCARE (2024).

La mission AEOLUS utilisant pour la première fois un Lidar-Doppler depuis l'orbite a démontré entre 2018 et 2023, sa capacité à améliorer notre connaissance du champ de vent, notamment sous les tropiques et dans la basse stratosphère où la convection induit des circulations de grande échelle, avec un impact très important sur la qualité des pré-

sions de vent des modèles globaux via l'assimilation, motivant EUMETSAT à proposer à ses états membres une suite opérationnelle (programme EPS-Aeolus) à l'horizon 2030.



**Fig. 2 :** Évolution de l'altitude des enclumes (à gauche) et de leur fraction (à droite) en fonction de l'accroissement de température de surface à l'échelle inter-annuelle en utilisant les observations du Lidar Caliop/CALIPSO. Les valeurs sont des moyennes tropicales (30S-30N) annuelles (juillet à juin). © Saint-Lu et al., 2020.

La détection de tendances climatiques, primordiale pour comprendre notre climat futur, nécessite l'acquisition de longues séries temporelles. Grâce à sa longévité, CALIPSO (2006-2023) a permis par mesure LIDAR des nuages, de mettre en évidence un effet de « stabilité » ou effet « d'Iris » qui consiste en la rétractation de la surface des enclumes lors d'un réchauffement local (Fig. 2). L'évolution de cette surface a un impact sur l'effet radiatif attribué aux nuages ainsi que sur les précipitations associées.

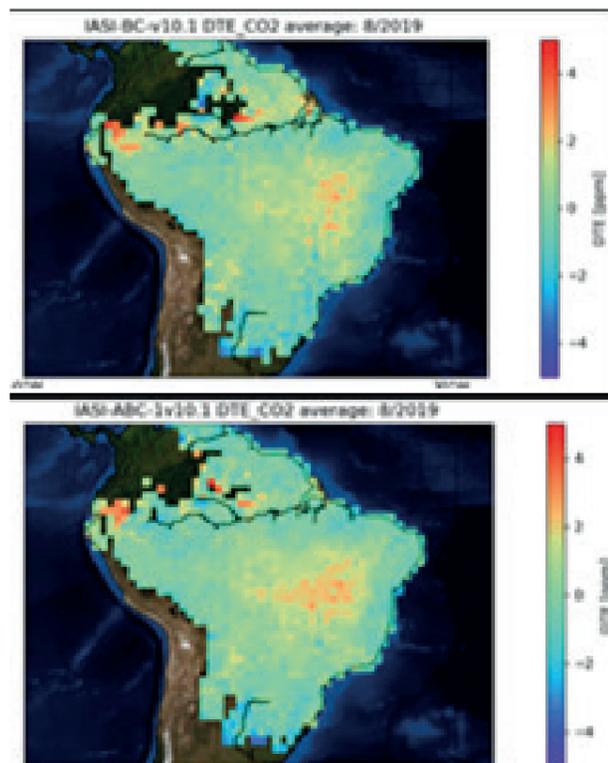
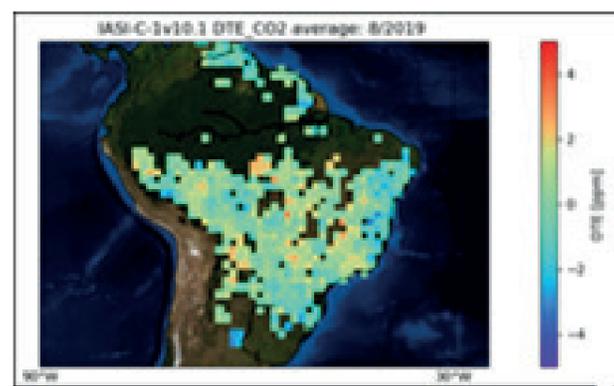
Enfin, l'étude des orages a bénéficié du lancement récent de l'imageur d'éclairs en orbite géostationnaire **GLM** sur **GOES-16** et **18**. En préparation à l'exploitation de **MTG/LI**, il a été montré que l'assimilation de ces mesures améliore la prévision d'évènements météorologiques à fort impact.

### 1.3 FORÇAGES RADIATIFS ET GAZ À EFFET DE SERRE

Les études permettant de mieux comprendre les flux des espèces chimiques absorbantes, dont les GES, sont très structurées en France par la préparation des missions **MicroCarb**, **CO2M**, **MERLIN**, **GeoCARB** (pour le CO<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub>), **Sentinel 5** (pour H<sub>2</sub>O et O<sub>3</sub> dans la stratosphère).

Ces dernières années, le focus des missions sur le CO<sub>2</sub> atmosphérique a évolué des flux naturels vers les émissions anthropiques, en ciblant les panaches issus de villes ou d'installations industrielles. L'identification des sources de CH<sub>4</sub> a progressé grâce au spectro-imageur **TROPOMI** sur **Sentinel-5P** et aux capteurs hyper-spectraux (**S2**, **S3**, **PRISMA**, **EMITS**...).

Les données du spectromètre infrarouge **IASI** apportent des informations dans le suivi des GES anthropiques. On relèvera à ce titre l'étude de « l'excès troposphérique diurne » (DTE) du CO<sub>2</sub> vu par **IASI** (Fig. 3) mettant en exergue l'apport de la constellation des 3 sondes de la série.



**Fig. 3 :** Estimation de l'excès diurne troposphérique de CO<sub>2</sub> pour le mois d'août 2019 à partir des observations de **IASI-C** (gauche), de **IASI-B** et **C** (milieu) et de **IASI-A**, **B** et **C** (droite). L'utilisation de 2 et 3 **IASI** permet d'augmenter significativement la couverture spatiale et de réduire le bruit, en faisant apparaître clairement les émissions de CO<sub>2</sub> au-dessus de l'arc de déforestation brésilien. © LMD/IPSL.

La préparation des futures missions GES a fait l'objet d'un effort très conséquent avec le projet long terme **MAGIC** (Monitoring of Atmospheric composition and Greenhouse gases through multi-Instruments Campaigns) pour lequel ont été réalisés des développements instrumentaux, des inter-comparaisons de capteurs pour apprécier leurs qualités respectives, et la mise au point de dispositifs et de méthodologies adaptés.

### 1.4 TRAVAUX D'ACCOMPAGNEMENT ET PRÉPARATOIRE DES MISSIONS ACTUELLES OU PRÉVUES

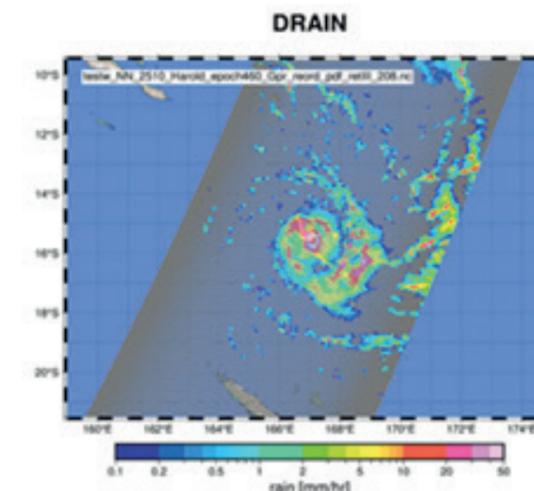
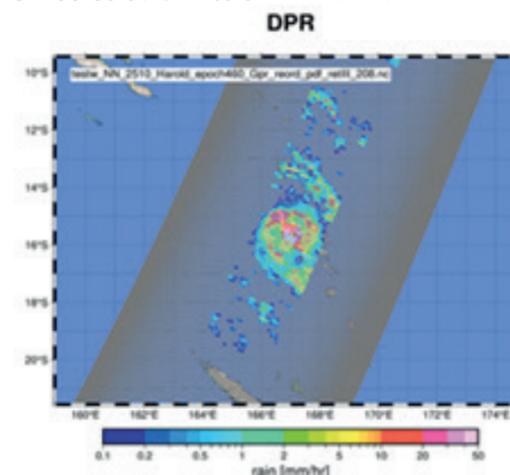
Concernant les données spectroscopiques documentant les raies d'absorption et les propriétés de diffusion des hydrométéores et/ou des aérosols, la mise en orbite dans un avenir proche d'instruments explorant de nouvelles parties du spectre électromagnétique a motivé des travaux spécifiques. On peut notamment citer l'infrarouge lointain pour la mission **FORUM** et le domaine micro-ondes sub-millimétriques pour l'instrument **ICI** à bord de

**MetOp-SG**. Ceci a nécessité un travail particulier afin que les différentes raies d'absorption ainsi que les propriétés de diffusion soient documentées dans ces longueurs d'onde. Pour les parties du spectre déjà connues, des travaux de pointe ont aussi pu être menés afin de progresser sur certains points clés pour l'exploitation de futurs instruments. Dans les bandes spectrales de **MicroCarb**, des études ont permis d'améliorer notre connaissance des paramètres spectraux avec dépendance en température de la bande du CO<sub>2</sub> (à 1,61 μm) et une caractérisation de l'absorption d'O<sub>2</sub> (0,76 μm) meilleure que le pourcent.

Concernant le transfert radiatif, des développements innovants ont été réalisés pour prendre en compte les effets tridimensionnels de la propagation du rayonnement dans les nuages en préparation des missions **EarthCARE** et **C3IEL**, permettant dans le cas de **C3IEL** de guider les études de dimensionnement.

Concernant les algorithmes d'inversion, il est important de noter l'importance croissante de l'IA. La Fig. 4 compare une restitution de la pluie à partir de données radars à ce que peut faire l'IA avec les données d'un radiomètre passif (algorithme **DRAIN**).

Enfin, il est à noter les avancées récentes concernant la spécification de futures missions spatiales. On peut citer les premiers travaux français d'expériences de simulations de systèmes d'observation à l'échelle du globe, permettant d'évaluer, l'apport sur la qualité de la prévision météorologique, de futures missions comme la constellation **CMIM** (pour « Constellation de Mlni sondes pour la Météorologie ») ainsi que la constellation **EPS-Sterna**, le lidar **EPS-Aeolus** et la mission **WIVERN**.



**Fig. 4 :** Exemple de restitution de la pluie instantanée pour le cyclone Harold, observé le 6 avril 2020. A gauche, l'image de référence de la pluie de surface du **Dual-frequency Precipitation Radar (DPR)** de **GPM-core**. A droite, la restitution proposée par IA (**DRAIN**) à partir du **GPM Microwave Imager (GMI)** présent sur la même plateforme. © LATMOS/IPSL

### 1.5 OBSERVATIONS AU SOL, SOUS BALLON OU AÉROPORTÉES

Ces moyens sont indispensables pour tester de nouveaux capteurs en vue de leur spatialisation, développer les chaînes de traitements associés, et valider les données spatiales durant des campagnes de mesures dédiées.

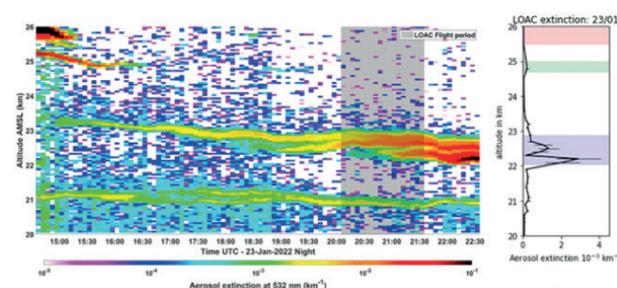
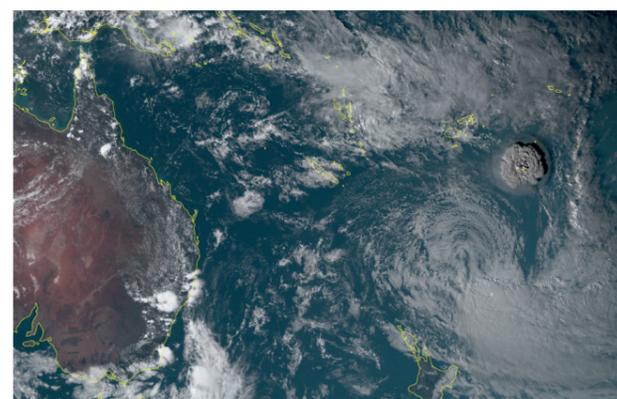
De nouvelles synergies impliquant des aéronefs tant au niveau français qu'europpéen ont permis l'organisation de plusieurs campagnes de mesures dans le cadre de l'infrastructure de recherche européenne **HEMERA** (ballons) ou de validation de satellites (**CADDIWA** validation **AEOLUS**, **MAGIC** validation missions GES). Ainsi, les campagnes **MAGIC** ont fédéré des mesures ballons (Ballons Légers Dilatables **BLD**, Ballons Stratosphériques Ouverts **BSO**) avec des mesures sol (**FTIR**, Lidar) et aéroportées (avions **SAFIRE/BAS/DLR**, drones). La Fig. 5 montre également un exemple de synergie instrumentale entre des mesures au sol et des mesures ballons avec la détection du panache d'aérosols, issu de l'éruption du volcan **Hunga-Tonga**, à l'île de La Réunion par un lidar au sol et un compteur de particules (**LOAC** pour **Light Optical Aerosols Counter**) embarqué sous **BLD**.

Dans le domaine des ballons, le projet **STRATEOLE-2** consacré à la basse stratosphère tropicale, a fait l'objet de campagnes aux Seychelles (2022). Ces

nouvelles données nourrissent des études sur la dynamique d'une couche de l'atmosphère peu documentée. On peut notamment citer la mise en évidence de certains modes de variabilité ondulatoires, de périodicité entre 2 et 5 jours, mal représentés actuellement dans les modèles de prévision numérique du temps (PNT).

Une innovation en cours porte sur des vols de ballons transcontinentaux et de longue durée, entre le site suédois de Kiruna et les côtes canadiennes. Le CNES a également soutenu le développement des Aéroclippers, ballons dérivants en contact avec la surface pour le suivi des cyclones (campagnes MICA).

Le CNES soutient les campagnes annuelles **MAGIC** préparant la validation des missions de mesures des GES. Ces campagnes sont aussi l'occasion d'embarquer au sein des avions SAFIRE, les démonstrateurs des futures missions satellites. On peut citer CHARM-F pour **MERLIN**, RALI pour **EarthCARE**, OSIRIS pour **3MI** ou **FIRMOS** pour **FORUM**.



**Fig. 5 :** En haut, panache volcanique lors de l'éruption du volcan Hunga-Tonga le 14 janvier 2020 par le satellite HIMAWARI-8 (© Japan Aerospace Exploration Agency, Earth Observation Research Center). En bas : panache observé 9 jours plus tard simultanément par le Lidar de l'observatoire de l'île de La Réunion au Maïdo (OPAR) et durant un vol BLD équipé du compteur d'aérosol LOAC. © Kloss et al., 2020

## 1.6 RETOUR SUR LES PRIORITÉS DU SPS DU HAVRE 2019

L'une des priorités fortes affichées en 2019 portait sur la spéciation des aérosols grâce à l'apport d'une voie UV sur un lidar américain de l'observatoire **AOS** (projet **MESCAL**). Cette perspective n'a pas abouti (arbitrage défavorable de la NASA). Des études ont malgré tout été menées et ont démontré l'intérêt de cette voie supplémentaire.

En revanche, il est important de souligner que deux autres priorités du SPS 2019 ont pu être engagées. Une priorité forte concernait les nuages avec la mission franco-israélienne **C3IEL** (CNES/ASI) et le projet **C2OMODO** (CNES) dans **AOS**. Après une pause pendant laquelle des travaux ont été poursuivis, **C3IEL** est reparti et devrait être mis en orbite en 2027. Quant à **C2OMODO**, le projet continue d'avancer avec un concept original de mission, assurant aux scientifiques français un accès à l'ensemble des données d'**AOS**.

Le prochain retrait de service du Falcon 20 de SAFIRE était connu en 2019 et les scientifiques avaient souligné l'importance de continuer à disposer d'un porteur capable de voler à haute altitude pour la préparation et la calibration/validation des futures missions spatiales. Le CNES et le CNRS ont réussi à sécuriser le budget très conséquent nécessaire à son remplacement qui devrait aboutir d'ici 2030.

Enfin, la perspective du lancement de plusieurs missions sur les GES telles que **MicroCarb**, **Merlin** et **CO2M** était aussi connue, et le besoin avait été souligné de se préparer à les exploiter et à les valider. La dynamique entretenue depuis 2018 autour du projet **MAGIC**, grâce à un important soutien du CNES, a permis de bien avancer sur cette thématique.

## 2. PRINCIPALES QUESTIONS, DÉFIS SCIENTIFIQUES ET SOCIÉTAUX

La communauté scientifique française souhaite poursuivre ses recherches sur la thématique atmosphère selon six axes décrits ci-dessous.

### 2.1 (A.1) COMMENT AFFINER NOTRE CONNAISSANCE DU CYCLE DES GAZ À EFFET DE SERRE GRÂCE AUX OBSERVATIONS SPATIALES ?

Ce premier axe concerne les GES, leur impact climatique ainsi que l'estimation de la part anthropique des émissions. Les questions sur lesquelles il est important de progresser afin d'affiner notre connaissance de ces cycles sont :

- Comment estimer les flux de CO<sub>2</sub> et du méthane via l'inversion atmosphérique ?
- Comment expliquer la variabilité interannuelle du contenu en méthane dans l'atmosphère ?
- Quel seuil de détection est-il nécessaire d'atteindre afin de mettre en évidence les points d'émission et raffiner ainsi les inventaires et la caractérisation des sources ?

Concernant l'estimation des flux des GES, nous devrions disposer en Europe à partir de 2025 de données inédites de concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> et de méthane avec les missions **MicroCarb**, **CO2M**, **Merlin**, **IASI-NG**, **Sentinel 5P** et **5**. Veiller à la qualité des mesures sera clé, notamment sur le respect des spécifications de leurs biais. L'objectif est de faire correspondre les flux estimés par l'approche descendante, basée sur l'inversion des mesures atmosphériques, avec les bilans de flux obtenus par l'ensemble des processus d'émission et d'absorption au sol au cours des saisons (cycle du carbone). La synergie avec des mesures connexes comme l'activité photosynthétique, l'humidité des sols, la température de surface sera une étape importante pour mieux comprendre les phénomènes sous-jacents à la variabilité atmosphérique des GES.

Pour le méthane, en plus des phénomènes de surface, il faut également évaluer sa variation interannuelle sous l'effet de réactions photochimiques, notamment dans la stratosphère. Ainsi, en plus de recueillir sa concentration proche de la surface, un des objectifs-clés vise à évaluer ses variations à plus haute altitude grâce à des capteurs tels que **IASI**

ou **IASI-NG**, **MERLIN** et éventuellement à visée au Limbe (**Altius**, **CAIRT**), et en les combinant avec des mesures connexes telles que les teneurs en ozone ou en vapeur d'eau.

Au-delà d'établir le bilan global des GES, un défi récurrent est de pouvoir déterminer les parts naturelle et anthropique des émissions. Ce besoin nécessite de pouvoir réaliser des mesures à haute résolution spatiale.

### 2.2 (A.2) COMMENT MIEUX CARACTÉRISER LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE ET SUIVRE LA QUALITÉ DE L'AIR ?

Le suivi de l'évolution des concentrations de divers polluants atmosphériques, sous forme gazeuse (O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, COV) ou particulaires (aérosols) est un enjeu important pour notre climat et pour la qualité de l'air. Les travaux à venir permettront de répondre aux questions suivantes :

- Comment améliorer le suivi des principaux gaz polluants et particules qui modifient l'équilibre physico-chimique de l'atmosphère et dégradent la qualité de l'air en surface ?
- Quelle est la composition des panaches émis par les feux de biomasse et les volcans ? Comment évoluent-ils chimiquement lors du transport ?
- Quelles sont les tendances à long terme des composés atmosphériques dans la troposphère libre et la basse stratosphère, notamment en relation avec le changement climatique ?

Les mesures de nouvelle génération des missions **Sentinel 4** (spectro-imageur UV-Visible-NIR « UVN ») et du spectro-imageur **IRS** à bord de Meteosat Nouvelle Génération **MTG-S** et **Sentinel 5 (UVNS)** – **IASI-NG** et **3MI** à bord d'**EPS-SG A** ont un fort potentiel pour approfondir l'étude de l'évolution chimique des panaches d'aérosols et ses précurseurs gazeux (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, COV), avec une meilleure précision que les précédentes, du fait d'une résolution spectrale accrue et de couvertures spatiale et temporelle plus fines (échelle intra-ville et évolution diurne).

Les missions **Sentinel 4** et **5** embarqueront aussi

plusieurs capteurs, permettant l'observation des polluants majeurs tels que l'O<sub>3</sub>, les PM (aérosols), le SO<sub>2</sub>, avec des résolutions verticales et une sensibilité proche de la surface accrues par rapport à la génération précédente. Ces missions apporteront également des mesures précieuses pour l'étude de la haute troposphère/basse stratosphère et dans cet objectif, la pérennité du programme Sentinel est précieuse car elle permet également d'étudier les tendances sur le long terme.

### 2.3 (A.3) COMMENT SE FORMENT ET SE DÉVELOPPENT LES NUAGES EN FONCTION DE LEUR ENVIRONNEMENT ?

La formation des nuages consiste en la condensation de la vapeur d'eau en petites gouttelettes d'eau liquide ou en petits cristaux de glace lorsque les conditions thermodynamiques y sont favorables. Cette formation fait l'objet du troisième axe de recherche, avec la volonté de répondre aux questions suivantes :

- Comment le mélange et les propriétés des aérosols anthropiques et naturels agissent-ils sur les processus de formation des nuages, leurs propriétés radiatives et les précipitations ?
- Comment améliorer notre compréhension de la convection profonde, processus clé pour notre climat ?
- Quels liens entre précipitations, activité électrique des orages et chimie atmosphérique ?

Les aérosols agissent comme des noyaux de condensation et jouent ainsi un rôle clé dans la microphysique des nuages (distribution en nombre et en taille des hydrométéores), et dans la fréquence et l'intensité des précipitations. La mission **EarthCARE** récemment mise en orbite ainsi que le projet de mission **CALIGOLA/AOS** permettront d'améliorer nos connaissances sur les propriétés des aérosols qui exercent une influence considérable sur le climat et le cycle de l'eau et qu'il est nécessaire de mieux documenter.

La convection profonde joue un rôle fondamental dans le fonctionnement du système climatique, via le transport d'eau et d'énergie ainsi que des espèces chimiques et aérosols, vers la troposphère libre. L'activité convective peut notamment être caractérisée par la vitesse verticale et les flux de

masse. A ce jour, ces deux variables ne sont pas mesurées à l'échelle mondiale ce qui est un élément bloquant pour la modélisation de ces phénomènes. Ce manque devrait être comblé par les mesures des missions **CZOMODO/AOS**, **C3IEL** ainsi que les mesures du radar Doppler de la mission **WIVERN**.

En lien avec la convection, les éclairs sont le résultat du couplage entre phénomènes dynamiques et la présence d'eau sous forme glacée au sein de l'orage. Grâce à la dynamique autour des missions **C3IEL** et **MTG/LI**, la communauté française souhaite compléter ses recherches ayant trait à la physique même des phénomènes d'électrification vers la chimie des éclairs afin de mieux comprendre la production des oxydes d'azote (NOx).

### 2.4 (A.4) QUELLES INTERACTIONS ENTRE LES PROCESSUS ATMOSPHÉRIQUES DE GRANDES ET DE PETITES ÉCHELLES ?

Au niveau global, une bonne compréhension des modes de variabilité internes du système climatique est très importante, cependant les interactions entre processus à des échelles variées sont nombreuses et complexes. Ces questions d'interactions "multi-échelles" font l'objet du quatrième axe prioritaire avec les questions suivantes :

- Comment les phénomènes dynamiques de grandes et petites échelles influencent-ils le mélange des aérosols, la convection et la circulation atmosphérique globale ?
- Comment améliorer la modélisation de ces couplages entre grandes et petites échelles pour l'étude du climat ?

Une zone de l'atmosphère particulièrement concernée par ces interactions multi-échelles est la haute troposphère et la basse stratosphère tropicale. C'est notamment proche de cette interface qu'a lieu l'oscillation quasi biennale (QBO). Phénomène dynamique de grande échelle, cette oscillation influence à un niveau encore mal compris le transport et le mélange des aérosols, la convection et la circulation atmosphérique globale. Une meilleure documentation des processus dynamiques de petite échelle responsables de ce phénomène pourrait conduire à une modélisation améliorée de la circulation générale et permettre de réduire les incertitudes sur les projections climatiques.

### 2.5 (A.5) COMMENT MIEUX OBSERVER L'ATMOSPHÈRE POUR AMÉLIORER LA PRÉVISION MÉTÉOROLOGIQUE ?

La Prévision Numérique du Temps (PNT) est en pleine ébullition depuis quelques années avec, à la fois, l'émergence des jumeaux numériques à haute résolution (kilométrique à l'échelle globale, et quelques centaines de mètres à l'échelle régionale) et la prévision par inférence basée sur l'IA. Ainsi, le cinquième axe de recherches concerne les questions suivantes :

- Quels sont les processus atmosphériques nécessitant une contrainte observationnelle à fine échelle ?
- Comment compléter les observations des instruments spatiaux de référence grâce à des constellations d'instruments miniaturisés ?

S'il paraît illusoire de penser pouvoir contraindre tous les degrés de liberté de ces modèles à haute résolution grâce à des observations, il convient d'identifier les processus clés qui nécessitent une contrainte forte à haute résolution, afin que ces modèles de nouvelle génération produisent des prévisions à leur plein potentiel. Le projet de constellation de petits satellites **EPS-Sterna** permettra d'augmenter de manière significative la revisite des observations en température et humidité dans la troposphère et la stratosphère. En complément, la constellation **CMIM** pourrait s'avérer clé pour l'observation dans les basses couches de l'atmosphère caractérisées par une forte variabilité.

### 2.6 (A.6) COMMENT ÉVOLUE LE BILAN RADIATIF DE NOTRE PLANÈTE DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

Enfin, le sixième et dernier axe de recherches concerne le bilan radiatif de notre planète. L'étude

de son évolution intègre les effets combinés de l'évolution des concentrations de GES dans notre atmosphère mais également les différents effets de rétroactions avec les nuages et les aérosols. Ces recherches visent à répondre aux questions suivantes :

- Quel est l'impact des nuages, des aérosols et des gaz sur le bilan radiatif de notre planète ?
- Comment mesurer suffisamment précisément le déséquilibre énergétique radiatif de la Terre pour fournir un indicateur supplémentaire de l'efficacité des politiques environnementales ?

Des éléments de réponse pourront être apportés à ces questions, en particulier si les outils de transfert radiatif nécessaires à ces recherches continuent à être développés et soutenus sur le temps long. Avec les nouvelles missions à venir (exemple : **IASI-NG / EPS-SG, FORUM, ICI**), le besoin de mieux documenter les interactions entre rayonnement et molécules/particules devrait se renforcer.

Les observations de la mission **EarthCARE** et du projet de mission **CALIGOLA/AOS** permettront de mieux quantifier l'effet radiatif direct des aérosols. Les efforts de validation d'EarthCARE qui seront menés dans les années à venir sont en ce sens essentiels.

Concernant la mesure du déséquilibre énergétique radiatif de la Terre (EEI pour Earth Energy Imbalance), les missions successives **CERES** de la NASA, et **ScaRaB** du CNES, permettent depuis une vingtaine d'années de surveiller l'évolution de l'EEI par radiométrie bandes larges. Néanmoins l'estimation de l'EEI est encore entachée de fortes incertitudes, et la capacité du prochain système post-CERES n'est pas encore établie. La mission **ECO**, permettra d'atteindre une mesure de l'EEI très précise avec un concept innovant de constellation.

mènes d'échelles variées, en particulier le mélange des aérosols, la convection et la circulation atmosphérique globale, nécessite à la fois des observations globales depuis l'espace, mais aussi des observations locales pour documenter les processus. En ce sens, les ballons stratosphériques pressurisés

sont un outil d'observation complémentaire aux observations spatiales, privilégié pour effectuer des mesures in situ et de télédétection. La communauté souhaite pouvoir exploiter de nouvelles capacités d'observations par ballons stratosphériques pressurisés : (i) une durée de vie accrue (6 mois à 1 an) des ballons permettrait d'observer un cycle d'oscillation complet de la QBO, (ii) différents niveaux de pilotabilité de ces ballons permettraient de satisfaire différentes stratégies d'observation dans la zone géographique d'intérêt. Il est proposé d'amorcer un nouveau programme ballon, **StratoFleet**, s'appuyant sur l'héritage du programme **Stratéole**, pour fournir de nouvelles observations de la QBO sur une période d'oscillation complète. En complément, des observations des interactions entre nuages, aérosols et convection, sur plusieurs zones géographiques telles que l'Afrique tropicale et l'Arctique seraient pertinentes et bénéficieraient des avancées instrumentales réalisées pour le programme **StratoFleet**. Un cadre international intéressant pour soutenir ces travaux serait le programme suborbital **AOS**.

#### **Mission de priorité majeure (question A5) : CMIM**

Afin de répondre aux besoins des futurs modèles de PNT (kilométrique à l'échelle globale, sub-kilométrique à l'échelle régionale), l'observation des processus dans les basses couches de l'atmosphère, et en particulier du champ d'humidité, est nécessaire. La fréquence d'observation de ces champs est aujourd'hui limitée à environ 6h avec les satellites **MetOp** et **NOAA**. L'objectif est de descendre en dessous de 3 heures grâce à une constellation complémentaire de petits satellites. La Phase 0 **CMIM** (Constellation de MIni sondeurs pour la Météorologie) a permis d'explorer des synergies entre sondeurs hyperspectraux dans l'infrarouge et sondeurs micro-ondes répondant au besoin d'observation dans les basses couches de l'atmosphère. A partir des résultats de cette Phase 0, il est recommandé de construire une proposition de systèmes d'observation (au niveau instrument et au niveau architecture de constellation), pour une potentielle implémentation future dans la programmation d'EUMETSAT sur le modèle de la constellation **EPS-Sterna**.

#### **Mission de priorité majeure (question A3) : C2OMODO / AOS**

La dynamique interne de la convection profonde

est encore mal documentée à l'échelle globale, en particulier le flux de masse convectif, avec très peu de références observationnelles. Ce thème avait été soulevé lors de la prospective 2019, et la communauté souhaite indiquer à nouveau le caractère prioritaire du projet de tandem de radiomètres microondes passifs **C2OMODO** au sein de l'observatoire international **AOS**. Ses observations auront une sensibilité accrue à l'eau sous sa forme condensée, avec des fréquences allant de 89 GHz à 325 GHz, et une résolution spatiale entre 10 km et 3 km. L'exploitation de la différence temporelle des mesures du tandem de radiomètres permettra d'inférer des informations nouvelles sur la dynamique interne de la convection.

### **3.2 LES MISSIONS AVEC UN CADRE ESA ET AUTRES**

#### **Mission de priorité majeure : CALIGOLA / AOS**

L'observation de la spéciation des aérosols à l'échelle du globe en fonction de l'altitude serait une nécessité pour caractériser les impacts des aérosols sur la composition de l'atmosphère, depuis la surface jusqu'à la haute troposphère / basse stratosphère et le bilan radiatif dans la haute troposphère / basse stratosphère. Un enjeu important est la meilleure caractérisation de l'impact des événements extrêmes et notamment des mégafeux, et des éruptions volcaniques. Malheureusement la mission **MESCAL**, proposée comme priorité majeure en 2019, n'a pas été sélectionnée par la NASA. Un concept proche, la mission **VULCAIN**, a par la suite été proposé mais non retenu au programme Earth Explorer 12. Actuellement en Phase A, le lidar **CALIGOLA** proposé par l'ASI comme contribution à **AOS** pourrait présenter des caractéristiques intéressantes pour la spéciation des aérosols et il sera important que la communauté française soit en bonne position pour exploiter ces données bien qu'aucune contribution instrumentale française ne soit envisagée.

#### **Mission de priorité substantielle: WIVERN**

La mission **WIVERN** est actuellement en Phase A compétitive du programme Earth Explorer 11 de l'ESA. Cette mission fournira des observations des vents au cœur des nuages à 1 km de résolution grâce à son radar Doppler avec une fauchée de 800 km. Ses observations seront très complémentaires de celles de la mission **C2OMODO**, afin de mieux

caractériser le transport d'eau sous forme condensée par les processus dynamiques de fine échelle. De plus, les observations de vents de **WIVERN** offriront une couverture géographique complémentaire aux observations en ciel clair d'**EPS-Aeolus**, au bénéfice de la prévision numérique du temps. Il paraît prioritaire de soutenir cette mission dans son processus de sélection et d'accompagner les études scientifiques dédiées.

#### **Mission de priorité substantielle: ECO**

L'innovation des technologies et possiblement des designs instrumentaux en radiométrie depuis 20 ans n'a pour l'instant pas ruisselé vers la mesure de l'EEL (Earth Energy Imbalance, paramètre fondamental nécessitant une mesure précise). La mission **ECO** qui propose de mesurer l'EEL de manière innovante et précise est actuellement en Phase 0 compétitive du programme Earth Explorer 12 et il paraît prioritaire de la soutenir dans son processus de sélection et d'accompagner les études scientifiques dédiées.

### **3.3 LES CAMPAGNES DE MESURES**

#### **Priorité substantielle: AOS suborbital**

En complément des observations spatiales, l'étude de processus physiques et chimiques liés à l'évolution et la formation des aérosols bénéficiera de moyens additionnels de mesure. Il est proposé de développer un volet dédié aux mesures in situ pouvant fournir une spéciation chimique détaillée des aérosols et des gaz précurseurs, embarqués sous ballon, aéroportées ou sur un site depuis le sol, au sein du programme suborbital **AOS**. Ces mesures de terrain permettront d'étudier le lien entre les propriétés optiques et la composition des aérosols, informations essentielles pour le développement de produits satellitaires aérosols fiables et leur validation.

#### **Priorité substantielle: IASI-NG, Sentinel-5P suborbital, MAGIC**

La compréhension du cycle des GES au niveau global passe notamment par la documentation des flux dans les zones géographiques où les puits et sources sont peu connus. La communauté scientifique française souhaite soutenir le programme **MAGIC** et les campagnes de mesures proposées dans les années à venir dans les tropiques et les hautes latitudes. Celles-ci permettront de docu-

menter la variabilité des GES et valider les missions spatiales avec des mesures au sol ou aéroportées coordonnées avec le passage des satellites, dans ces zones géographiques dépourvues de référence observationnelle.

### **3.4 LES R&T**

#### **R&T de priorité majeure: lidars**

Un besoin important en R&T se dégage autour des technologies lidars pour différentes applications (ex : spéciation des aérosols, mesures de GES) afin que ce type d'instrumentation puisse être proposé dans divers cadres programmatiques de manière plus aisée. Concernant la mesure des GES, et par rapport aux instruments passifs dans le proche infrarouge, les lidars réduisent les inconvénients de la mesure des concentrations en présence de diffusion par les aérosols (nouveau concept de lidar basé sur des peignes de fréquences). Il paraît prioritaire de poursuivre les actions de R&T autour de cette technologie, ainsi que de définir avec la communauté scientifique quelles variables géophysiques seraient le plus pertinent à mesurer avec un lidar spatial, en complément des missions spatiales à venir.

#### **R&T de priorité majeure : Concepts agiles haute résolution**

En plus de la différenciation des flux anthropiques et naturels de GES, il est désormais question de quantification des émissions anthropiques de GES et si possible d'attribution. Pour cela le recours à des missions à très haute résolution spatiale (quelques centaines de mètres) telles que le permettent les capteurs hyperspectraux, semble incontournable. En réponse à ces nouveaux défis, l'amélioration des détecteurs dans le proche infra-rouge et de l'agilité des plateformes ainsi que la miniaturisation pour des perspectives de constellations, sont des pistes à investiguer en R&T dans les prochaines années.

### **3.5 AUTRES RECOMMANDATIONS**

#### **New Space et recherches scientifiques**

De nouveaux acteurs du secteur privé se positionnent actuellement comme futurs producteurs de données pour l'observation de l'atmosphère et visent à proposer des services dans les domaines

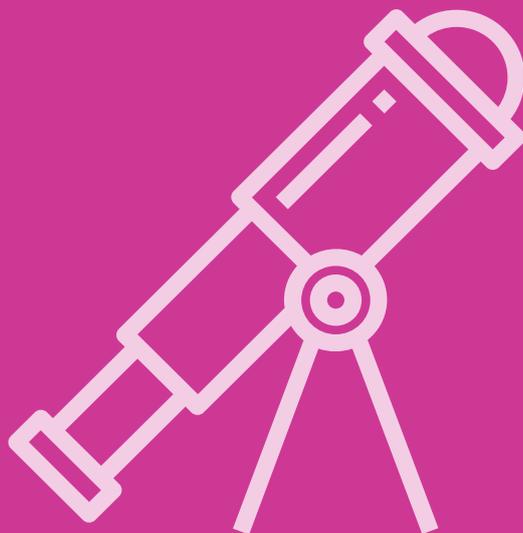
de la surveillance du climat et de la qualité de l'air. Les données envisagées sont souvent identifiées comme complémentaires des missions pilotées par les agences spatiales. Cependant les politiques de partage des données mises en œuvre devront les rendre facilement accessibles pour la recherche. La qualité des mesures qui seront produites est également un point capital pour leur réelle utilisation, les efforts de calibration/validation sont ainsi essentiels.

### Mesures avions, ballons, et IN AIR

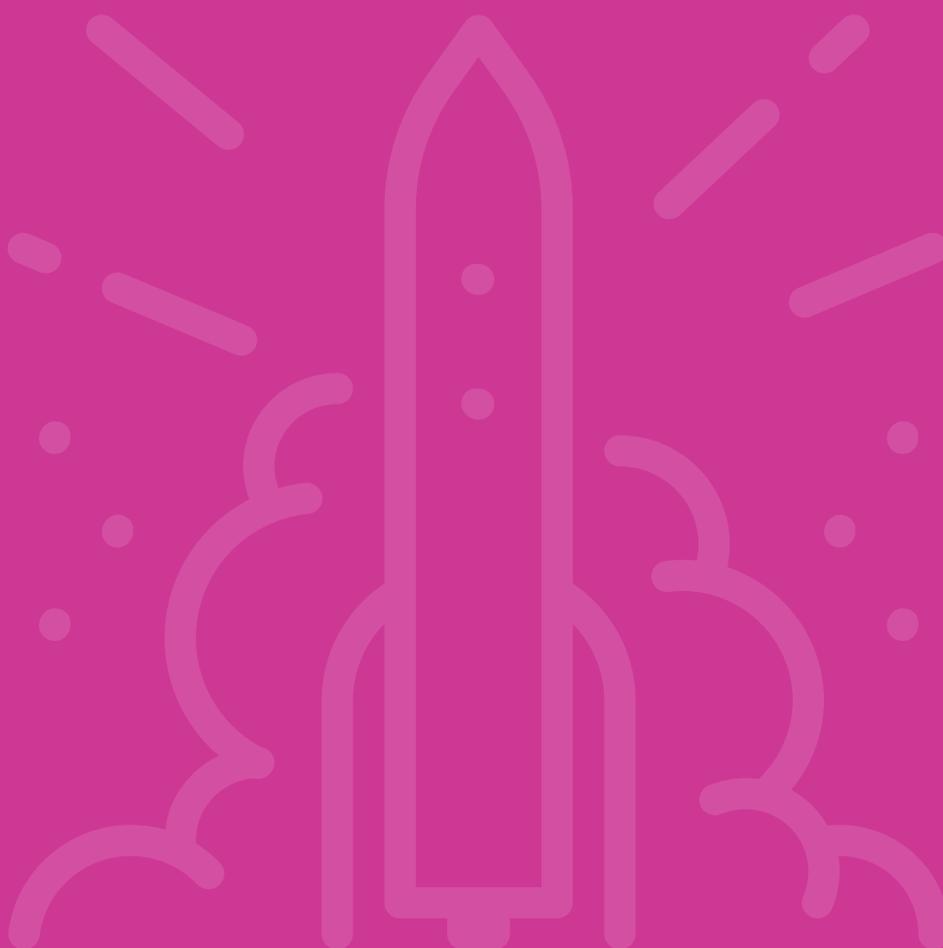
Les nombreux besoins en mesures par avions et ballons émis par la communauté Atmosphère re-

flètent l'importance de la nouvelle Infrastructure IN AIR pour celle-ci. De plus, de nombreux projets spatiaux auront besoin de ces moyens aéroportés pour leur validation dans les prochaines années (**MicroCarb, IASI-NG, C3IEL, AOS...**). Ainsi, il paraît prioritaire de maintenir une flotte française d'avions instrumentés pour la recherche ainsi que des moyens ballons répondant aux besoins de la communauté scientifique. Il est recommandé en particulier aux tutelles de SAFIRE de préparer dès maintenant le renouvellement de l'avion ATR pour éviter, comme c'est le cas du jet, une béance de plusieurs années dans les vecteurs disponibles.

	QUESTIONS SCIENTIFIQUES	OBSERVABLE	CADRE ACTUEL DE DÉVELOPPEMENT	PRIORITÉ	RECOMMANDATION
MISSIONS CADRE CNES	A.4	Multi variables	StratoFleet (Héritage Stratéole)	Majeure	Nouveau programme ballons
	A.3	Flux de masse	C2OMODO / AOS (Phase B0)	Majeure	Engagement programme AOS (Phases BCDE1) incluant le tandem de radiomètres CNES
MISSIONS CADRES ESA et AUTRES	A.5	Température, Humidité	CMIM (Phase 0 CNES)	Majeure	Passage en Phase A et recherche d'un cadre programmatique EUMETSAT
	A.2, A.3, A.6	Spéciation des aérosols	CALIGOLA / AOS	Majeure	Accompagnement mission ASI/NASA
	A.3	Vents	WIVERN	Substantielle	Accompagnement mission ESA
	A.6	Earth Energy Imbalance	ECO	Substantielle	Accompagnement mission ESA
CAMPAGNES DE MESURES	A.2, A.3, A.6	Multi variables	AOS suborbital	Substantielle	Engagement d'un programme suborbital CNES AOS
	A.1, A.2	Multi variables	IASI-NG et Sentinel-5P suborbital, MAGIC	Substantielle	Soutien aux activités de validation via campagnes de mesures dans les tropiques et les hautes latitudes



# **SCIENCES DE L'UNIVERS, MICROPESANTEUR ET EXPLORATION**



# COMITE D'EVALUATION DE LA RECHERCHE ET DE L'EXPLORATION SPATIALE (CERES) DU CNES

Aghanim Nabila (présidente entrante), Amsif Kader, Blouvac Jean (responsable Exploration), Boutelier Martin, Bret-Dibat Thierry, Coustenis Athéna (présidente sortante), Decourchelle Anne, Gauquelin-Koch Guillemette, Grasset Olivier, La Marle Olivier (responsable Science de l'Univers), Marques João, Kretzschmar Matthieu, Lallement Rosine, Laudet Philippe, Morbidelli Alessandro, Morel Jean-Luc, Mustin Christian, Petiteau Antoine, Petrelis François, Rocard Francis, Szopa Cyril

## 1. INTRODUCTION

Le Comité d'évaluation de la Recherche et de l'Exploration spatiale (Ceres) du Cnes couvre historiquement les thématiques de l'astronomie et l'astrophysique (AA) à l'exobiologie en passant par la physique fondamentale, l'héliophysique, et l'exploration du système solaire. Ce périmètre s'est étendu depuis le Séminaire de Prospective Scientifique (SPS) de 2019 en incluant l'exploration robotique et humaine, les sciences de la matière et de la vie et le Ceres s'appuie désormais sur sept groupes thématiques (GTs) abordant les grands thèmes suivants, qui seront détaillés ci-après:

- o **Lois de la physique gouvernant l'Univers**
- o **Origine et évolution de l'Univers**
- o **Fonctionnement global du système Soleil-planètes**
- o **Formation et évolution du système solaire, exoplanètes, habitabilité et planétologie comparée**
- o **Processus physiques de la matière**
- o **Sciences de la vie et exploration humaine de l'espace**

Les recherches en Sciences de l'Univers et Exploration (SUE) nécessitent un accès à l'espace, aux côtés de télescopes ou d'installations au sol. Il ne s'agit pas seulement de nouveaux projets car plusieurs missions spatiales, en opération de longues années après leur lancement (certaines pour plus de 25 ans, ex. Mars Express, SOHO, XMM-Newton), permettent aujourd'hui encore à la communauté scientifique d'obtenir des résultats de haut niveau. Ainsi entre 2019 et 2023, 39 publications internationales de rang A sur les 100 les plus citées dans le domaine AA utilisent des données de missions spatiales au leadership français comme Planck ou Gaia. Parmi ces 39 publications, la France détient le deuxième plus grand nombre d'auteurs ou co-auteurs principaux en Europe (6) derrière les Etats Unis (15). Ces succès et la moisson de résultats originaux obtenus depuis le SPS 2019, dont certains seront mentionnés ci-dessous, rendent compte du dynamisme de la communauté française et du Cnes qui sont devenus des partenaires privilégiés pour les agences spatiales dans le monde (Etats Unis, Japon, Chine, Emirats Arabes Unis, etc.). Ces résultats traduisent la forte implication des équipes françaises et du Cnes dans l'élaboration de missions spatiales ambitieuses, dans l'exploration d'objets de notre système solaire, dans la réalisation des charges utiles, dans l'exploitation de la basse orbite terrestre et dans l'analyse des données collectées ou archivées.

## 2. AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

Comme il serait vain de tenter un bilan exhaustif de toutes les avancées scientifiques depuis 2019, seules quelques-unes sont présentées ici, les rapports des GTs mettant en lumière davantage de résultats scientifiques.

### 2.1 LOIS DE LA PHYSIQUE GOUVERNANT L'UNIVERS

**Le cadre des modèles décrivant l'Univers et ses constituants est globalement établi, mais notre compréhension des lois de la physique qui le régissent reste incomplète.** Nous ne savons toujours pas comment unifier la relativité générale et les théories quantiques, si la relativité générale décrit correctement la gravitation dans tous les régimes, quelle est la nature de la matière noire et de l'énergie noire, ou comment expliquer l'inflation cosmique.

Des avancées majeures en physique fondamentale ont été réalisées ces dernières années par la communauté française. En 2022, l'analyse des données de Microscope, collectées de 2016 à 2018, a amélioré de deux ordres de grandeur la limite supérieure sur une violation possible du principe d'équivalence, la portant à  $10^{-15}$ . Ces résultats, combinés avec l'analyse des données du laser lune ou des éphémérides planétaires améliorées par les dernières données Gaia, conduisent à la réjection de toute une famille de modèles/théories unifiant la gravitation avec les autres interactions. Depuis le dernier SPS, deux événements majeurs ont concerné le domaine des ondes gravitationnelles. Tout d'abord, l'adoption de Lisa par l'Esa en janvier 2024 marque un tournant pour la communauté française fortement impliquée dans cette mission large de l'Esa. Ensuite, les collaborations Pulsar Timing Array impliquant fortement la France ont obtenu la première indication forte de l'existence d'ondes gravitationnelles, autour de quelques nanoHertz en juin 2023. Ces ondes pourraient être émises par des sources similaires à celles qui seront observées par Lisa. Enfin, la combinaison des derniers résultats (2020) du satellite Planck avec ceux des observatoires au sol impose des contraintes strictes sur le fond d'ondes gravitationnelles primordiales.

Sur le front de l'Univers sombre, ces cinq dernières années ont permis d'éliminer de nombreux candidats matière noire grâce aux travaux d'équipes

françaises, notamment au grand collisionneur de hadrons du CERN. La recherche indirecte dans les objets astrophysiques se poursuit donc notamment avec l'utilisation des données du satellite Gaia. Concernant la nature de l'énergie noire, les résultats du relevé sol de galaxies DESI, en avril 2024, indiquent une accélération de l'expansion de l'Univers due à une constante cosmologique présentant de petites déviations et suggérant une énergie noire évoluant au cours de l'histoire de l'Univers. Dans un avenir proche, le satellite Euclid nous apportera des éléments de réponse sur l'origine de l'accélération de l'expansion.

### 2.2 ORIGINE ET ÉVOLUTION DE L'UNIVERS

**Ici, la question centrale est de savoir comment l'Univers s'est formé et a évolué, sous l'effet de processus comme la gravité, la turbulence ou le champ magnétique, etc., dans la diversité des milieux astrophysiques, depuis les galaxies, amas et filaments cosmiques aux étoiles, disques protoplanétaires et planètes.** Pour répondre à cette question, il faut avoir accès aux premiers instants de l'Univers car ils déterminent les perturbations de matière donnant naissance aux galaxies. Les résultats de Planck obtenus en 2020 confortent une origine liée à l'inflation cosmique. Il faut aussi connaître les conditions dans lesquelles les galaxies vont se former et évoluer. Comprendre la récente phase d'accélération de l'expansion de l'Univers est critique car ce phénomène régit le taux de croissance des structures cosmiques et donc leur évolution dans le temps. Inversement, en mesurant la distribution et les formes des galaxies au cours du temps, il est possible d'étudier l'accélération de l'expansion et son origine. Euclid, lancé en juillet 2023, apportera des éléments de réponse à ces questions et les programmes Early Research Observations confirmeront les excellentes performances qui augurent des succès à venir de son exploitation scientifique.

D'autre part, il faut suivre la formation et l'évolution des étoiles et des galaxies, notamment la coévolution des galaxies avec leurs trous noirs super-massifs centraux et la structuration de la matière dans l'Univers. Aux plus grandes échelles spatiales, l'organisation de la matière en grands filaments de la toile cosmique a suscité un fort intérêt, en parti-

culier avec la première détection par les équipes françaises du gaz chaud qu'ils contiennent, dans les données Planck, ROSAT et dans les premières données du relevé eRosita. L'observation dans le domaine des rayons X et aux plus hautes énergies permet d'étudier la nature et les propriétés des phénomènes violents ou transitoires dans l'Univers. L'observation grâce à eRosita d'une nova pendant son éruption, celle d'un sursaut gamma avec le Fermi Gamma ray Telescope ou encore la détection d'un écho émis par le trou noir central de la Galaxie (SgrA\*) il y a 200 ans grâce à l'Imaging X-ray Polarimetry Explorer sont autant d'exemples illustrant les futures avancées qui seront réalisées dans un très proche avenir par des missions telles que Svom (lancement juin 2024) ou Einstein Probe.

A l'échelle de notre Galaxie, l'exploitation scientifique de la mission Gaia par la communauté française se poursuit changeant notre vision de l'environnement local. Grâce à Gaia-DR3, une solution astrométrique est disponible pour 1,46 milliard de sources et une cartographie chimique de la Galaxie a pu être réalisée. L'histoire de la Voie Lactée en est bouleversée car on détecte des restes de nombreuses fusions avec d'autres galaxies plus petites, étalées sur 10 milliards d'années.

Le lancement de JWST, en décembre 2021, a marqué un autre tournant dans notre compréhension de l'évolution de la matière depuis les plus petites jusqu'aux plus grandes échelles. Des galaxies lointaines, parmi les premières à s'être formées, sont observées pour comprendre la manière dont l'Univers a été ré-ionisé. Avec le JWST, il a été possible de détecter de plus en plus de molécules organiques complexes dans des disques proto-planétaires et de déterminer les propriétés physico-chimiques des glaces pré-stellaires, conduisant à des avancées significatives dans l'identification des processus de formation des étoiles et des systèmes planétaires.

### 2.3 FONCTIONNEMENT GLOBAL DU SYSTÈME SOLEIL-PLANÈTES

**Pour comprendre le fonctionnement global du système Soleil-planètes, il est nécessaire de considérer les phénomènes physiques qui opèrent dans le Soleil et ceux impliqués dans son interaction avec les planètes du système solaire.** Il s'agit donc de comprendre l'ensemble de la chaîne des interactions Soleil-planètes, de l'intérieur du Soleil à son atmosphère et ses événements éruptifs, leur pro-

pagation et interaction avec le vent solaire. Puis il faut se pencher sur la réponse des environnements ionisés des planètes à ces sources d'énergie variables, sur la création et la dynamique des magnétosphères et ionosphères des planètes du système solaire et leur couplage avec leurs atmosphères neutres et/ou leurs surfaces.

Le domaine de recherche a connu des avancées scientifiques importantes parmi lesquelles des nouvelles contraintes observationnelles sur la propagation des éruptions et des particules énergétiques dans le milieu interplanétaire, essentielles pour déterminer leur capacité à causer une perturbation géomagnétique, ou l'observation des plus petites éruptions solaires dans la basse couronne dans l'extrême ultraviolet, avec l'instrument EUV de Solar Orbiter, qui pourraient jouer un rôle dans le chauffage de la couronne solaire. On notera aussi la cartographie du vent solaire dans l'héliosphère interne avec les instruments *in situ* de Solar Orbiter (notamment RPW et SWA/PAS sous responsabilité française) et Parker Solar Probe, qui a par exemple permis de mettre en évidence le rôle des ondes de sifflements (whistler) sur l'isotropisation des électrons énergétiques qui devraient sans cela s'aligner avec le champ magnétique. Un résultat récent obtenu avec Parker Solar Probe montre l'omniprésence, près du Soleil, de structures alfvéniques créant un retournement du champ magnétique qui structure fortement le vent jeune et pourrait jouer un rôle dans son bilan énergétique. Ces avancées sont cruciales pour comprendre le fonctionnement global du système Soleil-planètes ainsi que pour alimenter les activités liées à la météorologie de l'espace. Dans ce domaine, la communauté française est devenue un acteur majeur en Europe comme l'atteste le succès de la European Space Weather Week organisée en France en novembre 2023. Une nouvelle étape dans l'exploration des magnétosphères planétaires a également démarré avec la mission de l'Esa Bepi Colombo qui a livré des premiers résultats en phase de croisière vers Mercure lors d'un survol de Vénus, et avec le lancement de la sonde Juice en avril 2023 vers Ganymède et le système de Jupiter.

### 2.4 FORMATION ET ÉVOLUTION DU SYSTÈME SOLAIRE, PLANÈTES, HABITABILITÉ ET PLANÉTOLOGIE COMPARÉE

**Alors que l'exploration des planètes du Système Solaire avance à grand pas et que nous découvrons de plus en plus de systèmes exoplanétaires, il nous reste toujours à élucider des étapes de la formation et de l'évolution de notre Système Solaire, ainsi que ses différences et similitudes avec les autres systèmes planétaires.** La détection de nouveaux types d'exoplanètes à laquelle Cheops a contribué, et la caractérisation chimique de certaines atmosphères grâce au JWST, posent les bases d'une taxonomie planétaire universelle. Les résultats obtenus ces dernières années avec des missions spatiales telles que ExoMars/TGO et Mars 2020 donnent un nouvel essor à la planétologie comparée : il s'agit de 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 centrale concerne l'émergence de la complexité, depuis le milieu interstellaire jusqu'à l'habitabilité des planètes.** Il s'agit de savoir comment la Vie est apparue sur Terre, et si des formes de vie existent ou ont existé ailleurs. Cela nécessite (i) de comprendre les processus de formation des molécules prébiotiques dans le milieu interstellaire et les environnements planétaires, (ii) de déterminer où et comment ont été réunies des conditions favorables à l'apparition et au maintien de formes de vie, et (iii) d'identifier des biomarqueurs pertinents. Les données récentes des missions Mars Science Laboratory et Mars 2020, opérant dans des cratères d'impact différents, ont montré que la planète Mars a été habitable et la recherche *in situ* de traces de vie passée revêt donc une importance considérable. Néanmoins cette recherche exhaustive passe impérativement par l'analyse *ex situ* et détaillée des échantillons de roches actuellement collectés par le rover Perseverance qu'il faudra rapporter sur Terre. De même, les découvertes récentes sur l'existence de zones habitables inédites dans des systèmes exoplanétaires ou de conditions habitables sur les satellites glacés des planètes géantes, ouvrent de nouvelles perspectives, notamment avec les contributions françaises dans les missions Nasa Dragonfly vers Titan et Europa Clipper, sur les environnements

favorables à l'émergence et au développement du vivant. Enfin, les analyses d'échantillons ramenés de l'astéroïde carboné Ryugu sur Terre par la sonde Hayabusa 2 confirment l'importance de la chimie carbonée des petits corps dans l'apport et l'accumulation de matériaux organiques nécessaires à l'émergence de la vie.

### 2.5 PROCESSUS PHYSIQUES DE LA MATIÈRE

**Les sciences de la matière étudient les propriétés physiques universelles à des échelles mésoscopiques, intermédiaires entre microscopiques et macroscopiques. Pour ce faire, il est nécessaire de s'affranchir de la pesanteur** car les phénomènes d'organisation de la matière aux échelles intermédiaires, sont impactés voire causés par la gravité (convection, pression hydrostatique, sédimentation ou drainage, etc.) et affectent les états de la matière dans les expériences menées en laboratoire. Les expériences ainsi réalisées, outre leur intérêt pour leurs aspects fondamentaux, peuvent avoir des applications importantes dans de nombreux domaines technologiques ou sociétaux.

Grâce à l'accès à différents moyens (*International Space Station (ISS), vols paraboliques, fusées sondes, tour à chute libre*) mis à disposition dans un contexte Esa, Cnes et international, la communauté française est parmi les plus actives et reconnues en Europe. Elle a pu être impliquée dans la réalisation de nombreuses expériences dans différents domaines : matière molle et fluides complexes, états et transition d'état de phases de la matière, instabilités, transfert et ondes. La période a vu la montée en puissance des activités dans le thème biophysique, conduisant à sa sélection pour un vol en fusée sonde. Parmi les faits marquants les plus importants dans les dernières années, on peut noter les avancées dans la compréhension et la modélisation des phénomènes qui gouvernent la croissance d'une bulle de vapeur sur une paroi surchauffée, et les échanges de chaleur associés à son évaporation. Également, en solidification des matériaux transparents dans l'insert Declic/DSI, des résultats spectaculaires et inédits ont été obtenus 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»). Les expériences sur les mousses humides ont quant à elles

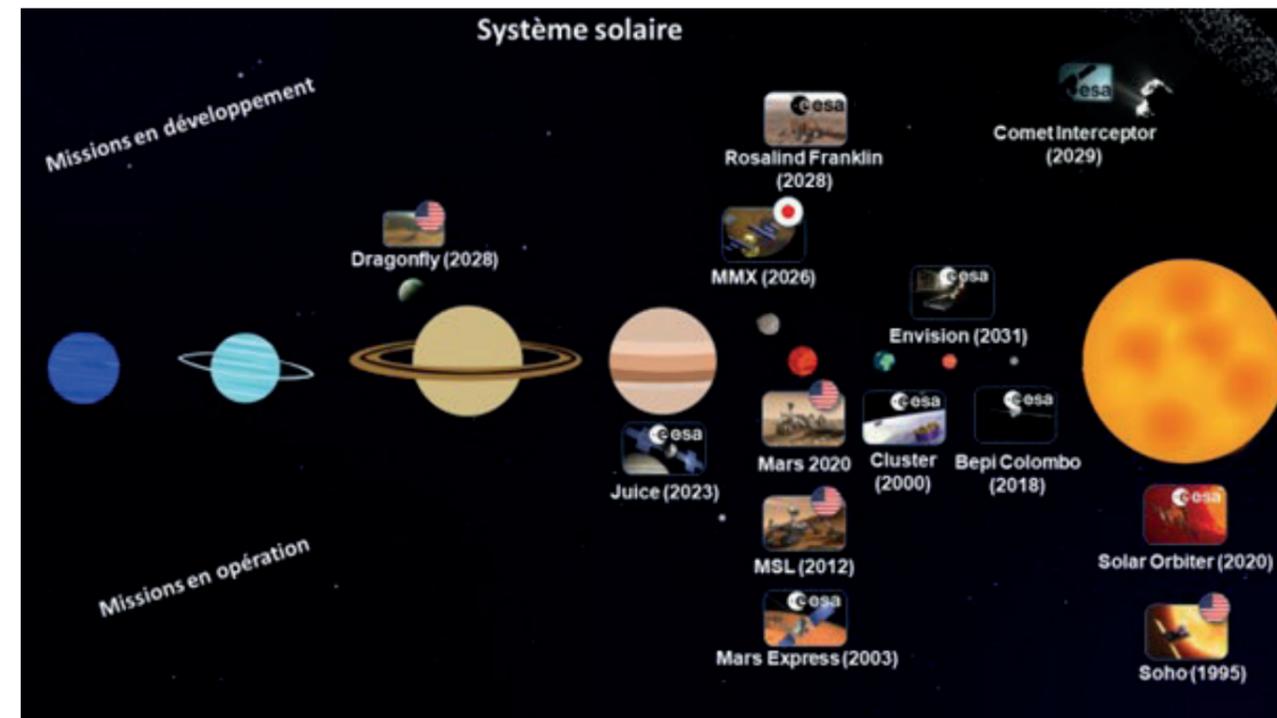
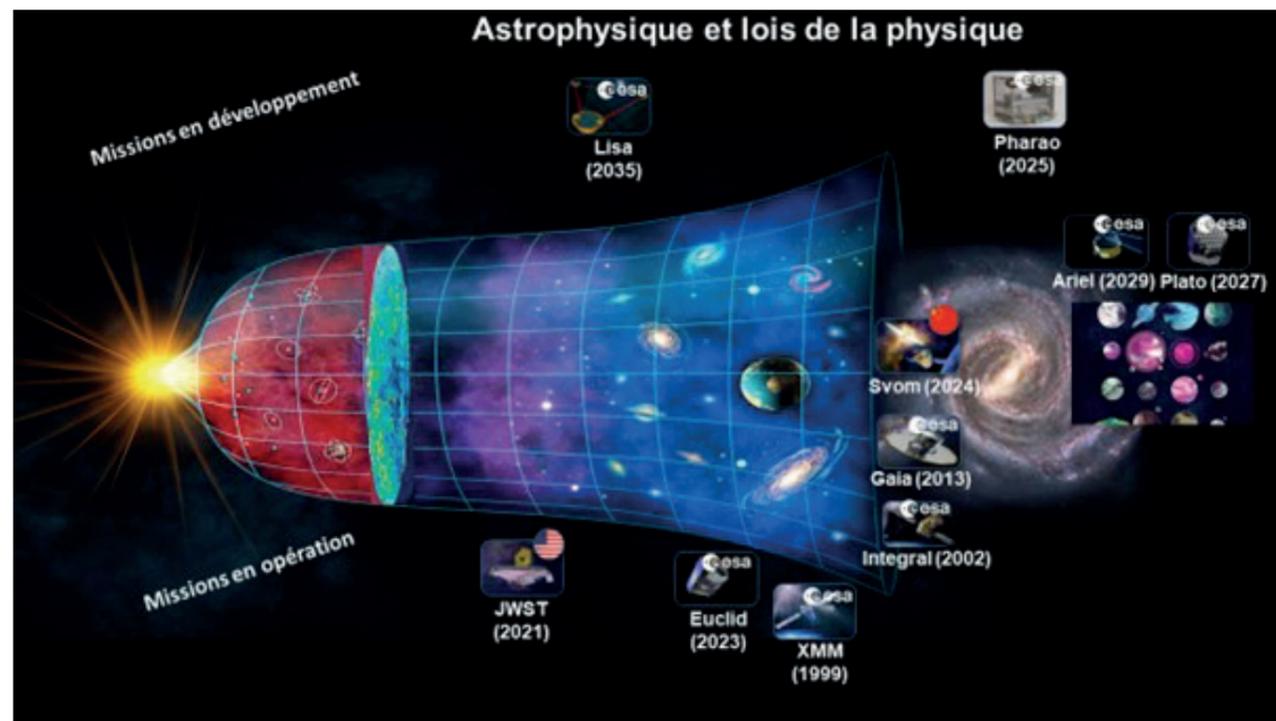
permis de mieux identifier la transition entre deux régimes de mûrissement, étape dans la fabrication des matériaux qui peut influencer sur leur comportement mécanique. Par ailleurs, le Cnes et les scientifiques ont avancé sur la définition de nouveaux instruments spatiaux dédiés à l'étude de la microphysique des nuages, la combustion bas carbone et les turbulences d'onde.

## 2.6 SCIENCES DE LA VIE ET EXPLORATION HUMAINE DE L'ESPACE

L'exploration humaine est liée aux progrès technologiques ; elle sert une variété d'intérêts économiques et politiques nationaux et internationaux et offre des opportunités pour faire progresser la science et en particulier la science du vivant. Les mesures des précurseurs de l'exploration humaine concernent principalement des aspects pratiques de santé, de sécurité et d'ingénierie, ainsi que des aspects de science fondamentale. De plus, l'exploration humaine donne accès à des études dans des conditions particulières, avec une gravité et des niveaux de radiation modifiés conduisant à des nouveaux modèles d'adaptabilité du vivant, et des progrès en médecine de la sédentarité, télémédecine et médecine d'urgence.

Grâce au soutien du Cnes, de nombreuses études ont été initiées sur les effets du bain de radiation gamma avec MarSimulator, la médecine spatiale d'urgence et l'immersion sèche qui permet de mimer les effets précoces du vol spatial. Des avancées scientifiques majeures ont été enregistrées en gravité modifiée et notamment sur les effets des radiations (dose/nature) sur le vivant (santé et support vie) appliquées à l'homme et au végétal dans les conditions martiennes et lunaires.

Les études sur les modèles précliniques (rongeurs et ours hibernant) ont permis de proposer la nécessité de coupler exercice physique et apports nutritionnels particuliers pour réduire les effets atrophiques mis en évidence pendant des vols ISS longue durée concernant les altérations physiologiques en vol et post-vol de l'architecture osseuse, la fonction vasculaire et le système immunitaire. De plus, les expériences au sol en immersion sèche, bed-rest et confinement ont mis en avant des différences homme-femme et des effets sur la réponse immunitaire. Enfin, des résultats majeurs ont été obtenus en médecine spatiale grâce aux développements significatifs de l'instrumentation et de la pratique médicale permettant d'améliorer les échographies et de proposer des gestes de médecine d'urgence.



Missions spatiales en astronomie (haut) et système solaire (bas) avec contributions françaises importantes. Le drapeau indique l'agence maîtresse d'œuvre.

## 3. BILAN PROGRAMMATIQUE DEPUIS LE SPS 2019

Après une période marquée par des retards et surcoûts importants, le programme Science de l'Esa a engrangé de nombreux succès depuis 2019. Il y a eu le lancement par l'Esa de la mission Nasa JWST (2021), les lancements de Cheops (2019), Solar Orbiter (2020), Juice (Avril 2023) et Euclid (Juillet 2023). Par ailleurs, les expériences sur l'ISS et les avancées dans les éléments pour l'exploration robotique et humaine de la Lune et de Mars se sont poursuivies.

Le tableau ci-dessous résume la situation des priorités majeures identifiées lors du SPS 2019, en indiquant l'objectif scientifique principal, les activités mises en place depuis le précédent SPS et la situation actuelle.

Mission	Objectifs scientifiques	Activités depuis SPS2019	Situation actuelle
<b>Athena (Esa)</b>	Observatoire en rayons X pour l'étude de l'Univers chaud et énergétique	Phase d'étude et de prototypage Reconfiguration en <b>NewAthena</b> suite aux coûts Esa trop élevés	Etudes complémentaires en vue de l'adoption début 2027 Lancement 2037
<b>Lisa (Esa)</b>	Observatoire d'ondes gravitationnelles	Phase d'étude, adoption Esa et engagement Cnes (2024)	Engagé Lancement 2035
<b>Litebird (Jaxa)</b>	Recherche des preuves de l'inflation	Phase d'étude	Etudes complémentaires Lancement 2032
<b>Spica (Esa)</b>	Galaxies, milieu interstellaire	Etudes Spica mais abandon Esa pour raison de coût Instruction de contributions Cnes à <b>Prima</b> et <b>Firsst</b> (Nasa)	Spica abandonné Prima et Firsst en compétition Probe à la Nasa ; Lancement 2032
<b>Ariel (Esa)</b>	Etude des exoplanètes	Adoption Esa et engagement Cnes (2021)	Engagé Lancement 2029
<b>Retour d'échantillons martiens (Nasa/Esa) (Jaxa)</b>	Recherche de traces de vie passée  Etude des lunes de Mars ; retour d'échantillons de Phobos	Travaux Nasa et Esa (ERO) sur <b>MSR</b> ; Lancement du projet Markus (gestion des échantillons) du PEPR Origins  Développement et livraison des contributions françaises à <b>MMX</b>	Coût du programme MSR jugé trop élevé côté Nasa, recherche en cours d'alternatives moins coûteuses  Intégration <b>MMX</b> ; Lancement 2026
<b>Exomars (Esa)</b>	Recherche de traces de vie passée	Livraison des contributions françaises et intégration Reconfiguration avec la Nasa suite au retrait de Roscosmos	Développements complémentaires liés au changement d'organisation Lancement 2028
<b>Géantes glacées</b>	Systèmes Uranus et Neptune	Decadal Survey US : 1 <sup>ère</sup> priorité <b>Uranus Orbiter &amp; Probe</b>	En attente de démarrage des études Nasa
<b>Priorité sans mission définie en 2019</b>	Observations simultanées des échelles fluides, ioniques et électroniques	Sélection et phase d'étude d' <b>Hélioswarm</b> (Nasa)  Pré-sélection de <b>Plasma Observatory</b> (Esa, M7)	Fin des études <b>Helioswarm</b> ; engagement à venir (Lancement 2029) Début des études <b>Plasma Observatory</b> (Lancement 2035)
<b>STE-Quest (Esa)</b>	Universalité de la chute libre	Candidature STE-Quest aux M7 Esa non retenue	Pas de cadre de réalisation identifié actuellement
<b>Accès aux moyens de micro-gravité</b>	Sciences de la matière et du vivant dans l'espace	2 <sup>nd</sup> vol ISS de Thomas Pesquet Vols paraboliques	Accès avion zéroG et ISS toujours assurés

Plusieurs des priorités du SPS 2019 ont pu être réalisées et la communauté française peut se féliciter de ce **bilan programmatique positif**. Il y a en effet une excellente implication de la France dans le programme Cosmic Vision de l'Esa, une très bonne participation dans des programmes bilatéraux, notamment avec les Etats Unis, ainsi qu'une impressionnante moisson de résultats scientifiques. Depuis le dernier SPS, les développements par le Cnes de ballons, incluant des vols longues durées, et des nacelles, ainsi que le soutien aux expériences sous

ballons Nasa, ont été mis à profit dans de nombreux domaines du périmètre Ceres pour des mesures directes ou pour la préparation de mesures depuis l'espace (par exemple avec Euso-SPB, Taranis-ballon, Bisou, etc).

## 4. PROSPECTIVE ET RECOMMANDATIONS DU CERES

### 4.1 PRIORITES THEMATIQUES

La prospective scientifique s'est nourrie de celles élaborées au niveau national (CNRS), européen (Astronet 2023, Esa Voyage 2050) et international notamment la National Academy of Sciences, Engineering and Medicine (Nasem) qui a élaboré les Decadal Surveys Astronomie et Astrophysique (DSAA) en 2020, planétologie et astrobiologie (PADS) en 2022, Biological and Physical Science (BPS) en 2023, et héliophysique (en cours). Le Ceres a dégagé des priorités scientifiques dont les majeures<sup>1</sup> sont détaillées ci-dessous avec leur cadre de réalisation, et a identifié des actions pour préparer l'avenir. Il aborde aussi des questions liées à l'organisation, les ressources et la stratégie du programme spatial français.

#### 4.1.1 Aux origines de l'Univers et des galaxies

Invoqué pour expliquer l'origine des perturbations de matière qui donneront naissance aux structures cosmiques (galaxies, amas) et pour rendre compte de la phase d'expansion exponentielle de l'Univers, le processus physique associé à l'inflation reste un mystère qu'on étudie en observant l'Univers très jeune. Cette priorité scientifique, affirmée lors des précédents SPS, nécessite la mesure de la polarisation du fond diffus cosmologique (CMB) aux grandes échelles angulaires, inaccessibles depuis les télescopes au sol, qui mettra en évidence le fond d'ondes gravitationnelles primordiales reliquat du Big-Bang. Le Ceres réaffirme cette priorité scientifique majeure. La mission **LiteBIRD** décidée par la Jaxa (lancement horizon 2032) constitue aujourd'hui le meilleur cadre de réalisation envisageable. La France a la responsabilité du télescope à hautes et moyennes fréquences. Cette importante contribution d'opportunité consolidera l'expertise française et sa visibilité internationale acquise grâce au succès de la mission Planck.

La spectroscopie du CMB, identifiée dans le cadre du programme Voyage 2050 pour l'étude de l'Univers très jeune, constitue une perspective future qu'il convient de préparer. Cette mesure révélera l'histoire thermique de l'Univers apportant des informations uniques à toutes les étapes de son

évolution depuis l'inflation.

Une priorité scientifique majeure pour comprendre la gravité est d'améliorer les contraintes du test du principe d'équivalence pour identifier quels sont les modèles qui permettent l'unification relativité générale/théories quantiques. Pour cela, il sera nécessaire de mesurer les différences d'accélération grâce à une mission comme **Microscope 2**, qui pourrait être proposée dans le cadre programmatique des missions de type F de l'Esa. Dans le domaine des ondes gravitationnelles, **Lisa** (lancement prévu en 2035) est une priorité majeure dans laquelle la communauté poursuivra son implication de premier plan. Lisa ouvrira aussi la voie à l'étude de la coalescence des trous noirs super-massifs et celle de la découverte des étoiles binaires dans notre Galaxie.

#### 4.1.2 Structuration et évolution de la matière à toutes les échelles

La structuration de la matière, depuis les échelles des filaments cosmiques et des amas de galaxies jusqu'à celles du milieu interstellaire et des étoiles, est le résultat de l'effondrement gravitationnel des perturbations de densités initiales et des processus physiques complexes qui affectent la matière ordinaire (les baryons). Ces processus interviennent à différentes échelles, spatiales et temporelles, et conditionnent les cycles des baryons dans les galaxies.

Dans ce contexte, l'environnement des objets compacts et des trous noirs, la co-évolution des galaxies avec leurs trous-noirs supermassifs ou encore la croissance des amas de galaxies déterminent le cycle des baryons chauds ( $T > 10^5 K$ ) qu'on ne peut étudier qu'avec des mesures en spectroscopie haute résolution dans le domaine des rayons X, accessible uniquement depuis l'espace. Cette priorité majeure, déjà identifiée lors des précédents SPS, a souffert de retards et d'une redéfinition. Elle est réaffirmée par le Ceres et elle a maintenant pour cadre de réalisation la mission large de l'Esa, **NewAthena** (adoption prévue en 2027), dans laquelle la France est responsable du spectromètre à intégrale de champ X-IFU. Comprendre le cycle des baryons froids, en étudiant les milieux interstellaires galactique et extragalactique et en déterminant les processus

1 Des priorités substantielles ou modérées sont présentées dans les rapports des Groupes thématiques.

physiques en jeu, est la seconde partie du puzzle de la formation et de l'évolution des structures. En effet ce cycle sous-tend la formation des étoiles et galaxies dans l'Univers et il nous éclaire sur la formation des disques proto-stellaires dans lesquels émerge la complexité moléculaire et se forment les systèmes exo-planétaires. Réaliser cette priorité scientifique majeure nécessite des mesures spectroscopiques haute résolution et polarimétriques de l'infrarouge moyen à lointain, uniquement accessibles depuis l'espace. Dans un contexte programmatique où aucune mission Esa n'est envisageable dans ce domaine avant l'horizon ~2040, il faut assurer la participation française aux projets de la Nasa tels que **Prima** (PProbe far-Infrared Mission for Astrophysics), **Firsst** (Far-IR Spectroscopy Space Telescope) ou **Saltus** (Single Aperture Large Telescope for Universe Studies), en compétition dans le cadre de l'appel **APEX 2023** (pour lancement prévu en 2032) ouvert pour des missions de classe Probe.

### 4.1.3 Des origines du système solaire à la recherche des traces de vie

Les récentes découvertes sur les systèmes exoplanétaires, et les développements théoriques sur leur formation, montrent qu'il reste encore beaucoup à comprendre sur l'architecture de notre système planétaire. La formation des planètes géantes glacées, Uranus ou Neptune, est une priorité scientifique majeure pour comprendre pourquoi elles diffèrent de Jupiter et Saturne par leur structure et leur composition atmosphérique, tout en apparaissant représentatives de certaines exoplanètes. Elle nécessite la mesure de leur structure interne en cartographiant les champs gravitationnel et magnétique et une meilleure détermination de l'enrichissement en éléments lourds au sein de leurs atmosphères, en effectuant des mesures *in situ* (par exemple grâce à une sonde d'entrée, de type Galileo). Le PADS a identifié comme première priorité une future mission Flagship vers **Uranus** qui représente une opportunité stratégique unique pour que la France, et/ou l'Europe, contribue à de nombreux instruments dont le développement devrait commencer en 2027.

Pour comprendre pourquoi seule la Terre possède des conditions habitables aujourd'hui, il est particulièrement important de connaître les origines de la matière organique et les phases de l'eau dans les planètes telluriques. La réalisation de cette priorité scientifique majeure, identifiée lors des précédents

SPS, repose sur le programme d'exploration, notamment de Mars. Plusieurs missions prévues permettront de valoriser les expertises et l'investissement français dont : **ExoMars/Rosalind Franklin**, du programme optionnel Terra Nova de l'Esa avec contribution Nasa et prévue pour 2028, ainsi que le programme **Mars Sample Return (MSR)** de la Nasa avec forte implication de l'Esa, en cours d'évaluation technologique et programmatique pour un retour d'échantillons à l'horizon 2035.

L'exploration d'autres mondes potentiellement habitables dans le système solaire externe (e.g. satellites des planètes géantes) sera de nouveau sur le devant de la scène à l'horizon 2045 avec la **quatrième mission large de l'Esa** dans le cadre Voyage 2050, décidée en avril 2024, vers Encelade, lune de Saturne. Cette mission caractérisera la structure interne et l'océan d'eau liquide en sous-surface afin d'y rechercher des biosignatures et bio-indicateurs. Les satellites de glace sont aussi des priorités déclarées dans le PADS et le DSAA.

Des milliers de planètes extrasolaires ont été découvertes, mais pour comprendre la formation des systèmes exo-planétaires et y rechercher des conditions habitables dans des planètes semblables à la Terre, il faut avoir accès à leur observation directe par imagerie haut contraste et caractériser les propriétés physiques et chimiques de leurs atmosphères par spectroscopie. Suivant la recommandation du DSAA, la Nasa a identifié comme première priorité une future mission de type flagship, **Habitable World Observatory (HWO)**. Les concepts à l'étude offrent une opportunité de contribution française importante. En parallèle, dans le cadre du programme Voyage 2050 de l'Esa, une mission large à l'horizon post-2045, **Large interferometer for Exoplanets (Life)**, est envisagée pour caractériser spectralement les atmosphères des exotéres.

### 4.1.4 Fonctionnement global du système Soleil-planètes

Le Soleil et les planètes du système solaire sont baignés dans des milieux ionisés couplés à leurs interfaces et dont les propriétés sont régies par des processus physiques comme la reconnexion magnétique, les chocs, la turbulence, l'accélération et le chauffage des particules, et l'émission de rayonnements électromagnétiques.

Pour comprendre ce système complexe Soleil-planètes, il faut élucider les processus de chauffage et de dissipation dans l'atmosphère du Soleil et dans

le vent solaire. Cette priorité scientifique majeure sera réalisée, dans le cadre de contributions d'opportunité à des missions Jaxa et Nasa, via deux types de mesures complémentaires. D'une part, il s'agira d'effectuer des mesures haute résolution de l'atmosphère solaire sur une large gamme de températures grâce au spectrographe Extreme UV de la mission **Solar-C** (Jaxa) prévue pour 2028 et à laquelle la France contribue. D'autre part, il s'agira de réaliser les premières mesures multi-échelles (fluides et ioniques) simultanées dans le vent solaire grâce à la constellation de 9 satellites de la mission **HelioSwarm** (Nasa), prévue pour 2029, et qui comprend une importante contribution française.

Les processus à l'œuvre dans l'énergisation des particules et le transport de l'énergie jouent un rôle clé dans la formation et l'évolution des environnements radiatifs de la Terre et des planètes du Système Solaire. Les comprendre et en évaluer l'impact est une priorité scientifique majeure qui nécessite des mesures *in situ* multi-points et multi-échelles dans les magnétosphères et ionosphères planétaires, notamment de la Terre et de Mars. Cette priorité scientifique majeure repose donc sur deux concepts en compétition pour la mission M7 de l'Esa et dans lesquels la France a des contributions importantes: **Plasma Observatory** qui effectuera des mesures multi-échelles dans la magnétosphère terrestre et **M-Matisse** (Mars Magnetosphere Atmosphere Ionosphere and Space-weather Science) qui, grâce aux observations simultanées de deux orbiteurs, cartographiera l'ionosphère et la basse atmosphère de Mars en découplant les variations spatiales et temporelles.

### 4.1.5 La matière dans (presque) tous ses états

Pour comprendre les propriétés universelles qui gouvernent les états de la matière et leurs transformations, il est nécessaire de s'affranchir de la pesanteur. Le maintien de l'accès aux moyens de microgravité est donc une nécessité.

La première priorité scientifique est d'identifier les états fondamentaux de la matière, et de savoir comment s'opèrent les transitions entre états (e.g., solidification, évaporation, ébullition, fluides supercritiques). Parmi les expériences clé, on note celles ayant pour but l'étude de la combustion bas carbone de matière organique dans l'eau supercritique ou encore celles visant à mettre en évidence les propriétés microphysiques des nuages et la condensation de l'eau. La réalisation de ces priori-

tés nécessitera le développement de l'instrument **Declic-Evolution**, avec les inserts **Aerosol et SCWO**, dans la continuité de la collaboration avec la Nasa. Comprendre la dynamique des fluides et les phénomènes comme la convection, ou l'apparition des instabilités et la propagation des ondes, revêt un intérêt fondamental en physique, et pour le rôle que ces processus jouent dans les fluides naturels en géophysique (e.g., océans, atmosphère), en astrophysique (e.g., étoiles, disques d'accrétion, milieu interstellaire) ou pour les applications industrielles (e.g., exploration spatiale). L'étude des propriétés statistiques des grandes échelles en turbulence et la dynamique d'interface, permise par l'instrument **Fluidics-L**, proposé par la communauté française dans le cadre collaboratif avec l'Esa, permettra d'atteindre les objectifs de cette priorité majeure.

### 4.1.6 Des sciences de la vie dans l'espace à l'exploration humaine

Le regain d'intérêt pour l'exploration de la Lune, illustré par les programmes de la Nasa (mission Artémis) et d'autres agences spatiales, laisse envisager un nombre croissant de missions robotiques et habitées vers la Lune et à plus long terme vers Mars. Dans ce contexte, il s'agira de préparer et d'accompagner les équipages lors de vols habités, notamment sur la Lune. Cette perspective implique des séjours dans l'espace plus longs et plus éloignés de la Terre avec des expositions étendues à des niveaux de radiation plus élevés, des délais de contacts avec la Terre allongés, et l'impossibilité de retour rapide sur Terre en cas d'urgence. Protéger la santé des équipages représente une priorité majeure des activités de recherche en science de la vie. Elle se basera sur un programme de recherche dont les volets prioritaires sont l'adaptation de la médecine d'urgence à l'environnement spatial et le suivi de l'état de santé des équipages, dont notamment le développement de dispositifs de diagnostic et de prise en charge des accidents cardiovasculaires et l'adaptation de la pharmacologie spatiale. Cette priorité repose sur l'accès aux conditions de microgravité. Ces recherches offriront de nombreuses opportunités pour l'étude du vivant dans l'espace conduisant à de possibles retombées applicatives. Le maintien des **vols paraboliques** et la sécurisation de l'**accès à l'ISS et ses successeurs** sont une nécessité ; la perspective du **Gateway** ouvrant de nouvelles possibilités.

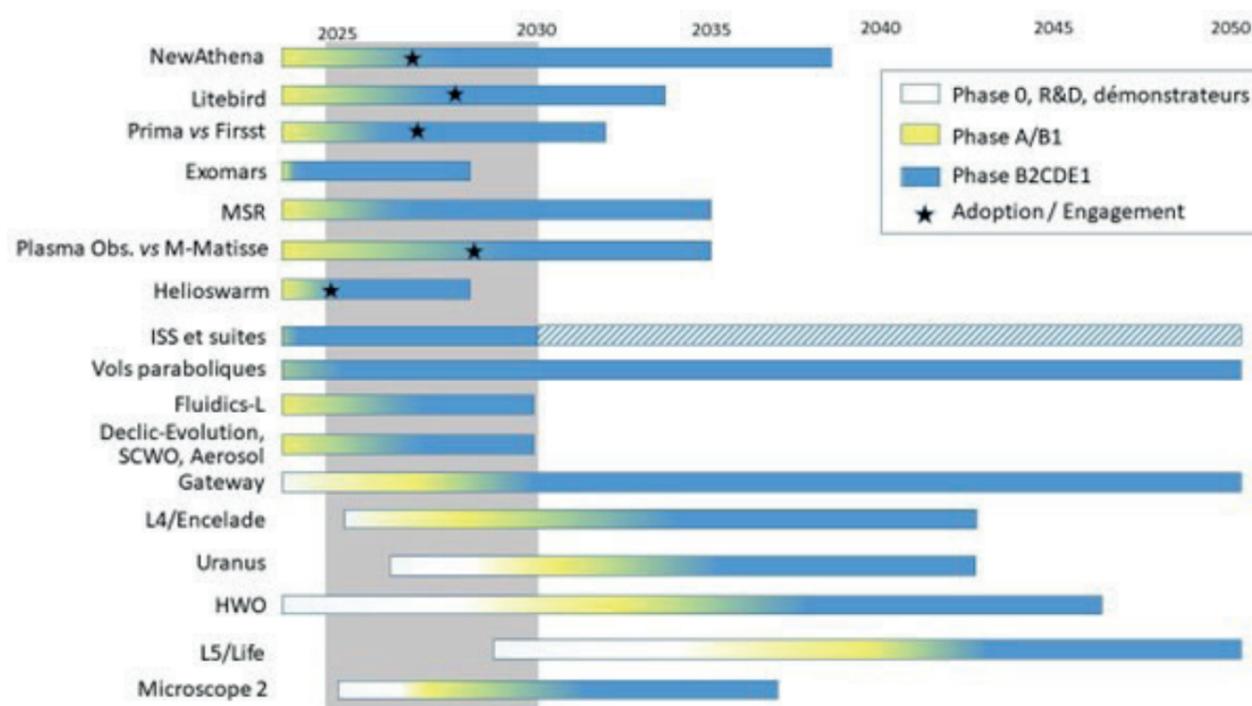
Une autre priorité majeure en sciences de la vie

est la dimension préventive consistant à assurer la bonne santé des équipages pendant et après les vols. Pour cela, il faudra mieux comprendre l'effet des conditions spatiales sur les êtres humains grâce aux études pré-cliniques et comportementales, notamment en isolement, qui permettront de mettre en place des contre-mesures adaptées et personnalisées incluant l'exercice physique, la nutrition, la pharmacologie ou la centrifugation. De plus, il sera fondamental de trouver des solutions qui rendront possible l'exploration spatiale par les humains en assurant la production d'une alimentation adaptée aux besoins des équipages, en la couplant avec le développement de systèmes bio-régénératifs dans les supports vie des stations. Pour cela, en plus de

l'accès à l'ISS, le recours à des expériences embarquées dans des **ballons** et à des **analogues sol** sont prioritaires.

## 4.2 SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

Les priorités majeures du Ceres sont synthétisées sur le chronogramme ci-dessous, avec une indication du phasage potentiel des activités associées. La période de la prospective scientifique est indiquée en grisé.



Synthèse des priorités majeures et programmation associée

## 5. STRATEGIE

Le Ceres réaffirme l'importance des programmes Science (SCI) et Human and Robotic Exploration (HRE) de l'Esa car ils offrent un cadre de réalisation à des priorités scientifiques en phase avec celles jugées majeures ou substantielles par la communauté française.

Le programme SCI constitue la colonne vertébrale du programme scientifique du Ceres en raison de son financement assuré, et du processus de sélection des missions motivé par la science. Les cadres de ses missions Medium et Large structurent le pro-

gramme scientifique du Cnes et permettent de réaliser des missions ambitieuses et d'envergure et d'en garantir le financement. Elles offrent la possibilité de contributions françaises significatives, voire de leadership, et offrent une grande visibilité aux réalisations instrumentales et aux expertises scientifiques françaises. Les missions Fast, beaucoup plus petites, ouvrent des opportunités dont la France peut se saisir pour réaliser certaines priorités importantes. La vigueur et le dynamisme du spatial en France reposent sur les programmes de

l'Esa, il est donc important que le Cnes continue d'accompagner les communautés pour qu'elles répondent efficacement à ces appels d'offres et qu'elles se saisissent des opportunités présentées. Le programme Terra novae HRE donne accès aux missions lunaires, martiennes et de micropesanteur. La recherche de traces de vie dans les planètes du système solaire, via la collecte, le retour et l'analyse d'échantillons de Mars, est une priorité majeure réaffirmée par le Ceres. Elle s'appuie sur la partie d'exploration robotique martienne **ExoMars/Rosalind Franklin** et **MSR**. Ces programmes impliquent un ensemble de missions dont la première, pour **MSR**, a été Mars 2020 à laquelle la France a grandement participé en fournissant l'instrument SuperCAM. Le Ceres recommande la poursuite des contributions françaises à ce programme. En lien direct, l'instruction relative à l'enjeu 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, a été réalisée depuis le SPS 2019. Elle conclut à un changement de stratégie en faveur de la nécessité de disposer d'un centre de référence français avec une offre de services certifiés au niveau international pour l'analyse des risques biologiques sur des échantillons solides, qu'ils soient d'origines terrestres ou extraterrestres. Ce centre s'appuierait sur les compétences nationales, les réseaux de biosécurité européens existants et des infrastructures de recherche européennes distribuées. Le Ceres recommande de poursuivre l'instruction de ce dossier en

impliquant les communautés scientifiques concernées et en contribuant à l'élaboration des règles de protection planétaire. On notera qu'aucune priorité scientifique majeure actuelle ne requiert un programme d'exploration de la Lune, ou des vols habités vers la Lune ou Mars, mais ils peuvent offrir des opportunités pour des priorités scientifiques substantielles liées au fonctionnement du système Soleil-planètes.

Pour atteindre les objectifs scientifiques prioritaires majeurs des domaines des sciences de la vie et de la matière, l'accès à l'espace sur des temps longs est une nécessité actuellement remplie par l'ISS. Sa désorbitation est programmée pour 2030 et des projets de stations spatiales commerciales en orbite basse, habitées ou automatiques, sont à l'étude. Le Ceres recommande qu'une instruction soit menée pour garantir le maintien de l'accès à l'espace pour les expériences scientifiques au-delà de la fin de l'ISS.

Les programmes SCI et HRE de l'Esa étant tracés jusqu'à l'horizon 2040 et au-delà, les missions d'opportunité et les collaborations bilatérales sont complémentaires et nécessaires pour répondre aux priorités scientifiques. Elles peuvent résulter de sollicitations de partenaires internationaux, cadre qui permet de valoriser les expertises techniques et/ou scientifiques françaises. Avant engagement, les contributions d'opportunité et collaborations bilatérales doivent impérativement répondre aux priorités scientifiques de la communauté et être instruites d'un point de vue technique et budgétaire.

## 6. PRÉPARATION DE L'AVENIR

Elle englobe l'ensemble des activités soutenues par le Cnes, depuis les R&T amont à la réalisation de démonstrateurs ou aux études de Phase 0 et A, qui permettent de positionner la communauté scientifique française avec des rôles importants dans les missions et programmes spatiaux ou d'être force de proposition. Depuis l'implémentation des sélections en deux temps pour une Phase A compétitive des missions M de l'Esa, l'évaluation de la faisabilité technique des propositions est un préalable à leur évaluation scientifique. Il est donc crucial que le Cnes conserve un important programme de préparation de l'avenir, notamment en ciblant les activités qui accompagnent les priorités scientifiques majeures et substantielles. Dans certains

cas, il conviendra même de réaliser des démonstrateurs pour valider les concepts ou des éléments de concepts instrumentaux. Pour identifier les actions stratégiques, il faut maintenir un dialogue étroit entre le Cnes et les scientifiques notamment à travers les GT. En parallèle, il faut que les laboratoires puissent être en capacité de s'emparer de ces outils (R&D, Phases d'étude, etc.).

Les programmes de R&D sont nécessaires pour améliorer les filières instrumentales d'excellence (e.g., search coil, capteurs de mesure du champ électrique et de densité des plasmas, sismomètres haute performance, spectromètres de masse haute résolution, spectro-imageurs Infrarouge-UV, réfrigérateurs sub-Kelvin, MicroLIBS, etc.) mais il est

crucial d'innover et de développer de nouvelles filières. Le Ceres a identifié quelques exemples de R&D stratégiques à explorer et/ou mettre en place, mentionnés sans ordre de priorité :

- Le développement d'un concept de caméra plasma, c'est-à-dire la miniaturisation de 3Dcam, un spectromètre à particule 3D à haute cadence pour la physique cinétique ;
- La spatialisation et l'intégration de dispositifs médicaux comme les capteurs et instruments physiologiques, échographes et peut-être dans le futur IRM ;
- Le développement de la nouvelle génération de sismomètres, Very Broad Band senseurs optiques pour étudier la structure interne des corps du système solaire ;
- Les développements pour la spectropolarimétrie UV qui incluent de nombreux aspects technologiques comme les matériaux et revête-

ments, les techniques d'adhérence moléculaire des composants, l'efficacité des revêtements UV, etc. ;

- La démonstration sous ballon d'un concept de spectromètre à transformée de Fourier pour mesurer des distorsions spectrales du CMB ;
- Le développement de l'instrumentation pour la collecte, préparation et stockage des échantillons de matière organique, minérale et biologique, et celle pour l'analyse in situ ou dans les installations sur Terre ;
- Le développement d'accéléromètres de nouvelle génération basés sur des capteurs à atomes ultra froids, plus sensibles que les accéléromètres électromécaniques actuels. La démonstration en cours avec Carioqa et Carioqa PMP est fortement soutenue par le Ceres pour son intérêt pour la physique fondamentale dans l'espace.

## 7. TRAITEMENT ET ARCHIVAGE DE DONNÉES

Une évolution globale observée depuis plusieurs SPS, illustrée par les missions **Planck**, **Gaia**, **Euclid** ou par **Lisa** dans le futur, est la part grandissante des activités liées au segment sol des missions envisagées ou décidées, et leur importance pour atteindre les objectifs scientifiques primaires.

L'amélioration des capteurs et des instruments fait que les signaux mesurés ont aujourd'hui souvent comme frontières les limites fondamentales imposées par le bruit de photon ou celles liées aux effets systématiques instrumentaux. Il est indispensable que les équipes scientifiques continuent de développer des compétences fortes en traitement des données complexes et/ou volumineuses qui couvrent des aspects comme l'analyse d'image, les techniques de dé-mélange (ou séparation) de sources, les données manquantes, l'agrégation de données, l'inférence, etc. Dans ce cadre, l'utilisation des techniques IA ou plus généralement d'apprentissage automatique est grandissante. Cette tendance est partagée avec les thématiques scientifiques dans le périmètre du Tosca. Elle nécessite le renforcement des collaborations avec les communautés des mathématiques appliquées, du traitement du signal et de l'informatique. Le Ceres recommande la mise en place ou le renforcement des outils (e.g., retours d'expérience, R&T ciblées, ateliers, etc.) pour accompagner les communautés scientifiques.

Il est essentiel que les données recueillies par les missions spatiales soient correctement archivées et valorisées car elles constituent des bases de données que les scientifiques utilisent continuellement pour obtenir des nouveaux résultats marquants (e.g., détection de la matière manquante grâce aux données trentenaires du relevé en rayons X ROSAT ou exploitation des données acquises dans la magnétosphère terrestre depuis plus de 20 ans par Cluster). Dans ce contexte et pour les missions sous responsabilité française, la mise en place de pôles de données contribue à valoriser les contributions du Cnes et de la communauté et pourrait conduire à des réductions de coûts en mutualisant les efforts et les infrastructures. Le Ceres estime qu'il est important d'instruire l'intérêt d'un pavage thématique des pôles de données spatiales dans les périmètres Sciences de la vie, Astronomie et Astrophysique et Physique fondamentale. Cette instruction devra intégrer le contexte national (Actions Nationales d'Observation) et international pour optimiser l'utilisation des ressources existantes.

## 8. ORGANISATION ET RESSOURCES

L'organisation actuelle, fondée sur un partenariat entre le Cnes, les laboratoires des organismes de recherche (CNRS, Cea, etc.) et des universités, adossé à des industriels, permet de réaliser les priorités scientifiques de la discipline. Le Ceres constate que la réduction continue des effectifs, en particulier ITA, relevée dans les laboratoires, conduit à des difficultés grandissantes aussi bien dans la réalisation des instruments que dans l'exploitation des données. En conséquence, une part de plus en plus grande des activités est assurée par des personnels non permanents. Cette situation impacte les activités de préparation de l'avenir dans les laboratoires avec le risque d'assécher leur potentiel d'innovation et leur créativité en termes de concepts instrumentaux nouveaux. Il est donc crucial qu'un équilibre soit trouvé et maintenu entre CDD et personnels permanents sans lesquels la préparation et la réalisation des projets spatiaux, sur le long terme, seraient impossibles.

Le retour scientifique des investissements significatifs, mis dans la réalisation des missions spatiales, est crucial. Il est conditionné par le niveau de soutien à l'exploitation scientifique des données collectées. Dans ce cadre, les lignes budgétaires du Cnes relatives à l'exploitation des missions doivent être préservées et commensurables aux enjeux des missions en opération et à venir. Par ailleurs, il nous semble important de maintenir le rôle unique joué par l'APR dans l'accompagnement scientifique des missions spatiales. Pour compléter le dispositif de soutien à l'exploitation scientifique, la communauté est active dans la recherche de financements externes (European Research Council, Agence Nationale de la Recherche) mais l'absence, tant au niveau national qu'europpéen, d'appels d'offres ci-

blés pour l'exploitation scientifique des données des missions spatiales est un réel frein. Comme lors du précédent SPS, le Ceres recommande vivement que le Cnes, le CNRS et les organismes de recherche partenaires, et les Universités agissent conjointement auprès des instances nationales et auprès de la commission européenne pour qu'un budget dédié à l'accompagnement scientifique soit mis en place et ouvert à des AO compétitifs. Pour atteindre leurs objectifs scientifiques certaines missions spatiales nécessitent des données complémentaires au sol, par exemple pour le suivi des alertes, la recherche des petites planètes telluriques, les relevés photométriques des galaxies depuis l'hémisphère Sud. Une coordination étroite entre le CNRS et le Cnes est nécessaire pour assurer le succès des missions dans lesquelles la France est fortement investie.

Le Ceres salue les efforts menés par le Cnes pour minimiser l'impact des problèmes budgétaires sur les priorités scientifiques de la communauté. Cependant, il s'inquiète des évolutions futures et de potentielles baisses du budget qui nuiraient considérablement à la mise en place des priorités scientifiques, même majeures. Il alerte sur la stagnation, voire la réduction, des ressources et le risque de conséquences irréversibles que cela présenterait sur le long terme : affaiblissement des percées scientifiques et perte des talents et compétences français. Le Ceres insiste donc sur la nécessité d'un budget adéquat et pérenne accompagnant la mise en place des priorités scientifiques, qui se déploient sur des périodes longues, et les différentes activités qui y sont associées de la phase de préparation jusqu'à l'exploitation des missions en opération.

## 9. CONCLUSIONS

Le Ceres se félicite des succès de la communauté française et de l'engagement de nouveaux projets avec une forte contribution de la France, depuis le précédent SPS. En particulier, ces dernières années ont vu l'implémentation du programme Cosmic Vision de l'Esa avec le lancement des premières missions (Cheops, Solar Orbiter, Juice, Euclid) et l'adoption des suivantes (Plato, Ariel, Comet-Interceptor, Lisa et Envision), et le développement du programme Terrae Novae. La future adoption de

NewAthena et la sélection de la mission M7 bouclera ce programme laissant la place à la préparation de Voyage 2050. En parallèle, les contributions stratégiques à des missions d'opportunité de la Nasa et de la Jaxa ont permis de compléter les priorités scientifiques françaises.

Ces succès sont d'autant plus remarquables que nous avons vécu des bouleversements sans précédent qui ont impacté l'écosystème de la recherche spatiale. Nous notons en particulier ceux d'ordre

géopolitique, avec l'impact de la guerre en Ukraine sur le programme ExoMars ou sur la mission Euclid ; d'ordre sanitaire avec la pandémie Covid qui a retardé les activités techniques et dont l'impact plus profond reste à évaluer ; et d'ordre financier. Le Ceres salue la résilience de tous les acteurs de l'écosystème de la recherche spatiale qui a permis de poursuivre les projets et activités malgré ces difficultés. C'est le signe que le système de la recherche spatiale française, fondée sur le triptyque laboratoires, Cnes et industries et financé de manière soutenable et adéquate, est bâti sur des fondations solides lui permettant de résister aux remous. C'est un modèle qu'il convient de préserver. Malgré tout, le bilan global doit être tempéré car certaines des priorités majeures identifiées depuis deux voire trois SPS peinent à voir leur mise en place réalisée. Il en résulte que parmi les priorités majeures du Ceres jusqu'à l'horizon 2040 figurent

comme il y a cinq ans des missions en planétologie décidées (surtout vers Mars ou les planètes de glace) ou en astronomie (par ex. Litebird, NewAthena) dont il est crucial d'œuvrer pour qu'elles soient réalisées et d'y consolider la participation française. Les priorités majeures du Ceres incluent aussi de nouvelles missions à venir mutuellement exclusives ainsi que des missions d'opportunité stratégiques. A plus long terme, la fin programmée de l'ISS pose de façon aiguë la question de l'accès à des moyens de microgravité qu'il faut anticiper dès maintenant. Nous espérons que la recherche spatiale française continuera d'engranger les succès scientifiques et techniques sur la scène européenne et internationale. Face à la tentation du court terme, nous soulignons l'importance des investissements dans l'avenir et dans la recherche fondamentale pour réaliser les succès de la prochaine génération de chercheurs, chercheuses, ingénieures et ingénieurs.

# PHYSIQUE FONDAMENTALE

Amy-Klein Anne, Astier Pierre, Bertoldi Andrea, Boutelier Martin (thématicien), Brax Philippe, Cleva Frédéric, Courde Clément, Leponcin-Lafitte Christophe, Petiteau Antoine (président), Rodrigues Manuel, Wolf Peter

La communauté de la physique fondamentale dans l'espace s'intéresse principalement à deux questions majeures de la science contemporaine, questions également partagées par les autres communautés qui interviennent dans les sciences de l'univers, en particulier la communauté astronomie et astrophysique :

1. Comprendre les lois physiques qui régissent notre univers et résoudre l'incompatibilité qui existe depuis une cinquantaine d'années entre les deux grandes théories de la physique du XXe siècle : la Relativité Générale (RG) d'une part qui décrit les effets de la gravité ; la théorie quantique des champs d'autre part qui permet un traitement unifié des interactions fondamentales électro-faibles et fortes dans le cadre de son modèle standard.
2. Décrire les constituants fondamentaux de l'univers à grande échelle (énergie noire, matière noire), mesurés par les succès du modèle cosmologique  $\Lambda$ -CDM, mais dont la nature est jusqu'à présent inconnue.

Les tentatives de réponses à ces questions conduisent à étudier des théories incluant de nouveaux champs, potentiellement massifs, qui n'ont pas de raisons intrinsèques d'être couplés d'une manière universelle aux champs connus. Par exemple, la matière noire peut être recherchée sous la forme d'un champ classique comme l'axion. Ces nouveaux champs ont une signature sur la structure de l'espace-temps qui peut être mise en évidence par une mesure de la gravité ou de ses effets sur des objets physiques.

La gravité est donc au cœur de ces deux questions fondamentales. Il est alors essentiel d'observer ses effets à toutes les échelles, depuis la Terre jusqu'aux confins du cosmos. A l'échelle du système solaire, ce sont des mesures ultra précises des trajectoires d'objets (par ex. **Microscope**, **Galileo**, **Cassini**, **Juno**, laser lune, éphémérides planétaires, **Gaia**) et de l'écoulement du temps mesuré par des

horloges atomiques (par ex. **Aces-Pharao**) qui nous renseignent sur la structure de l'espace-temps. Aux échelles cosmologiques, ce sont des observations du fond diffus cosmologique et des caractérisations des déformations gravitationnelles des grandes structures (**Planck**, **Euclid**) qui nous permettent de tracer l'effet de la gravitation. Par ailleurs, l'étude de l'inflation et de l'Univers jeune nous rapproche du régime où la RG et les théories des champs fondamentales se rencontrent. Enfin, avec les détections directes des ondes gravitationnelles (OGs) par les observatoires sol **Ligo**, **Virgo** et **Kagra**, nous disposons pour la première fois d'une observable directe de la gravité ouvrant une nouvelle fenêtre sur l'Univers. Les résultats déjà obtenus avec ces nouveaux messagers montrent la richesse et la diversité des sources et leur intérêt direct pour la physique fondamentale. La gamme de fréquence des sources d'OGs observables est en cours d'extension au nano-Hz (nHz) avec les récents résultats de la chronométrie de réseaux de pulsars (**PTA**) et sera très largement enrichie dans les décennies à venir avec la mission spatiale **Lisa** pour la bande du milli-Hz (mHz) et les observatoires sols **Einstein Telescope** et **Cosmic Explorer** pour la bande Hz-kHz. Ces nouveaux observatoires fonctionneront en synergie avec la nouvelle génération d'observatoires électromagnétiques (**JWST**, **VRO - Vera Rubin Observatory**, **newAthena**, **ELT**) ou neutrinos (**IceCube**, **KM3Net**) pour contribuer pleinement à l'astronomie multi-messagers dans laquelle la communauté française est pleinement investie.

L'ensemble de ces données permet une meilleure compréhension de la nature de l'espace-temps en lien avec les grandes interrogations des théories contemporaines (théorie des cordes, espace-temps de de Sitter, axion). Elles testent la RG dans des régimes encore peu étudiés.

L'accès à l'espace est absolument essentiel pour la physique fondamentale et complémentaire des expériences au sol. Par exemple, la mesure du prin-

cipe d'équivalence a gagné 2 ordres de grandeur en précision, en rupture avec la tendance historique, lorsqu'elle a pu être effectuée depuis l'espace (**Microscope**). C'est principalement dû à la réduction importante des perturbations, combinée à une augmentation significative des temps de mesures en chute libre. Pour les ondes gravitationnelles,

## 1. BILAN, FAITS MARQUANTS ET AVANCÉES DEPUIS LE SPS 2019

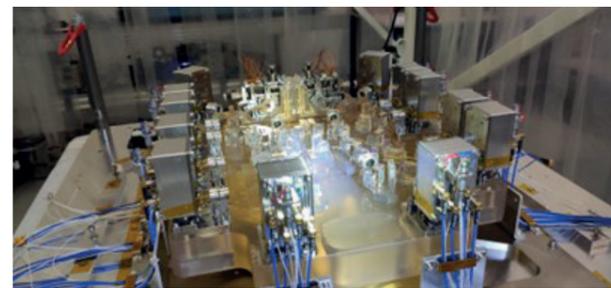
### 1.1 SYNTHÈSE DES PRIORITÉS DU PRÉCÉDENT SPS

Pour répondre à ces grandes questions de la physique fondamentale, la communauté scientifique française a identifié des priorités et des recommandations lors du précédent séminaire de prospective scientifique.

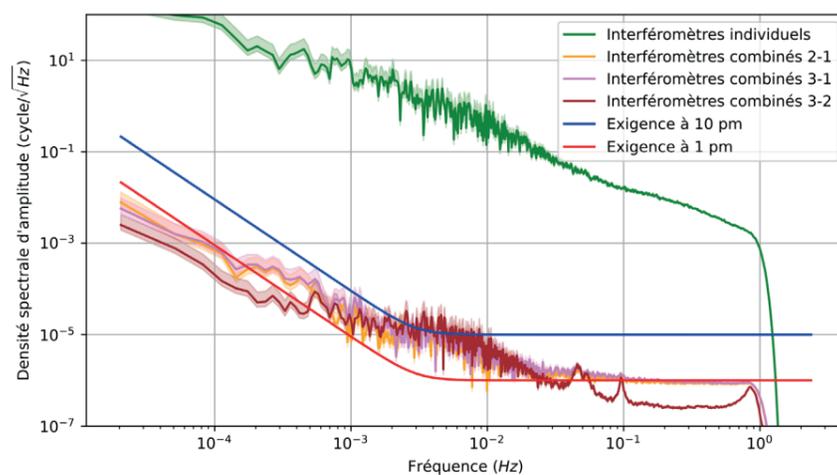
Premièrement, la communauté physique fondamentale a soutenu un investissement très conséquent du Cnes dans la mission spatiale **Lisa** et un accompagnement des laboratoires impliqués. Cette priorité a été largement suivie avec une activité importante du Cnes et des laboratoires dans les phases A et B1. La France a consolidé son positionnement stratégique sur la vérification des performances du cœur interférométrique et est res-

seules les fréquences supérieures à la dizaine de Hz sont accessibles depuis le sol. L'espace est nécessaire pour explorer les fréquences plus basses grâce à un environnement moins perturbé et à la possibilité de déployer des instruments de très grande taille.

ponsable du traitement scientifique des données, promettant un retour scientifique important et une forte visibilité pour la communauté française.



**Figure 1 : Prototype d'un ensemble d'interféromètres zéro-décalage (ZIFO) développé par la collaboration LISAFrance (équipes françaises et Cnes) préparant les activités de vérification des performances sous la responsabilité de la France. Ce prototype a permis de démontrer la capacité de LISAFrance à réaliser une mesure de stabilité picométrique au mHz.**



**Figure 2 : Mesure des performances du ZIFO obtenues dans la chambre de simulation spatiale ERIOS au LAM (laboratoire d'astrophysique de Marseille). En combinant les mesures des différents interféromètres, la stabilité du chemin optique atteint une précision picométrique au mHz, performance visée par les tests de performance de l'instrument **Lisa**.**

Deuxièmement, la communauté physique fondamentale a soutenu la participation française à une

mission de test de l'universalité de la chute libre dans le sillage de **Microscope**, avec une précision de  $10^{-17}$  ou mieux. La mission a été soutenue par le Cnes et a passé tous les critères programmatiques et technologiques. Elle n'a cependant pas été retenue par l'ESA comme candidate M7: en l'absence d'une théorie consensuelle prédisant un niveau de violation réfutable, le comité de sélection a jugé que l'intérêt d'une recherche de violation du principe d'équivalence était limité. Ce raisonnement restreint l'ambition des projets du domaine pour les années à venir. Une meilleure représentation de la communauté physique fondamentale dans les structures de conseil de l'ESA serait également nécessaire.

Enfin, la communauté physique fondamentale a recommandé l'emport d'un accéléromètre ultra précis sur une mission planétaire ESA ou d'opportunité afin d'améliorer notre connaissance du champ gravitationnel dans le système solaire et pouvoir réaliser des tests de gravitation. Peu d'avancées ont été constatées dans ce domaine : les tentatives pour embarquer un accéléromètre de haute précision se sont révélées infructueuses, ce type d'instrumentation étant jugée trop contraignante (nécessité de connaître très précisément le centre de gravité de la sonde).

### 1.2 TEST DES VIOLATIONS PRÉDITES PAR LES THÉORIES D'UNIFICATION

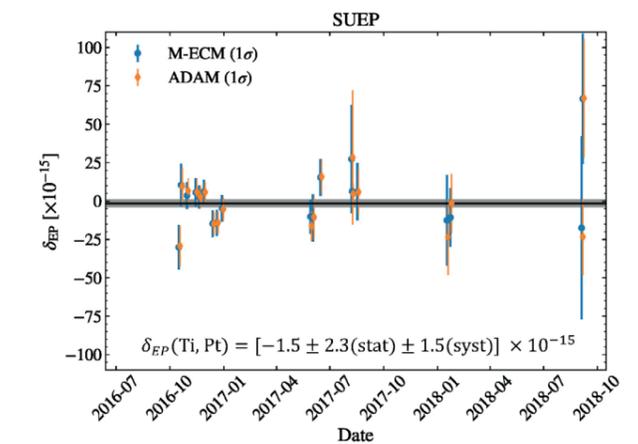
Tester toute déviation des principes fondamentaux de la RG ou du modèle standard constitue la voie la plus prometteuse pour répondre aux deux grandes questions de la physique fondamentale. Au cours des 5 dernières années, des améliorations considérables des niveaux de contrainte ont été apportées sur plusieurs violations prédites par les théories sur le principe d'équivalence ou la symétrie de Lorentz.

#### 1.2.1 Test du principe d'équivalence et universalité de la chute libre : résultats finaux de **Microscope**

Le principe d'équivalence d'Einstein (EEP) est le pilier fondamental de toute théorie métrique de la gravitation comme la RG. La plupart des théories d'unification prédisent une violation de ce principe et en particulier de sa manifestation la plus connue : l'universalité de la chute libre (Universal Free Fall -UFF). Le niveau où cette violation intervient ne fait pas consensus et varie entre  $10^{-10}$  et  $10^{-22}$ . Il est par

conséquent absolument nécessaire de la tester au meilleur niveau possible.

Après une première publication scientifique en 2017 avec un test du EEP à  $10^{-14}$ , les résultats finaux de la mission **Microscope** ont été publiés dans *Physical Review Letters* en 2022 accompagnés d'une dizaine de publications dans *General Quantum Gravity*. Ces résultats confirment la validité du principe d'équivalence avec une incertitude de  $10^{-15}$  pour le couple de matériaux Platine et Titane, améliorant d'un facteur 100 les meilleures mesures au sol ou avec le laser lune. Pour les obtenir, les équipes scientifiques et le Cnes ont réussi le double défi de combiner de multiples sessions d'observations (~1900 orbites) pour améliorer la statistique avec une estimation très précise des effets systématiques liés à la température ou encore aux effets des craquements du satellite (déformations thermoélastiques de la protection thermique) sur les données. Ces résultats finaux sont repris dans de nombreuses publications de la communauté internationale.



**Figure 3 : Mesures de **Microscope** du test du principe d'équivalence (paramètre d'Eötös) pour chaque segment de mesure en utilisant 2 types de traitement des données (M-ECM et ADAM). Ces deux techniques donnent une estimation du paramètre d'Eötös compatible avec 0 à  $10^{-15}$  près, démontrant une non violation du principe d'équivalence à ce niveau de précision**

#### 1.2.2 Violation de la symétrie de Lorentz/CPT

Les symétries de Lorentz et CPT (Charge, Parité et Temps) étant au cœur de la RG et du modèle standard des particules, tester leur violation représente un potentiel important de validation des extensions de ces deux théories. Plusieurs signatures phénoménologiques sont associées à ces violations comme par exemple une modification des équations du mouvement à deux corps qui dépend de

la vitesse relative des corps en question. Le système Terre-Lune constitue un bon candidat pour étudier ce phénomène.

En utilisant 50 années de mesures de distances Terre-Lune obtenues par tir laser entre une station sol et un réflecteur positionné à la surface de la Lune, il a été démontré par une équipe française qu'il n'y avait pas de violation des symétries de Lorentz/CPT avec une amélioration de 3 ordres de grandeur sur la précision obtenue par de précédents résultats basés sur l'analyse des signaux de pulsar.

### 1.2.3 Masse du graviton

Au-delà de la RG, une théorie de la gravité massive suppose que la gravitation n'a pas une portée infinie et qu'elle est véhiculée via une particule hypothétique de masse non nulle, le graviton. Contraindre la masse de cette particule est donc essentiel pour progresser vers une unification de la description des forces fondamentales. Les éphémérides planétaires, modèle numérique de positions des corps célestes basé sur un modèle théorique du mouvement et différentes observations, constituent un outil essentiel pour étudier ces théories dans le système solaire.

Parmi les solutions développées, la solution INPOP (Intégrateur Numérique de l'Observatoire de Paris) développée par l'Observatoire de Paris et de la Côte d'azur s'est considérablement améliorée avec les solutions Inpop19a et Inpop21a. En intégrant de nouvelles données provenant des missions **Gaia** (observations d'astéroïdes et orbite de Pluton délivrées dans la *Data Release 2*), **Juno** (position de Jupiter), **Cassini** (position de Saturne) ou encore **Mars Reconnaissance Orbiter** (position de Mars), les améliorations de la solution INPOP ont été utilisées pour établir une limite supérieure sur la masse du graviton à  $10^{-24}$  eV ( $1 \text{ eV} \sim 1,8 \times 10^{-36} \text{ kg}$ ). Cette amélioration d'un ordre de grandeur par rapport aux précédentes limites indique que les observations des éphémérides planétaires sont en faveur de la théorie de la RG.

## 1.3 MATIÈRE NOIRE ET ÉNERGIE SOMBRE

La recherche de la matière noire n'a pas connu de révolution majeure ces cinq dernières années, mais les limites se sont améliorées en utilisant trois méthodes : la production au collisionneur (prin-

cipalement le **LHC** - Grand Collisionneur de Hadrons), la recherche indirecte de co-annihilation dans les objets astrophysiques, et la recherche directe dans les détecteurs souterrains. Au **LHC**, les limites actuelles éliminent la plupart des scénarios supersymétriques, repoussant les masses minimales à plusieurs TeV. Les recherches indirectes de matière noire dans les objets astrophysiques ont exclu presque entièrement les trous noirs primordiaux et auraient détecté une particule de masse inférieure à  $\sim 200 \text{ GeV}$  s'annihilant via l'interaction faible si elle existait. La recherche directe dans les détecteurs souterrains a établi des limites plus générales, en particulier avec les détecteurs de xénon et d'argon qui couvrent le domaine des particules de masse entre  $10 \text{ GeV}$  et  $10 \text{ TeV}$  et produites par interaction faible.

L'étude de l'énergie noire utilise principalement les relevés optiques et infrarouges de l'astronomie pour déterminer si la constante cosmologique est responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers. Les dernières limites qui proviennent des mesures de distance utilisant les supernovae ou les BAO (Baryon Acoustic Oscillations), en particulier les relevés **SDSS** (Sloan Digital Sky Survey) et **DESI** (Dark Energy Spectroscopic Instrument), sont compatibles avec la constante cosmologique. La mise en service d'**Euclid** et sa mesure du cisaillement gravitationnel pour un grand nombre de galaxies doit améliorer ces résultats, en contraignant l'équation d'état au pourcent et en testant rigoureusement la RG aux grandes échelles.

## 1.4 ONDES GRAVITATIONNELLES

Les ondes gravitationnelles sont un nouvel outil d'observation de l'Univers qui nous renseigne sur la nature et les caractéristiques de la source responsable de l'émission et permettent des avancées majeures en physique fondamentale, cosmologie et astrophysique. La bande du 10Hz-kHz a été ouverte en 2015 par les détecteurs au sol et celle du nHz en 2023 par **PTA**. La bande du mHz sera ouverte par la mission spatiale **Lisa**. Les différentes bandes sont complémentaires tant du point de vue des différentes populations qu'elles révèlent que du suivi des sources elles-mêmes.

### 1.4.1 Bande de 10Hz au kHz

La détection conjointe des OGs par les interféromètres au sol **Ligo** (USA), **Virgo** (France, Italie), et

**Kagra** (Japon) a permis l'observation de 90 binaires d'objets compacts répertoriées dans le catalogue GWTC-3 publié en novembre 2021. Plus de 100 nou-

velles binaires ont été détectées depuis le démarrage d'une nouvelle période de prise de données en mai 2023.

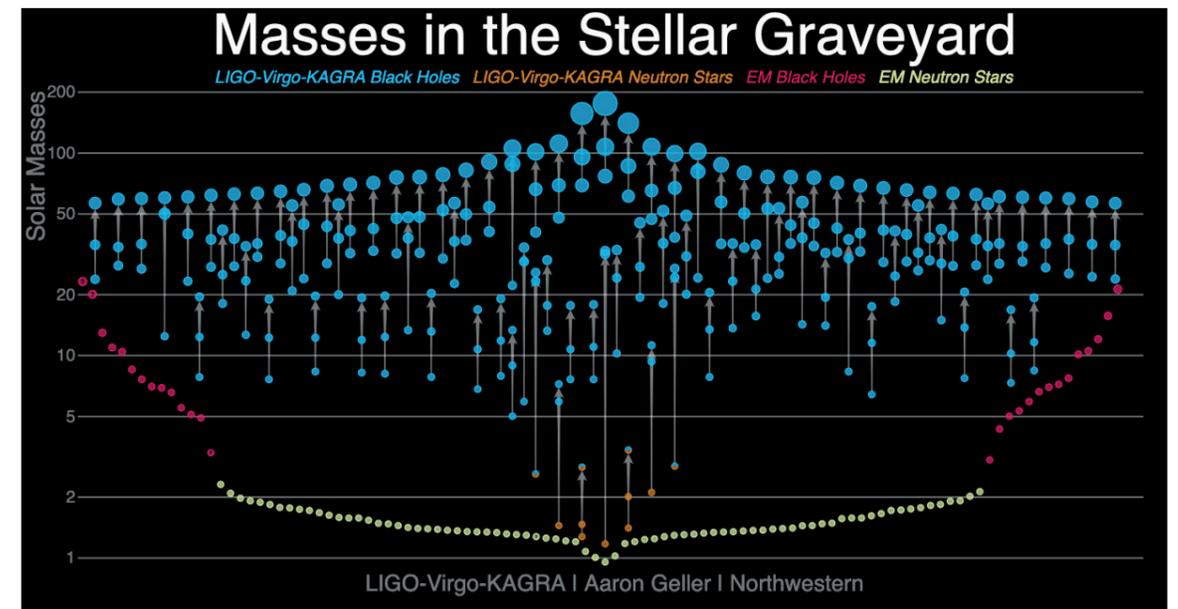


Figure 4 : Sources d'OGs détectées par la collaboration LVK. Les flèches représentent les fusions de deux objets compacts.

Cette large population d'événements a déjà permis des progrès spectaculaires comme la preuve de l'existence des trous noirs, la mesure de vitesse de propagation des OGs excluant de nombreuses théories, une nouvelle contrainte sur la constante de Hubble et de nouvelles approches sur la formation des sources.

De plus, l'exotisme de certains événements a permis des avancées singulières sur les modèles physiques et astrophysiques :

- test de la RG en champ fort avec la coalescence d'une binaire de trous noirs à grand rapport de masses (GW190412) ;
- étoile à neutrons très massive (GW190425) ;
- indication pour un modèle de formation hiérarchique des trous noirs avec l'observation de trous noirs très massifs (150 Mo après fusion pour GW190521) ;
- nature des objets avec un objet à 2.6 Mo pour GW190814 (trou noir très léger ou étoile à neutrons très massives ?) ;

### 1.4.2 Au nano-Hertz

Le système **PTA** (Pulsar Timing Array) permet d'observer les sources d'OGs entre 3 et 100 nHz par le chronométrage d'un ensemble de pulsars millisecondes observés par plusieurs radiotélescopes (perturbation par les OGs de la régularité des pulses).

Les sources d'OGs attendues sont les binaires de trous noirs supermassifs de plusieurs milliards de masses solaires et de potentielles sources d'origine cosmologique. La collaboration PTA-France utilise le radiotélescope de Nançay et contribue au consortium European PTA (EPTA) et International PTA (IPTA).

En juin 2023, une évidence forte pour l'observation d'un fond stochastique d'OGs a été publié de manière synchrone par quatre collaborations EPTA+InPTA (Europe et Inde), NANOGrav (Amérique du Nord), PPTA (Australie) et CPTA (Chine). Les différentes collaborations ont chronométré entre 25 et 60 pulsars sur des durées allant de quelques années à plus de 20 ans. Bien que la signature de la nature d'onde gravitationnelle ait été démontrée à 4 sigmas, il n'est pas encore possible de conclure sur l'origine du signal. Des analyses jointes organisées par l'IPTA sont en cours pour améliorer la significativité et mieux caractériser ce signal.

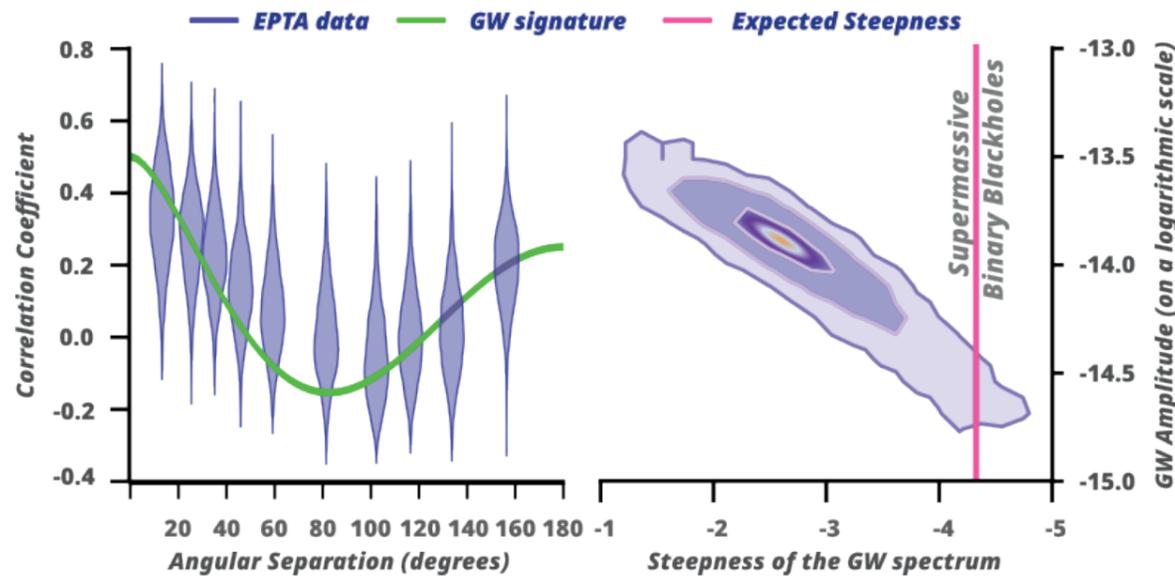


Figure 5 : Evidence forte pour un fond stochastique d'OGs observé par EPTA. À gauche, la corrélation entre pulsars en fonction de leur séparation angulaire : en violet les données et en vert la courbe théorique. À droite, l'estimation des paramètres d'un fond stochastique en loi de puissance : amplitude en fonction de la pente.

## 2. SITUATION PROGRAMMATIQUE DE LA PHYSIQUE FONDAMENTALE DANS L'ESPACE

L'exercice de prospective pour les cinq prochaines années se déroule dans un cadre programmatique avec trois missions d'intérêt pour la physique fondamentale déjà engagées :

- La mission **ACES** et son horloge atomique **Pharao** doit être lancée au début de l'année 2025 sur une fusée Falcon 9. Elle a pour objectif principal la mesure du décalage gravitationnel des fréquences (effet Einstein) dans le champ de la Terre avec une précision inégalée de  $10^{-6}$ . Malgré de nombreux retards, le potentiel scientifique de la mission reste important. Dans le domaine de la physique fondamentale, ACES doit fournir une mesure du décalage gravitationnel des fréquences améliorée d'un facteur 10, par rapport aux dernières mesures. Cette mission permettra aussi de rechercher les variations temporelles des constantes fondamentales et contribuera à la recherche de la matière noire. La communauté scientifique française a été largement impliquée dans la réalisation de l'horloge à atomes froids **Pharao** et est très impliquée dans l'organisation de la mission **ACES** et l'analyse des données.
- La mission large de l'ESA, **Lisa** (adoptée par l'ESA et validée par le Cnes), a de nombreux objectifs scientifiques en astrophysique, cosmologie et physique fondamentale. Son lan-

cement est prévu en 2035 et les premières données seront acquises en 2037. Cette mission permettra d'étudier la formation et l'évolution des binaires d'étoiles compactes dans la Voie Lactée, de retracer l'origine, la croissance et l'histoire de la fusion des trous noirs supermassifs à travers les âges cosmiques, de sonder les propriétés des trous noirs et leur environnement immédiat dans l'Univers local, d'effectuer de multiples tests de la RG, de mesurer le taux d'expansion de l'Univers ou encore d'obtenir des informations sur l'Univers très jeune. Avec plus de 200 membres dans le **Lisa** consortium, la communauté scientifique française est largement impliquée dans **Lisa** (communauté la plus importante en termes de force de travail, avec des responsabilités à tous les niveaux). La France est responsable des tests et de la mesure de la performance du cœur interférométrique de l'instrument. Elle est aussi responsable du segment sol scientifique (Distributed Data Processing Center) et coordonne l'ensemble des pays européens impliqués dans ce développement et héberge le centre de calcul principal.

- La mission **Euclid**, lancée en juillet 2023, a débuté sa cartographie du ciel profond. Les données d'excellente qualité fournies par les ins-

truments **VISible instrument** et **Near Infrared Spectro Photometer** doivent permettre d'observer l'évolution des galaxies et des grandes structures de l'Univers jusqu'à des distances

très importantes. Elles permettront de mieux comprendre la nature et le rôle de la matière noire et de l'énergie sombre dans l'accélération de l'expansion de l'Univers.

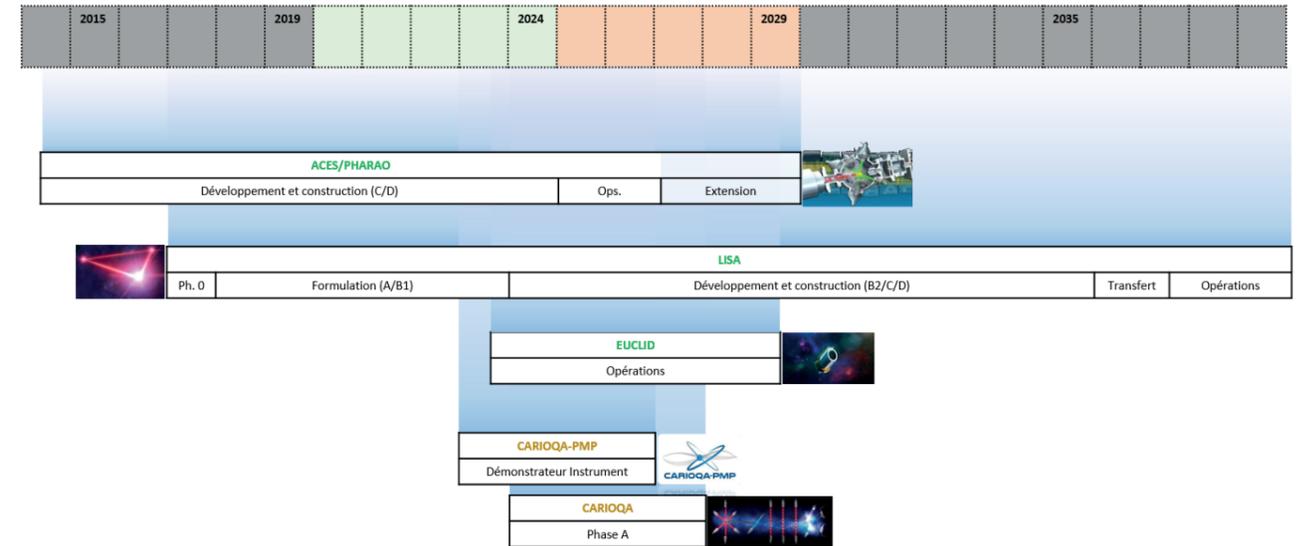


Figure 6 : Planning des missions pour la physique fondamentale.

Ces trois missions scientifiques décidées sont d'un intérêt primordial pour la communauté physique fondamentale et il est absolument essentiel que le Cnes soutienne fortement les équipes scientifiques en charge de ces missions, en particulier pendant les opérations et l'exploitation des données. La communauté physique fondamentale soutient également la participation du Cnes dans les pro-

jets de démonstration technologique d'accéléromètres à atomes froids que sont **Carioqa** (première démonstration en vol début 2030) et **Carioqa PMP**. Ces projets, qui intéressent également la communauté Terre solide, sont fondamentaux pour bâtir les futurs instruments nécessaires à la physique fondamentale dans l'espace.

## 3. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

Ces recommandations visent à poursuivre les progrès scientifiques sur les deux grandes questions directrices tout en tenant compte de la situation programmatique, des développements au sol et des expériences passées dans la soumission de projets spatiaux.

Concernant l'identification et la contrainte des modèles unifiant la RG et les théories quantiques, les trois axes prioritaires dans le spatial sont (i) de continuer à améliorer les tests du principe d'équivalence par des mesures directes et répétées d'une potentielle violation sur différents corps et différentes masses (atomes, masses d'épreuve, petits corps ou planètes) ; (ii) d'étudier la gravitation en champs forts (trous noirs) et à grandes échelles ; et (iii) d'étudier l'Univers jeune à la recherche d'une nouvelle physique qui se manifesterait à très hautes énergies.

Concernant l'identification des constituants de

l'Univers à grande échelle, les deux axes prioritaires sont (i) la recherche d'une signature directe de la matière noire ; et (ii) les études des différents modèles cosmologiques.

### 3.1 AMÉLIORER LE TEST DU PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE

L'amélioration des tests du principe d'équivalence est la première priorité de la physique fondamentale nécessitant une participation majeure du Cnes. Elle passe par la mesure de différences d'accélération s'étalant sur une large gamme de masses allant des atomes aux planètes. Pour les grandes masses, l'amélioration vient des tests au niveau du système solaire traité en 3.5.

Pour les tests avec des masses de l'ordre du kilogramme, la voie privilégiée est la mission **Microscope 2** qui est la suite naturelle de **Microscope** avec

un objectif de  $10^{-17}$  soit 100 fois mieux que **Microscope**. Des études sont menées à l'ONERA sur le retour d'expérience de **Microscope** pour améliorer les points limitant la performance dans un usage adapté pour **Microscope 2**, c'est-à-dire le maintien de la charge électrique de la masse d'épreuve et sa mesure de position. Une réflexion a lieu sur les matériaux à utiliser pour un retour scientifique optimal dans une configuration à 3 masses d'épreuve concentriques (au lieu de 2 pour **Microscope**). Cette configuration est motivée par la volonté de mieux différencier les erreurs systématiques de chaque paire de masses à tester. Une utilisation augmentée de la charge utile permettant d'autres objectifs scientifiques (matière noire, constante gravitationnelle G, ...) est également à l'étude. **Microscope 2** est envisagée dans un cadre international (bilatéral, trilatéral ou mission F à l'ESA) et une distribution des contributions à la mission (tâches / équipements / traitements).

Pour les tests au niveau atomique, la voie privilégiée est une mission spatiale d'interférométrie atomique à un coût acceptable (petite taille - mission F à l'ESA), **Carioqa** étant une première étape dans cette direction.

Les propositions de futures missions sur le principe d'équivalence intégreront l'expérience acquise après la non-sélection répétée de STE-QUEST à l'ESA.

### 3.2 RECHERCHER LES PREUVES DE L'INFLATION

La recherche de preuve de l'inflation est la seconde priorité de la physique fondamentale qui nécessite une participation majeure du Cnes. L'objectif est ici d'obtenir des informations sur l'Univers très jeune, bien avant l'émission du Cosmic Microwave Background (CMB - première lumière émise dans l'Univers observée par le satellite Planck). L'inflation est le modèle actuellement privilégié pour rendre compte de l'évolution de l'Univers juste après le Big Bang et consiste en une évolution extrêmement rapide. Sa mise en évidence et sa caractérisation sont des éléments cruciaux pour la compréhension de l'Univers et pour la nouvelle physique. Lors de la phase d'inflation, des ondes gravitationnelles de très grande longueur d'ondes ont été émises et ont imprimées des modes de polarisation particuliers dans le CMB, les modes B. Leur détection nécessite une mesure très précise de la polarisation du CMB, mesure qu'effectuera la mission **LiteBird** (JAXA +

Europe) actuellement en phase A.

### 3.3 PHYSIQUE FONDAMENTALE AVEC DE NOUVELLES CLASSES DE SOURCES D'ONDES GRAVITATIONNELLES ET DES OBSERVATIONS MULTI-BANDES

L'étude des phénomènes les plus violents de l'Univers est une des principales méthodes permettant d'accéder à une nouvelle physique. Les mesures en champ de gravité fort, comme dans les divers systèmes binaires de trous noirs, permettent de voir si la RG décrit bien la gravitation. Beaucoup de ces phénomènes violents émettent des ondes gravitationnelles dans des bandes de fréquence très variées. **PTA**, **Lisa** et **Ligo/Virgo** explorent et explorent respectivement les bandes du nHz, mHz et 10Hz/kHz mais il n'existe pas de projet concret au micro-Hz et au déci-Hz. Du fait de la taille des instruments et de la stabilité nécessaires, l'espace est un lieu privilégié pour cet élargissement et ce type d'instrument est donc une priorité pour la physique fondamentale nécessitant une participation substantielle du Cnes.

Les sources n'émettant qu'au micro-Hz sont par exemple certaines binaires de trous noirs supermassifs dans l'Univers proche avec une forte probabilité de trouver une contrepartie électromagnétique et ainsi d'avoir une très bonne compréhension des systèmes. Le déci-Hz donne accès aux binaires dont le rapport de masses est entre 50 et 500 et à celles de masse intermédiaire (autour 1000 masses solaires), qui ouvrent sur l'étude de la gravité dans un nouveau régime. L'accès au micro-Hz et au déci-Hz permet également d'observer et d'étudier des sources dont l'émission s'étale sur une large gamme de longueur d'onde comme par exemple les fonds stochastiques émis par l'Univers primordial ou les binaires d'étoiles à neutrons. Ces nouvelles bandes sont donc complémentaires des projets actuels comme **Lisa**.

Plusieurs projets spatiaux au micro-Hz et au déci-Hz sont en cours d'étude : un interféromètre de type **Ligo/Virgo** sur la Lune (**Lila**) ou dans l'espace (**Decigo**), un interféromètre atomique (**Agis**) ou encore une constellation de Nanosat avec des horloges de précision ou une **Lisa** de grande taille (**LISAmax**). Ces projets très prospectifs s'inscrivent sur le long terme.

### 3.4 RECHERCHER UNE SIGNATURE DIRECTE DE LA MATIÈRE NOIRE

L'espace est un lieu privilégié pour rechercher des signatures directes de la matière noire, en recherchant, par exemple, des oscillations résonnantes entre des masses d'épreuve en chute libre induites par un certain type de matière noire. La mission **Microscope 2** (décrite en 3.1) pourrait effectuer des mesures de ce type. Ce type de recherche est une priorité de la physique fondamentale nécessitant une participation substantielle du Cnes.

### 3.5 TEST DE GRAVITÉ DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

L'établissement d'une cartographie précise du champ de gravité dans le système solaire est un enjeu crucial pour la physique fondamentale. Cette cartographie qui passe par une trajectographie très précise des satellites, la réalisation des systèmes de référence et l'amélioration des éphémérides planétaires dans le système solaire, permet de faire des tests très précis de la physique sous-jacente, la gravité.

Pour cela, il est nécessaire d'emporter des accéléromètres suffisamment précis ( $10^{-11}$  m/s<sup>2</sup>) sur des missions vers les objets du système solaire pour supprimer les effets non gravitationnels et dépasser les limites des modèles actuels. L'emport d'accéléromètres sur des sondes 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 planète survolée et de la dynamique de la sonde ;
- En phase interplanétaire, d'obtenir pour la première fois une caractérisation précise de la dépendance en distance de la loi de la gravitation.

Ce type d'instrumentation nécessite un investissement substantiel du Cnes pour d'une part encourager et convaincre nos partenaires de l'intérêt de ce type d'instrumentation sur des missions planétaires, et d'autre part accompagner l'effort nécessaire en R&T pour améliorer les performances et miniaturiser ce type d'instrument.

### 3.6 INVESTIR ET SOUTENIR LES DÉVELOPPEMENTS TECHNOLOGIQUES

#### 3.6.1 Futurs capteurs et instruments

La physique fondamentale est une science qui repose sur des mesures extrêmement précises des effets de la gravité sur la structure de l'espace et du temps. Elle se trouve limitée aujourd'hui par la sensibilité des instruments. Par exemple, pour la mesure du temps, les dernières horloges atomiques optiques au sol atteignent des incertitudes inférieures à  $10^{-18}$  en valeur relative et des progrès significatifs ont été faits pour les automatiser et les fiabiliser. Mais on ne dispose pas de moyens suffisamment performants pour les comparer au niveau intercontinental (comparaison de fréquences par fibres optiques sur des distances du millier de km). Il est donc nécessaire d'accélérer le développement des liens de transferts de temps en espace libre avec ce niveau de performance. Ceci permettra de mesurer avec une meilleure précision l'effet de la gravité sur l'écoulement du temps.

Autre exemple de limitation, la mesure de la distance Terre-Lune est étroitement surveillée au cm près. Cette mesure se fait via des liaisons lasers entre une station sol et des rétro réflecteurs déposés lors des missions lunaires Apollo. De nouveaux réflecteurs lasers plus précis vont être déposés dans les années à venir lors des futures missions lunaires. La précision accessible par ces nouveaux réflecteurs sera limitée par les lasers utilisés et les techniques de détection mises en œuvre. Il est absolument nécessaire de développer des lasers de plus forte puissance, avec une cadence de tir plus élevée et des impulsions plus courtes. Il faut également soutenir le développement de capteurs plus rapides et moins bruités, et développer des optiques adaptatives robustes.

Concernant les accéléromètres et les capteurs inertiels, les performances des capteurs tels que ceux utilisés sur **Microscope** sont proches de leurs limites intrinsèques et d'autres technologies sont nécessaires. Les capteurs quantiques à base d'atomes froids constituent une alternative très prometteuse mais leur spatialisation est encore loin d'être acquise. Il est donc absolument nécessaire de soutenir une mission satellite précurseur basée sur des capteurs à atomes ultra-froids telle que **Carioqa**. En parallèle, il faut améliorer la miniaturisation des accéléromètres électromécaniques pour rendre possible leur emport sur des missions d'exploration du système solaire.

### 3.6.2 Techniques d'analyse et de traitement des données

Les données issues des futures missions spatiales liées à la physique fondamentale nécessiteront des nouvelles techniques d'analyse, qui devront être plus massives et plus performantes pour faire face aux quantités de données générées. La mission **Lisa** est un bon exemple de ce que préfigure le futur. Pour réussir l'exploitation scientifique de la mission, d'importants développements doivent être fait en analyse bayésienne à grand nombre de paramètres et en démixage de signaux pour extraire l'ensemble des sources. Les équipes scientifiques ont

également de plus en plus recours aux techniques issues de l'intelligence artificielle. L'ensemble de ces techniques doivent prendre en compte une flexibilité et une modularité dans le développement des chaînes d'analyse pour développer des cycles courts entre prototypage et production. Ces algorithmes seront distribués et exécutés sur de multiples fermes de calcul mutualisées CPU-GPU. Le Cnes doit accompagner les efforts de la communauté française dans ce domaine et continuer d'investir dans les développements associés, en particulier pour la mission **Lisa** où la France est responsable de l'analyse des données.

## 4. CONCLUSION

Au cours des 5 dernières années, la communauté française a obtenu d'importants résultats grâce à des mesures impliquant des moyens spatiaux. Cette communauté est fortement impliquée sur 3 missions où de nouveaux résultats sont attendus : **Lisa** qui vient d'être adoptée, **Aces/Pharao** qui sera lancée en 2025 et **Euclid** actuellement en opérations. Il est nécessaire de poursuivre les efforts et

de préparer l'avenir par des investissements du Cnes sur l'étude de nouvelles missions et de la R&T. Le tableau ci-dessous résume les recommandations majeures et substantielles:

Question fondamentale	Objectif scientifique	Observable/type de mesure	Exemple de cadre de réalisation avec phase	R&T
Unifier la relativité générale et les théories quantiques	Comment réconcilier mécanique quantique et relativité générale ?	Mesures de différences d'accélération des atomes aux planètes pour tester le principe d'équivalence [ <i>Priorité Majeure</i> ]	<b>Microscope2</b> à phase 0	Développement de l'interférométrie quantique ( <b>Carioqa</b> à phase A) Amélioration des techniques de mesure de distance (laser lune) Amélioration des techniques de mesure de temps (lien de transfert de temps)
			Accéléromètres embarqués sur des sondes interplanétaires	Miniaturisation des accéléromètres
	Nouvelle physique : Que nous apprend l'Univers très jeune (inflation) ?	Détection des modes B comme preuve de l'inflation [ <i>Priorité Majeure</i> ]	<b>LiteBIRD</b> à phase A	
	La relativité générale décrit-elle bien la gravitation à grande distance et en champ fort (observations des phénomènes les plus violents de l'Univers) ?	Détection d'ondes gravitationnelles au $\mu\text{Hz}$ et au $\text{dci-Hz}$ [ <i>Priorité Substantielle</i> ]	Interféromètre type <b>Ligo/Virgo</b> sur la lune et constellation de satellites (prospectif, long terme)	
Décrire les constituants de l'Univers à grande échelle	Nature de la matière noire	Mesures de différences d'accélération des atomes aux planètes pour la recherche de matière noire [ <i>Priorité Substantielle</i> ]	<b>Microscope2</b> à phase 0	Développement de l'interférométrie quantique ( <b>Carioqa</b> à phase A)

# ASTRONOMIE ET ASTROPHYSIQUE

Braine Jonathan, Dartois Emmanuel, Foglizzo Thierry, Grosso Nicolas, Gry Cécile, Halloin Hubert, Hébrard Guillaume, Knödseder Jürgen, Laudet Philippe (thématicien), Maffei Bruno, Marques João (président), Prunet Simon, Ristorcelli Isabelle

La thématique astronomie-astrophysique cherche à comprendre l'évolution de l'Univers et de ses constituants. Elle couvre des domaines aussi variés que l'inflation cosmique, la formation des galaxies, des étoiles et des planètes, leur vie et ultimement leur mort. Elle a des interfaces importantes avec la physique fondamentale, notamment via la physique de l'univers primordial, la matière noire, l'énergie noire, et les ondes gravitationnelles, mais aussi avec les groupes système solaire et exoplanètes et avec le groupe Soleil-héliosphère-magnétosphère. La discipline est caractérisée par une diversité d'échelles de temps, des premiers instants à l'âge actuel de l'univers, et de taille des objets, des filaments cosmiques aux atomes et molécules. De nombreux processus physiques sont en jeu, tels que la gravitation, la turbulence, l'accélération de particules, la nucléosynthèse. Ces processus agissent sur les champs de rayonnement, le champ magnétique, le rayonnement cosmique... dans des milieux très divers comme les différentes phases de gaz et les grains de taille variable. Les effets environnementaux et de rétroaction à toutes les échelles y jouent un rôle majeur. Les recherches en astronomie et astrophysique visent à comprendre :

- **L'origine, le contenu et l'évolution de l'Univers**

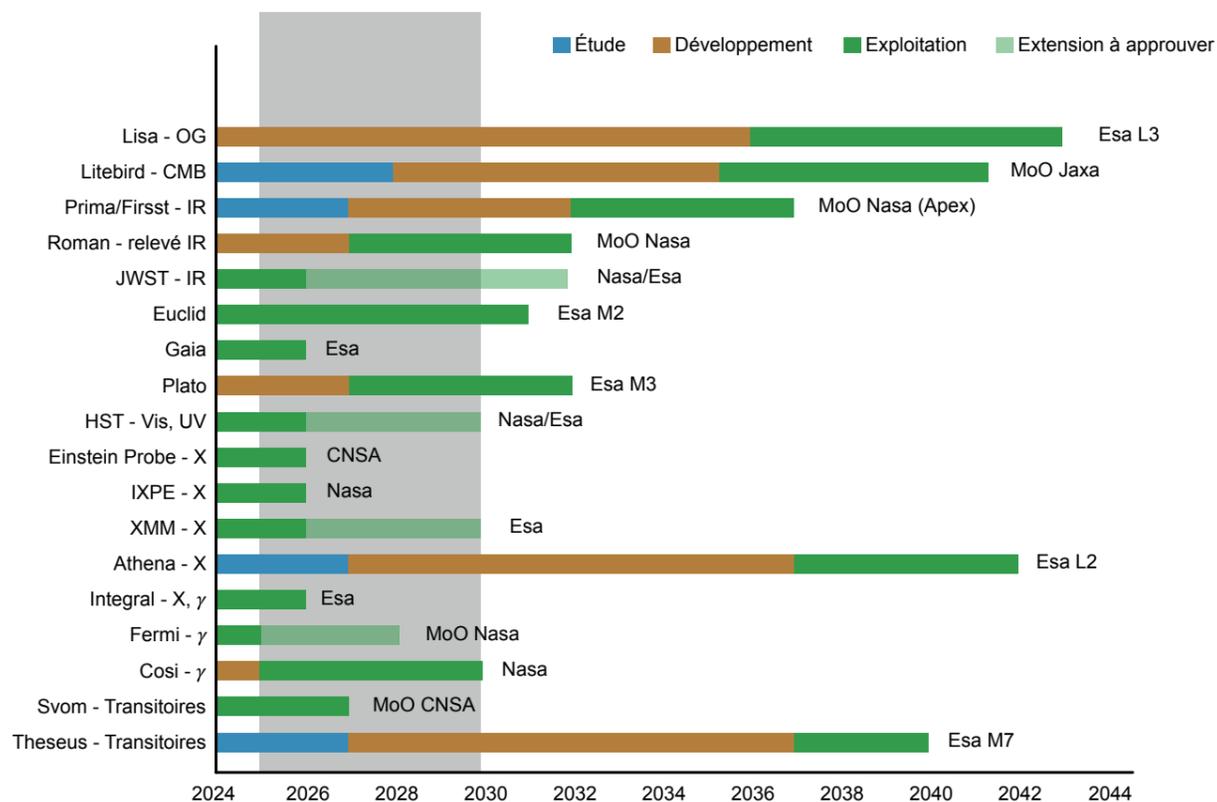
La nature de la matière noire et celle de l'énergie noire sont des questions ouvertes à l'interface avec la physique fondamentale. L'astrophysique s'attache à en mesurer les effets sur l'évolution et la structuration de l'Univers pour en comprendre les propriétés et contraindre leurs natures. De nombreuses questions portent également sur **l'origine et l'évolution primordiale de l'Univers** : quelles sont les conditions prévalant après l'inflation cosmique, comment les premières perturbations de matière issues de l'inflation ont-elles donné naissance à la toile cosmique, aux premières galaxies, aux premiers trous noirs ?

- **L'évolution et la structuration de la matière**

Les baryons dans l'Univers traversent des phases très différentes, sur des échelles très différentes, des filaments cosmiques aux trous noirs en passant par le milieu interstellaire et les étoiles. Les mécanismes d'échange de matière et d'énergie entre les différentes échelles et phases des milieux posent encore de nombreuses questions : comment le gaz est-il accrété et transformé à l'échelle des amas de galaxies, des galaxies et de leurs trous noirs centraux ? Comment les trous noirs centraux et les étoiles rétroagissent à leur tour sur le milieu intergalactique ?

Dans les galaxies, des étoiles se forment et meurent enrichissant le milieu interstellaire (MIS) en éléments lourds et y injectant de l'énergie. De nombreuses questions concernent la formation des étoiles et des planètes, la physique des intérieurs stellaires, et la rétroaction des étoiles sur le milieu interstellaire. Enfin, les étoiles massives explosent à la fin de leur vie, laissant derrière une étoile à neutrons ou un trou noir. Si ces objets compacts se trouvent dans un système binaire, ils finissent éventuellement par fusionner, générant des ondes gravitationnelles (OG) et éventuellement un sursaut gamma. Plusieurs questions restent sans réponse sur la physique et les effets de ces phénomènes transitoires et violents.

# 1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019



**Figure 1 : Missions avec participation du Cnes dans la thématique astronomie et astrophysique.** La bande grise correspond à la période couverte par cette prospective.

La Figure 1 rassemble les missions avec participation du Cnes dans la thématique astronomie et astrophysique. Un grand nombre de missions en exploitation a permis à la communauté française d'obtenir de nombreux résultats scientifiques ces derniers 5 ans. Ces résultats sont décrits dans la section en dessous.

## 1.1 QUELQUES RÉSULTATS SCIENTIFIQUES MARQUANTS

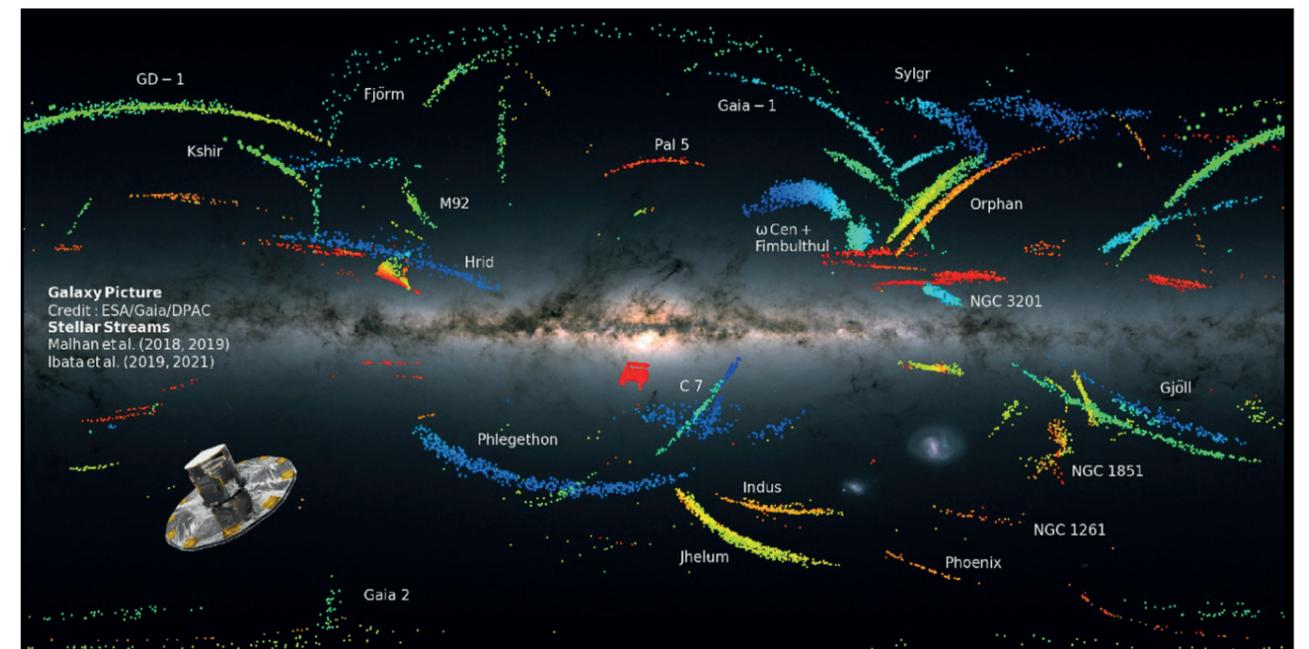
Seuls sont résumés ici des résultats impliquant des missions spatiales à forte implication française, une liste exhaustive de l'ensemble des avancées dans la discipline dépasse le cadre de ce document.

### 1.1.1 POURSUITE DES OBSERVATIONS ET TROISIÈME CATALOGUE GAIA

La mission **Gaia**, lancée en 2013, continue de cartographier la Galaxie et ses environs. Les derniers catalogues EDR3 (décembre 2020) et DR3 (juin 2022) contiennent l'astrométrie et la distance parallaxique pour 1,8 milliards d'étoiles, et une détermination de leur mouvement propre, vitesse radiale,

et paramètres astrophysiques (température, rayon, métallicité) pour des millions d'entre elles. Le catalogue recense également 6,6 millions de candidats quasars, les positions et orbites de 160 000 objets du système solaire, et bien d'autres données. Les données de **Gaia** ont déjà apporté une révolution dans plusieurs domaines de l'astrophysique. Plus de 10 000 articles utilisant les données de **Gaia** ont été publiés depuis son lancement, un record pour une mission spatiale.

Les résultats scientifiques obtenus à partir des données **Gaia** concernent presque tous les domaines de l'astrophysique, et sont trop nombreux et variés pour être repris en détail. Nous présentons dans ce rapport quelques aspects particulièrement marquants.



**Figure 2. Courants stellaires identifiés grâce à Gaia.** Les galaxies grossissent par accréation de plus petites galaxies. L'image est celle de notre galaxie, la Voie Lactée, et les courants stellaires montrés en couleurs sont les traces laissées par les trajectoires des petites galaxies arrivées sur le disque de la Voie Lactée. L'identification de ces courants a pu s'effectuer grâce à l'extrême précision des mesures de vitesse et de position de GAIA. Des équipes françaises ont été impliquées dans la découverte d'une partie de ces courants.

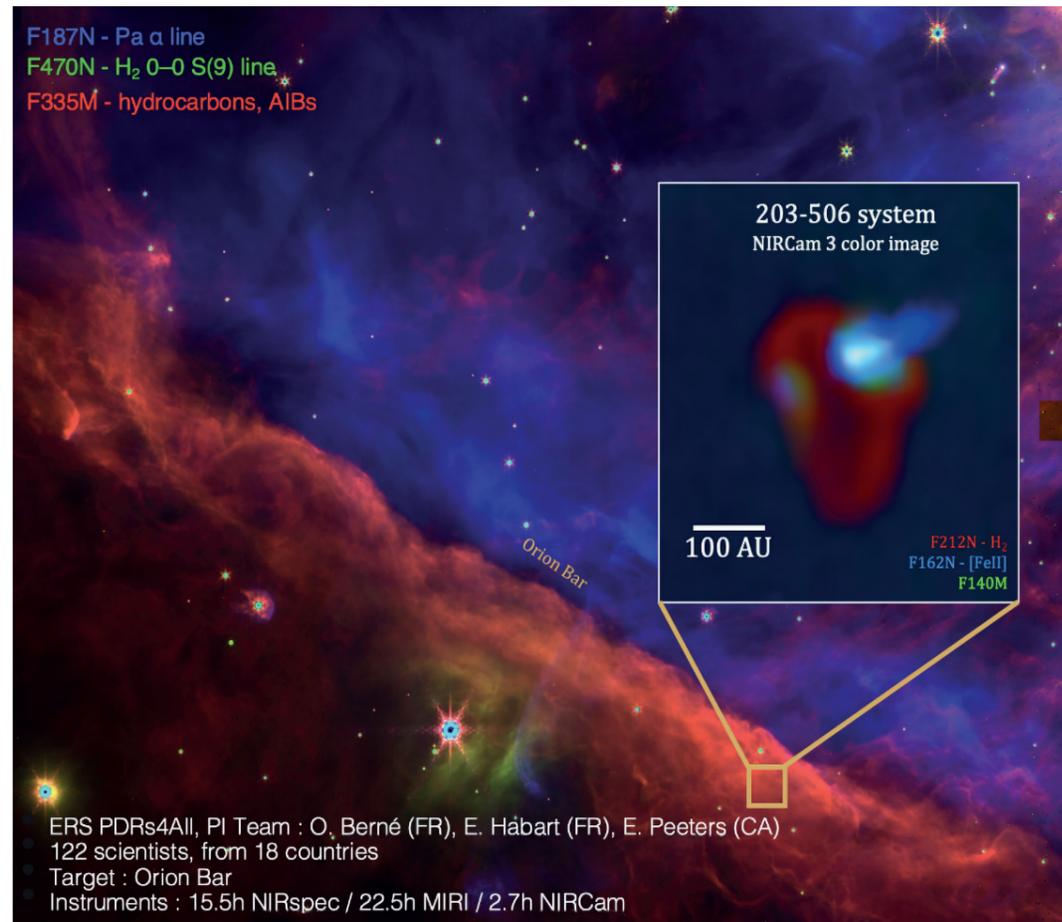
**Gaia** a révolutionné la connaissance de notre Galaxie et « l'archéologie Galactique » est devenue une discipline à part entière. Ce sont maintenant 10 milliards d'années de son histoire mouvementée et de sa transformation, par accrétions successives et collisions avec d'autres galaxies, qui sont retracées en particulier à partir des positions et des mouvements des amas globulaires, des courants stellaires et des satellites et de l'identification, parmi eux, des vestiges de ces fusions (Figure 2).

La DR3 a fourni des contraintes de plus en plus précises sur les distances et les mouvements 3D des étoiles distantes, et donc sur la courbe de rotation et le potentiel gravitationnel qu'on peut en déduire. Certains travaux conduits par des équipes françaises impliquent une révision à la baisse de la quantité de matière sombre à moins de 25 kpc du centre de la Galaxie. Ce résultat est en tension avec d'autres mesures utilisant les amas d'étoiles. Les débats et les études se poursuivent sur ce sujet.

Les mesures de Gaia sur les étoiles (position, distance, mouvement, abondances élémentaires) permettent d'en faire une classification précise, avec la détermination de leur luminosité intrinsèque, et la construction de cartographies tri-dimensionnelles des différents types stellaires, ainsi que de l'extinction par le milieu interstellaire sur leur ligne de visée. De nombreuses retombées pour toute la

communauté scientifique découlent de ces mesures : milieu interstellaire, évolution galactique, petits corps du système solaire, etc.

## 1.1.2 LE JWST A DÉJÀ PERMIS DES RÉSULTATS REMARQUABLES



**Figure 3. Image JWST NIRCcam de la barre de la nébuleuse d'Orion en trois couleurs.** Rouge, vert, et bleu révèlent respectivement les hydrocarbures polyaromatiques, le gaz moléculaire et le gaz ionisé. La barre, un mur de gaz dense et de poussières, et la surface du nuage moléculaire d'Orion 1 en arrière-plan sont éclairés par un groupe de jeunes étoiles massives et chaudes, le Trapèze, situé en haut à droite hors de l'image. Zoom sur un disque protoplanétaire présentant un puissant flot de photoévaporation, induit par le rayonnement FUV du Trapèze. Voir Berné, O., Martin-Drumel, MA., Schroetter, I. et al. Nature 621, 56–59 (2023) ; Habart, E., Peeters, E., Berné, O., et al. 2024, Astronomy & Astrophysics, 685, A73. (2024).

Très vite après sa mise en service, le **JWST** (James Webb Space Telescope) a commencé à produire de nombreux résultats.

Les équipes françaises en particulier, très impliquées dans les observations du milieu interstellaire et des disques protostellaires et protoplanétaires, ont mené ou participé à des découvertes à fort impact sur la formation stellaire et sur la chimie menant à la formation de matière organique complexe. Un exemple est la détection du cation CH<sub>3</sub><sup>+</sup> avec Miri-MRS à la surface d'un disque protoplanétaire autour d'une étoile jeune. Cette espèce, pierre angulaire de la chimie du carbone interstellaire, très réactive, peut déclencher dans les régions irradiées en UV la formation de molécules beaucoup plus complexes à base de carbone.

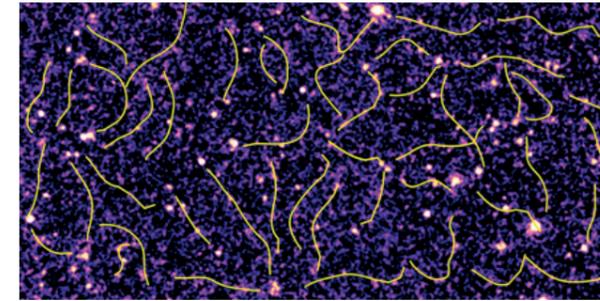
L'observation spectroscopique détaillée de nuages

denses permet de suivre l'évolution temporelle des grains. Elle a montré que l'accroissement en taille des grains se produit avant la phase proto-stellaire, ce qui va affecter la compréhension des processus les mettant en jeu : extinction, pénétration des champs de radiation, chimie de surface.

Le **JWST**, idéalement adapté à l'observation de l'Univers lointain, a déjà fourni de nombreuses observations de galaxies à très grand décalage spectral. Leur détection et le suivi spectroscopique de ces galaxies âgées de 500 millions à un milliard d'années révèlent leurs propriétés en termes de nombre, masse, luminosité et métallicité et nécessitent de nouveaux modèles détaillés de la réionisation.

## 1.1.3 AUTRES RÉSULTATS SPATIAUX NOTABLES

De nombreux résultats ont été obtenus avec une participation française à l'exploitation scientifique d'observatoires spatiaux. Nous en citons quelques-uns, particulièrement marquants.



**Figure 4.** Emission thermique en rayons X du gaz chaud intergalactique des filaments (montrés en jaune) de la toile cosmique observée par l'instrument eROSITA de la mission russo-allemande SRG.

Le satellite **XMM-Newton** est encore en exploitation avec toujours un fort engagement de la communauté scientifique française. Le projet CHEX-MATE, notamment, a pu obtenir une vue précise des propriétés statistiques de la population locale d'amas de galaxies et dans le régime des masses élevées, dévoiler l'origine du chauffage non-gravitationnel, mesurer comment leur gaz est façonné par l'effondrement dans le halo de matière noire et les fusions qui ont construit les amas d'aujourd'hui, résoudre les incertitudes principales dans les déterminations de la masse qui limitent les conclusions cosmologiques et construire les fondations de la science des amas pour les relevés de prochaines générations. L'exploitation des observations **XMM-Newton**, soutenue par le CNES, a donné lieu à de nombreuses publications.

Des observations avec **IXPE** (*Imaging X-ray Polarimetry Explorer*) de la Nasa ont révélé un écho en rayons X émis par le trou noir central (Sgr A\*) de la Galaxie il y a 200 ans. L'écho observé requiert une intensité de l'émission X d'origine d'un million de fois celle de Sgr A\* aujourd'hui, et explique pourquoi la luminosité des nuages moléculaires entourant Sgr A\* est plus intense que la normale. Ces observations aident à comprendre ce qui fait passer un trou noir à l'état actif.

Les résultats finaux de **Planck** ont été dévoilés en 2020. Ces résultats ont confirmé le modèle cosmologique actuel et raffiné ses paramètres. L'exploitation des données de **Planck** se poursuit, avec de nombreux nouveaux résultats dont la détection du

gaz chaud intergalactique dans les filaments de la toile cosmique. Cette détection a été confirmée avec les données d'archives **ROSAT** et celles de l'instrument X **eROSITA** sur la mission russo-allemande **SRG** (Spectrum-Roentgen-Gamma). Ce signal, associé à l'émission thermique du gaz chaud intergalactique de 460 filaments de la toile cosmique, est montré en Figure 4. Le premier relevé de 140 deg<sup>2</sup> de **eROSITA** a été publié.

## 1.2 BILAN PROGRAMMATIQUE

### 1.2.1 AVANÇÉES PROGRAMMATIQUES

Le **JWST** (*James Webb Space Telescope*), observatoire spatial Nasa avec contribution Esa, dédié à l'astronomie dans l'infrarouge proche (NIR) et moyen (MIR), a été lancé le 25 décembre 2021 et placé au point de Lagrange L2. Les performances de ce télescope révolutionnaire et de ses instruments, dont le spectro-imageur Miri, sont excellentes. L'instrument Miri est sous la responsabilité de l'Esa et à très forte participation du Cnes et des laboratoires français,

**Euclid** est la mission M2 de l'Esa dédiée à l'étude de la matière noire et de l'énergie noire, par effet de lentille gravitationnelle et à partir de la distribution tridimensionnelle des galaxies. **Euclid** utilise un télescope grand angle et deux instruments : une caméra dans le visible (VIS), pour mesurer la déformation des galaxies, et une caméra/spectromètre dans le NIR (NISIP), pour mesurer leurs décalages spectraux photométriques et spectroscopiques, et ainsi déterminer les distances à ces galaxies. **Euclid** a été lancé le 1<sup>er</sup> juillet 2023 et placé au point de Lagrange L2. Les performances du télescope et des instruments se sont révélées excellentes. La qualité des premières images publiées en novembre 2023 démontre clairement tout le potentiel d'**Euclid** et les premiers résultats ont été publiés en mai 2024. La mission franco-chinoise **Svom** (*Space Variable Objects Monitor*) a été lancée le 22 juin 2024. La mission **Lisa** (*Laser Interferometer Space Antenna*) de l'ESA, (avec une contribution importante de la NASA), dédiée à la détection des ondes gravitationnelles à basse fréquence, a été adoptée début 2024. Elle est au cœur des thématiques Physique Fondamentale et Astrophysique.

### 1.2.2 BILAN DES PRIORITÉS DU PRÉCÉDENT SÉMINAIRE

Le bilan programmatique des priorités du précé-

dent séminaire est décevant, car aucune des deux priorités majeures de la thématique Astronomie et Astrophysique n'a pu être adoptée ou présélectionnée par l'Esa.

Le groupe regrette que l'adoption de la mission **Athena** (*Advanced Telescope for High Energy Astrophysics*), priorité programmatique majeure des deux précédents séminaires de prospective, ait subi un retard lié à un surcoût pour l'Esa. Il se réjouit que la mission consolidée soit maintenant en bonne voie pour une adoption en 2027.

Le groupe déplore que la mission **Spica** (*Space Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics*), autre priorité programmatique majeure, ait été

## 2. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

### 2.1 THÉMATIQUES SCIENTIFIQUES ET MOYENS D'OBSERVATION

L'extraordinaire diversité de champs d'étude de la thématique astronomie et astrophysique demande une complémentarité des moyens d'observation pour répondre aux grandes questions de la discipline. Un seul domaine, ou une seule méthode d'observation, ne suffisent pas pour capturer toute la diversité et la richesse de la physique de cette thématique. Au-delà du rayonnement électromagnétique (EM, observé en photométrie, spectroscopie, polarimétrie, imagerie), d'autres messagers comme les neutrinos, les rayons cosmiques et les ondes gravitationnelles peuvent être observés actuellement.

L'accès à l'espace est essentiel pour beaucoup de méthodes d'observation. En effet, l'atmosphère terrestre est transparente au rayonnement EM visible, ainsi qu'aux fréquences entre environ 10 MHz et 1 THz (radio et millimétrique) ; les autres fréquences sont fortement ou totalement absorbées. Leur observation se fait nécessairement depuis l'espace. D'autre part, la turbulence de l'atmosphère induit des distorsions des images astronomiques, ainsi que de la scintillation. Des mesures astrométriques ou photométriques de précision ne peuvent donc se faire que depuis l'espace, même à des longueurs d'onde où l'atmosphère est transparente.

Les sections suivantes décrivent les questions scientifiques prioritaires identifiées par le groupe, ainsi que les moyens d'observation depuis l'espace jugés essentiels pour avancer dans leur compréhension. Un tableau récapitulatif reliant les objectifs scienti-

brutalement arrêtée en cours de phase d'étude compétitive par l'ESA.

Parmi les priorités substantielles, la mission dédiée au fond diffus cosmologique **Litebird** est toujours en phase d'étude et de redéfinition. Dans le domaine des phénomènes transitoires, la mission **The-seus** (*Transient High Energy Sky and Early Universe Surveyor*), non sélectionnée en M5, est passée en phase A compétitive pour la mission M7 de l'ESA.

Les missions UV **Arago** et gamma **Astrogam**, priorités modérées du précédent séminaire, n'ont pas été sélectionnées par l'Esa ni en M5 ni en M7.

fiques aux moyens d'observation se trouve à la fin de la section 3.

#### 2.1.1 ORIGINE ET ÉVOLUTION PRIMORDIALE DE L'UNIVERS

Selon le modèle cosmologique du Big Bang chaud, la phase d'inflation primordiale a propagé les fluctuations de densité initiales jusqu'aux échelles cosmologiques. Ces fluctuations sont à l'origine des structures actuelles de la matière dans l'Univers : filaments de la toile cosmique, amas de galaxies et galaxies. La théorie de l'inflation prédit l'existence d'un fond stochastique d'ondes gravitationnelles qui a laissé une empreinte sur la polarisation du fond diffus cosmologique (CMB, Cosmic Microwave Background), inaccessible depuis le sol : les modes-B. La polarisation du CMB permet donc de sonder les ondes gravitationnelles primordiales et en conséquence de contraindre la physique de l'inflation.

Les autres modes de polarisation du CMB (modes-E) portent aussi de l'information : elles permettent de mesurer l'âge de l'Univers à l'époque de la réionisation, quand les premières étoiles se sont formées.

**Litebird** est la seule mission en étude dédiée à la polarisation du CMB. 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 de très haute énergie et à la physique de l'inflation. Le groupe soutient fortement une contribution française majeure à cette mission.

Les écarts du CMB au spectre de corps noir, appelés distorsions spectrales, sont le résultat de processus qui perturbent l'équilibre thermique entre la ma-

tière et le rayonnement. Ces distorsions spectrales fournissent donc des informations sur l'évolution thermique de l'univers depuis le Big Bang. Cependant, à la suite de la non-sélection M7 de **Fossil** (*FTS for CMB Spectral Distortion Exploration*), il n'y a plus de mission dédiée à cette thématique dans le paysage programmatique. Le groupe soutient la continuation du support du Cnes aux activités tournées vers la spectrométrie du ciel submillimétrique pour la mesure des distorsions spectrales du CMB, notamment à travers le démonstrateur ballon **Bisou**.

#### 2.1.2 STRUCTURE ET ÉVOLUTION DE LA MATIÈRE

De nombreuses questions se posent sur la formation et l'évolution des systèmes, de l'échelle des filaments cosmiques aux étoiles, et sur le cycle des baryons dans les galaxies. Pour y répondre, il est nécessaire d'observer la composante baryonique de l'Univers dans toutes ses phases et toutes les échelles, car elles sont physiquement reliées.

La matière du milieu interstellaire (MIS) a longtemps été décrite comme appartenant à différentes phases bien définies : un milieu très chaud ( $T \sim 10^6$  K) et ionisé, émettant en rayons X mous, des milieux chauds ( $6000 - 10^4$  K) diffus neutres ou ionisés, et un milieu froid ( $10 - 200$  K) et dense, atomique ou moléculaire, dont les nuages de formation stellaire occupent seulement une petite fraction du volume. Bien que ces différentes phases soient souvent supposées en équilibre hydrostatique global, l'aspect multi-phase du MIS appelle de plus en plus des conditions hors-équilibre et l'aspect dynamique du MIS ne peut être ignoré. Les relations entre les différentes phases, leurs interfaces, la façon dont la matière circule d'une phase à l'autre (en particulier de H à H<sub>2</sub> qui est la première étape vers la formation stellaire), le rôle de la turbulence et du champ magnétique, sont des questions ouvertes pour comprendre le cycle de la matière dans notre galaxie. Il est nécessaire d'élargir cette connaissance aux galaxies externes avec le même niveau de détail, en particulier dans les galaxies pauvres en métaux, où la composition chimique, les conditions physiques et la topologie changent considérablement, avec des conséquences significatives sur l'évolution galactique.

Entre gaz intra-amas, intergalactique, et circumgalactique, le gaz chaud comprend au moins la moitié des baryons. Ce gaz chaud se situe également dans les restes de supernova, autour des étoiles (vent), et

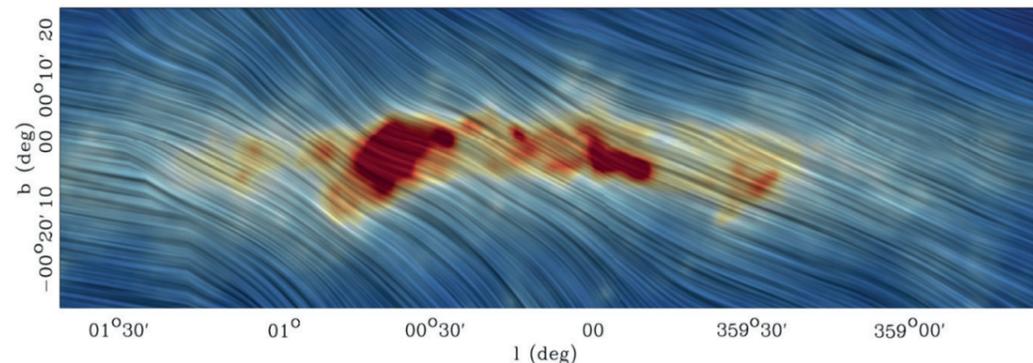
dans les couronnes stellaires.

Les rayons X, inobservables depuis le sol, offrent un accès unique à l'Univers chaud et tracent des phénomènes gravitationnels intenses, telle l'accrétion par les trous noirs supermassifs au centre des galaxies actives. L'énergie libérée par ce processus est évacuée sous forme de rayonnement X et en énergie mécanique sous forme de jets ou vents. La rétroaction des trous noirs supermassifs affecte à son tour le gaz chaud galactique et circumgalactique et façonne l'évolution des galaxies hôtes. Plusieurs questions restent ouvertes : Comment le gaz chaud se structure dans les filaments cosmiques ? Comment coévoluent les galaxies et leurs trous noirs supermassifs ? Comment les trous noirs supermassifs accrètent de la matière et lancent des jets ?

La mission **NewAthena** est un observatoire dédié à l'exploration de l'Univers en imagerie et spectroscopie X pour répondre à ces grandes questions. La **spectroscopie haute résolution en rayons X, spatialement résolue, de l'instrument X-IFU** est un nouveau moyen d'observation emblématique pour étudier la physique de l'Univers chaud et énergétique. Ce thème est identifié comme prioritaire depuis plusieurs exercices de prospective. Dans cette perspective, le groupe renouvelle son fort soutien à la mission **NewAthena**.

La composante baryonique froide et dense, atomique ou moléculaire, est à l'origine de la formation des étoiles et des planètes dans les galaxies. Les observations de cette composante permettent d'étudier l'origine et l'évolution des galaxies, des éléments lourds et de la poussière ainsi que la formation stellaire dans la Voie Lactée et les galaxies proches et de caractériser les signatures chimiques de la genèse des systèmes planétaires.

Beaucoup de raies et de bandes moléculaires se trouvent dans **l'infrarouge lointain (FIR)**, non couvert par le **JWST**, qui observe dans l'infrarouge proche et moyen, ni par aucun autre observatoire. La **spectroscopie** dans cette bande fournit des informations essentielles sur les processus physiques et chimiques en jeu. Comme illustré dans la Figure 5, la **polarimétrie** donne accès au champ magnétique qui joue un rôle essentiel dans la structuration de la matière. La mesure du degré de polarisation apporte de nouvelles contraintes aux modèles de poussières.



**Figure 5. Cartographie de la région du centre galactique avec le ballon PILOT**, montrant les lignes de champ magnétique déduites à partir des données de polarisation.

Des avancées technologiques (cryogénie, détecteurs) rendent possible un gain de deux ordres de grandeur en sensibilité par rapport aux décennies précédentes. Le *Decadal Survey 2020 in Astronomy and Astrophysics* américain a reconnu l'importance de cette fenêtre de longueur d'onde (ainsi que celle des rayons X), et la Nasa a ouvert un appel Nasa APEX 2023 pour une mission de classe Probe dans le domaine FIR ou en rayons X.

La mission **Spica** avec la Jaxa ayant été arrêtée, car jugée trop chère et complexe pour le cadre M5 Esa, la communauté française s'est impliquée dans les réponses à cet appel Nasa sur deux projets particulièrement intéressants dans le FIR : **Prima** (*Probe far-Infrared Mission for Astrophysics*) et **Firsst** (*Far-IR Spectroscopy Space Telescope*). Le groupe apporte un fort soutien à la participation française à ces missions d'opportunité.

La perte de masse des étoiles chaudes ou évoluées impacte fortement leur évolution ainsi que le MIS. Les mécanismes associés sont encore largement débattus, mais le rôle du champ magnétique est reconnu : il confine les vents stellaires magnétisés et rétroagit sur l'étoile, notamment en freinant sa rotation.

La **spectropolarimétrie dans l'UV** permet de détecter et de caractériser les champs magnétiques et les environnements locaux des objets astrophysiques. D'autres questions pertinentes concernent les interactions entre les étoiles et leurs planètes. Un instrument de spectroscopie avec haute résolution spectrale couvrant tout le domaine UV est aussi essentiel pour l'étude du MIS dans toutes ses phases. Dans l'UV lointain, un grand nombre de transitions en absorption dans le spectre d'étoiles chaudes ou de quasars éclairent la composition, la dynamique et les propriétés physiques de toutes

les phases du MIS. Un instrument dédié à la spectropolarimétrie dans l'UV n'a jamais existé.

On rappelle que la spectropolarimétrie est une spécialité française, avec des instruments en activité au sol tels que ESPaDOnS et SPIRou au CFHT et NARVAL au Télescope Bernard Lyot. La communauté française est impliquée dans le projet **Pollux**, un spectropolarimètre UV-Visible à haute résolution pour **HWO** (*Habitable Worlds Observatory*), mission flagship de la Nasa. **HWO** est un observatoire généraliste UV-visible-NIR dont le lancement est prévu pour la décennie 2040. Le groupe soutient la poursuite des efforts engagés par le Cnes pour les Phases 0 et A d'**Arango**, notamment à travers le démonstrateur nanosatellite **Casstor**, dans le but de développer l'instrument **Pollux**.

Enfin, l'observation de systèmes de petite dimension angulaire ou haut contraste (permettant l'étude d'objets à faible luminosité proches d'objets brillants) a un intérêt évident pour la communauté astronomie et astrophysique : les régions des disques protoplanétaires proches de l'étoile, les étoiles évoluées et leurs éjections de matière, et les régions centrales des noyaux actifs de galaxies, où résident des trous noirs supermassifs.

Ces observations peuvent se faire depuis le sol en utilisant l'interférométrie à grande ligne de base. Depuis l'espace, l'interférométrie dans l'IR (inaccessible depuis le sol) et/ou l'imagerie haut contraste dans le visible avec l'utilisation d'un coronographe ont été étudiées pendant la décennie 2000.

Deux projets ambitieux sont actuellement en étude : le projet européen **LIFE** (Large Interferometer For Exoplanets), un interféromètre IR, et l'instrument HCI (High-Contrast Imaging) proposé pour **HWO**. Bien que ces projets soient à long terme, il est essentiel d'impliquer et d'organiser la com-

munauté scientifique compétente autour de ces projets. Le groupe soutient cette implication de la communauté dès maintenant.

### 2.1.3 LES PHÉNOMÈNES ÉNERGÉTIQUES ET/OU TRANSITOIRES

Les sursauts gamma apparaissent dans tout le ciel de façon imprévisible. On pense que les sursauts gamma courts sont le résultat de la fusion d'étoiles à neutrons (kilonova) et les sursauts gamma longs sont associés à l'effondrement du cœur des étoiles très massives. Plusieurs questions restent cependant ouvertes : comment explosent les supernovæ ? Quels sont leurs progéniteurs ? Quel est le rôle des kilonovæ dans l'origine des éléments ?

À cause de leur grande luminosité, les sursauts gamma peuvent être détectés à des très grandes distances et servir alors de sondes de l'époque de réionisation, contribuant à élucider comment et quand se sont formés les premiers objets : étoiles, trous noirs, galaxies.

Une surveillance en X très grand champ permet de détecter le plus tôt possible et le plus grand nombre possible de contreparties de sursauts gamma. La spectroscopie rapide dans le NIR permet de déterminer la position et le décalage spectral de la galaxie hôte. Le groupe soutient la mission **The-seus**, en phase A compétitive pour une mission M7 de l'Esa, et rappelle que c'est la seule mission de cette thématique encore candidate en M7. L'astronomie multi-messagers sera en plein essor pendant la décennie de 2030 grâce à la 3<sup>ème</sup> génération de détecteurs d'ondes gravitationnelles et de neutrinos.

La localisation rapide des contreparties EM des sources d'OG nécessite une autre stratégie d'observation, comme celle proposée par le projet **ComCube**. Ce projet est une constellation de nanosatellites pour la polarimétrie à haute précision des sursauts gamma et la localisation très rapide des sources pour le suivi multi-longueurs d'onde et multi-messagers. D'autres projets d'essaims de microsatellites, tel que la mission Chinoise **Catch**, peuvent constituer de bonnes opportunités.

Enfin, l'origine du rayonnement cosmique, les mécanismes d'accélération de particules, la nature des particules accélérées et leur impact sur l'environnement sont des questions clés en astrophysique. Le rayonnement cosmique excite les noyaux atomiques du milieu interstellaire, donnant lieu à des raies gamma dans le domaine du MeV. L'observation des raies permet l'étude de la composante

basse énergie du rayonnement cosmique qui joue un rôle important pour la chimie du milieu interstellaire. Des raies gamma sont également produites lors des décroissances d'isotopes radioactifs, et leur observation permet d'étudier les mécanismes d'explosion des supernovæ, la nature de leurs progéniteurs et d'éclaircir le rôle des supernovæ et des kilonovæ dans la synthèse des éléments. Notons également les signatures de l'annihilation électrons-positrons, qui se manifestent uniquement dans le domaine du MeV, et dont l'origine reste toujours inexpiquée.

Tandis que des observations à haute énergie ont amélioré notre compréhension de l'Univers non-thermique et des raies gamma nucléaires, l'annihilation électrons-positrons ainsi que le rayonnement cosmique de basse énergie sont seulement observables dans le domaine du MeV. À la suite de la non-sélection d'**Astrogam** en M5 et M7, il n'y a pas de mission dédiée à ce domaine prévue en Europe. Du côté de la Nasa, la mission **Cosi** (Compton Spectrometer and Imager) a été sélectionnée en 2021. Des équipes françaises sont engagées scientifiquement dans cette mission, et le groupe soutient cette implication. Les questions qui peuvent être élucidées dans cette gamme d'énergie concernent les mécanismes d'explosion des supernovæ et la nature de leurs progéniteurs. L'observation de raies correspondant à la désintégration d'éléments radioactifs permet d'éclaircir le rôle des supernovæ et des kilonovæ dans la synthèse des éléments. Le rayonnement cosmique de basse énergie, essentiel pour la chimie du milieu interstellaire mais qui échappe pour le moment aux observations à cause de la modulation solaire, peut être étudié au travers de raies d'excitation caractéristiques. Les observations au MeV permettent également de révéler les contreparties électromagnétiques des événements d'ondes gravitationnelles.

## 2.2 RECHERCHE ET TECHNOLOGIE

Pour la mesure de la polarisation et des distorsions spectrales du CMB, ainsi que pour la spectroscopie X spatialement résolue (Athena/X-IFU) et le FIR, les efforts se concentrent sur la détection basse température très sensible ainsi que sur les chaînes cryogéniques actives et passives atteignant 100 à 50 mK dans l'espace. L'accroissement de la sensibilité avec un budget de masse limité doit passer par l'intégration des fonctionnalités de polarisation et de spectroscopie basse résolution directement dans

les détecteurs. Enfin, dans le cas de la spectropolarimétrie UV (préparation de l'instrument Pollux), les défis techniques incluent les matériaux et revêtements, ainsi que les techniques d'adhérence moléculaire des composants des modulateurs, l'efficacité des revêtements UV, les lames dichroïques, la performance des détecteurs CMOS dans l'UV, et l'efficacité des réseaux et des cross-disperseurs.

La validation de ces concepts se fait souvent à travers des démonstrateurs ballon et nanosatellites. Des exemples sont le ballon **Bisou** pour les distorsions spectrales et le nanosatellite **Casstor** pour la spectropolarimétrie UV. Mais les ballons et les nanosatellites peuvent jouer un rôle au-delà de démonstrateur. Si la limitation en taille et poids peut être restrictive pour la plupart des sujets scientifiques, les nanosatellites peuvent être pertinents pour des niches spécifiques : c'est le cas du suivi multi-longueurs d'onde de phénomènes transitoires. Le groupe soutient la continuation des efforts sur toutes les techniques qui permettent d'utiliser les nanosatellites pour l'astrophysique multi-messagers : pointage de précision, chaînes de détection basse consommation pour le MeV, polarimètre-imageur gamma, vol en formation pour les essais.

Le groupe note un intérêt croissant dans la communauté pour l'utilisation de la Lune comme base d'observation. Des projets incluent un télescope de grand diamètre posé à l'intérieur d'un cratère situé dans les zones polaires pour l'observation dans l'IR et un observatoire lunaire d'ondes gravitationnelles.

### 2.3 DONNÉES, MOYENS AU SOL ET ACCOMPAGNEMENT SCIENTIFIQUE

Le retour scientifique d'**Euclid** dépend crucialement d'observations au sol. Dans ce cas, le but est de déterminer les décalages spectraux photométriques des galaxies avec une précision impossible à obtenir avec les bandes d'observation d'**Euclid**. Si les observations au sol pour les données de la DR1 (correspondant à l'hémisphère nord) sont déjà assurées par le consortium Unions, ce n'est pas le cas pour le relevé de l'hémisphère sud. Un Memorandum of Understanding (MoU) a été signé récemment avec le consortium Rubin-LSST, mais la stratégie d'observation n'est pas encore établie. L'analyse multi-longueurs d'onde, voire multi-messagers, est essentielle pour beaucoup de questions

scientifiques et particulièrement dans le cas des phénomènes transitoires. L'espace peut donner accès à une couverture multi-longueur d'onde et de tout le ciel, et l'observation au sol offre la possibilité d'utiliser de l'instrumentation plus lourde. Le suivi rapide au sol des sursauts gamma détectés depuis l'espace permet notamment de localiser la rémanence à plus basse énergie, observer rapidement la courbe de lumière et déterminer le décalage spectral. Les observations au sol sont donc essentielles à la réalisation des objectifs scientifiques, et demandent une couverture temporelle (donc géographique) complète.

Cette couverture au sol est difficile à mettre en œuvre. Dans le cas de **Svom**, l'achat de temps d'observation, ou la réponse à des appels d'offres ouverts pour accéder aux télescopes au sol, sont des possibilités qui ont été considérées pour assurer le suivi, mais elles ne sont pas optimales. Le groupe recommande l'utilisation d'un réseau dédié de télescopes optiques au sol pour le suivi des transitoires observés par **Svom** et des futures missions dans le domaine, comme le télescope franco-mexicain Colibri.

Le groupe rappelle l'importance de mettre en place un suivi au sol bien en amont du lancement d'une mission pour assurer le retour scientifique, surtout dans les cas où les observations au sol sont essentielles pour les objectifs scientifiques de la mission spatiale.

Les mesures observationnelles, seules, ne permettent pas toujours d'accéder directement aux quantités physiques d'intérêt. En effet, le lien entre mesure et grandeur physique est très souvent indirect en astrophysique. Ce lien se fait fréquemment à travers des modèles ou des simulations numériques parfois lourdes. Par exemple, la détermination de l'âge des étoiles observées par **Plato** à travers l'astérosismologie dépend crucialement de modèles stellaires. Cette détermination d'âge est aussi juste que le sont les modèles stellaires sous-jacents. Il est donc indispensable de prendre en compte les besoins de simulations dans la préparation des missions.

Le volume et la complexité des données attendues des missions en exploitation et en développement demandent des techniques d'analyse sophistiquées et innovantes, avec une utilisation de plus en plus courante de l'apprentissage automatique et de l'intelligence artificielle. Le soutien financier du Cnes à l'exploitation des données des missions

spatiales est impératif pour garantir et valoriser un retour scientifique conséquent.

Le groupe rappelle l'importance de la documentation, pérennisation et libre accès aux données issues des missions spatiales. Le niveau d'exploitation des données utilisables existantes doit également être pris en compte dans le contexte d'engagement d'une nouvelle mission. Étant donné le fort

## 3. CONCLUSIONS

Les données spatiales ont permis des avancées remarquables dans tous les domaines de l'astrophysique. Grâce à l'accompagnement scientifique du CNES, la communauté bénéficiera de l'exploitation des missions **XMM-Newton, Fermi, Gaia, JWST, Euclid** et de celles à venir, **Svom et Plato**.

A part **Lisa**, aucune mission de la thématique astronomie et astrophysique n'a été adoptée depuis **Plato** (2017), ou sélectionnée depuis **Athena** (2014), par l'Esa.

Du fait de cette situation programmatique particulièrement défavorable, de nombreux objectifs

impact environnemental des missions spatiales, il convient de s'assurer que les données d'archive soient faciles d'accès pour le plus grand nombre de membres de la communauté, et que leur exploitation scientifique au long cours bénéficie de financements dédiés, bien au-delà de la durée de vie nominale des missions.

scientifiques majeurs de la précédente prospective restent fortement d'actualité et à soutenir, dont certains prioritaires depuis plusieurs exercices de prospective.

Les moyens d'observation considérés comme prioritaires par la communauté pour y répondre n'ont pas évolué de façon significative depuis le dernier séminaire de prospective.

Le tableau suivant reprend les priorités de missions et indique le cadre principal de réalisation envisagé.

Objectifs scientifiques	Observations ou mesures	Cadre de réalisation, phase et niveau de priorité
Structuration du gaz chaud dans les filaments cosmiques. Coévolution des galaxies et leurs trous noirs supermassifs. Physique de l'accrétion dans les trous noirs supermassifs.	Spectroscopie X haute résolution spatialement résolue	Mission NewAthena, L2 ESA – phase A <b>Majeure</b>
Formation des structures en IR et rôle du champ magnétique. Milieu interstellaire galactique et extragalactique.	Spectroscopie et polarimétrie du MIR au FIR	MoO APEX NASA, future L ESA <b>Majeure</b>
Formation des premières structures. Nature de l'énergie sombre et de la matière sombre. Histoire thermique de l'univers.	Spectroscopie et polarimétrie en submillimétrique	LiteBIRD (MoO JAXA) – phase A Future M ou L ESA <b>Majeure</b>
Supernovæ, kilonovæ, origine des éléments. Histoire de la formation des trous noirs et de leur fusion. Les premières étoiles, galaxies.	Surveillance en X très grand champ et NIR	Theseus, M7 ESA – phase A compétitive <b>Substantielle</b>
Rétroaction des étoiles sur le milieu interstellaire. Interaction étoiles-planètes. Activité stellaire.	Spectroscopie haute résolution et polarimétrie en UV et FUV	MoO NASA, nanosats, POLLUX-HWO (NASA) <b>Substantielle</b>
Explosions de supernovæ, kilonovæ. Origine des éléments chimiques. Origine des rayons cosmiques.	Observations dans le domaine du MeV	MoO NASA, nanosats, future M ESA <b>Modérée</b>
Formation stellaire, disques proto-planétaires. Disques d'accrétion au tour d'objets compacts.	Accès à haute résolution angulaire / haut contraste	HCI-HWO (NASA), LIFE (ESA) <b>Modérée</b>

# SOLEIL HÉLIOSPHERE MAGNÉTOSPHÈRES (SHM) DU CNES

Amsif Kader (thématicien), Astafyeva Elvira, Auchère Frédéric, Baudin Frédéric, Berthomier Matthieu, Célestin Sébastien, Génot Vincent, Hadid Lina, Issautier Karine, Koutroumpa Dimitra, Kretzschmar Matthieu (président), Maget Vincent, Strugarek Antoine

## INTRODUCTION

La thématique Soleil Héliosphère Magnétosphères SHM traite principalement des **milieux ionisés du système solaire**. Ceux-ci, dans leur variété, sont présents dans notre étoile, dans le milieu interplanétaire, dans les magnétosphères et ionosphères des planètes, dont la Terre, et jusque dans les régions d'interface entre la basse atmosphère et l'ionosphère. L'ensemble de ces milieux représente un **large spectre de plasmas aux propriétés différentes** et qui ne sont pas, ou très peu, reproductibles en laboratoire. La proximité de ces objets permet leur observation à **très haute résolution spatiale et temporelle**, comme dans le cas du Soleil, et même de **les explorer in situ**. On peut ainsi observer et étudier en détail des phénomènes physiques universels et à l'œuvre dans de nombreux autres plasmas astrophysiques, comme **la reconnexion magnétique, les chocs, la turbulence, l'accélération et le chauffage des particules et l'émission de rayonnement électromagnétique**.

Les recherches dans la thématique SHM s'organisent autour de deux grandes questions :

*Comment le Soleil fonctionne et contrôle l'héliosphère ?*

Le Soleil est la seule étoile qui peut être étudiée dans toute sa complexité. Il s'agit de comprendre comment l'énergie est transportée de son intérieur jusque dans le milieu interplanétaire, et notamment comment l'activité magnétique solaire est initiée puis transformée en énergie pour le chauffage de l'atmosphère solaire, l'accélération et la cascade turbulente du vent solaire, et la génération des événements éruptifs qui sculptent l'héliosphère et impactent les planètes.

*Comment se créent et varient les environnements terrestre et planétaires ?*

Il s'agit de comprendre comment les propriétés des planètes et notamment de la Terre vont influencer la structure des environnements ionisés, magnétosphères et ionosphères. La très forte dynamique de ces environnements, illustrée notamment lors des orages magnétiques donnant lieu aux aurores boréales et australes, fait intervenir des processus complexes impliquant différentes échelles spatiales et temporelles qui ne sont encore que partiellement compris.

Ces deux grandes questions sont abordées de façon unifiée dans le cadre de la météorologie de l'espace, qui vise à décrire, comprendre, puis prévoir quand l'activité solaire peut affecter nos activités technologiques.

## 1. BILAN ET AVANCEES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

### 1.1 BILAN PROGRAMMATIQUE

Voici le résumé des priorités du GT SHM en 2019 :

Thème scientifique	Type de mesure/d'observables	Cadre de réalisation <sup>(1)</sup>	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 nano-satellite adapté à la caractérisation des plasmas spatiaux</i>	Exploration in situ des plasma spatiaux à partir de nano-satellites	CNES	Etudes PASO nano-satellite 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 nano-satellite 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	

Certaines priorités ont bénéficié d'avancées majeures sans être pleinement encore réalisées :

- La mission **Comet-Interceptor** (lancement 2027) a été sélectionnée par l'Esa (classe F) pour aller explorer une comète primitive et le CNES s'est engagé sur la contribution française pour les phases de développement BCDE1 ;
- La mission de la Jaxa **Solar-C** (lancement 2028) pour étudier la dynamique de l'atmosphère solaire à très haute résolution doit passer en phase B en septembre 2024 à la Jaxa, et la définition et la participation de la France à la réalisation du spectrographe EUV, principal instrument de la mission, est maintenant consolidée (voir section 2);
- La mission **HelioSwarm** a été sélectionnée par la Nasa pour un lancement en 2029 avec pour objectifs les premières mesures multi-échelles (fluides et ioniques) simultanées dans le vent solaire grâce à une constellation de neuf satellites. La France est sollicitée pour y contribuer fortement en fournissant deux des quatre instruments (voir section 2);
- L'étude Paso du nano satellite **Speed** optimisé pour la mesure des plasmas spatiaux a permis de préciser les besoins et les étapes à entreprendre afin de le réaliser et a généré une forte activité de R&T ;
- Une mission dédiée à l'exploration d'Uranus a été inscrite dans le Decadal Survey de planétologie et astrobiologie 2022 de la Nasa (voir section 2).

## 1.2 PHYSIQUE DU SOLEIL ET DE L'HELIOSPHERE

La compréhension de notre environnement spatial passe nécessairement par l'étude du Soleil, principal acteur de la variabilité observée et seule étoile que l'on peut étudier en détail. Ce domaine de recherche a été marqué par le lancement de deux missions majeures, **Solar Orbiter** (Esa, 2020) et **Parker Solar Probe** (Nasa, 2018). Elles s'ajoutent aux observatoires solaires historiques toujours en activité (e.g. **Soho**, **SDO**, **Stereo**). Si la forte participation de la communauté française à **Solar Orbiter (SOLO)** était attendue, la France est le seul pays hors Etats-Unis à avoir fourni un instrument à **Parker Solar Probe (PSP)**. Les bases de données **Medoc** et **CDPP** et les différents services d'observations assurés par la communauté jouent un rôle essentiel dans l'exploitation de ces missions en fournissant un accès centralisé aux données.

Une des découvertes majeures de **PSP**, qui s'est aventurée plus près du Soleil que n'importe quelle autre sonde, est l'omniprésence de structures possédant un champ magnétique retourné dans le vent solaire jeune, appelées *Switchbacks*. La com-

munauté française s'est fortement impliquée dans leur caractérisation et leur interaction avec le vent solaire ambiant. Il semble maintenant admis qu'elles sont la signature dans le vent solaire de reconnections magnétiques liées à la super-granulation dans l'atmosphère solaire, et qu'elles donnent lieu à des micros faisceaux de vent solaire rapide.

**Solo** a débuté sa phase nominale fin 2021 avec à la fois des mesures *in situ* couvrant les distances 0.3 UA<sup>1</sup> - 1 UA et des observations inédites du Soleil au périhélie, qui ont permis une exploration de l'héliosphère interne de manière approfondie. Par exemple, les mesures *in situ* ont permis de répertorier et caractériser les ondes présentes dans le vent solaire en fonction de la distance au Soleil (Fig. 1). L'effet global des ondes de sifflement (*whistlers*) sur les électrons peut expliquer pourquoi les électrons les plus énergétiques du vent solaire perdent leur alignement strict avec le champ magnétique au cours de leur propagation, ce qui était inconnu depuis des décennies. Le vent solaire a pu être caractérisé depuis quasiment sa zone de naissance jusqu'à 1 UA, ce qui impose des contraintes fortes sur les modèles mais pose également de nouvelles questions.

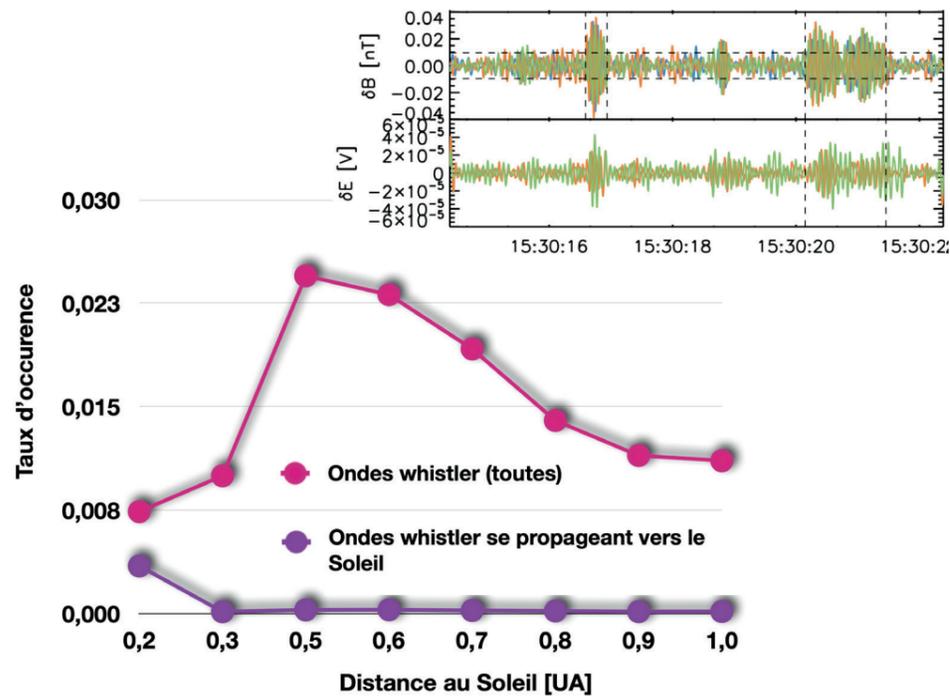


Fig.1. Taux d'apparition des ondes Whistler (exemple dans l'insert en haut à droite) dans le vent solaire, mesuré par **SOLO/ RPW** et **PSP**. Adapté de Colombari et al. (2024).

1 UA= 1 unité astronomique vaut la distance Terre-Soleil

La combinaison des observations de ces nouvelles missions avec celles des observatoires sol (instruments radio de la station de Nançay notamment) et des missions plus anciennes comme **Soho** a permis d'effectuer des analyses multipoints et multi-longueurs d'onde des événements éruptifs solaires et d'apporter des contraintes fortes sur la génération et la propagation de ces événements.

Les premiers périhélies de **Solo** en dessous de 0.3 UA ont permis d'obtenir des images spectaculaires de la couronne solaire à une résolution spatiale iné-

dite de 100 km par pixel. Elles ont révélé les événements éruptifs les plus localisés jamais observés dans la couronne dans l'extrême ultraviolet (Fig. 2), qui prolongent le spectre des éruptions vers les échelles spatiales les plus petites. Des travaux sont en cours afin de tester l'hypothèse d'Eugene Parker selon laquelle la reconnection magnétique serait à l'origine des températures de l'ordre du million de degrés des couronnes d'étoiles de type solaire.

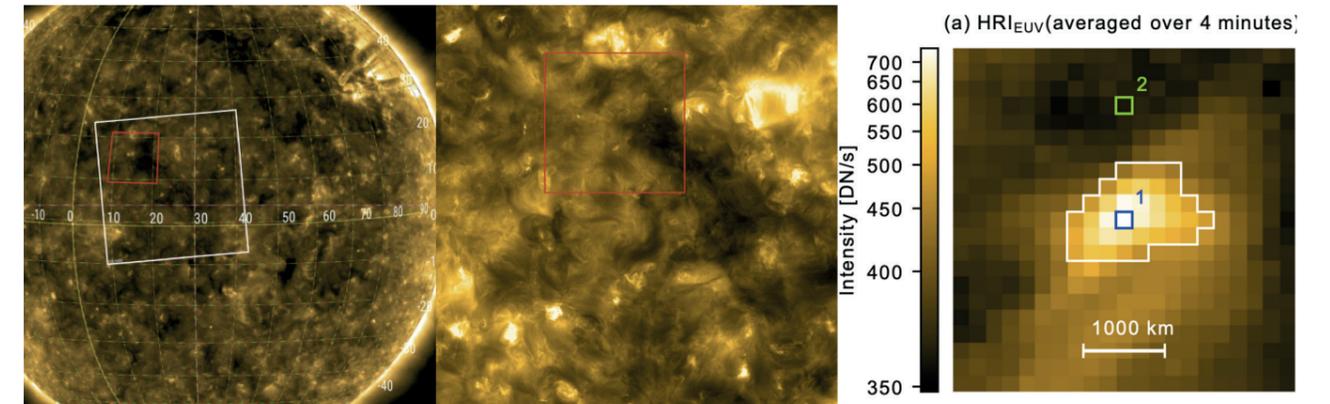


Fig. 2 : « Campfires » observés par **Solo** dans la couronne solaire avec **EU1** à 174 nm [Panneaux de gauche : Berghmans et al., 2021 ; Panneau de droite : Dolliou et al., 2023].

De nombreux efforts de modélisation ont été par ailleurs fournis par la communauté pour l'interprétation des observations, que ce soit pour expliquer l'origine du cycle solaire, pour établir la connectivité magnétique entre le Soleil et les mesures *in situ*, ou pour expliquer la génération et la propagation des éruptions.

## 1.3 ENVIRONNEMENTS TERRESTRE ET PLANÉTAIRES

L'exploitation des missions planétaires avec implication française s'est poursuivie, avec de nouvelles avancées importantes. La sonde **Juno** (Nasa, 2011) a permis de comprendre le rôle de l'interaction de la planète avec ses lunes dans l'émission du rayonnement radio. Il a également été montré que le champ magnétique de Jupiter possédait une asymétrie nord-sud tandis que celui de Saturne, étudié par la mission **Cassini**, semblait axisymétrique. Un travail important de modélisation a démarré pour la préparation de la phase nominale de la mission **Juice** (Esa, 2023), lancée en 2023 par l'Esa en direction de Jupiter. La mission **Maven** (Nasa, 2013), en orbite autour de Mars, a

montré l'existence de variations saisonnières de l'échappement de l'hydrogène atmosphérique plus importantes que prévu. Elle a également permis de mieux comprendre la génération des ondes de choc liées au vent solaire et a mis en évidence la variabilité des zones frontières de l'ionosphère martienne en fonction du vent solaire, du flux ultraviolet et des champs magnétiques crustaux. La mission **BepiColombo** (Esa, 2018), en phase de croisière vers Mercure, a livré de beaux résultats lors des premiers survols de Mercure et de Vénus. La première détection d'ondes de type chorus autour de Mercure a été réalisée et les premières mesures de profils de densités ont été combinées avec des simulations MHD 3D pour reconstruire les différentes frontières rencontrées. Les mesures *in situ* du plasma ont révélé l'occurrence d'injections impulsives d'électrons précipitant à la surface de la planète semblables à ceux observés sur Terre lors des orages magnétiques. L'analyse conjointe des données de **BepiColombo** au voisinage de Vénus, et de **Solo** en amont dans le vent solaire, confrontée à de nouvelles simulations numériques, a montré qu'en dépit d'une faible ionisation due aux conditions solaires et de

l'absence de champ magnétique, l'atmosphère de Vénus pouvait s'opposer efficacement à la pression du vent solaire en créant une région de stagnation

s'étendant jusqu'à 1900 km au-dessus de la surface (Fig. 3).

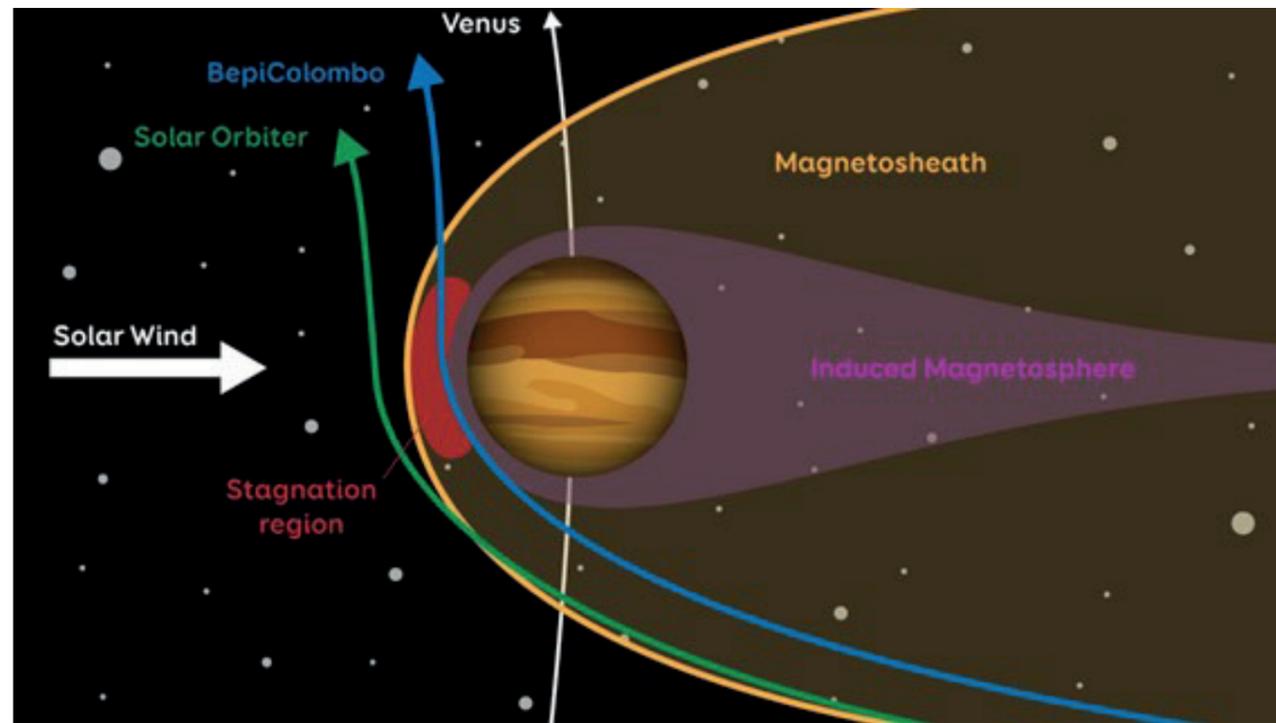


Fig. 3. Schéma de la région de stagnation du vent solaire au voisinage de Vénus (rayon 6050 km) observée par SoLo et BepiColombo en Août 2021. [EuroPlanet Society].

Les missions étudiant l'environnement de la Terre ont également livré de nouveaux résultats.

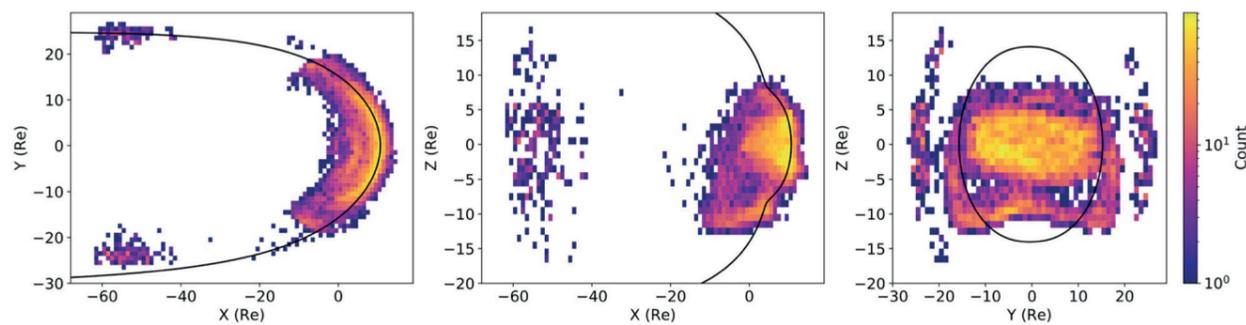


Fig. 4 : Distribution spatiale de 15 000 traversées de la magnétopause terrestre détectées par des techniques de machine learning, dans trois plans orthogonaux. La ligne noire représente un modèle standard de magnétopause. [Nguyen et al., 2022b].

La mission **Cluster** (Esa, 2000) a fourni des résultats de premier plan notamment grâce à la grande quantité de données acquises et à l'utilisation de techniques de « machine Learning » (Fig. 4), Un entraînement massif sur ces données ainsi que celles des missions **Themis**, **Magnetospheric Multiscale (MMS)**, et **Double Star** pour l'identification des frontières a montré comment la magnétopause dépend de l'orientation du champ magnétique du vent solaire et a confirmé qu'elle est effectivement indentée au niveau des cor-

nets polaires, ce qui faisait l'objet d'un débat de longue date. Le modèle analytique de cette frontière a finalement été mis à jour et le drapé des lignes de champs autour de la magnétosphère a pu être décrit de manière plus complète. L'analyse des données de la mission **MMS**, souvent accompagnée de simulations numériques très poussées, continue de nous révéler l'importance et la complexité des phénomènes plasmas dans l'environnement de la Terre. Elle a notamment montré l'intrication entre la reconnexion magnétique et la turbulence aux échelles cinétiques et a mis

en évidence l'importance de la structure fine des événements de transfert de flux pour le transport du plasma à travers la magnétopause. Des méthodes d'apprentissage ont été utilisées pour détecter un grand nombre de régions de diffusion électronique, ces petites régions où opère la reconnexion magnétique, et étudier leur variabilité selon les paramètres à grande échelle du milieu. Une attention renouvelée a été portée à l'étude de l'ionosphère, en particulier aux régions équatoriales et à l'ionosphère basse qui est largement méconnue. Des réflexions ont démarré sur l'observation de ces régions depuis le sol grâce à des récepteurs VLF en ajout des radars Superdarn, et depuis l'espace avec notamment la Phase 0 du projet **Daedalus** de l'Esa qui a été menée à bien avec une forte implication française. Les données des satellites **Swarm** ont permis d'étudier l'effet des vents thermosphériques sur l'asymétrie de l'anomalie équatoriale d'ionisation, ainsi que de développer pour la première fois un modèle de courants électriques dans la région F de l'ionosphère à basses et moyennes latitudes.

La communauté a malheureusement aussi été marquée par l'échec du lancement de **Taranis**, qui visait à étudier le couplage entre les orages atmosphériques et l'environnement spatial. Elle a su rebondir, d'abord en proposant une mission **Taranis 2**, hélas rapidement abandonnée pour raison budgétaire, puis en développant une instrumentation visant à caractériser plus partiellement certains de ces phénomènes transitoires à bord de ballon et de nanosatellites. Les mesures obtenues en avion à 20 km d'altitude par la Nasa montrent que les phénomènes de couplage entre le rayonnement cosmique et les nuages orageux sont beaucoup plus fréquents qu'attendus. Ceci souligne l'importance des mesures ballons auxquelles la communauté française s'est préparée

en développant une instrumentation gamma dédiée et des instruments de mesure du champ électrique continu et des émissions radios.

## 1.4 MÉTÉOROLOGIE DE L'ESPACE

Les études de météorologie de l'espace ont été structurées par la participation de la France dans le programme *Space Safety (S2P)* de l'Esa en fournissant des services pré-opérationnels dédiés aux utilisateurs du portail Esa SWE Network Portal (<https://swe.ssa.esa.int/>). L'investissement de la communauté dans les services d'observations sol ou espace du Programme National Soleil-Terre (PNST<sup>2</sup>) pour produire les données et outils nécessaires et le soutien financier de l'APR joue un rôle essentiel dans la capacité de la communauté à produire des services valorisables en météorologie de l'espace. Parmi ceux-ci, on peut citer :

1. Le calcul de propagation du vent solaire, des éjections de masses coronales (CME), et des particules énergétiques ;
2. La restitution et la prévision des risques satellites associés à la dynamique des ceintures de radiation ;
3. La prévision du cycle magnétique de 11 ans du Soleil ;
4. La production de carte de radiation à l'altitude des avions.

Cette mobilisation importante de la communauté française pour la météorologie de l'espace s'est particulièrement manifestée lors de l'organisation à Toulouse de la European Space Weather Week du 17 au 24 novembre 2023, évènement majeur de la discipline en Europe qui a réuni plus de 700 participants de 46 pays, avec d'importantes participations française, européenne, et américaine.

## 2. PROSPECTIVE ET RECOMMANDATIONS

### 2.1 COMMENT LE SOLEIL FONCTIONNE ET CONTROLE L'HELIOSPHERE ?

La poursuite de **SoLo**, qui débutera sa sortie du plan de l'écliptique en 2025 avec un angle de 15° en phase nominale, jusqu'à 33° en phase étendu au-delà de 2027, permettra de poursuivre la ca-

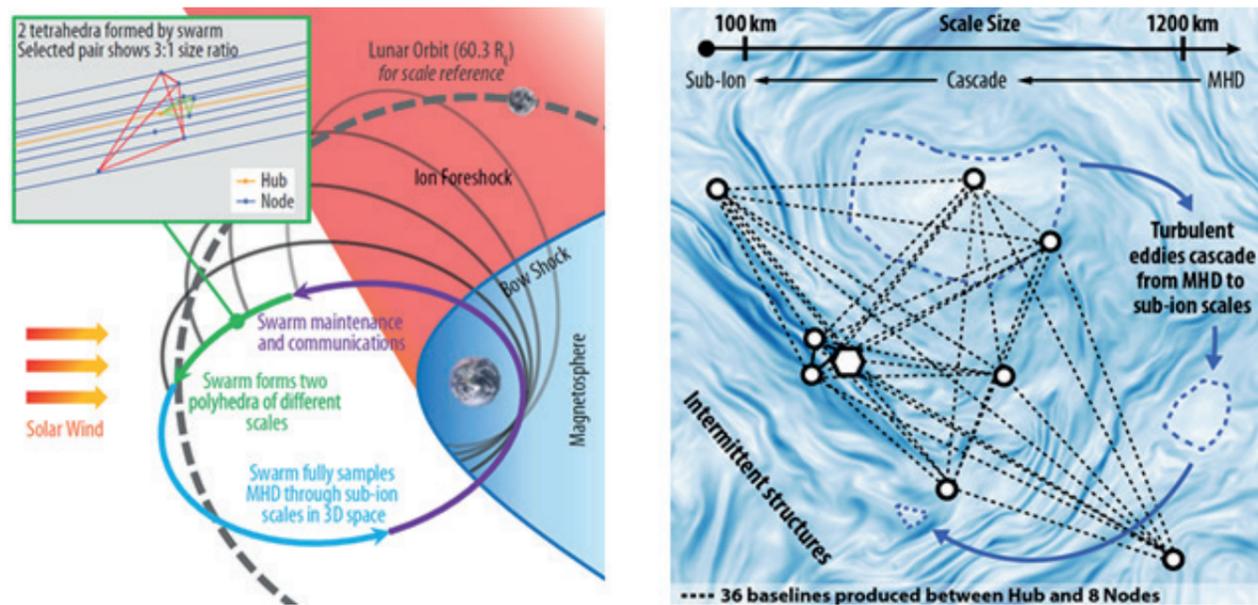
ractérisation de l'héliosphère interne et une première observation, partielle, des pôles solaires. **PSP** devrait être étendue avec la même orbite, soit un périégée à 9,9 rayons solaires, pour continuer d'étudier le vent solaire au plus proche du Soleil. Certaines questions essentielles ne sont pas abordées par ces missions, soit car elles ne possèdent pas

2 [https://pnst.ias.u-psud.fr/sites/pnst/files/Executive\\_Summary\\_prospective\\_PNST\\_2024\\_Final.pdf](https://pnst.ias.u-psud.fr/sites/pnst/files/Executive_Summary_prospective_PNST_2024_Final.pdf)

l'instrumentation nécessaire, soit car elles laissent certaines régions inexplorées. La priorité majeure est d'étudier les processus de dissipation 1) dans le

vent solaire grâce à la première constellation multi-échelles **HelioSwarm**, et 2) dans l'atmosphère solaire grâce à la mission haute résolution **Solar-C**.

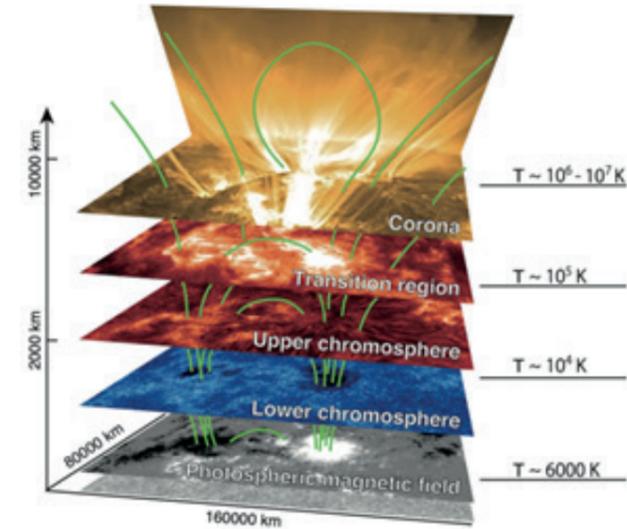
### 2.1.1 Quels sont les processus de dissipation dans les plasmas spatiaux ?



**Fig. 6.** Orbite de la constellation **HelioSwarm** (gauche) et schéma (droite) montrant les séparations typiques entre les satellites, des échelle sub-ioniques aux échelles fluides. [Proposition mission **HelioSwarm** à la Nasa]

Dans le vent solaire, la priorité majeure est l'étude multi-échelles de la turbulence en participant à la mission **HelioSwarm**. La turbulence reste l'un des grands problèmes de la physique non encore résolus. Elle joue un rôle crucial à la surface du Soleil et dans les magnétosphères planétaires, mais également dans le vent solaire où une turbulence non contrainte par des frontières existe et pourrait notamment expliquer le faible refroidissement des ions observé à grande distance du Soleil. La turbulence est un processus intrinsèquement multi-échelles car elle désigne le mécanisme par lequel l'énergie injectée à l'échelle d'un système se transporte vers les plus petites échelles par les fluctuations du champ magnétique et celles des mouvements du plasma. La dissipation désigne le processus par lequel les fluctuations cèdent leur énergie aux particules, ce qui correspond à un chauffage. Les précédentes missions ont montré qu'il faut observer plusieurs échelles simultanément pour caractériser et comprendre les processus turbulents et de dissipation. Cette caractérisation multi-échelles n'est possible qu'avec une constellation d'au moins cinq satellites. C'est l'objectif de la mission **HelioSwarm** de la Nasa (lancement en 2029), constituée d'un essaim composé

pour la première fois d'un satellite mère et de huit satellites filles, plongé dans le vent solaire. L'instrumentation sera identique sur les neuf satellites et le satellite mère disposera également d'un analyseur électrostatique ionique pour caractériser le chauffage des ions. Les laboratoires français ont été fortement sollicités sur cette mission puisqu'ils sont appelés, grâce à leur expertise technique, à fournir deux des quatre instruments : les neuf magnétomètres de type Search-coil et l'analyseur électrostatique ionique. Cette implication forte donnera à la France une place solide dans l'exploitation de cette mission novatrice, qui permettra de déterminer la structure spatio-temporelle de la turbulence plasma et le transfert d'énergie des échelles fluides aux échelles ioniques. Une autre priorité importante mais qui ne dispose pas de cadre programmatique défini à l'heure actuelle est de réaliser des mesures multi-échelles incluant les échelles électroniques, car celles-ci jouent également un rôle important dans les processus plasmas.



**Fig. 5.** Couplage entre les différentes couches de l'atmosphère solaire. [Proposition **Solar-C** à la JAXA].

Dans l'atmosphère solaire, les observations les plus récentes de **Solo** ont montré l'omniprésence de structures fines et dynamiques qui résultent du couplage entre les différentes 'couches' de l'atmosphère via le champ magnétique (Fig. 5). Les mouvements dans la photosphère sont la source de l'injection d'énergie dans les couches supérieures, mais les échelles spatiales et temporelles impliquées dans les processus de dissipation de l'énergie magnétique en chauffage n'ont pas encore été résolues ni observées dans une gamme de température suffisante pour les caractériser. C'est notamment le cas pour les « Campfires » pour lesquels **Solo** a des capacités de diagnostic limitées. Il faut donc observer ces petites échelles spatiales et temporelles pour savoir comment la masse et l'énergie sont transportées, emmagasinées et converties de la chromosphère à la couronne. C'est l'objet de la mission **Solar-C** de la Jaxa (lancement 2028), qui pourra effectuer un diagnostic poussé de ces événements de chauffage grâce à son spectrographe EUVST qui disposera d'une très haute cadence et résolution angulaire et couvrira une large gamme de températures. La France, de par son expertise sur les optiques EUV, a été sollicitée pour contribuer à la réalisation d'EUVST ; une phase A a été conduite au Cnes et une décision sur l'engagement de cette contribution en phase BCDE1 devrait être prise prochainement. La participation à la mission **Solar-C** est une priorité majeure.

Une priorité substantielle mais qui ne dispose pas actuellement de contexte programmatique défini est la mesure du champ magnétique dans l'atmos-

phère solaire, qui est une grandeur fondamentale pour la dissipation d'énergie dans ce milieu. Notre connaissance du champ magnétique coronal est principalement basée sur des modélisations extrapolant les cartes du champ photosphérique, et les résultats dépendent des hypothèses propres à chaque modèle. Le spectropolarimètre **Clasp** (dont la France est co-PI) a volé trois fois à bord de fusées sonde et a démontré la faisabilité de la mesure du champ magnétique coronal par l'effet Hanle. De futures missions d'opportunités pourraient embarquer ce type d'instruments et effectuer ainsi ces nouvelles mesures.

### 2.1.2 Quelle est la variabilité de l'héliosphère et quelle est son origine ?

Comprendre la variabilité de l'héliosphère nécessite aujourd'hui de multiplier les points de vue, en observant le Soleil à différentes longitudes et latitudes et en explorant l'héliosphère externe et ses frontières avec le milieu interplanétaire. Il sera essentiel d'observer directement les pôles solaires, qui jouent un rôle majeur dans le cycle solaire, ainsi que d'observer notre étoile depuis plusieurs points de vue simultanément.

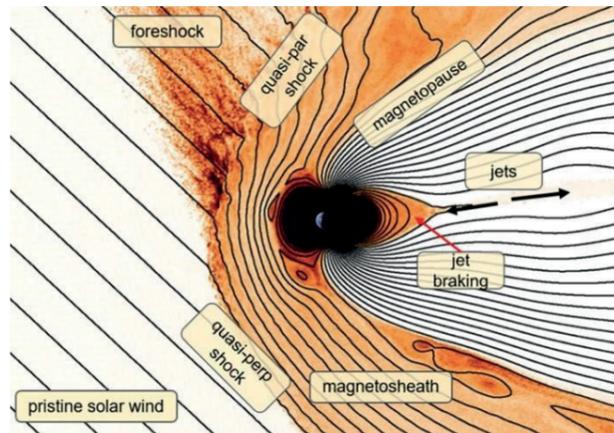
Plusieurs missions proposées au Decadal Survey pour la physique héliosphérique de la Nasa adressent ces objectifs. La participation française à cette future grande mission de l'héliophysique est une priorité substantielle de la communauté. Un premier concept de mission propose de réaliser des observations multipoints du Soleil permettant une couverture à 360° et une reconstruction 3D de l'environnement solaire. Une autre mission propose une constellation à des distances plus petites pour la caractérisation multipoints du vent solaire et des éjections de masse coronale lors de leur propagation. Un troisième concept propose de visiter les limites de l'héliosphère, leurs variabilités, et l'espace interstellaire local.

Enfin, la mission de météorologie spatiale **Vigil**, prévue dans le programme Space Safety (S2P) de l'Esa, propose de surveiller le Soleil depuis le point de Lagrange L5 pour caractériser notamment la propagation des éjections de masse coronale en les observant par la tranche lors de leur propagation Soleil-Terre. La France est sollicitée par un consortium de la Nasa pour participer à l'imageur EUV JEDI, ce qui constitue une priorité substantielle.

## 2.2 COMMENT SE CREENT ET VARIENT LES ENVIRONNEMENTS TERRESTRES ET PLANETAIRES ?

La poursuite des études sur les environnements terrestre et planétaires devra emprunter plusieurs voies. Il s'agit d'une part d'utiliser la possibilité nouvelle de réaliser des mesures multi-échelles pour comprendre les phénomènes de transfert d'énergie et d'accélération des particules dans la magnétosphère terrestre, alors que la mission **Cluster** finira en 2024, et d'autre part de réaliser une exploration plus poussée des autres magnétosphères du système solaire, avec leur particularité, à commencer par la magnétosphère martienne où nous pouvons maintenant étudier l'impact du forçage solaire sur l'environnement martien de façon plus complète. La priorité majeure est la participation à la prochaine mission M7 de l'Esa si celle-ci étudie la magnétosphère terrestre ou martienne. La magnétosphère d'Uranus, dont l'axe de rotation est dans le plan de l'écliptique, est également particulièrement intéressante par sa configuration unique, et représente une priorité substantielle, tout comme l'étude de l'ionosphère et des couplages atmosphère-ionosphère au-dessus des zones orageuses, objet de la mission **Taranis** perdue au lancement.

### 2.2.1 Comprendre l'énergisation et la dynamique dans les environnements terrestre et planétaires



**Fig. 7.** Zones de la magnétosphère terrestre où prennent place des phénomènes de transfert d'énergie et de couplage entre échelles. [Retino et al., 2021]

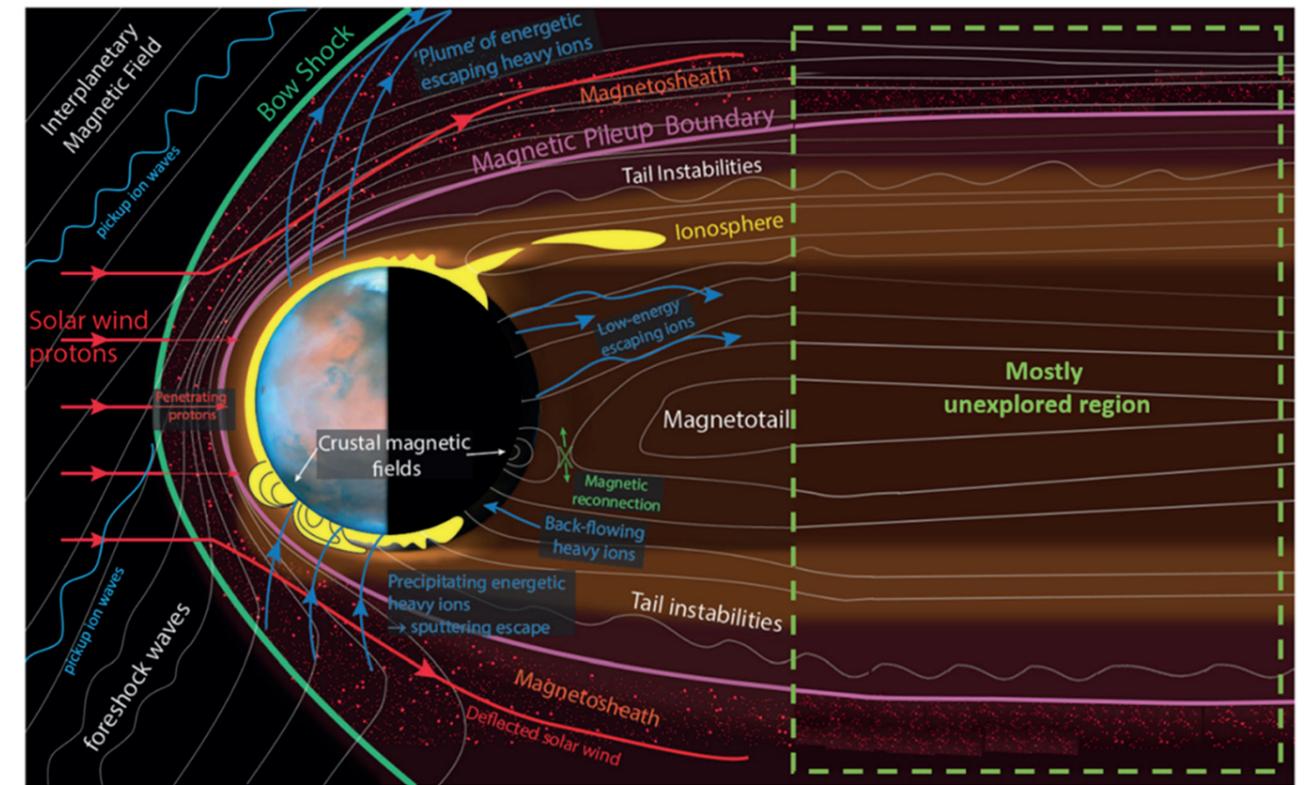
Les phénomènes d'énergisation des particules et de transport de l'énergie jouent un rôle clé dans la dynamique de multiples objets astrophysiques. Ils sont un ingrédient essentiel pour la formation des

différentes zones des magnétosphères planétaires et terrestre (Fig. 7). Le cas terrestre constitue un laboratoire idéal pour comprendre ces phénomènes car il est plus aisément accessible à la mesure *in situ*. Les constellations de quatre satellites actuelles **Cluster** et **MMS** ont permis des avancées importantes dans l'identification et la quantification des processus plasmas responsables de la conversion d'énergie électromagnétique en énergie cinétique et de la dynamique de la magnétosphère terrestre. Bien qu'une constellation de quatre satellites ne puisse observer qu'une seule échelle spatiale à la fois, ces observations mono-échelles couplées avec les simulations suggèrent que le couplage entre les échelles fluides (magnétohydrodynamiques) et les échelles cinétiques (ioniques puis électroniques) ont un rôle important dans la plupart des processus plasmas. Un consensus s'est établi dans la communauté pour proposer un dispositif de mesure ambitieux couvrant simultanément les échelles ioniques et fluides. La mission **Plasma Observatory** sélectionnée en Phase A compétitive pour la mission M7 de l'Esa propose de placer sept satellites dans une configuration contrôlée afin de former deux tétraèdres à deux échelles différentes dans les régions clés du système magnétosphérique. La mise en œuvre d'une instrumentation miniaturisée et innovante dans laquelle la France joue un rôle de premier plan rend aujourd'hui possible cette mission qui devrait révolutionner notre compréhension des phénomènes d'énergisation des particules et de transport de l'énergie observés universellement.

L'exploration des magnétosphères planétaires revêt une importance cruciale pour approfondir notre compréhension de l'origine, l'évolution et l'habitabilité des planètes ainsi que leurs environnements plasmas et le couplage avec le vent solaire. Cela permet aussi de mieux appréhender les processus fondamentaux à l'œuvre dans les milieux astrophysiques divers.

L'exploration poussée de l'environnement spatial martien est nécessaire pour comprendre l'évolution du climat martien et la réponse de la planète aux événements solaires. Les interactions entre les différentes régions de l'environnement martien sous l'effet du vent solaire et du flux radiatif sont complexes et multidimensionnelles, et leur caractérisation nécessite des données provenant de sondes à différents endroits simultanément. La mission **M-Matisse** (*Mars Magnetosphere Atmos-*

*phere Ionosphere and Space-weather Science*, Fig. 8), également sélectionnée en Phase A compétitive pour la mission M7 de l'Esa, propose, grâce aux observations simultanées et coordonnées de ses deux orbiteurs, de cartographier l'ionosphère et la basse atmosphère de Mars simultanément et de découvrir ses variations spatiales et temporelles. **M-Matisse** représente une étape majeure dans l'explora-



**Fig. 8.** Illustration de la magnétosphère induite de Mars et des processus physiques qui dominent sa dynamique [Sánchez-Cano, et al. 2021].

Sur ces deux missions en phase A compétitive, **Plasma Observatory** et **M-Matisse**, les laboratoires français ont su valoriser les R&T effectués notamment dans le cadre de la phase 0 SPEED et jouent un rôle majeur dans la définition et réalisation de leurs charges utiles.

Enfin, le système d'Uranus, survolé par **Voyager 2** en 1986, est sans équivalent dans le système solaire, avec une rotation d'environ 17h autour d'un axe incliné de 98° par rapport au nord céleste et un champ magnétique incliné de 60° par rapport à l'axe de rotation. Ce champ produit une magnétosphère asymétrique à rotation rapide qui adopte des configurations extrêmement différentes au solstice et à l'équinoxe. La première priorité du Decadal Planétologie et Astrobiologie de la Nasa pour la prochaine mission flagship est le concept de mission **Uranus Orbiter and Probe**, qui offre une opportunité unique d'étudier cette magnétosphère

de la magnétosphère martienne et permettra d'explorer en profondeur la physique de la météorologie de l'espace martien, de la magnétosphère à la surface, et de contraindre l'environnement radiatif de la planète. Cette mission contribuera ainsi au développement des outils nécessaires à l'exploration robotique de Mars des prochaines décennies.

atypique. L'étude de la magnétosphère d'Uranus est une priorité substantielle.

### 2.2.2 Comprendre le couplage Atmosphère-Ionosphère-Magnétosphère

L'ionosphère terrestre est un milieu extrêmement variable et dynamique et ses couplages avec la magnétosphère et l'atmosphère restent trop mal compris. On pourra citer comme exemple la difficulté d'identifier clairement les causes de la perte de nombreux satellites Starlink en février 2022. Couplées à des modèles multi-fluides d'ionosphère, des mesures multipoints permettant une couverture spatiale significative du système ionosphère/thermosphère sont nécessaires pour comprendre ces couplages impliquant des zones différentes, et constituent une priorité substantielle. Des projets de constellations ionosphériques proposés à la Nasa comme les mission **GDC** (Geospace Dynamics

Constellation) et **Dynamic** (Dynamical Neutral Atmosphere-Ionosphere Coupling) permettraient de combler au moins partiellement ces lacunes observationnelles, mais d'autres opportunités pourraient apparaître. L'étude de la précipitation dans l'ionosphère des particules chargées (électrons et protons) et des ceintures de radiation est également essentielle à la compréhension de la dynamique ionosphérique. La basse ionosphère (100-200 km d'altitude) est une région clef pour la transition entre l'atmosphère et l'espace. La physique qui s'y joue est particulièrement intéressante car elle implique le couplage entre les fluides de l'atmosphère et le plasma ionosphérique, ainsi qu'une chimie particulière. Elle reste cependant peu étudiée *in situ* notamment à cause de freinage atmosphérique important à ces altitudes. Suite au projet de mission **Daedalus** (arrêté en fin de phase A), un groupe de travail Esa/Nasa ENLoTIS (Esa/Nasa Lower Thermosphere-Ionosphere Science) s'est constitué et de nouveaux projets pourraient prochainement apparaître.

L'étude des couplages électromagnétiques entre les nuages d'orage dans la troposphère et l'ionosphère, ainsi que les couches supérieures de l'atmosphère est un domaine actif de recherche et une priorité substantielle du groupe SHM. En particulier, des phénomènes conduisant à d'intenses émissions de photons de haute énergie appelés flashes gamma terrestres (TGF) suscitent un très fort intérêt de par leurs aspects fondamentaux et sociétaux (risques radiatifs). Le projet **Bees**, soumis pour une phase 0 au CNES, propose l'utilisation de plusieurs nanosatellites en formation et équipés d'un spectromètre gamma rapide et d'un instrument radio HF pour améliorer significativement notre connaissance des TGF. La détection multipoints permet l'étude de la géométrie du faisceau tandis que les mesures radio permettent la caractérisation des phénomènes d'accélération encore mal connus ainsi que le contexte électrique. Ces mesures seraient complémentaires de celles prévues plus proches des sources grâce à des campagnes de ballons stratosphériques (BSP et BLD) en conditions orageuses (projets Oreo et Stratelec).

Enfin, les corps qui ne possèdent pas d'atmosphère dense (Lune, Mercure, astéroïdes ou satellites gla-

cés) sont directement et constamment exposés aux effets de l'irradiation solaire et du bombardement par les particules du vent solaire ou les impacts micro-météoritiques. Plusieurs missions récentes ont révélé une variété de phénomènes résultant de l'interaction du régolithe et de l'exosphère lunaire avec le vent solaire : « mini-magnétosphères » autour des anomalies du champ magnétique crustal, potentiel électrique entre la surface lunaire et le plasma ambiant qui favorisent la production de plasmas poussiéreux complexes. Au-delà de Mercure avec BepiColombo et Mars avec MMX, les programmes d'exploration lunaire de l'Esa et de la Nasa pourraient fournir l'opportunité d'étudier ces phénomènes sur la lune.

### 2.3 R&T

Les actions de R&T entreprises ont porté leurs fruits et permettent à la communauté française de jouer un rôle de premier plan dans plusieurs projets de l'Esa : **Comet-Interceptor, Plasma Observatory, M-Matisse**. Les défis à relever dans les années à venir sont multiples. En particulier, l'effort de miniaturisation des capteurs devra se poursuivre afin de tirer pleinement partie des nombreuses opportunités offertes par le développement des nanosatellites, que ce soit dans le cadre de projets scientifiques ou bien pour la météorologie de l'espace. Trois axes sont à approfondir en particulier : le développement d'une version nanosatellite du concept de caméra plasma 3DCAM ; l'évolution du récepteur radio haute fréquence PERL pour le rendre tolérant aux radiations pour l'exploration d'Uranus ; et la miniaturisation des magnétomètres initiée avec la R&T MAROT.

## 2.4 SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

Objectif scientifique	Priorité	Types de mesures	Cadre de réalisation
Élucider les processus de dissipation dans l'atmosphère du Soleil et le vent solaire	Majeure	Mesures multi-échelles et haute résolution des plasmas spatiaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Solar-C</b> (Phase A+, lancement 2029)</li> <li>• <b>HelioSwarm</b> (Nasa, phase B1, lancement 2029)</li> <li>• Ex : Debye</li> </ul>
Comprendre l'énergisation et la dynamique dans les environnements terrestre et planétaires	Majeure	Mesures <i>in situ</i> multipoints et multi-échelles dans les ionosphères et magnétosphères	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Plasma Observatory, M-Matisse</b> (CALL Esa/M7, Phase A compétitive en cours, 2035)</li> </ul>
Explorer de nouvelles régions de l'héliosphère	Substantielle	Mesures et observations de l'héliosphère externe, des environnements des géantes glacées, des régions polaires du Soleil	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Decadal Heliophysique (Nasa, 2037)</li> <li>• <b>Uranus Orbiter and Probe</b> (Nasa, 2037)</li> <li>• <b>Vigil</b></li> </ul>
Comprendre le couplage Atmosphère-Ionosphère-Magnétosphère	Substantielle	Mesure <i>remote sensing</i> des régions source et mesures <i>in situ</i> des espèces neutres et ionisées	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Bees</b> (phase 0 CNES)</li> <li>• Constellations ionosphériques</li> <li>• ENLoTIS</li> <li>• Mesures Ballons</li> </ul>
Améliorer les modèles physiques de météorologie de l'espace	Modérée	Mesures des observables de météorologie de l'espace en différentes positions de la magnétosphère et de l'ionosphère	Par opportunité Esa/Nasa, S2P, D3S, Lunar Gateway
Caractériser les interactions vent solaire - surface lunaire	Modérée	Mesures <i>in situ</i> à la surface de la lune	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atterrisseurs lunaires</li> </ul>

## GRUPE THEMATIQUE

# SYSTÈME SOLAIRE

Lydie Bonal, John Carter, Sébastien Charnoz, Agnès Cousin, Evelyn Fūri, Raphael F. Garcia, Olivier Groussin, Benoît Langlais, Alice Le Gall, Alessandro Morbidelli (Président), Cathy Quantin, Francis Rocard (Thématicien), Sandrine Vinatier,

L'étude du Système solaire s'organise autour de trois grandes questions :

### QI. Quelle est l'origine du Système solaire ?

Ce sont essentiellement les 100 premiers millions d'années du Système solaire dont il est question ici, depuis la formation des premiers solides, il y a 4,567 milliards d'années lors de la formation du disque protoplanétaire, jusqu'à l'établissement de l'architecture finale de notre système planétaire, avec ses planètes et petits corps. Différents processus, pas encore complètement élucidés, ont fait naître deux types de planètes dans deux régions distinctes, séparées sans doute par la « ligne de glace d'eau » : à l'intérieur, les planètes telluriques et à l'extérieur, les planètes géantes. Un objectif fondamental est de comprendre quels sont les processus et événements, peut-être contingents, qui ont donné au Système solaire une structure si atypique parmi les systèmes planétaires observés. Pour les planètes géantes, on s'intéresse aussi à la formation de leurs anneaux et satellites.

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

Il s'agit ici de retracer les chemins d'évolution, distincts pour chaque corps, qui ont créé les disparités de caractéristiques physico-chimiques (atmosphère, surface, intérieur) entre les planètes au sein même des deux grandes familles (telluriques et géantes) ainsi qu'entre leurs satellites. Une des questions centrales pour les planètes telluriques concerne la divergence évolutive entre Vénus, la Terre et Mars, qui a fait de la première une fournaise infernale, de la dernière un désert glacé, en laissant seulement la Terre en conditions habitables. Pour les géantes, la redistribution des éléments lourds au sein de leur atmosphère reste mal connue, ainsi que les interactions satellites-magnétosphère; les connaissances sur la structure interne d'Uranus et Neptune sont presque inexistantes

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

Ces questions sont partagées avec l'exobiologie et sont donc aussi discutées dans le chapitre du groupe E2P2. Dans le cadre de la formation et évolution du Système solaire on s'intéresse surtout aux origines de la matière organique et de l'eau et leur incorporation dans les planètes telluriques. D'autres questions majeures portent sur l'origine de la disparité en abondance d'eau dans les satellites des planètes géantes, ainsi que les processus de dissipation qui peuvent, dans certains cas, maintenir un océan liquide sous leurs surfaces glacées.

## 1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

### 1.1 BILAN SCIENTIFIQUE

#### 1.1.1 SUR LA QUESTION DES ORIGINES

La formation de Jupiter a influencé toute l'architecture et l'évolution du Système solaire. Pour mieux la comprendre il est nécessaire d'élucider la structure interne de Jupiter, la nature de son noyau et l'enrichissement global de la planète en éléments lourds. Ce sont les objectifs de la mission **Juno** de la Nasa, dans laquelle la France a une implication scientifique, soutenue par le Cnes incluant l'attribution de bourses de doctorat et postdoctorat. Depuis 2016, cette mission a permis de sonder non seulement l'intérieur mais aussi l'atmosphère profonde de la planète par une gravimétrie ultra-précise (de plus de 2 ordres de grandeur sur les moments gravitationnels par rapport aux mesures précédentes) rendue possible par une orbite polaire avec un périapse très proche de la planète. Elle a notamment démontré la présence d'un noyau dilué, ce qui indique que Jupiter a accrété à la fois du gaz et des éléments lourds, au moins jusqu'à ce qu'elle ait atteint 60 masses terrestres. Les modèles actuels (2020-2022) prédisent un arrêt de l'accrétion d'éléments lourds quand la planète atteint ~30 masses terrestres et des valeurs d'abondance de ces éléments dans l'enveloppe externe trop faibles par rapport aux mesures. Les modèles doivent donc être revus pour expliquer ces observations.

Les missions **Hayabusa2** (Jaxa) et **Osiris-Rex** (Nasa) ont ramené sur Terre des échantillons des astéroïdes géocroiseurs carbonés Ryugu (5,4 g de matière en 2020) et Bennu (environ 120 g en 2023). Pour Ryugu, les analyses préliminaires ont été effectuées par 6 groupes thématiques, impliquant au total 24 scientifiques français dont deux «group deputy leads». Pour Bennu l'implication de la communauté française dans l'analyse préliminaire de ces échantillons est limitée à deux équipes. Du point de vue de la question des origines, le résultat marquant est que ces deux astéroïdes ont la même nature chimique et isotopique que les météorites de type CI, avec quelques rares différences de nature pétrologique (par exemple l'existence de quelques phases non altérées qui semblent les parents de minéraux communs dans les météorites primitives).

Les météorites de type CI jouent un rôle privilégié en cosmochimie car elles ont la composition élémentaire la plus proche de la composition solaire. Les météorites CI sont très rares, mais le fait que les deux premiers astéroïdes primitifs échantillonnés soient de cette nature suggère que la matière CI n'est pas rare en réalité. La rareté des météorites CIs s'expliquerait a priori par leur destruction pendant l'entrée atmosphérique, à cause de l'extrême fragilité de ces objets constatée lors de l'expérience d'impact et des opérations d'échantillonnage sur Ryugu et Bennu.

#### 1.1.2 SUR LA QUESTION DE L'ÉVOLUTION ET DES PROPRIÉTÉS DES CORPS

Le résultat phare sur cette question a été apporté par la mission **InSight** (Nasa) et en particulier par le sismomètre français Seis déployé sur Mars en 2018. Tout d'abord la sismicité de la planète a pu être estimée comme étant comprise entre celle de la Lune et de la Terre. Un essaim de sismicité a été localisé dans la zone de Cerberus Fossae dès 2019, démontré en 2023 comme étant associé à une activité volcanique induite par la présence d'un panache chaud sous cette région. Les mesures de Seis ont également permis en 2021 de localiser des impacts de météorites à des distances inférieures à 300 km ainsi que d'enregistrer deux impacts majeurs (diamètres des cratères > 130 m). Ces mesures permettent de mieux comprendre le lien entre les impacts et les ondes sismiques, ainsi que de mieux connaître la structure interne de Mars. La stratification de la planète a été déterminée (Fig. 1) et présente une croûte dont l'épaisseur moyenne varie entre 30 et 72 km, une lithosphère d'au moins 400 km d'épaisseur et un noyau de ~1650 km entouré par une couche de matériaux fondus à la base du manteau martien. Les efforts pour garder la mission **InSight** active ont permis d'enregistrer un "gros" séisme de magnitude supérieure à 4,3 en mai 2022 à la toute fin de la mission qui a excité des ondes de surface et les modes de vibration de la planète. Les équipes de recherche françaises soutenues par le Cnes sont fortement impliquées dans ces publications.

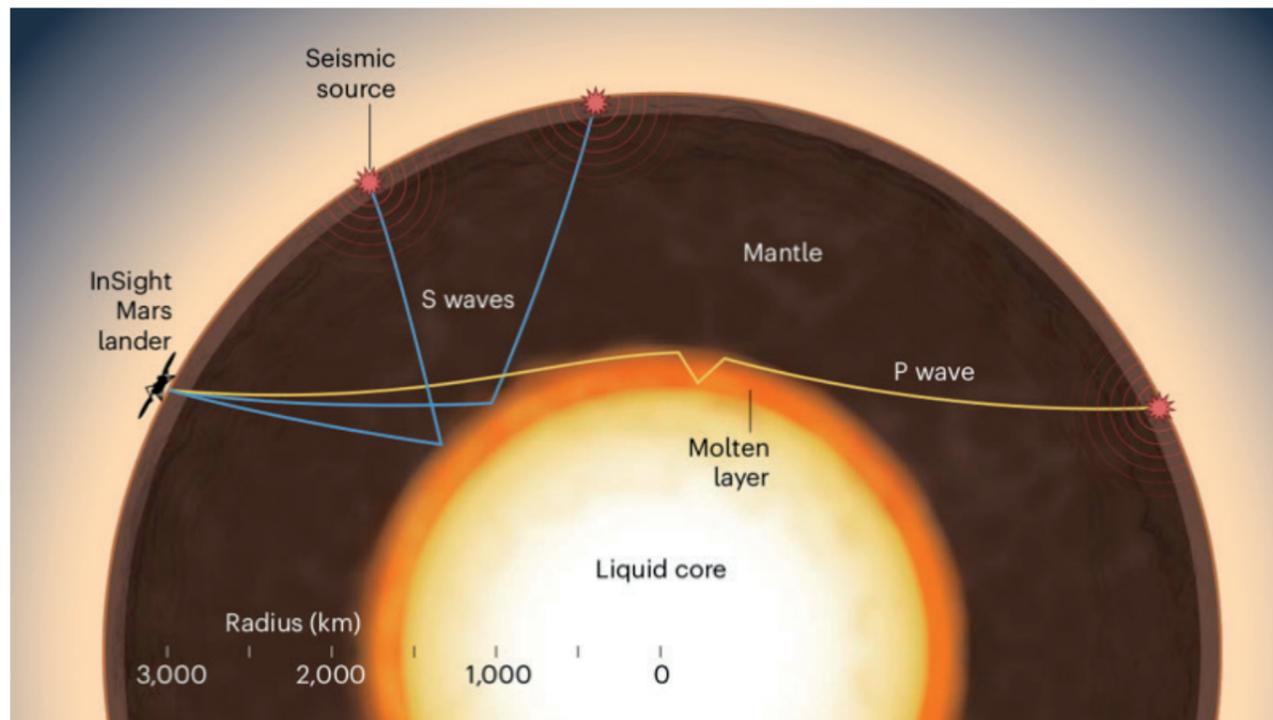


Fig. 1. Schéma des mesures sismiques d'InSight et taille des différentes couches géophysiques de

Les missions orbitales ExoMars/TGO (Esa) lancée en 2016 et EMM lancée en 2020 (sonde Hope, MBR-SC-Mohammed Bin Rashid Space Center des Émirats Arabes Unis), qui impliquent la participation scientifique de plusieurs membres de la communauté française (la participation à EMM se faisant hors du cadre Cnes à la demande des EAU), ont permis de préciser la composition de l'atmosphère martienne, notamment concernant la vapeur d'eau, l'ozone, ou HCl, ainsi que son couplage avec le cycle des tempêtes de poussières et/ou cristaux de glace au pôle Nord, et sa structure thermique 3D (y compris de la thermosphère). Le débat sur le cycle du méthane et son origine perdure car les observations TGO et sol (MSL Curiosity) sont en désaccord, bien que les observations orbitales imposent désormais une limite supérieure très basse sur les abondances de ce gaz.

La cartographie de l'astéroïde Bennu par la sonde Osiris-REx (Nasa) en 2019 a montré une surface globalement homogène, avec quelques différences notables près de l'équateur et sur des zones particulières comme certains cratères ou gros cailloux. Les résultats sont en accord avec la classification de Bennu comme astéroïde de type B. L'étude des fractures observées sur les roches de Bennu a permis de confirmer le rôle de la fatigue thermique et d'élucider l'origine du régolithe.

La mission Gaia (Esa) a poursuivi sa moisson de données, et la dernière "Data Release 3" de 2022 contient l'astrométrie et le spectre en réflectance de plus de 60 000 petits corps du Système solaire, dans toutes les familles (astéroïdes, comètes, Troyens, Centaures, et objets Trans-Neptunien). Ces données ont permis de faire des études statistiques sur un échantillon homogène, révélant ainsi en particulier les effets du vieillissement spatial sur les astéroïdes de type S. Gaia a aussi permis de faire des avancées majeures dans la prédiction des occultations stellaires, en améliorant à la fois la précision du catalogue stellaire et des orbites des petits corps. Ainsi de nombreuses campagnes de suivi d'occultation, du sol comme de l'espace (notamment par le satellite Esa Cheops), ont pu être effectuées. Une de ces campagnes a permis la découverte d'anneaux autour de l'objet Trans-Neptunien Quaoar par une équipe internationale avec une forte implication française.

Les mesures de gravimétrie par effet Doppler sur les communications radio de la sonde Juno ont aussi permis de caractériser la dynamique de l'atmosphère de Jupiter. Son radiomètre micro-onde a révélé que les espèces condensables comme l'ammoniac ne sont pas distribuées uniformément dans l'atmosphère de Jupiter, même quand elles sont entièrement vaporisées. La mise en évidence d'éclairs peu profonds, là où l'eau devrait

être sous forme solide, corrélés avec l'abondance d'ammoniac a permis de mettre en évidence le rôle très important des orages liés à la formation de grêle d'ammoniaque qui fournit un mécanisme efficace de transport vers le bas de ces éléments lourds. D'autres résultats sur le champ magnétique de Jupiter sont décrits dans le rapport du groupe SHM. Les observations avec le JWST ont aussi permis de mettre en évidence un jet étroit autour de l'équateur dans la basse atmosphère (pressions de 100-200 mbar) de Jupiter.

JWST et Juno ont permis de mieux caractériser les propriétés thermiques, la composition de surface et les aurores des satellites Galiléens, notamment Europe et Ganymède. Ces résultats participent également à la préparation de la mission Juice qui opérera dès 2031 (Esa).

### 1.1.3 SUR LA QUESTION DES ENVIRONNEMENTS HABITABLES

Les résultats de la sonde Hayabusa 2 reviennent à la une sur cette question avec la caractérisation de la matière organique de l'astéroïde Ryugu. Une analyse préliminaire de la composition chimique de tous les grains récoltés a été faite depuis début 2021 au Japon à l'aide du microscope infrarouge hyperspectral MicrOmega de conception française, le jumeau de celui embarqué sur l'atterrisseur Mascot (Fig. 2). Cette analyse a notamment permis de détecter des centaines d'inclusions de carbonates, de quelques dizaines à quelques centaines de microns en taille. Ces carbonates se sont formés seulement quelques millions d'années après le début de la formation du Système solaire, soit par fusion de la glace de CO<sub>2</sub>, soit par altération de molécules organiques, riches en carbone.

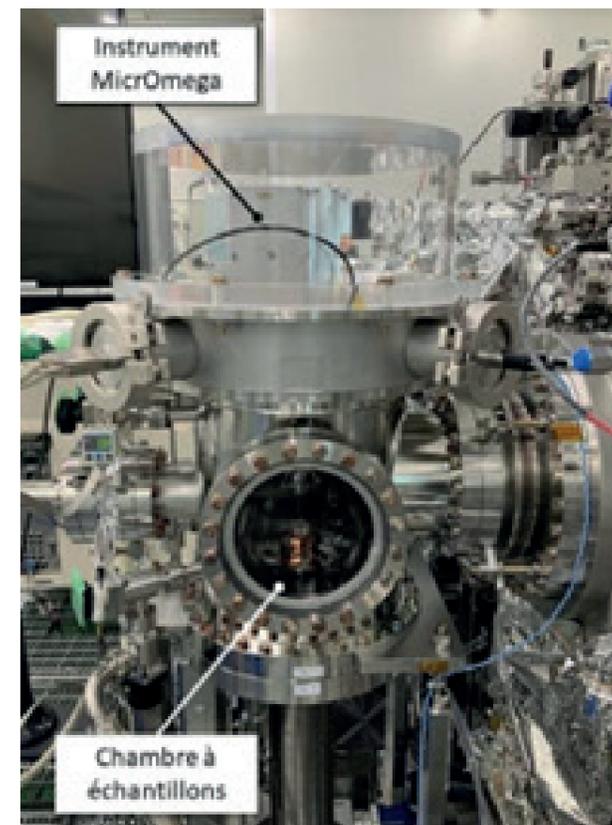


Fig. 2. L'instrument MicrOmega de Hayabusa 2 installé dans la salle de curation de la Jaxa

Mars Express (Esa ; PI-ship français du spectro-imagier Omega), grâce à deux décennies d'accumulation de données, a produit les premières cartes globales complètes et à haute résolution concernant les minéraux hydratés et leur teneur en eau sur Mars. Les résultats des rovers Curiosity et Perseverance de la Nasa (co-PIship français de ChemCam et SuperCam, instruments de spectrométrie Libs puis Libs/Raman/IR) sont discutés en détail dans le rapport du groupe E2P2.

Enfin les données collectées par la sonde Cassini (Nasa, 2004-2017) sont encore source de résultats. Elles ont notamment permis d'établir la présence d'un océan d'eau liquide sous la croûte glacée de Mimas et ont confirmé l'existence d'anomalies thermiques sur Encelade, au-delà même de sa région polaire Sud. Les observations de Titan aident à mieux comprendre sa météorologie et contribuent à préparer la future mission vers cet autre monde-océan, la mission Dragonfly (Nasa), dans laquelle la France est impliquée scientifiquement et instrumentalement (livraison du chromatographe de l'instrument DraMS).

## 1.2 BILAN PROGRAMMATIQUE

Le bilan par rapport à la prospective du groupe en 2019 est positif. Nous reprenons ici les anciennes priorités GTSS.

*Échantillons de Mars, de la Lune et de quelques petits corps.* Le programme de retour d'échantillon est en plein essor, avec

(i) **MSR** (récolte d'échantillons martiens) en cours dans le cadre d'une collaboration Nasa-Esa, mais qui souffre actuellement d'importants surcoûts et problèmes techniques et risque d'être retardé avec un retour d'échantillon au-delà de 2035

(ii) **MMX** (échantillons de la lune martienne Phobos) avec la finalisation et l'envoi à la Jaxa du ro-

ver IDEFIX de fabrication franco-allemande et du spectro-imageur infrarouge français MIRS, pour un lancement en 2026

(iii) les échantillons lunaires de la région du Mons Rümker récoltés par la mission **Chang'E5** de la CNSA, dont un don de 1,5 g a été fait à la France par la Chine, et

(iv) les échantillons des astéroïdes Ryugu et Bennu. *Mise en programme d'une mission vers Uranus et Neptune.* Une telle mission n'a pas encore été formellement approuvée, mais elle est inscrite dans le Decadal Survey de la Nasa et Voyage 2050 de l'Esa. La communauté se mobilise sur cet objectif (voir Section 2).



**Fig. 3.** Gauche : Photo prise par une caméra à bord de la sonde **Juice** quelques heures après son lancement le 14 avril 2023. On y distingue une partie de l'instrument MAJIS (PI-ship français). Droite : vue d'artiste de la sonde **EnVision** qui sera en orbite autour de Vénus dans les années 2030.

*Étude de Vénus et de son climat.* L'adoption par l'Esa de la mission **EnVision** (Fig. 3) en janvier 2021 répond à cette priorité. La France est très investie dans cette mission, avec le PI-ship de l'expérience de Radio Science et du canal UV du spectromètre embarqué. La mission **EnVision** sera accompagnée de deux missions Nasa complémentaires, **Veritas** (qui intègre du « hardware » fourni par le Cnes et des co-I français) et **DaVinci+** (participation scientifique). Les missions **Veritas** et **EnVision** reprendront la cartographie de la surface de Vénus là où la mission **Magellan** (1990-1994) l'a laissée mais avec une résolution accrue grâce à des radars imageurs nouvelle génération dotés de capacités interférométriques. L'un des principaux objectifs de ces missions est d'apporter la preuve irréfutable d'un

volcanisme contemporain sur Vénus. **DaVinci+** effectuera un sondage de l'atmosphère avec des analyses de sa composition chimique et isotopique.

*Étude de la différenciation des corps.* La mission **Psyche** (Nasa) dans laquelle la France a une participation scientifique, permettra d'étudier, pour la première fois, un astéroïde avec une forte composante métallique et dont la véritable nature demeure mystérieuse à la lumière des observations depuis le sol. La mission **Juice** lancée en 2023 (Fig. 2), étudiera les propriétés du noyau de Ganymède, un satellite glacé entièrement différencié.

*Structure interne des lunes et petits corps.* Elle sera l'objectif de la mission **Hera** de l'Esa qui étudiera à

partir de 2026 les conséquences de l'impact de la sonde **Dart** (Nasa) sur le satellite Dimorphos de l'astéroïde Didymos. L'impact a généré un grand nuage de poussières et a engendré une diminution de 33 minutes de la période orbitale de la lune, initialement de 11,92 heures. **Hera** permettra de mesurer la masse de Dimorphos et de déterminer la taille du cratère, le transfert de moment linéaire dû à l'impact, et l'éjection des poussières et de caractériser la structure interne aussi par sondage radar. La mission **Juice** va aussi sonder la structure interne d'Europe et Ganymède.

*Magnétosphère des lunes et petits corps.* Elle sera un des objectifs scientifiques de la mission **Comet Interceptor** approuvée par l'Esa, et en particulier des instruments à responsabilité française COMPLIMENT et LEES (voir rapport du groupe SHM). La mission **Juice** étudiera la magnétosphère de Ganymède, le seul satellite à avoir un champ magnétique propre.

*Opportunités pour instruments sur étagère dans le cadre des nouvelles missions lunaires.* L'instrument français DORN, du fait de sa simplicité, a été financé par le Cnes pour la mesure du dégazage du

Radon de la surface lunaire à bord de l'atterrisseur chinois **Chang'E 6** en juin 2024. Le modèle de recharge du sismomètre français Seis pour **InSight** a été adapté et fourni au JPL (Jet Propulsion Laboratory) pour un déploiement lunaire en 2025 sur une mission **CLPS**, ce qui réaffirme le leadership Français sur les capteurs de sismologie planétaire.

La prospective 2019 ne faisait pas de recommandations sur deux missions Esa, considérées comme acquises : **BepiColombo** et **ExoMars/Rosalind Franklin**. La sonde **BepiColombo** poursuit actuellement son voyage, avec une insertion orbitale autour de Mercure prévue en décembre 2025. Au cours des dernières années, plusieurs survols de la Terre, de Vénus, et de Mercure, ont permis de tester les instruments à bord à responsabilité ou co-responsabilité française (Phebus, Simbio-sys, Pep et MPPE). A l'inverse, la mission **ExoMars** a dû être reportée à 3 mois de son lancement prévu en sept. 2022, à cause de l'arrêt de toute collaboration Esa-Roscosmos, par suite de l'invasion de l'Ukraine par la Russie. L'Esa envisage un partenariat avec la Nasa pour un scénario de lancement estimé à 2028.

## 2. PROSPECTIVE

Nous ne revenons pas ici sur les missions en cours ou engagées (voir section 1.2) et présentons seulement les nouvelles idées de mission, selon les questions scientifiques auxquelles elles apportent une réponse. Ces nouvelles idées de mission ont fait l'objet de réponses à l'appel à idées préparatoire à ce SPS. Pour simplifier, on présentera chaque mission par la question principale qu'elle adresse, même si certaines sont aussi pertinentes pour les autres questions de la discipline.

### 2.1 SUR LA QUESTION DES ORIGINES

La priorité majeure sur cette question est une mission vers Uranus ou Neptune, prioritairement avec sonde de rentrée atmosphérique. L'origine de ces planètes, caractérisées par une atmosphère d'hydrogène et d'hélium bien moins massive que celles de Jupiter ou Saturne, reste mystérieuse. Pourtant, elles sont les plus semblables aux planètes les plus

communes dans les systèmes extrasolaires, appelées justement « mini-Neptunes ». Pour comprendre leur origine, il est nécessaire de caractériser leur structure interne, par le biais de cartographies du champ gravitationnel et du champ magnétique, mais aussi par des observations d'astérosismologie lors de la phase d'approche. La mesure de la composition atmosphérique par une sonde de rentrée de type Galileo permettrait de déterminer les enrichissements des différents éléments volatiles (eau, carbone, azote, gaz rares, ...) ainsi que leur composition isotopique par rapport au Soleil, et comparer ces résultats à ceux obtenus pour l'atmosphère de Jupiter. Les observations IR et UV de la haute atmosphère à partir de l'orbiteur permettraient aussi de mesurer sa composition et d'observer la dynamique des vents et des nuages. Lors de son dernier Planetary and Astrobiology Decadal Survey en 2022, la Nasa a émis comme priorité une future mission de type Flagship vers Uranus. Il serait souhaitable que l'exploration d'Uranus soit réalisée

dans un cadre de collaboration Nasa/Esa, peut-être avec l'Esa prenant à charge la sonde atmosphérique, selon l'exemple Cassini/Huygens. Plusieurs instruments pourraient être développés par la communauté nationale pour cette sonde de rentrée ainsi que pour l'orbiteur (spectromètre de masse, TLS, néphélomètre, analyseur de poussières à impact, spectromètre submillimétrique, spectro-imageur Vis/Nir, spectro-imageur UV, récepteur radio haute fréquence, spectromètre à ions, analyseur d'électrons, imageur Doppler pour astérosismologie). Une sonde de rentrée atmosphérique aurait son intérêt aussi sur Saturne, peut-être couplée à une mission vers ses satellites glacés (voir sect. 2.2.3), mais elle est moins prioritaire qu'une sonde dans Uranus, car nous avons déjà des informations partielles sur la composition de l'atmosphère saturnienne.

Une priorité substantielle serait de caractériser les propriétés isotopiques d'une comète, par analyse *in situ* avec un atterrisseur et/ou un retour (cryogénique ou pas) d'échantillons, pour placer ces objets dans le cadre de la dichotomie isotopique entre les météorites carbonées et non-carbonées. L'analyse chimique et isotopique *in situ* d'une comète de la ceinture principale serait aussi importante pour comprendre si ces objets sont des comètes capturées ou des astéroïdes primitifs ayant conservé une partie de leur glace primordiale, contrairement aux corps parents des météorites. Une priorité moindre, mais néanmoins importante, est de continuer la récolte d'échantillons d'astéroïdes, commencée par les missions **Hayabusa 1** et **2** et **Osiris-REx**, mais en se concentrant sur des objets de la ceinture principale, plus primordiaux qu'un géocroiseur, et ayant des propriétés spectrales qui ne les lient pas a priori à des météorites connues. La récolte de poussières interplanétaires dans la stratosphère terrestre par ballon a aussi son intérêt pour échantillonner statistiquement astéroïdes et comètes.

Le retour d'un échantillon de l'atmosphère de Vénus est également une priorité, pour pouvoir comparer l'abondance et les propriétés isotopiques des éléments volatils, notamment les gaz rares, ce qui donnerait les premières indications sur la composition de Vénus par rapport à la Terre.

## 2.2 SUR LA QUESTION DE L'ÉVOLUTION ET DES PROPRIÉTÉS DES CORPS

Une priorité substantielle est de mieux caractériser la structure interne de la Lune, et particulièrement sous sa face cachée, par un réseau sismique. Pour ce faire, il faudra saisir les opportunités offertes par les nombreux futurs atterrisseurs lunaires, habités ou pas (CLPS, Artemis, Argonaut, missions CNSA, Jaxa, ...). Les sismomètres devront avoir une longue durée de vie pour pouvoir travailler en réseau, tout en étant déployés à des époques différentes. Le développement de la nouvelle génération de sismomètres, les Very Broad Band (VBB) senseurs optiques, plus sensibles que les VBBs actuels dont le stock est proche de l'épuisement, devient donc une urgence, en dépit des difficultés à trouver un partenaire industriel fiable. Toujours dans le contexte lunaire, il serait intéressant de caractériser le régolithe lunaire et la subsurface aussi profondément que possible par radar de pénétration de sol, ainsi que ses propriétés chimiques à l'aide d'un  $\mu$ LIBS. Ces deux instruments devraient être embarqués sur un rover pour couvrir une zone large. Dans le cadre du renouveau d'intérêt général scientifique et exploratoire pour la Lune, les opportunités ne devraient pas manquer. Pour l'origine de l'exosphère lunaire, il est important d'attendre les résultats sur l'échappement du Radon par l'instrument Dorn sur **Chang'e 6** avant de statuer sur l'intérêt de poursuivre l'étude dans le cadre d'une mission de longue durée. La mesure quantitative de la glace et de l'hydratation des pôles de la Lune a également un intérêt pour mieux contraindre l'apport de volatils au cours du temps dans le Système solaire interne.

Une autre priorité est de profiter de l'opportunité unique du passage de l'astéroïde Apophis près de la Terre, qui devrait générer des séismes par forces de marée sur l'objet. Ces séismes, potentiellement détectables par des géophones intégrés dans des atterrisseurs au format CubeSat, permettront de caractériser la structure interne de ce géocroiseur typique. Si dotée de géophones, la mission **Ramses** proposée à l'Esa est donc une priorité substantielle. Une mission dotée seulement d'un radar, comme la mission **Droid** de la Nasa ou **Ramses** sans la partie géophones, serait moins prioritaire car le sondage radar d'astéroïdes peut être réalisé sur tous petits corps et ne nécessite pas un passage rapproché à la Terre.

Enfin, la structure interne de Vénus mériterait d'être caractérisée par sismologie, soit par le biais d'un ballon atmosphérique sensible à la propagation des ondes sismiques dans l'atmosphère, soit en monitorant les « airglows » issus des séismes par (nano)-satellites, peut-être même en "piggy back" sur **EnVision**. Ces deux techniques ont déjà fait leurs preuves sur Terre.

## 2.3 SUR LA QUESTION DES ENVIRONNEMENTS HABITABLES

Commençons par rappeler que la première des priorités est de finaliser le programme MSR du retour d'échantillons martiens, commencé par la mission **Perseverance**, et de porter enfin la mission **ExoMars/Rosalind Franklin** sur Mars.

Concernant les missions nouvelles, la priorité majeure est celle de l'exploration d'Encelade, une lune glacée de Saturne qui présente des caractéristiques « habitables » (un océan liquide en sous-surface en contact avec la partie rocheuse du satellite, en présence d'hydrothermalisme). Ce satellite est désormais la cible de la mission L4 de l'Esa dans le cadre du programme Voyage 2050. Elle est également priorisée comme cible dans une 2ème Flagship Nasa par la *Decadal* américaine « Origins, Worlds, and Life » paru en 2023. Il s'agira de caractériser l'activité, l'habitabilité et le potentiel exobiolo-

gique de ce satellite, objectifs qui nécessiteront des instruments à la fois de télédétection, de géophysique et d'analyse *in situ*. Le Cnes doit s'assurer du maintien des filières instrumentales françaises d'excellence pouvant potentiellement embarquer sur une telle mission : sismomètre, radar sondeur, spectromètre IR, spectromètre submillimétrique hétérodyne, analyseur de poussières, un mini-laboratoire (possiblement microfluidique) doté de plusieurs méthodes d'analyse (e.g. nouvelle génération IR, Raman et LIBS in-situ, nouvelle génération GC-MS, HRMS).

Une priorité substantielle est aussi l'analyse *in situ* de la matière organique provenant de l'intérieur de Cérés (planète naine et ancien monde océan), à la recherche d'une chimie organique pré-biotique et aqueuse soumise à des conditions physico-chimiques possiblement plus proches de la Terre ou Mars que des petits corps.

Au gré de possibles futures missions d'opportunités y compris portées par des acteurs hors Nasa et Esa, d'autres corps riches en eau et en matière organique pourraient être visités *in-situ* et constitueraient une priorité de la thématique. S'agissant de Mars, d'autres opportunités pourraient être considérées telle une mission drone de la Nasa ou le programme de retour d'échantillons chinois **Tianwen-3**.

## 2.4 SYNTHÈSE SUR LES CONCEPTS DE MISSION RECOMMANDÉES.

Objectif	Priorité	Question	Exemple de cadre/concept
Uranus	Majeure	Q1/Q2	Decadal. Collaboration NASA-Esa Contribution européenne sonde rentrée
Encelade /Titan	Majeure	Q3/Q1/Q2	Decadal, Voyage2050 L4
Sismologie lunaire	Substantielle	Q2	SPSS, Mission ISRO, Argonaute
Structure d'Apophis	Substantielle	Q2	RAMSES, DROID
Retour d'échantillon cométaire	Substantielle	Q1	Collaboration NASA-Esa (Caesar, Corsair)
Comètes de la ceinture principale	Substantielle	Q1	Ex. Castalia
Cérés	Substantielle	Q3	Ex. Calico, NASA New Frontier
Retour d'échantillon de l'atmosphère Vénus	Subst/Modérée	Q1	Ex. Vatmos
Propriétés du régolithe lunaire	Modérée	Q2	Radar sondeur ou $\mu$ LIBS sur rover (Rashid2?)
Sismologie Vénus	Modérée	Q2	Ballons Nasa our airglow par nanosat (piggyback EnVision?)
Echappement atmosphérique sur Vénus	Modérée	Q2	Mission type MAVEN
Sonde de rentrée dans Saturne	Modérée	Q1	En combinaison avec mission ESA L4?
Échantillons d'astéroïdes non associés aux météorites	Modérée	Q1	?
Récolte de poussières astéroïdales/cométaires	Modérée	Q1	BESAFE/STRATOPART
Distribution matière organique sur Mars	Modérée	Q3	Par drone (NASA) ou opportunité (Tianwen-3)

## 2.5 LE DÉVELOPPEMENT INSTRUMENTAL

La contribution du Cnes aux missions d'exploration du Système solaire s'exprime essentiellement par la fourniture d'instruments. Il est donc important que le Cnes puisse financer au bon niveau la recherche instrumentale afin de développer des nouveaux concepts, les faire évoluer en TRL jusqu'à leur implémentation finale sur des missions spatiales, mais aussi maintenir les filières instrumentales dont l'excellence a déjà été prouvée, pour conserver l'expertise et améliorer sans cesse les performances. Des missions d'acteurs émergents du spatial peuvent également présenter l'opportunité de faire mûrir ces concepts. Nous passons ci-dessous en revue les filières d'excellence instrumentales mais aussi les nouvelles filières intéressantes à développer.

### 2.5.1 Filières d'excellence française en planétologie spatiale :

*Sismologie hautes performances* : La sismologie large bande avec un capteur de hautes performances a démontré son intérêt scientifique dans le cadre de l'instrument Seis à bord d'**InSight**. La prochaine génération d'instruments à large bande passante repose sur un capteur à base d'interférométrie optique spécifiquement développé pour les objets sans atmosphère, la Lune en particulier. Des capteurs avec de tels niveaux de performances n'ayant pas d'équivalent à l'international, ils permettraient de garder un leadership international sur la sismologie planétaire.

*Spectro-imageurs IR et UV* : Les missions d'exploration vers le Système solaire externe rendent difficile l'implémentation d'instruments de spectroscopie de grande masse (type Majis). Des solutions innovantes sont à creuser permettant une compacité accrue de ce type d'instrument, et/ou une augmentation de la gamme spectrale (avec e.g. des instruments cumulant UV et proche IR, ou un instrument IR allant dans l'IR plus lointain, type Mirs). Des implémentations à la fois pour des mesures orbitales et in-situ sont à maintenir.

*Radars sondeurs* : En attendant les premières mesures radar à bord du rover ExoMars au plus tôt en 2030, et dans un contexte où les opportunités de vols vers la Lune ou les petits corps se multiplient, l'enjeu est de maintenir le savoir-faire technique et

scientifique dans les laboratoires et de continuer à faire évoluer les concepts instrumentaux de type Wisdom/ExoMars ou Jura/Hera pour les rendre de plus en plus versatiles en termes d'objectifs scientifiques et adaptables à une grande variété de plateformes.

*Libs* : La technique du Libs ("Laser-Induced Breakdown Spectroscopy") a fait ses preuves sur Mars depuis 2012 (instruments ChemCam et SuperCam à bord de Curiosity et Perseverance). Le Libs permet d'obtenir la composition chimique des roches autour des rovers, jusqu'à une dizaine de mètres, pour une zone d'analyse submillimétrique (< 500 microns). L'objectif des prochaines années est de miniaturiser encore plus cette technique, de réduire la taille d'analyse à 50  $\mu\text{m}$ .

*Méthodes d'analyse chimique in situ* : L'expérience acquise montre que la matière organique n'est que peu abondante à la surface de nombreux corps du Système solaire. Par conséquent, des techniques de pré-concentration et pré-identification doivent être intégrées en amont d'analyses plus complexes par GC, HPLC, HRMS. Le développement de la spectrométrie de masse très haute résolution du type Orbitrap, soutenu depuis de nombreuses années par le Cnes, doit continuer jusqu'à sa démonstration sur mission spatiale.

*Microphone* : L'important retour scientifique du microphone associé à l'instrument SuperCam sur la mission **Perseverance** ouvre la question de l'emploi de ces instruments sur les missions déployées dans les atmosphères planétaires (Mars, Vénus, Titan) par différentes plateformes (drones, rovers, atterrisseurs, ballons).

### 2.5.2 Nouvelles Filières

*Géophones* : Les capteurs sismologiques courtes périodes de type géophones sont actuellement considérés pour déterminer la structure de sub-surface des corps sans atmosphère (Lune, astéroïdes, lunes glacées). Les équipes françaises travaillent actuellement à la qualification spatiale de plusieurs capteurs. Ces instruments seront donc à TRL élevé à la fin 2024 car portés par les projets **SPSS** (Nasa), **Ramses** (Esa).

*Néphélomètre* : Il s'agit de mesurer la concentration d'aérosols dans une atmosphère, la taille des parti-

cules et leur typologie en mesurant l'angle de diffusion d'un rayon laser, une mesure jamais effectuée auparavant hors de la Terre. Ce type d'instrument est intéressant pour des sondes de rentrée atmosphérique proposées dans le cadre de missions vers Uranus, Saturne ou Vénus.

*Spectroscopie TeraHz/submm* : Des équipes françaises sont impliquées depuis de nombreuses années dans le développement de spectromètres TeraHz/submillimétriques hétérodynes miniaturisés pour cubesat. Au-delà des applications cubesat, une telle miniaturisation est d'un grand intérêt pour toute future mission spatiale.

*Spectroscopie IR in-situ* : Il apparaît crucial d'améliorer les performances et la miniaturisation des instruments in-situ. Cela inclut les filières existantes de spectroscopie infrarouge de contact (e.g. MicrOmega) ou de proche contact permettant la caractérisation locale (e.g. IRS-SuperCam). De nouvelles filières infrarouge in-situ sont à envisager telles la spectro-polarimétrie, les spectromètres FTIR ou la TLS-IR.

# EXOBILOGIE, EXOPLANÈTES, PROTECTION PLANÉTAIRE

Beaulieu Jean-Philippe, Boccaletti Anthony, Fray Nicolas, Mustin Christian (thématicien), Pilorget Cédric, Pisapia Céline, Quirico Eric, Schoepp-Cothenet Barbara, Selsis Franck, Szopa Cyril (président), Vuitton Véronique

En quelques années, la problématique de l'habitabilité des corps célestes de notre système solaire et des systèmes exoplanétaires découverts a donné naissance à des champs de recherches très féconds au sein de la planétologie, de l'astrophysique et de l'exobiologie. À partir d'observables à toutes échelles, astronomes, géologues, biologistes, physiciens et chimistes s'efforcent de comprendre l'évolution des systèmes planétaires et essaient d'en dégager les propriétés physiques et chimiques qui seraient favorables à l'apparition ou au développement de formes de vie. Aujourd'hui ce sont les bases systémiques de l'écologie planétaire et d'une « géographie » des habitats au sein des systèmes solaire et planétaires, qui sont posées (Fig. 1). Répondre à la question de l'habitabilité des corps célestes ou de l'existence présente ou passée de formes de vie extraterrestres exige de développer des stratégies et des méthodes de prospection et d'analyse de plus en plus sophistiquées. Les missions spatiales dédiées à l'observation et l'étude des exoplanètes ou à l'exobiologie sont un pilier de ces recherches. Complexes et audacieuses, elles sont souvent mises en œuvre dans un cadre international, principalement avec l'Esa, la Nasa et la Jaxa.

Grâce au Cnes et à sa politique de soutien à long terme, la France est aujourd'hui présente dans de nombreuses missions spatiales dédiées *pro parte* à l'étude de l'habitabilité d'exomondes et en position de leadership pour certaines. De même, l'In-su ainsi que d'autres instituts du CNRS (INC, INSB) ont un rôle fédérateur à jouer via leurs programmes nationaux et leurs actions thématiques dans cette recherche interdisciplinaire, couverte par le groupe Exobiologie, Exoplanètes et Protection Planétaire. La communauté scientifique française est fortement impliquée dans l'étude des grandes questions actuelles :

i. Quelle est la diversité des systèmes exoplanétaires et comment évoluent-ils ? Aujourd'hui, identifier de nouveaux systèmes planétaires

pour documenter leurs structures et leurs modes de formation, est un objectif partagé avec le groupe Astronomie et Astrophysique, avec l'ambition de rechercher des exoTerres et de contraindre les propriétés chimiques et physiques des atmosphères d'exoplanètes.

- ii. Quels environnements du système solaire sont favorables à l'apparition et l'épanouissement de formes de vie ? Ce questionnement central pour définir l'habitabilité de corps célestes, est abordé de manière transverse avec le groupe Système Solaire, afin de connaître les processus ayant forgé ces habitats et réuni les conditions d'émergence de formes de vie.
- iii. Comment identifier et qualifier les contaminations chimiques ou biologiques et les éviter dans le cadre de la protection planétaire ? Avec l'essor des missions de retour d'échantillons sur Terre, en particulier de Mars prochainement, il est nécessaire de développer des moyens de contrôle de la non-contamination et de détection agnostique de signes de vie.

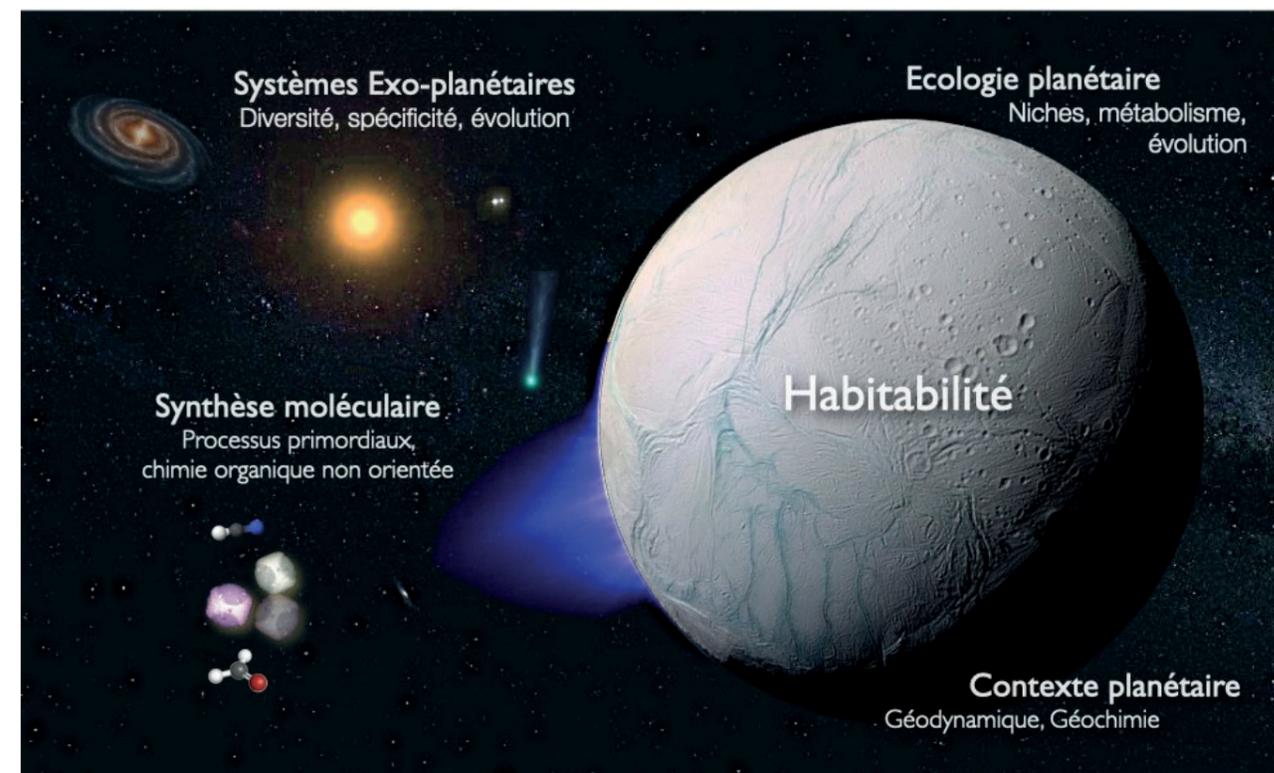


Fig. 1. L'habitabilité des corps célestes de notre système solaire et dans les systèmes exoplanétaires, un champ structurant dans le cadre programmatique du groupe Exobiologie, Exoplanètes et Protection Planétaire. Les observations à toutes échelles servent à comprendre l'évolution des systèmes planétaires et à identifier les déterminants physico-chimiques favorables à l'apparition ou au développement de formes de vie

## 1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LE SPS 2019

### 1.1 CADRE PROGRAMMATIQUE

La communauté « exobiologie et exoplanètes » française maintient sa forte implication dans les missions spatiales majeures européennes et internationales (Fig. 2) dédiées à l'étude de l'habitabilité et la recherche de vie dans le système solaire (rovers martiens **MSL**, **Mars2020** et **Exomars**, sonde **Juice** vers Jupiter, drone **Dragonfly** sur Titan...), et l'étude des exoplanètes (télescopes spatiaux **Cheops**, **Tess**, **JWST**, **Plato**, **Ariel**...).

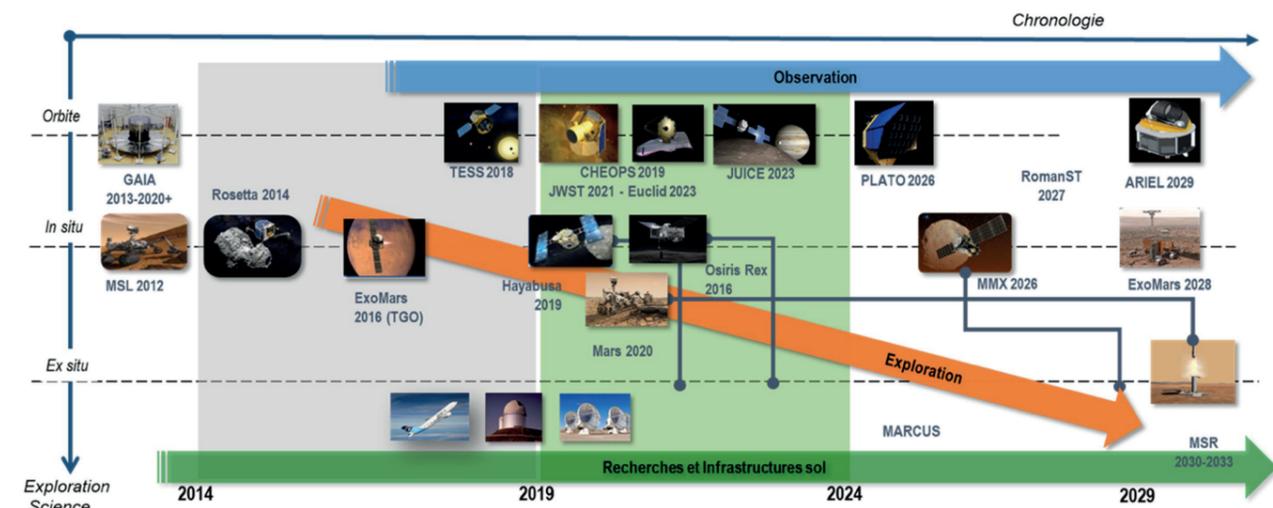
Depuis 2019, le programme européen s'est enrichi de deux missions actives avec le lancement et l'exploitation de **Cheops** pour l'observation d'exoplanètes et le lancement de **Juice** en 2023 pour l'étude du système de Jupiter, incluant des satellites glacés dont l'intérêt est devenu primordial pour l'exobiologie. Le lancement du rover de la mission **Exomars** prévu en 2022 a été reporté en raison de la rupture des collaborations entre l'Esa et l'agence spatiale russe. Il aura lieu d'ici la fin de la décennie avec le soutien de la Nasa. Les missions en développement **Plato** (2026) et **Ariel** (2029) et **Roman**

**Space Telescope** (Nasa, 2027) enrichiront la flotte des observatoires spatiaux d'exoplanètes, qui ont vu un renfort de poids arriver en 2021 avec le James Webb Space Telescope (**JWST**, Nasa/Esa/CSA) dont les premières observations ont déjà permis des découvertes spectaculaires.

Des équipes françaises sont également impliquées dans des missions majeures d'opportunité de la Nasa et de la Jaxa, que ce soit pour le développement et l'exploitation d'instruments ou l'apport de compétences clé pour la gestion *ex situ* d'échantillons. Depuis 2021, le rover Perseverance de la mission **Mars2020** arpente le cratère Jezero à la recherche des échantillons de roches les plus pertinents à ramener sur Terre vers 2040 par la mission Mars Sample Return (**MSR**). En parallèle, la préparation du retour d'échantillons de Mars ou Phobos a déjà débuté avec une forte implication de la France dans la définition des moyens de curation (Centre de curation National de Matières Extraterrestres, CNME) et de quarantaine (Marcus). Les contributions françaises à la curation et à l'analyse *ex situ* des échantillons d'astéroïdes carbonés apportés

par les missions **Hayabusa 2** (Jaxa) et **Osiris-Rex** (Nasa) assurent une montée en compétence de la communauté française dans ce domaine. Enfin, les contributions instrumentales de la France aux missions **MMX** (Jaxa) pour l'exploration de Phobos, Deï-

mos et de Mars, et de la mission **Dragonfly** (Nasa) pour la surface de Titan sont respectivement finalisées et grandement avancées.



**Fig. 2. Chronologie des missions d'intérêt pour l'exobiologie et les exoplanètes en fonction du type d'exploration scientifique.** Tendances stratégiques d'exploration (1) - Poursuite mission d'exploration des exoplanètes depuis l'espace, (2) - déploiement de missions de collecte *in situ* et d'analyse *ex situ* (3) soutien des moyens SOL : astro-physique et chimie de laboratoire, grands télescopes (VLT, Alma...) et dispositifs de quarantaine

## 1.2 AVANCÉES PRINCIPALES PAR THÈME

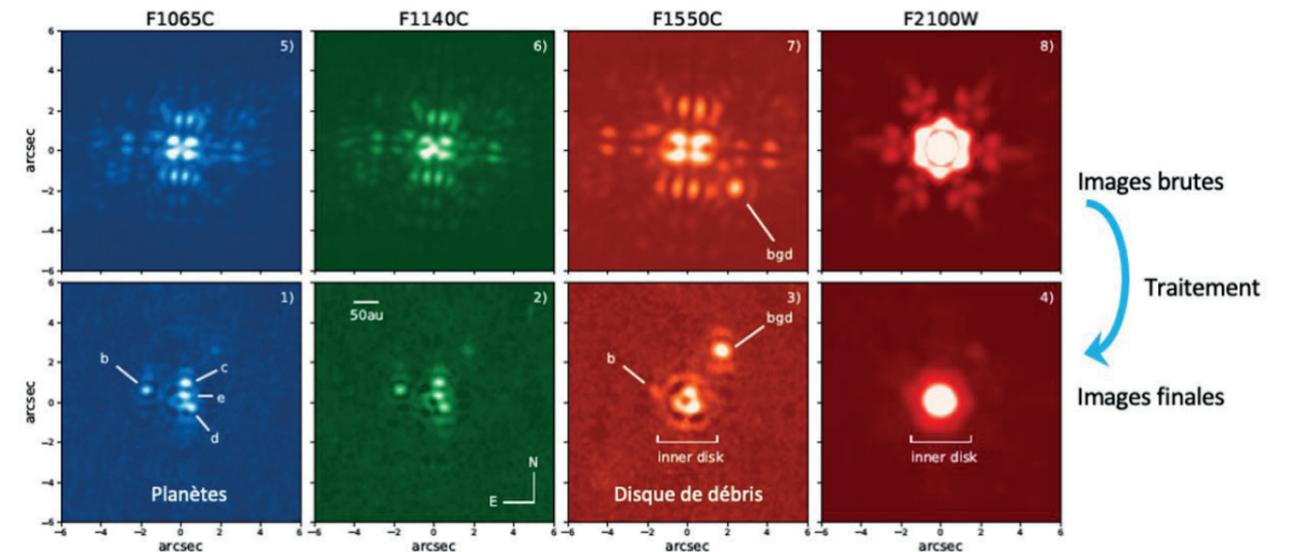
### 1.2.1 LES SYSTÈMES EXOPLANÉTAIRES

La détection des exoplanètes initiée il y a près de 30 ans se poursuit aujourd'hui par la découverte d'environ 200 exoplanètes par an et la caractérisation de la taille et la masse, et le sondage des atmosphères d'une partie d'entre elles. Ce travail s'effectue en exploitant la complémentarité des observations depuis le sol et l'espace.

Dans ce cadre, le télescope de l'EsA **Cheops**, en opération depuis 2020, poursuit sa tâche spécifique d'observations précises de transits de systèmes d'exoplanètes connues en complément des observations sol en spectroscopie haute résolution. Ses observations ont permis de préciser le rayon de plusieurs dizaines d'exoplanètes, d'affiner l'architecture des systèmes d'exoplanètes observés, et récemment d'effectuer la détection d'une planète hors norme : LTT9779b. Surnommée la « Neptune ultra-chaude », elle se distingue par une température de surface de 2000 °C et la présence

de nuages métalliques contribuant à la réflexion de 80 % de la lumière provenant de l'étoile. La mission a été étendue jusqu'en 2026 au moins.

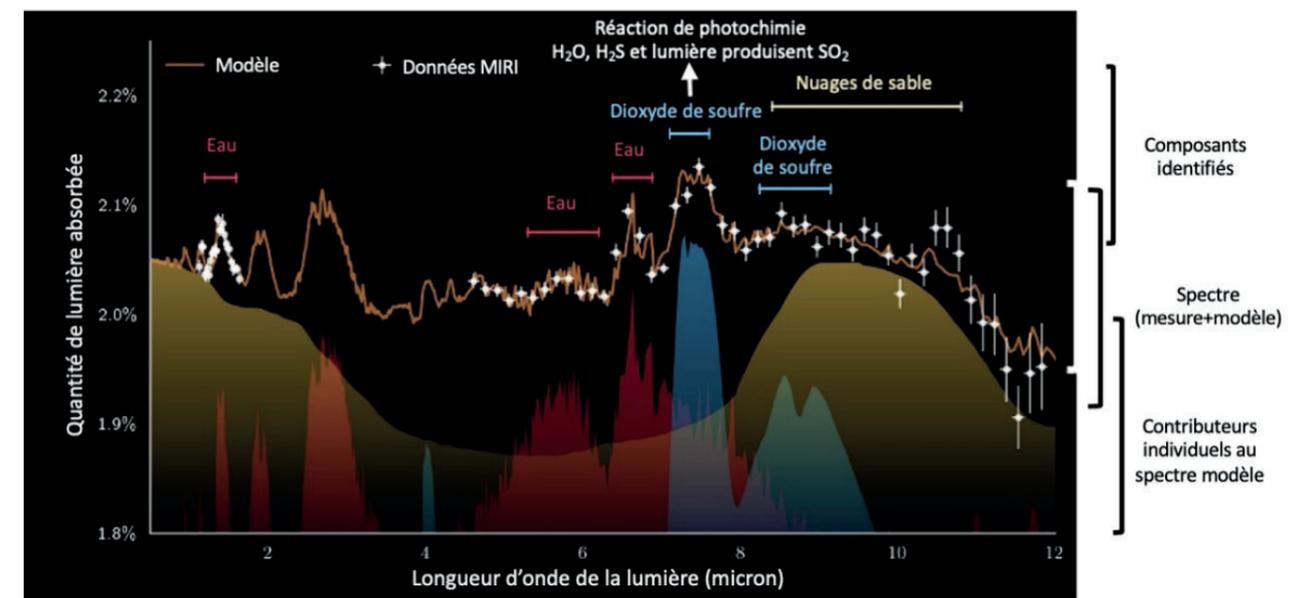
Mais la révolution récente dans l'observation spatiale des exoplanètes a été obtenue grâce au **JWST**. Le télescope a fini sa phase de déploiement en 2022, avec à son bord une suite d'instruments incluant Miri, dont l'imageur et son mode coronographique, conçus par une équipe française, montrent des performances en vol dépassant les prévisions. Miri permet également l'observation d'exoplanètes en photométrie et en basse résolution spectrale, particulièrement adaptée à l'étude des transits. Les premiers résultats publiés cette dernière année sont spectaculaires. En coronographie, l'observation du système HR8799 dans le domaine IR moyen a permis les premières détections des quatre planètes géantes en formation, et d'imager pour la première fois le disque interne de poussières (Fig. 3).



**Fig. 3. Observation par l'instrument Miri en mode coronographie du système HR8799 montrant 4 planètes et le disque interne de poussières.**

Quant aux observations du Jupiter chaud WASP-39b en transit, elles marquent réellement l'entrée dans une nouvelle ère d'étude des exoplanètes, avec la première détection nette de CO<sub>2</sub> dans son atmosphère, et la mise en évidence de SO<sub>2</sub> créé par

photochimie. De manière similaire, l'observation de l'exoplanète WASP-107b révèle la présence de vapeur d'eau, de silicates et de SO<sub>2</sub> photochimique dans l'atmosphère de cette planète chaude (Fig. 4).



**Fig. 4. Spectre infrarouge reconstitué de l'atmosphère de l'exoplanète WASP-107b** (Neptune chaude) à partir de mesures faites par l'instrument Miri du télescope spatial James Webb. Outre la mise en évidence de nuages de sable (silicates) produits dans l'atmosphère, cette observation met pour la première fois en évidence l'existence d'une photochimie par la détection de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>).

Au-delà, plusieurs missions fondamentales (télescopes spatiaux) dans lesquelles la communauté française est impliquée, notamment pour la fourniture de parties d'instruments avec l'appui du Cnes, sont en cours de développement : i. **Plato** pour

améliorer le niveau de détection de petites planètes autour des étoiles de types solaires et la mesure des masses et rayons, ii. **Ariel** pour étudier de façon cohérente, du domaine visible à l'IR moyen, les atmosphères d'une population de planètes

géantes et sous-géantes, chaudes à tempérées, mini-Neptunes et les super-Terres chaudes et iii. **Roman-ST** pour améliorer la statistique des planètes rocheuses en abaissant le seuil de détection à des exoplanètes de la masse de Mars sur des orbites de 0,5 UA de rayon.

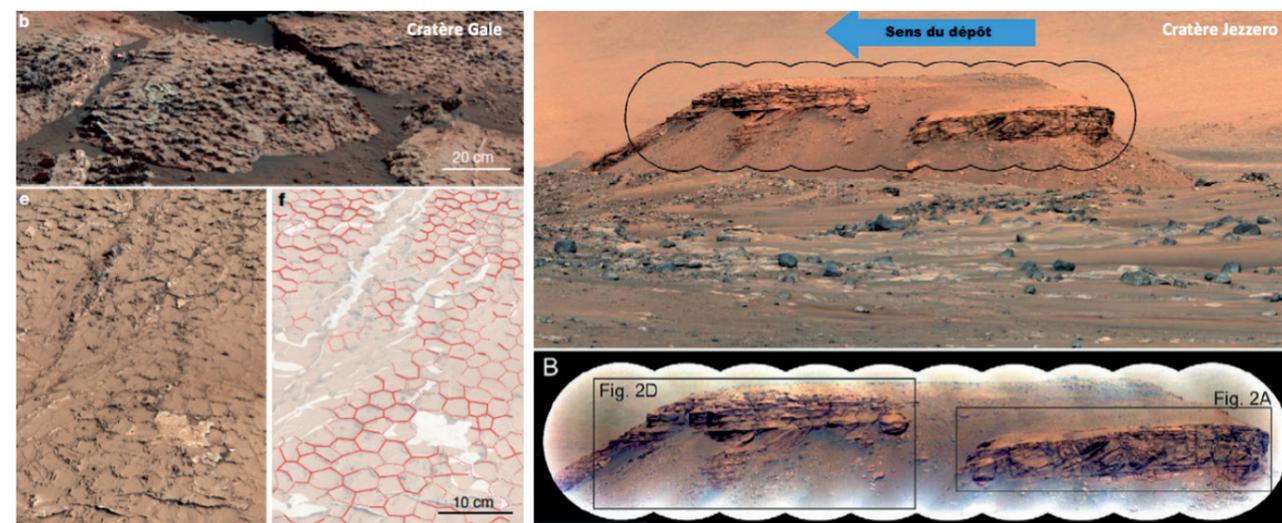
## 1.2.2 EXPLORATION DE MARS POUR L'EXOBILOGIE

Mars reste aujourd'hui l'objet du système solaire d'intérêt majeur pour l'exobiologie car c'est la seule planète du système solaire ayant connu des conditions de surface semblables à celles de la Terre à une période où la vie terrestre existait déjà.

En complément des observations en orbite menées par le Trace Gas Orbiter (**TGO**), le rover Curiosity de la mission **MSL**, explore le cratère Gale à la surface de Mars depuis 2012. Ces dernières années, il a poursuivi son ascension du mont Sharp en traversant notamment la vallée « Glen Torridon » riche en minéraux hydratés et en argiles déjà détectées en aval et depuis l'orbite, puis plus récemment en franchissant la limite stratigraphique entre les terrains argileux et ceux riches en sulfates. Les analyses effectuées, notamment par l'instrument franco-américain ChemCam montrent que cette limite est représentative d'un changement climatique majeur dans l'histoire de Mars avec une transition progressive d'un climat humide à aride. En effet, la morphologie des dépôts observés indique une progression cyclique, voire saisonnière, avec des successions de périodes humides et de

périodes sèches (Fig. 5). Cette alternance pourrait être favorable à une chimie prébiotique et au développement de formes de vie et atteste de l'habitabilité passée du cratère Gale. De plus, la présence de matière organique mature (ayant évolué avec le temps) et de faibles quantités de molécules organiques soufrées détectées dans ces terrains par l'instrument SAM (qui inclus un chromatographe français), indiquent l'existence passée de composés chimiques élémentaires transformés dans les conditions drastiques régnant à la surface de Mars depuis 3 Gans.

De son côté, le rover Perseverance documente le contexte géologique des sites de prélèvement et les dépôts échantillonnés. Ainsi, la caractérisation géomorphologique et géochimique de la butte de Kodiak et des reliefs par l'instrument franco-américain SuperCam a mis en évidence une alternance de couches sédimentaires caractéristiques d'un type de système deltaïque lacustre (Gilbert). Les mesures géochimiques ont, quant à elles, mis en évidence des roches essentiellement ignées (roches magmatiques) très peu altérées dans le fond du cratère. En revanche, sur le front du delta et au cours de sa traversée vers la « Marginal Unit », Perseverance a rencontré et collecté des roches composées d'argiles riches en sels ou parfois associés à des carbonates ou des phosphates. Toutes ces mesures, dont un grand nombre ont été réalisées par l'instrument SuperCam, attestent du caractère habitable passé du cratère Jezero.



**Fig. 5. Images d'environnements des cratères Gale (à gauche) et Jezero (à droite) mettant en évidence des structures polygonales formées par une alternance de périodes humides et sèches et la structure sédimentaire de la butte Kodiak caractéristique de deltas lacustres (Gilbert).**

Enfin, l'intégration et les tests du rover « Rosalind Franklin » de la mission **Exomars** et de ses instruments avec fortes contributions françaises ont été achevés en 2021. Toutefois, en 2022, le contexte géopolitique a conduit à l'arrêt de la collaboration entre l'Esa et Roscosmos qui était en charge du lancement, de deux instruments du rover et de la plateforme d'atterrissage. Une reconfiguration de la mission en partenariat avec la Nasa visant à déposer le rover sur Mars dans la région d'*Oxia Planum* début 2031 a été acceptée lors de la conférence ministérielle de l'Esa de 2022. En dépit de ces changements, l'intérêt scientifique du rover a été réaffirmé, notamment en raison de sa capacité à sonder la subsurface pour y rechercher des traces de vie et des biosignatures non altérées. Les contributions instrumentales françaises restent capitales pour décrire le site de collecte (Wisdom, Clupi) et déterminer *in situ* la composition chimique et minéralogique d'échantillons « frais » prélevés en profondeur (Micromega, Moma et RLS).

## 1.2.3 MONDES OCÉAN : LES NOUVEAUX MONDES HABITABLES ?

La découverte récente sur des lunes de Saturne ou Jupiter, comme Encelade ou Europe, de l'existence probable d'océans d'eau liquide profonds, d'une chimie organique et de sources d'énergie thermique générées par les forces de marée, positionne des zones habitables dans le système solaire externe. Ces objets de taille modeste sont devenus des cibles prioritaires pour l'étude des milieux habitables du système solaire et la recherche de vie. Mis en avant lors du dernier SPS du Cnes, les cinq dernières années ont vu la mise en place des premières missions qui leur sont spécifiquement dédiées.

En premier lieu, la mission **Juice** a été lancée en 2023 pour une insertion en orbite de Jupiter en 2031. Les équipes françaises apportent une contribution significative aux instruments de la sonde, notamment sur le spectro-imageur Majis sous responsabilité française. **Juice** vise à étudier l'habitabilité de satellites joviens (Ganymède, Europe et Callisto) en cartographiant les propriétés physiques et la composition chimique de la surface/sous-surface des satellites et en suivant leur évolution au cours de la mission. **Europa Clipper**, mission « Flagship » de la Nasa, sera lancée fin 2024 pour une insertion en orbite de Jupiter en 2030. Des équipes françaises sont impliquées scientifiquement dans trois instruments qui servi-

ront à caractériser les échanges de matière depuis l'océan profond jusqu'à l'exosphère d'Europe, et de connaître le potentiel exobiologique des mondes océan ; des informations très utiles pour la définition de futures missions d'exploration *in situ* de leur surface et sub-surface.

De plus, pour préparer l'exploration de la surface de Titan par la mission **Dragonfly** en 2034, des équipes françaises étudient à différentes échelles l'albédo de surface, les changements saisonniers atmosphériques et les processus de synthèse organique associés. Ces équipes sont également impliquées dans le développement de deux instruments clés de cette mission : Drams pour l'étude de la composition et de la chimie de la surface dont le chromatographe est développé par une équipe française, et DragMet pour l'étude de la météorologie et la géophysique de Titan.

Enfin, ces missions spatiales vers les satellites Galiléens sont soutenues par des observations au sol avec les grands télescopes, la modélisation des processus de formation et d'évolution et la synthèse et l'étude en laboratoire de matériaux analogues. Ces approches restent essentielles pour préparer, compléter et soutenir l'interprétation des observations à venir.

## 1.2.4 RETOURS D'ÉCHANTILLONS D'ASTÉROÏDES

Les missions **Hayabusa 2** en 2020 (Jaxa) et **Osiris-Rex** (Nasa) en 2023 ont ramené sur Terre plusieurs grammes d'échantillons des astéroïdes carbonés Ryugu et Bennu. De tels échantillons primitifs et « non altérés » sont essentiels pour les cosmo- ou géo-chimistes français qui ne disposaient jusqu'à présent que de fragments de météorites carbonées, reliques d'astéroïdes ayant été remaniés lors de leur passage dans l'atmosphère terrestre et leur séjour au sol. Les premières investigations récentes, auxquelles ont participé des équipes françaises impliquées dans la curation avec l'instrument Micromega et dans les groupes d'analyse, prouvent le caractère unique des échantillons de Ryugu, notamment par la mise en évidence d'un cortège de molécules organiques témoignant d'une chimie non-orientée et d'une origine abiotique, sans évidence de contamination terrestre. La préservation de cette matière organique à la surface de Ryugu, malgré une exposition prolongée aux conditions du milieu interplanétaire, laisse supposer que ces composés prébiotiques sont omniprésents dans le Système Solaire. Ces investigations se poursuivent

et les premiers résultats concernant Bennu sont attendus avec impatience.

### 1.2.5 EXPÉRIENCES EN ORBITE TERRESTRE

Le spectre ultraviolet du Soleil étant difficile à reproduire en laboratoire sur une large gamme de longueurs d'ondes, les expériences d'exposition en orbite terrestre sont essentielles pour produire des données photochimiques robustes sur des matériaux d'intérêt. Afin d'améliorer le retour scientifique de ce type d'expériences et de corriger certains biais identifiés, la plateforme **IR-Coaster** a été développée et réalisée ces dernières années par une équipe française dans le but d'exposer au flux solaire des échantillons gazeux ou condensés, et de pouvoir suivre en temps réel leurs transformations chimiques par spectroscopie IR. **IR-Coaster** sera prochainement installée sur la plateforme Bartolomeo de l'ISS et les premiers résultats sont attendus fin 2024.

En parallèle, le Cnes a soutenu des collaborations scientifiques internationales pour des expériences d'exposition sur l'ISS, d'une part, sur la plateforme japonaise **Tanpopo** pour la collecte de poussières extraterrestres afin d'y rechercher des molécules prébiotiques, d'autre part, sur la plateforme allemande **ExoCube** de l'ISS pour l'exposition de bactéries halophiles enrobées dans des cristaux de sels respectivement. Enfin, une série d'expériences **Mattis** sont menées à bord de l'ISS afin de tester de nouveaux matériaux visant à limiter la fixation et la colonisation des parois internes de la station par

## 2. RECOMMANDATIONS

### 2.1 EXOSYSTÈMES PLANÉTAIRES

Dans les années à venir, les télescopes spatiaux opérationnels (**JWST**) et en cours de développement (**Plato**, **Roman-ST**, **Ariel**) seront au cœur d'avancées majeures dans la détection de nouvelles exoplanètes et la détermination de leurs principales caractéristiques (masse, atmosphère, etc.), et de celles de planètes déjà connues. Néanmoins, elles ne permettront pas de détecter des planètes telluriques analogues à la Terre, ni de sonder leur atmosphère afin d'identifier des marqueurs d'habitabilité.

La conception et le développement de missions ayant les capacités requises pour ces observations sont donc aujourd'hui la première priorité. Cet objectif s'inscrit dans le cadre des missions Habi-

des bactéries autochtones pouvant être nocives pour les astronautes.

### 1.2.6 PROTECTION PLANÉTAIRE

Depuis plusieurs années, la communauté française est mobilisée dans les missions de retour d'échantillons de corps célestes (astéroïdes, Lune, etc.) et prépare tout particulièrement le retour d'échantillons de Mars (**MSR**, **MMX**...). La France tient un rôle de premier plan dans la définition des catégories et des régulations internationales de protection planétaire en siégeant et en présidant le « Planetary Protection Panel » du Cospar. La position française s'affirme grâce à la définition d'infrastructures et d'équipements de réception, de curation et d'analyse d'échantillons extraterrestres. Ainsi le projet de CNME implanté au Museum National d'Histoire Naturelle (MNHN) deviendra la référence nationale voire européenne en matière de conservation d'échantillons extraterrestres et l'un des rares centres internationaux de ce niveau. Le Cnes participera au financement des équipements mi-lourds qui y seront installés.

Dans l'optique de retour d'échantillons extraterrestres sur Terre, le Cnes pilote l'action technique **Marcus** au sein du PEPR Origins piloté par le CNRS. Récemment initié, ce projet vise à fournir à court terme des équipements clés pour les analyses ou diagnostics préliminaires d'échantillons inconnus (extraterrestres ou non), et la détection agnostique de traces infimes d'activités énergétiques ou métaboliques de systèmes vivants dans ces échantillons.

table World Observatory (**HWO**, prochaine mission Flagship Nasa à l'horizon 2040) et Large Interferometer For Exoplanets (**Life**, identifié comme thème scientifique de Voyage 2050 par l'Esa). La Nasa a mis en place en 2024 plusieurs groupes de travail scientifiques et techniques pour la mission **HWO**, qui doivent aboutir sur le court terme à une « Design Reference Mission ». **HWO** sera équipé en priorité d'un instrument coronographique pour la détection et la caractérisation d'exoTerres utilisant des techniques de correction de front d'onde sur lesquelles la communauté française est fortement investie depuis plusieurs années et reconnue mondialement. Le soutien engagé par le Cnes en R&D doit donc se poursuivre et s'intensifier pour maîtriser les techniques de contrôle de front d'onde

et de vol en formation aux niveaux requis, que ce soit pour **HWO** ou **Life**. L'expérimentation de laboratoire est également indispensable pour préparer l'interprétation des données aux longueurs d'ondes et résolutions spectrales considérées.

En synergie avec les spectrographes haute résolution au sol (CFHT...) plusieurs concepts de missions proposées présentent un intérêt pour la communauté française comme l'amélioration de la précision de mesures de vitesses radiales avec un satellite fournissant une référence de vitesse mondiale (**nuAncestor**, projet mené par la Suisse) pour lequel une étude de faisabilité serait souhaitable. Différentes voies doivent être explorées pour détecter et caractériser les petites planètes incluant des analogues terrestres dans le voisinage terrestre. Dans ce contexte, et pour préparer les futures grandes missions il est intéressant d'explorer l'intérêt des nanosatellites (mission de transit par exemple), et les avantages de l'astrométrie micro-arcseconde pour la détection d'exoTerres (comme **Theia** proposée pour la mission Esa M7). Enfin la possibilité de précurseurs technologiques à la mission **Life**, avec un objectif scientifique fort qui porterait sur les conditions de formation des exoplanètes, est également une opportunité à prendre en compte.

### 2.2 EXPLORATION MARTIENNE

L'exploration actuelle *in situ* de la surface de Mars dans le cadre des missions **MSL** et **Mars2020** vise à contraindre les conditions d'habitabilité passée et présente de terrains d'intérêt pour l'exobiologie. A partir de 2031, le rover Rosalind Franklin de la mission **Exomars** ira rechercher en profondeur dans le sol martien des biomarqueurs protégés des conditions de surface. Ces missions sont très complémentaires à la fois par les contextes géologiques et l'âge des terrains étudiés, et par leurs modes d'échantillonnage et d'analyse variés.

La campagne **MSR** qui ramènera une partie des échantillons collectés par le rover Perseverance de la mission **Mars2020** à l'horizon des années 2030, reste la priorité de la communauté. L'accès à de tels échantillons produira des informations uniques et précises par l'utilisation de méthodes analytiques sensibles de laboratoire. Ces informations, complémentaires à celles acquises *in situ*, sont déterminantes pour dater les échantillons, et pour caractériser finement les processus géologiques, climatiques et biochimiques auxquels ils ont été

liés. Dans ce cadre, il sera nécessaire de soutenir le développement de moyens de confinement et de curation d'échantillons (voir 2.5.), ainsi que d'instrumentations de laboratoire performantes pour le traitement et l'analyse.

En dépit de ce programme dense d'exploration de Mars, il demeure un fort intérêt à étudier des environnements favorables à la préservation de traces de vie et inexplorés jusqu'à présent. C'est le cas de l'atterrisseur Mars Life Explorer (**MLE**) recommandé dans le dernier decadal survey de la Nasa pour être la prochaine mission d'exploration *in situ* visant à rechercher dans des terrains glacés à haute latitude des biosignatures dans des échantillons prélevés à 2 m de profondeur.

### 2.3 MONDES GLACÉS ET OCÉAN : DE L'HABITABILITÉ DE SATELLITES GLACÉS À LA CONTRIBUTION DES COMÈTES À L'APPARITION DE LA VIE

Bien qu'aujourd'hui des satellites glacés de Jupiter et Saturne, e.g. Europe, Encelade et Titan, semblent satisfaire aux principaux critères d'habitabilité, il demeure indispensable de le confirmer et de déterminer si ces mondes océans sont ou ont été habités. Leur observation à distance (**JWST**) et leur exploration depuis l'orbite (**Juice**, **Europa Clipper**) ou *in situ* (**Dragonfly**) amélioreront considérablement nos connaissances sur la géophysique de ces habitats potentiels. Néanmoins, la chimie des matériaux exhumés des océans sous-glaciaires est essentielle pour y rechercher des biosignatures ou modéliser les échanges de matière et d'énergie entre l'océan interne, la surface et l'ensemble du système planète-lune. Encelade est aujourd'hui la cible à explorer prioritairement par les agences spatiales (L4 Esa et Flagship Nasa pour la décennie 2040, possible New Frontier (NF) 5 Nasa à l'horizon 2030) en raison de son attrait scientifique, de sa nouveauté et de critères techniques plus favorables à son exploration. L'enjeu majeur de l'exploration d'Encelade pour l'exobiologie est de caractériser les processus (bio-)géochimiques se déroulant dans l'océan interne et leur déterminants, grâce à un inventaire exhaustif des espèces produites. Pour cela, des analyses devraient être réalisées sur des matériaux collectés dans les panaches des geysers connus, ou directement à la surface dans les zones où sont présentes les retombées des panaches. Les mesures moléculaires, isotopiques et chirales

envisagées nécessiteront une adaptation des instruments aux conditions des mondes glacés, notamment pour la caractérisation de composés chimiques complexes.

Bien que n'étant pas glacé, Cérès est aujourd'hui considéré comme un monde océan potentiel depuis son exploration intense depuis l'orbite par la mission **Dawn** qui a révélé la présence d'une grande proportion d'eau dans la planète naine, ainsi que des régions enrichies en sels et en matière organique non identifiée à sa surface. L'exploration de Cérès présente donc un intérêt substantiel pour caractériser son habitabilité et y rechercher des biomarqueurs, et elle pourrait être menée par analyse *in situ* et/ou par l'analyse d'échantillons raménés sur Terre.

Enfin, dans le futur, l'un des objectifs sera de préciser la nature et la quantité de matière apportée par les petits corps (astéroïdes et comètes) sur la Terre primitive afin d'évaluer leur impact sur la chimie prébiotique et l'apparition du vivant sur Terre. Si ce travail est bien engagé pour les astéroïdes avec l'étude des échantillons de Ryugu et Bennu, la composition chimique des noyaux cométaires n'a été qu'effleurée jusqu'à aujourd'hui. Il faut donc envisager un retour d'échantillon et/ou une étude *in situ* d'un noyau cométaire, envisageable dans les années 2030 au travers de la mission NF5 de la Nasa, afin de caractériser finement sa composition moléculaire et élémentaire pour répondre à cette question.

## 2.4 DE L'ORBITE TERRESTRE À LA LUNE

Jusqu'à présent l'orbite basse (LEO) était le seul endroit accessible pour étudier des échantillons d'intérêt soumis à des conditions environnementales (e.g. pesanteur, rayonnement) plus représentatives du milieu interplanétaire, ou de la surface d'objets du système solaire actuellement inaccessibles ou non explorés, que celles simulées en laboratoire. Néanmoins, les expériences implantées jusqu'à présent sur l'ISS doivent composer avec un environnement radiatif atténué par les ceintures magnétosphériques terrestres et les multiples révolutions et rotations journalières de la station. Il y a donc un franc intérêt à mener des expériences d'exobiologie au-delà de l'orbite basse, sur des modules de la Lunar Gateway ou à la surface de la Lune, afin de s'approcher des conditions de rayonnement du milieu interplanétaire. Ceci nécessite le développement de plateformes spécifiques ac-

compagnées d'instrumentation *in situ* pour un suivi en temps réel sur des temps longs.

On peut souligner également des convergences potentielles entre des problématiques de l'exobiologie et celles des sciences de la Vie notamment sur l'usage de régolithe dans des supports Vie ou sur l'impact des poussières lunaires sur la santé des astronautes. En particulier, l'étude des interactions régolithe-eau-microorganismes sont intéressantes pour définir des conditions d'habitabilité aux petites échelles et de résilience fonctionnelle ou de résistance dans des écosystèmes *de novo* sous l'effet de « stressseurs » lunaires ou spatiaux.

## 2.5 RETOUR D'ÉCHANTILLONS ET CURATION

Depuis plus d'une décennie, les missions de retour d'échantillons sont en plein essor, avec une prédilection pour l'environnement martien : la Jaxa propose un retour du régolithe de Phobos, une des lunes de Mars, à l'horizon 2030 ; la Nasa et la CNSA proposent des retours d'échantillons de roches et d'atmosphère en 2035 avec les programmes **MSR** et **Tianwen-3** respectivement. Au-delà de l'exploration martienne, les lunes glacées du système solaire externe (Europe, Ganymède, Encelade...) deviennent des cibles prioritaires d'exploration *in situ* pour les futures missions (e.g. NF5 et 6) avec l'espoir d'une détection *in situ* ou *ex situ* de traces de vie. Des concepts de missions de retour d'échantillon d'un noyau cométaire (**Hayabusa3**/Jaxa) sont également à l'étude.

Outre les analyses à distance et *in situ*, ces missions intègrent un volet « sol », incluant la réception, la conservation et les analyses préliminaires en centre de curation des échantillons, avant leur distribution aux équipes scientifiques internationales. Cette stratégie d'exploration tend à redéfinir les contours « end-to-end » d'une mission de retour d'échantillons ainsi que les rôles respectifs des communautés scientifiques et techniques impliquées dans les phases de curation et les études en laboratoire. La communauté européenne, et en particulier française, très impliquée dans différentes missions de retour d'échantillons, vise désormais à développer à moyen terme ses propres installations de curation. Dans ce cadre la position française a évolué depuis le SPS 2019, notamment grâce à (i) l'instruction au Cnes depuis 2021 d'un projet d'infrastructure de haute sécurité pour la gestion d'échantil-

lons extraterrestres et des technologies requises et (ii) au projet de construction du CNME au MNHN, validé en 2023 au niveau ministériel.

Aujourd'hui, le développement d'une infrastructure dédiée uniquement à la réception et la gestion d'échantillons martiens n'est pas soutenable. En revanche, il est nécessaire de disposer, en complément du CNME, d'une offre de services « hors curation » pour l'évaluation des risques biologiques associés à des échantillons inconnus, qu'ils soient d'origines terrestres ou extraterrestres. C'est un défi technique de haute importance pour les prochaines décennies et le bon positionnement de la communauté scientifique française dans les analyses préliminaires des échantillons. Développer cette offre de services est un moyen d'accélérer le passage en curation et la distribution des échantillons auprès de la communauté scientifique internationale et surtout française qui en

fera la demande. La France a tous les atouts pour développer la curation d'échantillons sensibles et contribuer à la définition des procédures de manipulation et aux opérations d'évaluation des risques biologiques, notamment grâce au projet Marcus (Management and Analysis in Restricted Containment of Unknown Samples). Le Cnes doit en être l'un des moteurs.

Ainsi, la participation des équipes françaises aux analyses préliminaires, en confinement strict et sur des échantillons « libérés » en curation, demeure essentielle et doit être soutenue. Pour une forte valeur ajoutée, il faudrait veiller à faciliter/garantir l'accès des scientifiques aux outils analytiques de pointe (e.g. TGI), à implémenter des méthodes de traitement de données innovantes et à structurer de nouvelles équipes interdisciplinaires, métissant les savoir-faire des curateurs, des instrumentalistes et des scientifiques.

Objectifs scientifiques	Observations/Mesures	Cadre	Recommandations
Détecter et caractériser des ExoTerres et leur atmosphère	Observations depuis l'espace par imagerie à haut contraste et interférométrie	ESA - NASA	Soutien majeur à la définition et au développement de HWO (Nasa/2040) et Life (Esa/2045) en valorisant l'expertise française pour PLATO, Ariel et Roman-ST
Identifier les déterminants de l'habitabilité des mondes glacés et « océan »	Sondage depuis l'orbite et exploration <i>in situ</i> pour la recherche de biomarqueurs et de traces de vie	ESA - NASA	Soutien majeur aux futures missions dédiées de l'Esa (L4/2040) et de la Nasa (NF5/2035-Flagship/2045) vers Encelade
Étudier l'habitabilité de planètes naines et le rôle des comètes dans l'émergence de la vie	Exploration <i>in situ</i> pour caractériser les conditions d'habitabilité et/ou retour d'échantillon chimie prébiotique des comètes	ESA - NASA	Soutien substantiel à l'exploration de Cérès et aux missions d'analyse des noyaux cométaires
Améliorer nos connaissances sur les exoplanètes telluriques et les systèmes associés	Mesures précises depuis l'espace de propriétés d'étoiles (position, activité lumineuse) de systèmes exoplanétaires connus	Multilatéral ESA	Soutien substantiel à de petites missions complémentaires de Plato/Ariel et aux observatoires sol (CFHT, ELT...)
Développer des services de réception, de gestion des échantillons extraterrestres et de détection agnostique de risque biologique	Mesures robustes de contaminations moléculaires Analyses chimiques et biochimiques ultra-sensibles (composition moléculaire, isotopique, volatomes...)	CNES SpaceShip. FR ESA - JAXA - NASA	Soutien substantiel à la participation française aux analyses préliminaires et processus de levée de quarantaine Favoriser les synergies avec les réseaux de TGI et de biosécurité (NRBC)
Déterminer les signatures organiques ou biologiques à rechercher à la surface d'objets du système solaire	Exposition de matériaux (molécules, bactéries) au rayonnement complexe interplanétaire et suivi <i>in situ</i>	ESA - NASA	Soutien substantiel au développement de nouvelles plateformes d'exposition et d'instrumentation adaptées (LunarGateway, CLPS, ...)
Rechercher des biosignatures à la surface de Mars	Caractérisation d'un environnement martien à hautes latitudes et recherche de biosignatures en profondeur	Multilatéral NASA	Soutien modéré à des missions <i>in situ</i> aux hautes latitudes de Mars
Étudier la formation des systèmes (exo)planétaires	Observation du carbone dans les disques protoplanétaires et de l'environnement de formation des exoplanètes telluriques	ESA	Soutien modéré à des missions précurseur de Life

## 2.6 RECHERCHE & TECHNOLOGIE

Les recommandations en R&T du groupe portent sur l'identification des technologies instrumentales émergentes et les verrous technologiques en termes d'instrumentation pour :

- (i) l'imagerie directe à haut contraste des exoplanètes, *i.e.* optique adaptative ou non-linéaire et coronographie pour le développement d'instrumentation du futur grand observatoire HWO (Flagship Nasa) ou spectroscopie ;
- (ii) l'analyse de composés organiques dans des matrices glacées/salines par techniques chromatographiques et spectrales (Exploration des lunes glacées) ;
- (iii) de la spectrométrie d'absorption ou de réflexion, vibrationnelle dans l'infrarouge moyen ou rotationnelle pour des gaz ou aérosols à pression évanescence dans le domaine submillimétrique ;
- (iv) des dispositifs de collecte *in situ* supervisée, de transport monitoré et de conservation sécurisée d'échantillons sensibles ou présentant un risque

## ACRONYMES

Ariel : Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey  
Cheops : CHaracterising ExOPlanet Satellite  
Clupi : Cloe-Up Imager  
CNME : Centre de curation National de Matières Extraterrestres  
CNRS : Centre National de Recherche Scientifique  
CSA : Canadian Space Agency  
Esa : European Space Agency  
HWO : Habitable Worlds Observatory  
INC : Institut National de Chimie  
INSB : Institut National des Sciences Biologiques  
Jaxa : Japan Aerospace Exploration Agency  
Juice : Jupiter Icy Moons Explorer  
JWST : James Webb Space Telescope  
IR : Infra Rouge  
ISS : International Space Station  
Life : Large Interferometer For Exoplanets  
Marcus :

biologique potentiel.

En particulier, compte tenu de l'importance incontestée d'une mission de retour d'échantillons de comètes et intérêt de la communauté pour l'exploration *in situ* des mondes « océans », il est recommandé de faire progresser les techniques de collecte, de concentration et de stockage de matériaux glacés sensibles et de maîtriser les biais analytiques qu'elles induisent.

De manière générale, les moyens de transfert d'échantillons de l'installation de curation aux laboratoires (ou entre installations de curation) ou de préparation des échantillons seront à parfaire afin d'éviter toute exposition à l'environnement terrestre.

Ceci passe par l'acquisition de compétences nouvelles au sein du Cnes dans le domaine de réception/manipulation d'échantillons inconnus. Cette action pourrait bénéficier également de synergies et collaborations avec les spécialistes du risque nucléaire biologique et chimique NRBC (Institut Pasteur, Inserm, DGA et ArianeGroup).

Miri : Mid-Infrared Instrument

MLE : Mars Life Explorer

MMX : Martian Moon eXploration

Moma : Mars organic Molecules Analyser

MSL : Mars Science Laboratory

MSR : Mars Sample Return

Nasa : National Aeronautic and Space Administration

NF : New Frontier

Plato : PLANetary Transits and Oscillations

RLS : Raman Laser Spectrometer

Roman-ST : Roma Space Telescope

Sam : Sample Analysis at Mars

SPS : Séminaire de Prospective Scientifique

Tess : Transiting Exoplanet Survey Satellite

Theia : Telescope for Habitable Exoplanets and Interstellar/Intergalactic Astronomy

UA : Unité Astronomique

# SCIENCES DE LA VIE ET EXPLORATION HUMAINE DE L'ESPACE

David Bouchez, Jérôme Cachot, Guillemette Gauquelin-Koch (thématicienne) Hélène Giraud, Didier Le Ray, Jean-Luc Morel (Président), Julie-Anne Nazarre, Jean-François Quignard, , Yannick Saintigny, Samuel Valable.

Aujourd'hui, le groupe de travail Sciences de la Vie a pour objectif d'accompagner l'exploration de l'Espace et la présence humaine sur la Lune et sur Mars.

Les recherches menées depuis 50 ans ont permis d'accumuler de nombreux savoirs sur les modifications physiologiques de l'humain induites par les vols spatiaux en orbite basse. Si jusqu'à présent, toutes ces altérations étaient en partie réversibles et bien tolérées par l'organisme, notamment du fait de la courte durée des vols (environ six mois), il n'en sera pas de même avec les vols vers la Lune et à plus long terme Mars. La durée de vol, le niveau de radiation plus élevé, le délai des contacts avec la Terre, et l'impossibilité de retour rapide sur Terre en cas d'urgence sont désormais à prendre en compte et nécessitent l'adaptation de la médecine préventive et curative. La proposition d'un entraînement personnalisé pour maintenir les performances physiques et cognitives, le développement de capteurs spécifiques placés sur les sujets pour améliorer le diagnostic, les moyens de téléopération et une médecine spatiale d'urgence pour réduire les délais d'intervention sont absolument nécessaires pour l'exploration humaine de la Lune et Mars. Les sciences de la vie sont leader pour la mise en place du support-vie (nutrition et recyclage de la matière organique) qui accompagneront ces longs voyages de l'exploration.

Au travers des questions majeures qui sont comment accompagner l'exploration humaine de l'espace et comment le vivant terrestre s'adaptera-t-il aux contraintes spatiales, le Cnes met en place les moyens d'une réduction des risques pour la santé humaine dans l'espace reposant sur trois piliers : la prévention, les contremesures et l'autonomie à bord. La prévention et le développement de programmes de contremesures efficaces passent par une compréhension approfondie des effets de l'environnement spatial (microgravité, confinement et radiation) sur l'ensemble des systèmes

physiologiques et les aptitudes psychologiques et donc de la santé et des performances des astronautes.

La description des effets du vol spatial sur le vivant terrestre a débuté dès le début de la « conquête spatiale », et progresse toujours grâce aux modèles au sol (alitement ou bedrest, immersion sèche à la clinique Medes, confinement, simulateurs de radiations comme MarSimulator) financés conjointement par le Cnes et l'Esa, mais aussi grâce aux vols paraboliques permettant une micropesanteur réelle et les ballons pour la radiobiologie, et surtout aux expériences en orbite basse dans la Station Spatiale Internationale (ISS). Ces recherches doivent se poursuivre en particulier au travers de développements utilisant les analogues sol et les vols paraboliques, mais aussi en poursuivant l'utilisation de l'ISS et des vols automatiques (capsules, Bion,...) embarquant des expériences robotisées et en participant à la définition des moyens à venir comme le Gateway lunaire qui permettront une présence pérenne de l'humain sur la Lune. L'ensemble de ces moyens permettent une recherche de la cellule à l'organisme entier dans des approches précliniques et cliniques.

Les sciences de la vie sont la source de nombreuses collaborations internationales avec des partenaires européens de l'Esa mais aussi avec les États-Unis, la Russie, la Chine et les Emirats Arabes Unis tant pour des développements d'instruments de recherche en biologie spatiale que pour le suivi de la santé des astronautes. Par exemple, la France depuis 1982 est leader pour le suivi des paramètres osseux et cardiovasculaires des équipages internationaux.

# 1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

## 1.1 EN VOL SPATIAL : ISS ET BION M1

L'évaluation de la durée et de l'étendue des atteintes musculo-squelettiques et les moyens de les atténuer par des contremesures appropriées ont progressé grâce aux travaux des équipes françaises. La densité des os porteurs des astronautes n'est pas récupérée 18 mois après le retour au sol et celle du radius, inchangée à la fin des missions, se dégrade progressivement après le retour. Les études d'échographie confirment des modifications structurales vasculaires et l'étude de l'endothélium indique qu'il est moins réactif aux changements de pression artérielle, ce qui accroît le risque de dysfonction vasculaire. De plus, une modification du répertoire d'anticorps IgM observée chez deux des cinq astronautes étudiés, pourrait altérer la réponse immunitaire. A l'heure actuelle, les liens entre les altérations cardiovasculaires et immunitaires n'ont pas été mis en évidence. La perception visuelle et la représentation tactile et proprioceptive d'un objet en 3D sont aussi affectées lors du vol spatial confirmant l'implication de la gravité dans le traitement complexe des signaux sensoriels polymodaux.

Dans Bion-M1 (vol en 2015), la reprogrammation du système immunitaire montre une réduction de la production de nouveaux lymphocytes B. Grâce aux études sur des analogues sol (bed-rest, Concordia), il est désormais possible d'identifier des biomarqueurs pour surveiller le système immunitaire des astronautes. Le programme Bion s'est arrêté suite aux événements de février 2022 malgré le programme scientifique défini pour un vol M2 en 2023.

## 1.2 EN VOLS PARABOLIQUES

Le Cnes organise deux campagnes de vols paraboliques par an avec quatre à cinq études en sciences de la vie par campagne. Ces vols permettent de modifier rapidement et sur de courtes durées le niveau de gravité. Ils induisent ainsi la désorientation du système vestibulaire et de la proprioception qui permettent au sujet d'intégrer la gravité et sa position dans l'espace pour définir ses actions et ses mouvements. Ils ont permis de montrer que les apprentissages d'un mouvement de péda-

lage requièrent la gravité et que les individus bien adaptés aux conditions du vol ont un degré de flexibilité plus important. Dans le contrôle du geste et les corrections motrices associées en réponse à des perturbations transitoires et imprévisibles pendant la réalisation de l'action, l'hypergravité représentent un challenge beaucoup plus important pour le système sensorimoteur que la microgravité, suggérant des difficultés cognitives pendant les phases de décollage et d'atterrissage. Ces vols paraboliques permettent certes d'étudier tous les changements biologiques ou physiques induit par les changements rapides de gravité mais aussi de tester des gestes médicaux en micropesanteur, tests particulièrement pertinents avec le besoin de la médecine d'urgence en vol.

## 1.3 DANS LES STATIONS DE CONFINEMENT

Une des contraintes majeures vécues dans l'espace est le confinement qui se traduit par l'isolement social, la réduction du mouvement et du champ de vision (plus généralement un appauvrissement sensoriel) et la réduction des possibilités de s'extraire de la situation vécue. Lors des expériences de confinement Sirius (Moscou, 2020 et 2022), contrairement à l'hypothèse formulée à partir de l'expérience Mars500 (2010-2011), les états affectifs des individus ne sont pas modifiés. Ces données doivent être corrélées avec la performance des sujets dans diverses tâches routinières ou exceptionnelles via un simulateur de téléopération couplé à des questionnaires validés lors des dernières campagnes. Des modifications du système immunitaire mises en évidence indiquent que le confinement, comme les radiations et la microgravité, impactent la qualité de la réponse immunitaire, pouvant compromettre la santé des astronautes lors des vols longs.

## 1.4 IMMERSION SÈCHE

L'immersion sèche (Fig1) est un modèle analogue de microgravité sur Terre qui reproduit les effets de la phase précoce du déconditionnement de la microgravité du vol spatial. Une approche globale a permis d'identifier des interactions possibles entre les systèmes physiologiques perturbés chez

l'homme et la femme. Ces études permettent ainsi de proposer une méthode d'évaluation globale et intégrée des contremesures pouvant être développées dans les études cliniques et précliniques préparatoires à l'exploration et ce, en prenant en compte la différence de réponse entre les sexes, question importante en raison de la mixité des équipages. Les dernières campagnes ont décrit la cinétique des marqueurs de résorption et formation osseuses en lien avec ceux de l'inflammation, la perturbation du microenvironnement de la fibre musculaire, une augmentation du disque intervertébral qui, associée à l'atrophie des muscles posturaux paravertébraux, favoriseraient les hernies discales et les douleurs associées. Enfin, une altération de la régulation du métabolisme du fer, pouvant expliquer l'anémie des astronautes,

participerait aux détériorations des capacités physiques et cognitives en sensibilisant l'organisme au stress et aux radiations. Le métabolisme, carrefour et moteur des grandes fonctions, est lui aussi affecté. L'altération qualitative du microbiote intestinal suggère des modifications des réponses immunitaires et de la production des molécules postbiotiques (produites par le microbiote mais pas par les cellules du corps humain) comme l'ergothioneine connue pour participer à la bonne santé musculaire ; elle est actuellement en évaluation préclinique comme contremesure. Ces données renforcent le potentiel important de l'exercice physique comme contremesure puisqu'il module tous ces paramètres.

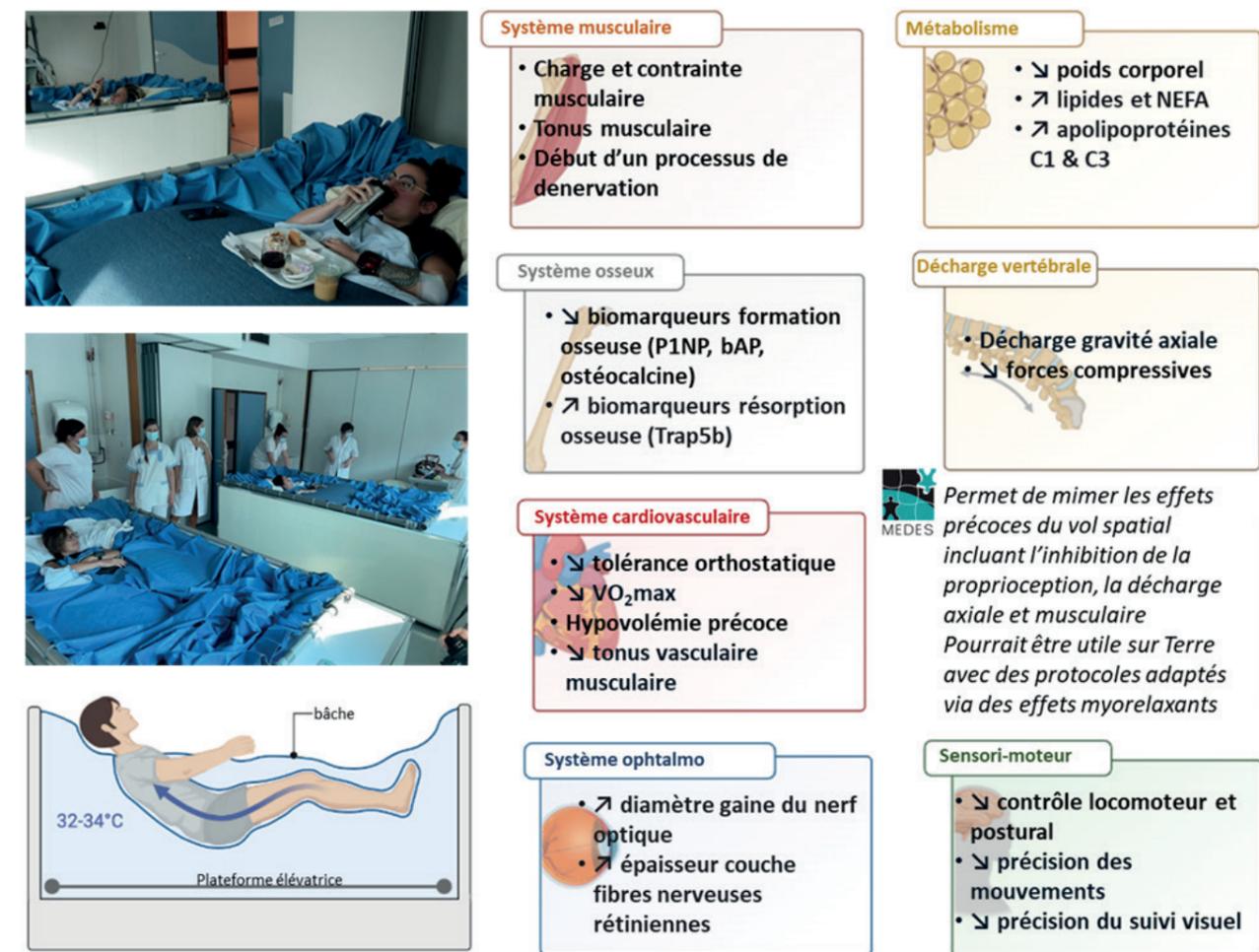


Figure 1 : Immersion sèche réalisée au Medes en 2023, représentation schématique de l'ensemble des effets de l'immersion sèche sur la physiologie humaine.

## 1.5 APPORTS DES MODÈLES PRÉCLINIQUES (NÉCESSAIRES AVANT LES ÉTUDES CHEZ L'HUMAIN)

Les modèles précliniques ont permis d'étudier des effets de la microgravité impossible à mettre en évidence chez l'humain comme l'efficacité réduite de la barrière hématoencéphalique, élément clé de la protection du cerveau ou le tendon d'Achille qui subit des altérations structurales et fonctionnelles qui persistent après l'hypogravité, identifiant un point de vigilance pour les futures missions de longue durée. Enfin, les études chez des ours hibernant (un modèle résistant à l'atrophie musculaire malgré une inactivité physique), des volontaires sains en bedrest et des souris (vol Bion-M1) convergent vers le ciblage des voies de signalisation spécifiques qui régulent la dégradation et la synthèse des protéines musculaires. L'utilisation d'extraits de sérum d'ours hibernant, sur des cultures de cellules musculaires humaines montre une réduction de l'atrophie musculaire induit par la microgravité. Ces résultats inattendus et novateurs ouvrant des perspectives thérapeutiques prometteuses et innovantes pour réduire l'atrophie musculaire au cours des vols spatiaux mais aussi dans la population générale sur Terre.

## 1.6 RADIOBIOLOGIE SUR CELLULES HUMAINES

L'objectif principal est d'estimer les risques cliniques liés aux radiations lors d'un séjour dans l'espace en prenant en compte la nature des radiations spatiales (dose, débit, énergie). Ainsi l'utilisation des ballons stratosphériques a permis de montrer que les cellules de l'os et du cristallin sont particulièrement sensibles aux radiations spatiales et de tester l'efficacité relative de différents blindages pour réduire les dommages de l'ADN. L'irradiation continue à faible débit produite dans Mar-Simulator induit un stress oxydatif constant tandis que les particules de faible énergie, via le relargage radio-induit du calcium intracellulaire, altèrent la signalisation intracellulaire.

## 1.7 SPATIALISATION DES DISPOSITIFS MÉDICAUX DE DIAGNOSTIC ET D'URGENCE

La spatialisation de l'échographie s'est poursuivie

pour être télé-opérable depuis le sol. Les pratiques médicales d'urgence se sont développées par la définition d'une procédure de laryngoscopie testée en vol parabolique par le médecin urgentiste, pour un transfert de compétence à un membre d'équipage. Celle permettra une autonomie de l'équipage des vols de longues durées.

## 1.8 L'AQUACULTURE DE SUPPORT-VIE

La proposition d'une aquaculture spatiale lors du dernier SPS a été investiguée en testant au sol un système de transport d'embryons de poisson compatible avec les conditions de lancement (Lauve, Centrespatial de l'Université de Montpellier), suivi d'une courte période de microgravité simulée (Gravity, Gepam, Nancy) ou d'irradiation par neutron ou proton (Corafe, IRSN, Cadarache), démontrant la validité de la première étape d'une aquaculture spatiale puisque les embryons de poissons survivent et peuvent se développer (atteindre un stade adulte) suite à ces trois étapes cruciales de la mise en orbite.

## 1.9 LES PLANTES POUR LE SUPPORT-VIE

Les avancées majeures sur la compréhension des mécanismes d'adaptations des végétaux à la gravité auront une portée notamment au niveau du support-vie. La croissance des végétaux est conditionnée par leur capacité à percevoir les contraintes physiques telles que la gravité dont les mécanismes tissulaires ont été précisés et qui implique la modulation de 2000 gènes. Les expériences sur Mar-Simulator ont démontré que microgravité et radiations sont perçues comme des facteurs de stress qui peuvent modifier les qualités alimentaires de la plante et donc à terme la santé des astronautes.

Fort de ce bilan concernant la médecine spatiale et la mise en place d'un support vie adaptée, il apparaît évident de poursuivre les efforts d'investigation en ciblant particulièrement la médecine préventive et personnalisée pour les astronautes. Ces travaux permettront, sur Terre, un meilleur suivi de certaines pathologies et de participer au développement de la télémédecine. De plus, les études en radiobiologie ont montré un impact important du bain de radiation tant sur les plantes que sur l'humain ce qui nous oblige à développer cette thématique de recherche pour les missions

de type lunaire. Au-delà des aspects opérationnels, ces expériences conduites pour le support-vie en microgravité apportent des données uniques en biologie fondamentale que ce soit sur

## 2. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

Pour rendre possible l'exploration humaine de l'espace, les programmes de recherche prendront en compte deux grands volets pour les prochaines années : la continuation de l'exploitation de l'ISS et des vols habités de courtes durées et des missions beaucoup plus distantes de la Terre comme la Lune (sur et en orbite de la Lune) voire Mars. Les orbites basses accueilleront des équipages comprenant des équipages plus diversifiés comprenant des astronautes entraînés et sélectionnés et des personnes moins entraînés. Ceux-ci devront néanmoins bénéficier d'une assistance médicale performante et adaptée. Les vols « plus loin et plus long », quant à eux, nécessiteront une surveillance particulière en vol, sur le sol lunaire et au retour sur Terre pour assurer la santé et les performances des équipages. Ainsi les programmes de recherche concernant la santé et la survie des équipages devront se concentrer sur la prise en charge de l'urgence médicale à bord des systèmes d'exploration, les moyens de diagnostic et de suivi médical, le développement de contremesures efficaces et personnalisées, la définition d'un support-vie permettant la production d'aliments nutritifs et le recyclage de la matière organique et enfin la prise en compte de l'environnement lunaire pour une exploration humaine de notre satellite. Sur l'ensemble de ces points, les recommandations portent sur la poursuite de programmes pour lesquels les équipes françaises bénéficient d'atouts majeurs sur les autres nations spatiales (d'une part, grâce à sa filiale Novespace, le Cnes permet à l'ensemble de la communauté scientifique européenne et internationale de participer à des vols paraboliques mimant la microgravité ou des gravités partielles et d'autre part Medes est la seule clinique spatiale a disposé d'installation d'immersion sèche) et le développement de nouveaux axes de recherche pour lesquels une communauté de chercheurs est identifiée et prête à s'investir dans la recherche en biologie/santé spatiale. Ces recherches participeront également à apporter des connaissances pour l'humanité restée sur Terre en améliorant les systèmes de productions et de recyclage, la médecine d'urgence, les moyens

le développement embryonnaire des vertébrés ou sur l'impact de la gravité sur la croissance des végétaux.

de diagnostic à distance et la prise en charge de la santé des personnes forcées à l'inactivité et à une meilleure compréhension du vieillissement.

### 2.1 UNE NOUVELLE MÉDECINE SPATIALE : PRISE EN CHARGE DE L'URGENCE ET SUIVI AMBULATOIRE, UNE SPÉCIFICITÉ FRANÇAISE

La présence sur l'ISS de personnes non entraînés d'une part et des distances incompatibles avec un retour rapide depuis le Gateway ou la surface lunaire, imposent de développer une médecine spatiale en vol et tournée vers la prise en charge d'urgence. En particulier, le massage cardiaque et les insuffisances respiratoires sont vitaux et nécessitent des développements techniques pour une adaptation à la gravité réduite ou à l'impesanteur. Les travaux effectués dernièrement sur la laryngoscopie (Fig.2) par les équipes françaises leur donnent un avantage compétitif et elles bénéficieront des vols paraboliques pour la mise au point du matériel, de la procédure et de son transfert dans les mains du personnel de bord.



Figure 2 : Le vol parabolique permet la validation du matériel médical et la mise au point du geste par le médecin spécialiste puis le transfert de compétence vers un personnel de bord (ISS, gateway, station lunaire)

Cette médecine d'urgence doit se compléter par un dispositif diagnostic performant en lien avec les équipes médicales au sol si besoin. Pour cela, depuis quelques années, le Cnes a choisi de développer l'imagerie médicale par échographie. Un échographe pilotable à distance est déjà installé dans l'ISS, il va s'améliorer en utilisant les outils de l'IA pour aider le manipulateur à bord d'une station spatiale à trouver le meilleur emplacement de la

sonde échographique pour envoyer aux médecins au sol une image de qualité diagnostique.

La proposition est de profiter du développement important depuis ces dernières années de cette technique d'imagerie médicale grâce à l'accroissement de la vitesse d'acquisition et de traitement du signal. La France est leader dans le domaine. Entre autres, une utilisation pour accéder à la perfusion sanguine intra-osseuse et le couplage avec le recueil d'autres paramètres physiologiques seront développés, une veille technologique et scientifique sera renforcée.

Cette nouvelle ère de la médecine spatiale verra également le développement de l'intégration de capteurs associés aux tenues des astronautes afin de suivre l'évolution de paramètres physiologiques et de prédire, en association avec leurs jumeaux numériques, les risques encourus et aider à la prise en charge de leur santé et donc de leurs performances. Il y aura une forte interaction entre le Cadmos (Centre d'Aide au Développement des Activités en Micropesanteur et des Opérations Spatiales), le Spaceship (préparation d'une future base lunaire), la clinique Medes et les équipes de recherche biomédicales et celles qui développent ces nouveaux capteurs couplant paramètres physiologiques et dosages de biomarqueurs pour aboutir à une instrumentation permettant une recherche appliquée et un suivi médical avec et pour les équipages. Ces interactions permettront également de profiter pleinement des développements technologiques en cours dans les laboratoires sur l'instrumentation médicale.

La pharmacologie spatiale devra se développer avec l'allongement des durées et la diversité des missions à venir. Pour le suivi des équipages, il faudra compléter les données des capteurs de biomarqueurs avec des données de dosage plus précises et de pharmacocinétique des médicaments en vol. Pour cela, nous bénéficierons des avantages combinés de système de recueil d'échantillons compatibles avec le vol spatial (échantillons secs sur buvard) et de systèmes de mesures incluant de la microfluidique réduisant considérablement le volume des échantillons biologiques rendant moins nécessaire la spatialisation d'équipements de laboratoire et des retours d'échantillons coûteux.

La globalisation des données du suivi des biomarqueurs et paramètres physiologiques et de la pharmacologie spatiale améliorera la prise en charge des douleurs des équipages pendant et après le vol mais aussi de renforcer les études concernant les adaptations cardiovasculaires, métaboliques et immunitaires, mais également cognitives et psychiques des équipages. La santé cardiométabolique est cruciale pour maintenir l'homéostasie des autres fonctions physiologiques. L'immunité devra également répondre à des agents rendus infectieux par le vol spatial ou à résister à de nouveaux allergènes.

Aujourd'hui, la cognition regroupe l'ensemble des actions programmées par le cerveau comprenant la planification du geste, la mémoire, le traitement des informations sensorielles et émotionnelles, devenant un ensemble complexe qu'il faut étudier en intégrant ses différentes composantes. La poursuite des études comportementales dans l'ISS, de la planification de l'action ou du mouvement en vol paraboliques permettront de mieux permettre aux équipages de maintenir leurs performances cognitives en fonction de leur charge mentale. Les aspects de psychologie cognitive seront suivis lors des expériences conduites chez l'humain tant dans les expériences en vol que lors des expériences dans les analogues sol.

Les vols spatiaux habités vont dépasser l'orbite terrestre basse, avec notamment des missions exploratoires vers la Lune et Mars, y compris l'établissement d'une base avec équipage permanent sur la surface lunaire. Ces missions comportent des défis physiologiques et psychologiques. Les longues distances entraîneront des durées de mission plus longues avec un niveau croissant d'éloignement, d'isolement et de confinement. Des questions se posent concernant les performances optimales, le bien-être et la santé mentale de l'équipage dans des circonstances aussi extrêmes. Ces défis psychologiques doivent être relevés, car ils constituent des facteurs limitants pour le succès des missions exploratoires de longue durée. C'est pourquoi, des études d'isolement sont fondamentales pour étudier les effets du confinement et de l'isolement sur la santé, le comportement et les performances humaines. Celles-ci deviennent prioritaires pour l'ensemble des agences spatiales.

## 2.2 CONTREMESURES ADAPTÉES ET PERSONNALISÉES

Le suivi osseux des cohortes d'astronautes après leur vol a permis de démontrer la variabilité inter-individuelle des réponses biologiques au vol spatial. Il est donc nécessaire d'adapter les contremesures à chaque astronaute. Pour cela, il faut définir en recherche préclinique quelles sont les combinaisons de contremesures (exercice physique, nutrition, pharmacologie, low body negative pressure, cuffs, centrifugation) les plus efficaces afin de les optimiser pour chacun par la suite. Aujourd'hui il est admis que l'efficacité de ces contremesures doit cibler le métabolisme cellulaire, l'inflammation, le stress oxydant, et les voies de l'atrophie et de la régénération cellulaire. Les voies de réparation de l'ADN devront également être investiguées à cause de leur efficacité à lutter contre les effets du bain de radiation. Les études se porteront de façon combinée sur les axes muscle-tendon-os, cardiovasculaire-immunité-cerveau qui semblent structurant. Ces études seront associées avec celles sur le métabolisme énergétique et le microbiote, qui ont des rôles centraux dans le fonctionnement physiologique et dont la sensibilité aux vol spatial est démontrée ; par exemple le microbiote est capable de produire des molécules post-biotiques nécessaires au bon fonctionnement de l'individu. Ces contremesures prendront aussi en compte des composés prébiotiques stimulant ce microbiote associés avec d'autres compléments alimentaires et exercices physiques spécifiques proposés avant, pendant et après le vol. La priorité dans ce domaine sera d'étudier les effets de façon transversale et avec une approche multi-organes sur des modèles précliniques avant un test clinique.

## 2.3 SUPPORT-VIE

Le support-vie peut être envisagé comme un ensemble complexe comprenant la production d'une nourriture adaptée aux besoins physiologiques en fonction des conditions de vie des équipages. La production d'un aliment adapté comprend l'étude de l'efficacité de la nutrition et les aspects de bien-être psychologique de l'alimentation. Les effets sur la santé mentale et physique de la réduction soudaine de l'accès à la nourriture due à des dysfonctionnements éventuels du support-vie sont aussi à intégrer. Cela implique également

un suivi individualisé du statut énergétique et nutritionnel des astronautes afin de pouvoir adapter rapidement leur nutrition tout en prenant en compte leur pratique d'exercice physique. Dans l'éventualité d'un dysfonctionnement du support-vie, les astronautes risquent d'être contraints de limiter leurs apports caloriques et/ou hydriques pendant des périodes plus ou moins longues. Il est donc impératif d'évaluer l'impact de ces restrictions sur la santé humaine. Ces études fourniront également de nouvelles données sur les effets de l'hypométabolisme à moyen et long terme. Elles aideront à envisager des stratégies de baisse de la dépense énergétique des astronautes pour limiter les besoins et le coût associé des missions longues. Des données cliniques suggèrent que l'hypométabolisme ralentit les processus de vieillissement et de sénescence (pouvant faire l'objet d'applications en médecine sur Terre). Lors de ces expériences les aspects cognitifs seront suivis pour adapter et personnaliser les rations alimentaires aux performances cognitives et motrices.

Il s'agit aussi de produire de la nourriture selon un cercle vertueux de recyclage de la matière organique. Les études théoriques incluent végétaux terrestres, microorganismes et insectes, algues et poissons pour un recyclage efficace de l'eau et des nutriments organiques provenant de l'humain et de ses activités. Dans ce contexte, la poursuite des études sur des espèces végétales d'intérêts agronomiques et des espèces de poissons pouvant participer à la recreation de cet écosystème est indispensable pour connaître les propriétés nutritionnelles pour l'humain tout en assurant une activité socialement valorisante pour l'équipage. Enfin, il sera également indispensable de saisir les opportunités de conduire une recherche scientifique sur ces productions pour améliorer les connaissances fondamentales sur les effets des conditions spatiales (durées d'exposition à l'impesanteur et au bain de radiation, confinement) sur les végétaux, animaux et micro-organismes produits ou utilisés dans ce cadre.

## 2.4 ENVIRONNEMENT LUNAIRE : TOXICITÉ DU RÉGOLITHE LUNAIRE ET BAIN RADIATIF

Le retour des missions américaines a laissé en-

trevoir la toxicité potentielle du régolithe lunaire par les dysfonctions pulmonaires induites par les particules transportées sur les combinaisons dans l'habitable des modules. Pour comprendre les effets biologiques et sanitaires de l'exposition au régolithe lunaire il faudra une synergie entre les thématiques concernés du Ceres (exobiologie et Sciences de la matière) pour connaître les propriétés physico-chimiques des particules du régolithe et sa dispersion aux alentours des humains présents sur la Lune. Des équipes de recherche en écotoxicologie des particules, modélisation préclinique et physiologie sont déjà identifiées et prêtes à élaborer les projets de recherche.

Ces travaux seront nécessaires pour définir les moyens de prévention et de prise en charge suite à l'exposition aux particules de régolithe, ils pourront également participer aux travaux de recherche sur la prise en charge des équipes de secours qui, sur Terre, interviennent dans des ambiances polluées (poussières, suies, etc.). Il est nécessaire d'engager ces études le plus rapidement possible pour aboutir à une présence humaine sur la Lune en toute sécurité. Pour cela, des projets seront proposés à la Nasa pour obtenir du régolithe provenant des missions lunaires américaines et feront l'objet de discussions et projets internationaux.

## 2.5 SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

Objectif scientifique	Observable Type de mesure	Exemple de cadre de réalisation avec phase	R&T	Commentaires
Rendre possible l'exploration humaine de l'espace	Calibration du geste par le médecin puis l'équipage Couplage avec la téléopération  <b>Paramètres physiologiques et cognitifs lors des missions</b>  Ecotoxicité par contact avec l'environnement lunaire  Nutrition / Balance énergétique Pharmacologie spatiale	<b>Médecine d'urgence</b> Vol parabolique  Echographie vol spatial ISS  Vol parabolique, confinement, immersion sèche, bed-rest, <b>Etudes d'hypométabolisme</b>  Etudes précliniques sur les effets des poussières lunaires sur l'humain (Exobiologie, physique-chimie)  Suivi de la santé au cours des missions Lune et Gateway Analogues sol et vol parabolique	<b>Adapter les outils de médecine d'urgence en µg</b>  <b>Intégration et validation en µg de capteurs</b> et systèmes de dosage  Stockage de régolithe	Pour le moment spécificité française  <b>Besoin de régolithe lunaire</b> (collaboration Nasa)  Objectifs Artemis
Quel cocktail de contre-mesures pour assurer la santé en vol et après le retour sur Terre ?	Etudes précliniques et cliniques	<b>Test au sol sur animaux et cellules en culture exposés à la µg simulée et bain de radiations Transfert chez l'humain en analogues sol pour une personnalisation des contre-mesures</b>	Développement d'instruments pour des vols automatiques et ballons ; modélisation	Validation de contre-mesures personnalisées Meilleures connaissances sur les effets des conditions spatiales sur le vivant terrestre
Comment assurer le support-vie dans les stations ? (nutrition, etc)	<b>Développement et qualités nutritionnelles d'une production végétale</b>	Développement et composition des végétaux en conditions spatiales (Analogues sol, capsules)		Effets de la µg couplée au bain de radiation
	<b>Qualités et conservation de l'aliment</b> (ISS, Gateway)	Conservation (années) Propriétés nutritionnelles des aliments apportés ou produits		
	Développement d'une production d'aquaculture spatiale	Transport d'embryons et tests en vol spatial (développement et croissance)	<b>Système d'emport (aquarium) des embryons de poissons et de leur milieu de vie</b>	Essais sols préalables de fécondation après vibrations, µg et radiations
	Développer un système intégré bio-régénératif	Propriétés et qualité nutritionnelles et effets de l'alimentation produite		

Les priorités sont indiquées en gras dans le tableau. Une spécificité des sciences de la vie est de pouvoir tester rapidement de nouvelles technologies lors des vols d'astronautes français.

## 3. CONCLUSION

A l'occasion de la préparation de ce séminaire de prospectives, les équipes de recherche et le Cnes ont souligné l'importance d'une discussion renforcée avec le Cadmos et le Medes afin de mieux répondre aux différents appels d'offres et être force de proposition auprès de l'Esa. La tenue de neuf discussions scientifiques thématiques en visioconférence et d'un atelier d'un jour et demi au Cnes ont permis de structurer une communauté scientifique grandissante. L'ensemble des acteurs souhaite poursuivre ces interactions afin d'accroître leur efficacité. Ces moments d'échanges ont permis au groupe de travail de définir les recommandations présentées mais aussi de définir des axes de réflexion allant bien au-delà des recommandations pour les cinq prochaines années.

Dans le domaine de l'exploration humaine de l'espace, le Cnes a déjà mis en place de nombreuses collaborations internationales notamment avec les Emirats Arabes Unis, les Etats-Unis (notamment programme Artemis d'exploration lunaire), Japon et bien sûr il faudra renforcer les interactions avec les nations européennes membres de l'Esa, et développer des collaborations avec les nations spatiales émergentes (Inde et Brésil) qui disposent d'une recherche dynamique dans les sciences de la vie et de la médecine. La France, grâce aux vols paraboliques, à la clinique spatiale (Medes) et au Cadmos dispose d'atouts majeurs pour valider des protocoles médicaux en impesanteur et des propositions originales et adaptées de contre-mesures. Les équipes de recherche proposent 1/ une recherche préclinique rapidement transférable pour les équipages et 2/ une recherche de pointe, appliquée et fondamentale, pour des propositions concrètes de support-vie qui pourront en partie se développer via le Spaceship. Enfin la synergie avec d'autres groupes de travail du Ceres permettra de définir les risques pour la santé des équipages de l'exposition au régolithe lunaire ainsi qu'au bain de radiations qui régnera dans le Gateway ou sur le sol lunaire.

Actuellement, de nombreuses études peuvent encore être menées dans l'ISS, celle-ci étant disponible au moins jusqu'en 2030. Des discussions internationales entre les agences sont également en cours pour « aménager » l'ISS afin de pouvoir simuler des vols lunaires ou martiens. Cela permettra

de développer des recherches fondamentales et appliquées à l'exploration humaine.

De plus, les équipes françaises ont créé des dispositifs de formation pour les étudiants européens en biologie et médecine afin d'accompagner l'exploration humaine au travers de la création du master Erasmus Mundus Spacemed (universités de Caen, La Charité Berlin et Ljubljana, Slovénie) et de la demande Biospace dans le cadre l'appel Compétence et métiers d'avenir de l'ANR-France2030 pour un enseignement du lycée au doctorat.

Il est indispensable de rappeler que toutes ces recherches ont bien entendu de très nombreuses retombées sociétales que ce soit pour la meilleure compréhension de la physiopathologie de l'inactivité physique et de la sédentarité, fléau sociétal responsable de plus de 35 maladies chroniques, et le vieillissement ou pour l'accélération du développement d'appareils médicaux nécessaires au suivi médical personnalisé tant sur Terre que dans l'espace. Enfin les études liées au support-vie auront aussi des répercussions bénéfiques en agronomie qui seront particulièrement pertinentes dans le contexte de transition écologique actuel.

Thierry Bret-Dibat (thématicien), Philippe Brunet, Olga Budenkova, Christophe Delaroche (thématicien), Bruno Denet, Pascale Domingo, Stéphane Dorbolo, Jean-Baptiste Manneville, François Pétreils (Président), Isabelle Raspo, Laurence Rongy, Valérie Vidal, Régis Wunenburger Et le Conseil Scientifique du GDR Micropesanteur Fondamentale et Appliquée

### 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 (Fig.1). Il faut généralement faire appel à la physique non-linéaire et à la physique statistique d'états hors d'équilibre pour modéliser ces phénomènes.

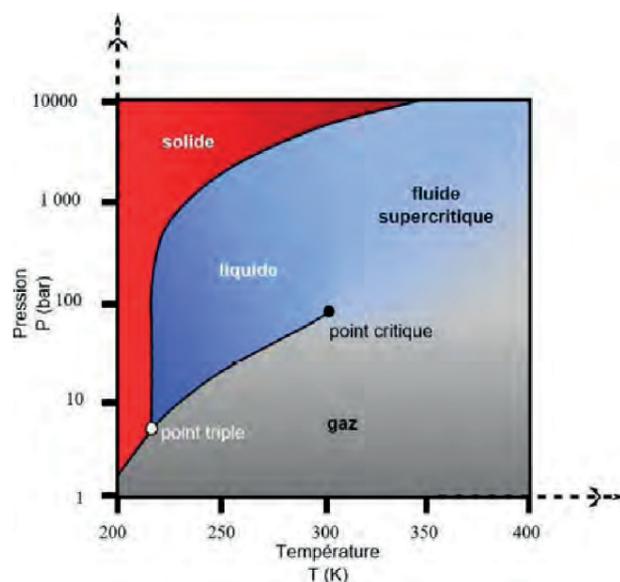


Fig.1 : Diagramme de phase du dioxyde de carbone, présentant les courbes d'équilibre entre les différents états. Les Sciences de la Matière s'intéressent aux propriétés lorsque le système traverse ces courbes d'équilibre. Les systèmes y sont alors sensibles à la gravité.  
 © Marc Jacobs, 2005

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, et l'Esa, offrent 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. La communauté française peut bénéficier de l'accès aux conditions de micropesanteur dans l'ISS, en vols paraboliques, en fusées sondes ou en tour à chute libre, avec pour l'ISS une mise en œuvre fortement majoritaire à travers le programme SciSpacE de l'Esa.

Le processus de sélection des projets est rationalisé en utilisant les principes de l'analyse dimensionnelle. L'importance relative des phénomènes physiques est exprimée par des nombres sans dimension. Lorsque la gravité joue un rôle, ces nombres font intervenir la gravité  $g$  multipliée par d'autres grandeurs caractéristiques du problème. Citons par exemple le nombre de Rayleigh en convection thermique, de Bond pour des phénomènes capillaires, etc. La micropesanteur est nécessaire pour étudier un phénomène physique s'il n'est pas possible de réduire ce nombre sans dimension soit pour des raisons techniques soit parce qu'en le modifiant, on en modifie un autre qui joue un rôle dans la physique du système. Cette approche est cruciale dans le processus de sélection des projets.

## 1. BILAN ET AVANCEES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

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, créé en 1992. Il compte plus de 150 chercheurs du CNRS, du CEA et des Universités.

La période écoulée a vu notamment la réalisation des programmes Cnes de l'instrument **Declic** dans l'ISS en coopération avec la Nasa et aussi l'utilisation de l'instrument **Fluidics** dans l'ISS.

Concernant les nouveaux sujets identifiés en 2019 et dans le cadre Cnes, les inserts **Scwo** et **Aerosol** du programme Declic terminent leur phase A, cependant leur cadre programmatique est incertain, la Nasa ayant besoin de redéfinir ses priorités scientifiques avant de préparer la suite de ses engagements. Un nouvel instrument pour l'étude de la turbulence d'onde Fluidics\_L termine également sa phase A. L'insert **Ali** de Declic a été mis à niveau et opéré, tandis que la deuxième mise à niveau de l'insert **DSI** ne pourra être réalisée avant la fin de l'accord de coopération avec la Nasa.

Dans le cadre du programme SciSpacE de l'Esa, autre priorité identifiée en 2019, la communauté française, la plus représentée, a participé à bon nombre d'expériences dans l'ISS, et en fusée sonde, ou à la définition et préparation de nouveaux instruments.

Nous présentons maintenant les avancées scientifiques significatives obtenues par les équipes françaises dans les diverses thématiques constituant les Sciences de la Matière en mentionnant pour chacune les aspects transverses et applicatifs. Les progrès sont associés à des thématiques multiples et variées, qui de façons souvent indépendantes améliorent la compréhension des propriétés fondamentales de la matière (organisation, transition, propriétés statistiques et dynamiques).

### 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, notamment diphasique, et les 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, ainsi que de tester et valider 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, émulsions, suspensions denses et gels colloïdaux sont des milieux emblématiques de la matière molle. A titre d'illustration, les mousses liquides sont des dispersions de gaz dans une phase aqueuse. Sur Terre, la gravité conduit au drainage rapide de l'eau. Très rapidement, les mousses deviennent « sèches » avec un fort gradient vertical de densité d'eau. Les expériences en microgravité constituent une opportunité unique d'étudier le comportement des mousses « humides », en particulier au voisinage de la transition de blocage (dite de *jamming*) où la mousse passe d'un comportement solide à celui d'un liquide « bulleux » concentré. Au cours des procédés de fabrication de certains matériaux, les mousses passent souvent par un stade proche de la transition de blocage, dont le vieillissement et le comportement mécanique n'ont jamais pu être étudiés sur Terre.

Le projet **Foam-C** porte sur leur vieillissement dû au mûrissement (grossissement des bulles induit par le transport de gaz entre elles du fait des différences de pression capillaire). Un nouveau domaine de mousses a été mis en évidence, les bulles s'y agrègent entre elles sous l'effet d'un phénomène d'adhésion, repoussant alors la transition de blocage. L'existence de ce nouveau domaine soulève des questions jusqu'ici ignorées, alimentant actuellement des travaux de pointe à l'échelle internationale.

Le projet **Pasta** a étudié le comportement d'émulsions (dispersions constituées de deux phases liquides dont l'une apparaît sous forme de gouttes). Une nouvelle phénoménologie s'est révélée, montrant des séquences transitoires de coalescence accélérée au voisinage des agrégats de gouttes. Le contrôle de la vitesse de déstabilisation de l'émulsion, donc de son vieillissement, sont ainsi sujets à des avancées notables de l'état de l'art.

Enfin, le domaine des dispersions de particules colloïdales (browniennes, taille inférieure au micron),

s'est montré particulièrement fécond ces dernières années. L'étude de la dynamique microscopique des verres mous en réponse à une sollicitation mécanique a dévoilé l'existence d'une transition universelle de comportement lorsque le seuil d'écoulement est dépassé, transition à présent prédite par un modèle dynamique issu d'une analogie avec le modèle de van der Waals pour la transition liquide-vapeur.

### 1.1.2 BIOPHYSIQUE

Entre physique de la matière molle et sciences du vivant, la biophysique s'intéresse aux propriétés de fluides et tissus biologiques tels le sang, l'endothélium, ou les agrégats cellulaires. Les études, menées entre laboratoires de physique et biologie, ont pour objectifs de : (i) élucider les mécanismes fondamentaux qui gouvernent les écoulements sanguins, (ii) développer des dispositifs biomimétiques de la microcirculation, (iii) mettre au point des méthodes physiques originales d'imagerie, de simulation numérique et de manipulations cellulaires. En micropesanteur, on s'affranchit des effets de sédimentation des cellules sanguines et on peut documenter les effets de la micropesanteur sur la réponse cellulaire et la circulation.

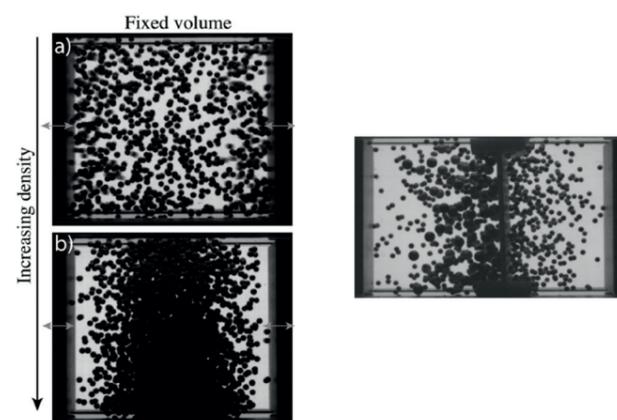
Les phénomènes de migration et d'agrégation dynamique sous flux de globules rouges en microcanaux ont été étudiés afin d'éclaircir le rôle des propriétés mécaniques des globules et de leurs interactions adhésives dans la distribution des cellules au sein de réseaux de vaisseaux ainsi que sur les propriétés rhéologiques locales du sang. L'agrégation de globules rouges lors d'une dégradation enzymatique de leur surface, similaire à celle observée en vols spatiaux, a également été étudiée expérimentalement en vols paraboliques et numériquement.

### 1.1.3 FLUIDES COMPLEXES

La physique des milieux granulaires 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 de forces extérieures imposées et de la sédimentation, difficilement contrôlable sur Terre.

Le modèle vol de l'instrument **Vipgran** de l'ESA est en cours de construction. Plusieurs résultats nouveaux ont été obtenus à l'aide d'un prototype vol parabolique. L'origine de la transition d'un « gaz » granulaire vers un amas dense de grains (fig.2),

lorsque leur nombre augmente, a été comprise. La dynamique de traceurs a permis de détecter l'émergence de cette transition et de proposer un modèle de minimisation d'énergie décrivant avec précision la formation d'hétérogénéités locales. Ces résultats ouvrent la possibilité d'étudier la formation des agrégats de type protoplanétaire. Par ailleurs, un analogue granulaire au phénomène d'osmose a été observé et quantifié.



**Fig.2 Visualisations en micropesanteur d'expériences sur milieux granulaires :**

a) et b) illustrent la transition vers un amas dense ; c) phénomène d'osmose en présence d'une paroi

Des études de la turbulence diphasique, ont été initiées, afin de comprendre notamment comment la turbulence peut modifier la distribution de taille des gouttelettes d'eau dans l'air, un processus important de la physique des nuages. La différence de densité importante entre les deux phases rend la microgravité indispensable. Une expérience d'écoulement de von Karman diphasique a été réalisée et une réduction de traînée turbulente due à la migration de l'air a été identifiée.

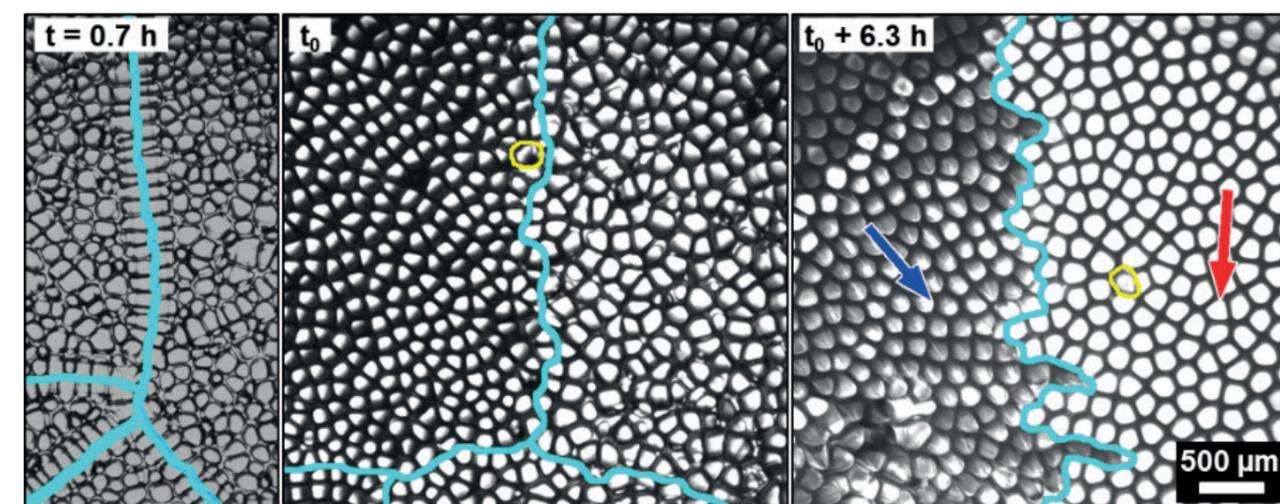
## 1.2 ETATS ET TRANSITIONS D'ÉTAT DE LA MATIÈRE

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'oxydation de particules organiques.

### 1.2.1 SOLIDIFICATION

La solidification étudie la dynamique des microstructures qui se forment à l'interface entre un solide et le liquide dans lequel il croît. Il peut s'agir d'alliages métalliques ou de matériaux transparents. La recherche amont en solidification a un très fort impact industriel, les microstructures de solidification déterminant les propriétés des matériaux élaborés.

En apesanteur, la solidification et les instabilités morphologiques associées sont gouvernées uniquement par la diffusion de solutés et de chaleur, couplée aux propriétés physico-chimiques du matériau utilisé. Ces conditions uniques permettent



**Fig.3 Interpénétration entre grains dans l'interface solide – liquide pendant la solidification dirigée en microgravité**  
Les joints de grains sont représentés en cyan ; une cellule « solitaire » est entourée en jaune ; les flèches rouge et bleu indiquent les directions de dérive globale des grains.

Une nouvelle mise à niveau de l'insert DSI\_(DSI\_R2) était prévue, mais les difficultés de développement combinées à la fin de l'accord de coopération avec la Nasa ont conduit à y renoncer.

Dans le cadre ESA, l'analyse des expériences de solidification *in situ* dans l'instrument « Transparent Alloys » (ISS) et leur modélisation numérique ont permis d'éclairer deux aspects de la croissance biphasée couplée des mélanges dits eutectiques : la mise en ordre hexagonal des structures en fibres en fonction de la vitesse de solidification et celui de la transition morphologique dite lamelles/fibres.

Le projet XRMON (fusée sonde) pour l'étude *in situ* de la croissance dendritique colonnaire ou équiaxe dans des échantillons d'alliages Al-Cu par radiographie X, a mis en évidence l'influence de la gravité sur la germination et la croissance de grains équiaxes lors de la transition colonnaire-équiaxe. Ces résultats ont permis d'éclairer les contributions

une exploration précise des phénomènes contrôlant la formation des microstructures dans un contexte de physique non-linéaire des structures hors équilibre.

La période écoulée a vu la continuation des expériences dans l'insert **Declic-DSI** en coopération avec la Nasa. Les expériences ont permis l'obtention de résultats sur la sélection microstructurale et la dynamique d'ordre/désordre sous l'influence de distorsions du champ thermique ou de la cristallographie (fig.3 : compétition de grains, « cellules solitaires »).

respectives des blocages mécanique et solutal et mis en avant le rôle crucial en micropesanteur de l'écoulement provoqué par le retrait de solidification.

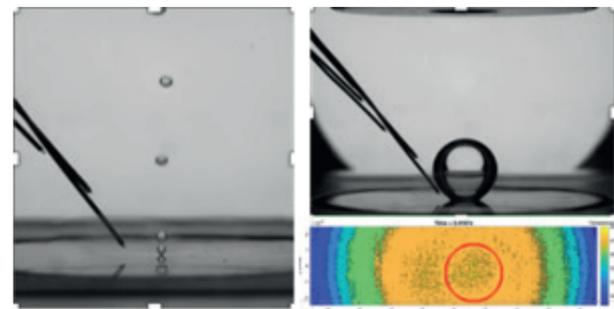
Les expériences CETSOL (ISS) ont fourni des résultats sur la transition colonnaire-équiaxe (impact de porosité, influence d'un champ magnétique et caractérisation tri-dimensionnelle) par analyse métallographique post-mortem, analysés grâce aux simulations numériques multi-phases et multi-échelles.

### 1.2.2 EVAPORATION ET ÉBULLITION

Ces activités sur les écoulements diphasiques (liquide/vapeur en présence d'ébullition/évaporation) abordent la phénoménologie liée au changement de phase, telles, l'évaporation de gouttes sur des substrats de mouillabilité variable ou solubles ou la dynamique de lignes de contact. En pratique, l'évaporation et la condensation sont associées à d'intenses échanges de chaleur, ce dont tirent profit

de nombreuses applications industrielles. Les expériences en micropesanteur permettent d'améliorer notre compréhension des phénomènes physiques grâce à des expériences ciblées à l'échelle d'une bulle ou d'une goutte en l'absence de force de flottabilité et en présence de forts effets capillaires.

L'expérience Esa **Rubi** (Multiscale Boiling) a permis de réaliser à bord de l'ISS des expériences uniques d'ébullition sur un site isolé, en présence d'un champ électrique et/ou d'un écoulement. Des bulles de tailles centimétriques ont été observées à de bien meilleures résolutions temporelles et spatiales des champs de température qu'à gravité terrestre. Il a été montré en particulier que l'évaporation au voisinage de la ligne de contact contribue pour une part importante à la croissance de la bulle (fig.4).

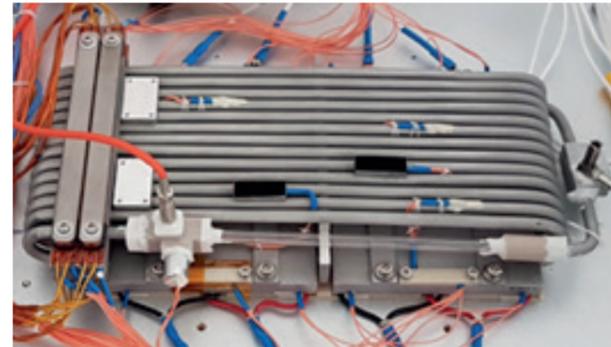


**Fig.4 : expérience Rubi**  
(gauche) ébullition à gravité terrestre ;  
(droite) ébullition en microgravité et champ de température associé (cercle rouge : pied de bulle)

Cette évaporation au voisinage de la ligne de contact joue un rôle important dans l'évaporation de gouttes, dont la cinétique dépend de la mouillabilité du substrat. Plusieurs expériences de formation et évaporation de gouttes sessiles sur les parois hydrophiles et hydrophobes ont été réalisées en vols paraboliques et en fusée sonde (**Arles**). Le mouillage d'une goutte sur un substrat n'est pas systématiquement prédit. Ce constat a motivé des études sur l'influence de la gravité sur l'angle macroscopique de mouillage lors de la formation d'une goutte sessile, éclairant le rôle de l'énergie de la zone triple.

L'évaporation d'un film liquide déposé sur une paroi joue un rôle important dans les caloducs oscillants, tels les PHP (pulsating heat pipe), candidats pour le refroidissement d'électronique de puissance. La figure 5 en présente un prototype. Le train de bou-

chons qu'est l'écoulement diphasique circulant dans le tube entre en mouvement auto-entretenu dès le contact au point chaud établi, conduisant la chaleur à la fois par évaporation-condensation et par advection. L'étude en vol parabolique a permis d'identifier les phénomènes physiques responsables de ce mouvement.

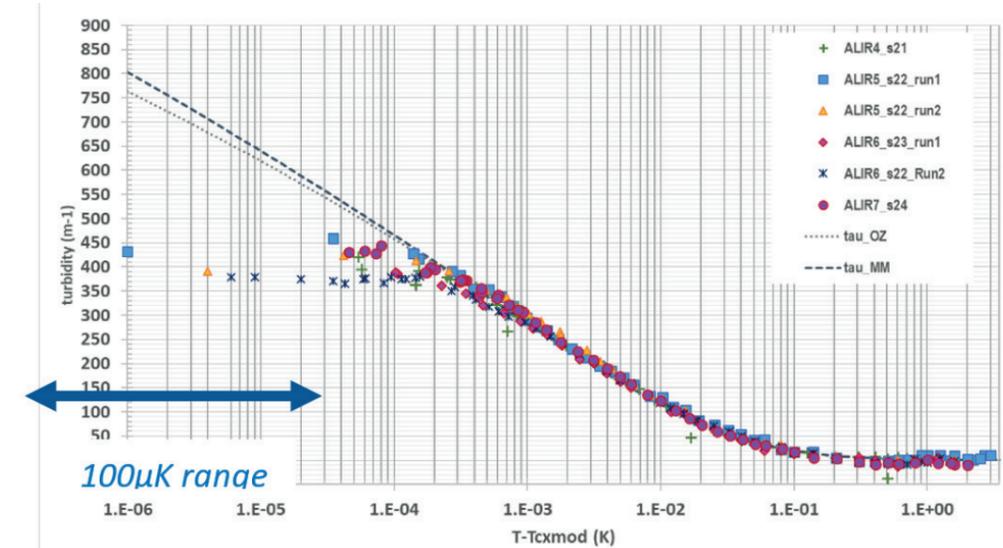


**Fig.5 : Prototype de caloduc oscillant pour l'appareil HTH-1 de l'ESA.**

### 1.2.3 FLUIDES SUPERCRITIQUES

La température au point critique définit le point du diagramme des phases où la coexistence des phases liquide et vapeur se termine. Au voisinage de cette température, le comportement du fluide devient très particulier à cause de la divergence de ses propriétés telles la capacité thermique ou la compressibilité. Pour étudier les phénomènes à proximité du point critique, la stratification par effet gravitaire doit être supprimée. Les inserts **ALI** et **HTI** de l'instrument **Declic** (ISS) sont dédiés à cette tâche.

Les premières mesures avec ALI en apesanteur ont démontré l'importance de l'écart à la densité critique dans l'analyse théorique du comportement singulier de la propriété de turbidité (fig.6). La maîtrise de cet écart a permis de tester expérimentalement les modèles théoriques de la forme universelle de l'équation d'état. Ainsi, ces expériences ont permis de proposer un nouveau modèle prédictif, le seul à être en accord avec les résultats expérimentaux.



**Fig.6 Mesures de turbidité lors d'expériences ALI-R dans l'ISS (2022-2023), jusqu'à une proximité de la température critique inférieure à 100 $\mu$ K.**

Les expériences utilisant l'insert **HTI-R** ont mis en évidence la compétition entre les phénomènes de séparation de phase et les phénomènes d'ébullition en présence de sel, créant l'alternance de situations diphasiques stables et instables sans aucune modification apparente des niveaux thermiques locaux dans la cellule.

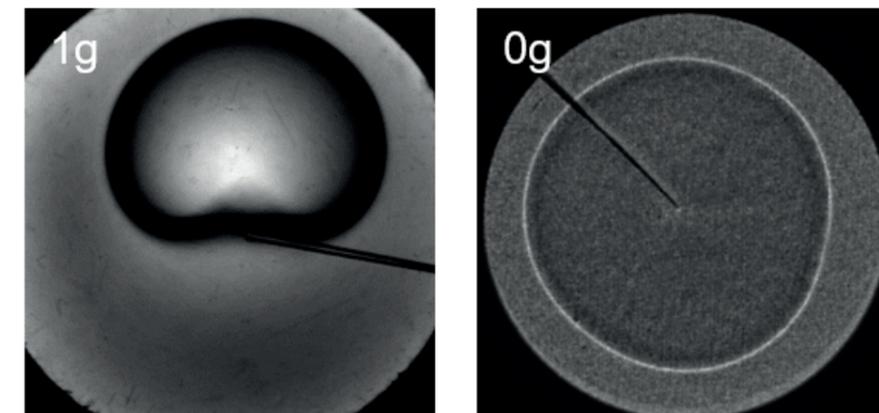
### 1.3 INSTABILITÉS, TRANSFERT ET ONDES

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 liés à la combustion en micropesanteur sont d'accroître les connaissances sur les phénomènes fondamentaux, puis d'en utiliser les résultats pour faire progresser les technologies liées à la

maîtrise de la combustion. Les processus à gravité terrestre sont généralement fortement influencés par la convection naturelle. S'en affranchir permet de mener de nouvelles expériences dans lesquelles les écoulements et la sédimentation induits par la gravité sont pratiquement éliminés. L'élimination des perturbations causées par les forces de flottabilité peut en particulier accroître la durée des expériences, ouvrant sur l'examen des phénomènes à plus grande échelle temporelle. La pertinence de l'outil micropesanteur est illustrée en fig.7.



**Fig.7 A conditions initiales identiques, propagation lente d'une flamme prémélangée**  
(gauche) fortement convectée sous gravité terrestre ; (droite) en micropesanteur.

Au niveau international, différentes équipes de recherche travaillent sur ces problématiques de combustion en micropesanteur, avec une forte représentativité de la part des États-Unis et du Japon. L'Europe est faiblement active, exceptée en France où les recherches se concentrent sur la combustion diphasique (spray combustible), ainsi que sur la propagation de flamme sur combustible solide. Ces travaux permettent d'aborder les questions de sécurité relatives aux incendies, notamment à bord des engins spatiaux habités. Une coopération Cnes-Jaxa a permis une contribution significative d'une équipe française à une expérience en cours d'exploitation au sein du module japonais Kibo.

### 1.3.2 INSTABILITÉS HYDRODYNAMIQUES (CONVECTION) ET ONDES

Les instabilités hydrodynamiques jouent un rôle fondamental dans les processus géophysiques (météorologie, océanographie, climat), les écoulements astrophysiques (étoiles, disques d'accrétion, milieu interstellaire) ainsi que dans de nombreux dispositifs industriels. C'est en particulier le cas de la convection thermique. Celle-ci est un moyen efficace de transfert de chaleur entre un fluide et un autre milieu de température différente. En micropesanteur, la poussée d'Archimède, responsable de la convection naturelle, est négligeable. La compréhension des phénomènes de convection dans des liquides avec interface (convection thermocapillaire) et dans les mélanges binaires ou ternaires (convection thermosolutale) reste également un enjeu de taille pour la stabilité des mélanges ou la séparation des espèces en microgravité. Une partie de ces études a été réalisée dans le cadre de l'expérience Esa **DCMIX**.

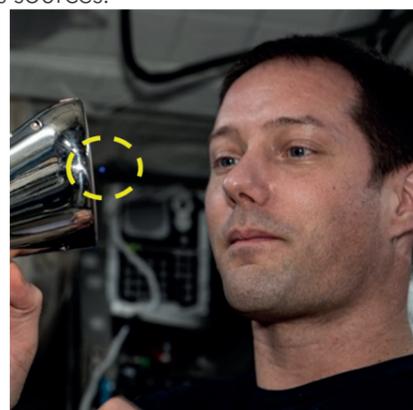
La turbulence d'ondes concerne l'étude des propriétés dynamiques et statistiques d'un ensemble d'ondes en interaction non-linéaire. Les applications sont diverses et concernent, par exemple, les vagues à la surface des océans ou les ondes d'Alfvén dans les plasmas astrophysiques. L'intérêt de la micropesanteur 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**, utilisé de 2017 à 2023) ont mon-

tré un bon accord avec les prédictions théoriques de la turbulence faible.

### 1.3.3 ONDES ACOUSTIQUES

Les ondes ultrasonores (fréquence > 20 kHz) sont des perturbations locales de la pression d'un milieu matériel, inaudibles pour les humains. À faible intensité, elles représentent des vecteurs d'information qui permettent de sonder fluides et solides, l'échographie étant l'application la plus connue. À forte intensité, ces ondes peuvent interagir avec la matière et engendrer l'apparition de forces, dite de pression de radiation, sur les objets impactés. L'intérêt de la micropesanteur est de permettre l'étude précise de ces phénomènes fondamentaux sans l'effet parasite de la pesanteur, pour ensuite développer des dispositifs technologiques les intégrant.

Le phénomène de pression de radiation acoustique permet de déplacer des objets sans les toucher. Une nouvelle modalité de manipulation a été développée : la pince acoustique. Elle est basée sur l'utilisation d'un faisceau unidirectionnel d'ondes ultrasonores qui exerce une force tridimensionnelle pouvant piéger un objet à un endroit précis de l'espace. Cette technologie sans contact présente un grand potentiel, notamment dans la science des matériaux, en micro-fluidique ou en microrobotique. Les expériences qui ont eu lieu en vols paraboliques et à bord de l'ISS (avec le démonstrateur technologique **Telemaque** en fig.8) ont mis en évidence l'intérêt des pinces ultrasonores pour manipuler une grande variété de matériaux dans diverses configurations en micropesanteur. Ces résultats ont permis de valider un modèle théorique prédictif permettant l'optimisation de la configuration des sources.



**Fig. 8 : Utilisation de la pince acoustique TELEMAQUE pour piéger une bille (entourée en jaune) par Th. Pesquet lors de la mission Alpha (Juillet 2021).**

## 2. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

### 2.1 MATIÈRE MOLLE ET FLUIDES COMPLEXES

#### 2.1.1 MOUSSES ET ÉMULSIONS

Les expériences sont réalisées grâce à des instruments originaux qui couplent rhéologie et diffusion de la lumière. Pour les mousses et les émulsions, le but est d'élucider les dynamiques de vieillissement au cours d'expériences dans l'ISS avec l'instrument **Foam-C**. Pour les gels et verres, il s'agit d'étudier la dynamique microscopique sous sollicitation mécanique avec l'instrument de diffusion de la lumière **Colis** de l'Esa. L'instrument **Flumias** de l'Esa sera utilisé pour des expériences sur des émulsions stimulables.

À plus long terme, les objectifs seront les suivants :

- Caractérisation et compréhension de la dynamique lors de la transition vitreuse (verres) ou de blocage (verres, gels, mousses), incluant le 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.

Outre la clarification des transitions vitreuses et de blocage sur le plan fondamental, les applications bénéficieront d'une compréhension plus fine des mécanismes responsables de la défaillance de matériaux désordonnés. La meilleure maîtrise des procédés de fabrication des mousses pourrait mener à des matériaux nouveaux pour la santé (biocompatibles) et la construction, notamment dans l'optique d'habitats lunaires/martiens car les mousses sont de bons isolants et nécessitent intrinsèquement moins de ressource que les matériaux massifs.

#### 2.1.2 BIOPHYSIQUE

Le soutien doit être en particulier orienté vers deux projets Esa embarqués en fusée sonde en 2025. Le projet **Krabs** fournira des informations sur le couplage entre agrégation et écoulement sanguin par des mesures simultanées de viscosité effective et des visualisations de l'agrégation. Le projet **Imedys** représentera, lui, la toute première expérience de caractérisation de la sensibilité des cellules endothéliales à des altérations de la gravité en présence du stimulus mécanique associé à la contrainte hydrodynamique de cisaillement. Les résultats consolideront la compréhension des phénomènes de déconditionnement vasculaire repor-

tés lors des vols spatiaux.

Les dispositifs acousto-fluidiques mènent à des perspectives de manipulation et contrôle d'agré-gats cellulaires pour la culture 3D et l'étude de sphéroïdes en microgravité.

Les travaux de simulations numériques des écoulements sanguins en réseaux de microcanaux, appuyés par les méthodes émergentes d'analyse de données par intelligence artificielle, doivent permettre quant à eux de fournir un cadre prédictif qui guidera le design des expériences.

#### 2.1.3 FLUIDES COMPLEXES

La participation au projet **Vipgran** de l'Esa devra se poursuivre lors de son exploitation dans l'ISS. Les régimes inaccessibles sur Terre devront être sondés, tels la dynamique post-excitation de relaxation d'un granulaire ou la rhéologie d'un granulaire dense proche du seuil de la transition de blocage (*jamming*). Enfin, déplacer un granulaire devient un défi majeur en impesanteur : l'application de vibrations au sein d'une cellule semi-cloisonnée serait une solution et répondrait à des questions ouvertes en physique statistique des systèmes hors d'équilibre.

Les expériences de turbulence diphasique doivent être poursuivies afin de comprendre le mécanisme de réduction de traînée turbulente résultant de la présence de bulles d'air dans l'eau. En priorité majeure, un nouvel insert **Aerosol** de **Declic** est en cours de conception au Cnes, permettant de mettre en évidence et d'étudier la génération de brouillard de gouttelettes dans un écoulement de vapeur d'eau et d'air.

### 2.2 ETATS ET TRANSITIONS D'ÉTAT DE LA MATIÈRE

#### 2.2.1 SOLIDIFICATION

Pour l'étude de la croissance de grains équiaxes dans les alliages transparents des expériences devront être conduites dans la continuité du programme **Cetsol**.

Enfin, le potentiel majeur du dispositif développé dans le cadre du projet XRMON a mené l'Esa à initier le développement d'un nouveau dispositif **XRF** (X-Ray Facility) destiné à une utilisation dans l'ISS en 2026. L'expertise française doit y être soutenue.

## 2.2.2 EVAPORATION ET ÉBULLITION

Le post-traitement des données de **Rubi** et leur valorisation doivent se poursuivre dans les années futures. Les données de **Rubi** sont une référence pour la validation des modélisations physiques implémentées dans les codes de calcul.

Deux prototypes de caloducs oscillants sont en cours de développement et seront montés sur l'appareil **Heat Transfer Host 1** de l'Esa. Une collaboration Cea/Cnes sur la validation du code Casco pour le dimensionnement du caloduc oscillant démarre dès 2024. Les expériences sur l'ébullition en tube en microgravité mériteraient, elles, d'être poursuivies avec une ouverture sur les problématiques de mise en froid de tubes, rencontrées lors du ré-allumage des moteurs de lanceurs. Il s'agit là d'une des priorités affichées par la Nasa et les industries du secteur aérospatial, notamment avec des fluides cryogéniques.

## 2.2.3 FLUIDES SUPERCRITIQUES

L'objectif prioritaire est de poser les bases du traitement de la matière organique dans l'eau supercritique, avec la mise en œuvre d'une technologie d'oxydation en eau supercritique (procédé Super-Critical Water Oxydation – **Declic Scwo**, fig.9) qui permettra l'étude *in situ* de la réactivité chimique, des flammes hydrothermales et des phénomènes de mélange. Cela présente un intérêt certain pour la neutralisation des déchets toxiques, avec des applications potentielles pour l'exploration spatiale.



**Fig.9 : première visualisation de SCWO (~220 bar)**  
Enveloppe de flamme non-prémélangée bleue (caractéristique de la combustion des alcools)

## 2.3 INSTABILITÉS, TRANSFERT ET ONDES

### 2.3.1 COMBUSTION

Dans le domaine de la sécurité, les écoulements prémélangés air/réfrigérant présentent des vitesses de flamme relativement faibles et les études fondamentales en micropesanteur permettent alors l'exploration de conditions inaccessibles sur Terre. Une collaboration franco-germanique naissante s'intéresse à l'inflammabilité des réfrigérants, notamment ceux embarqués dans les engins spatiaux, et se traduit par une participation conjointe aux campagnes de vols paraboliques Cnes & DLR à soutenir.

Dans le domaine de la combustion solide, les configurations expérimentales développées permettent l'étude de la propagation de flamme sur polymère, qui mène à gravité terrestre au phénomène parasite d'égouttement. Ces études multiphasiques soutenues par le Cnes dans le contexte de collaborations internationales en cours sont particulièrement pertinentes dans le cadre de la sécurité-incendie des vols habités. Le contrôle de l'histoire de la combustion pourrait s'étendre à l'étude de configurations sphériques, qui trouve un écho potentiel dans les efforts environnementaux de décarbonation de l'énergie et plus spécifiquement de la combustion de particules métalliques.

### 2.3.2 INSTABILITÉS HYDRODYNAMIQUES (CONVECTION) ET ONDES

La conception de l'instrument **Fluidics-L** est un sujet prioritaire majeur pour le CNES. Cet instrument est destiné à des expériences de dynamique des fluides sous forçage linéaire, original à bord de l'ISS, afin d'étudier d'une part la turbulence d'ondes (dans un régime purement capillaire et en géométrie sphérique irréalisable au sol) et d'autre part le contrôle actif de ballottements d'ergols dans des réservoirs. Ces deux sujets figurent parmi les domaines d'excellence des communautés scientifiques et industrielles françaises.

Par ailleurs, une expérience nouvelle, vise à affiner la modélisation des transferts thermiques atmosphériques (**Atmoflow**). Des expériences en vols paraboliques (DLR/Cnes) seront nécessaires pour aider les simulations numériques et les études théoriques en vue de préparer l'expérience ISS.

Enfin, les études théoriques accompagnant l'expérience **DCMIX** de l'Esa doivent être poursuivies.

### 2.3.3 ONDES ACOUSTIQUES

Le phénomène de *streaming* peut accélérer les transferts thermiques dans des zones difficilement accessibles. En effet, les ondes acoustiques parviennent à se propager dans des géométries exiguës jusqu'à, par exemple, des circuits imprimés chauds. Les écoulements induits sont alors particulièrement intenses et il est alors possible de remplacer les dispositifs usuels de conditionnement thermique par des transducteurs piézoélectriques robustes. La première mise en évidence expérimentale au sol et les simulations numériques détaillant les caractéristiques optimales de ces dispositifs doivent ouvrir vers un prototype pour évaluer le potentiel de cette nouvelle technologie en micropesanteur.

## 2.4 SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

### 2.4.1 PRIORITÉS DU PROGRAMME DE RECHERCHE EN SCIENCE DE LA MATIÈRE

Parmi les priorités scientifiques, celles identifiées à travers le programme DECLIC-Evolution ont besoin de temps longs en micropesanteur et sont de vrais spécificités, inscrites jusqu'ici dans une coopération historique franco-américaine, et non traitées par d'autres agences. Pour ces nouveaux inserts, le cadre programmatique doit être consolidé, la Nasa ayant besoin de redéfinir ses priorités scientifiques avant de préparer la suite de ses engagements.

Les sujets de recherches du programme DECLIC-Evolution, dans la programmation du CNES sont :

- La combustion froide dans l'eau supercritique : nouvel insert/instrument **SCWO**
- La nucléation de l'eau : nouvel insert/instrument **Aerosol**

Egalement, dans le cadre programmatique du Cnes, la communauté soutient fortement le développement d'un instrument **Fluidics\_L** pour l'étude de la turbulence d'ondes à grande échelle, à fort savoir-faire scientifique et technique français.

Le cadre programmatique Esa SciSpacE est depuis toujours fondamental pour satisfaire les besoins de la communauté française extrêmement présente. Il est crucial d'accompagner la communauté dans la préparation et proposition d'expériences, et d'aider à son positionnement dans les équipes de définition de nouveaux instruments. Parmi les thèmes privilégiés dans ce contexte nous trouvons

les mousses, les différents transferts d'énergie et les milieux granulaires.

Enfin, pour les projets futurs, nous soutenons les projets interdisciplinaires, et poussons à favoriser les échanges entre disciplines scientifiques. Les sciences de la matière peuvent apporter un soutien fondamental à la santé avec la biophysique, la météorologie, la climatologie, la planétologie, etc, en apportant des modèles construits sur les propriétés universelles, hors gravité, de la matière. De même, il paraît essentiel de souligner le potentiel applicatif à long terme de la recherche fondamentale, notamment dans le contexte énergie/climat.

### 2.4.2 LES MOYENS : ÉLÉMENTS DE CONTEXTE

La fin de vie de la station internationale est programmée en 2030 avec une potentielle désorbitation en 2031. Les Etats-Unis ne souhaitent pas reproduire au-delà de cette date une infrastructure avec un modèle d'exploitation identique et comptent s'appuyer sur des modèles de services commerciaux d'infrastructures ou systèmes d'accueil en orbite basse (systèmes habités ou automatiques). Plusieurs acteurs commerciaux américains développent leur infrastructure orbitale et recherchent des partenariats internationaux avec l'industrie des différents partenaires européens, japonais ou canadiens notamment. La recherche en Sciences de la Matière nécessite l'accès à des infrastructures de recherche procurant des conditions de  $\mu$ pesanteur sur des temps longs, et il est fondamental de préserver cet accès pour la communauté française. Il convient par l'action du Cnes et de l'Esa auprès des acteurs commerciaux et industriels nationaux et internationaux de chercher à en faciliter les mécanismes d'accès et à en optimiser les coûts.

Il paraît également utile de rappeler que les campagnes de vols paraboliques constituent un outil majeur pour la communauté, en préparation de vols de plus longue durée, mais aussi pour mener des activités de recherche à part entière. L'accès à cet outil assez unique peut également favoriser la coopération avec un partenaire international disposant d'expérience en orbite basse.

Par ailleurs, il est bon de prendre en compte que la stratégie de l'Esa sur l'Exploration pousse vers des activités scientifiques davantage dirigées au profit de l'Exploration. Dans ce contexte, il paraît indis-

pensable d'identifier et valoriser clairement les activités répondant à ce critère, ainsi que celles avec un fort potentiel applicatif, mais surtout d'agir au sein de l'Esa pour préserver un volume d'activité suffisant destiné à la recherche fondamentale, à la base des progrès scientifiques.

Enfin, l'importance du dispositif APR doit être souligné : c'est une ressource centrale pour la communauté, en préparation mais également en réalisation d'expériences, notamment en Vols Paraboliques, avec le financement de l'instrumentation. Il est indispensable de le maintenir au minimum à son niveau actuel.

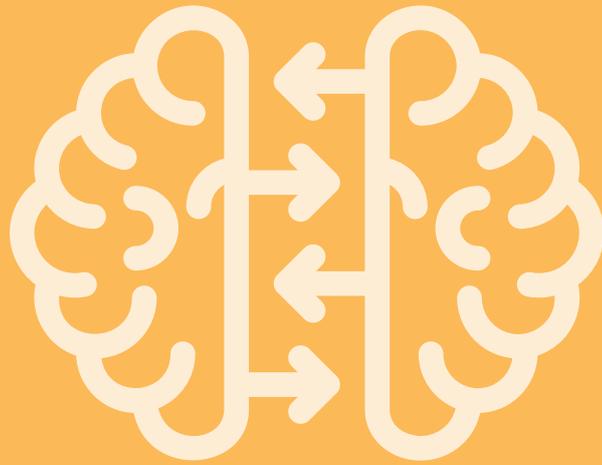
### 2.4.3 TABLEAUX DE SYNTHÈSE

#### Recommandations priorités scientifiques

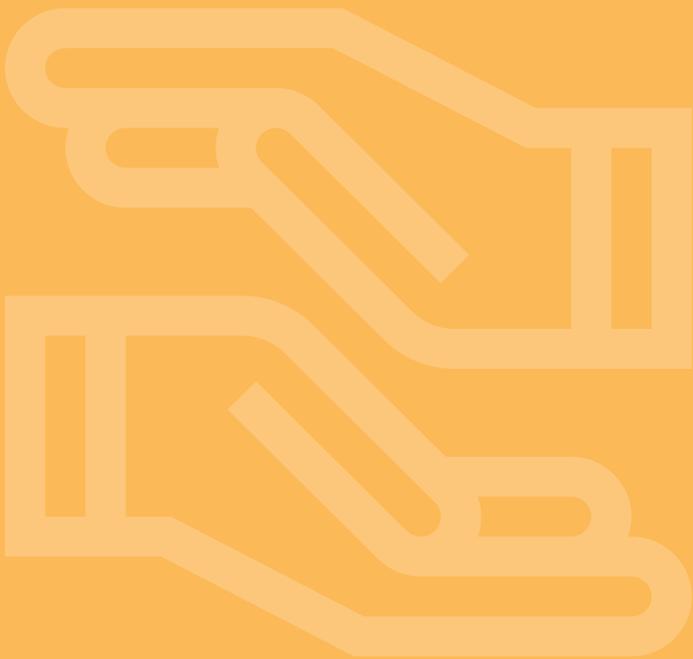
Objectif scientifique	Observable/type de mesure	Exemple de cadre de réalisation avec phase	R&T	Commentaire
<b>Micro-physique des nuages</b>	Condensation de l'eau et influence de la turbulence	DECLIC_EVO – Insert AEROSOL Phase A au CNES	Validation Vols Paraboliques	Engagement visé fin 2024 ? Horizon fin ISS ?
<b>Combustion bas carbone</b>	Combustion de matière organique dans l'eau supercritique	DECLIC_EVO – Insert SCWO Phase A au CNES	Dispositifs microfluidiques	Engagement visé fin 2024 ? Horizon fin ISS ?
<b>Etude des grandes échelles en turbulence d'ondes</b>	Dynamique d'interface	Fluidics_L Phase A au CNES Coopération Esa	Validation Vols Paraboliques	Engagement visé fin 2024
<b>Mousses Transferts d'énergie Milieux granulaires</b>	Rhéologie du murissement Evaporation de gouttes Milieu granulaire sous vibration	Esa SciSpacE		Cadre programmatique Esa fondamentale
<b>Programmes inter-disciplinaires Energie - Climat Combustion - Biophysique</b>		Esa SciSpacE, APR, AD		Orientation Exploration

#### Recommandations sur les moyens

Contexte	Recommandation
La fin de l'ISS est programmée pour 2030 avec une suite commerciale	Garantir l'accès à des vols longue durée en µpesantur dans ce nouveau contexte.
Les programmes Cnes et Esa de vols paraboliques procurent un outil essentiel pour la communauté scientifique, pour faire de la science, en préparation d'expériences plus longue durée	Il est crucial de maintenir ces programmes.
La stratégie ESA Terra Novae pousse pour de la Science plus orientée au profit de l'Exploration	Veiller à préserver les capacités de mener de la science fondamentale en SdM.
Le soutien de la communauté SdM à travers le dispositif Appels à Propositions de Recherche est fondamental pour l'émergence et la réalisation d'expériences en SdM.	Veiller à maintenir les capacités de ce soutien.



# LES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES AU CNES



# LES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES

Céline Calleya

## 1. L'ORIGINE

En 2008, à la demande du président du Cnes une réflexion concernant les enjeux de l'innovation impliquant des chercheurs issus des Sciences Humaines et Sociales (SHS) a été lancée. Cette réflexion a abouti à la création d'un programme de recherche intitulé « Espace Innovation Société » mené en partenariat avec des laboratoires français sous l'animation conjointe Cnes et cabinet externe. Il s'agissait de s'intéresser à la contribution de l'activité spatiale aux grands problèmes contemporains de la société, en se concentrant sur les conditions de cette contribution, notamment le dialogue avec les décideurs publics, l'identification des espaces de coopération, les modalités de co-construction avec les acteurs émergents.

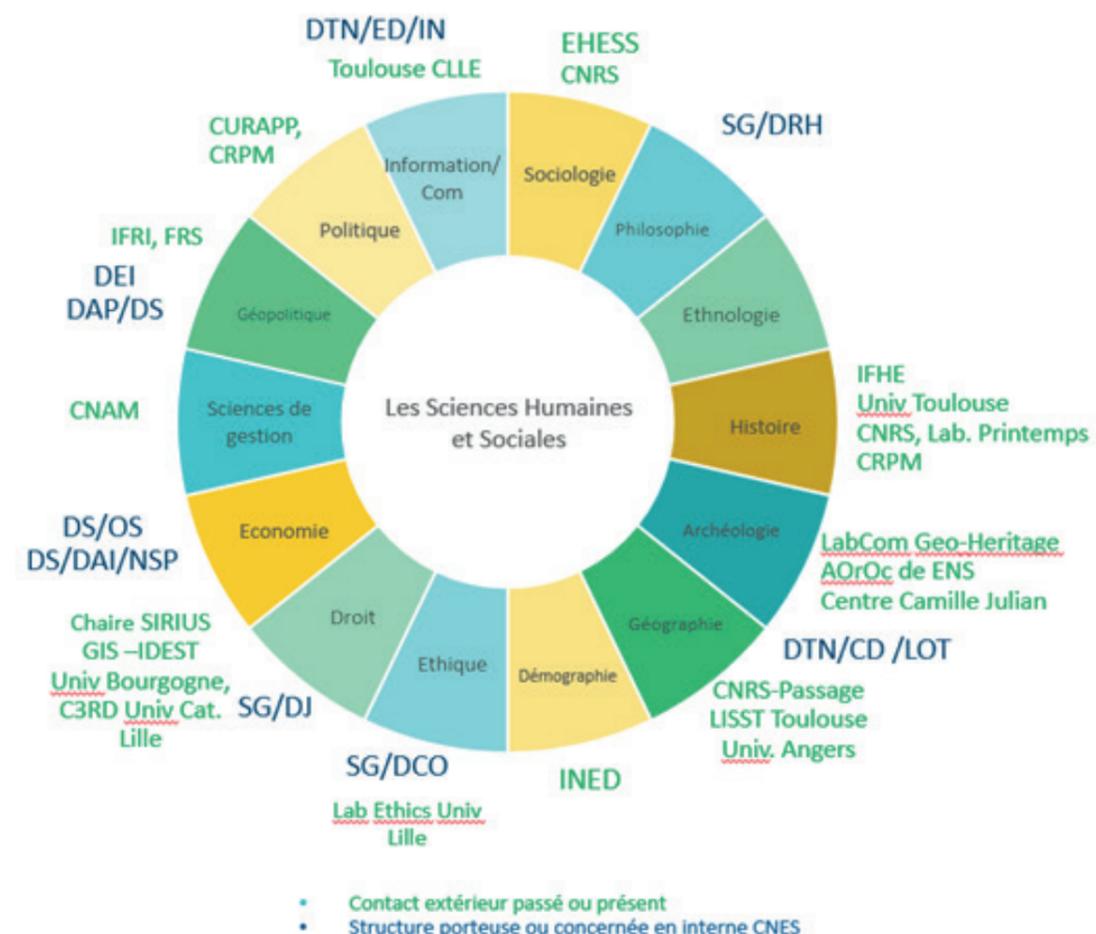
En 2016, à la fin de ce programme, le groupe de chercheurs SHS ainsi constitué a continué à s'intéresser au secteur spatial et à ses grandes questions. Pour les accompagner, la Direction de l'Innovation et des Applications de l'époque a soutenu ce groupe par l'intermédiaire de conventions bilatérales et d'allocations de recherche doctorale, en essayant de construire un espace de dialogue entre ces chercheurs et les ingénieurs Cnes.

Cependant ce n'est qu'en 2022 que les sciences humaines et sociales sont devenues un véritable programme de recherche du Cnes grâce à un rattachement à la direction adjointe des programmes de la direction de la stratégie. Cette thématique dispose ainsi au sein du Cnes d'un responsable clairement identifié et dédié à ce programme. Cette fonction est rattachée à la sous-direction « Coordination Scientifique » qui a pour mission d'accompagner en transverse toutes les thématiques scientifiques représentées dans les comités CERES et TOSCA. La coordination scientifique est en charge des processus d'Appel à Projet de Recherche (APR) annuel du Cnes ainsi que de celui du programme doc/post docs.

## 2. L'ÉTAT ACTUEL

Au sein du Cnes, les thématiques des sciences humaines et sociales peuvent concerner plusieurs entités, ces structures peuvent aussi être porteuse de la thématique

### Les thématiques SHS et les porteurs internes Cnes



D'un point de vue pratique les chercheurs en sciences humaines et sociales peuvent être classés en trois catégories :

- Ceux qui sont potentiellement utilisateurs de la donnée spatiale pour mener à bien leur recherche. Elle est potentiellement un outil, ils peuvent donc avoir besoin de la part de la communauté scientifique spatiale de produits dédiés ou une aide pour les construire. Dans cette catégorie on pourra retrouver des géographes, des démographes, des archéologues..
- Ceux qui étudient le secteur spatial en lui-même, l'objet ou le terrain d'étude est l'écosystème ou un de ses acteurs. Sur le territoire national le nombre de chercheurs en science humaines et sociales intéressés par le spatial étaient peu nombreux. Avec la multiplicité des usages, des acteurs, du changement global, les chercheurs SHS sont de plus en plus amenés à étudier la contribution du

spatial aux problématiques de la société.

- Ceux qui travaillent plus étroitement avec cet écosystème spatial et qui contribuent à le changer comme les juristes en droit spatial, des géopolitologues.

Les enjeux liés à ces catégories sont bien différents : Pour le premier groupe il s'agit de contribuer à la compréhension du changement global, mieux évaluer les interactions environnement population territoire, corréler les données terrain avec des données spatiales. Pour le deuxième groupe, il s'agit d'écrire le récit du spatial français et européen et de répondre aux questionnements de la société sur les activités spatiales, pour le troisième, l'enjeu est l'évolution même de ce secteur en devenant acteur du changement pour les besoins de la société.

Pour recueillir le besoin des chercheurs en sciences humaines et sociales, le Cnes établit des liens avec les organismes de recherche SHS comme l'InSHS (Institut des Sciences Humaines et Sociales) du CNRS, l'INED (Institut National d'Etudes Démographiques) ou encore l'EHESS (l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales), l'ENS (Ecole Normale Supérieure).

De par ces actions de rapprochement, le Cnes est sollicité pour soutenir des initiatives émanant des chercheurs en sciences humaines et sociales comme :

- organisation d'un colloque sur l'archéologie (2023) intitulé « Imagerie spatiale au service du patrimoine culturel » au siège du Cnes à Paris
- participation en tant que mécène pour la Chaire Espace de l'Ecole Normale Supérieure (sollicitation en 2023 pour un démarrage en 2024)
- soutien à des réponses à appels externes au Cnes comme par exemple pour l'AMI SHS France 2030, les Défis clés de la Région Occitanie (action en cours)...

Afin de répondre aux besoins de ces chercheurs, le Cnes a ouvert ses processus initialement dédiés à la communauté spatiale du CERES et du TOSCA vers

### 3. LES PERSPECTIVES

Au-delà de l'accompagnement des chercheurs en sciences humaines et sociales et la réponse à leur besoin, le Cnes veut favoriser les échanges entre les disciplines scientifiques. Il semble important que les activités menées pour accompagner les chercheurs en sciences humaines et sociales soient complétées par des actions conjointes ou croisées entre les chercheurs des autres thématiques. Les initiatives soutenues par le Cnes et mentionnées précédemment vont dans ce sens. Cette perspective est sans doute difficile à atteindre en l'état actuel mais sur un temps plus long et une acculturation mutuelle cela pourrait être un bon objectif pour la prospective à 5 ans.

Le travail de rapprochement du Cnes vers les thématiques SHS porte donc ses fruits et doit maintenant s'accompagner d'une organisation plus solide et pérenne impliquant la communauté scientifique. La difficulté de définir un groupe thématique en sciences humaines et sociales résulte dans la diver-

les chercheurs en sciences humaines et sociales. C'était déjà le cas pour les allocations doctorales mais depuis 2022 l'APR, et en 2023 l'appel à contribution du Séminaire de Prospective Scientifique (SPS), ont été ouverts et diffusés vers les chercheurs en sciences humaines et sociales.

Concernant l'appel à contribution pour le SPS, deux propositions émanent directement des contacts établis par le Cnes, une sur l'impact environnemental par des démographes de l'INED et une sur l'hydrologie du passé par les archéologues du centre Camille Julian. C'est le groupe Surface Continentale du TOSCA qui a pris en compte ces deux propositions car très en lien avec cette thématique. En dehors de ces contributions, les activités SHS du Cnes ont été présentées dans les groupes spécifiques (Science et NewSpace, réduction de l'empreinte environnementale des activités scientifiques). Les travaux des chercheurs SHS pourraient alimenter la réflexion sur ces domaines, il semblait donc intéressant de porter à leur connaissance les travaux menés par le Cnes.

sité même de ces thématiques. Le groupe thématique SHS pourrait être un groupe hétérogène, du point de vue direction de recherche, et nous envisageons d'inviter dans ce groupe les représentants des thématiques les plus représentées à ce jour.

Il est important pour le Cnes, qu'à l'occasion de cette prospective scientifique le CPS considère les besoins des chercheurs en sciences humaines et sociales et qu'il aide à structurer d'un point de vue programmatique scientifique leurs besoins, en lien avec les autres thématiques.



## **LES ACTIVITÉS DE R&T**



## GROUPE SPÉCIFIQUE

# PRÉPARATION DU FUTUR

Céline Angélélis (animatrice), Aurore Dupuis, Frédéric Estève, Corentin Laroche, Véronique Pascal, Aurélie Strzepek

Ce rapport propose un bilan et une vision prospective des activités de préparation du futur menées par le Cnes depuis la dernière édition du SPS (Le Havre 2019). Il remplace en cela celui généralement intitulé « technologie » dans les rapports des SPS précédents. Il a en effet semblé intéressant d'élargir la problématique à l'ensemble de la préparation du futur, incluant donc les études système en sus des technologies, car la problématique est de plus en plus difficilement segmentable (on pourra à ce propos se référer à la présentation ci-dessous de nouveaux dispositifs d'accompagnement de type Pex ou Poc).

Autre évolution, la partie dédiée à la prospective de ce rapport n'indiquera pas d'axes de travail techniques pour la période qui s'ouvre, s'inscrivant là aussi en rupture avec ce qui s'était fait lors des précédentes éditions. Nous faisons en effet le constat que :

- les besoins en R&T fournis par les groupes thématiques sont des sujets déjà travaillés au Cnes depuis un moment déjà, ce qui est assez logique, l'instrumentation scientifique requérant une maturation de temps long ;
- le soutien aux filières d'excellence qui se construisent dans le temps et sont globalement intangibles constitue un socle d'activités de préparation du futur qui se perpétue ;

Nous avons donc plutôt choisi d'indiquer les leviers et les mécanismes qui nous permettent d'adapter nos activités à l'évolutions des besoins d'une part et à la survenue de l'inattendu d'autre part :

- pour les instruments d'après-demain, nous avons en effet essayé de construire des processus couvrants, qui permettent de capter l'innovation, qu'elle soit de rupture ou incrémentale, et de la consolider au fil des TRL ;
- ces processus permettent aussi de travailler le lien avec les futures missions et la dimension programmatique en temps voulu ;
- ces processus permettent enfin de saisir les opportunités de préparation en mode «fast-track», que ce soit de briques technos ou de concepts instrumentaux.

Le contexte extrêmement dynamique que connaît le secteur spatial ces dernières années, rend d'autant plus importante cette adaptation agile des activités de préparation du futur, en cohérence et en soutien des besoins de l'ensemble de l'écosystème (communauté scientifique, industriels).

## 1. EXPLICITATION DES PROCESSUS

L'ensemble des dispositifs de préparation du futur des systèmes orbitaux est vaste. Un certain nombre s'appuient sur des financements en dehors du PMT (Esa, France 2030...) ou sont mis en œuvre dans un cadre de préparation à de futures missions (par ex. : programme Otos – observation de la Terre optique super-résolue financé par le Cnes et la DGA), ou de programmes aval (Sand – services analytics duaux).

Les dispositifs opérés par l'équipe de préparation du futur du Cnes ont été mis en place avec l'ambition de couvrir de la manière la plus claire et exhaustive possible un ensemble de besoins :

- o parcourir une vaste gamme de TRL ;
- o travailler sur différents modes d'intervention (maîtrise d'œuvre interne ou externe) ;
- o monter en gamme ou en compétence sur certains métiers ou techniques ;
- o favoriser l'esprit d'initiative et la créativité, ...

Les sections qui suivent présentent de manière aussi synthétique que possible ces dispositifs :

- o R&T ;
- o démonstrateurs transverses ;
- o Pex (projet exploratoire) ;
- o avant-projets (phase 0) ;
- o Poc (preuve de concept).

Cet ensemble a été conçu afin de pouvoir accompagner les sujets dans toutes leurs composantes, avec une vision d'ensemble structurée, en cohérence avec la vision stratégique.



**Fig. 1. Deux exemples de continuums entre dispositifs de préparation du futur.** A droite la préparation de missions à base d'essaims de satellites permettant une instrumentation répartie, à gauche la maturation d'un instrument de gravimétrie quantique et du concept mission associé.

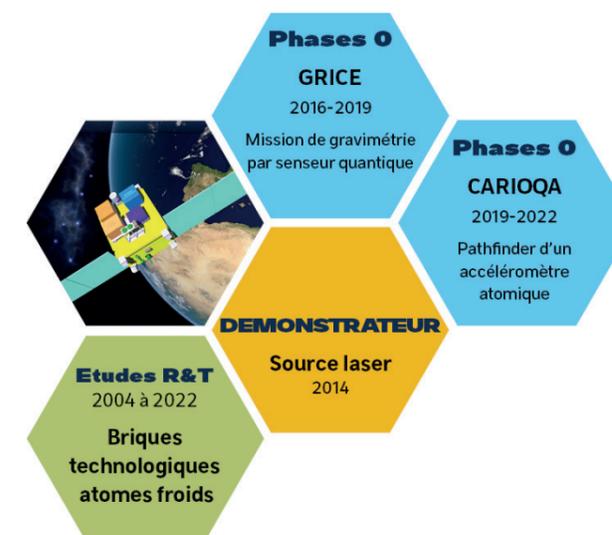
### 1.1 R&T

La R&T des systèmes orbitaux accompagne les développements techniques et technologiques dans les bas TRL (d'un TRL 2/3 jusqu'à TRL 5), et contribue à l'émergence de nouveaux concepts susceptibles de déboucher sur des réalisations plus ambitieuses. Depuis 2022, le processus de R&T est passé progressivement d'une à trois relèves par an, avec un appel à idées ouvert en permanence. L'augmentation de la fréquence des relèves, a eu pour objectif de donner davantage d'agilité et de réactivité au processus R&T et ainsi de mieux répondre aux besoins de l'écosystème.

En complément, deux nouveaux outils ont été mis en place :

- les Appels à Idées thématiques permettant de stimuler les écosystèmes sur des thématiques spécifiques ;
- les Challenges R&T permettant d'aborder des sujets mal appréhendés par les dispositifs « classiques » et d'aller chercher de nouveaux acteurs, y compris hors du secteur spatial en transposant des technologies terrestres (exemples : jumeau numérique santé du spationaute, écoconception, cybersécurité..).

Suite à ces changements, les évolutions quantitatives observées sont les suivantes :



- le nombre de propositions par an sur l'appel à idée R&T générique, a chuté drastiquement, passant de plus de 600 à moins de 200 ;
- le nombre de propositions retenues, se maintient autour des 200 en comptant l'ensemble des dispositifs R&T (Appel à Idées permanent, Challenges R&T, Réactivité, Appel à Idées thématique).

Passée la première inquiétude en voyant le nombre de propositions chuter drastiquement, le résultat est sans équivoque : les propositions sont de bien meilleure qualité, le taux de sélection des propositions est passé de 30% à 87%. Les proposant n'hésitent pas à repousser le dépôt d'une idée à la relève suivante pour mieux la préparer. Il en résulte un gain de temps pour tout le monde.

Riche de ces enseignements, le processus de R&T va poursuivre son évolution avec pour objectif la mise en place d'une gestion du flux des actions en continu.

## 1.2 DÉMONSTRATEURS TRANSVERSE.

Les démonstrateurs transverses prennent le relais de la R&T dans les TRL supérieurs à 4/5 pour porter des développements prometteurs jusqu'à un produit ou quasi-produit de niveau TRL 7, avec une qualification générique ou une réalisation d'actions en réduction de risques. Il peut s'agir de tout ou partie d'un instrument scientifique, du développement d'un équipement industriel (gain en compétitivité) ou d'un développement en lien avec la donnée spatiale.

Sur ce segment de l'accompagnement à la maturation technologique, l'accent a été beaucoup mis sur le soutien à la compétitivité du secteur industriel depuis 2019. Les budgets du PMT Cnes ont notamment été renforcés par un dispositif BPI depuis 2020, destiné à soutenir la qualification de nouveaux produits visant des marchés commerciaux, puis par une partie du Plan de Relance mis en œuvre à partir de 2021.

A partir de 2023, les appels à projet du dispositif France 2030 ont également soutenu cette gamme de montée en TRL, toujours en quasi-totalité à destination du secteur privé. Tout récemment, le volet IOD/IOV (in orbit demonstration/in orbit validation) de France 2030, donne l'opportunité de vol

à des charges utiles, scientifiques ou commerciales. La première relève des propositions d'expériences faites à l'Appel d'Offre ouvert début 2024 montre néanmoins une prépondérance, quasi exclusive, des réponses émanant du privé.

Même sur le dispositif adossé au PMT du Cnes, doté d'environ 3 M€ par an, les propositions scientifiques sont rares, alors qu'elles sont clairement éligibles.

Il apparaît donc clairement que sur ce segment de l'accompagnement de la maturation technologique des instruments scientifiques, l'articulation entre le Cnes et les laboratoires pourrait être améliorée. Ce point sera développé dans la section consacrée à la prospective au paragraphe 3.4.

## 1.3 PEX

Les projets exploratoires (Pex) sont venus compléter à partir de 2020 l'éventail des dispositifs de la préparation du futur pour proposer aux structures techniques du Cnes un espace pour manipuler de nouveaux concepts systèmes prometteurs en amont de la R&T (concept bas TRL, voire dont la preuve de concept reste à établir) en s'appropriant éventuellement de nouvelles technologies. Les Pex ne peuvent pas faire l'objet d'un contrat industriel (contrairement à la R&T ou aux démonstrateurs transverses), ils s'appuient donc sur une maîtrise d'œuvre interne. Le volume financier consacré par le Cnes à cette activité est de 1,5 M€ par an. Depuis 2020, une douzaine de Pex ont été lancés, dont trois sont terminés. Les sujets abordés, ainsi que les objectifs poursuivis, sont très variés, comme l'illustrent quelques exemples de Pex dans le tableau ci-dessous (non exhaustif).

NOM	SUJET
Swarm	Démonstration fonctionnelle au sol des usages d'un réseau bord inter-satellite dans un essaim de nano-satellites.
Scale	Démontrer l'intérêt des lidars à micropeignes de fréquences pour le sondage atmosphérique et l'adéquation théorie/expérience sur les performances. Réalisation d'un prototype aéroporté pour le sondage du CO2 et pour la validation du concept en configuration représentative d'une future mission spatiale.

Dicos	Réalisation à l'échelle 1 au sol d'un télescope tout aluminium de 40 cm doté d'optique active et couplé à un bâti d'interface ainsi qu'à une avionique de type ballon.
MEEP	Etude de Moyen d'Essai Electromagnétique pour Propulseurs.
Strato-Drone	Deux objectifs principaux à cette étude de drone en atmosphère raréfiée : - Valider le vol en environnement réel d'une hélice optimisée pour ce type d'atmosphère, - S'appropriier sur des « cas d'usage » le potentiel des composants « consumers » du domaine drone.

## 1.4 POC

Les Proof of Concept (POC) visent à démontrer la faisabilité en vol de futurs concepts d'envergure. Le périmètre couvre le développement entier (phase A à F) avec un pilotage à planning/coûts objectifs. Toutes les thématiques peuvent être concernées. Cependant, l'objectif n'est pas de fournir de la donnée directement utilisable pour la science ou les applications, mais de démontrer une future capacité à la produire.

Le premier POC **Essaim** est un démonstrateur du concept de mesure en essaim, dans une approche multithématique, en intégrant des briques technologiques essentielles. Ce dernier vise à démontrer la capacité de vol en essaim de plusieurs satellites communiquant entre eux et travaillant de manière collective et collaborative. Ce POC est préparatoire à de futures missions de type instruments « répartis » ou « synthétiques » tels que **Smos-HR** ou **Noire**, ou encore de missions nécessitant des mesures coordonnées.

## 1.5 PHASES 0

Les études de phases 0, menées au sein de l'équipe avant-projets, sont des études système consistant à explorer les besoins, identifier les scénarios missions, examiner les points de faisabilité, et concevoir les futures missions spatiales. Lorsque l'objet de l'étude est une mission avec un contexte programmatique identifié, l'objectif de la phase 0 est de réunir les éléments nécessaires à une prise de

décision pour un passage en phase A (intérêt, coût, risques). Lorsque l'objet de l'étude est un pré-positionnement, l'objectif de l'étude est de réunir les éléments sur l'intérêt du domaine, la faisabilité technique et les développements associés nécessaires pour un positionnement stratégique.

Les études de phases 0 sont multithématiques (Sciences de l'Univers et Exploration, Sciences de la Terre, Télécommunication et Navigation, Infrastructures, Défense et Sécurité) et font l'objet d'un appel à idées interne annuel, avec une possibilité de sollicitations au fil de l'eau.

Les propositions d'études issues de la communauté scientifique sont relayées par les responsables thématiques et de programmes, qui sont parties prenantes dans l'évaluation des différentes sollicitations relevant de leur domaine.

Le processus de sélection des études de phase 0 vise à obtenir une représentation de chaque thématique dans les études, en adéquation avec la capacité en ressources humaines de l'équipe d'avant-projet et des services techniques Cnes.

Dans le cadre du support à la communauté scientifique lors d'appels à propositions (Call) d'autres agences comme l'Esa ou la Nasa, l'équipe avant-projets peut apporter un support à l'élaboration de la réponse. Du fait du temps relativement court pour répondre à ces appels à propositions, ce support se traduit généralement sous forme d'une expertise ciblée (de type mécanique spatiale, ingénierie satellite/instrument, ou encore estimation des coûts), avec parfois un support industriel.

La sélection des proposant à soutenir et le type de support le plus pertinent à apporter sont effectués par les responsables de programme, après rebouclage avec les responsables thématiques et la communauté.

## 2. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

### 2.1 R&T : BILAN QUANTITATIF

Le budget total R&T de 2019 à 2023 consacré par le Cnes aux thématiques d'observation de la Terre et de sciences de l'Univers a été conséquent (de l'ordre de 19M€ sur 5 ans, soit pratiquement 4 M€ par an). Il a été réparti entre l'observation de la Terre à hauteur de 10M€ et les sciences de l'Univers à hauteur de 9M€.

Suite à la mise en place du nouveau processus R&T, le volume budgétaire de l'année 2023 a été cependant plus faible en comparaison aux années précédentes, cette baisse étant due à la diminution du nombre de R&T proposées. **Même si, comme il est indiqué au §1.1, les actions proposées, bien que moins nombreuses, sont d'une meilleure maturité et donc présentent un taux de succès élevé, cela ne suffit pas à compenser la baisse constatée.**

Sur ce point comme sur d'autres (démonstrateurs transverses), l'articulation entre les équipes de préparation du futur et les laboratoires scientifiques est essentielle. Nous y revenons plus longuement au §3.4.

#### 2.1.1 PHASES 0

Concernant les phases 0, environ 20 études concernant les sciences de l'Univers et l'observation de la Terre ont été menées sur la période, également réparties entre les deux thèmes.

Dans le thème sciences de l'Univers, la dizaine d'études a principalement concerné les thématiques SHM, astronomie astrophysique et système solaire, avec des typologies d'études variées, allant de missions nanosatellites à des missions interplanétaires, en passant par des missions sous ballons ou encore sur le gateway lunaire.

On peut noter que la moitié des études ont concerné des missions à base de nanosatellites, alors que ce sujet était marginal précédemment. Parmi celles-ci, on peut citer **Speed**, démonstrateur d'un nanosatellite SHM pour des missions multi points, et recommandée lors du SPS2019. Celle-ci faisait suite à l'étude **Rensem**, mission de mesure multi-point appliquée à l'exploration de la magnétosphère martienne. Ces deux études ont permis à la communauté scientifique de préparer les réponses

**M-Matise** et **Plasma Observatory** au call Esa M7, qui ont été retenues pour des phases A. On peut également citer **Casstor**, mission de démonstration scientifique pour la spectro-polarimétrie UV haute résolution sur nanosatellite, destiné à préparer le développement de l'instrument **Pollux**, candidat pour une participation à la mission **HWO** (Habitable World Observatory, flagship Nasa).

Dans le thème observation de la Terre, les études ont concerné l'ensemble des thématiques atmosphère, surfaces continentales, océan et Terre solide. Parmi celles-ci, deux études lidar ont été menées : **Mescal**, lidar pour mesurer la distribution verticale des nuages et aérosols (étude menée dans le cadre d'une coopération avec Nasa) et **Scale**, lidar à peignes de fréquences pour une mission Gaz à Effet de Serre. On peut aussi citer **Cmim**, une constellation de mini-sondeur infra-rouge ou micro-ondes pour améliorer la prévision numérique du temps en particulier dans les basses couches de l'atmosphère aussi bien en résolution spatiale que temporelle. On peut également citer la phase 0 **Odysea**, mission pour mesurer le courant océanique de surface total sur l'océan global qui a été soumise à l'appel Explorer de la Nasa en 2023 et acceptée pour une phase A. De même, la phase 0 **Carioqa**, spatialisation d'un accéléromètre quantique pour des futures missions gravimétriques spatiales ambitieuses basées sur l'interférométrie à atomes froids, a permis de démarrer un démonstrateur dans le cadre du programme européen horizon Europe financé par la commission européenne.

#### 2.1.2 TECHNOLOGIES INSTRUMENTALES

Les éléments notables de l'accompagnement technologique dans les dispositifs du Cnes dans le domaine instrumental sont les suivants :

- un soutien continu aux filières d'excellence (senseurs quantiques, lidars, détections IR, cryogénie, altimétrie et sondage passif) afin d'accroître le niveau de maturité, et de positionner certains sujets sur des avant-projets ;
- la maturation d'un concept de lidar à peigne de fréquences grâce à la création des Pex. Les applications pour mesurer les gaz à effet de serre semblent très prometteuses. Le concept instrumental innovant et compact (**Scale** : short comb atmospheric lidar experiment)

peut s'appuyer sur les technologies fibrées mises au point dans le domaine des télécommunications. La physique de la mesure est intrinsèquement mieux maîtrisée et plus robuste aux perturbations (instrumentales et environnementales) que les lidars classiques ;

- au-delà du soutien technologique à des capteurs de très haute performance, l'apport potentiel de capteurs plus petits, moins chers et moins performants unitairement, mais associés à des concepts de mesures multipoints est un sujet d'étude en émergence, en lien avec l'essor du newspace et la miniaturisation des équipements (voir §2.1.5 qui traite du même sujet sous un angle système).

#### 2.1.3 TECHNOLOGIES GÉNÉRIQUES

La tendance à la **miniaturisation des équipements** se poursuit :

- phénomène continu dans le spatial, mais nettement amplifié depuis une décennie grâce aux capacités et performances offertes par l'électronique et la numérisation qui l'ont accompagnée ;
- côté instrumentation, la difficulté réside dans l'évaluation de l'apport d'une mesure généralement de moins bonne qualité que celle obtenue avec un instrument de plus grande taille mais offrant des performances à l'état de l'art. La problématique devient alors « système » et revient à déterminer la configuration optimale permettant un gain global sur les aspects multi-points, multi-temporels et revisite ;
- plusieurs études de ce type ont été menées (**NanoMagSat**, **Smash**, **Noire**, **Speed**) ou sont en cours (**Cmim**, **Nemesis**). Ces travaux ont contribué à irriguer le programme R&T par des actions visant la levée de verrous techniques tant sur les instruments que sur les sous-systèmes plate-forme.

Les **techniques d'IA bord** sont en plein essor.

Ces technologies rendues accessibles par les capacités d'hébergement de traitements à bord ouvrent les champs suivants :

- détection d'anomalie à bord ;
- traitement bord pour optimiser le lien bord sol (suppression des images nuageuses, descente de l'info utile uniquement) ;
- traitement bord pour gagner en réactivité

(détection de feux, application militaire, ...) et autonomie.

#### 2.1.4 DONNÉES

Les **traitements algorithmiques** sont un axe très soutenu par le Cnes car au cœur de la maîtrise de la performance de la chaîne de mesure. Trois volets principaux se dégagent :

- amélioration des images (restauration d'images, correction IRT, super-résolution) ;
- amélioration des algorithmes d'inversion (colonne atmosphérique, lidar, biais état de mer en altimétrie) ;
- modélisation physique (transfert radiatif, trade-off bord sol sur les modélisations de gain antenne).

Le développement du secteur aval correspond à apporter un soutien à l'élargissement de l'usage des données d'origine spatiale. Par élargissement, on entend une utilisation qui dépasse celle du besoin initial exprimé, généralement par la communauté scientifique ou le client défense. Cette utilisation peut être soit au service d'un besoin sociétal ou institutionnel, soit destinée au secteur marchand. Dans les deux cas ce sont quasi exclusivement les données d'observation de la Terre qui sont concernées. Les données de science de l'Univers ou d'exploration n'ont pas encore trouvé d'autres usages que le besoin scientifique exprimé à l'origine de la mission spatiale.

Cette extension des usages des données d'OT conduit donc à des besoins de traitement :

- restitution 3D, MNT, MNS ;
- détection de changements ou d'anomalies ;
- hydrologie (classification des zones hydro, suivi petits plans d'eau, estimation volume d'eau dans les retenues) ;
- océanographie, bathymétrie ;
- croisement de sources (multi capteurs, données satellites/données in situ, multi-temporalités) ;
- exploitation des techniques d'IA sur ces problématiques.

#### 2.1.5 UNE AUTRE VOIE : INSTRUMENTATION RÉPARTIE

De manière encore plus prospective, les prochaines ruptures pourraient venir d'instruments à synthèse d'ouverture. En optique, ce sujet reste encore très

prospectif et nécessite l'identification préalable des verrous technologiques avant de pouvoir être adressé d'un point de vue mission / système. Le POC **Essaim** permet la montée en maturité sur le concept de missions de ce type, les avancées obtenues

## 3. PROSPECTIVE

### 3.1 VISION DES ENJEUX TECHNIQUES ET TECHNOLOGIQUES

L'objectif premier de la préparation du futur telle qu'elle est menée au Cnes est de développer les compétences instrumentales et technologiques françaises en préparation des futurs programmes, mais aussi de permettre de valoriser les missions existantes en tirant le meilleur parti des données recueillies et en soutenant leur création de valeur au sens large. L'accompagnement, notamment en R&T s'effectue donc souvent en déclinant très en amont les développements nouveaux en termes de technologies spatiales nécessaires à la mise en œuvre des priorités scientifiques programmatiques. En parallèle, il convient d'explorer les nouvelles technologies ou nouveaux concepts qui pourraient s'avérer prometteurs en termes de capacités opérationnelles, de richesse de mesures ou de minimisation des coûts de possession, même s'ils ne rentrent pas directement à première vue dans les priorités exposées au paragraphe précédent. Enfin, on accompagne également le développement de capacités génériques pouvant soutenir et faciliter le développement des futures missions ou leur valorisation :

- miniaturisation, en particulier pour des perspectives de constellation ;
- amélioration des équipements bords en termes de coûts (usage des COTS) ou de performances et leur qualification pour le spatial ;
- technologies d'IA bord ;
- traitement des données. La masse de données actuellement disponible, rendue accessible et utilisable par le Cnes (entre autres), permet de développer :
  - des méthodes innovantes de traitement : fusion, combinaison, assimilation de données multi sources : multi-capteurs ; satellite/in-situ ; multi-temporel ; ... permettant d'obtenir des jumeaux numériques thématiques
  - l'explicitabilité des résultats avec estimation

nues en termes notamment de performance et de capacité à maîtriser la conformation, à connaître les positions respectives ou encore à synchroniser les satellites de l'essaim éclaireront la capacité à poursuivre vers la synthèse d'ouverture.

- des incertitudes en particulier sur les algorithmes issus de l'intelligence artificielle
- l'innovation sur les technologies permettant l'utilisation de jumeaux numériques pour les enjeux scientifiques (cycle de l'eau, cycle du carbone, ...)
- amélioration de technologies clés (détecteurs dans le proche infra-rouge, agilité des plateformes, ...) pouvant répondre à des missions exigeantes en performances (missions hyperspectrales à haute résolution spatiale, mission lidar pour différentes applications en atmosphère (spéciation des aérosols, mesure de gaz à effet de serre), en océanographie (couleur de l'eau, bathymétrie) et pour les surfaces continentales (écosystèmes forestiers)

Sur la partie purement instrumentation, on peut cette fois distinguer deux types de soutien :

- **L'entretien de filières d'excellence**  
L'écosystème du spatial français, du laboratoire au maître d'œuvre industriel, peut se prévaloir d'une reconnaissance de leur savoir-faire sur la scène internationale, et de capacités remarquables sur la majeure partie des thématiques et des technologies. L'entretien de ces filières d'excellence passe par :
  - l'amélioration continue (c'est un des rôles de la R&T), mais également l'analyse critique, menée en concertation avec les laboratoires scientifiques, de l'avenir de chacune d'entre elles ;
  - le transfert à envisager vers l'industrie lorsque c'est possible (en particulier pour des instruments récurrents), avec néanmoins une difficulté croissante pour des instruments purement scientifique sans marché possible ;
  - l'entretien et le développement de la maîtrise de la physique de la mesure qui est une brique fondamentale dans la maîtrise d'une performance « end-to-end », essentielle à la réussite des programmes scientifiques. Améliorer la modélisation de la phy-

sique contribue aussi à un meilleur usage des données spatiales.

- **Le développement de nouvelles capacités**  
C'est sur ce volet que les activités de la préparation du futur du Cnes se doivent d'être capacitantes pour les missions scientifiques de demain.  
Leur pilotage se doit alors :
  - d'investir les nouvelles technologies ou les innovations dans la chaîne de la mesure. Il peut s'agir de technologies susceptibles de devenir des « game changers » (LIDAR à peigne de fréquence par ex.), ou de concepts de mesure innovants (instruments à synthèse d'ouverture par ex., essaim de satellites). Il peut aussi s'agir d'améliorer le service pour l'usage des données en permettant d'accélérer l'usage des données spatiales (cloud...), de rajouter des nouveaux observables ou de mixer différents observables ;
  - d'adapter les efforts consentis au risque pris : c'est le rôle du continuum de la préparation du futur. Ainsi, on autorisera l'engagement d'un grand nombre de R&T, de faibles montant et risquées car de faible TRL, puis des actions plus conséquentes, moins nombreuses, destinées à poursuivre la montée en maturité ;
  - de conserver une R&T couvrant un large domaine technologique pour ne pas se fermer de porte à priori.

### 3.2 VISION DES ENJEUX CLIMATIQUES ET DES CONTRAINTES À VENIR

Les enjeux liés au développement durable et à la transition écologique se doivent d'être pris en compte dans les activités de préparation du futur. Quelle qu'en soit notre perception, ces enjeux vont à court terme se traduire par des contraintes fortes sur les activités de préparation du futur et doivent absolument être anticipés.

A court terme (automne 2024), la feuille de route de décarbonation de l'industrie spatiale française sera disponible et devra être déclinée, mais d'ici là on peut indiquer quelques axes de réflexion actuels, encore très préliminaires :

- améliorer notre connaissance de l'impact du

secteur spatial sur l'environnement, et ce à tous les niveaux (émission haute atmosphère, Analyse cycle de vie, ...)

- low tech : comment continuer à faire du spatial avec des contraintes fortes en termes de matériaux et d'énergie disponibles ? A noter que cet axe trouve un écho dans certains travaux menés dans le cadre de l'exploration ;
- le « design-for-demise » (prise en compte de la fin de vie, en particulier la ré entrée atmosphérique et les conséquences d'éventuels débris au sol, et ce dès la conception) couplé à la fabrication additive
- green IT / Green AI : limiter l'empreinte numérique liée à la masse de données et aux traitements associés ;
- comment réutiliser au maximum et à tous les niveaux ?

### 3.3 RÔLE DU CNES ET DÉVELOPPEMENT DE L'ÉCOSYSTÈME

Le Cnes s'appuie largement dans sa démarche de construction des futures technologies ou missions sur les capacités du centre de compétence technique. Le maintien de cette expertise requiert le développement en interne de concepts techniques prometteurs. Ces concepts, comme ceux proposés par l'écosystème industriel et les laboratoires, sont considérés en préparation du futur dans une démarche techno push. Ce mode de fonctionnement fait par ailleurs écho à la recommandation que le Cnes prenne en charge la maîtrise d'œuvre d'instruments complexes, en réponse notamment au désengagement des industriels sur des missions ou instrument considérés comme ayant un triptyque risque / coût / rentabilité d'un marché ultérieur défavorable. Le maintien de la capacité à mener des maîtrises d'œuvre de ce type implique une expertise, qui ne peut être acquise et entretenue que par des développements internes.

La R&T doit également permettre de maintenir les compétences spécifiques du Cnes sur le sujet du couplage instrument / traitement. Ce sujet très complexe est au cœur des performances des missions d'imagerie. Il est critique dans toute démarche d'expertise du Cnes dans son rôle d'agence nationale, ou d'aide aux nouveaux entrants.

L'intégration des nouveaux venus de l'écosystème

spatial français dans les programmes scientifiques reste à construire, et ce malgré les différentes initiatives en ce sens (objectif initial des 10% de scientifiques en consortium dans les projets France 2030 par ex., à moins de 2% aujourd'hui). Dans le domaine des sciences de l'univers, l'absence de marché conduit de toute façon à ce que peu d'acteurs se positionnent directement sur ces activités (il peut néanmoins y en avoir sur des thématiques en synergie - par exemple en météo de l'espace-). Toutefois, rien n'interdit d'imaginer s'appuyer sur des plate-formistes newspace pour bénéficier de solutions d'emport pour des missions de démonstration scientifique, ou des petites missions multipoints. En outre, côté observation de la Terre, l'apparition d'une diversité de nouveaux acteurs privés qui se positionnent comme producteurs de données et/ou de services nécessitera l'évaluation de la qualité des mesures produites pour envisager leur intérêt en complémentarité des mesures produites par les missions scientifiques. La question de l'aide active à l'émergence des opportunités entre science et newspace reste donc largement ouverte, et pourra faire l'objet d'initiatives dédiées.

### 3.4 AXES DE TRAVAIL PROCESSUS

La partie bilan fait apparaître clairement que le Cnes a, depuis 2019, enrichi la diversité des instruments de préparation du futur pour couvrir aujourd'hui la plupart des besoins tant côté technologies que côté concepts systèmes. Toutefois, un certain nombre de problématiques subsistent, et conduisent à plusieurs axes de réflexion.

Une des principales problématiques à résoudre est celle de **l'amélioration du niveau de maturité** des technologies critiques ou des concepts instrumentaux avancés en phase A afin de sécuriser le passage en phase B. Cette consolidation en phase amont vise à obtenir des coûts à achèvement moins incertains, à sécuriser les plannings de développement, et également à faciliter par ricochet la prise de décision d'un passage en phase B. De plus, on constate que, pour limiter les risques de dérives de coût, plusieurs agences (Esa, Nasa) demandent des niveaux de maturité relativement élevés très tôt. Par exemple, lors du call Esa M7, il était demandé un TRL minimum de 4 à la proposition, de 5 à la sélection (fin de phase A) et de 6 à l'adoption (fin de phase B1).

Selon les caractéristiques du sujet plusieurs types

d'accompagnements amonts peuvent s'envisager, soit entre la phase 0 et la phase A, soit un renfort de la phase A elle-même.

- **Axe 1 : Faciliter le passage et renforcer la phase A**  
Dans les processus en place, la phase A se décide à l'issue d'une phase 0, en considérant le besoin et l'intérêt de la mission, le contexte programmatique, mais également le coût tel qu'estimé avec les éléments de la phase 0. Les principaux écueils conduisant à une réticente au passage en phase A sont donc les suivants :
  - dans le cas de programmes scientifiques nécessitant un concept instrumental complexe à développer, l'estimation de coût est difficile à produire et comporte une incertitude importante ;
  - dans le cas de certaines missions prometteuses, pour lesquelles on souhaiterait pouvoir continuer la montée en maturité, le contexte programmatique reste à construire.

Une évolution possible de ce processus serait de permettre les engagements de telles phases A, en identifiant une première phase d'activités de maturation technologique et de dérisquage de concept instrumental. Le corollaire est alors qu'il faudra nécessairement accepter que certaines de ces phases A ne se poursuivent pas si l'étude de faisabilité n'est pas concluante.

- **Axe 2 : S'appuyer plus sur les démonstrateurs transverses**  
Les activités démonstrateurs transverses peuvent prendre le relais de la R&T, avec l'objectif de passer la « vallée de la mort » des TRL, jusqu'à un TRL 6-7 (qualification générique). On note que, bien qu'a priori éligibles, il n'y a que peu de proposition d'instrument laboratoire au guichet démonstrateur (ex : CosmOrbitrap, Sismomètre optique), mais essentiellement des propositions industrielles. Il est possible que ce guichet soit méconnu des laboratoires scientifiques, ou que ceux-ci n'y postulent pas par crainte de critères qui ne leur seraient pas applicables (tels qu'une vision orientée économie). A noter également que les propositions de démonstrateurs sont relayées vers le guichet par les structures internes du Cnes. Or dans le cas de nombreux

instruments de laboratoire en sciences de l'univers, il n'existe pas nécessairement au Cnes de structure technique spécialisée dans la thématique qui puisse effectuer ce relais. Ceci est moins vrai en Observation de la Terre, où les services techniques possèdent généralement une expertise historique forte sur le sujet. Les axes d'amélioration existent donc à deux niveaux, au niveau de l'articulation avec le laboratoire, en amont de la proposition, qui pourrait se faire directement avec les équipes DS, et au niveau de la communication autour des possibilités offertes par ce dispositif auprès de l'écosystème de la recherche.

Une autre problématique concerne les difficultés en termes de **tensions RH dans les laboratoires**.

Or les instruments en science de l'univers sont généralement développés par des laboratoires, les problématiques RH associées limitant de facto les capacités à proposer et à suivre des actions de R&T. Les besoins exprimés accompagner ce type de développement sont donc du financement pour du matériel, des EGSE, ainsi que des demandes de CDDs (voir thèse / post-doc). Or, si les guichets APR permettent le financement de quelques RH et matériel pour initier les concepts instrumentaux très bas TRL, dans les phases amonts (R&T, phase 0 / A ...), on ne finance pas les RH laboratoires (sauf cas très particuliers). Cette règle pourrait certes être assouplie, mais le sujet d'un renfort par des supports de type CDD pour des activités de préparation du futur est délicat en termes de pérennité d'acquisition des connaissances. L'utilisation d'une expertise industrielle à la place d'un CDD, lorsqu'elle est possible, pourrait dans certains cas permettre de garantir une plus grande pérennité des acquis, au détriment du coût et de la relation contractuelle à gérer.

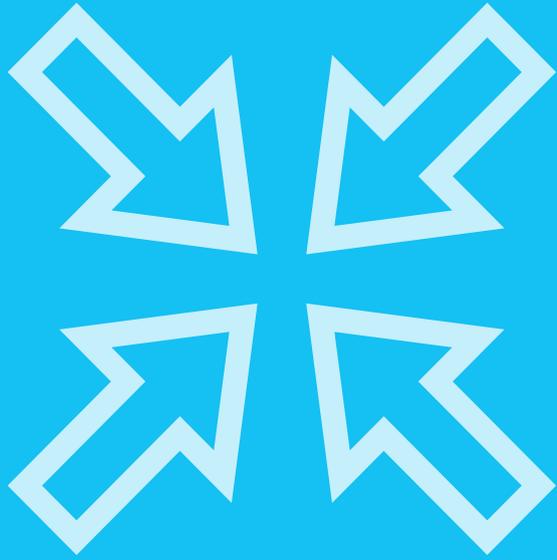
- **Axe 3 : Étendre le concept des projets exploratoires (Pex) à des activités menées avec les laboratoires**  
Le Pex, qui permet d'explorer des concepts bas TRL ayant une composante système en amont d'une phase 0 peut alors s'avérer un outil adapté. Réservé aujourd'hui à des activités en maîtrise d'œuvre interne, à l'exemple du Pex SCALE, il pourrait être étendu à des travaux de maturation d'un concept instrumental dans un laboratoire, impliquant des experts Cnes, et éventuellement des sup-

ports externes de type assistance technique.

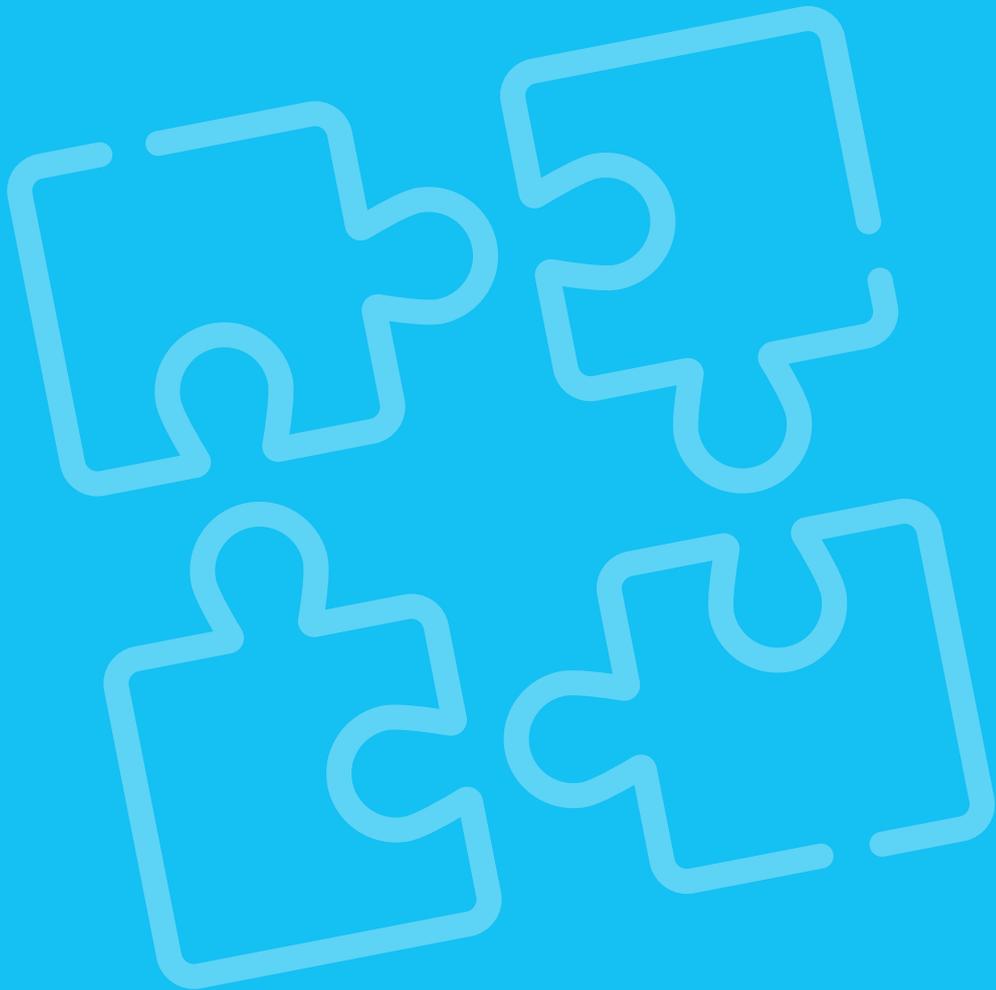
- **Axe 4 : Mise en place de binômes Cnes/labo, où le CNES accompagne, en proposant et en suivant les R&T nécessaires pour faire avancer les sujets scientifiques des labos, en lien avec un/des industriels, qui peuvent par la même occasion monter en compétence et prétendre à répondre à des appels d'offre européens (Copernicus, etc.) en consortium avec le laboratoire. C'est particulièrement vrai pour l'aspect aval, utilisation de la donnée spatiale, peut-être moins pour la partie instrument**

Au-delà des dispositifs d'accompagnement proprement dits, le Cnes dans le pilotage de ses activités de préparation du futur va poursuivre sa recherche de synergies entre les besoins exprimés par différentes typologies de prescripteurs : scientifiques, défense, sociétaux, voire commerciaux. Ces recouvrements existent naturellement plutôt dans le domaine de l'observation de la terre (ex : vision de nuit, interféromètre partiel tels que **Scarbo** ou **CGI** - compact gas imager) que dans les sciences de l'univers, mais il convient néanmoins de ne pas restreindre ces réflexions à priori.

La dernière réflexion pour la période qui s'ouvre concerne l'intérêt que pourrait avoir un service d'IOD/IOV (in orbit demonstration/in orbit validation) pour mener des expérimentations en vol de charges utiles scientifiques issues de concepts instrumentaux développés dans les laboratoires. En effet, comme rappelé dans le paragraphe de bilan des phase 0, on a noté une augmentation notable des propositions de missions basées sur des nanosatellites, traduisant un souhait d'expérimentation en vol de petites charges utiles à des fins de démonstration (technique ou de concept). Un service de ce type s'est ouvert début 2024 dans un cadre France 2030. L'appel d'offre destiné aux charges utiles a remporté un vif succès mais surtout auprès des industriels, les propositions des laboratoires étant quasi inexistantes. Ce point mérite sans doute une réflexion conjointe, car il serait dommage de ne pas saisir une telle opportunité pour des concepts instrumentaux scientifiques.



## **GROUPES SPÉCIFIQUES**



# QUELS MOYENS POUR LA SCIENCE DE DEMAIN : BILAN ET PERSPECTIVES

Florence Ardellier-Desages, Thierry Bret-Dibat (co-animateur), Patrick Castillan, Laurence Chaoul, Antoine Godard, Frédéric Huynh, Thierry Labasque, François Leblanc (co-animateur), Pascale Moro, Clémence Pierangel, Hervé Roquet, Charles Yana

Les programmes scientifiques spatiaux se réalisent sur des temps longs aussi bien dans le domaine des sciences de la Terre que de l'Univers et de l'Exploration. Ils mettent en œuvre la réalisation d'instruments, de techniques physiques de la mesure et de traitements de données. Ces développements nécessitent de s'appuyer sur des moyens durables et adaptables dans le temps pour répondre aux enjeux, sans cesse renouvelés, de la recherche.

Un premier constat est de rappeler que la capacité française à faire émerger de nouvelles missions, à les défendre dans des cadres nationaux et internationaux et à développer une instrumentation scientifique unique, du prototype au modèle de vol, s'appuie sur le partenariat extrêmement fructueux entre les organismes nationaux de recherche (ONR), les universités et le Cnes, tout cela en travaillant bien sûr avec l'industrie. Les laboratoires de recherche apportent une excellence scientifique et technique, que complètent l'expertise et la capacité mondialement reconnues du Cnes à conduire des programmes spatiaux extrêmement ambitieux.

En Sciences de l'Univers et Exploration (SUE), la France se positionne essentiellement sur le développement d'instrumentation et de segment sol, de maîtrise de la performance mission et sur l'analyse de données. Dans un contexte de forte coopération internationale, ces activités sont généralement confiées à des consortia de laboratoires, et portent sur le développement de techniques non maîtrisées par l'industrie et/ou demandant une maturation technologique longue. Les agences responsables de la mission (Esa, Nasa, Jaxa...) prennent en charge, avec leur industrie, le satellite et le segment sol de contrôle. Le Cnes peut être maître d'ouvrage ou maître d'œuvre de la contribution française, et il apporte son soutien et son expertise aux laboratoires sur le développement et l'exploitation.

Dans le domaine de l'Etude et Observation de la Terre (EOT), dans un cadre de coopération qui

est souvent bilatéral, le Cnes peut être maître d'œuvre du système (y compris la performance), maître d'ouvrage d'instrument, de la plateforme, et du segment sol de contrôle en s'appuyant sur l'industrie dans une plus forte logique de filière industrielle et commerciale, et être, avec les laboratoires, en charge du développement du segment sol de mission, et de son exploitation.

Dans les deux domaines, la capacité française à faire émerger de nouvelles missions nécessite, au sein des laboratoires et du Cnes, de s'investir en amont sur la maîtrise de la physique de la mesure, des traitements des données, et d'être proche des développements instrumentaux, dès les premières phases d'un projet. Il est également crucial de disposer de capacités de développement de prototypes, en amont, et pour effectuer des mesures de calibration et validation (Cal/Val).

Parler de moyens pour la science de demain nécessite donc de considérer tous les aspects d'un projet spatial, qui vont des ressources humaines (section 1), aux infrastructures de recherche, de tests ou de gestion et traitement des données (section 2) jusqu'aux ressources financières (section 3).

# 1. LES RESSOURCES HUMAINES

## 1.1 EVOLUTION DES MOYENS HUMAINS

Les organismes acteurs dans la recherche spatiale sont nombreux (allant des Organismes Nationaux de Recherche comme le CNRS, le CEA ou l'Onera aux très nombreuses universités qui contribuent activement aux programmes scientifiques spatiaux), et il était illusoire de s'adresser à chacun pour effectuer cet exercice de trajectoire des ressources humaines (RH). Il a été estimé que la représentativité des organismes (CNRS, CEA, Onera, Météo-France, Cnes) au sein du groupe de travail était suffisante pour analyser la situation globale et dégager des recommandations. Une distinction a été faite entre les RHs recherches et les RHs techniques.

### 1.1.1 LA SITUATION DES CHERCHEURS

Une partie de l'analyse des évolutions au CNRS qui suit s'appuie sur un exercice mené récemment par l'INSU pour le domaine Astronomie et astrophysique (AA). Nous avons fait l'hypothèse qu'une évolution similaire existe dans les autres instituts et domaines scientifiques concernés par l'observation de et depuis l'espace (en particulier à l'IN2P3 pour l'astrophysique). Les effectifs chercheurs permanents du CNRS/Insu sont restés quasi-stable (-3%) sur la période 2013-2022 (de 964 à 933). Pour le domaine AA, les effectifs chercheurs CNRS montrent également une stabilité autour de 300 postes. La démographie de la population de chercheurs CNRS indique cependant un déséquilibre vers les catégories d'âges plus élevés, avec une moyenne d'âge de 51 ans, et 40 % des effectifs ont plus de 55 ans.

Les effectifs chercheurs permanents CEA, environ 35 en astronomie et astrophysique, montrent une stabilité dans le domaine des expériences spatiales d'astrophysique avec une véritable dynamique d'accompagnement de doctorants et post-doctorants. La volonté de l'organisme est, au minimum, de maintenir ces effectifs constants dans les années à venir.

Pour Météo-France, les activités de recherche dédiées au spatial concernent essentiellement la préparation à l'exploitation des données satellitaires pour les besoins de la prévision météorologique (en particulier ceux de la Prévision Numérique du Temps), ainsi que leur valorisation scientifique. Les ressources humaines dédiées à ces activités de recherche sont de l'ordre de 30 permanents, moitié

chercheurs, moitié ingénieurs de recherche. Il est prévu que ces effectifs permanents consacrés au spatial restent globalement stables pour les années à venir.

L'Onera, dont environ 10 % de l'effectif est consacré au spatial, voit ses effectifs rester globalement stables (environ 150 ingénieurs-chercheurs).

Les universités, à travers leurs enseignants-chercheurs, sont également des acteurs incontournables des projets spatiaux. En quantifier l'importance, et surtout une éventuelle évolution de leur contribution, reste très complexe compte tenu du nombre important d'universités impliquées. Mais, on ne peut que constater le rôle grandissant de leurs personnels dans ces projets et la difficulté que ces mêmes personnels ont de concilier leurs activités d'enseignements avec celles très chronophages d'un projet spatial. Développer les mécanismes permettant aux enseignants-chercheurs de s'investir sur le long terme dans les projets spatiaux permettra de répondre aux besoins de ces personnels et renforcera l'implication et la visibilité des universités.

### Un indicateur macroscopique : l'Appel à Projets Recherche (APR) du Cnes

Les actions menées annuellement dans le cadre de l'APR reflètent l'activité scientifique des chercheurs dans les phases de préparation, de développement ou d'exploitation de mission.

La figure ci-dessous recense l'évolution des effectifs (permanents, doctorants, post-doctorants, etc.) en nombre de personnes (actifs) et en équivalent temps plein (ETP) impliqués, ainsi qu'en nombre d'actions (APR), en distinguant les domaines EOT et SUE.

Aucune grande tendance ne se dégage de l'évolution des indicateurs APR. Les variations annuelles observées sont souvent dues au cycle des projets.

Une population de chercheurs vieillissante

### Préserver le potentiel et le dynamisme français en anticipant les départs et renforcer l'implication des personnels universitaires

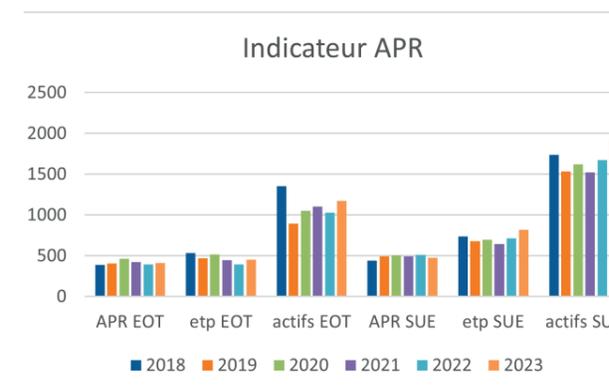


Fig. 1 Evolution du nombre d'etp et actifs, et actions depuis 2018 sur l'APR Cnes

Une autre manière de mesurer le dynamisme de la communauté scientifique française est à travers son implication sur les deux derniers appels d'offre émis par l'Esa : côté SU, l'appel M7 a vu la pré-sélection de 3 missions, toutes s'appuyant sur une très forte contribution française, et côté EOT, l'appel Earth Explorer 12 avec une communauté française là aussi très fortement impliquée.

### 1.1.2 LA SITUATION DES PERSONNELS TECHNIQUES

#### Pas de projet spatial sans un binôme ingénieur-chercheur

En grande majorité, les personnels techniques intervenant sur les projets spatiaux sont présents au sein du CNRS, du Cea, du Cnes, des universités et de l'Onera.

Pour le CNRS, les outils RH permettent d'avoir une visibilité sur l'évolution des ressources. Afin de compléter la vision CNRS, une enquête spécifique a été également menée auprès des laboratoires de la section 17 (AA), avec un exercice en cours pour les autres thématiques (Océan Atmosphère, Surfaces et Interfaces Continentales, Terre Solide).

Les personnels techniques permanents des UMR du domaine AA, tous organismes confondus, représentent environ 715 personnes en 2024. Une baisse a été constatée à un rythme de 8/an depuis 2013, pour les effectifs CNRS.

En AA, le ratio Personnel technique/Chercheur CNRS a décru entre 2013 et 2022 de 2 à 1,8. Il indique donc une baisse du soutien technique dans les unités de recherche. Pour les autres domaines du CNRS-Insu, ce ratio est aux alentours de 1,2-1,5 suivant les laboratoires.

Cette même enquête indique une baisse régulière des effectifs de la Branche d'Activité Professionnelle (BAP) C (conception et test instrument, mécanique, optique et qualité), représentant, les métiers de la mécanique, de l'électronique, de l'optique et de la qualité. Ainsi, cette BAP a perdu 53 postes CNRS en 10 ans, sur un effectif de 300 en 2013, soit 17%. Pour la BAP E, associée aux métiers de l'informatique, du contrôle commande et du traitement de la donnée, les effectifs CNRS sont stables (aux alentours de 200 ETP), voire en légère augmentation depuis 2013 (notamment grâce à une revalorisation salariale). Ces deux BAP représente 75% des effectifs Ingénieur et Technicien (IT) du domaine AA. Globalement, la baisse des effectifs IT (tous métiers confondus) du domaine AA est de 70 postes sur les 10 dernières années, soit 11,7%.

L'étude démographique des effectifs IT des unités du domaine AA (toutes tutelles confondues), indique une criticité liée à une pyramide des âges déséquilibrée. 36 % des effectifs IT (toutes BAP confondues) quitteront les UMR du domaine dans les 9 ans, soit 261 postes. Cette criticité s'exprime notamment pour la BAP C, au sein de laquelle 30 % des effectifs quitteront le CNRS sur cette même période (75 postes), et surtout pour les métiers des ingénieurs de recherche en développement d'expérimentation, en développement d'instruments, et les ingénieurs d'étude en techniques expérimentales. Environ 40 % de ces effectifs quitteront le CNRS dans les 10 ans. Pour la BAP E, la criticité est moins prégnante, avec une pyramide des âges plus favorable. L'attractivité toutefois des organismes de recherche pour ces métiers, doit être améliorée auprès des étudiants en fin d'étude, au regard de la concurrence salariale des autres employeurs potentiels. La BAP E est ainsi identifiée comme une BAP prioritaire au CNRS (et à l'INSU), avec une marge de négociation salariale possible. Ces postes sont également éligibles à la mobilité au fil de l'eau sur l'année.

Pour le CEA, l'effectif dédié à la réalisation de projets spatiaux en astronomie et astrophysique compte environ 40 ETP de spécialistes de l'instrumentation spatiale qui permettent d'assurer la maîtrise d'œuvre d'un instrument embarqué. Ce nombre demeure stable grâce à une politique de maintien des effectifs qui assure le remplacement de chaque départ. De plus, en fonction des engagements pris sur les projets et des phases de

développement, des ingénieurs non dédiés exclusivement au spatial sont amenés à contribuer aux projets spatiaux.

Au Cnes, le volume RH sur les projets en développement et en exploitation est stable au fil des ans (100 ETP en SUE, 200 ETP en EOT) (sans les phases 0, A, la R&T...). La programmation pluriannuelle permet d'identifier et de répondre aux besoins sur les projets engagés.

Néanmoins, les sollicitations sont en croissance avec beaucoup de tension RH entre les besoins des projets (en augmentation), la préparation du futur et le soutien à l'écosystème sur les différents thèmes traités par le Cnes, d'où un morcellement des RHs.

Le CNES est actuellement au pic de ses départs en retraite, et fait face à de plus en plus de départs dans l'industrie. Il rencontre également des difficultés de recrutement, en particulier pour les métiers liés à l'informatique.

A l'Onera, le potentiel RH dans les différents métiers de support à la recherche a réussi à être préservé ces quatre dernières années. Toutefois, comme les autres acteurs de la recherche, l'Onera souffre de la concurrence des autres secteurs pour les métiers techniques et informatiques actuellement en forte tension. Le maintien du potentiel se fait donc au prix de recrutements qui sont souvent longs et difficiles à mener à bien.

Dans tous ces organismes, au cours des 10 prochaines années, un important renouvellement des compétences critiques en ingénierie spatiale est à anticiper avec les départs à la retraite. L'attractivité pour les recrutements est également en baisse. Enfin, l'émergence de nouveaux métiers est un enjeu, en particulier dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA), qui est appelée à se déployer dans de nombreuses activités.

#### Des indicateurs macroscopiques : la R&T et les projets

Le nombre de propositions de R&T de la part des laboratoires n'a cessé de baisser ces 5 dernières années dans le domaine de la Science.

La R&T étant une variable d'ajustement au sein des laboratoires (et au Cnes, priorité au premier lancé), cette baisse traduit l'incapacité croissante des laboratoires à dégager du temps d'IT pour s'y consacrer. Poursuivre une telle décroissance ne

peut qu'impacter rapidement la capacité de nos laboratoires à préparer le futur.

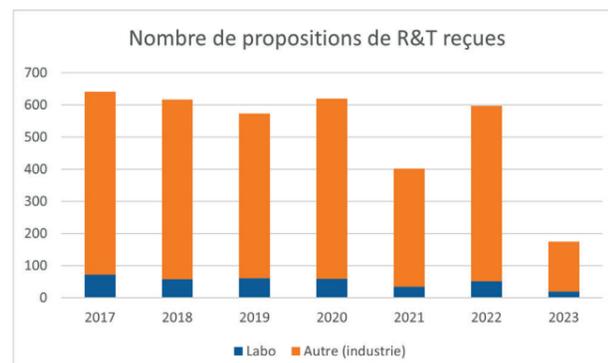


Fig. 2 Evolution du nombre d'actions proposées par les laboratoires (en bleu)

Une décroissance significative des personnels techniques

#### La recherche fondamentale française dans le spatial en difficulté pour (dans l'incapacité de) préparer le futur

##### Des métiers critiques en tension

Les métiers de l'instrumentation (ingénierie système, intégration, mécanique, optique, assurance produit et assurance qualité, composants, etc.), au cœur de la conception de nouveaux systèmes et de leur réalisation, sont particulièrement en danger. A l'interface entre recherche et technique, le métier si fondamental d'« instrument scientist » souffre également d'un manque de reconnaissance pour les recrutements sur des postes de chercheurs CNRS, et en terme d'évolution de carrière.

Même s'ils restent relativement stables en nombre, les métiers de l'informatique ne sont pas mieux lotis car ils doivent faire face à des enjeux en forte croissance nécessitant de nouvelles compétences. Certaines activités sont plus adaptées à la sous-traitance, comme l'Assurance Produit et l'Assurance Qualité en régime routine ou la mécanique en régime cadré.

##### Des métiers nouveaux

Le domaine d'activité le plus innovant est celui lié aux métiers de l'informatique avec l'intégration de l'IA et les problématiques du big data (le besoin de gérer, traiter et stocker des quantités de données considérables et souvent complexes avec le développement de l'algorithmie frugale). Les technologies quantiques (capteurs et calcul) sont également de plus en plus présentes dans nos domaines d'activité, ainsi que la stratégie financière par rapport

aux moyens Cloud (FinOPS), et les métiers de l'éco-conception.

#### Maintenir et renforcer le personnel d'IT et de chercheurs dans les laboratoires :

- Faire des priorités de recrutement sur les métiers de l'instrumentation et les enjeux nouveaux sur l'algorithmie scientifique (également valoriser le métier et les carrières des 'instrument scientist') ;
- Rendre les salaires proposés plus attractifs pour ces filières ;

## 1.2 EXTENSION DES RESSOURCES HUMAINES

Devant la décroissance des RHs techniques dans les laboratoires et le besoin d'aller chercher des compétences complémentaires sur des enjeux nouveaux, comment s'appuyer davantage sur l'écosystème des établissements publics et de l'industrie ?

### 1.2.1 RELATIONS INTER-ORGANISMES DE RECHERCHE

#### L'exemple des programmes de la MITI

Les appels à projets MITI (Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires) du CNRS permettent d'initier des projets inter-instituts et organismes de recherche. En 2022, l'appel « Nouvelles méthodes pour le traitement et l'analyse des données spatiales » a été soutenu par le Cnes et le CNRS à travers une petite dizaine de projets en Observation de la Terre et Sciences de l'Univers. Ces activités ont permis de créer des connexions entre divers instituts du CNRS sur des sujets allant du spatial aux mathématiques, et entre le CEA, le Cnes et d'autres organismes ou universités. Les montants alloués, la liberté d'orientation laissée aux chercheurs, et la relative simplicité du dossier à présenter, rendent ce dispositif extrêmement attractif. La collaboration est établie de façon durable pour la plupart de ces projets, certains ayant eu accès à des financements substantiels de type ANR à la suite de cette initiative.

Ce dispositif d'amorçage est souvent à l'origine de projets de doctorats (80 Primes du CNRS).

#### Attirer des expertises au sein des établissements publics :

- Inciter les laboratoires et le CNES à définir des sujets inter-instituts/inter-organismes qui pourraient être à l'origine d'appels à projets de la MITI

(autour de la filière instrumentale, du traitement de la donnée, de jumeaux numériques, etc.).

- Encourager les actions inter-instituts/inter-organismes à travers les AOs CNES (APR, R&T, bourses doctorales et post-doctorales).

#### La coordination inter-organismes

On peut également souligner la vertu des Programmes et Equipements Prioritaires de Recherche (PEPR) pour fédérer de l'activité interdisciplinaire et inter-organismes, mais regretter une faible coordination inter-organisme qui, si elle avait été plus efficace, aurait permis d'intégrer dès leur conception les questions du spatial dans les PEPR.

De la même manière, les universités françaises sont désormais des acteurs importants dans le domaine du spatial, non seulement au niveau de la formation mais aussi au niveau de la recherche et ont vocation à être impliquées dans tous les dialogues entre les différents acteurs du spatial français.

Les Agences de Programme, dont celle sur le spatial, doivent permettre une coordination inter-organismes plus efficace et pourraient permettre d'attirer vers le spatial des compétences complémentaires, par exemple avec un apport de l'Inria sur le numérique, et c'est également l'opportunité de valoriser la recherche spatiale au sein des autres agences de programme.

### 1.2.2 LA RELATION À L'INDUSTRIE

L'industrie spatiale, maîtres d'œuvre et équipementiers, est fortement développée en France et reconnue internationalement pour son excellence technique. Elle joue un rôle majeur dans le développement des systèmes spatiaux scientifiques en EOT, et également en SUE, où la maîtrise d'œuvre par les laboratoires et le Cnes des instruments et segments sol s'appuie largement sur des équipementiers.

#### La délégation de tâches en support à la maîtrise d'œuvre

Une grande partie des projets spatiaux fonctionne avec un rapport CDD/permanents de plus en plus important introduisant une fragilité certaine sur le long terme.

Afin de bénéficier d'un soutien plus pérenne dans la durée que les CDD, et de davantage capitaliser les compétences, le CNRS a entrepris il y a quelques années de mettre en place des accord-cadre dans différents domaines identifiés comme sous-trai-

tables (une centaine de postes identifiés). Cet effort est resté en suspens. Il est jugé nécessaire de le poursuivre. Un recours aux CDI de projet serait également une alternative à l'emploi de CDDs.

### **Relancer les accords cadre de délégation de tâches auprès des services marchés du CNRS et permettre des embauches longues à travers des CDI de mission/projet/métier.**

#### **Vers plus de coopération et de transfert vers l'industrie**

Dans le cadre du Cospace, un groupe de travail « recherche et transfert » formé de représentants des organismes nationaux de recherche (CNRS, Onera et CEA), du Cnes et d'acteurs industriels (Gifas Alliance NewSpace), est chargé de proposer des stratégies pour améliorer les collaborations industrie-recherche publique. Ce dialogue se met en place et permet d'échanger sur les capacités et besoins réciproques, par exemple sur les infrastructures de recherche susceptibles de permettre à l'industrie de tester et valider leurs technologies spatiales ou sur les possibles collaborations dans le domaine de l'observation de la Terre.

#### **Rendre plus efficiente la relation à l'industrie**

- Développer des outils communs (base de données, réseau de métiers, etc) à tous les laboratoires (et organismes) travaillant dans le spatial pour rationaliser l'accès à un ensemble d'industries spécialisées ;
- Mettre en place des forums de discussion ONR/Cnes/industrie, à travers des workshops thématiques (ex : Workshop Hydrologie 2024).

### **1.3 LA FORMATION**

Préparer le futur de la Science réclame bien évidemment de se préoccuper de la formation de ceux qui développeront et utiliseront les missions spatiales imaginées aujourd'hui.

#### **Thèses et bourses postdoctorales**

De l'interview de plusieurs Ecoles Doctorales, il ressort principalement le constat que la durée moyenne d'une thèse dépasse en moyenne de 1 à 7 mois la durée de 36 mois prévue initialement. Ré-évaluer la durée officielle des contrats doctoraux semble donc aujourd'hui devenir impératif, et permettrait de s'aligner sur les standards interna-

tionaux. C'est d'autant plus vrai lorsque l'on considère l'évolution de la charge de travail d'un doctorant, notamment pour les thèses expérimentales. Par ailleurs, un exercice grossier d'analyse statistique du devenir des étudiants a été effectué, sur la base Cnes et les données fournies par les écoles doctorales sur une dizaine d'années (les informations sont difficiles à collecter après quelques années). 60 % bénéficient d'un CDI dans la recherche académique ou privée, voire l'enseignement, et environ 25 % (les plus jeunes) sont en CDD, toujours dans la recherche. Cela témoigne d'un dispositif plutôt efficace pour la formation des chercheurs et ingénieurs de recherche.

#### **Soutenir les thèses expérimentales, notamment en environnant mieux celle-ci, en valorisant pour les encadrants ce type de thèses et par la mise en place de fonds de réserve pour une éventuelle prolongation. Promouvoir auprès des Ministères le passage de thèse sur 4 ans (financement et au niveau du cycle universitaire).**

#### **Compétences et Métiers d'Avenir**

Le dispositif Compétences et Métiers d'Avenir (CMA) de France 2030 a permis de proposer, et de voir sélectionné, un certain nombre de projets d'envergure pour développer des formations aux métiers du secteur spatial (industrie et recherche) afin de pallier le manque de main d'œuvre qualifiée. On peut citer l'Académie Spatiale d'Île-de-France, COMETES en région toulousaine, et BIOSPACE à Bordeaux. Ces dispositifs visent à augmenter de manière significative le vivier d'étudiants formés aux métiers du spatial pour nourrir les différentes filières. Les CMA sont un bon guichet pour fédérer les efforts et mettre en visibilité les formations et les débouchés auprès des étudiants. Il sera bon de faire un retour d'expérience sur ce dispositif, pour savoir s'il faut soutenir d'avantage ce genre d'initiative à l'avenir.

Par ailleurs, le groupe tient à souligner l'intérêt de l'apprentissage (scolaire et post-bac), l'importance du mentorat interne en accompagnement de nouveaux arrivants, l'utilité des centres spatiaux universitaires, des opérations de communication en direction de la jeunesse, de la formation dans les projets (ex : challenges algorithmiques) et l'importance d'avoir quelques développements en maîtrises d'œuvre internes côté Cnes.

## **2. LES INFRASTRUCTURES**

Le développement et l'exploitation des missions spatiales scientifiques nécessitent de disposer d'infrastructures d'essais, de traitement de la donnée ou aéroportés.

Depuis des années, un effort de structuration est réalisé pour rassembler les différents moyens en Infrastructures de Recherche labellisées, afin de rationaliser leurs capacités et leurs offres de service, et les rendre visibles et éligibles à des financements nationaux et européens.

#### **Faire connaître les moyens d'essais, de traitement de la donnée ou aéroportés dans l'écosystème du spatial**

### **2.1 LES MOYENS D'ESSAIS EXPÉRIMENTAUX**

La préparation et le développement de segments spatiaux nécessitent des moyens d'intégration, de tests, de caractérisation, d'étalonnage et de qualification aux environnements. Dans le domaine des Sciences de l'Univers, pour lequel les laboratoires interviennent en maîtrise d'œuvre d'instruments ou de sous-systèmes instrumentaux, la possession et l'opération en propre d'infrastructures d'essais, souvent spécifiques, sont indispensables.

Depuis 2019, le groupement d'intérêt scientifique Paradise (plateforme pour les activités de recherche appliquées et de développement en instrumentation sol et espace) rassemble les plateformes d'essais de plusieurs laboratoires nationaux. Les moyens rassemblent des salles blanches, pots vibrants, métrologie mécanique, cuves thermiques, étuves cryostat, plateforme de fabrication de composants optiques, moyens de tests de compatibilité électromagnétique, moyens d'irradiations X, UV, mur d'images, etc.

Infrastructure de recherche depuis 2022, Paradise a défini un mode de fonctionnement homogène entre les différentes plateformes, partage les bonnes pratiques et formations, rationalise les moyens nécessaires aux activités d'assemblage, d'intégration et tests des projets scientifiques et de R&T, coordonne les jouvences et les développements des capacités de tests au sein des plateformes. L'effort commun pour définir des modèles économiques des plateformes permet d'accéder à des crédits d'investissements nationaux et euro-

péens, et de proposer des prestations à l'industrie, ce qui peut permettre d'alléger les coûts de fonctionnement (entre 50 et 100 prestations par an). Paradise constitue de fait un forum de discussions, également avec le Cnes, pour orienter les positionnements des laboratoires dans les phases amont des projets, et le cas échéant la prise en compte de nouveaux moyens d'essais.

L'existence de ces moyens est indispensable pour la préparation et le développement des projets du domaine et il est fondamental de permettre leur maintien et leur évolution en fonction des nouveaux besoins. Ceci passe bien sûr par des capacités financières, identifiées à ce jour, mais aussi par des ressources humaines de haute qualification à formation longue, et nécessairement pérennes. La disponibilité de cette ressource humaine cœur de métier, en volume suffisant, est un des défis actuels des plateformes de Paradise, même si des efforts sont faits pour trouver des schémas qui intègrent des ressources humaines industrielles complémentaires.

Au-delà de ces moyens spécifiques aux ONRs, l'écosystème spatial français ne paraît pas manquer de capacités de tests de performances ou de qualification à l'environnement spatial, que ce soit dans l'industrie ou dans les organismes. Un effort de présentation et d'ouverture des plateformes de la recherche publique auprès des acteurs privés du spatial contribuerait à les faire évoluer au meilleur niveau tout en fournissant à ces acteurs l'accès à des moyens de test.

#### **Soutenir le recrutement sur les métiers de RH développement et opération des plateformes**

### **2.2 LES PÔLES DE DONNÉES**

Les pôles de données et de services représentent un moyen de faciliter l'accès aux données en permettant notamment le référencement, l'analyse et la distribution de ces données tout en proposant des services d'accompagnement aux chercheurs. En Sciences de l'Univers, on peut citer l'Infrastructure de Recherche CDS (Centre de Données de Strasbourg) pour l'astronomie, MEDOC et CDP pour le Soleil et les plasmas, et les pôles (à l'étude) Surfaces Planétaires et Petits Corps. En Observa-

tion de la Terre, l'infrastructure de recherche Data Terra coordonne les différents pôles thématiques. Le développement et maintien de ces pôles, souvent plateformes multi-centres et multi-labos interconnectées, nécessitent une expertise scientifique au croisement des données et profils développeurs, une expertise de plus en plus difficile à attirer. Les besoins en capacités de stockage et d'usages y sont croissants notamment avec le volume des données des missions futures et l'arrivée de l'IA, qui vont nécessiter des reprises d'architecture pour le passage CPU / GPU, et dans un contexte de respect du critère environnemental.

Pour Data Terra, le mode de financement ne permet pas actuellement une visibilité pluriannuelle, ce qui réduit les capacités d'anticipation pour répondre aux objectifs de demain. La question de la valorisation économique des investissements de cette infrastructure doit être résolue afin de permettre à ces outils de la recherche publique de répondre à la fois aux enjeux sociétaux tout en préservant son modèle de développement, gage de son indépendance essentielle pour préserver la qualité des outils qu'elle propose et leur exemplarité.

**Pour Data Terra, offrir une visibilité pluri-annuelle sur les moyens financiers, une dotation socle et des capacités de valorisation économique préservant**

Notons également l'importance de renforcer le rôle des Services Nationaux d'Observation comme acteurs principaux pour la calibration/valorisation

### 3. RESSOURCES FINANCIÈRES

Globalement, le spatial voit ses budgets en croissance en Europe, en France, et dans le monde. Le Cnes et l'Esa fournissent les sources de financements principales pour les programmes scientifiques en préparation (accompagnement scientifique, R&D), développement et exploitation. Ces sources peuvent être complétées par des activités à l'UE (Horizon Europe), nationales (France2030, PEPR, Equipex), régionales, et bien sûr au sein des organismes de recherche. L'exploitation des données de missions spatiales reste un parent pauvre, notamment depuis la baisse drastique du soutien de l'Europe à ces activités.

#### 3.1 BUDGET CNES

Côté SUE, et malgré une forte alerte fin 2022, les

des données, en leur permettant de bénéficier des financements du spatial. Les pôles de données et les infrastructures de recherche ont aussi un rôle pour créer plus de synergie thématique pour mieux insérer le spatial dans les moyens d'observation disponibles.

#### 2.3 IN'AIR : BALLONS ET AVIONS

IN'AIR est l'Infrastructure Nationale des Aéronefs Instrumentés pour la Recherche, qui rassemble désormais les avions (Safire) et les ballons (Cnes). C'est une infrastructure nouvelle. Les principaux enjeux pour IN'AIR concernent la consolidation de sa gouvernance et de son ambition (moyens financiers et humains en adéquation), une homogénéisation de l'accès à ses moyens et aux données indépendamment des vecteurs concernés (avions, ballons), le renouvellement du jet (projet Anvole), qui permet de voler très haut, avec une grande autonomie de vol et une capacité importante d'emport d'équipements, l'extension de l'offre aux gros drones et le renouvellement à venir de l'Avion de Transport Régional (ATR). Compte tenu des difficultés rencontrées pour le renouvellement du jet, celle de l'ATR est à anticiper.

**IN'AIR : un outil stratégique pour l'EOT  
Faire un retour d'expérience du projet ANVOLE pour anticiper le futur renouvellement de l'ATR**

budgets Cnes ont été globalement stables sur la période et ont permis d'engager les priorités scientifiques issues de 2019 prêtes à l'être sur le plan programmatique, ainsi que d'assurer les exploitations. Côté EOT, des abondements budgétaires ont permis de travailler à l'engagement de nouveaux projets bilatéraux (AOS, C3IEL).

Pour les deux domaines, les prévisions budgétaires devraient permettre des ouvertures pour les sujets identifiés.

**Maintenir la capacité du PMT Cnes à permettre les engagements des priorités du SPS24 – Présentation régulière en CPS du PMT et des marges de manœuvre.**

#### 3.2 BUDGET ESA

Côté SPC (programme scientifique obligatoire), le budget (voté à l'unanimité des Etats Membres) qui a été confirmé à la CMIN22, est constant, simplement corrigé de l'inflation. Le programme est tendu budgétairement, notamment par rapport aux missions L (**Lisa, Athena**) concomitantes, et ne permet de concrétiser la prochaine mission de taille moyenne M7 qu'à l'horizon 2037. Des ouvertures existent cependant pour des collaborations sur les futures missions flagships de la Nasa et autres coopérations.

**Œuvrer pour une augmentation du budget Science, anticiper l'impact des divers aléas (notamment sur les deux missions L), et partager avec la communauté sur les priorités à défendre.**

Côté programme optionnel PB-HME (vols habités, microgravité et exploration), le budget souscrit à la CMIN22 est en augmentation de 50 % par rapport à la période précédente, notamment pour permettre la poursuite des activités sur Exomars et Mars Sample Return, ainsi que les activités en vol habité. Cependant, le budget souscrit pour la partie scientifique dans le cadre SciSpacE est en retrait important par rapport au besoin identifié par la communauté scientifique.

Côté programme optionnel PB-EO (observation de la Terre), le budget souscrit par la France est en forte augmentation, ce qui permet en particulier de satisfaire de fortes priorités de la communauté française sur le programme Future EO (Earth Observation) et sur la mission AEOLUS 2.

**Promouvoir les activités SciSpacE (expériences dans l'ISS) parmi les Etats Membres**

#### 3.3 LES AUTRES GUICHETS

A l'Europe, la proportion de financement réservée

### 4. EN GUISE DE SYNTHÈSE

**La science spatiale est en danger.**

Les RH techniques sont en décroissance régulière depuis plusieurs années dans les laboratoires, avec une pyramide des âges vieillissante et une problématique nouvelle de manque d'attractivité. La ten-

à la recherche scientifique spatiale n'a cessé de reculer au fil des ans, entre FP7 (20% et 140 M€), H2020 (11% et 107 M€) et maintenant Horizon Europe (1% et 15 M€ hors programme Copernicus). L'UE concentre de plus en plus ses moyens en soutien à la compétitivité industrielle, privilégiant de fait des activités à plutôt haute maturité technologique. Les activités spatiales scientifiques auraient cependant besoin, comme par le passé, d'investissements lourds de démonstrateurs technologiques ou de soutien dans le domaine de l'analyse de données et de l'exploitation.

Le programme France2030, très orienté service et nouveaux entrants, n'a pas été une opportunité de fédérer le monde de la recherche avec celui des applications (2% des financements vers des acteurs recherche au lieu des 10 % pré-identifiés), France2030 se focalisant sur les développements à partir de technologies de haut TRL, et sur la valorisation économique rapide, deux critères difficilement compatibles avec les missions des organismes de recherche publique.

Heureusement, les appels à idées ANR et les PEPR représentent toujours des vecteurs de soutien essentiels pour la communauté scientifique, en permettant des investissements dans des programmes ambitieux et pluridisciplinaires. Un cadre à privilégier.

Malgré tout, force est de constater que ces différents budgets sont de plus en plus morcelés, et manquent de pérennité et de stabilité sur le long terme (la recherche fondamentale travaillant sur des échelles de temps longues).

**Influencer l'UE sur la définition de ses programmes cadres au profit de la recherche spatiale.  
Promouvoir à l'ANR des budgets dédiés à l'exploitation scientifique.**

sion sur les RH Cnes est également palpable. Dans ce contexte, des criticités sont notamment identifiées en instrumentation et en traitement de la donnée, par rapport à des ambitions en croissance, ainsi que sur la Cal/Val. De fortes inquié-

tudes sont notables vis-à-vis de la préparation du futur, et dans le développement de projets pour le domaine SUE.

Il faut inverser cette tendance avec une nécessité impérative de former, recruter et stabiliser ces métiers critiques, pour au minimum rester au niveau d'excellence scientifique et technique reconnu à l'international, et qui permettra à la communauté de préserver son rôle de premier plan dans les futures missions.

Plus que jamais, il convient de s'appuyer sur les forces actuelles, l'excellence scientifique bien sûr, l'expérience dans les filières instrumentales, les infrastructures de recherche, l'industrie française et le trio ONR-Universités -Cnes.

### La coordination ONR- Universités-Cnes au cœur de la science spatiale

La coordination ONR- Universités-Cnes est fondamentale et mérite de plus en plus d'attention, pour la mise en œuvre des priorités scientifiques, dans l'échange sur les compétences des uns et des

autres, dans la préparation du futur (R&T, phase 0), et sur les projets. La concertation en amont est particulièrement cruciale dans les montages de projet SUE, dans un contexte RH plus difficile pour les laboratoires qui affaiblit leur capacité à assumer un rôle de maîtrise d'œuvre d'une contribution substantielle. Cette concertation dans le montage de projets s'exerce notamment via les Comité Inter-Organismes de projets, qui rassemble les Directeurs de laboratoires concernés et leurs Tutelles : elle permet de consolider l'activité, l'organisation avec les RHs disponibles, les ressources financières nécessaires et d'identifier les actions à mener.

La prise en charge par le Cnes de maîtrise d'œuvre devra être étudiée au cas par cas, dans un montage laboratoires/Cnes/industrie, et en adaptant le périmètre de contribution accessible.

### La recherche spatiale française est extrêmement bien reconnue internationalement, faisons-en sorte que cela perdure.

### Synthèse des recommandations

Catégorie	N°	
Ressources Humaines	RH1	Une population de chercheurs vieillissante Préserver le potentiel et le dynamisme français en anticipant les départs et renforcer l'implication des personnels universitaires
	RH2	Maintenir et renforcer le personnel d'IT et de chercheurs dans les laboratoires : - Faire des priorités de recrutement sur les métiers de l'instrumentation et les enjeux nouveaux sur l'algorithmie scientifique (également valoriser le métier et les carrières des 'instrument scientist') ; - Rendre les salaires proposés plus attractifs pour ces filières.
	RH3	Attirer des expertises au sein des établissements publics : - Inciter les laboratoires et le CNES à définir des sujets inter-instituts/inter-organismes qui pourraient être à l'origine d'appels à projets de la MITI (autour de la filière instrumentale, du traitement de la donnée, de jumeaux numériques, etc.) ; - Encourager les actions inter-instituts/inter-organismes à travers les AOs CNES (APR, R&T, bourses doctorales et post-doctorales).
	RH4	Relancer les accords cadre de délégation de tâches auprès des services marchés du CNRS et permettre des embauches longues à travers des CDI de mission/projet/métier.
	RH5	Rendre plus efficiente la relation à l'industrie : - Développer des outils communs (base de données, réseau de métiers, etc) à tous les laboratoires (et organismes) travaillant dans le spatial pour rationaliser l'accès à un ensemble d'industries spécialisées ; - Mettre en place des forums de discussion ONR/Cnes/industrie, à travers des workshops thématiques (ex : Workshop Hydrologie 2024).
	RH6	Soutenir les thèses expérimentales, notamment en environnant mieux celle-ci, en valorisant pour les encadrants ce type de thèses et par la mise en place de fonds de réserve pour une éventuelle prolongation ; Promouvoir auprès des Ministères le passage de thèse sur 4 ans (financement et au niveau du cycle universitaire).

Infrastructures	IR1	Faire connaître les moyens d'essais, de traitement de la donnée ou aéroportés dans l'écosystème du spatial
	IR2	Soutenir le recrutement sur les métiers de RH développement et opération des plateformes
	IR3	Pour Data Terra, offrir une visibilité pluri-annuelle sur les moyens financiers, une dotation socle et des capacités de valorisation économique préservant son indépendance.
	IR4	IN'AIR : un outil stratégique pour l'EOT : Faire un retour d'expérience du projet ANVOLE pour anticiper le futur renouvellement de l'ATR
Ressources Financières	RF1	Maintenir la capacité du PMT Cnes à permettre les engagements des priorités du SPS24 : Présentation régulière en CPS du PMT et des marges de manoeuvre
	RF2	Œuvrer pour une augmentation du budget Science, anticiper l'impact des divers aléas (notamment sur les deux missions L), et partager avec la communauté sur les priorités à défendre.
	RF3	Promouvoir les activités SciSpacE (expériences dans l'ISS) parmi les Etats Membres.
	RF4	Influencer l'UE sur la définition de ses programmes cadres au profit de la recherche spatiale. Promouvoir à l'ANR des budgets dédiés à l'exploitation scientifique..

### Liste des Acronymes

AA	Astronomie et Astrophysique	IN AIR	Infrastructure Nationale des Aéronefs Instrumentés pour la Recherche,
ANR	Agence Nationale de la Recherche	IN2P3	Institut national de physique nucléaire et de physique des particules
ANVOLE	projet d'acquisition d'un jet	INRIA	Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique
AEOLUS-2	ESA wind mission	INSU	Institut National des Sciences de l'Univers
AOS	Atmosphere Observing System	IT	Ingénieur et Technicien
APR	Appel à Projets Recherche	JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
ATR	Avion de Transport Régional	MEDOC	Multi Experiment Data and Operation Center
BAP	Branche d'Activité Professionnelle	MITI	Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires
BIOSPACE		NASA	The National Aeronautics and Space Administration
Cal/Val	Calibration et Valorisation	ONERA	Office national d'études et de recherches aérospatiales
CDD	Contrat à Durée Déterminée	ONR	Organismes nationaux de recherche
CDI	Contrat à Durée Indéterminée	OA	Océan Atmosphère
CDPP	Centre de Données de Physique des Plasmas	PARADISE	Plateforme pour les activités de recherche appliquées et de développement en instrumentation sol et espace
CPU	Unité Centrale de Traitement	PB-EO	Programme Board for Earth Observation
CDS	Centre de Données de Strasbourg	PB-HME	Programme Board for Human Spaceflight, Microgravity and Exploration
CEA	Centre d'Etudes Atomiques	PEPR	Programmes et Equipements Prioritaires de Recherche
C3IEL	Cluster for Cloud evolution, Climate and Lightning	PMT	Plan à Moyen Terme
CMA	Compétences et Métiers d'Avenir	RH	Ressources Humaines
CMIN22	Council Meeting at Ministerial Level 2022	R&D	Recherche et Développement
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales	R&T	Recherche et Technologie
CNRS	Central National de Recherche Scientifique	SciSpacE	Science in the Space Environment
CPS	Comité des Programmes Scientifiques	SIC	Surfaces et Interfaces Continentales
COMETES		SPS	Séminaire de Prospective du Spatiale
EOT	Etude et Observation de la Terre	SPC	ESA Science Programme Committee
ETP	Equivalent Temps Plein	SUE	Sciences de l'Univers et Exploration
ESA	European Space Agency	TRL	Technology Readiness Level
FP7	Programme-cadre pour 2007-2013 de l'Union européenne, pour la recherche et le développement	TS	Terre Solide
GIFAS	Groupement des industries Françaises Aéronautiques et Spatiales	UE	Union Européenne
GPU	Graphics Processing Unit	UMR	Unité Mixte de Recherche
H2020	Programme de financement de la recherche et de l'innovation de l'Union européenne pour la période 2014-2020		
IA	Intelligence Artificielle		

# QUEL CADRE POUR LES MISSIONS INTERNATIONALES DE DEMAIN ?

Güliz Alinca (co-animatrice), Anne Decourchelle (co-animatrice), Nabila Aghanim, Yves André, Michel Berthé, Jacqueline Boutin, Adrien Deschamps, Thierry Floriant, Marielle Gosset, Jean-Marie Hameury, Alexia Lacaze

Le groupe s'est intéressé aux différents cadres de coopération dans lesquels se développent les missions spatiales scientifiques en sciences de l'Univers, exploration (SUE) et en étude et observation de la Terre (EOT). Il s'est attaché à en comprendre les enjeux, les évolutions, les ambitions et intérêts

## 1. RECOMMANDATIONS PRÉCÉDENTES

Lors du dernier séminaire de prospective scientifique en 2019, les questions relatives aux coopérations internationales ont été abordées par le groupe transverse « Stratégie spatiale pour la science » et par l'atelier de travail n°10 dédié à l'Europe.

La place particulière du cadre de coopération européen (comprenant l'Esa, l'UE et Eumetsat) pour la réalisation de grands projets spatiaux a été réaffirmée. Ce groupe transverse a proposé un renforcement des moyens alloués à l'Esa, accompagné d'une augmentation du budget du Cnes pour contribuer aux charges utiles du programme scientifique obligatoire. Sur le programme Earth Explorer de l'Esa, il a fait le constat de sélections peu conformes aux priorités de la communauté scientifique française, alors que le cadre bilatéral ou multi-bilatéral permet de conduire des coopérations à fort retour sur investissement avec les agences partenaires. Il a noté enfin que la coopération avec de nouveaux entrants, souvent portée par une

## 2. MÉTHODOLOGIE

Le groupe de travail a auditionné un vaste panel d'acteurs du spatial afin de disposer (1) d'éléments stratégiques et géopolitiques de la participation française à des missions internationales (directions de la Stratégie et de l'Europe et l'International du Cnes, ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, Esa, Commission Européenne, Eumetsat), (2) d'une analyse des éléments

scientifiques spécifiques à chacun d'eux, le positionnement de la communauté et les marges d'optimisation. Il a ensuite identifié les éléments nécessaires à la définition du cadre de futures missions internationales et a formulé des recommandations.

stratégie diplomatique de la France, demande une réflexion en amont sur les sujets et types de coopérations scientifiques à mettre en œuvre.

L'atelier dédié à l'Europe a défini deux actions prioritaires pour favoriser la participation de la communauté scientifique nationale aux programmes européens : le partage d'information entre les différents acteurs nationaux ainsi qu'une attitude proactive sur la stratégie et la politique scientifiques européennes et l'élaboration des appels d'offres.

Si plusieurs de ces préconisations ont été mises en place ou vont l'être, dont une forte augmentation du budget souscrit par la France sur le programme Earth Explorer (EE), les résultats se mesureront à l'aune du positionnement de la communauté scientifique sur les missions européennes EE (missions EE11 et EE12 en cours de sélection) et Copernicus.

ments programmatiques des différents cadres (responsables Cnes des programmes scientifiques, présidents du Ceres et du Tosca), et (3) de retours d'expériences scientifiques, techniques et de gestion de projets sur la réalisation de missions dans différents cadres (responsables scientifiques, chefs de projets).

Plus de vingt-cinq entretiens ont été menés de sep-

tembre 2023 à mars 2024, permettant une vision d'ensemble sur les enjeux, le fonctionnement, les forces et faiblesses des différents cadres de missions internationales, et des coopérations.

Les aspects légaux n'ont pas été abordés, nos experts estimant qu'il n'y aurait pas d'enjeu pour les cinq années à venir. Enfin, un travail spécifique

## 3. SYNTHÈSE ET ANALYSE DES ENTRETIENS

### 3.1 QUELLES RAISONS MOTIVENT LA RÉALISATION DE MISSIONS DANS UN CADRE EUROPÉEN OU INTERNATIONAL (BILATÉRAL OU MULTILATÉRAL) ?

De nombreux enjeux sous-tendent le développement de missions spatiales scientifiques dans un cadre de coopération<sup>1</sup> européen ou international.

La coopération permet d'accomplir collectivement ce que la France ne serait pas en mesure de réaliser seule. Elle donne accès à des missions ambitieuses qui servent des objectifs scientifiques inatteignables dans un cadre national. La participation française au **JWST**, dont le coût global est d'une dizaine de milliards, en est un exemple. Même si la France était en mesure de réaliser seule une mission de grande envergure, elle devrait y concentrer l'essentiel de ses moyens au détriment de contributions structurantes aux autres thèmes et missions indispensables aux avancées des domaines scientifiques. En SUE, l'accès à différentes longueurs d'onde (radio submm, infrarouge, optique, UV, X et gamma) et messagers (ondes gravitationnelles) est essentiel pour progresser. En EOT, ce sont les mesures des propriétés complémentaires de l'écosystème Terre (océan, atmosphère, continents, ...) qui sont requises. La coopération permet de répondre au besoin de missions sur différents champs d'investigation en optimisant les ressources, en partageant le coût et la charge de réalisation, en bénéficiant de technologies, d'instruments, de compétences uniques ou complémentaires. Le développement d'une large communauté scientifique autour de la conception ou la réalisation d'instruments innovants, et de l'exploitation de leurs données, en est

<sup>1</sup> On définit comme coopération l'association bilatérale ou multilatérale de deux ou plusieurs agences spatiales ou entités pour collaborer dans un domaine défini, officialisée par un support juridique tel qu'une lettre d'intention, un accord-cadre, un accord de mise en œuvre ...

supplémentaire aurait été requis pour identifier les filières technologiques et les compétences scientifiques spécifiques à la réalisation de missions en coopération à fort retour scientifique sur investissement ; ce point est traité par d'autres groupes thématiques et transverses.

L'un des aspects moteur et constitue un enjeu de connaissance, de progrès, de visibilité et de reconnaissance internationale. Tant dans les sciences de l'Univers que dans la compréhension du système Terre, les questions scientifiques posées ont vocation à concerner l'humanité entière. Favoriser la coopération, et la recherche de solutions globales prend tout son sens dans ce contexte.

Au niveau institutionnel, la coopération au Cnes s'appuie sur trois principes directeurs. En premier lieu, elle est au service des programmes du Cnes pour la réalisation des priorités scientifiques et techniques de la communauté. Elle est également un levier d'intérêts diplomatiques et peut accompagner des intérêts industriels – ce dernier point étant considéré comme un atout supplémentaire. Ces trois principes peuvent se combiner ou coïncider, tout comme il arrive que des intérêts géopolitiques soient le moteur principal.

Au sein de l'Europe et de ses institutions, dont la France est l'un des contributeurs majeurs, le Cnes se doit d'être un acteur de premier plan. Il doit œuvrer activement au soutien des projets de la communauté scientifique française pour maximiser le retour sur investissement par une participation aux missions spatiales scientifiques européennes et à leur exploitation.

En tant que pays doté d'une grande agence spatiale ayant délégation de la politique spatiale nationale, la coopération du Cnes avec les grandes agences spatiales (Nasa, Jaxa, ...) revêt des enjeux stratégiques. Enfin, il est également de sa responsabilité de construire des coopérations avec des pays

émergents dans le domaine spatial, pour accompagner et porter de nouvelles opportunités.

### 3.2 ECOSYSTÈME DES DIFFÉRENTS CADRES DE COOPERATION ET LEUR ÉVOLUTION

On distingue les missions qui se développent dans un cadre européen des programmes bilatéraux ou multilatéraux pour lesquels le Cnes est en coopération directe avec ses partenaires.

Il existe des distinctions importantes entre les domaines SUE et EOT pour le montage de projets, le rôle des laboratoires et celui du Cnes. En science de l'Univers et exploration, les charges utiles des missions sont en grande majorité développées dans les laboratoires, ainsi que les segments sol de production des données de niveaux scientifiques. Dans le domaine de l'étude et observation de la Terre, les charges utiles sont réalisées par des industriels. Mais les laboratoires conservent une expertise en physique de la mesure et jouent un rôle clé dans l'évaluation des performances, la calibration/validation et l'analyse des données. Ils peuvent être amenés à développer des démonstrateurs sol ou aéroportés. Si le domaine SUE a pour seul cadre l'Esa pour la réalisation de missions scientifiques européennes, le domaine EOT dispose maintenant de différents cadres européens (Esa, UE ou Eumetsat) pour la réalisation de ses missions, en lien avec les aspects sociétaux de ce domaine.

Historiquement, l'Esa s'est bâtie autour de la science et du programme scientifique – enjeu principal lors de sa création en 1975, puis s'est saisie de nouvelles priorités dès les années 1990 avec le développement des lanceurs, de l'exploration et de l'observation de la Terre. Aujourd'hui, la science à l'Esa est présente à travers différents programmes et leurs comités associés : le programme scientifique obligatoire dédié aux sciences de l'Univers (Science Programme Committee, SPC), les programmes optionnels dédiés aux vols habités, à la microgravité et à l'exploration (Programme board PB-HME), à l'observation de la Terre (Programme board PB-EO), et à la surveillance des objets en orbite autour de la Terre, de l'environnement spatial et des menaces provenant de l'espace (Programme board PB-SSA).

#### 3.2.1 LE CADRE ESA ET LES SCIENCES DE L'UNIVERS, EXPLORATION.

Parmi ces quatre programmes de l'Esa, le Programme scientifique obligatoire a quelques spécificités : unique programme dont la création est explicitement prévue par la Convention de l'ESA, il est obligatoire pour les 22 Etats membres tenus de souscrire à hauteur d'un montant calculé en fonction de leur produit national brut. Les trois autres programmes sont optionnels : les Etats membres décident du montant de leur souscription, mais aussi de leur affectation au sein du programme. La règle de retour géographique de l'Esa (montant des contrats industriels d'un pays proportionnel à son investissement) s'y décline différemment, (calcul appliqué par tranche de trois ans, et non pas par mission). L'industrie, la mission ou encore l'activité spatiale concernée ne peuvent donc pas être pré-définies.

Lors du conseil ministériel de 2022, tous les programmes ont augmenté en euros constants sauf le programme scientifique obligatoire. Pour les programmes optionnels, la souscription est faite en euros constants, ce qui n'est pas le cas pour le programme scientifique obligatoire. Pour donner des ordres de grandeur, les engagements français lors de la ministérielle de 2022 étaient de 3 202 M€, dont notamment : 515 M€ dédiés à l'exploration, 515,5 M€ à l'observation de la Terre et 450,5 M€ au programme scientifique obligatoire ; l'écart avec le programme obligatoire se creuse d'autant plus que l'enveloppe du programme scientifique est établie en euros courants et ne tient pas compte de l'inflation bien que ce soit le cas pour les programmes optionnels. Selon l'ESA, la part du budget du SPC sur le budget total de l'Esa était de 14% en 2000, et est de 8% en 2024. De plus, le pic d'inflation aurait entraîné une perte de pouvoir d'achat du programme scientifique de 34 millions d'euros en 2023-2025, tandis qu'elle s'estimerait à 125 millions d'euros en 2023-2027. Le programme scientifique obligatoire de l'Esa est la colonne vertébrale des sciences de l'Univers. C'est un socle pour des missions ambitieuses, répondant à des fortes priorités scientifiques nationales et européennes, permettant de construire un programme sur le long terme avec des missions spatiales catégorisées par taille : grandes (L, budget Esa de l'ordre de 1.3 G€), moyennes (M, ~650 M€) et petites (S, ~150 M€). L'Esa pilote ces missions en coopération avec les Etats membres qui fournissent généralement la charge

utile, et aussi souvent avec des agences d'autres pays comme la Nasa ou la Jaxa. L'Esa contribue également aux missions d'autres agences à travers des missions dites d'opportunité. La participation de la France à la conception et réalisation des charges utiles et aux centres de données des programmes portés par l'Esa, est de premier plan. Elle inclut la contribution européenne à l'emblématique **JWST**, lancé fin 2021, et aux missions L et M du programme Cosmic Vision, avec le plus souvent des responsabilités majeures. Le programme bilatéral porte également des contributions importantes de la France avec la Nasa, la Jaxa ou la Chine.

Le domaine de l'exploration est en forte évolution. Il est essentiellement centré sur les questions d'habitabilité et d'exploitation des ressources, avec des enjeux industriels forts. Le programme optionnel Terrae Novae du programme Vols habités, microgravité et exploration (HME) de l'Esa couvre l'exploration de la Lune, de Mars et les expériences en sciences de la vie et de la matière menées sur la station spatiale internationale (ISS) dont l'arrêt prévu, pose une difficulté majeure. Le retrait de la Russie d'**Exomars** a fortement impacté le programme martien, en cours de redéfinition avec la Nasa. Le soutien aux aspects scientifiques de l'exploration a cependant diminué avec le programme optionnel Science Space, dédié à la science de HME, qui a été faiblement souscrit à la dernière ministérielle et a été réorienté vers des aspects plus applicatifs que par le passé.

#### 3.2.2 LE CADRE EUROPEEN EN ETUDE ET OBSERVATION DE LA TERRE

Le domaine de l'Etude et Observation de la Terre a connu de profondes mutations au cours des dernières années. Au-delà du programme enveloppe Future EO de l'Esa où sont développées les missions Earth Explorer et des nouvelles missions Scout dédiées aux petits satellites, le cadre européen s'est fortement complexifié et enrichi. Le programme spatial Copernicus, porté par la Commission européenne, est monté en puissance avec l'objectif de fournir des services applicatifs en réponse à des enjeux sociétaux, mais il fournit aussi des données essentielles pour les scientifiques. Dans une moindre mesure, Eumetsat a évolué avec des objectifs qui dépassent aujourd'hui ceux de la météorologie pour contribuer au suivi du changement climatique global et à l'étude de la composition atmosphérique. Dans le cadre d'Horizon Europe

et du NewSpace, le concept de petites missions, telles que les constellations de nanosatellites ou mini satellites, a vu le jour, porté par des industriels et éventuellement des laboratoires sans forcément impliquer les agences spatiales ni le CNES a priori. L'évolution du rôle respectif des différentes agences (Esa, EUSPA – European agency for the space programme, Eumetsat) a multiplié les acteurs du spatial et les guichets en observation de la Terre, complexifiant le cadre européen pour l'accompagnement du positionnement de la communauté scientifique française. Des mesures ont été prises pour renforcer la participation française aux missions Earth Explorer de l'Esa où les priorités françaises n'avaient pas été sélectionnées ces dernières années. Un arbitrage global sur l'ensemble des missions et programmes prioritaires pour l'observation de la Terre a permis de renforcer la contribution budgétaire française à l'enveloppe optionnelle du programme Future EO. Une autre action a consisté au soutien de la participation de scientifiques français aux comités consultatifs de l'Esa qui établissent les priorités scientifiques sur les missions. La sélection des prochaines missions Earth Explorer (EE11 and EE12) permettra de mesurer l'impact de ces mesures. Mais le montant maximum alloué à une mission est faible et exclut de réaliser des missions innovantes et ambitieuses (ex : lidar).

Au niveau français, des décisions de missions bilatérales portées par une motivation géopolitique (**C<sup>3</sup>iel**) et soutenues par la communauté scientifique, ont continué.

### 3.3 IMPACT DU CADRE PROGRAMMATIQUE

Le groupe s'est intéressé à l'ensemble de la chaîne de développement de missions spatiales : proposition de mission, processus de décision, phases d'étude et de réalisation, et exploitation scientifique.

#### 3.3.1 DE LA SÉLECTION DES MISSIONS À LEUR DÉVELOPPEMENT

A l'Esa, les missions du programme scientifique obligatoire et du programme observation de la Terre sont sélectionnées suite à un appel d'offres auprès de la communauté scientifique. L'évaluation scientifique des propositions de missions est menée par des comités scientifiques mis en place

par l'Esa et l'évaluation technique et financière est faite par l'Esa. Le domaine de l'exploration dépasse le seul cadre scientifique et fait l'objet d'enjeux politiques, prescripteurs de projets spatiaux. Dans le cadre bilatéral, les missions peuvent être issues d'appels d'offres vers la communauté scientifique des agences partenaires (Nasa, Jaxa, ...) de propositions ou d'accords directs entre agences (Cnsa, ...) qui souhaitent coopérer, ou de décisions géopolitiques. Ces différents cadres doivent permettre de réaliser les missions spatiales répondant aux priorités scientifiques de la communauté.

Dans un contexte de ressources financières et humaines limitées, il convient de veiller à ce que les missions à motivation géopolitique, permettant à la diplomatie française de se déployer, ne se fassent pas au détriment de missions scientifiques prioritaires, et qu'elles contribuent au positionnement scientifique de la communauté. Elles devraient émerger d'une concordance entre volonté politique, intérêts scientifiques, compétences techniques et/ou sur l'analyse des données, et ressources humaines disponibles dans les laboratoires. Le groupe a noté la nécessité de concertation dès le montage de projets avec des dialogues renforcés entre les différents acteurs français (scientifiques, laboratoire, organismes, ministères) dans le cadre de l'agence de programmes et de comités inter-organismes dédiés.

Dans la phase de préparation des missions, le montage du consortium est un élément critique pour la suite du développement de la mission. Il est facilité dans un cadre bilatéral, qui permet une répartition plus simple des responsabilités au sein des consortia, et dans lequel le Cnes peut jouer un rôle fort. Il peut bénéficier d'un cadre politique de haut niveau, comme pour les missions **CFOSat** et **Svom** avec la Chine, ou **C³iel** avec Israël. Selon les coopérations, les différences culturelles et de fonctionnement des partenaires sont des dimensions structurantes à prendre en compte, dès le montage et tout au long de la coopération. Cela concerne la protection des technologies, la politique des données, l'anticipation des difficultés (besoin de composants sans règle spécifique d'exportation, mise en place de scellés, ...) et des surcoûts associés. Au sein d'un même pays, les partenaires et leurs liens institutionnels avec la France, peuvent différer selon les domaines. Ce ne sont par exemple pas les

mêmes interlocuteurs, ni les mêmes règles qui prévalent pour la mission **Svom**, pilotée par l'académie des sciences chinoise (Cas), la mission **CFOSat** et l'instrument **Dorn** sur l'atterrisseur lunaire avec l'agence spatiale chinoise (Cnsa), ou des expériences sur la station spatiale chinoise.

Les missions spatiales ont des temps de développement et d'exploitation qui nécessitent des engagements à long terme. La solidité du consortium et l'envergure d'une mission bilatérale sont fortement dépendantes de l'agence ou du pays partenaire, de sa fiabilité et de sa stabilité politique sur le long terme. Les conflits actuels (par exemple avec la Russie) ainsi que les tensions géopolitiques affectent directement les missions spatiales concernées.

Dans le domaine SUE, le cadre de l'Esa, par construction, permet une envergure scientifique des missions, une stabilité, une meilleure résilience aux aléas et une capacité à surmonter des difficultés majeures (par ex., l'abandon du lanceur Soyouz résolu avec le lancement de la mission **Euclid** par Space X). Dans le cadre de missions Esa, les consortia instrumentaux sont en revanche souvent complexes, avec des contributions morcelées de nombreux pays contributeurs qui génèrent des difficultés pour l'implémentation des projets et leur gestion, et augmentent les risques de surcoûts et de retards. Par exemple, un consortium tel que celui de la mission spatiale **Euclid** (Esa Cosmic Vision M2 avec contribution de la Nasa), réunit 17 pays, dont 15 européens. Agréger le plus grand nombre d'Etats par volonté politique ou pour aider au soutien de la mission peut devenir un point de faiblesse pour la réalisation de la mission, et une vigilance accrue doit être portée sur les sous-systèmes critiques pour la performance. Un constat important est que les moyens de restructuration, par le Cnes ou l'Esa, de consortia déjà formés sont très limités. Le montage initial du consortium par le PI dès la réponse à l'appel d'offres est donc déterminant et doit bénéficier de l'appui du Cnes en amont. Ce doit être un atout considérable pour les porteurs français. Les retours d'expérience de missions précédentes menés par le Cnes doivent être partagés pour consolider le montage de consortium et le choix adéquat des laboratoires partenaires internationaux (compétences et engagements financiers). La tenue de Comités Inter Organismes (CIO), dès la phase préparatoire et plus tôt que ce qui se fait

aujourd'hui, est indispensable pour préparer l'engagement dans une mission.

Le soutien financier et humain aux phases A est essentiel pour consolider le concept, la faisabilité et les coûts de la mission, mais également pour en limiter la durée. Selon le cadre de coopération et les domaines, des différences importantes sont observées sur la durée des phases A (phase d'étude) et le niveau de maturité technologique (TRL) demandé. Ainsi, la mission **Swot** (domaine EOT), en bilatérale Cnes/JPL, a mené une courte phase A avec une contractualisation dès la phase B, une exigence de TRL 5 à la revue de définition préliminaire, et non à l'adoption de la mission. L'industriel, choisi en phase A, a permis de se concentrer sur un seul design et de définir tôt les interfaces. A l'inverse, la mission **Athena** (Esa L2 Cosmic Vision) a dû mener 10 ans de phase A avec l'exigence de TRL 5 dès son adoption. En outre, le maintien de la concurrence industrielle en phase A par l'Esa a imposé un interfaceage avec deux industriels sur deux designs différents, et donc un surcoût de travail à la fois pour les équipes instrumentales et pour l'Esa.

En résumé, le succès des missions dépend d'un ensemble de facteurs déterminants, au cœur desquels se trouvent l'organisation des consortia, avec un partage clair des responsabilités en sous-systèmes cohérents et la minimisation des interfaces, la fiabilité et la plus-value des partenaires, et leur compétence sur ce dont ils ont la responsabilité. Les entretiens ont mis en avant, l'importance d'un binôme responsable scientifique (PI) / chef de projet solide, pour le bon déroulement du projet ; dans le cas de coopérations géopolitiques, dont le partenariat est souvent à construire, le projet bénéficie de leurs lectures croisées. D'un point de vue organisationnel, les nécessités de consolider la phase de montage, le découpage des responsabilités, l'identification des bonnes interfaces, ainsi que le renforcement des retours d'expérience de missions ont été fortement appuyés.

### 3.3.2 POLITIQUE DES DONNÉES ET EXPLOITATION SCIENTIFIQUES

Le groupe de travail rappelle l'enjeu essentiel de la politique des données pour le retour scientifique des missions spatiales qui doit être instruite en amont de l'engagement, notamment dans un cadre bilatéral. La politique de distribution des données

est très dépendante de la nature de la mission et du cadre de coopération et peut faire l'objet de nombreuses pressions. Dans le cadre de coopérations bilatérales, certains partenaires imposent un accès restreint aux données faisant l'objet d'un accord de partage au sein du consortium, avec une distribution au goutte à goutte limitant l'étendue des avancées scientifiques. A l'inverse, la Nasa rend ses données immédiatement publiques. En SU, la communauté scientifique souhaite maintenir un temps minimal (~ 1 an) avant de rendre publiques les données, en particulier pour garantir leur qualité scientifique. C'est généralement le cas dans les programmes de l'Esa.

Le groupe relève le besoin de données complémentaires sol (de calibration, validation, ou scientifiques) pour nombre de missions spatiales, qui peut nécessiter l'implication de nouveaux partenaires apportant l'accès à des infrastructures sol. Quand l'obtention de données sol est au cœur de la science de la mission, une vision complète sol/espace du projet et un suivi des données sont requis. A ce jour, c'est un point faible qui pose la question de l'implication des agences spatiales dans l'accès à ces données sol. La Nasa évolue dans ce sens, que ce soit en observation de la Terre en présentant un observatoire complété par une composante dite suborbitale, ou par le financement de temps de télescope sol pour l'astrophysique. Si l'Esa peut mettre en place des appels conjoints pour assurer la calibration ou la validation des données spatiales en observation de la Terre, elle n'offre aucun moyen en sciences de l'Univers. Au Cnes, des évolutions sont en cours en EOT avec le développement aval d'applications et d'accès à d'autres types de données, comme sur **Swot** avec la Nasa et le JPL, et sur les missions à venir telles que **Trishna** avec l'ISRO (Inde) et **AOS** avec la Nasa. Le soutien à de l'instrumentation sol pour la mission **Svom** marque une évolution en SUE.

La pleine exploitation des données de missions spatiales par la communauté scientifique est un enjeu majeur. La communauté française doit pouvoir obtenir un retour scientifique commensurable avec son investissement et se positionner au meilleur niveau international. Pour cela, il est nécessaire qu'elle puisse disposer de ressources et être compétitive. Au niveau français, l'ANR n'a pas de programme dédié à l'exploitation du spatial, qui est de

plus exclu des appels « blancs ». Des actions coordonnées Insu/Cnes ont été menées pour porter ces priorités dans le cadre de l'ANR et du programme cadre de l'Union Européenne, mais n'ont pas abouties.

En SUE, la Nasa alloue des moyens importants aux porteurs scientifiques ayant obtenu du temps d'observation sur les observatoires spatiaux leur permettant de disposer de ressources humaines pour l'exploitation de leurs données. Elle finance également l'exploitation par des scientifiques américains de données d'observatoires européens, comme **XMM-Newton**. A l'inverse, le programme scientifique obligatoire de l'Esa ne fournit aucun budget d'accompagnement à l'exploitation des données par les porteurs européens tandis que le programme cadre de l'Union Européenne ne dispose pas de programmes dédiés à l'exploitation scientifique de ces missions spatiales. L'essentiel du budget consacré au spatial est orienté vers les industriels. Il est clair que pour pouvoir mener l'exploitation des données pendant leur période propriétaire, il est nécessaire d'avoir un mécanisme d'accompagnement coordonné à l'obtention du temps d'observation. Un tel programme n'existe pas actuellement pour les sciences de l'Univers. Assurer le retour scientifique au niveau français est cependant une priorité majeure.

En EOT, le Cnes a contribué aux deux programmes

## 4. CONCLUSIONS

### 4.1 LE CADRE EUROPÉEN (ESA, UE, EUMETSAT)

Le cadre européen est un moyen privilégié de réaliser des missions ambitieuses et innovantes. Des points de vigilance relatifs à leur fonctionnement ont cependant été identifiés.

Les missions scientifiques doivent relever d'un processus transparent d'évaluation en vue de leur sélection, s'appuyant sur des comités scientifiques bénéficiant de garanties d'indépendance. Pour éviter des conflits d'intérêt, des comités ad hoc d'évaluation scientifique ont été mis en place par l'Esa en sus des structures de conseil existantes. La nomination et le fonctionnement de ces comités scientifiques se doivent de répondre aux exigences

d'accompagnement de l'Esa pour l'exploitation des données : « Climate Space », suite du « Climate Change Initiative », sur l'exploitation des longues séries de données climatiques, et le nouveau programme « Sentinel User Preparation » pour préparer les futures missions Sentinel du programme Copernicus, dont les appels d'offre viennent d'être publiés. Cependant la participation française au programme Climate Space a été faible et deux points ont été identifiés lors des précédentes perspectives pour y remédier : le besoin d'une information centralisée par le Cnes sur les appels d'offres ouverts à la communauté et la nécessité d'un accompagnement au montage de consortium. Le groupe de travail confirme le besoin pour les porteurs d'être accompagnés par leur organisme de tutelle sur le montage administratif de la réponse à l'appel d'offre Esa, comme cela est fait pour les programmes européens. La lourdeur administrative liée au reporting (fréquence, nombre et niveau de rapports techniques) constitue un frein au travail des scientifiques et au fonctionnement du projet. Alors que les partenaires européens s'appuient sur des ressources dédiées au sein des universités et de leurs organismes pour les réaliser et se positionner en porteur, la France est en difficulté pour porter ces consortia. Une concertation et une coordination inter-organismes dans le cadre de la nouvelle Agence de programme pour le spatial, portée par le Cnes, apparaît nécessaire pour définir et mettre en place ce soutien aux porteurs.

de transparence, ainsi que les procédures d'évaluations de faisabilité et de coût qui sont menées par l'Esa. En amont des comités de programmes, le Space Science Advisory Committee (SSAC) et le Advisory committee for Earth observation (Aceo), qui émettent les recommandations respectivement au SPC et au PB-EO, ont un rôle primordial pour garantir la place de la science. La mise en place de sessions fermées (membres non-ESA et secrétaire exécutif) apparaît donc comme un élément important d'indépendance de ces comités. Leur composition doit être publique et accessible à tous.

Inhérents à la construction européenne, les consortia instrumentaux et segment sol sont souvent complexes, avec des contributions dispersées, amenant à des difficultés parfois majeures dans le

développement des projets (défaillance, surcoûts et délais). La capacité d'intervention des agences sur l'organisation de consortia constitués est très limitée. L'effort doit donc être mis dès la phase de montage sur un dialogue et un accompagnement renforcé du Cnes vers les porteurs scientifiques français, s'appuyant sur des retours d'expériences partagés de missions précédentes (optimisation des montages, fiabilité des partenaires, compétence des laboratoires...)

La réalisation du programme scientifique obligatoire est mise en danger par sa grande perte de pouvoir d'achat. Il requiert des moyens dimensionnés pour mener à bien l'ambition européenne, à laquelle participe activement la France par sa contribution aux grandes missions du programme Cosmic Vision, **Lisa** et **Athena**. En EOT, une augmentation du budget Esa Earth Explorer est fortement recommandée par l'Aceo pour la réalisation de missions innovantes.

L'exploitation des données est un enjeu majeur. Dans le domaine SUE, il n'existe aucun support de l'Esa ou de programmes de l'UE pour l'exploitation des données de missions spatiales. Si en EOT, des programmes dédiés existent, un soutien organisationnel et administratif aux porteurs français manque pour l'accompagnement dans le montage du consortium, la réponse aux appels d'offres et le management du projet très lourd en matière de rapports et de suivi des différentes composantes, qui apparaît comme un frein important.

### 4.2 LE CADRE BILATERAL (ET MULTILATÉRAL)

Les coopérations bilatérales apportent des opportunités majeures complémentaires à celles du cadre européen. Elles offrent une visibilité forte pour le Cnes et la communauté, ainsi qu'un rayonnement diplomatique de la France a fortiori. Ces missions sont généralement de moindre envergure que celles réalisées dans un cadre européen, mais cela dépend en grande partie du partenaire, les coopérations avec la Nasa permettant de contribuer à des missions très ambitieuses. Les missions **JWST** et **Swot** portées par la Nasa en sont d'excellents exemples. Des coopérations avec la Chine ont également permis de réaliser les missions **CFOSat** et **Svom**. Dans un cadre bilatéral, l'organisation des

consortia est simplifiée par la réduction du nombre d'interlocuteurs. Cependant, ces missions peuvent engendrer des risques liés notamment à la fiabilité et aux contraintes propres au pays ou au partenaire (propriété intellectuelle, politique des données, stabilité politique...). En particulier dans le cas de missions qui servent les intérêts diplomatiques, souvent non issues de propositions de la communauté scientifique, les engagements se décident parfois rapidement avec les risques associés : fiabilité du nouveau partenaire, manque d'un fort soutien scientifique, faible instruction du concept de mission (maturité, coût), moindre connaissance du partenaire et de ses règles, manque de connaissance des coopérations françaises existantes.

### 4.3 QUEL CADRE POUR LES MISSIONS INTERNATIONALES DE DEMAIN ?

Il n'y a pas un cadre unique qui permette de répondre à l'ensemble des priorités scientifiques. De plus, la stratégie française spatiale se déploie dans un contexte de positionnement de la France au sein de l'Europe, de partenariats stratégiques avec les pays partenaires et d'enjeux géopolitiques. Dans un écosystème évolutif et multi-paramètres de coopérations internationales, l'équilibre à trouver requiert de placer la science au cœur du dispositif. La communauté scientifique et le Cnes doivent se saisir des différents cadres pour répondre au mieux aux priorités scientifiques de la communauté et aux opportunités qui permettent de préparer le futur, et réaliser les missions de façon fiable, dans un budget et des délais contrôlés.

Le cadre européen (Esa, Union Européenne, Eumetsat) est incontournable pour répondre à cette ambition. C'est un cadre solide et stable sur lequel la communauté doit continuer de s'appuyer. Le cadre bilatéral permet des coopérations structurantes avec les grandes agences partenaires sur des missions complémentaires en termes d'objectifs et d'envergures, la Nasa étant l'un des partenaires clés. Il se complète de missions d'opportunités avec de nouveaux partenaires. La place de la science dans ces choix questionne et génère parfois des inquiétudes liées aux motivations orientées vers les applications et l'industrie, ainsi qu'à l'impact croissant des crises géopolitiques sur la coopération scientifique (arrêt de la participation de la Russie à **Exo-mars**).

Nos recommandations visent à optimiser le positionnement français pour mieux répondre aux priorités scientifiques, et pour assurer la fiabilité des réalisations dans un contexte contraint. Elles ont en commun de renforcer le positionnement de la science dans le cadre de coopérations eu-

## 5. RECOMMANDATIONS

### 5.1 R1 : DIMENSIONNER LES MOYENS DES GRANDS PROGRAMMES SCIENTIFIQUES DE L'ESA À LEUR AMBITION

Pour mener à bien l'ambition européenne en sciences de l'Univers et en étude et observation de la Terre, à laquelle participe fortement la France notamment par sa contribution aux grandes missions du programme Cosmic Vision, à Future Earth Observation (Future EO) et à la préparation de Voyage 2050, il est nécessaire de réviser significativement le budget des programmes scientifiques et d'explorer les moyens d'y inclure un support à l'exploitation des données.

R1a : Œuvrer à une augmentation significative du budget du programme scientifique obligatoire de l'Esa à la prochaine ministérielle ;

R1b : Maintenir à un niveau compétitif la contribution française aux programmes Future Earth Observation et Scout.

### 5.2 R2 : RENFORCER L'ACCOMPAGNEMENT DE L'EXPLOITATION DES DONNÉES DES MISSIONS EN COOPÉRATION

Facteur clé de la compétitivité scientifique internationale de la France, le soutien à l'exploitation est un enjeu majeur. Elle requiert des actions d'information, d'accompagnement des demandes de financement (e.g., Esa), de soutien financier dédié et un lobbying renforcé vers l'Europe.

R2a : Dimensionner les budgets d'accompagnement scientifique en sciences de l'Univers au Cnes afin qu'ils puissent permettre de soutenir l'exploitation des données spatiales ;

R2b : Œuvrer pour que les programmes cadres de

ropéennes et internationales à chaque étape de la mission, en améliorant l'anticipation, la transparence des processus, la communication entre acteurs, la mise en place des coopérations et leur organisation, de la conception du projet jusqu'à l'exploitation des données.

l'union européenne intègrent des appels d'offre dédiés à l'exploitation des données spatiales scientifiques :

- Concertation inter-organismes pilotée par le Cnes, responsable de l'agence de programme en charge du spatial, et avec les ministères concernés (dont le SGAE - Secrétariat général des affaires européennes).

R2c : Soutenir le montage de consortia pour l'exploitation des données spatiales :

- Mise en place de comités inter-organismes amont pour le montage de consortia sur l'exploitation des données spatiales quand le niveau d'engagement français le justifie ;
- Soutien spécifique aux porteurs par leur organisme de tutelle (comme c'est le cas pour les appels d'offre de l'Union Européenne) pour répondre aux appels d'offre de l'Esa en étude et observation de la Terre (EOT) sur l'exploitation des données.

R2d : Informer sur les sources de financement existantes :

- Centralisation et mise à disposition par le Cnes des informations relatives aux programmes ouverts à la communauté scientifique, en support à l'exploitation des données spatiales de programmes bilatéraux ou internationaux (Esa, UE, accords bilatéraux...).

### 5.3 R3 : CONSOLIDER LES MONTAGES DE PROJETS

Les différents entretiens soulignent le besoin d'optimiser la préparation des coopérations, du stade initial de la réflexion au montage de la mission. Il en découle le besoin d'identifier en amont les coopérations et les compétences liées au spatial, en particulier celles de pays pouvant faire l'objet d'opportunités géopolitiques, pour préparer la décision de coopération et se positionner au mieux dans un

cadre qui évolue. La phase de montage est fondamentale, une définition claire et cohérente des responsabilités en est un des éléments clés.

R3a : Anticiper et préparer en amont les montages de coopération :

- Coopérations et compétences existantes : élaborer avec les laboratoires une cartographie des coopérations existantes, scientifiques et techniques, de la communauté française avec des partenaires internationaux et leurs compétences respectives liées au spatial ;
- Montage de consortium : le Cnes sensibilise et forme en amont la communauté scientifique en établissant un guide des bonnes pratiques issus de retours d'expérience partagés entre le Cnes, les directeurs de laboratoire et la communauté scientifique ; les porteurs informent les responsables de programmes du Cnes dès l'émergence du projet (ainsi que leur directeur de laboratoire), et le Cnes les accompagne dans le montage du consortium et met en place des comités inter-organismes amont pour le montage des consortiums.

R3b : S'assurer que les critères essentiels à une coopération sont satisfaits avant de s'engager :

- La nature et le niveau d'engagement du partenaire sont compatibles avec sa stabilité prévisible sur la durée (exploitation incluse) de la mission ;
- La contribution du partenaire porte sur des éléments maîtrisés, ou non critiques pour la mission, avec un partage clair des responsabilités en sous-systèmes cohérents au sein du support juridique ;
- Il y a accord sur la politique de données ;
- Le partenaire a un niveau de fin de phase A lors de l'engagement du projet ;
- Le niveau disponible de ressources (humain, financier, plateformes) est commensurable avec les besoins.

### 5.4 R4 : S'ASSURER DE LA TRANSPARENCE DES PROCESSUS DE SÉLECTION DES MISSIONS

R4 : Il est demandé au Cnes de veiller à la transparence des processus de sélection des missions spatiales scientifiques en œuvrant :

- A rendre publique, et facilement accessible à tous, la composition des comités scientifiques et de programme (Cnes, Esa, Eumetsat) ;
- A la mise en place de sessions fermées dans les comités scientifiques des structures de conseil (Cnes, Esa, Eumetsat) quand ce n'est pas le cas ;
- Pour une présence française adéquate dans ces comités scientifiques (dont ad hoc de l'Esa).

### 5.5 R5 : RENFORCER LE DIALOGUE ENTRE LES ACTEURS IMPLIQUÉS

La communauté scientifique, les laboratoires, le Cnes et les organismes œuvrent dans un intérêt commun de la science mais le manque de connaissance partagée des priorités ou des intérêts respectifs peut constituer un frein. Les entretiens et les échanges au sein du groupe ont montré la nécessité d'une compréhension mutuelle des enjeux. Un dialogue renforcé du Cnes avec les organismes de recherche sur ces sujets permettra également d'identifier les coopérations les plus prometteuses.

R5 : Assurer le bon niveau de partage de connaissance entre les différents acteurs de la stratégie scientifique spatiale (Cnes, communauté scientifique et organismes de recherche, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche) :

- Participation des présidents des comités scientifiques Tosca et Ceres à la préparation de la position française aux principaux programmes (pour l'Esa, le SPC, PB-EO, PB-HME, PB-SSA) ;
- Participation et présentation régulière d'acteurs de la coopération internationale et de la stratégie du Cnes au Tosca, au Ceres et au CPS ;
- Présentations des stratégies internationales du Cnes et des organismes lors de comités inter-organismes de haut niveau, dans le cadre du rôle d'agence de programme sur le spatial du Cnes,

## GRUPE SPÉCIFIQUE

# SCIENCE ET NEW SPACE

Céline Angelelis, Florence Ardellier, Laure Brooker, Véronique de la Casa (co-animatrice), Loic Chanvillard, Yann Chemin, Marjolaine Chiriaco, Laurent Escarrat, Thomas Ferrero, David Fraboulet, Pierre-Luc Georgy, Louis Gouyon-Matignon, Thomas Hiriart, Tania Lasisz, Benoit Lépine, Sébastien Lombard, Antoine Mangin, Stanislas Maximin, Mustapha Meftah, Antoine Miniussi (co-animateur), Jean-louis Monin, Adrew Nutter, Olivier Queyruet, Thierry Sequies, Nafissa Sfaksi, Stéphanie Villaret et Paul Wohrer

## 1. MÉTHODOLOGIE

Le groupe spécifique "Science et new space" est constitué de 19 acteurs reflétant la diversité de ce sujet : laboratoires technologiques et scientifiques, universités, entreprises (startups, PME, grands groupes), mais également des financeurs, pôles de compétitivité et think-tank. Ce panel a appuyé sa réflexion sur ses propres connaissances de ce domaine, sur un questionnaire en 10 parties largement diffusé auprès de la communauté, ainsi que sur plusieurs interviews. L'analyse a été conduite en prenant en compte des perspectives scientifiques et industrielles, tout en intégrant des aspects des sciences humaines et sociales, des enjeux stratégiques, ainsi que des questions liées au financement. Les membres des groupes thématiques CERES et TOSCA ont été impliqués dans cette étude.

En tout, plus de 50 personnes ont contribué à cette réflexion, dont 51% de personnes issues de la communauté scientifique, 43% d'industriels et 6% liées au financement. La répartition entre les genres est représentative de l'industrie du spatial (d'après le GIFAS en 2022) avec 77% d'hommes et 23% de femmes.

Plusieurs publications scientifiques et rapports ont également nourri cette réflexion, tels que : "Ambition new space 2027" issu des Assises du new space de 2022, « Grandes Constellations de Satellites : Enjeux et Impacts » (mars 2024) de l'Académie des Sciences, rapport du GT recherche et transfert du COSPACE et bien sur le rapport sur le new space du SPS 2019

## 2. CONTEXTE ET ÉTAT DES LIEUX

### 2.1 DÉFINITIONS

#### 2.1.1 SCIENCE

Dans le contexte new space, la définition la plus large de la science s'applique : sciences naturelles, humaines et sociales par le traitement et l'analyse de données, sciences instrumentales et applicatives ou encore le développement de technologies ou briques technologiques qui permettraient d'atteindre un objectif scientifique.

Plus généralement, il est admis que la science a vocation à être portée par les entités publiques (Cnes, CNRS, universités, ...), poursuit des objectifs de développement et partage des connaissances (via les publications scientifiques) et n'est par principe pas soumise à une exigence de rentabilité financière. Néanmoins, la science a également vocation à nourrir le développement de nouvelles technologies, procédés, méthodes et autres, qui peuvent trouver une utilisation dans tous les domaines industriels, dont celui du new space.

#### 2.1.2 NEW SPACE

Le new space n'a pas une seule définition communément admise car ce terme est utilisé pour décrire l'évolution récente de l'industrie spatiale.

Les Assises du new space de 2022 ont fourni la définition suivante : "Le NewSpace désigne un nouvel écosystème industriel et plus généralement, une nouvelle façon d'aborder et de conduire l'activité spatiale, liés à l'apparition d'une nouvelle génération d'entreprises aux côtés d'acteurs en place et notamment marqués par l'utilisation de technologies de rupture ou de process innovants, l'introduction de modèles d'affaires fondés sur une plus forte acceptation des risques, le redéploiement de la chaîne de valeur des activités spatiales vers des marchés liés à la commercialisation de services."

Il faut souligner que l'industrie du new space a un objectif avant tout lié à la rentabilité financière. Elle se nourrit des avancées technologiques permises par la science, d'autant plus dans le domaine spatial où de fortes interactions existent entre ces deux domaines.

Nous proposons donc en complément d'utiliser les

réponses au questionnaire concernant les caractéristiques du new space, représentées dans leur ordre d'importance par le nuage de mots (Fig. 1). Cette liste donne ainsi une représentation du new space par les utilisateurs.



Fig 1. Nuage de mots issu des réponses au questionnaire concernant la définition du new space

#### 2.1.3 SCIENCE ET NEW SPACE

Bien qu'aux objectifs initiaux différents, la science et le new space se retrouvent dans de nombreuses applications telles que le développement de nouvelles technologies, la démonstration en orbite et l'acquisition de données spatiales. Les réflexions de ce groupe spécifique se situent donc à l'intersection de ces deux domaines et visent à représenter la complémentarité de la science et de l'industrie.

### 2.2 CONTEXTE INTERNATIONAL

#### 2.2.1 EVOLUTION DES MISSIONS NEW SPACE SCIENTIFIQUE

Depuis son avènement au début des années 2000, le new space scientifique s'est largement développé, passant d'un cadre universitaire (cubesat étudiant) à un domaine technologique à part entière portant des missions scientifiques complètes. Cette dynamique est portée entre autres par un accès à l'espace diversifié (piggyback, déploiement par bus spatiaux, plateformes satellites partagées) et peu cher (\$1500/kg en orbite basse pour le lanceur lourd Falcon Heavy en 2024) ainsi que la multiplication d'offres de composants et instruments sur étagère (COTS).

Le domaine du new space scientifique a connu une forte expansion depuis 20 ans que l'on peut mesurer par l'évolution du nombre de nanosats lancés à objectif éducatif ou scientifique (uni-

versités, instituts, agences) passé de quelques-uns à plusieurs centaines par an (Fig. 2). Les États-Unis dominant en opérant plus de 50% de ces missions. On retrouve cette tendance au travers du nombre de publications scientifiques révisées par des pairs qui contiennent les termes « cubesat » ou « new space » (Fig. 2).

Ces nouveaux moyens mis à disposition par le new space ont permis de valider de nouvelles technologies spatiales à moindre coût. Plus récemment, ils ont permis la réalisation de missions scientifiques dédiées hors validation technologique. On peut citer les missions réussies ASTERIA qui a réalisé la première détection d'exoplanète par un cubesat en 2017, EcAMSat qui a étudié les effets d'un antibiotique contre e-coli ou encore MarCO en 2018 qui signe le premier cubesat interplanétaire. Plus d'une trentaine de missions scientifiques hors validation de technologie sont en cours de développement par la Nasa. **Les améliorations (miniaturisation, basse consommation, résistance aux radiations...) des instruments new space dans la prochaine décennie accentueront l'intérêt de dédier des missions new space à des objectifs scientifiques.**

Enfin, ces nouveaux moyens permettent l'essor de constellations d'observation de la Terre fournissant des images vendues au km<sup>2</sup> pour quelques dollars. Ces missions, généralement portées et opérées par des entreprises privées telles que Planet Labs aux États-Unis **fournissent des données suffisamment précises pour certaines études de la Terre et leurs temps de revisite en font d'excellentes données complémentaires aux missions spatiales de grande ampleur.** Elles sont utilisées pour de nombreux champs de recherche dont l'urbanisme, l'impact climatique ou la déforestation.

En Europe, l'Esa et la Commission Européenne sont fortement impliquées dans cette démarche avec de nombreux appels à projet, programmes et autres financements vers la recherche et l'industrie new space. Le programme scientifique européen Copernicus pour l'observation de la Terre inclut même depuis 2023 des données issues d'entreprise new space pour compléter certains jeux de données.

## 2.2.2 ORGANISATION DU SOUTIEN ÉTATIQUE : EXEMPLES ÉTRANGERS

Afin d'accompagner cette démarche new space, plusieurs acteurs se sont organisés afin de canaliser les nombreuses initiatives et soutenir les acteurs privés et publics du new space.

Des agences scientifiques spatiales, telles que le DLR et la Nasa, ont organisé une partie de leurs activités autour des *smallsats* (femto to mini) via des instituts et des initiatives. Elles permettent de fédérer les acteurs, fournir des informations techniques, aider aux échanges et à la communication, lister les financements etc...

Certaines sont aussi **porteuses de financements avec des appels d'offres pour le développement de technologies et missions spatiales, des démonstrations et validations d'instruments en orbite (IOD/IOV) ou encore des places réservées sur certains lancements.**

Le DLR finance ainsi, au travers de plusieurs compétitions, plus d'une vingtaine de lancements de satellites et missions complètes pour charges utiles (plateforme + lancement). Ce financement permet également de financer le développement des lanceurs de l'entreprise allemande ISAR Aerospace.

La Nasa s'est dotée depuis les années 2010 d'un *Smallsat Institute* qui regroupe toutes ces initiatives (accompagnement, financement) et utilise ses capacités (télécommunication, expertise) pour accompagner industrie et recherche publique new space aux États-Unis.

Ces démarches innovantes, associant acteurs scientifiques et industriels, **fédèrent autour de grands projets financés et opèrent la stratégie scientifique du pays dans un contexte où le spatial est de plus en plus une industrie et de moins en moins un domaine de recherche.** Elles permettent ainsi d'accompagner les acteurs privés et publics dans des développements technologiques conjoints qui serviront aux missions scientifiques de demain.

## 2.3 CONTEXTE NATIONAL

Le séminaire de prospective scientifique de 2019 traitait déjà du sujet du new space et le groupe spécifique associé a émis six recommandations. Celles-ci n'ont globalement pas été suivies d'effets

concrets. Il s'agit donc pour l'édition 2024 de fournir des recommandations plus ciblées et d'en réaliser le suivi.

### 2.3.1 LABORATOIRES ET UNIVERSITÉS

Les laboratoires et universités suivant sont reconnus dans le milieu du new space scientifique :

- **Centres de recherche** : APC, IAP, IPGP, IRAP, LAM, LATMOS, LERMA, LESIA, LISA, LP-ENS, OBSPM, ONERA, ...
- **Universités** : Grenoble, Paris Cité, PSL, Sorbonne, Toulouse Paul Sabatier, UPEC,...

On peut noter la création de la Fédération nanosat CNRS/INSU dans un premier temps rattachée à l'Île-de-France mais qui a vocation à s'élargir au territoire national à partir de 2025. Enfin, les universités organisent leurs activités spatiales généralement autour de "centres spatiaux".

Ces laboratoires et universités collaborent généralement entre elles ainsi qu'avec les Centres Spatiaux Universitaires (CSU) et de nombreuses entreprises. Ensemble, ils développent des briques technologiques, des instruments et des missions complètes.

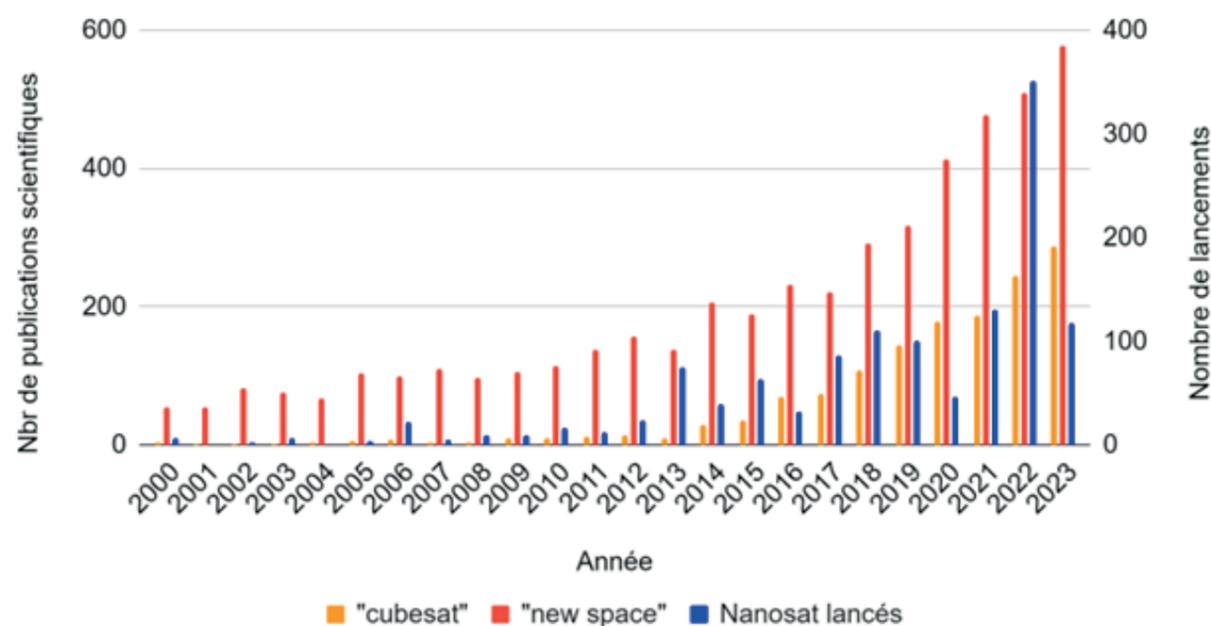
Plusieurs programmes (AMI "Compétences et Métiers d'Avenir", programmes de financement régionaux) ainsi que les appels d'offres ou propositions de financement incitent aux échanges et à la création de consortiums entre laboratoires, universités et industriels.

Ce maillage permet une vaste offre de formations à destination de tous niveaux pour les jeunes et les adultes, mais également des stages ou encore des thèses. **La présence du new space dans les médias et les offres de formation associées attirent les jeunes vers le domaine du spatial qui une fois formés rejoignent les laboratoires, les industries ou créent leurs entreprises.**

### 2.3.2 LES CENTRES SPATIAUX UNIVERSITAIRES (CSU)

Une dizaine de CSU ont été créés depuis le milieu des années 2010. Chacun regroupe généralement plusieurs établissements d'enseignement supérieur, des laboratoires et des industriels. La raison d'être de ces CSU est la formation d'étudiants à la conception et réalisation de mission spatiale, géné-

## Evolution du new space entre 2000 et 2023



**Fig. 2.** Comparaison du nombre de publications scientifiques incluant les mots « cubesat » (orange) et « new space » (rouge) (axe de gauche) et nombre de lancements de nanosats issus d'universités, laboratoires et agences spatiales (bleu, source : nanosats database), entre 2000 et 2023.

ralement portée par un objectif scientifique définis par les scientifiques associés.

On peut lister ici les principaux : Toulouse (CSUT), Grenoble (CSUG), Montpellier (CSUM), Polytechnique (CSEP), Bordeaux (NAASC), CSU Côte d'Azur, Paris-Sorbonne (CurieSat), Paris-Est (CS-UPEC).

Chaque CSU forme entre 50 et 100 étudiants par an au travers de programmes pédagogiques et de projets autour d'une ou plusieurs missions cubesats. **Les retours sont globalement excellents avec des étudiants fortement impliqués dans les projets et rapidement embauchés par les industriels (principalement) et les laboratoires.**

Le Cnes accompagne les projets spatiaux étudiants et les CSU depuis 2012 au travers du programme Nanolab Academy (anciennement Janus). La nouvelle version de ce programme procure un soutien au travers de la fourniture de 2 plateformes (EM + FM, matériel et logiciel) assorti d'un support technique, d'une participation au lancement et d'un support aux opérations (bande-S) pendant 1 an. Cinq missions ont été lancées et dix projets sont actuellement accompagnés, basés sur la même plateforme « SEED » 3U développée par Nanolab Academy.

**Il est important de souligner que les missions portées par les CSU ont avant tout une vocation pédagogique, bien qu'embarquant généralement des instruments scientifiques ou des technologies à valider.** Le retour scientifique a été jusqu'à présent faible avec une importante proportion de dysfonctionnements techniques mettant fin aux missions.

**Les CSU ne sont pas adaptés pour s'engager dans des programmes de développement ou de production industrielle.** Néanmoins, le CSUG et le CSUM ont démontré que ce fonctionnement était également possible en s'associant avec de nombreux industriels jusqu'à répondre à des appels d'offres ou bien contractualiser certains de leurs services.

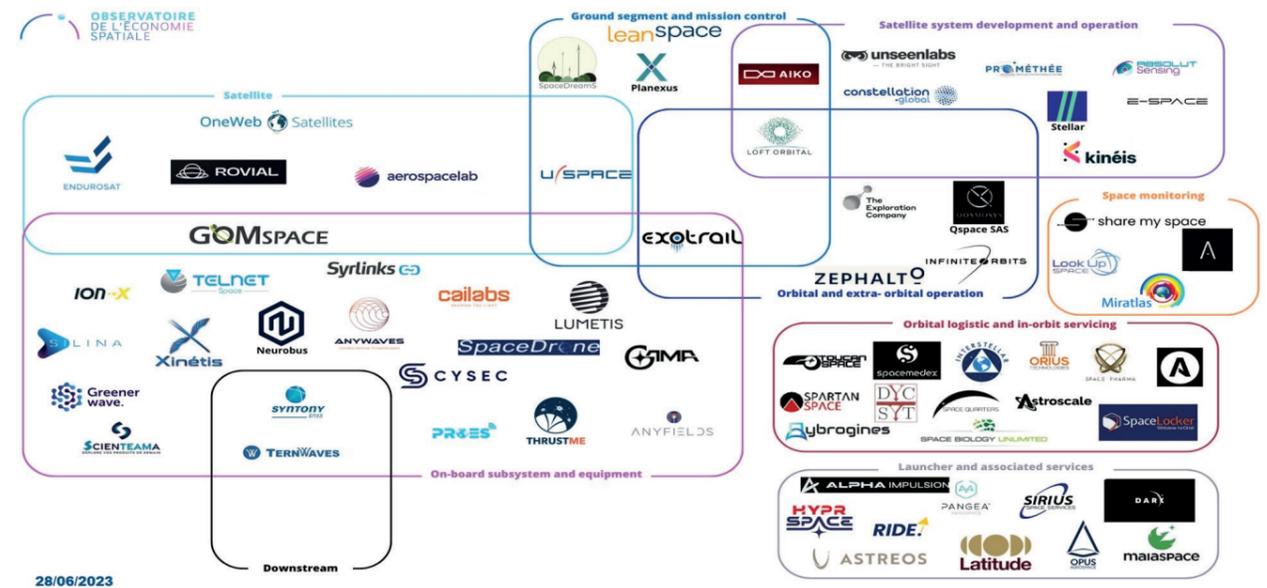
Les budgets annuels (hors salaires) des CSU vont de 100k€ à 400k€ suivant leurs activités. Ce chiffre est stable ou en croissance. Néanmoins, la dynamique repose généralement sur un faible nombre de personnes dans chaque établissement et peut être sujette à de rapides changements en cas de départ.

### 2.3.3 CARTOGRAPHIE DU NEW SPACE INDUSTRIEL FRANÇAIS

Les nouveaux entrants français dans le spatial sont nombreux comme le montre les infographies (Fig. 4) produites en 2023 par l'observatoire de l'économie spatiale rattaché au Cnes. Cette étude liste environ 140 entreprises réparties entre l'amont (plateformistes, équipementiers, lanceurs, ...) et l'aval (données traitées pour la gestion territoriale, l'environnement, l'intelligence, ...). Cette cartographie ne prend pas en compte les activités new space des grands groupes du spatial.

Toujours d'après cette étude, les fonds privés levés en 2022 totalisent un montant de 351 M€ capté à 40% par les services aval d'intelligence, 27% par les services amont de plateformistes et équipementiers et enfin 16% par les opérateurs de systèmes satellitaires. Le reste est dirigé vers les autres segments listés en Fig. 4.

### Nouveaux entrants : Amont (Upstream)



### Nouveaux entrants : Aval (Downstream)

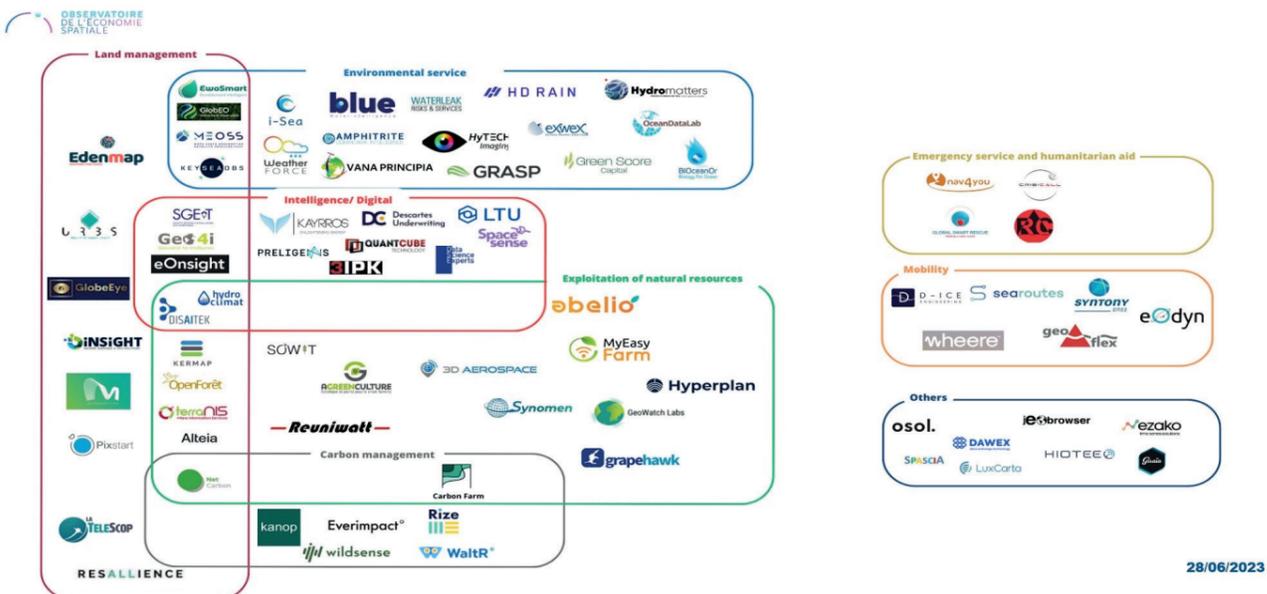


Fig. 3. Panorama des entreprises new space françaises regroupées par thème technique. Source : observatoire de l'économie spatiale.

### 2.3.4 FINANCEMENTS ET INITIATIVES POUR LE NEW SPACE

Autrefois réservés aux laboratoires scientifiques et aux grands groupes industriels, les financements dans le domaine de la recherche spatiale se sont diversifiés afin d'également soutenir les entreprises du new space. Celles-ci peuvent désormais bénéficier de subventions principalement destinées au développement technologique, favorisant ainsi des collaborations potentielles avec des laboratoires de recherche.

En France, on observe une **forte augmentation des financements publics vers le secteur du new space.** De quelques dizaines de millions d'euros par an au début des années 2010, le budget annuel est passé à environ 300 M€ dès 2021 avec le plan de relance *France Relance*, puis *France 2030* à partir de 2023. Ce mécanisme intègre plusieurs volets dont du soutien à l'innovation et du financement de la recherche. Il faut néanmoins souligner que ces crédits, rattachés au Secrétariat général pour l'In-

vestissement (SGPI) et dont les engagements sont co-pilotés par la DGE, la DGRI et la DGA, sont fléchés pour 2/3 de l'enveloppe vers les acteurs émergents. Si un objectif de 10% des financements du volet spatial de *France 2030* vise à bénéficier aux laboratoires dans le cadre de projets collaboratifs avec les industriels, à ce jour **seuls environ 1.5% de l'enveloppe a effectivement financé des laboratoires de recherche.**

Cette forte augmentation du financement public des entreprises du new space permet de quasiment égaliser les levées de fonds privées (351 M€ en 2022), pour un total de 650 M€. À titre de comparaison, le budget du Cnes après retrait de la contribution à l'ESA était de 1 382 M€ en 2022, servant à cofinancer la majeure partie des activités spatiales scientifiques françaises. Ainsi, le conséquent financement combiné du privé et du public vers les entreprises souligne la profonde modification de l'utilisation de l'espace. Fut un temps dominé par des usages publics (scientifique et militaire), **l'espace poussé par le new space est aujourd'hui associé à un marché privé** nécessitant un besoin de rentabilité, loin du modèle de la recherche publique française.

Ce profond changement nécessite de **repenser la manière dont les laboratoires de recherche spatiale conçoivent les missions scientifiques, interagissent avec les fournisseurs ou encore embauchent les ingénieurs captés par le privé.**

Côté entreprise, malgré le fléchage clair des financements publics (français ou européen) vers ce domaine, **plusieurs problèmes sont relevés pour les petites entreprises** : ressources humaines et compétences administratives insuffisantes pour répondre aux appels parfois très complexes, financements dépendant parfois du capital souvent très faible au démarrage, cofinancement nécessaire afin d'accéder au fond.

Ces financements, fortement orientés vers le privé, et complétés par les financements privés (levées de fonds, prêts bancaires...) **favorisent néanmoins l'émergence d'activités spatiales scientifiques grâce aux nouveaux produits et services générés.** Les missions scientifiques peuvent alors profiter de ces moyens : lancements à faible coût, composants sur étagères, segment sol, etc.

La table suivante liste par ordre alphabétique les

financements vers les universités, laboratoires et industriels :

Financements	Pour qui ?
AMI Compétences et Métiers d'Avenir	Universités
Cnes (R&T, APR)	Industriels, laboratoires
CNRS (ANR)	Laboratoires
Commission européenne (EIC, Horizon Europe)	Industriels, laboratoires
Esa - (OSIP, Scout, Cassini, Incubed, ARTES...)	Industriels, laboratoires
France2030	Industriels
Nanolab Academy (Cnes)	Universités, grandes écoles
Privé (investissement, banque...)	Industriels
Régions, départements, communautés d'agglomération, ...	Tous

Ces financements sont complétés par plusieurs initiatives privées et publiques afin d'aider les acteurs du new space à être incubés, trouver des financements, des partenaires, du soutien administratif, etc. La table suivante liste par ordre alphabétique les principales :

Initiatives	Pour qui ?
Accélérateurs (TechTheMoon, BLAST)	Industriels
BPI	Industriels
Connect by Cnes	Industriels, Laboratoires
COSPACE	Industriels, Laboratoires
CSU	Universités
Fédération nanosat CNRS/INSU	Laboratoires
IRT	Industriels, Laboratoires
Nanolab Academy	Universités, Laboratoires
SATT	Industriels, Laboratoires

## 3. LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE S'APPUYANT SUR L'INDUSTRIE NEW SPACE

### 3.1 LES DIFFÉRENTES DÉMARCHES

Les laboratoires s'appuient sur les industriels depuis de nombreuses années afin de s'approvisionner en instruments, satellites, services etc... Le new space scientifique est la continuité et la facilitation de ce fonctionnement.

Lors de cette étude, nous avons noté plusieurs manières dont les laboratoires se sont appropriés le new space :

**1. Développement d'un instrument scientifique adapté aux plateformes new space** (COTS, standard cubesat...). Celui-ci peut s'intégrer facilement aux plateformes cubesat et parfois aboutir à un produit commercialisable via un partenariat ou une spin-off. Ce cas est le plus commun mais le développement est généralement bloqué par le manque de financement de la plateforme, du lancement et des opérations. Le new space facilite la démonstration en orbite.

**2. Utilisation des données spatiales issues d'entreprises new space**, généralement pour de l'observation de la Terre (visible, IR, SAR, ...), dans un but de recherche. Ces données viennent généralement en compléter d'autres issues de plus grandes missions scientifiques et données in situ.

Ce cas est encore rare en France pour plusieurs raisons : 1) les scientifiques ne sont pas familiers de cette démarche, 2) l'achat de données est peu centralisé et doit donc se faire par chaque laboratoire, 3) peu d'acteurs nationaux ou européens proposent ces services et enfin 4) l'analyse des données produites (qualité, fréquence) doit être poursuivie afin d'estimer leurs qualités et ainsi leurs utilisations suivant les domaines scientifiques.

**3. Développement d'une mission scientifique complète** (instruments, plateforme et opérations) réalisée par le laboratoire.

Ce cas est peu commun et reste complexe car il s'agit de maîtriser l'ensemble de la chaîne d'une mission spatiale qui implique également un pur travail d'ingénierie qui pourrait être dé-

légué. Néanmoins, il faut noter le succès de cette démarche au travers des missions INSPIRE-Sat portées par le LATMOS.

### 4. Commande auprès d'un industriel pour la fourniture d'une mission scientifique clé en main (jusqu'aux données)

Cette démarche est encore très marginale car les industriels sont plus souvent utilisés par les agences spatiales et les scientifiques pour les fonctions supports (plateforme, lanceur). Néanmoins, compte tenu de la multiplication des entreprises offrant un service de données satellitaires, il est possible que ce type de commande soit de plus en plus fréquent. L'entreprise anglaise Blue Skies Space se positionne sur ce segment en proposant des missions scientifiques pour l'analyse des exoplanètes ou l'étude d'étoiles proches.

Par ailleurs, il faut noter le rôle des entreprises qui offrent un service de support aux missions scientifiques spatiales (lancement, télécommunication, segment sol, plateforme, ...). Bien que cette démarche n'amène pas directement à la réalisation d'une mission spatiale, elle n'en reste pas moins nécessaire. Ce segment n'est pas pris en compte dans l'étude statistique qui suit.

### 3.2 ETUDE STATISTIQUE DES MISSIONS SCIENTIFIQUES FRANÇAISES S'APPUYANT SUR NEW SPACE

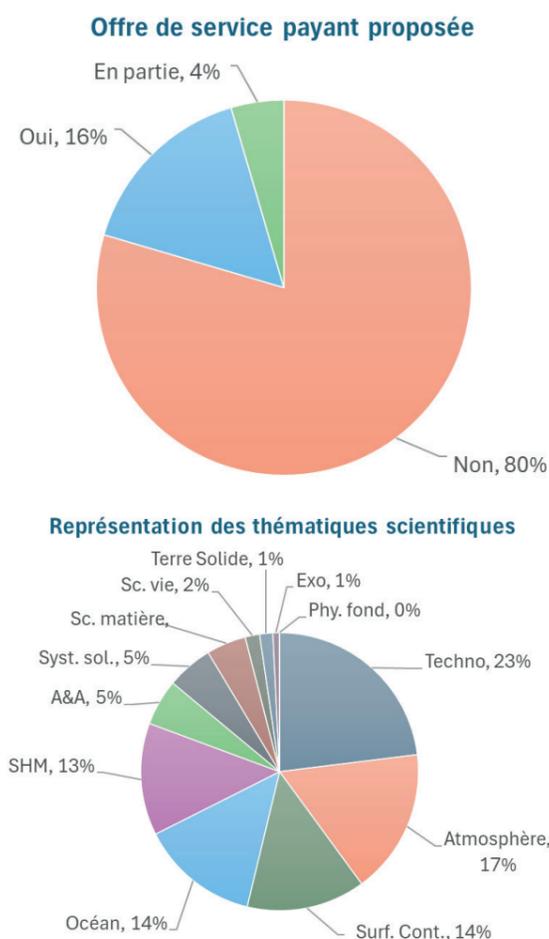
Nous avons dénombré 88 missions new space à participation françaises dont l'objectif scientifique relève des trois premiers cas types décrits ci-dessus. Sont listées, toutes celles portées par une entité française (Cnes, CNRS, université, entreprise, CSU) ou dont les données sont ou pourraient être utilisées à des fins scientifiques par des chercheurs-ses Français-es.

Comme décrit en Fig. 4, 20% de ces missions proposent une offre de service payante qui peuvent être utiles aux équipes de recherche, tandis que 80% ressortent du domaine public. Certaines des

entreprises listées n'en sont qu'à un stade de développement et il s'agira, une fois les premières données produites, d'étudier la "qualité scientifique" de celles-ci.

Les produits et services new space étant principalement conçus pour l'observation de la Terre, la moitié des missions (47%) alimente les thèmes scientifiques du TOSCA. Les autres missions sont à 30% liées à des thèmes scientifiques du CERES et à 23% pour la validation de technologies pour la réalisation future d'instruments spatiaux scientifiques publics. Plusieurs thèmes peuvent être rattachés à une même mission.

Aucune mission new space rattachée à la thématique "Physique fondamentale n'a été répertoriée.



**Fig. 4.** Proportion des missions recensées offrant des services payant (haut) et associées aux thématiques du Cnes (bas).

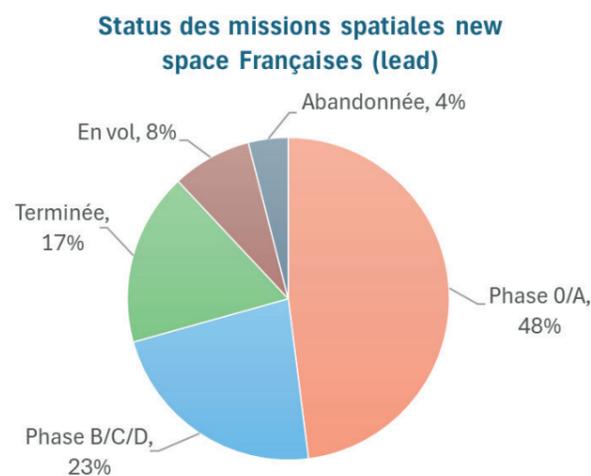
Sur les 88 missions listées, 13 ne sont pas portées par une entité française. Sur les 75 missions restantes, 13 ont déjà volé et la mission est terminée et 6 sont en vol. Ainsi, près de 3/4 des missions ne

sont pas lancées (phases 0, A, B, C ou D, voir Fig. 5). **Cette nette coupure souligne la difficulté qu'ont les laboratoires à faire financer l'achat d'une plateforme et son lancement afin d'aboutir à la mission complète.**

Les 13 missions ayant décollées ont des objectifs scientifiques souvent multiples, mêlant validations technologiques et autres thématiques qui apparaissent dans des proportions similaires à celles de l'ensemble des projets.

Il est toujours complexe de définir le succès d'une mission scientifique. Néanmoins, on peut noter que près de la moitié des missions terminées ont connu des problèmes techniques pouvant amener jusqu'à la perte complète du satellite. Les missions ayant abouties sont presque toutes issues de laboratoires accumulant de l'expérience (CSUM : 5 missions, LATMOS : 2 missions) et ayant accès à des financements important. Ce qui démontre l'importance que pourrait avoir le rôle du Cnes à accompagner techniquement les missions new space scientifique.

Enfin, sur les 6 missions en vol, seulement 3 sont portées par des acteurs publics, les 3 autres étant portées par des entreprises privées.



**Fig. 5.** Statuts des missions spatiales opérées par un organisme public ou privé français.

### 3.2.1 CAS PARTICULIER DES "OFFRES DE SERVICE" NEW SPACE UTILISÉES PAR LES SCIENTIFIQUES

Les offres de service new space mettent à disposition des ressources mutualisées auprès des scienti-

fiques (entre autres) de différentes manières.

Au travers tout d'abord de **constellations privées fournissant des données d'observation de la Terre à haute fréquence de revisite (plusieurs fois par jour) et avec des résolutions spatiales toujours plus précises (jusqu'à quelques dizaines de centimètres)**. Les données sont traitées par l'entreprise et vendues à de nombreux clients tels que les États, les collectivités territoriales, les banques des développements, les ONG et bien sûr les scientifiques.

En France, plusieurs entreprises se positionnent sur ce segment, bien que leur vocation première ne soit pas scientifique. On peut citer trois exemples d'entreprises : Unseenlabs pour la surveillance des activités maritimes dont le premier satellite a été lancé en 2019. Prométhée avec sa constellation Japetus pour l'observation de la Terre en hyperspectral et dont le premier satellite a été lancé en novembre 2023. Et enfin Absolute Sensing avec la constellation GESat pour la mesure de méthane et dont le premier satellite de validation de technologie devrait être lancé en 2024.

En attendant que l'offre s'accroisse, un consortium d'organismes de recherche et d'universités a fondé l'Infrastructure de Recherche (IR) *Data Terra*. Cette plateforme open source met à disposition des chercheurs et des acteurs publics des produits satellitaires à valeur ajoutée, des logiciels, d'algorithmes et de traitements d'images liés à l'observation de la Terre (atmosphère, océan, surfaces et croûtes terrestres). **Cette démarche est plébiscitée par les acteurs scientifiques avec le souhait d'augmenter le volume et la diversité des données incluses.**

Autre marché : des acteurs privés tels que l'entreprise franco-américaine Loft Orbital ou la jeune

## 4. L'ENTREPREUNARIAT NEW SPACE S'APPUYANT SUR LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

La recherche scientifique est une des sources du développement du new space par les nombreuses avancées technologiques transférées vers l'industrie depuis des décennies : propulsion spatiale, télécommunication, matériaux, robotique, IA, quantique, etc...

pousse française Space Locker, portent cette démarche en offrant un accès à l'espace clé en main pour y **opérer un instrument intégré au sein d'une plateforme partagée.**

Dans les deux cas, ces offres de service **mutualisent les moyens et les données ce qui permet d'optimiser l'utilisation des satellites** lancées et ainsi de réduire l'utilisation de l'espace, diminuant les coûts et la pollution spatiale.

### 3.3 UTILISATION DU NEW SPACE PAR LA COMMUNAUTÉ SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES (SHS)

La communauté SHS interagit avec le spatial de deux manières :

- 1) De manière directe, comme objet d'étude en économie, droit, histoire, géopolitique et pour répondre aux questions soulevées par le développement du new space, comme celles listées au chapitre 5.2.
- 2) De manière indirecte au travers de la fourniture de données satellitaires pour les études de gestion de risque, archéologie, démographie, exploration et géographie. Cette démarche peut avoir un fort intérêt pour les SHS mais les possibilités restent sous-utilisées par manque de connaissance des acteurs de ces domaines.

On peut noter l'engouement autour du spatial dans les SHS par la création d'une nouvelle Chaire Espace en 2024 à l'ENS, dont les grands groupes industriels du spatial sont mécènes.

Ces transferts se poursuivent activement comme en attestent les exemples suivants de startups françaises ayant profité de technologies matérielles ou logicielles développées par des laboratoires : Exotrail, Thrust-Me, Aldoria, LeoBlue, OGS Technologies, HELSA, etc...

On peut également citer le cas rare de ION-X, en-

treprise de propulsion spatiale qui a été cofondée par le CNRS et dont le produit est basé sur une technologie développée au laboratoire C2N du CNRS.

Enfin, de nombreux moyens expérimentaux de pointe (banques d'essais, accélérateurs, lignes photoniques, ...) sont détenus par les laboratoires et universités. Prioritairement utilisés pour le développement des missions scientifiques, **ils peuvent également être loués aux industriels**. C'est le cas de l'infrastructure de recherche (IR) Paradise, répartie entre 6 sites, regroupe des moyens d'assemblage, de caractérisation et d'étalonnage pour des missions spatiales. Environ 10% de son temps d'utilisation est dédié à l'industrie.

On souligne que l'amplification de ces mises à disposition vers les industriels est une des recommandations du GT « Recherche et Transfert » du COSPACE publiée fin 2023. Les laboratoires doivent néanmoins rester prioritaires dans l'utilisation de ces plateformes.

## 5. SCIENCE ET ENTREPREUNARIAT NEW SPACE : UNE CAUSE COMMUNE

### 5.1 NOUVEAUX SUJETS SCIENTIFIQUES NEW SPACE

A la question : "Quels champs scientifiques et technologiques ne peuvent pas bénéficier du new space ?" de nombreux répondants ont répondu "aucun" ou que ce n'était qu'une question de temps. Ainsi, de nombreux sujets qui apparaissent difficile à associer au new space aujourd'hui (exploration du système solaire, astronomie, grand télescope, ...) trouvent des réponses jusqu'à y voir des possibilités d'assemblage en orbite pour répondre aux problèmes les plus complexes.

On peut relever plusieurs technologies et sujets d'intérêt portés par les participants de ce GS qui peuvent être développés conjointement entre acteurs privés et publics :

- Plateformes et lanceurs vers l'orbite très basse (VLEO, 250-450 km) pour des missions haute résolution ;
- Contrôle d'attitude et d'orbite pour la mobilité orbitale, le vol en formation, docking, l'assemblage en orbite via logiciel (algorithmes) et maté-

Ces technologies ou briques technologiques ont pu dans certains cas être **valorisées grâce à l'une des 13 Sociétés d'Accélération du Transfert de Technologies (SATT)** réparties sur le territoire et financé par le Programme d'Investissement d'Avenir (PIA) dont sont issus France Relance et France 2030. Ces structures semi-publiques, "*détection, évaluation, protègent et conduisent [des] inventions jusqu'au marché en les confiant à une entreprise existante ou une future startup*".

Les participants à ce GS ont souligné le rôle pertinent de ces structures dans le transfert technologique, surtout concernant la propriété intellectuelle dont le partage entre acteurs scientifiques et industriels est complexe.

Concernant les aspects de propriété intellectuelle, plusieurs **participants scientifiques à ce GS ont souligné la complexité des échanges avec les industriels et le manque d'accompagnement** par les instances publiques afin qu'un équilibre soit trouvé entre les deux parties aux démarches différentes.

riel (propulsion) ;

- Station spatiale et capsule embarquant des expériences de microgravité permettant le retour d'échantillons sur Terre (matériaux, pharma/biotech) ;
- Télécommunications : optiques, sat-to-sat, quantique ;
- Caméras (panchromatique, multispectrale, hyperspectral, infrarouge), instrument optique intégré (freeform) et traitement de données pour l'observation de la Terre (surveillance, climat, analyse) ;
- Automatisation des traitements de données embarqués par IA avec envoi direct des résultats aux utilisateurs finaux ;
- Réseau de stations sol souverain pour le recueil des données ;
- Technologie de refroidissement d'instruments new space ;
- Composants et matériaux résistant aux radiations (FPGA, processeurs, composants pour l'IA embarquée...);
- Validation indépendante des résultats obtenus

par les technologies du new space ;

- Aide à la spatialisation de technologies de labo (design + IOV) : imageur, propulsion, carte électronique.

### 5.2 LE NEW SPACE AU CŒUR DES ENJEUX SOCIÉTAUX

Les nombreuses actions portées et médiatisées par les acteurs industriels du new space incite la société civile à s'interroger sur de nombreux sujets ayant ou pouvant avoir un impact sur nos vies, dont :

- Pollutions : terrestre, atmosphérique, spatiale (encombrement des orbites), radio et lumineuse ;
- Privatisation du spatial et des données produites ;
- Inégalité d'accès aux technologies / données entre pays riches et pays pauvres ;
- Course à l'espace et multiplication des acteurs ;
- Forage d'astéroïdes ;
- Colonisation ;
- Compétition entre États et enjeux de souveraineté.

L'impact environnemental est un des sujets les plus récurrents car les missions spatiales, de leur conception jusqu'à leur fin de vie en passant par les lancements, utilisent fortement les ressources et génèrent des Gaz à Effet de Serre (GES) qui contribuent au réchauffement climatique. **La multiplication des missions new space scientifique va à l'encontre d'une modération nécessaire de notre industrie. Mais c'est ce même new space qui facilite l'observation de la Terre et l'analyse de notre impact sur la planète** dans les domaines de surveillance maritime, cartographie d'occupation des

## 6. CONCLUSION

Avec le new space, le spatial scientifique et entrepreneurial est d'autant plus lié. Malgré leurs objectifs initiaux différents, ces deux acteurs doivent faire cause commune en profitant de la multiplication des composants, offres, initiatives et financements.

Cette nouvelle approche doit néanmoins être **embrassée par l'ensemble des acteurs** ce qui nécessite un accompagnement par les entités publiques telles que le Cnes. Elle est de long cours car la portée scientifique des missions new space actuelles n'est pas toujours au rendez-vous bien qu'elles commencent à profiter des développements technologiques de ces 15 dernières années. Néanmoins,

sols, bilan radiatif, émission de GES, climat, gestion des ressources naturelles, suivi de catastrophes.

Il est donc nécessaire de trouver des moyens de **produire un new space scientifique durable** (éco-conception, bilan carbone, propulsion verte, gestion des déchets spatiaux, ...), raisonné (toutes les initiatives sont-elles d'intérêt public ?) et parfois remplacé par d'autres moyens tels que les ballons stratosphériques ou les High Altitude Platform Station (HAPS).

Mutualiser la production de données scientifiques en s'appuyant sur des **constellations partagées privé / public permet également de** réduire l'impact du spatial sur l'environnement. Cela nécessite néanmoins une concertation entre les différents acteurs à l'échelle européenne et même mondiale afin de ne pas multiplier les constellations aux objectifs identiques.

Ce type de problématique tout autant que les autres sujets complexes listés au-dessus soulignent parfaitement les **enjeux de souveraineté et les questions de géopolitique soulevés par le new space**. Ils nécessitent une réflexion approfondie ainsi que des prises de position de nos institutions dirigeantes qui sortent du cadre de ce groupe spécifique. Sans que le Cnes puisse y répondre immédiatement, l'agence spatiale a les moyens de poser ces questions et de s'appuyer sur des groupes d'experts afin d'apporter des recommandations.

cet **investissement initial est nécessaire** pour que la France maintienne son statut d'acteur majeur de la recherche spatiale, qui passera entre autres par des missions plus agiles. La fédération nanosat CNRS/INSU propose un budget annuel de 3 à 5 M€ pour le financement d'une mission nanosat scientifique par an.

Cette démarche doit être accompagnée de **financements vers les laboratoires** afin qu'ils développent des instruments et missions scientifiques dont les aspects techniques (plateforme, lancement, segment sol...) sont tout ou partie issus des industriels new space. Un accompagnement des laboratoires est également nécessaire afin qu'ils maî-

trisent cette nouvelle démarche et que le partage de la propriété intellectuelle soit équitable.

Enfin, les enjeux de société autour du new space sont tels que les engagements de la France applicables au spatial (climat, pollution spatiale, aide aux populations...) doivent être suivis de **régulation et priorisation des missions scientifiques** et sou-

## 7. RECOMMANDATIONS

### **R1 : DÉVELOPPER UNE STRATÉGIE SCIENTIFIQUE INTÉGRANT LES OPPORTUNITÉS OFFERTES PAR LE NEW SPACE AU CNES**

- soutenant activement des missions scientifiques innovantes pilotées par des acteurs du monde académique et soutenues par les acteurs du new space ;
- promouvant l'intérêt d'un investissement dans le new space scientifique dès maintenant afin d'accéder à des missions d'intérêt dans le futur et avec une stratégie de prise de risque clairement définie ;
- encourageant les acteurs scientifiques et entreprises à collaborer ;
- prenant en compte les enjeux climatiques, sociétaux et de souveraineté en concertation avec les acteurs publics et privés du new space ;
- portée par un institut « new space » au Cnes (voir R2).

### **R2 : CRÉER UN INSTITUT « NEW SPACE » AU CNES**

- pour favoriser l'écosystème new space scientifique et entrepreneurial ;
- au travers de financement d'instruments, de missions et de lancements via des appels d'offre en évaluant leur intérêt dans le contexte "new space scientifique". Cette recommandation ne fait pas consensus auprès de l'ensemble de la communauté scientifique, au-delà de ce groupe spécifique ;
- avec la prise en compte de l'impact sociétal des missions (pertinence sociétale, bilan carbone...) lors de la sélection des missions ;
- avec le support technique et expertise des équipes du Cnes : logiciels, aide à la définition de la mission (PASO), accès aux bases de connaissances (composants électroniques, matériaux...), partage PI, démarches administratives (conformité aux réglementations, réservation de fréquence...);

tien à l'écosystème new space.

Pour cela, le soutien aux développements de **constellations mutualisées d'observation de la Terre** (privées/publiques) permettra un apport scientifique conséquent à de nombreux domaines (dont les SHS), à moindre coût et en limitant la pollution spatiale.

- incluant le soutien aux opérations en permettant l'utilisation du segment sol Cnes.

### **R3 : CONDUIRE DES MISSIONS SCIENTIFIQUES EN S'APPUYANT SUR LE NEW SPACE**

- par la poursuite d'achat et de mise à disposition de données scientifiques new space groupées via l'IR Data Terra ;
- au travers d'appels d'offre pour l'achat d'instruments, services, constellations et missions scientifiques issus du new space afin d'être le premier client des entreprises new space et ainsi favoriser l'émergence de nouvelles technologies ;
- en incluant des scientifiques dans l'orientation des appels d'offre et la sélection des missions.

### **R4 : RENFORCER L'ESPACE D'ÉCHANGE ENTRE SCIENTIFIQUES ET ACTEURS NEW SPACE**

- par le développement d'une connaissance mutuelle entre laboratoires et entreprises intégrés au new space scientifique en s'appuyant sur Connect by Cnes ;
- par la mise à disposition d'une liste de laboratoires, entreprises, moyens et technologies utiles au new space scientifique ;
- en créant une passerelle entre les labos et l'industrie afin de faciliter les échanges de RH dans les deux sens ;
- en utilisant les conférences / salons existants pour faire se rencontrer les acteurs industriels et scientifiques (inviter les entrepreneurs au SPS et les scientifiques aux assises du new space).

# RÉDUCTION DE L'EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE DES ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES SPATIALES

Simon Baillarin, Etienne Berthier, Cédric Lothoré, Aurélie Marchaudon, Héloïse Méheut (co-animatrice), Bruno Millet (co-animateur), Pierre Omary, Françoise Perrel, Thierry Pellarin, Alexandre Santerne, Aymeric Spiga

## 1. INTRODUCTION

L'influence humaine est sans équivoque sur le climat planétaire et sur la crise de la biodiversité. Ces impacts, déjà ressentis aujourd'hui, iront en s'aggravant à l'avenir en l'absence de changements profonds de trajectoire sur les plans politiques, sociaux, économiques, environnementaux et technologiques. Le CNES ainsi que 15 autres organismes de recherche français ont pris l'engagement<sup>1</sup> de donner l'exemple pour permettre à la France d'atteindre son objectif de neutralité carbone d'ici 2050 ; ce rapport identifie la trajectoire qui en découle pour le spatial scientifique.

Les activités spatiales, notamment scientifiques, se trouvent donc confrontées à des enjeux forts de réduction de leur empreinte environnementale. Le secteur du spatial scientifique a d'autant plus conscience de l'importance de ces enjeux qu'il contribue activement à les caractériser. De plus, l'avenir du spatial ne peut non plus s'appréhender sans la prise en compte de la saturation des orbites, de la multiplication des débris spatiaux (cf. Syndrome de Kessler) et de la pollution lumineuse et radioélectrique.

Le groupe de travail (ci-après dénommé « le groupe »), nommé par le Comité de Programme Scientifique et qui a œuvré au titre des présents

travaux, s'est concentré sur l'empreinte environnementale des moyens spatiaux utilisés par la communauté scientifique française pour des travaux académiques. Ce périmètre inclut en particulier les sciences de l'observation de la Terre et de l'Univers ou de l'exploration du système solaire, et plus généralement l'ensemble des thématiques scientifiques du CNES. Cette réflexion ne peut être conduite en vase clos, et le groupe a également considéré les évolutions du secteur spatial hors domaine académique (télécommunication, NewSpace, etc.). Il s'est nourri de 9 interviews avec des acteurs variés, plus ou moins proches du spatial, membres de la communauté scientifique, des agences spatiales ou de l'industrie.

Les objectifs du groupe sont :

1. De proposer une estimation des ordres de grandeur de l'empreinte environnementale de différents types de projets spatiaux scientifiques ;
2. D'identifier au sein de l'ensemble des étapes d'un projet spatial, les axes offrant un potentiel de réduction significative de leur empreinte environnementale ;
3. De se projeter dans le futur (2030, 2050) pour penser l'évolution du spatial scientifique à l'aune des bouleversements environnementaux à venir.

## 2. EMPREINTES ENVIRONNEMENTALES

### 2.1 CONSTAT

Le secteur spatial ne participe aujourd'hui qu'à un faible pourcentage ( $\leq 1\%$ )<sup>2</sup> de l'empreinte environnementale mondiale anthropique. Cependant, sa croissance, notamment avec l'émergence du NewSpace, permet d'imaginer une augmentation significative de sa contribution ( $\approx 5\%$ ) en quelques années. Chaque contributeur à l'empreinte car-

bone doit prendre part à la réduction globale, les scientifiques qui ont mis en évidence le problème, en particulier<sup>3</sup>.

Enfin, le secteur spatial constitue, par nature, l'une des seules activités humaines affectant directement toutes les couches de l'atmosphère et au-delà, tout en concourant à la pollution des océans et de leurs abysses :

- La phase propulsée d'un lanceur ainsi que la ren-

1 <https://presse.cnes.fr/fr/la-recherche-au-service-de-la-transition-ecologique-et-du-developpement-soutenable-16-organismes>

2 <https://www.iacpartners.com/en/the-space-industrys-path-to-a-sustainable-future>

3 Pour la part de la science dans le spatial : [https://brycetechnology.com/reports/report-documents/Bryce\\_2022\\_Global\\_Space\\_Economy.pdf](https://brycetechnology.com/reports/report-documents/Bryce_2022_Global_Space_Economy.pdf)

trée atmosphérique d'objets artificiels (étages supérieurs de lanceurs, satellites, stations orbitales, etc.) impactent la stratosphère et la couche d'ozone<sup>4</sup> ;

- Les polluants plus ou moins volatils dus à la combustion des ergols de lanceurs, la retombée nominale ou accidentelle d'étages de lanceurs en zone proche ou lointaine de la base de lancement vient contaminer les écosystèmes marins déjà fragilisés par l'acidification et le réchauffement des océans.

Ainsi, les activités spatiales ne peuvent s'exonérer de leur part liée à la contamination des sols, de l'air et de l'eau et à la destruction de la biodiversité. Si elles offrent une capacité à mesurer les phénomènes en jeu, elles font aussi partie du problème posé.

## 2.2 METHODE

Les connaissances actuelles ne permettent pas de quantifier de manière précise et exhaustive les contreparties environnementales des activités spatiales. En effet, le périmètre des activités (lanceur, satellite, segment sol, station spatiale, observation de la Terre, exploration de l'univers, exploitation planétaire, tourisme spatial, etc.) est si large et les phases de vie de l'objet considéré si entremêlées que l'estimation des impacts environnementaux liés à l'ensemble des missions s'avère exigeante, minutieuse et complexe.

La méthode la plus communément adoptée consiste à réaliser une Analyse de Cycle de Vie (ACV) de l'ensemble des composantes du système. Appliquée au secteur spatial, elle passe donc par la caractérisation précise de l'ensemble des activités de sa chaîne de valeur depuis l'extraction et la transformation des matières premières, la fabrication et le transport de chaque pièce élémentaire jusqu'à l'intégration finale, le lancement, l'exploitation et la fin de vie. La mise en œuvre d'une ACV complète est donc un défi pour les acteurs du spatial. Les résultats issus d'une ACV peuvent de plus être difficiles à appréhender pour un public non initié, par la multiplicité des indicateurs d'impacts, 16 par exemple pour la méthode Product Environmental Footprint (PEF). Par construction, cette méthode n'inclut pas des problématiques comme la

confiscation des orbites, la génération des débris ou la pollution lumineuse et radioélectrique.

## 2.3 OUTIL ET HYPOTHESES

Le CNES dispose d'un outil simplifié, OASIS (Orbital projects : Assessment of Simple environmental Impacts Software) d'estimation de ces impacts, destiné à l'analyse des projets spatiaux. Il reprend les indicateurs du PEF comme la contribution au changement climatique, la consommation de ressources fossiles, minérales et d'eau et condense les autres en 2 catégories : l'impact sur la biodiversité et sur la santé humaine. Cet outil constitue un compromis entre les outils grand public de comptabilité d'impacts environnementaux, trop généralistes et donc non adaptés au secteur spatial, et les outils d'ACV présentés ci-dessus. Il s'adresse aux équipes projet, non-expertes des méthodes d'ACV, pour estimer l'impact environnemental des composantes dont elles sont responsables. Il s'appuie sur une définition paramétrique d'un projet spatial, limitée à ses composantes majeures (durée de développement, masse du satellite, type de lanceur, etc.). Le calcul des impacts environnementaux est notamment basé sur des abaques issus de résultats d'ACV existantes.

L'outil a cependant des limites : le segment sol est plus approximatif que le segment spatial et les déplacements domicile-travail, les activités non récurrentes liées au développement du lanceur, ainsi que les applications « aval » sont omises.

Les résultats fournis par l'outil OASIS ont été corroborés par une comparaison, à périmètre équivalent, à ceux obtenus avec une ACV conventionnelle d'un projet orbital, l'instrument Athena X-IFU en l'occurrence.

Tous les résultats présentés ici s'appuient sur une exploitation rigoureuse de l'outil. Dans la version utilisée (datée à fin 2023), si sa précision concernant les valeurs absolues estimées doit gagner en maturité, elle est suffisante pour mener une étude comparative entre différents scénarios telle qu'exposée présentement.

## 2.4 SCENARIOS

Le groupe a défini différents scénarios de missions

scientifiques spatiales caractérisées par plusieurs aspects : la coopération, le gabarit et le nombre de satellites, la localisation de la base de lancement, la durée de la phase de développement et de la phase d'exploitation, la performance lanceur requise, la puissance de calcul pour les (re)traitements scientifiques, le mix énergétique des zones géographiques impliquées, etc.

Au total, 13 scénarios permettent une cartographie relativement couvrante des schémas envisageables :

#	Type	Coopéra.	Gabar.	Lance.	Durée dével.	Durée exploi.	Coût
1	LEO <sup>5</sup>	France	1 000 kg	S. Am.	10 ans	10 ans	M
2	LEO	Europe	1 000 kg	S. Am.	12 ans	10 ans	M
3	LEO	Asia	1 000 kg	Asia	14 ans	10 ans	M
4	LEO	N. America	2 000 kg	N. Am.	15 ans	5 ans	M
5	LEO	Europe	200 kg	S. Am.	14 ans	5 ans	S
6	LEO	France	10 kg	S. Am.	4 ans	2 ans	S
7	LEO	France	10 kg	Kaz.	4 ans	2 ans	S
8	LEO	France	50 x 30 kg	Japan	6 ans	8 ans	M
9	LEO	France	12 x 300 kg	S. Am.	6 ans	10 ans	M
10	L2 <sup>6</sup>	World	4 000 kg	N. Am.	25 ans	15 ans	L
11	L2.	Europe	4 x 1 500 kg	S. Am.	25 ans	15 ans	L
12	Rover <sup>7</sup>	N. America	400 kg	N. Am.	10 ans	4 ans	M
13	Orbiter <sup>8</sup>	Europe	5 300 kg	S. Am.	20 ans	6 ans	L

Les éléments de coûts respectent la classification suivante :

- S (Small) : Coût ≤ 250 M€ ;
- M (Medium) : 250 M€ < Coût ≤ 1 G€ ;
- L (Large) : Coût > 1 G€.

En revanche, l'estimation de l'empreinte environnementale des vols habités et de l'exploration humaine de corps céleste n'a pas été faisable, car les outils actuels ne le permettent pas.

## 2.5 RÉSULTATS

L'estimation de l'empreinte environnementale de chaque scénario de mission a permis d'identifier leurs points saillants en matière environnementale. Le groupe<sup>9</sup> s'est concentré sur l'empreinte carbone, même si les autres composantes (telles que listées ci-avant) doivent être aussi nominalement appréhendées.

5 LEO : Low Earth Orbit.

6 L2 : Point de Lagrange 2.

7 Rover : « Atterrisseur » sur un corps céleste, sans plus de précision.

8 Orbiter : Sonde orbitale autour d'un corps céleste, sans plus de précision.

9 Avec la contribution significative de la société SCALIAN (Xavier Loizillon) sur l'année 2023.

Les enseignements sont les suivants :

- Hormis les 3 premiers, les 10 autres scénarios ne sont pas comparables en termes d'empreinte puisqu'ils ne répondent pas à des envergures programmatiques (objectifs, durées et coûts) équivalentes. La similarité des unités fonctionnelles est absolument primordiale dans une analyse comparative de cycle de vie ;
- En revanche, la comparaison des 3 premiers scénarios permet d'appréhender les conséquences de la coopération sur l'empreinte carbone. L'effet (dé)centralisation (régionalisation versus internationalisation) associé à l'allongement des phases de développement est mis en évidence (Fig. 1) ;
- De manière générique, les 3 contributeurs majeurs sont (Fig. 2) : (i) la fabrication de la composante spatiale, (ii) l'intégration et les tests de cette même composante (AIT : Assembly, Integration and Test) et (iii) le lancement. Leurs poids relatifs dépendent du scénario. L'AIT est un fort contributeur car les exigences thermiques, hydrométriques et de propreté à respecter ainsi que les tests d'environnement (mécaniques et thermiques) font appel à des moyens techniques énergivores. De plus, en cas de partenariat, les activités AIT sont menées sur plusieurs sites, accompagnées de transports de matériels entre les sites ;
- Si l'empreinte totale est proportionnelle à la taille du projet (masse du satellite, durée des phases), l'empreinte ramenée au kg est inversement proportionnelle à la masse du satellite dans le cas d'un objet unique (Fig. 3).

Ce dernier point est relativement contre-intuitif et mérite une attention particulière. Même si une petite mission présente une empreinte carbone individuelle plus faible, la multiplication de ces missions, peu onéreuses, conduit à une explosion de l'empreinte totale ; un effet rebond en contradiction avec l'objectif recherché.

Le poids des déplacements professionnels dépend naturellement de l'ampleur de la coopération sur laquelle les organisations s'appuient pour le développement et l'exploitation de la mission. Plus les acteurs sont nombreux et éloignés, plus le partage de responsabilité est complexe, plus le coût environnemental lié à la mobilité est élevé.

4 Impact of Rocket Launch and Space Debris Air Pollutant Emissions on Stratospheric Ozone and Global Climate : <https://doi.org/10.1029/2021EF002612>

Au-delà des points saillants, toutes les activités doivent être étudiées avec précaution au profit d'éventuelles économies « carbone ». Le (re)traitement des données, leur archivage (stockage) et leur distribution n'échappent pas à l'objectif, même si les résultats actuels ne révèlent pas d'empreinte exagérée, pour les scénarios considérés et avec les hypothèses actuelles de l'outil données ci-dessus.

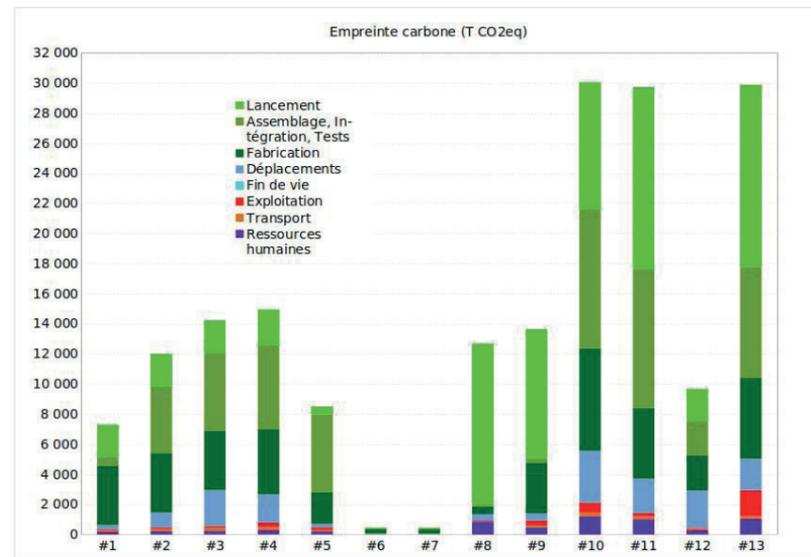


Figure 1 : Missions spatiales - Empreinte « carbone » absolue exprimée en T de CO<sub>2</sub>eq

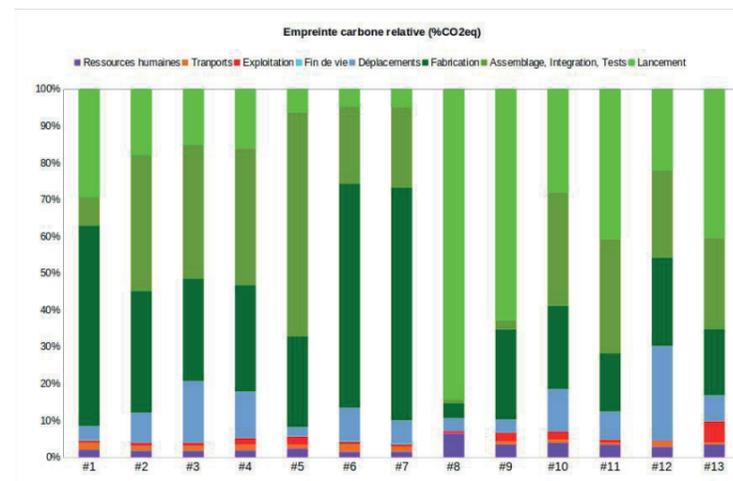


Figure 2 : Missions spatiales - Empreinte « carbone » relative exprimée en % de CO<sub>2</sub>eq

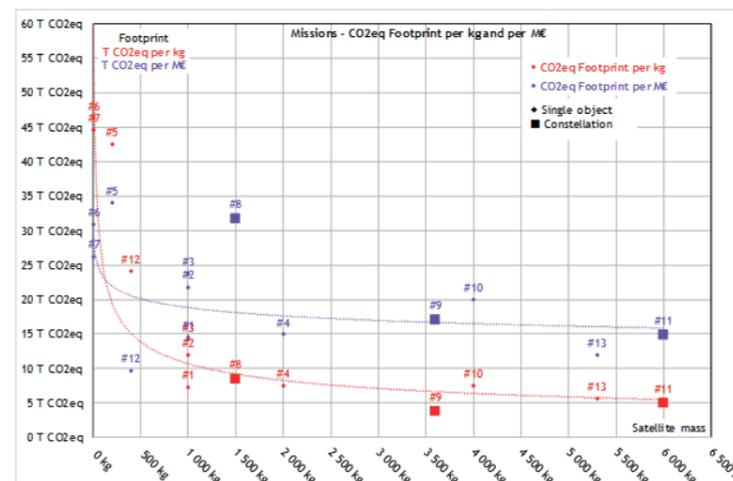


Figure 3 : Missions spatiales - Empreinte « carbone » exprimée en T de CO<sub>2</sub>eq ramenée au kilogramme et au M€ en fonction de la masse de la composante spatiale (satellite ou cumul des satellites composant la constellation)

### 3. AXES DE REDUCTION

L'objectif de neutralité carbone d'ici 2050 implique de diminuer les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'un facteur 6 par rapport à 1990 (Plan Climat, Stratégie Nationale Bas Carbone, Pacte Vert pour l'Europe). Cela correspond actuellement à une trajectoire à hauteur de -7%/an (pour un début de transition en 2025), sachant que tout délai dans la mise en œuvre résultera en une trajectoire plus abrupte (-8,5%/an à partir de 2029). Aussi, avons-nous fait la distinction entre les mesures à court terme (CT, soit d'ici 2025) et les mesures à moyen terme (MT, soit d'ici 2029). Les mesures à plus long terme, qui doivent apporter les changements les plus profonds sont abordés au chapitre #4.

Cette trajectoire de -7% par an s'applique à l'ensemble des secteurs d'activités français et européens, celui du spatial y compris. La recherche et par conséquent les activités scientifiques spatiales françaises doivent respecter la trajectoire de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC)<sup>10</sup>, fortement soutenue par une vaste communauté scientifique française<sup>11</sup>. En conclusion, le groupe recommande donc d'appliquer cette trajectoire de -7% par an à l'ensemble des activités spatiales scientifiques françaises, indépendamment de leurs bénéfices sociétaux.

L'analyse précédente de scénarios de missions spatiales montre que les émissions de gaz à effet de serre sont principalement liées aux campagnes de lancements, aux AIT, à la production du satellite, ainsi qu'aux déplacements professionnels des personnels impliqués dans ces missions. Il n'existe donc pas un seul segment très émetteur sur lequel devrait peser tous les efforts. De plus, l'analyse a été menée pour les seules missions spatiales alors qu'il faut considérer toutes les échelles d'intervention depuis le financement de la recherche en lien avec le spatial (APR, doctorats, R&T, etc.) jusqu'au rôle du CNES comme acteur international auprès des autres agences spatiales.

Par tradition et motivée par une conscience accrue, la France a toujours adopté une position pionnière en matière de réglementation spatiale au bénéfice de la protection de l'environnement et de l'espace dans lesquels l'activité évolue.

Nous identifions 5 axes de réduction de l'empreinte environnementale du spatial scientifique.

#### 3.1 QUANTIFIER ET SUIVRE LES ÉMISSIONS DE GES

Afin de mener une transition environnementale efficace et juste, il est primordial de continuer les efforts de quantification de l'empreinte du spatial scientifique (à CT), ce que nous avons initié pour les missions (cf. chapitre #2). Cette quantification prendra en compte tout le périmètre du spatial scientifique, incluant les activités de recherche financées par le CNES, l'utilisation des ressources numériques (de la conception à l'exploitation des moyens, y compris le stockage), ainsi que les lancements. Il s'agit d'un périmètre différent de celui considéré par le CNES pour ses BEGES (Bilans d'Émissions de Gaz à Effet de Serre).

Les actions à mettre en place sont :

- De quantifier annuellement les émissions de GES prévisionnelles des dossiers de candidature aux appels à projet de recherche (APR), dès l'appel 2025. Une méthodologie claire et un outil commun doivent être fournis aux porteurs de projets, en s'appuyant par exemple sur ceux développés par le GdR Labos 1point5. Les bilans d'utilisation des crédits devront également quantifier, grâce à ces mêmes outils, les émissions de GES effectuées ;
- D'estimer les impacts environnementaux, et notamment les émissions de GES, des projets de R&T et mener des ACV systématiques de tous les projets spatiaux dans lesquels le CNES est impliqué (CT). Ces ACV comporteront une dimension temporelle (passée, actuelle et future) sur toute la durée de vie des missions et projets R&T afin de pouvoir suivre leur évolution dans le temps ;
- D'évaluer annuellement (CT) les émissions de GES des infrastructures solaires nécessaires au développement et aux opérations des projets spatiaux (salles blanches, moyens de test, d'intégration, de calcul et stockage, base de lancement, activités et moyens de calibration et de valida-

<sup>10</sup> Blanchard M, Bouchet-Valat M, Cartron D, Greffion J, Gros J (2022) Concerned yet polluting: A survey on French research personnel and climate change. PLOS Clim 1(9): e0000070. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000070>

<sup>11</sup> Contribution émanant de la communauté scientifique (recueillant plus de 200 signataires) au Séminaire de Prospective Scientifique du CNES 2024 sur la thématique « Empreinte environnementale des activités scientifiques spatiales ».

tion, etc.) à partir d'une méthode commune ;

- De financer en urgence les activités de recherche sur l'empreinte environnementale des activités spatiales pour adapter au plus juste les scénarios de transition (Fig. 4, 5, 6 et 7)<sup>12</sup>.



Topics	Environmental footprint of the space segment			
	Development	Exploitation	Disposal	
Planetary boundaries	Climate change	Significant	None	Unknown
	Aerosol loading	Low	None	Thesis proposal
	Ozone depletion	Low	None	Thesis proposal
	Land system change	Low	None	Unknown
	Biogeochemical flows (Nitrate & Phosphate)	None	None	None
	Biosphere integrity	Unknown	Unknown	Unknown
	Ocean acidification	Low	None	Unknown
	Freshwater use	Low	None	Unknown
	Novel entities	Unknown	None	Unknown
	Mineral resources depletion	Significant	None	None
Into orbit	Space debris	None	Executioner or victim	Significant
	Dark sky	None	Significant (LEO satellites)	Unknown
	Quiet sky	None	Significant (Telecom)	None

Figure 4 : Quantification de l'empreinte environnementale du « Space segment »



Topics	Environmental footprint of the launch segment			
	Development	Exploitation	Disposal	
Planetary boundaries	Climate change	Significant	Unknown	Unknown
	Aerosol loading	Low	Thesis proposal	Thesis proposal
	Ozone depletion	Low	Thesis proposal	Thesis proposal
	Land system change	Low	None	Unknown
	Biogeochemical flows (Nitrate & Phosphate)	None	None	None
	Biosphere integrity	Unknown	Unknown	Unknown
	Ocean acidification	Low	Unknown	Unknown
	Freshwater use	Low	Unknown	Unknown
	Novel entities	Unknown	Unknown	Unknown
	Mineral resources depletion	Significant	None	None
Into orbit	Space debris	None	Low	Significant
	Dark sky	None	Low	Unknown
	Quiet sky	None	None	None

Figure 5 : Quantification de l'empreinte environnementale du « Launch segment »



Topics	Environmental footprint of the ground segment			
	Development	Exploitation	Disposal	
Planetary boundaries	Climate change	Significant	Significant	Low
	Aerosol loading	None	None	None
	Ozone depletion	None	Low	None
	Land system change	Unknown	Unknown	Unknown
	Biogeochemical flows (Nitrate & Phosphate)	None	None	None
	Biosphere integrity	Unknown	Unknown	Unknown
	Ocean acidification	Low	Low	Low
	Freshwater use	Unknown	Unknown	Unknown
	Novel entities	Unknown	Unknown	Unknown
	Mineral resources depletion	Significant	None	None
Into orbit	Space debris	None	None	None
	Dark sky	None	None	None
	Quiet sky	None	None	None

Figure 6 : Quantification de l'empreinte environnementale du « Ground segment »

<sup>12</sup> L'estimation de l'empreinte environnementale des différentes composantes est issue des travaux menés avec l'écosystème industriel français en 2023, complétés et validés dans le cadre du groupe.

Topics	Environmental footprint	
	Research work to be carried out	
Planetary boundaries	Climate change	Unknown Thesis proposal
	Aerosol loading	Unknown Thesis proposal
	Ozone depletion	Unknown Thesis proposal
	Land system change	Unknown Research studies to be suggested
	Biogeochemical flows (Nitrate & Phosphate)	No, because no impact
	Biosphere integrity	Unknown Research studies to be suggested
	Ocean acidification	Unknown Research studies to be suggested
	Freshwater use	Unknown Research studies to be suggested
	Novel entities	Unknown Research studies to be suggested
	Mineral resources depletion	No, because LCA/Database
Into orbit	Space debris	No, because under investigation
	Dark sky	Need to carry out activities: to be confirmed
	Quiet sky	No, because under investigation

Figure 7 : Synthèse des recherches académiques à mener au bénéfice de la quantification de l'empreinte environnementale du secteur spatial

### 3.2 METTRE EN PLACE DES BUDGETS CARBONES AINSI QUE LA TRAJECTOIRE DE RÉDUCTION

Une fois le bilan des GES établi sur l'ensemble des activités du spatial scientifique, il s'ensuit :

- De mettre place un budget d'émissions de GES (CT) pour l'ensemble des projets APR (éventuellement par sous-groupes thématiques) sur la base de l'évaluation faite. Ces budgets doivent s'accompagner d'une évolution temporelle qui suit la trajectoire choisie (-7% / an ou -8,5% / an si MT). Dans ces projets de recherche, les budgets des émissions de GES doivent être prioritairement affectés aux jeunes chercheuses et chercheurs ;
- De mettre en place un budget carbone sur tous les secteurs du spatial scientifique (dès 2026, ≈ CT) avec la même trajectoire de réduction que l'ensemble des émissions de GES. Ce budget carbone doit être défini pour tous les projets spatiaux et de R&T sur la base des ACV qui auront été menées, conformément à la trajectoire définie. Il doit être respecté lors du déroulement du projet et décliné sur l'ensemble des acteurs. Il doit être traité de la même manière que les budgets financiers ;
- D'accompagner par tous les moyens possibles les infrastructures sol à réduire leurs émissions de GES (CT) en suivant la même trajectoire. No-

tamment, il faudra conduire des audits des infrastructures sols les plus prioritaires, selon leur consommation énergétique au regard de leur volume afin de déceler celles qui sont les plus énergivores et les accompagner pour réduire leur consommation énergétique (électricité, chauffage, ventilation et climatisation) sur le MT ;

- De systématiser les exigences environnementales (incluses éventuellement dans les critères RSE) dans les spécifications pour toutes les parties prenantes, notamment à court terme dans les Cahiers des Clauses Techniques Particulières (CCTP) et demander à moyen terme une quantification de l'impact environnemental de l'activité associée.

### 3.3 SENSIBILISER ET FORMER A LA TRANSITION ENVIRONNEMENTALE

La transition environnementale doit être accompagnée par une sensibilisation et une formation de tous les utilisateurs, utilisatrices, acteurs et actrices du spatial scientifique. Cela inclut :

- De sensibiliser et former (CT) le personnel CNES, les scientifiques dans les laboratoires, incluant les jeunes chercheuses et chercheurs, et équipes projets, quel que soit leur statut (contractuel ou titulaire) ;
- De former en continu (CT) à l'écoconception spécifiquement les acteurs impliqués dans le développement des projets (missions spatiales et projets de R&T, incluant les aspects hardware et software) ;
- D'accompagner les industries (MT) qui contribuent aux activités du spatial scientifique afin qu'elles puissent répondre aux nouvelles exigences environnementales du secteur.

### 3.4 OPTIMISER ET MUTUALISER LES BESOINS ET LES MOYENS

L'une des approches pour réduire les émissions de GES est d'optimiser les besoins et les moyens. Cela passe par de nombreuses actions, notamment :

- De limiter les sur-spécifications (CT) qui entraînent des développements inopportuns par rapport au réel besoin ;
- D'appliquer l'écoconception, à toutes les activités (CT) depuis les projets R&T jusqu'aux activités de développement, de réalisation et d'ex-

ploitation de missions spatiales ;

- De favoriser au maximum le recyclage, le réemploi, et la mutualisation des ressources utilisées (CT) pour les projets de R&T et la conception des missions spatiales sur toute leur durée de vie ;
  - D'ouvrir les demandes APR ainsi que les sujets de doctorat et post-doctorat à l'exploitation de données d'archives (y compris hors missions européennes, CT) ;
  - D'utiliser des critères de sélection des candidats et des candidates aux bourses doctorales et post-doctorales qui soient compatibles avec la transition environnementale (CT), a minima de ne pas pénaliser celles et ceux qui ont fait, par exemple, le choix de limiter les déplacements aériens, ou encore de s'engager dans une démarche de « slow-science » ;
  - D'éviter les déplacements en avion non impératifs et de les remplacer par des déplacements en train ou une participation en distanciel (CT) ;
  - De mettre en place une charte des événements éco-responsables co-financés par le CNES (CT) ;
  - De favoriser les développements et intégrer les solutions low-tech (MT) ;
  - D'encourager les missions ballons comme une alternative potentielle aux missions orbitales (MT), notamment pour les démonstrateurs technologiques ;
  - De renforcer en amont les méthodologies et moyens nécessaires (MT) par exemple en finançant des projets de R&T visant à l'écoconception des missions spatiales, aussi bien d'un point de vue hardware que software.
- Une autre approche consiste à mutualiser les ressources, et donc :
- De renforcer (CT) les efforts de mutualisation et de réutilisation des moyens sols de développement d'instruments spatiaux afin d'assurer une utilisation optimale de ces ressources énergivores. La mutualisation de ces moyens peut inclure le prêt de matériel entre laboratoires pour éviter les achats en duplication. Les équipes techniques de ces laboratoires doivent favoriser le recyclage, le réemploi et la mutualisation des instruments et matériaux utilisés ;
  - De rationaliser le développement de nouvelles infrastructures à l'échelle locale ou régionale (MT). Les moyens existants doivent être partagés avant d'envisager de nouveaux moyens dont l'impact énergétique et environnemental est important. C'est le cas par exemple pour la for-

mation des étudiants aux techniques spatiales (comme les centres spatiaux universitaires), dans les régions où ce type d'infrastructures existe déjà.

### 3.5 PRIORISER LES BESOINS POUR RÉDUIRE LES MOYENS

L'optimisation des programmes spatiaux, via l'éco-conception par exemple, devrait permettre d'atteindre une réduction des émissions de GES de 20% environ (selon J. Knödlseeder et D. Barret)<sup>13</sup>. Pour atteindre l'objectif de neutralité carbone d'ici 2050, il sera indispensable de réduire la quantité de nouvelles missions spatiales. Ainsi, nous recommandons :

- De sélectionner (dès le CT) seulement les nouveaux programmes qui sont compatibles avec la trajectoire carbone globale. Il est important de profiler les émissions de GES par projet dans le temps et vérifier que la somme des émissions de GES du spatial scientifique soit compatible avec cette trajectoire. Ces nouveaux programmes doivent s'inscrire dans la feuille de route des grandes priorités scientifiques déterminées lors

## 4. PENSER L'AVENIR

### 4.1 NÉCESSITÉ ET DIFFICULTÉ

Dans le paragraphe précédent, nous avons identifié des pistes pour réduire l'empreinte carbone des missions spatiales. Cependant, il est apparu clairement au cours de ce travail de prospective que cette approche seule, sans stratégie globale, ne permettra pas d'atteindre les objectifs nationaux et internationaux.

C'est donc un changement de paradigme bien plus profond qu'il faut initier. Pour cela, un travail de projection est inévitable pour tout nouvel engagement de long terme sur des missions. Le statut du spatial scientifique en 2050 ne dépend pas uniquement du monde scientifique mais de l'évolution de l'ensemble de la société, ce qui dépasse le cadre de cette prospective. Pour tenter d'initier tout de même ce travail impérieux et éclairer les orientations possibles, nous nous sommes appuyés sur les scénarios du rapport du GIEC (SR1.5) ensuite repris

de cet exercice de prospective scientifique. La sélection de ces missions doit se faire au regard de leurs retombées scientifiques attendues, en favorisant peu de missions de grandes envergures plutôt qu'une multitude de petites missions. Elles devront également être conçues pour avoir une durée d'exploitation la plus longue possible et impliquer de larges communautés scientifiques ;

- De renforcer (CT) les projets de R&T qui s'inscrivent dans les 3 axes suivants :
  1. Réduire l'impact environnemental (GES et ressources) de la conception des projets ;
  2. Augmenter la durée de vie des projets, éventuellement via des missions robotiques de service ;
  3. Améliorer les capacités technologiques en prévision des futures missions scientifiques ;
- D'ouvrir complètement l'accès aux données et aux logiciels (à CT) et financer des ressources humaines pour assurer pleinement l'exploitation scientifique des missions actuelles et passées et pour éviter leur duplication.

par l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) pour proposer des trajectoires socio-économiques<sup>14</sup>. Pour chacune de ces trajectoires, nous avons proposé une situation du spatial scientifique à l'horizon 2050 et identifié les choix correspondants, à initier dès maintenant. Comme synthétisé ci-dessous, et du fait des spécificités du secteur, il ressort que le chemin vers une réduction de l'empreinte environnementale du spatial scientifique est particulièrement ténu.

### 4.2 QUATRE SCENARIOS

Un premier scénario, le plus frugal, correspondrait à un monde qui s'oriente vers l'arrêt de la recherche scientifique dans le domaine spatial. Celui-ci se limiterait à s'assurer de l'avancée des engagements environnementaux des pays, la surveillance des quotas, et la protection de la nature, et se traduirait par un arrêt des missions ayant pour but princi-

pal de répondre à des questions scientifiques fondamentales. Cette approche s'oppose au besoin de connaissance dans un but désintéressé, qui doit rester la fin en soi du spatial scientifique, et au rôle d'éclairer qu'a la recherche vis-à-vis du monde socio-économique.

A l'opposé, le spatial scientifique pourrait penser sa stratégie dans un scénario de type « pari réparateur ». Dans celui-ci, la recherche serait fortement développée au profit des nombreuses missions sélectionnées, comme par exemple vers la caractérisation d'astéroïdes pour l'exploitation de ressources minières extraterrestres, ou comme faire-valoir de l'exploration planétaire humaine. Cette stratégie est contraire aux valeurs éthiques de la recherche<sup>15</sup>, qui doit s'affranchir de tout opportunisme allant à l'encontre des enjeux environnementaux en cours. Et bien que la culture de l'échec soit parfois mise en avant, elle ne doit pas être appliquée ici, car nous n'avons pas le droit à l'erreur lorsqu'il s'agit des limites planétaires et de l'altération de la biosphère. Ces constats extrêmes encouragent à explorer les scénarios intermédiaires, et tout d'abord celui basé sur les technologies vertes. Dans ce scénario, le spatial serait très développé et s'appuierait sur de multiples technologies bas carbone, et l'éco-conception. Après avoir permis le développement du secteur privé, le spatial scientifique pourrait se reposer sur celui-ci pour obtenir des données. Cependant, les interviews menées nous indiquent que les pratiques en matière d'écoconception pour le spatial amèneraient une réduction des émissions nettement insuffisante pour atteindre les objectifs dans les prochaines décennies.

Par conséquent, seul un chemin de crête peut conduire à un spatial scientifique pérenne. Cette voie ne sacrifie ni la science fondamentale, ni ne mystifie la connaissance technologique comme réponse unique aux enjeux environnementaux. Nous recommandons de s'appuyer sur un scénario plus coopératif avec la mutualisation des projets et des moyens au niveau international associée à une diminution du nombre d'infrastructures au sol, l'utilisation généralisée de composants issus du recyclage et un rééquilibrage fort vers les ballons. Cela se transpose dans le choix de développer la recherche technologique principalement en ce sens, et de bannir la culture de la compétition dans les

modes de financements et de gestion des projets. De plus, le CNES se doit d'être moteur pour la mise en place d'une régulation spatiale internationale de l'accès à l'espace, pour les organismes publics comme privés. Ce levier devra conduire à préserver les orbites, tout en limitant les pollutions lumineuse et radioélectrique. Cette régulation entraînera également une réduction de la pollution stratosphérique des rentrées atmosphériques. Enfin, il est du ressort du CNES et ses partenaires européens d'optimiser la performance des lanceurs, afin de réduire leurs impacts sur l'environnement et améliorer leur efficacité et fiabilité.

### 4.3 UNE STRATÉGIE POUR LE SPATIAL SCIENTIFIQUE

Ce chemin se traduit par :

- Assumer ses responsabilités vis à vis de la société. Cela signifie la formation et l'information de tous les publics (général, étudiant, politique, industriel, etc.) et en transparence, non seulement des apports mais aussi des risques en particulier environnementaux du spatial, ainsi que la transmission de la culture de la coopération. En parallèle, cela implique d'aller vers plus de représentativité dans les choix de politique scientifique pour ramener celle-ci sous les limites planétaires d'une part et au-dessus des fondations sociales d'autre part, en impliquant toute la diversité de la communauté des personnels des laboratoires de recherche dans une démarche de type « Convention »<sup>16</sup> ;
- Endosser sa place de pionnier dans la filière. La communauté scientifique française étant précurseur dans sa capacité à s'organiser autour de ces questions<sup>17</sup>, il est de la responsabilité des acteurs (français) du spatial de s'appuyer sur celle-ci pour engager le grand virement de bord de l'ensemble du secteur vers la sobriété, à l'opposé de la trajectoire actuelle. Le spatial scientifique, bien qu'étant une composante mineure du spatial, semble être l'acteur le plus à même d'amorcer un changement et d'influencer la filière, du fait de son expertise sur la thématique, de son degré d'auto-détermination, et de sa responsabilité éthique. Cela inclut la recherche d'un éclairage sur les entraves à cette transition

<sup>13</sup> [https://indico.esa.int/event/349/attachments/3871/5477/CleanSpace\\_Webinar-EcoDesign\\_ESA.pdf](https://indico.esa.int/event/349/attachments/3871/5477/CleanSpace_Webinar-EcoDesign_ESA.pdf)

<sup>14</sup> <https://www.ademe.fr/les-futurs-en-transition/les-scenarios/>

<sup>15</sup> Avis 2022-43 du COMETS du CNRS.

<sup>16</sup> Telle que l'a mise en place l'Institut de Recherche pour le Développement ou l'Assemblée de la transition de l'université de Lausanne.

<sup>17</sup> Par exemple, Labos 1point5, prospective de l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU).

écologique du spatial, par les sciences humaines et sociales, dans un effort interdisciplinaire. De plus, les activités scientifiques ne doivent en aucun cas être utilisées pour justifier de multiples autres activités spatiales, à forts impacts environnementaux<sup>18</sup> ;

- Garder confiance en l'avenir. Pour ne pas hypothéquer aujourd'hui le futur du spatial scientifique, ni fermer la porte à des révolutions techniques, il est essentiel de programmer une trajectoire carbone contraignante pour l'ensemble du spatial scientifique, en accord avec la stratégie nationale bas carbone. Du fait des échelles de temps mises en jeu dans le spatial, il est nécessaire d'agir aujourd'hui sur les diffé-

## 5. RECOMMANDATIONS

Ces nombreux aspects amènent à recommander aux décideurs, au CNES et à la communauté scientifique :

1. De quantifier annuellement les émissions de GES de l'ensemble du spatial scientifique français ;
2. De se fixer une trajectoire de réduction globale de ces émissions avec un objectif de 7% par an, soit 30% entre 2025 et 2030 ;
3. D'honorer la trajectoire de réduction de ces émissions : mise en place de budgets carbone pour les émissions émanant de l'ensemble des parties prenantes ;
4. De définir et de sélectionner les missions, orienter la R&D, dans les limites de cette trajectoire ;
5. De sensibiliser et de former l'ensemble des parties prenantes (depuis les industriels jusqu'aux

## 6. CONCLUSION

Nous partageons tous et toutes la volonté de pérenniser l'activité scientifique spatiale française pour les générations actuelles et futures. Nous proposons donc une feuille de route ambitieuse qui répond aux enjeux environnementaux et sociétaux, qui s'appuie sur une amélioration de notre efficacité et sur une politique de sobriété, tout en garantissant l'absence de transfert de charge et d'effet rebond.

L'absence de régulation environnementale dans ce secteur en forte croissance, notamment avec

rentes temporalités. Cela signifie de définir et de mettre en place la trajectoire de réduction de l'empreinte environnementale des APR et de la R&T, de l'ensemble des infrastructures du spatial, de la globalité des activités scientifiques spatiales, dont les missions. La sélection de celles-ci doit permettre d'assurer leur retour scientifique optimal en en donnant la responsabilité à l'ensemble des scientifiques des communautés concernées, incluant les plus jeunes.

Soulignons que les éléments précédents concernent uniquement la problématique de l'atténuation. Nous préconisons donc d'inclure les questions de résilience dans la réflexion globale du secteur.

utilisateurs) à la transition environnementale ;

6. D'optimiser l'existant : augmenter la durée d'exploitation des missions, maximiser l'utilisation des données scientifiques, mutualiser et limiter les infrastructures sol, intégrer le réemploi, le recyclage et l'écoconception ;
7. De privilégier la coopération, de partager les données et de réduire la compétition ;
8. De placer les questions environnementales au cœur de la politique spatiale scientifique (notamment assumer ses responsabilités vis à vis de la société, endosser sa place de pionnier dans la filière et garder confiance en l'avenir) et d'anticiper le besoin de résilience.

Les recommandations susmentionnées sont présentées par thème, sans préjuger d'une éventuelle priorisation (temporelle, faisabilité ou efficacité).

L'émergence du NewSpace, impose une approche de réduction ambitieuse pour le spatial scientifique, accompagnée de recommandations concrètes balisant ainsi pour tous, la direction à suivre pour offrir un avenir viable.

En effet, nos projets s'inscrivent dans le temps long, nos décisions aujourd'hui ne doivent pas se concrétiser par des réalisations non acceptables et non soutenables demain. Elles doivent faire partie d'une démarche vertueuse, pertinente, et pérenne. De plus, pour que la communauté scientifique

conserve sa crédibilité, le spatial scientifique doit prendre toute sa part dans l'effort sociétal de réduction de l'empreinte environnementale, de façon responsable et en toute transparence. De même, la science ne doit pas servir de caution à des initiatives désastreuses du point de vue environnemental.

Nous faisons face à des méconnaissances actuelles qui méritent de porter les efforts sur des travaux académiques afin de répondre à des questions fondamentales. Ces questions concernent à la fois les impacts physiques du spatial sur l'environnement, et aussi les bénéfices sociétaux des missions spatiales. Ce dernier sujet doit être abordé, débattu et tranché, afin de disposer, pour les missions décidées, de la balance bénéfices sociétaux versus coûts environnementaux la plus favorable.

On pourrait craindre que de telles mesures entraînent une perte de compétences dans une course à l'international qui s'accélère. En réalité celles-ci augmentent la résilience du spatial scientifique et assurent la continuité de l'activité dans une société bas carbone, sur le très long terme.

Nous avons donc l'opportunité unique de faire du spatial scientifique français un modèle, précurseur, face à des enjeux environnementaux, et donc sociétaux, urgents et majeurs qui nous obligent à titre individuel, comme collectif.

<sup>18</sup> Avis 2023-45 du COMETS du CNRS.

# UNE STRATEGIE INTEGRANT TOUS LES POSSIBLES : QUELS MOYENS POUR QUELLES AMBITIONS ?

Yves André ; Fabrice Arduin ; Gilles Bergametti (président sortant du CPS) ; Matthieu Berthomier ; Baptiste Cecconi ; Selma Cherchali ; Cathy Clerbaux ; Bruno Cugny (animateur du groupe) ; Agnès Ducharne, François Forget ; Jean-Marie Hameury (président entrant du CPS) ; Karine Issautier ; Christophe Laporte ; Laurence Lavergne ; Laurence Lorda ; Didier Massonnet ; Isabelle Panet ; Frédéric Parol ; Hervé Roquet ; Marc Sauvage ; Céline Tison ; Paola Van-Troostenberghe.

Ce texte est une synthèse des réflexions menées par les différents groupes, Ceres, Tosca, groupes thématiques et groupes transverses, et bien entendu le CPS. Il représente la position du CPS. Il ne reprend pas les priorités scientifiques exprimées dans les rapports de synthèse du Ceres et du Tosca, qu'il

endosse. Il a pour ambition, à partir de l'analyse de ces priorités, de contribuer à l'élaboration de la stratégie scientifique du Cnes dans un contexte très évolutif, tant sur le plan national qu'international.

## 1. QUELS ENJEUX POUR DEMAIN (ET APRÈS-DEMAIN) ?

L'objectif premier de la communauté scientifique est de faire progresser notre connaissance du monde qui nous entoure. Les données spatiales contribuent aux progrès du savoir dans nombre de disciplines, mais il en est deux pour lesquelles cet apport est décisif, et même vital : les sciences de l'univers et les sciences de la Terre. Si on veut observer l'univers ailleurs que dans la bande limitée du spectre électromagnétique qui n'est pas absorbée par l'atmosphère, ou explorer *in-situ* les planètes du système solaire ou l'héliosphère, il est indispensable d'aller dans l'espace. De même, l'étude de la planète Terre requiert des observations couvrant l'ensemble – ou à tout le moins de larges fractions – de la planète, avec une bonne résolution spatio-temporelle qui ne peuvent être réalisées que depuis l'espace. Enfin, l'espace offre un environnement stable sur de longues durées et dans lequel la pesanteur est pratiquement nulle, indispensable pour certaines expériences de physique fondamentale, de sciences de la matière ou de la vie. Dans de très nombreux cas, le lien modèle – données est fondamental et les données satellitaires constituent une base essentielle de la modélisation numérique.

Cet objectif de progression des connaissances se conjugue avec d'autres objectifs sociétaux, en particulier ceux relatifs aux crises environnementales auxquelles l'humanité doit faire face, notamment la crise climatique.

Par ailleurs, le progrès des connaissances ne se

conçoit que dans un contexte où les résultats de la recherche sont largement diffusés et les données ouvertes, donc très compétitif au plan international. Un enjeu important pour la communauté scientifique française – et européenne – est de rester compétitive dans un contexte où les équilibres économiques, géopolitiques et scientifiques évoluent rapidement.

### 1.1 DES AMBITIONS FORTES

Les priorités scientifiques affichées lors de ce séminaire de prospective, comme lors des précédents séminaires, sont ambitieuses. Dans le domaine des sciences de l'univers, la détection des signatures des ondes gravitationnelles primordiales pour comprendre la physique de l'inflation, la compréhension du cycle de la matière, depuis la formation des étoiles dans le milieu interstellaire jusqu'à leur fin de vie, la question de l'habitabilité des planètes et satellites du système solaire sont quelques exemples d'objectifs difficiles auxquels s'attaque la communauté scientifique depuis plusieurs années, avec des progrès qui, bien que notables, sont loin d'avoir épuisé le sujet. De même, les sciences de la Planète étudient de façon intégrée le système Terre pour comprendre son évolution dans le temps et l'espace, ce qui passe par la compréhension des différents cycles (cycle de l'eau, cycle du carbone, cycle de l'énergie) tant au travers de leurs stocks que de leurs flux et des interactions entre ses enveloppes fluides et solides ; elles analysent l'impact de l'homme sur le système terrestre et l'impact de

ces changements sur l'homme ; elles s'intéressent autant à des régions habitées qu'à des régions reculées, voire inaccessibles par l'observation directe de notre planète, l'intérieur de la Terre par exemple, dont on tente de comprendre le fonctionnement, sa composition et sa structure thermique, le mode de circulation des éléments dans le manteau ou encore la génération du champ magnétique terrestre.

Les données qui permettront de répondre à ces questions seront souvent obtenues à partir de missions innovantes et ambitieuses, ou, dans le cas des sciences de la Terre, de missions pouvant être moins innovantes mais récurrentes, notamment pour répondre au besoin de séries temporelles à long terme, nécessaires pour observer les changements des systèmes anthropisés, et, dans bien des cas, complétées par des observations depuis le sol ou des mesures *in-situ*. La difficulté se situe alors soit dans les techniques de mesure elles-mêmes, soit dans la complexité de la mission, soit dans le traitement et l'assimilation de données. Dans le domaine des sciences de l'univers, les instruments sont souvent à la limite du possible (voire au-delà dans les phases préliminaires des projets) ; la mesure de variations relatives de distances inférieures à  $10^{-20}$  pour la détection des ondes gravitationnelles dans le cadre de la mission Lisa en est un bon exemple. Dans le domaine des sciences de la Terre (et dans une moindre mesure en sciences de l'univers), la nécessité d'assimiler et d'hybrider des données issues de multiples sources (observations et modèles) pose un défi qui reporte les difficultés des missions sur l'analyse des données ; le besoin de garantir la disponibilité de données à haute résolution spatiale et temporelle se traduit par un coût de mission important et une empreinte environnementale qui peut être significative. En planétologie, emporter une charge utile significative jusqu'à Uranus ou Neptune génère un temps de croisière de plusieurs années, immédiatement synonyme d'un coût élevé et d'une planification long terme. Pour les plasmas spatiaux, multiplier les points de mesure sans réduire leur qualité en chaque point est également un défi. Dans tous les cas, il faut traiter des ensembles de données de plus en plus volumineuses et complexes qui peuvent nécessiter de recourir à des méthodes sophistiquées d'analyse.

Les ambitions scientifiques se traduisent donc par des missions souvent complexes et/ou coûteuses,

par leur profil instrumental ou par leur traitement. C'est une tendance structurelle lourde qui ne s'infléchira pas sur le moyen/long terme.

### 1.2 UN CONTEXTE EN ÉVOLUTION RAPIDE

Le paysage tant national qu'europpéen et international a fortement évolué ces dernières années. Les points les plus remarquables sont les suivants :

- **Un contexte politique privilégiant les applications.** En France, le Cnes a désormais comme tutelle principale le ministère de l'économie, des finances et de la souveraineté industrielle et numérique, le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche restant tutelle avec le ministère des armées. Parmi ses objectifs, le Cnes doit être moteur de l'écosystème spatial national et européen dans un contexte newspace. Cette tendance vers les applications est accentuée par l'émergence d'un marché de surveillance de l'environnement avec des possibilités de commercialiser des services auprès d'acteurs publics ou privés. Le faible retour pour les partenaires académiques du volet spatial du plan France 2030 (2% du budget, loin des 10% affichés), dû à l'inadéquation des critères de sélection et des contraintes sur le montage des projets, est une manifestation de cette évolution. En Europe, on note le développement significatif du programme Copernicus qui allie un programme spatial ambitieux (les nouvelles missions Sentinel-Expansion et Sentinel-New Generation s'ajoutant aux Sentinel) et des services. En parallèle, le programme exploration de l'Esa prend de l'ampleur. La science n'est plus le moteur principal du spatial comme cela avait été le cas lors de la création de l'Esa, même si le programme Copernicus fournit et fournira des données fondamentales pour la science et que l'exploration lunaire peut offrir des opportunités à considérer.
- **Un désengagement à confirmer des maîtres d'œuvre industriels (MOI) historiques sur les missions scientifiques ?** Pour la première fois, on a vu des MOI majeurs être très réticents à répondre à certains appels d'offres du Cnes. Les causes doivent être analysées finement pour déterminer s'il s'agit d'un phénomène conjoncturel, ou plus structurel qui pourrait traduire une réticence affirmée des MOI à s'engager sur

des missions ou des instruments présentant un triptyque risque / coût / rentabilité d'un marché ultérieur défavorable. Il est trop tôt pour en tirer des conclusions définitives, mais ce point doit faire l'objet d'une grande vigilance car il conditionne la capacité de l'Europe à développer les missions innovantes indispensables pour rester compétitive. Malgré l'émergence du newspace, ces missions requièrent un niveau technologique atteignable uniquement par les MOI à ce jour.

- **Un contexte programmatique international tendu.** Outre les difficultés du programme d'exploration de Mars, suite à l'arrêt de la participation de la Russie au programme Exomars et à la sous-estimation des coûts du programme de retour d'échantillons martiens mené en collaboration entre la Nasa et l'Esa, la fin programmée de la station spatiale internationale (ISS) pose la question de l'accès à l'espace dans les domaines des sciences de la vie et de la matière, celles-ci reposant de façon quasi-exclusive sur l'utilisation de l'ISS pour mener leurs expériences dans l'espace.
- **Un contexte international évolutif.** La Chine, tout comme l'Inde sont désormais des acteurs majeurs et incontournables du domaine spatial. La Chine affiche clairement une volonté politique de devenir le leader mondial dans ce domaine. Très vraisemblablement, les Etats-Unis ne voudront pas se laisser distancer, et vont (ou ont déjà) renforcer leur investissement dans le spatial. Si l'Europe ne veut pas disparaître du paysage, un effort significatif sera nécessaire. Par ailleurs, de nouveaux pays, tels que les Emirats Arabes Unis rentrent sur la scène avec des ambitions fortes et les moyens financiers de les réaliser. Les coopérations internationales restent des opportunités majeures pour développer les missions spatiales, mais sont soumises aux aléas géopolitiques (voir l'arrêt des collaborations avec la Russie, partenaire historique de la France, suite à l'invasion de l'Ukraine, et l'impossibilité d'utiliser des Soyouz). Les tensions internationales actuelles font craindre des modifications profondes des capacités de montage de missions innovantes.
- **Une demande sociétale forte de réduire l'empreinte environnementale.** La tutelle du Cnes lui a demandé de réduire son empreinte environnementale avec une attention particulière

à l'empreinte carbone et l'empreinte sur la biodiversité ; le Cnes a initié une démarche en interne visant à estimer l'empreinte environnementale de ses missions pour, à terme, mieux la contrôler. Par ailleurs, les astronomes sont particulièrement concernés par la pollution des orbites, du ciel nocturne et de l'environnement électromagnétique. Celle-ci résulte pour beaucoup de projets de très grandes constellations à visées commerciales par les acteurs du newspace, mais, dans ce contexte, la mise en avant par les scientifiques de constellations pour des objectifs scientifiques doit se justifier aussi sur ces aspects. Cette préoccupation doit être intégrée à tous les développements de l'écosystème spatial dans son ensemble.

- **Le Cnes, agence de programme chargée de l'espace.** Lors de son discours du 7 décembre 2023, le président de la République a demandé au Cnes d'assumer le rôle d'agence de programme en charge de l'espace, réaffirmant ainsi sa mission définie par la loi de 1961, fondatrice du centre. Le rôle et le mode de fonctionnement de l'agence ne sont pas encore clairement établis ; ce peut être une opportunité de renforcer et d'améliorer la coordination entre les organismes contribuant à la recherche spatiale. Il n'en reste pas moins que le maintien de la position de la science dans un Cnes qui voit évoluer certains de ses piliers historiques (turbulences dans le domaine des lanceurs avec l'irruption des acteurs du newspace, positionnement vis-à-vis des industriels, défense avec le commandement de l'espace installé à Toulouse, etc.) peut être source d'inquiétude.

### 1.3 DES DÉFIS À RELEVER

Dans ce contexte, le maintien de la compétitivité scientifique et technique et de la capacité à réaliser les missions jugées prioritaires par la communauté scientifique française imposent de relever plusieurs catégories de défis. Ils sont énumérés ici et seront détaillés dans la suite de ce rapport avec quelques pistes à explorer pour y faire face.

#### 1.3.1 RELEVER LE DÉFI POSÉ PAR LES AMBITIONS CHINOISES ET AMÉRICAINES

Pour que l'Europe ne disparaisse pas du paysage international marqué, on l'a vu, par la rivalité Etats-Unis – Chine, il faut renforcer l'Esa pour qu'elle soit

plus efficace et plus réactive. En effet, les missions les plus ambitieuses qui peuvent se comparer aux grandes missions américaines ne sont réalisables que dans un cadre européen. Cela passe par le maintien, voire le renforcement du soutien financier à l'Esa (notamment du programme Sciences qui a perdu en pouvoir d'achat malgré l'arrivée de nouveaux Etats-membres, accompagné, le cas échéant, d'une augmentation du budget propre du Cnes, voir plus bas). Le budget Esa dédié à la science restera, quoi qu'il arrive, largement inférieur à celui de la Nasa, même si une comparaison directe a peu de sens en raison de différences dans la façon de comptabiliser les coûts et du fait que les budgets de l'Esa sont moins soumis aux à-coups politiques que celui de la Nasa. Cela passe aussi par des réformes internes à l'Esa comme on le verra plus loin.

Par ailleurs, il faut mieux faire entendre les positions françaises à l'Esa et à la Commission européenne et renforcer les activités de lobbying pour les amener à un niveau comparable à celui de nombreux autres pays, petits ou grands.

#### 1.3.2 MAINTENIR UNE CAPACITÉ D'INNOVATION

Pour assurer notre compétitivité sur le long terme, il est essentiel de maintenir un programme de préparation du futur ambitieux (actions de R&T, démonstrateurs, phases 0/A, programmes exploratoires, etc.). La montée en TRL peut souvent être facilitée par le développement de démonstrateurs au sol ou aéroportés (ballon ou avion) à vocation scientifique. Enfin, il faut saisir les opportunités du contexte newspace pour créer des partenariats entre les nouveaux entrants et les laboratoires qui peuvent être bénéfiques sur le long terme.

L'issue des activités de R&T peut être très incertaine et elles sont par nature risquées, ce qui, pour des industriels, correspond à un coût élevé. Les laboratoires, qui ne sont pas soumis à des exigences de rentabilité, doivent donc être moteur dans ces activités, en particulier celles dont le débouché commercial est loin d'être garanti.

#### 1.3.3 MAXIMISER L'USAGE DES DONNÉES SPATIALES

Depuis une décennie, le volume de données est en forte augmentation avec une diversité croissante de leurs sources. La technologie, à la fois algorith-

mique (intelligence artificielle) et matérielle permet d'accompagner cette explosion de données. Il ne s'agit plus de les traiter de façon isolée mais de les hybrider pour atteindre un niveau d'information toujours plus riche. L'essor des jumeaux numériques en est l'expression la plus emblématique, amenant une fusion de la modélisation, de l'exploration des possibles et de la prédiction ; ce ne sont pas des modèles autonomes et ils ont un besoin impératif de données. Cependant, les données restent largement sous-utilisées de par leur haute technicité et des accès qui restent souvent cloisonnés. Les questions de traitements massifs de données complexes restent un enjeu tant pour les sciences de la Terre que pour les sciences de l'univers.

Le Cnes doit encourager les initiatives de simplification, d'illustration et d'explication pour l'accès à la donnée spatiale. Les développements de l'infrastructure de recherche Data Terra en sciences de la Terre doivent être poursuivis en maintenant une vigilance sur l'objectif de répondre aux besoins de la recherche, tout comme la contribution Cnes sur l'accès aux données (portail Geodes), pierre angulaire du dispositif. Pour les sciences de l'univers, l'Esa et la Nasa assurent l'archivage et la mise à disposition des données provenant des missions dont elles ont la responsabilité et des pôles de données existent déjà pour la physique solaire et la physique des plasmas, mais cela ne couvre pas tout. La recommandation faite en 2019 de définir, en concertation avec le CNRS-Insu, les dispositifs pertinents (pôles de données et services ou autres) à mettre en place, en précisant leur périmètre, est toujours valide. Comme dans le cas de Data Terra, coordonner, fédérer et optimiser l'ensemble des institutions, dispositifs et moyens existants œuvrant dans ce domaine constitue une des ambitions importantes, à l'échelle nationale comme aux échelles européennes et internationales.

#### 1.3.4 FORMER DES SCIENTIFIQUES

Le précédent séminaire de prospective avait souligné le besoin de développer ou de renforcer les filières de formation aux métiers du spatial ou en lien avec le traitement des données spatiales. Cette recommandation demeure, plus forte encore dans un contexte où l'attrait des disciplines scientifiques auprès des jeunes diminue de façon très inquiétante, notamment chez les filles. Les centres spa-

tiaux universitaires traduisent la sensibilisation de la communauté universitaire aux débouchés des métiers du spatial ; un bilan mériterait d'en être tiré. Il faut souligner, comme en 2019, que la formation se fait aussi au travers de stages, de contrats d'apprentissage et de thèses dans les équipes projet de grandes missions spatiales qui, au-delà des techniques spatiales, forment à la conduite de grands projets internationaux. Le besoin concerne la formation initiale, comme la formation continue. Enfin, une diffusion plus large et une meilleure visibilité de la cartographie des formations aux métiers du spatial, réalisée en 2020 à la demande du Cnes et du MESR et en cours d'actualisation, serait bénéfique pour les étudiants qui cherchent à s'engager dans ce domaine. D'autres initiatives, souvent locales, existent mais gagneraient à être coordonnées.

L'émergence du newspace, en posant des questions qui débordent le seul domaine scientifique (juridique, par exemple) et à l'interface entre recherche et finalités industrielles, fait émerger des besoins nouveaux de formation pour des personnels scientifiques et techniques déjà en activité dans le secteur mais aussi une opportunité de réorienter vers ce secteur des personnels issus d'autres disciplines. Dans les deux cas, la réponse à ces besoins passe par des actions de formation permanente.

Ces sujets, comme d'ailleurs la possibilité de mieux tirer parti de l'attrait du spatial, des sciences liées à l'environnement ou des sciences de l'univers auprès des jeunes pour renforcer les filières scientifiques tôt dans le cursus universitaire, ne peuvent aboutir concrètement sans un partenariat mieux formalisé avec les universités. Ils pourraient être abordés dans le cadre nouveau de l'agence de programme.

### 1.3.5 RÉSOUDRE LES TENSIONS ENTRE RESSOURCES PRÉVISIBLES, AMBITIONS ET DÉFIS SCIENTIFIQUES

Il faut s'assurer que les ressources disponibles, tant financières que (surtout) humaines, sont à la hauteur des ambitions scientifiques. Or, on voit que dès à présent, il existe des tensions dans ce domaine, qui risquent de croître à court et moyen terme si les recrutements, indispensables, ne permettent pas de compenser l'ensemble des départs et de couvrir les nouveaux besoins. Face à ce risque, la stratégie, classique, est double. Il faut optimiser le

coût complet des missions, ce qui suppose de bien identifier les objectifs scientifiques et la stratégie instrumentale à développer, de construire le partenariat adapté qui valorise les compétences scientifiques et techniques nationales tout en maintenant la part française à un niveau raisonnable, alors que, dans les consortia instrumentaux, la tentation est grande de maximiser la contribution. L'autre option est de rechercher des compétences académiques hors des laboratoires spatiaux traditionnels, tant sur l'instrumentation que le traitement des données. Enfin, sans que cela ne réduise les coûts totaux, il faut reconsidérer la répartition des tâches laboratoires / Cnes / industrie.

### 1.3.6 RÉDUIRE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE LA RECHERCHE SPATIALE

La crise climatique, qui s'inscrit dans une problématique environnementale plus large, impose des mesures fortes de réduction de l'empreinte environnementale au niveau mondial ; la communauté scientifique doit évidemment participer à cet effort. Le groupe spécifique « Réduction de l'empreinte environnementale des activités scientifiques spatiales » a été mis en place dans cet objectif et a émis un certain nombre de recommandations pratiques à court terme qui font consensus ; on peut par exemple citer la nécessité de :

- poursuivre les efforts de quantification de l'empreinte du spatial (scientifique) : projets spatiaux, activités de R&T et infrastructures sol liées aux activités spatiales ;
- renforcer la mutualisation et la réutilisation des moyens sols en support au développement d'instruments spatiaux et rationaliser le développement de nouvelles infrastructures à l'échelle locale ;
- encourager les missions ballons comme option potentielle des démonstrateurs technologiques ;
- favoriser le financement de recherches sur l'empreinte environnementale des activités spatiales ;
- sensibiliser et former l'ensemble des personnels à la transition environnementale ;
- appliquer l'écoconception à toutes les activités depuis les projets R&T jusqu'aux activités de développement, de réalisation et d'exploitation de missions spatiales ;
- favoriser au maximum le recyclage, le réemploi,

et la mutualisation des ressources utilisées pour les projets de R&T et la conception des missions spatiales sur toute leur durée de vie ;

- ouvrir davantage les demandes APR ainsi que les sujets de doctorat et post-doctorat à l'exploitation de données d'archives (y compris hors missions européennes).

Ces mesures, pour autant qu'elles ne posent pas de difficulté pratique insurmontable, peuvent être mises en place très rapidement. On peut également consulter l'avis<sup>1</sup> du comité d'éthique du CNRS « Intégrer les enjeux environnementaux à la conduite de la recherche – Une responsabilité éthique »

Les estimations faites par le groupe spécifique montrent que ces mesures ne permettront pas d'atteindre l'objectif global de diminuer d'ici 2050 les émissions de gaz à effet de serre d'un facteur

## 2. QUELLES MISSIONS ?

### 2.1 QUELLES AMBITIONS, QUELS COÛTS POUR LES MISSIONS DE DEMAIN ?

Disposer d'une vaste palette de missions de toutes tailles est indispensable pour atteindre les objectifs scientifiques identifiés dans les prospectives du Ceres et du Tosca. Cependant, la taille des missions est très différente en fonction des domaines.

- Les très grandes missions (XL, classe 2 G€ et au-delà, telles que **HST, JWST, Lisa, Athena**<sup>2</sup>) sont des spécificités du domaine des sciences de l'univers et de l'exploration. Ces missions phares sont des priorités majeures. Leur complexité résulte de contraintes fondamentales dues à la physique, tant pour la sensibilité que la résolution spatiale. En outre, certains domaines de longueur d'onde, notamment le submillimétrique et l'infrarouge nécessitent une cryogénie poussée parfois à des limites extrêmes (50 mK pour un des instruments d'Athena). Enfin, la distance des objets planétaires à explorer, conjuguée au besoin d'emporter une charge utile complexe, explique le coût des missions vers Neptune par exemple.
- Les grandes missions (L), de l'ordre de 1G€, sont

6 par rapport à 1990, qui permettrait d'atteindre la neutralité carbone. Sauf à imaginer que la situation soit très différente pour les autres activités humaines émettrices de gaz à effet de serre, des mesures contraignantes seront nécessaires et les efforts devront être répartis équitablement (ce qui ne veut pas dire uniformément) entre les différentes activités humaines, économiques et industrielles, en fonction, en particulier, de leur bénéfice pour la société. Il s'agit d'une décision éminemment politique. En l'absence de cadrage global, sélectionner les projets en fonction de leur impact environnemental, suppose qu'on soit capable d'évaluer si le gain en connaissance d'un projet particulier justifie son impact environnemental. Les comités scientifiques ne sont pas armés aujourd'hui pour cela.

dans le domaine des sciences de l'univers, le prolongement de la catégorie ci-dessus, avec les mêmes justifications ; **Juice**, mission de l'Esa vers Jupiter, en est un bon exemple. Dans le domaine des sciences de la Terre, on trouve des missions très ambitieuses comme **Swot**<sup>3</sup>.

- Les missions moyennes (M), de quelques centaines de M€, sont incontournables en sciences de l'univers et exploration et en sciences de la Terre ; les missions innovantes du programme Earth Explorer, préparatoires à des missions Copernicus rentrent dans cette catégorie, de même d'ailleurs que la plupart des missions Copernicus et de nombreuses autres missions.
- Les petites missions (S, moins de 200 M€) sont pertinentes sur des questions scientifiques ciblées en sciences de l'univers, notamment dans le domaine de la physique des plasmas spatiaux, et en sciences de la Terre. Il est possible, mais cela reste encore à démontrer, que l'amélioration de la revisite puisse aussi passer par de plus petits satellites, un peu moins performants mais moins coûteux (< 60 M€), ce qui renforcerait le poids de cette classe de mission pour les sciences de la Terre si, au-delà des enjeux appli-

<sup>1</sup> <https://comite-ethique.cnrs.fr/avis-du-comets-integrer-les-enjeux-environnementaux-a-la-conduite-de-la-recherche-une-responsabilite-ethique/>

<sup>2</sup> Le Hubble Space Telescope (HST), le James Webb Space Telescope (JWST), Lisa et Athena sont des missions d'astronomie décrites dans le rapport du GT astronomie-astrophysique. Le HST, JWST et Athena sont des télescopes qui observent dans le visible, l'infrarouge et les rayons X respectivement ; Lisa est dédié à la détection d'ondes gravitationnelles.

<sup>3</sup> Swot (Surface Water Ocean Topography) est une mission Nasa – Cnes, décrite dans le rapport du GT Océan

catifs, des objectifs scientifiques d'intérêt sont atteignables.

### 2.1.1 LE NEWSPACE : DES OPPORTUNITÉS, MAIS LIMITÉES

Le newspace, défini ici comme l'irruption de nouveaux acteurs ayant un objectif commercial à court terme et fournissant de nouveaux moyens et/ou de nouveaux services, offre des opportunités qui doivent être examinées de près afin de voir si, et dans quelle mesure, elles sont utilisables pour couvrir des objectifs scientifiques pertinents et ambigus en complément des visées applicatives.

Ce sujet a été le thème d'un groupe de travail du précédent séminaire de prospective (et de celui-ci), mais l'application de technologies issues du newspace à la science et, plus encore, l'obtention de résultats scientifiques ont été plus lentes qu'espérées. Outre l'optimisme résultant de l'engouement pour cette nouvelle approche et la démonstration effective de plusieurs réussites en observation de la Terre, les difficultés ont parfois résulté de l'utilisation de méthodes traditionnelles de développement, moins adaptées à des nanosats<sup>4</sup>. L'objectif a souvent été de réduire les coûts en utilisant des plateformes standardisées plus que d'utiliser des méthodes et une philosophie du développement nouvelles qui sont un élément constitutif du newspace ; les promoteurs de ces missions, quelquefois experts d'un sous-ensemble assez limité du système complet, se sont retrouvés dans des rôles de maîtrise d'œuvre de bout en bout et ont dû se familiariser avec des technologies qu'ils ne maîtrisaient pas totalement.

On voit aujourd'hui se développer des projets de constellations de satellites pour l'observation de la Terre ou la météorologie de l'espace qui pourraient compléter les missions institutionnelles en permettant une revisite élevée, rendue possible par le bas coût de chaque satellite individuel, au prix d'une qualité de la mesure moindre. Les principaux domaines concernés sont l'hydrologie, l'imagerie multi- et hyperspectrale, la mesure des aérosols et des gaz à effet de serre et la surveillance de l'environnement spatial. Mais on reste au niveau du potentiel

en termes de démonstration de l'apport scientifique. Le retour de **C3iel**<sup>5</sup> (qui n'est pas stricto sensu du newspace en raison de l'absence d'objectifs commerciaux) sera très intéressant pour valider le concept sur un plan technique dans le cadre très particulier d'une mission qui a été conçue dans un but scientifique car, rappelons-le, le newspace a d'abord des visées commerciales et la science ne peut considérer les missions conçues dans cet esprit que comme d'éventuelles opportunités.

Par rapport aux missions scientifiques traditionnelles, l'utilisation de données issues de plusieurs petits satellites, mieux résolues temporellement et/ou spatialement mais de moins bonne qualité, reporte la difficulté sur le traitement de la donnée, d'autant plus quand le système a été optimisé dans un objectif qui n'est pas celui des scientifiques. Il pourrait alors être utile de développer des simulateurs d'observations pour s'assurer de l'utilité scientifique de ces projets de mission. Ils peuvent être de bons compléments à des missions à haute fiabilité et qualité sous réserve qu'une analyse amont permettent d'en prescrire la qualité minimum pour qu'une plus-value effective soit *in fine* constatée. C'est d'ailleurs l'approche retenue par l'Esa avec certaines des « Third Parties Missions » qui complètent les Sentinel.

Outre les questions sur la précision de la mesure, l'accessibilité des données pour un usage scientifique est un point critique ; il n'est pas raisonnable que la recherche fondamentale puisse être vue par les acteurs du newspace comme un client ordinaire qui aurait à payer comme les autres clients pour utiliser des données quand elle a contribué à développer les concepts et les traitements qui les sous-tendent. Il faut souligner à ce sujet que le newspace peut se nourrir de la recherche académique dans les domaines de l'instrumentation et du traitement des données, ce qui favoriserait son utilisation pour des objectifs scientifiques.

Le bilan environnemental est un autre écueil, puisque, à coût total fixé, le bilan en équivalent CO<sub>2</sub> d'une constellation de petits satellites est plus mauvais que celui d'un ou deux gros satellites (voir le rapport du groupe « newspace »).

Il n'en reste pas moins vrai que des projets classifiés (parfois abusivement) « newspace » tels que **Nanomagsat**<sup>6</sup> ou **Smash**<sup>7</sup> ont reçu un soutien fort de la communauté scientifique et sont ou pourraient être financés l'un dans un cadre Esa et l'autre France 2030. Il est important de continuer à les interclasser avec les projets plus traditionnels et de ne pas créer un guichet de financement spécifique qui laisserait à entendre que ce type de projet a besoin d'être protégé de la compétition pour être sélectionné. L'excellence doit rester déterminante pour la sélection des projets scientifiques et ce critère n'est pas pénalisant pour les projets newspace.

Enfin, il convient de souligner que La Lune, comme objet d'étude ou comme base possible, n'apparaît pas comme une priorité forte dans la prospective du Ceres (ni celle du groupe planétologie) en regard de l'importance qui est donnée à l'exploration lunaire dans le contexte newspace.

Il faut, par contre, garder une veille pointue sur les infrastructures bord et sol développées pour et par le newspace qui pourraient être réutilisées pour des missions à volet plus scientifiques et avec une performance maîtrisée. Il s'agit notamment des plateformes à bas coût, de segments sol simplifiés, et d'instruments miniaturisés.

### 2.2 QUEL CADRE DE RÉALISATION ?

Les missions de la classe XL ne sont réalisables que dans un cadre de collaborations internationales **dépassant l'Europe**. Il peut s'agir de missions européennes avec des contributions significatives, mais pas majoritaires, de partenaires extra-européens. Elles correspondent aux priorités les plus élevées de la communauté scientifique européenne, mais aussi internationale. La mission Lisa de détection des ondes gravitationnelles de basse fréquence en est une belle illustration. Réciproquement, l'Europe peut aussi participer à des missions initiées par la Nasa, seule agence capable de porter des missions scientifiques de cette ampleur ; un exemple en est le **James Webb Space Telescope** lancé par l'Esa et auquel les pays européens (et en particulier la France) ont contribué (et financé, puisque sur cette mission

comme pour la plupart des missions du programme obligatoire de l'Esa, l'instrumentation est fournie par les Etats membres) à l'instrumentation focale.

Dans le domaine des sciences de l'univers, les missions L et M sont portées par l'Esa dès lors que la participation de pays européens est significative. Lorsqu'elles sont réalisées dans un cadre bilatéral, la contribution française est nécessairement limitée (en pourcentage), et sa visibilité, sauf exception (un bel exemple en est la contribution française à la mission **Insight**<sup>8</sup>), modérée, voire modeste. Pour les sciences de la Terre, la flexibilité est plus grande, en raison de l'existence de sources de financement complémentaires (par exemple PIA) qui permettent des contributions très visibles à des missions ambitieuses, comme **Swot**. Cependant, le plafond budgétaire des Earth Explorer (EE) est un frein à l'innovation : des missions sont disqualifiées sur le seul critère coût alors que leur intérêt scientifique est très fort (voir les sélections EE11 et EE12).

Les petites missions sont normalement réalisées dans un cadre bilatéral, voire national. Sauf exception, le cadre Esa n'est pas le meilleur en raison de la capacité budgétaire des grands pays à réaliser ces missions seuls ou à deux et des surcoûts générés par les contraintes Esa. On notera néanmoins comme contre-exemple la mission d'étude du champ magnétique terrestre **Nanomagsat** qui sera réalisée dans un contexte Esa (programme Scout).

Enfin, des contributions hardware modestes à des missions d'envergure portées par de grandes agences (souvent Nasa ou Jaxa) ont généralement un fort retour scientifique. Elles s'appuient sur la compétence d'équipes dans des domaines scientifiques ou technologiques pointus qui les rendent incontournables et qui s'est construite par des contributions passées importantes à des projets d'envergure. Se limiter à ces seules missions optimiserait certes à court terme le rapport science / coût, mais entraînerait inéluctablement l'érosion à terme des compétences, de la visibilité des équipes et un abandon de la souveraineté nationale. L'Europe et la France ne peuvent avoir pour ambition d'être des acteurs de second rang.

4 A noter que le nanosat n'est pas une composante obligatoire du newspace, les industriels du newspace utilisant des satellites bas-coût, dans la gamme nano mais aussi mini

5 C3iel (Cluster for Cloud evolution, ClimatE and Lightning) est une mission franco-israélienne décrite dans le rapport du GT Atmosphère

6 Nanomagsat est un projet de nanosatellite pour la mesure du champ magnétique terrestre. Réalisé dans un cadre traditionnel et sans objectif commercial, c'est abusivement qu'il est considéré comme newspace.

7 Smash (SMAll Satellites for Hydrology) est un projet prioritaire décrit dans le rapport du GT SC

8 Insight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) est une mission Nasa d'exploration de Mars à laquelle la France a contribué en fournissant l'instrument principal, le sismomètre SEIS

## 2.3 QUEL RÔLE DES LABORATOIRES DANS LA RÉALISATION DES PROJETS ?

Cette question est intrinsèquement liée à celle des personnels, en particulier techniques, et de leurs compétences. Les laboratoires n'ont pas (et n'ont jamais eu) la capacité d'être maîtres d'œuvre des instruments les plus complexes ; par ailleurs, comme mentionné plus haut, les grands maîtres d'œuvre industriels (MOI) semblent de plus en plus réticents à prendre en charge la réalisation d'instruments scientifiques de haute complexité qui n'ont pas de suite commerciale évidente ou qui leur semblent trop risqués. Le Cnes apparaît donc incontournable comme maître d'œuvre des instruments complexes pour en assumer les risques, avec une limite liée à la disponibilité des personnels techniques du centre. Il doit cependant anticiper une demande accrue et faire les efforts nécessaires pour y faire face au mieux dans la limite de ses contraintes budgétaires.

Dans le domaine des sciences de la Terre, les charges utiles ne sont pas réalisées dans les laboratoires, mais ceux-ci ont un rôle central dans la définition des objectifs scientifiques des missions et dans le suivi des spécifications des instruments afin de s'assurer que les performances attendues permettront de répondre aux objectifs définis. Cela implique de maîtriser la physique de la mesure, de développer de simulateurs, de contribuer au segment-sol et de définir les activités calibration / validation (Cal/Val) qui permettront de s'assurer de la qualité finale des données.

Si les laboratoires contribuent si fortement à l'instrumentation spatiale, c'est qu'ils ont des atouts à faire valoir. Ils sont le lieu où peut s'exercer une synergie entre chercheurs (instrumentalistes ou non) et ingénieurs, où la prise de risque n'est normalement pas un problème. Cependant, le risque de perte de compétences est important et il est parfois difficile d'attirer et de recruter des chercheurs instrumentalistes ou spécialistes des données pour diverses raisons, l'une d'elles étant liée aux critères de recrutement et de promotions qui favorisent la production scientifique sous formes de publications. La responsabilité de la communauté scientifique est majeure, puisque c'est elle qui peuple les jurys de recrutement. Un fléchage plus fréquent par les tutelles serait une solution im-

populaire, mais efficace. Le financement de thèses par le Cnes est un élément important du dispositif, qui alimente la recherche académique mais aussi le Cnes et l'industrie. En ce qui concerne les personnels techniques, leur décroissance, beaucoup plus marquée pour les métiers de l'instrumentation que de l'analyse des données, est également très inquiétante ; elle met en danger la capacité des laboratoires à assurer les développements instrumentaux des missions spatiales des sciences de l'univers et à maintenir les compétences en instrumentation *in-situ* ou aéroportée qui sont nécessaires à la Cal/Val des missions spatiales et pour servir, comme démonstrateurs, au développement d'instruments innovants. Outre le non-remplacement de tous les départs, les salaires proposés sont sensiblement inférieurs à ceux du privé dans nombre de métiers, et donc peu attractifs pour les meilleurs candidats.

Face à ces dangers, qui ne sont pas nouveaux, la communauté scientifique a dans un premier temps tenté d'optimiser le système pour utiliser au mieux les ressources disponibles ; ces efforts peuvent et doivent se poursuivre, mais ils ne sont pas loin d'avoir atteint leurs limites. Les demandes de soutien ponctuel au Cnes, s'ils peuvent résoudre des problèmes immédiats, ne peuvent être érigées en système. Si l'évolution actuelle des personnels techniques ne s'inverse pas, un recours au support industriel plus important sera indispensable. Le SPS2019 avait affiché le besoin d'analyser la possibilité d'industrialiser des filières d'instruments très utilisés (par exemple les magnétomètres). Cela n'a été fait qu'en partie (les magnétomètres d'**Helioswarm** seront réalisés en partenariat avec l'industrie) mais pourrait être généralisé. Ce recours accru à l'industrie sera sans doute plus coûteux, en raison des différences de salaires pratiquées dans les organismes de recherche et dans l'industrie, de la vocation des industriels à faire des bénéfices, mais aussi, et peut-être surtout parce que la prise de risque a un coût important, et les priorités scientifiques, notamment en sciences de l'univers (mais aussi dans le domaine des sciences de la Terre, voir les lidars), demandent des instruments aux limites de la technologie. C'est néanmoins le prix à payer par le Cnes pour pallier en partie la décroissance des personnels permanents dans les laboratoires. Enfin, si la frilosité des MOI se confirme, le Cnes pourrait, dans certains cas, être amené à prendre des maîtrises d'œuvre avec sous-traitance PME sur

des sujets qui relèveraient normalement de l'industrie ; cela aura des conséquences sur les ressources et le positionnement traditionnel du Cnes qu'il convient dès à présent d'anticiper.

La poursuite des activités de R&T dans les laboratoires est vitale pour l'avenir à long terme, mais se heurte aux tensions sur les personnels techniques des laboratoires qui, à juste titre, mettent la prio-

## 3. RECHERCHER DE NOUVELLES COMPÉTENCES ACADÉMIQUES ET SOUTENIR L'EXISTANT

### 3.1 DONNÉES MASSIVES ET COMPLEXES

Dans un contexte où les traitements de données par intelligence artificielle se multiplient, où se développent les concepts de jumeaux numériques<sup>9</sup>, où l'accès massif aux données est un enjeu renouvelé avec par exemple les plateformes « intelligentes » de distribution de données multi-sources, les questions de traitement massif de données complexes restent un enjeu tant pour les sciences de la Terre que pour les sciences de l'univers.

Le SPS2019 avait fait le constat que le rapprochement avec les sciences mathématiques et informatiques était une nécessité, pour d'une part importer les outils et méthodes développés par ces dernières qui ne sont plus l'objet de recherches amont et qui ne demandent qu'à être utilisées, mais aussi pour mener en commun des actions de recherche permettant le développement de nouveaux outils originaux. Une action conjointe Cnes / Miti (CNRS) a joué un rôle d'incubateur et a permis de faire émerger des collaborations prometteuses. Elle mériterait d'être poursuivie un an ou deux, et surtout d'être prolongée par d'autres actions qui inscriraient dans la durée le soutien nécessaire à ces recherches interdisciplinaires ; un financement de thèses et de post-doctorats est indispensable, tout comme le recrutement de jeunes chercheurs dans ce domaine. L'affichage explicite des données spatiales dans les thèmes ou les mots clés de la commission interdisciplinaire du CNRS chargée des recrutements de chercheurs sur la thématique « science et données » montrerait l'importance que le CNRS leur accorde. Par ailleurs, l'élargissement

<sup>9</sup> Le Cnes développe la Digital Twin Factory, boîte à outils pour fabriquer des jumeaux numériques locaux et thématiques. Cette initiative sera un atout pour les laboratoires et les industriels dans l'exploitation des données et dans l'appropriation de la thématique des Jumeaux Numériques, permettant un positionnement européen et international.

rité sur les engagements déjà pris. Une réorganisation au profit d'une plus grande sous-traitance des activités de réalisation lorsque cela est possible (et ce n'est pas toujours le cas, voir plus haut) serait une des pistes pour des engagements moindres et une orientation R&T plus marquée. Il faut rester cependant vigilant à garder l'expertise technique développée au fil des ans.

de ces actions à d'autres organismes (en particulier l'Inria) est indispensable par souci de cohérence globale du dispositif, parce que les compétences sont inégalement réparties dans les organismes et pour donner à cette démarche la visibilité qui lui manque aujourd'hui en l'inscrivant dans une stratégie d'ensemble. C'est un des sujets qui pourrait être discuté dans le cadre de l'agence de programmes.

### 3.2 INSTRUMENTATION

Un effort comparable mérite d'être mené pour l'instrumentation. L'importance de ce domaine est reconnue par le CNRS-Insu, ne serait-ce qu'à travers la nomination d'un directeur adjoint scientifique en charge des développements instrumentaux innovants pour la recherche et l'observation (DIIRO). Depuis 2021 un programme de soutien au développement instrumental a été mis en place. Il permet d'allouer jusqu'à 100 k€ sur deux ans à des projets novateurs dont le potentiel de transversalité inter-domaines est avéré ou en devenir, afin de faire collaborer des laboratoires / domaines / instituts / organismes différents qui proposent de faire monter en TRL un développement instrumental original. Des rencontres entre l'Insu et l'Insis ont été initiées en 2023 afin d'identifier des axes de travail commun qui devraient conduire à des collaborations futures. Une action conjointe Cnes / CNRS, éventuellement élargie à d'autres organismes pour développer des collaborations avec des laboratoires non spatiaux ayant des compétences fortes sur les détecteurs, composants, etc., par exemple rattachés à l'Insis, serait très bénéfique. Ces développements concerneraient dans un pre-

mier temps la R&T, en s'étendant éventuellement jusqu'au démonstrateur, voire au-delà, pourvu que le soutien nécessaire à ces laboratoires non-spatiaux aux techniques spécifiques du domaine spatial soit apporté.

Ces actions ne pourront atteindre leurs objectifs sans qu'on y consacre des moyens significatifs, allant au-delà d'appels à projets incitatifs. Elles nécessiteront l'affichage explicite de ressources financières qui, dans le domaine de l'instrumentation, ne peuvent pas être modestes. Il faudra aussi afficher la possibilité de recruter des chercheurs via des affichages de postes, des doctorants et éventuellement post-doctorants et CDD, pourvu que le recrutement de personnel temporaire n'obère pas la pérennité des nouvelles compétences acquises. Le Cnes pourrait y contribuer sur le modèle du programme avion/ballon mené dans les années 1995, tout comme les universités via par exemple les chaires de professeur junior, et éventuellement d'autres organismes. Peut-être autant que les moyens mis en œuvre, ce qui est essentiel pour la réussite de ce dispositif est son ancrage visible et explicite dans la durée traduisant ainsi son appropriation pleine et entière par le Cnes et ses partenaires.

Sur les sujets de l'instrumentation comme sur les données, il est essentiel de mettre en avant les aspects défi scientifique / numérique / instrumental, avec un accompagnement en termes de budget et de RH (chercheurs et ingénieurs permanents, doctorants, post-docs, éventuellement CDD) pour être attractif. Les projets ambitieux portés par les laboratoires sont en soi visibles et attractifs, mais ont

## 4. MAINTENIR UNE ACTIVITÉ SOUTENUE DE PRÉPARATION DU FUTUR POUR RESTER COMPÉTITIF SUR LE LONG TERME

Contrairement à la Nasa, à l'Esa, aux agences chinoises et indiennes et, dans une moindre mesure, à la Jaxa, le Cnes n'est plus une agence prescriptrice de missions scientifiques d'ampleur, mais peut être prescripteur de missions de plus petite taille (ce qui ne signifie pas peu ambitieuses)

besoin de s'inscrire dans une stratégie plus vaste des tutelles.

### 3.3 NOUVEAUX DOMAINES

Pour la première fois, l'appel à contributions du SPS a été explicitement ouvert aux sciences humaines et sociales (SHS). Cette thématique est actuellement traitée en partie dans le groupe de travail « surfaces continentales », mais le Cnes souhaite élargir la communauté scientifique qui s'intéresse au spatial, que ce soit en tant qu'objet d'étude (domaines du droit, de l'histoire, de la (géo)politique, etc.) ou pour utilisation de données spatiales qui peuvent apporter des éclairages nouveaux, même si parfois indirects. Ainsi, la biodiversité animale n'est pas observable par satellite mais on peut caractériser les changements environnementaux responsables de son évolution. Le développement du newspace couplé aux crises environnementales, la gestion et la prévision des risques, sont porteurs de questions sociétales qui doivent être abordées par les communautés académiques compétentes. On voit ainsi émerger de nouveaux domaines, souvent multi- ou interdisciplinaires dont il faut encourager le développement.

Le Cnes envisage la mise en place à terme d'un nouveau groupe thématique centré sur le domaine SHS qui viendrait épauler le thématicien actuellement en place. Le CPS regarde cette initiative avec un *a priori* favorable et considère que la question devra être instruite d'ici le prochain SPS en 2029, notamment en ce qui concerne le périmètre du nouveau groupe et les interfaces avec les groupes existants.

comme cela a été le cas par exemple avec **C3iel**<sup>10</sup> ou **Microcarb**<sup>11</sup>. L'objectif stratégique est donc de participer aux missions européennes. En effet, la France a décidé lors de la création de l'Esa de lui confier la réalisation des missions ambitieuses dans le domaine scientifique, ainsi que la participation

ciblée aux missions des agences partenaires prescriptrices, aux objectifs scientifiques essentiellement similaires aux nôtres, afin d'y sécuriser des positions scientifiques gages de futurs succès en termes de publications et de notoriété. Mais le Cnes se doit également de conserver la capacité d'être le maître d'œuvre de petites missions.

L'efficacité maximale de ce processus suppose l'entretien et le développement pérenne de capacités ou de technologies qui permettent à la France d'être un partenaire fiable et efficace, et dans l'idéal un contributeur essentiel à une capacité critique de la mission. Sont concernés le Cnes, les laboratoires qui développent des instruments (embarqués ou prototypes) ou des logiciels et les industriels. Ceci conditionne l'avenir à long terme, et l'apparente diminution des demandes d'action de R&T, si elle devait se confirmer, est, à ce titre, plus qu'inquiétante. En raison d'une limitation des ressources humaines, les laboratoires mettent logiquement, la priorité sur la réalisation de projets sur lesquels ils se sont engagés, au détriment de la R&T ; s'il est naturel que l'activité de préparation du futur fluctue en fonction des engagements, il est vital que soit conservée une activité significative de R&T. Ceci devrait être vérifié lors de la discussion sur la hauteur de l'engagement des laboratoires dans les projets.

Cet objectif se décline selon trois axes.

#### 4.1 L'ENTRETIEN DE FILIÈRES D'EXCELLENCE

Il faut préserver les capacités et le savoir-faire qui ont permis de remplir ces objectifs lors de précédentes missions tout en identifiant à l'avance les changements de situation qui pourraient rendre cette préservation inutile. Sans prétendre à l'exhaustivité, les techniques de sismologie (**Seis**<sup>12</sup>), de chromatographie (Mars et Titan), de mesures magnétiques et plasmas (search coils et spectrométrie plasma), de technique cryogénique (adiabatic demagnetization refrigerator – ADR), d'imagerie micro-onde passive (radiomètres) ou actives (altimètres), de sondage atmosphérique en infrarouge, sont reconnues par nos partenaires étrangers comme parfaitement maîtrisées en France et fai-

sant partie des savoir-faire assez uniques. Pour ces valeurs sûres, sous réserve de maintien des conditions évoquées ci-dessus, la participation aux missions ciblées est relativement « facile » et naturelle, parce que la France est le partenaire le plus évident et le plus simple à inclure dans le consortium. Ration du succès, il est parfois nécessaire de limiter la participation française si les sollicitations excèdent les capacités de réalisation pour garder un optimum entre contribution et position scientifique.

Les mesures à prendre dans ces filières de technologies maîtrisées en France et reconnues sont donc l'amélioration continue et surtout l'analyse critique de l'avenir de chacune d'entre elles. Le transfert vers l'industrie de celles qui conduisent à la réalisation d'instruments récurrents doit être très sérieusement envisagé dans un contexte où le potentiel technique des laboratoires décroît.

#### 4.2 LE MAINTIEN D'UN SAVOIR-FAIRE À BASE LARGE

Ce qui précède suppose l'existence et la pérennité d'un savoir-faire à large base, à moins d'identifier d'emblée une restriction dans les capacités possibles : ainsi, les générateurs d'énergie nucléaire sont *de facto* absents des réflexions, au moins jusqu'ici, en raison d'un ticket d'entrée très élevé et de perspectives d'utilisation trop incertaines. Aucune restriction de ce type n'est actuellement envisagée sur les filières instrumentales ou de support.

Les activités avions, ballons et nanosats peuvent aussi être considérées comme des moyens utiles au maintien du savoir-faire et à la formation des agents du Cnes comme des jeunes scientifiques, à condition que ces activités restent dans le temps court. Il faut cependant accepter de les dimensionner raisonnablement et de les mettre en balance avec, par exemple, une participation à une mission Esa ou en bilatéral. Enfin, les développements de projets en maîtrise d'œuvre interne sont aussi un élément traditionnel et important d'entretien du savoir-faire au Cnes.

Les thèses et post-doc en soutien à toutes les activités de préparation mentionnées ci-dessus contri-

<sup>10</sup> C3iel est une mission franco-israélienne dédiée à l'observation des nuages convectifs

<sup>11</sup> Microcarb est une mission dédiée à la mesure du CO<sub>2</sub> atmosphérique

<sup>12</sup> Seis (Seismic Experiment for Interior Structure) est l'instrument principal de la mission Insight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) de la Nasa pour l'étude de Mars.

buent à entretenir cette base de savoir-faire. Ces soutiens sont essentiels et pourraient être renforcés.

Le Cnes doit veiller à mieux informer ses partenaires, laboratoires et industriels des nouvelles possibilités ouvertes ; le processus de R&T a été modifié pour être plus flexible (plusieurs relèves par an, appels type « Challenges » très ciblés) et plus cohérent (regroupements en VIP, vecteurs d'innovation prioritaires), et d'autres mécanismes sont disponibles (démonstrateurs, projets exploratoires, « Proof of Concept »). Par ailleurs, une plus grande ouverture à des partenaires académiques moins traditionnels (par exemple CNRS ingénierie ou Inria) mais qui ont des compétences en recherche amont dans les domaines de l'ingénierie et des logiciels ferait sens dans un contexte de tensions sur les ressources humaines dans les organismes. Il faut aussi veiller à ce que leurs experts soient bien inclus dans les Comets (communautés d'experts). Une discussion dans le cadre de l'agence de programme peut fournir des éléments de réponse.

#### 4.3 LE DÉVELOPPEMENT DE NOUVELLES CAPACITÉS

On retrouve ici les ambitions d'offrir de nouvelles capacités soit dans la mesure (atomes froids, peignes de fréquences, spectrométrie de masse, lidars et plus généralement capteurs et détecteurs), soit dans la servitude instrumentale ou le système (cryogénie plus ou moins générique, matériaux particuliers, sous-systèmes ou composants électroniques, voire logiciels spécifiques). Ces nouvelles capacités sont toujours confrontées à un problème critique de synchronisation. N'étant pas prescripteur de missions, le Cnes ne maîtrise pas les plannings, avec le risque de ne pas être en mesure de réaliser à temps la montée en TRL d'une capacité ou de faire des efforts disproportionnés sur une capacité qui sera prête mais sans partenaire pour voler... Il est donc nécessaire de porter un certain nombre de pistes prometteuses jusqu'au TRL suffisant pour pouvoir rapidement atteindre la maturité nécessaire en cas d'appel d'offre ou d'opportunité internationale.

Il est cependant contre-productif de porter des technologies jusqu'à un TRL élevé sans assurance sur le besoin mission ni éléments critiques d'inter-

face. Il faut donc privilégier la réactivité et l'agilité pour mettre en place rapidement, dès avant la phase de dépôt d'une proposition à un appel d'offre par des scientifiques français qui auront ensuite besoin du soutien du Cnes, une aide à la construction du consortium scientifique (pour éviter des schémas trop complexes qui grèveront ensuite le projet pendant des années) ainsi qu'un plan d'action vigoureux permettant d'amener les contributions envisagées jusqu'au TRL d'entrée minimal.

#### 4.4 LES RESSOURCES HUMAINES DES LABORATOIRES

Il y a manifestement un problème d'adéquation entre les ambitions légitimes de la communauté française et les ressources humaines disponibles. En outre, les projections montrent que bon nombre de chefs de projets expérimentés et d'ingénieurs spécialisés vont partir à la retraite dans les dix ans qui viennent. Alors qu'il faudrait organiser des biseaux, la tendance dans les organismes est clairement à la réduction des effectifs. De plus, les salaires proposés sont peu compétitifs dans un marché où on peine à fournir les ingénieurs indispensables à l'industrie. Ceci conduit et va conduire à une tension forte sur les activités de préparation du futur et notamment celles qui sont les plus innovantes et les plus porteuses.

Comme pour ce qui concerne la réalisation d'instruments, une partie de la solution pourrait être de transférer les savoir-faire bien maîtrisés et reconnus vers l'industrie mais celle-ci a aussi ses problèmes et n'est, pour les plus grandes entreprises, parfois intéressée que s'il existe un marché commercial rentable. De même, on peut chercher de la ressource humaine ailleurs mais cela nécessite aussi des moyens et ne résoudra pas tout. Le constat demeure donc qu'une volonté politique et une stratégie de moyen terme (c'est à dire des ressources humaines correctement dimensionnées), est indispensable pour que la France ne devienne pas un acteur de second plan.

## 5. EUROPE ET INTERNATIONAL

Le groupe spécifique traitant de l'international a abordé ces questions en détail et fait des recommandations consensuelles que le CPS endosse.

### 5.1 RENFORCER L'ESA POUR QU'ELLE SOIT PLUS EFFICACE ET RÉACTIVE

Dans le domaine des sciences de l'univers, l'augmentation, souhaitable, du budget de l'Esa, et particulièrement du programme obligatoire qui est loin d'avoir été compensé de l'inflation ces dernières années (avec pour conséquence que, sans augmentation du niveau de ressources au-delà de l'inflation, il sera impossible d'adopter une nouvelle mission pendant 10 ans après l'adoption d'Athena et de M7, déjà sélectionnées), doit s'accompagner 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 les partenariats bi- ou multilatéraux.

Les règles de juste retour sont pénalisantes, en termes de coût mais aussi et surtout de complexité des montages industriels qui sont loin d'être optimaux, et donc en termes de réactivité face à des agences américaines ou chinoises. Elles sont cependant difficiles à faire évoluer et ont permis la construction de l'Europe spatiale qui nous donne la capacité de réaliser aujourd'hui des missions ambitieuses. Ceci ne dispense cependant pas de tenter d'introduire plus de souplesse dans leur application, et n'oblige certainement pas à construire des consortia instrumentaux (non concernés par ces règles) qui rassemblent parfois un nombre excessif de partenaires, ni à morceler les sous-systèmes.

Le programme obligatoire, très diversifié, permet aux grands comme aux petits pays de participer à des missions scientifiques pionnières qui voient le jour dans des conditions budgétaires bien plus contraintes qu'à la Nasa. Il tire sa force de son mode de sélection des missions, basé sur la science, qui lui vaut le soutien de la communauté scientifique. Cette confiance s'est érodée dans les dernières années, et les choix de l'Esa lui ont valu des critiques,

pas toujours infondées, sur l'opacité des décisions en particulier. Il est urgent d'y remédier.

Dans le domaine des sciences de la Terre, les priorités scientifiques nationales n'ont pas été retenues dans les sélections Earth Explorer. Ceci résulte en partie d'une sous-souscription du programme, ce qui a été corrigé à la dernière ministérielle, mais aussi d'un défaut de lobbying, qui apparaît comme assez général dans les programmes européens. Les missions Copernicus, décidées par l'UE, ont des visées plus exploratoires que dans le passé, mais le poids de la France n'est pas toujours à la hauteur de ses ambitions malgré des succès tels que l'approbation de la mission **Sentinel-3-NG-Topo** ; ainsi une mission prenant la suite de **Smos**<sup>13</sup> n'a pu être sélectionnée dans ce cadre. Il est essentiel de poursuivre la co-construction du programme Copernicus afin de mettre en avant dans les futures discussions les missions d'intérêt pour la communauté nationale, dans lesquelles elle s'est souvent investie de longue date, ainsi que le développement de services associés. Par ailleurs, une réévaluation à la hausse du plafond des missions Earth Explorer permettrait de pouvoir retenir des missions très ambitieuses qui ont été écartées du processus de sélection du seul fait de leur coût malgré un très fort soutien scientifique.

Enfin, la mise en compétition, pour la sélection des missions M du programme obligatoire, de trois missions durant des phases A longues, devait certes permettre de réduire les incertitudes et les coûts, objectif louable, mais pèse lourdement sur les laboratoires qui sont en tension sur les personnels techniques. Le soutien de l'Esa aux laboratoires pendant ces phases a réduit la charge qui pèse sur eux, mais est insuffisant. L'Esa et les Etats membres doivent trouver un meilleur équilibre entre charge des laboratoires et fiabilisation des missions, par exemple en réduisant le nombre de phases A compétitives ou en réduisant la durée de la partie compétitive. De même, la mise en compétition d'industriels pour une mission donnée est pénalisante pour le développement en parallèle des instruments. D'autres agences, comme la Nasa, ont des processus plus simples dont il conviendrait d'analyser les conditions d'implémentation dans un contexte Esa.

<sup>13</sup> Smos (Soil Moisture and Ocean Salinity) est une mission de l'Esa lancée en 2009

## 5.2 LES MISSIONS BILATÉRALES, UN COMPLÉMENT INDISPENSABLE

Si les divers cadres européens permettent des missions ambitieuses, elles ne couvrent pas la totalité des priorités scientifiques françaises et sont programmées sur un horizon parfois très lointain ; il est donc nécessaire de pouvoir mener des missions en coopération bilatérale pour compléter le dispositif et permettre en principe de la réactivité. Il faut donc maintenir les coopérations historiques ambitieuses en bilatéral avec la Nasa, la Jaxa et l'Isro, mais aussi avec la Chine, y compris dans un cadre Esa, malgré le risque lié au caractère hautement politique des relations entre la Chine et les pays Européens.

Sur le long terme, il peut être aussi intéressant d'aider les pays émergents comme les Emirats Arabes Unis à développer une communauté scientifique intéressée par le spatial en s'appuyant sur les organismes de recherche et en particulier le CNRS. Leur motivation principale pour le spatial n'est pas aujourd'hui scientifique, mais ils disposent de moyens importants.

## 6. LE CNES, AGENCE DE PROGRAMME EN CHARGE DE L'ESPACE

Dans le contexte de la création des agences de programme, il a été demandé au Cnes d'assumer le rôle d'agence de programme en charge de l'espace. Il est prématuré d'en tirer toutes les conséquences, mais comme le Cnes joue de fait déjà ce rôle, il ne devrait pas y avoir de bouleversement de l'organisation de la recherche spatiale. Il y a par contre des opportunités à saisir pour renforcer les liens avec les organismes. Le comité des partenaires de l'agence qui associe organismes, universités et industriels permettra de compléter les comités inter-organismes (CIO) existants (notamment les CIO projets organisés pour s'assurer de l'engagement de tous les partenaires sur un projet spécifique et dont le rôle essentiel est rappelé) et les discussions bilatérales Cnes-organismes. Il y a quelques domaines où

## 7. CONCLUSIONS

L'enjeu des prochaines années est le maintien de la compétitivité scientifique de la France et de l'Europe dans un contexte international où les équi-

## 5.3 RÔLE DE L'UE POUR SOUTENIR L'EXPLOITATION SCIENTIFIQUE DES MISSIONS DE L'ESA

Alors que les programmes cadres précédents contenaient un volet spécifique sur l'exploitation des données spatiales, et notamment leur mise à disposition, cet aspect a pratiquement disparu du programme Horizon Europe qui couvre la période 2021-2027. Il y a eu un seul appel générique dédié à l'exploitation des données spatiales issues de missions européennes sur la période 2021-2024 ; il n'y en aura probablement pas d'autre. La commission européenne finance certes, et de façon significative, la recherche en général via notamment l'ERC et le soutien aux infrastructures de recherche (par exemple Europlanet en planétologie qui a un volet spatial significatif), cela est loin d'être suffisant. Les sciences de la Terre peuvent émerger à des programmes thématiques, mais ce n'est pas le cas des sciences de l'univers. Une action de lobbying est là encore nécessaire pour que le programme cadre suivant, en cours de préparation, corrige cela.

une discussion inter-organismes pourrait être utile ; sans que cette liste soit exhaustive, on peut citer à titre d'exemple les partenariats internationaux, la politique des ressources humaines, la mise en place d'actions visant à soutenir le traitement de données et l'instrumentation, la formation aux métiers du spatial. En fonction des sujets abordés, ces discussions pourraient soit concerner l'ensemble des partenaires, soit les plus directement impliqués d'entre eux (par exemple sur la question des ressources humaines des laboratoires).

Le CPS tient à souligner que son rôle doit rester celui d'un conseil indépendant donnant des avis scientifiques.

libres se déplacent. La rivalité Etats-Unis – Chine qui se développe aussi dans le domaine de la recherche spatiale peut, si la mesure de l'enjeu n'est

pas prise, reléguer la France au rôle d'acteur de second rang. En outre, les changements de l'équilibre Cnes / Laboratoires / industrie pour des raisons à la fois politiques et de tensions sur les ressources humaines dans les organismes peuvent être déstabilisants, quand de plus les industriels historiques du spatial semblent réticents à prendre des risques qui ne porteront des fruits que sur le long terme. Il n'y a pas lieu de penser que les startups du newspace aient une attitude très différente sur l'absence de retour sur investissement avant un temps long.

La poursuite de la rationalisation du système dans un environnement budgétaire surcontraint est indispensable mais ne suffira pas. Des évolutions de la répartition des tâches entre les laboratoires, le Cnes et l'industrie seront aussi nécessaires, mais seront limitées et ne suffiront pas à elles seules non plus. Les enjeux de connaissance, dénués d'objectifs mercantiles, justifient un effort soutenu des tutelles, d'autant plus que ces enjeux sont la clé pour faire face aux défis sociétaux auxquels nous sommes confrontés ; les objectifs « appliqués » nécessitent aussi de maintenir dans la durée l'écosystème spatial, notamment sa composante amont de recherche. Cet effort doit être coordonné par

le Cnes dans le cadre nouveau de l'agence de programme. A plus haut niveau, une volonté politique forte et une stratégie claire de moyen terme, appuyée *a minima* sur des ressources humaines correctement dimensionnées sont indispensables pour que la France conserve son rang de puissance spatiale internationalement reconnue.

Enfin, ces défis et ces enjeux se placent dans un contexte de crise environnementale qui dépasse largement la recherche spatiale et impose à très court terme des efforts importants de réduction de l'empreinte environnementale s'appliquant à tous les acteurs. Le Cnes est déjà engagé dans cette démarche, vitale pour l'avenir.



**SAINT-MALO**

[www.sps2024.com](http://www.sps2024.com)