

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 Mandea,
Direction de la stratégie du Cnes



SCIENCES DE LA TERRE



COMITE TOSCA (TERRE SOLIDE, OCÉAN, SURFACES CONTINENTALES, ATMOSPHERE)

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, PY. 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.

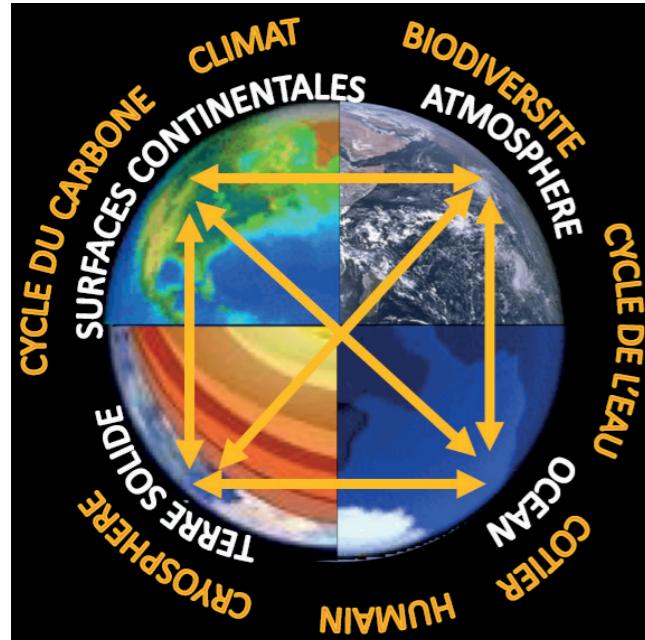


Fig. 1. L'observation du système Terre, de ses composantes et interactions.

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'Evolution 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 sociaux 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 sociaux 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).

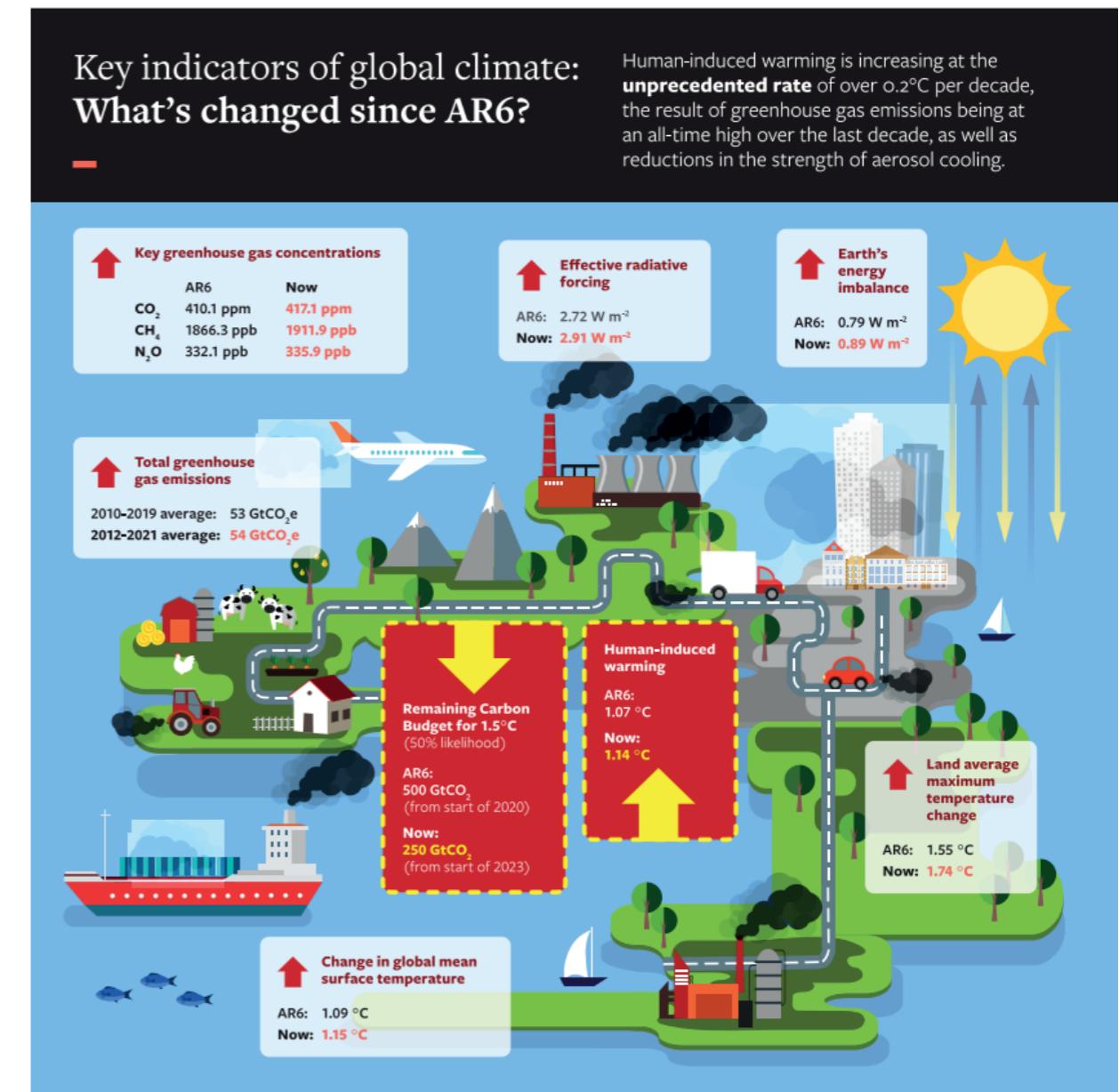


Fig. 2. Evolution des indicateurs climatiques depuis la publication du sixième rapport du GIEC (Forster et al., 2023).

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'Etude et l'Observation de la Terre : améliorer la compréhension du système Terre (cycle de l'eau, cycles biogéochimiques, cryosphère et côtière/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 ($\sim 0,08 \text{ mm/an}^2$) 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'Amazone 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 (côtière/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 décamétriques 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 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 (**Stratéole-2**), démontrant l'apport d'analyses interdisciplinaires pour étudier la réponse impulsionale 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 Soyouz 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 PRIORITÉ

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. Tenant 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
Très haute priorité			
Trishna	Stress hydrique des écosystèmes, zones urbaines, côtier	Température de surface	Phase-C, lancement prévu en 2026 en partenariat avec l'Isro
Mescal/ACCP	Spéciation des aérosols	Phase-0, non retenue par la Nasa	Discussion pour participation à Caligola en partenariat avec Asi et Nasa.
	Nuages convectifs et précipitation	Phase-0 puis A	Phase-A C2omodo/AOS en partenariat avec la Nasa
Haute priorité (grosses missions)			
Marvel	Champ de gravité	Phase-0, concept étudié en partenariat avec DLR, Esa, Nasa mais non retenu	Magic/NGGM en phase B1 dans un cadre Esa/Nasa
	Système de référence		Genesis dans le cadre du programme NAV de l'Esa
Skim	Mesure à haute fréquence des vagues et des courants de surface	Phase-0 Cnes puis phase-A Esa (EE9), proposition Stream à EE11	Odysea acceptée pour la phase A compétitive à Nasa EE
Biodiversity	Variables essentielles pour la biodiversité à petite échelle	Phase-0 hyperspectral. Galène (eaux côtières et continentales) non retenue à EE12	-
Haute priorité (petites missions)			
C3iel	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'Israël
Ulid/Smos-Next	Salinité, humidité des sols et épaisseur des glaces fines	Phase-0/A. Fresch non retenue à EE12	-
NanoMagSat	Etude du champ magnétique terrestre	Phase-0/A	Décidé dans le cadre du programme Scout de l'Esa
DAMONA	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^e 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 la salinité, de l'humidité des sols et de l'épaisseur des glaces fines, la mission démonstrateur d'un concept de 3^e 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^e génération **Smos-HR** dont est tiré le concept **Fresh** 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 (**Fresh**).

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 **Sentinels**), 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 **Sentinels-New 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 à 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**, **Scarlo**¹⁾).

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 aéronefs 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 Eurec4a).

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 (Aérés, 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 émergeants (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. PRIORITES 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**, **Venus**) 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 construire la feuille route du spatial en Etude et Observation de la Terre.

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 submésoséchelle 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 caractériser**

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 mêlés 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 SYNTHESE 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 Sentinels), 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 des 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, Caint** 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 PRIORITES 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 (déttection 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'inscrire 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 chaîne décennie. Les missions futures **Sentinel Expansion** viendront grandement les 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 Méteorologie). 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 programmatique 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 événements sur 10 ans), au lieu de 8.5 et plus (environ 1-2 événements 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 (spécification 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 expliquées 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** (OGF) 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 plates-formes 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	C2omodo / AOS (Phase B0)
Quelles interactions entre les processus atmosphériques des grandes aux petites échelles ? (thème 2)	Multi variables	StratoFleet (Héritage Stratéole)
Comment les couplages courant-vents influencent les échanges air-mer ? (thème 2)	Courants globaux	Odysea 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	Smos-HR 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	Biodiversity
Cycle de l'eau à l'échelle des besoins de la gestion en eau (thème 1)	Cotes d'eau journalières rivières, lacs, réservoirs	Smash 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	Cmim (Phase 0 CNES)
Amélioration du référencement géodésique (thème 6)	Positionnement millimétrique	Genesis , 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	Magic , mission Esa-Nasa. Démarrage Phase-B1 en 2024
Démonstrateur instrumentation spatiale (thème 6). Intérêt en physique fondamentale	Champ de pesanteur	Carioqa , phase-A lancée en janvier 2024
Prévision océanique, cycle de l'eau (thème 5, thème 1, thème 3)	Niveau de la Mer	S3NG-Topo
Infrastructures sol		
Amélioration du référencement géodésique (thème 6)	Positionnement millimétrique	Observatoire Géodésique Géophysique Fondamental de Tahiti

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>.