

## SYNTHESE DU TOSCA

Cyril Crevoisier (Président du TOSCA) et Juliette Lambin (Responsable Terre-Environnement-Climat)

### 1. Introduction

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

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

Composante essentielle d'un système d'observation intégré qui résulte de la combinaison de divers systèmes, spatiaux et *in situ*, souvent établis dans le cadre d'accords de coopération internationale, les systèmes d'observation spatiaux doivent être homogènes et stables sur le long terme afin d'assurer la continuité des mesures, mais aussi être basés sur une innovation constante afin d'affiner les précisions des mesures et assurer la transition des systèmes pour la recherche vers des systèmes opérationnels. Un enjeu particulier est la nécessité de mettre au point des proxys quantifiables depuis l'espace apportant une précision compatible des observations *in situ* qui restent fondamentales pour étudier le Système Terre, calibrer et exploiter les observations spatiales. La fusion de l'ensemble de ces données est réalisée à l'aide de modèles du Système Terre.

Les priorités de recherche françaises reflètent cette approche globale, basée sur l'appropriation de l'outil spatial en complément des observations de réseau sol ou de campagne, de la modélisation et de l'expérimentation. Elles visent à mesurer, analyser, interpréter et prévoir l'état de notre planète dans sa globalité.

Les activités menées par le TOSCA au cours de la période 2014-2019 s'inscrivent logiquement dans cette vision intégrée, systémique et transverse aux milieux terrestres. Les priorités définies dans le cadre de cette prospective scientifique assoient cette vision, tout en prenant en considération l'évolution du contexte spatial en Europe ces dernières années. La mise en place du programme Copernicus constitue une réelle opportunité de faire porter la pérennisation et la consolidation à long terme de l'observations de variables-clés au niveau européen, tout en restant une force de proposition et de développement pour des missions innovantes.

### 2. Les grandes questions et défis

#### 2.1. Compréhension du Système Terre [ST]

Améliorer notre compréhension du Système Terre nécessite de mieux connaître les processus internes propres à chacun des milieux terrestres mais aussi de mieux comprendre le fonctionnement des grands cycles intégrateurs, au premier rang desquels le cycle de l'eau et les cycles biogéochimiques, ainsi que les échanges qui ont lieu aux interfaces entre les composantes du Système Terre, notamment au niveau de la cryosphère et du littoral.

##### 2.1.1. Le cycle de l'eau [ST1]

Indispensable à la vie humaine et aux écosystèmes, disponible en quantité limitée, l'eau est une ressource rare, profondément affectée par les changements globaux. Le devenir des eaux douces continentales, notamment en cas d'évènements extrêmes (sécheresses et inondations), représente une préoccupation environnementale de premier plan. L'eau est également un acteur majeur du système terrestre en contrôlant la circulation de l'atmosphère et les propriétés des surfaces. La dynamique de la couverture nuageuse et les processus qui

régissent les interactions entre les flux à l'interface surface-atmosphère et les précipitations constituent toujours des inconnues majeures sur la réponse du système Terre aux changements globaux. La réduction des incertitudes sur la dynamique et l'évolution du cycle de l'eau (évapotranspiration et précipitations, convection humide et formation des systèmes convectifs, ampleur des phénomènes extrêmes) est ainsi en enjeu essentiel de compréhension des changements globaux, d'adaptation à ces changements aux niveaux local, régional et mondial et d'accès à la ressource en eau.

### 2.1.2. Les cycles biogéochimiques [ST2]

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

### 2.1.3. La cryosphère [ST3]

A l'interface entre les principales composantes du Système Terre, la cryosphère est un indicateur de l'état du système climatique et un acteur de son évolution. Les régions polaires sont particulièrement vulnérables à l'évolution du climat. Il est nécessaire d'établir leurs bilans de masse, année après année. Un autre enjeu est d'améliorer la compréhension des processus qui expliquent les variations de masse de la cryosphère, tant dans la composante de surface (précipitation, fonte, sublimation, transport de la neige par le vent) que dans la partie dynamique. Les principaux défis concernent la continuité mais aussi l'amélioration de la mesure (en termes de précision et de résolution spatiale, temporelle et spectrale) des variables impliquées dans le bilan d'énergie de surface (albédo, température de surface, fonte à la surface, précipitations).

### 2.1.4. Le littoral [ST4]

Les zones littorales sont des régions d'intérêt majeur pour la compréhension du Système Terre, l'impact des changements globaux sur les populations et les intérêts économiques et sociaux. Mieux connaître leur fonctionnement et suivre leur évolution répond à un besoin de meilleure prévisibilité et de gestion des ressources et des risques littoraux qui résultent de la combinaison d'une forte dynamique démographique et d'une accentuation probable des événements extrêmes régionaux. Les processus océaniques y sont généralement complexes ce qui nécessite d'adapter le système d'observation en conséquence. À plus large échelle, la quantification des transferts de matière et d'énergie sur le continuum Terre-Mer doit permettre d'améliorer la compréhension de l'évolution des régions littorales (falaises, plages, estuaires) en réponse aux forçages météo-marins.

## 2.2. Détection et quantification des Changements Globaux [CG]

### 2.2.1. Changement climatique [CG1]

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

### 2.2.2. Anthropisation [CG2]

L'anthropisation est un processus par lequel les populations humaines modifient ou transforment les espaces, les écosystèmes et les milieux naturels ou semi-naturels. La déforestation, l'élevage, l'urbanisation et l'activité industrielle sont parmi les principaux facteurs d'anthropisation, qui impactent durablement la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes marins et terrestres. L'objectif du Millénaire pour le développement des Nations Unies, visant à éradiquer l'extrême pauvreté dans le monde, ne peut être atteint qu'avec la protection et l'utilisation durable de la biodiversité et de ses services écosystémiques. Il est donc nécessaire de comprendre

les processus d'anthropisation et leurs impacts sur le Système Terre. Les principaux enjeux concernent l'identification des facteurs (environnementaux, climatiques et humains) des changements anthropiques avec des attendus en termes de continuité des services écosystémiques (préservation de la biodiversité, production de nourriture), des systèmes de gestion des terres, d'interactions urbain-rural et de politiques sanitaires.

### 2.2.3. Dynamique et forme de la Terre [CG3]

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

## 2.3. Enjeux environnementaux et risques [ER]

### 2.3.1. Les objectifs de développement durable [ER1]

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

### 2.3.2. La pollution atmosphérique [ER2]

L'exposition à des niveaux élevés de pollution de l'air est le plus grand facteur de risque environnemental pour la santé à l'échelle mondiale. La pollution a également de nombreux effets néfastes sur les écosystèmes. Cette dernière décennie a marqué un saut quantitatif et qualitatif dans la surveillance depuis l'espace de la pollution à l'échelle globale tant pour la détection d'événements extrêmes (feux, éruption, pollution urbaine) que pour le suivi à long terme des principaux gaz réactifs. Ceci s'est accompagné du développement des modèles et programmes pérennes d'observations *in situ* notamment dans le cadre du service Atmosphère de Copernicus. Les principaux enjeux concernent l'amélioration : du suivi de la distribution spatiale des particules (O<sub>3</sub>, PM), et des précurseurs organiques (COVs) et inorganiques (NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>) des polluants secondaires, en particulier près du sol ; de la spéciation chimique des polluants ; de la compréhension des processus de transport et des processus chimiques associés ; de l'impact des polluants sur la santé et les écosystèmes.

### 2.3.3. Les événements extrêmes [ER3]

Des phénomènes transitoires et extrêmes d'origine géologique (séismes, tsunamis, éruptions volcaniques et glissements gravitaires), océanique (tempêtes, submersion), hydrologique (sécheresse ou inondation) ou météorologique (orages, cyclones tropicaux) perturbent le système terrestre et ont un impact sociétal particulièrement important, ce qui implique de développer une surveillance permanente et fiable. Le cycle sismique et les mécanismes de préparation et de déclenchement des éruptions volcaniques sont aujourd'hui mieux compris grâce notamment aux observations d'interférométrie spatiale (InSAR) et GNSS. Les principaux enjeux concernent le développement des techniques de géodésie de fond de mer et la mesure des déformations de la surface de l'océan avec une précision centimétrique et une couverture spatiale et temporelle homogène, notamment pour développer un système d'alerte tsunami. La compréhension des mécanismes physiques et dynamiques qui sont à l'origine des extrêmes météorologiques fait partie des grands challenges fixés par le programme mondial de recherches sur le climat (WCRP).

### 2.3.4. La biodiversité [ER4]

La biodiversité qui comprend trois niveaux étroitement liés (diversité des gènes, des espèces et des milieux) est essentielle pour le développement naturel de tous les écosystèmes de notre planète. La perte de biodiversité causée par les changements globaux se traduit par un certain nombre d'indicateurs : lente disparition des espèces et des écosystèmes, fragmentation des habitats naturels, etc. Selon la FAO, 60% des écosystèmes sont dégradés ou surexploités. La conservation de la biodiversité des surfaces continentales et marines est un enjeu environnemental majeur. L'imagerie hyper-spectrale avec une haute revisite temporelle est la seule à même de renseigner sur les propriétés morphologiques, physiologiques et phénologiques d'espèces végétales, de façon à mesurer les changements des variables essentielles de la biodiversité avec une incertitude minimale.

## 3. Bilan programmatique depuis la prospective 2014

### 3.1. Bilan programmatique du SPS de la Rochelle

#### 3.1.1. Les priorités sur les missions

Les activités de recherches menées au cours de ces cinq dernières années suivent les priorités définies lors du SPS de 2014. Le tableau 1 dresse le bilan des recommandations qui avaient été faites sur les missions à court, moyen et long termes. Le tableau 2 dresse le bilan des recommandations qui avaient été faites sur les missions pour lesquelles il était prioritaire d'assurer la continuité des mesures.

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

Objectif scientifique	Mission	Travaux effectués	Etat actuel / Nouveau cadre éventuel
<b>Priorités à court-terme</b>			
Quantification précise des bilans hydriques et énergétiques des surfaces	Thirsty	Phase-0 (Thirsty avec Nasa) puis A (Trishna avec Isro)	Phase-B Trishna. Mission prioritaire SPS2019
Amélioration du système de référence	Grasp	Phase-0 avec la Nasa, non retenue à EVM2/Nasa ni à EE9	Marvel. Mission prioritaire SPS2019
Dynamique des zones côtières	OCAPI	Phase-0 puis A, non retenue à EE9	Cadre à définir. Mission prioritaire SPS2019.
Mesures des gaz à effets de serre	MicroCarb	Phase-0 puis A, annoncée à la COP21	Phase-C. Lancement en 2021 Partenariat CNES/UKSpace/CGI
	CarbonSat	Non sélectionnée à EE9 face à Flex	Mission Sentinel-7/CO2M en phase A/B1 ESA, lancement en 2026
Étude de la Haute Troposphère /Basse Troposphère par ballons	Stratéole-2	Phases-0 à C	Phase-D. Campagnes fin 2019, 2021-2022 et 2024-2025.
<b>Priorités à moyen-terme</b>			
Amélioration de la connaissance de la forme de la Terre	Z-Earth	Phase-0 (Z-Earth et Memfis)	CO3D, mission duale confirmée en 2019
Mesure des courants de surfaces océaniques	Sword	Phase-0 (Vasco), Phase-A (Skim)	Skim, mission candidate EE9
Mesures de la structure de la végétation	Alive-Folio	Phase-0 (Alive-Folio et Expe-Val)	R&T Lidar à soutenir
Mesures hyperspectrales	Hypxim	Phase-0 (Hypxim et Chimere). Hypex non retenue à EE9	-
Mesures de la qualité de l'air à haute répétitivité	Orepo	Phase-0, Mageaq non retenue à EE9	Partiellement repris dans Sentinel-4/MTG
<b>Priorités à long-terme</b>			
Mesures de la salinité des océans et de l'humidité des sols à haute résolution spatiale	Smos-Next	Phase-0 (Ulid et Smos-Next)	Phase-A Ulid. Mission prioritaire SPS2019
Mesures du profil vertical de la vapeur d'eau dans l'UTLS (et la couche limite)	Live, Topase, Winti	Phase-0 (2015-2018), non retenue à EE10 (Qsat)	R&T Lidar à soutenir
Dynamique atmosphérique	Dycect	Proposition Wivern non retenue à EE10	-

**Tableau 2.** Etat des recommandations du SPS 2014 sur les missions à court, moyen et long termes pour assurer la continuité de mesures prioritaires.

Objectif scientifique	Mission	Travaux effectués	Etat actuel / Nouveau cadre éventuel
<b>Priorités à court-terme (avant 2020)</b>			
Mesures altimétriques	Altika-2	Phase-0 et A (Wisa)	Besoins repris dans Sentinel1-3, Swot, Cristal et Sentinel-3-NG Topo
Mesures gravimétriques	Grace-FO		Lancée en 2018 (Nasa)
<b>Priorités à moyen-terme (avant 2025)</b>			
Mesure des aérosols et des nuages	Mescal (suite Calipso/EarthCare)	Phase 0 (2014 – 2019) avec Nasa	Pre-formulation study Nasa ACCP 2018 – 2021. Phase-A ACCP au Cnes (lidar et radiomètre micro-ondes, avec priorité plus forte mise sur le lidar)
Mesure du géoïde océanique	suite Goce/Grace	Phase-0 Grice	Marvel. Mission prioritaire SPS2019
Mesure du champ magnétique	Swarm-FO	Phase-0 NanoMagSat	NanoMagSat. Mission prioritaire SPS2019
<b>Priorités à long-terme (avant 2030)</b>			
Dynamique des surfaces	Suite CERES, Sentinel 1 à 3	Phase-0 Copernicus	Sentinel-NG-1 à 3

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

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

Sur recommandation du comité TOSCA, le Cnes a accompagné à des degrés divers les études liées aux missions de l'Esa (Aeolus, Biomass, EarthCare, Flex, Smos) et soutenu l'exploitation systématique des données de la constellation Sentinel. La participation des équipes française au *Climate Change Initiative* de l'Esa a également été fortement soutenue.

### 3.1.2. Mise en place des pôles de données.

Priorité affichée lors du SPS de la Rochelle, la mise en place des pôles de données AERIS, Odatis, Form@ter et Theia a été un succès et a permis la création d'une dynamique qui a contribué au rapprochement des développeurs et des utilisateurs de produits spatiaux et de données *in situ*, à l'image des Animations Régionales Theia. Organisation incontournable pour fournir données et produits associés, avec le label « FAIR », à tous les utilisateurs, les pôles assurent la dissémination des produits phares issus du traitement des missions nominales du Cnes et offrent un tremplin vers Copernicus et GEOSS. La prise en main de chaînes de traitement développées dans les laboratoires est possible une fois atteint une maturité suffisante. La création du pôle Data Terra améliorera la cohérence du fonctionnement et des services des pôles avec la mise en place d'un point d'entrée unique pour les utilisateurs, permettant un accès facilité à l'expertise basée sur la capitalisation des expériences passées.

### 3.1.3. Les avions de recherche

L'Unité Mixte de Services Safire (CNRS – Météo France – Cnes), créée en 2005 pour exploiter trois avions de recherche en environnement, réalise des campagnes de mesures scientifiques visant à : améliorer la connaissance du Système Terre, préparer et valider des missions spatiales, réaliser de la R&T aéronautique et spatiale. En moyenne, 20% des heures de vol avion sont consacrées au spatial. Si l'on inclut les campagnes scientifiques ayant des objectifs liés au spatial comme objectifs secondaires, ce pourcentage monte à 80%.

Depuis le SPS 2014, le socle des utilisateurs de Safire et le nombre de campagnes au service de missions spatiales se sont fortement élargis dans l'ensemble des domaines du TOSCA, impliquant au total une cinquantaine de laboratoires : terre solide (Airgravi), surfaces continentales (AeroIRT pour la préparation de

Trishna), océan (Kuros, campagnes de préparation et de validation de la mission CFOSAT, Drfit4Skim pour la préparation de Skim) et atmosphère (Magic pour la préparation de Merlin, MicroCarb et Iasi-NG, et Aeolus). Toutes ces campagnes ont mobilisé des instruments de la communauté nationale très innovants préfigurant de futurs instruments spatiaux ou servant à fournir des mesures de validation *in situ* ou par télédétection. L'écrasante majorité de ces campagnes étaient soutenues de manière partenariale par différentes agences : CNRS, Cnes, Esa, Eumetsat, ANR, H2020. Une consultation large de la communauté en 2016 a fait ressortir la nécessité du renouvellement du Falcon20 de l'unité SAFIRE, le seul de ses avions à pouvoir voler haut (jusqu'à 10-12km d'altitude) avec un long rayon d'action et actuellement en fin de vie, afin de préparer au mieux différentes missions spatiales du Cnes dont les lancements sont prévus à l'horizon 2022.

### 3.1.4. Les ballons pour l'observation de la Terre

Les recherches soutenues ces dernières années suivent les priorités définies lors du séminaire de prospective Cnes-Insu Ballons pour l'observation de la Terre de 2015, au cours duquel la mission Stratéole-2 a été confirmée comme une priorité forte de la communauté pour l'étude de la haute troposphère-basse stratosphère à l'aide de ballons pressurisés stratosphériques. Le rôle des Ballons Stratosphériques Ouverts (BSO) pour le suivi de la composition stratosphérique et l'emport de démonstrateur a été reconnu, la recommandation étant de poursuivre des campagnes BSO aux bases actuellement disponibles en alternance tous les 18 mois, mais aussi de déployer rapidement un site de lâcher équatorial ou tropical, ce qui n'a toujours pas été réalisé. Enfin, la recommandation d'accompagner le développement d'aéroclippers pour améliorer la prévision de la trajectoire et de l'intensité des cyclones a été suivie, mais le projet n'a pas encore abouti.

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

## 3.2. Evolution du contexte programmatique

### 3.2.1. Des évolutions majeures pour les Sciences de la Terre

Depuis le dernier SPS, le paysage programmatique a connu des évolutions fondamentales. La question climatique, avec la COP 21 et l'accord de Paris, et l'émergence d'une préoccupation politique majeure en la matière, a sensiblement infléchi les programmes spatiaux d'observation de la Terre dans le monde. Les décisions de missions MicroCarb et Merlin peuvent être directement attribuées à cette reconnaissance des enjeux climatiques. Le *Space Climate Observatory* (Sco), proposé par le Cnes à ses partenaires internationaux à l'occasion du *One Planet Summit* en décembre 2017, est aussi issu de la volonté française de mobiliser les partenariats internationaux sur un axe plus aval visant à promouvoir les capacités de l'observation spatiale pour le suivi et l'étude des impacts du changement climatique à des échelles locales. Au niveau français, le Sco devrait être une opportunité de fédérer les recherches dans ces domaines et d'impulser une orientation commune avec des moyens associés et partagés, en s'appuyant sur le pôle Data Terra.

Les opportunités de coopération internationale, élément indispensable de l'action du Cnes, se sont multipliées avec l'engouement pour le spatial : au-delà des grandes agences partenaires (Esa, Nasa, Isro, CNSA), de nombreuses sollicitations ont concerné des pays plus émergents en termes de compétences spatiales, visant plutôt des concepts 'quick&cheap', et dépendant d'un calendrier diplomatique plus que d'une prospective scientifique.

Enfin, deux points majeurs méritent d'être détaillés : la mise en place effective du programme Copernicus et le *NewSpace*.

### 3.2.2. Le programme Copernicus et la constellation des Sentinel

Le programme Copernicus de l'Union Européenne développé en coopération avec l'Esa constitue une révolution tant pour la recherche que pour les services dans le domaine de l'environnement, avec en particulier une politique de données ouverte favorable aux développements d'applications nouvelles. Il a pour objectif d'assurer une capacité pérenne et autonome de l'Europe pour le suivi de l'environnement avec une vision à long terme (> 20 ans). Il est principalement basé sur des observations satellitaires mais aussi *in situ* (sol, bouées, avions, etc). La composante spatiale est actuellement composée de pas moins de six séries de missions satellitaires détaillées dans le tableau 3. Il a permis la mise en place de services opérationnels pour différentes composantes essentielles de notre environnement : *Atmosphere* (CAMS), *Marine Environment* (CMEMS)

piloté par la France, *Land* (CLMS), *Climate* (C3S), *Emergency Management* (CEMS), *Security*. Le fait d'être un programme opérationnel se traduit par l'assurance de la pérennité et de la continuité des observations et des services. Un enjeu particulier concerne le stockage, la dissémination et le traitement de ces données.

Ce programme, que s'est appropriée la communauté scientifique, structure de façon durable le paysage spatial : les propositions de nouvelles missions spatiales doivent dorénavant se situer par rapport aux Sentinel.

**Tableau 3.** Description des missions Sentinel du programme Copernicus

Noms	Objectifs scientifiques	Technique de mesure	Dates de lancement
<b>Sentinel-1</b>	Surveillance de l'environnement marin et de l'Arctique, suivi des surfaces	Radar à synthèse d'ouverture (9-40 m de résolution)	S1A (2014), S1B (2016), S1C (2021), S1D (2024)
<b>Sentinel-2</b>	Suivi des surfaces continentales à haute résolution (agriculture, occupation des sols, biodiversité, catastrophes naturelles)	Imagerie hyperspectrale à haute résolution (10-60 m)	S2A (2015), S2B (2017), S2C (2022), S2D (2025)
<b>Sentinel-3</b>	Océanographie et suivi de la végétation	Radiomètre imageur multi spectral (300-1200 m)	S3A (2016), S3B (2018), S3C (2023), S3D (2026)
<b>Sentinel-4</b>	Composition atmosphérique dans la troposphère, qualité de l'air	Sondeur IR et UV sur MTG (8 km)	S4A (2023), S4B (2031)
<b>Sentinel-5</b>	Composition atmosphérique	Spectromètre imageur UV, Vis, IR sur Metop-SG (7,5-50 km)	S5P (2017), S5A (2022), S5B (2029), S5C (2036)
<b>Sentinel-6</b>	Altimétrie (suite de Jason-2)	Radar à synthèse d'ouverture	S6A (2020), S6B (2025)

### 3.2.3. NewSpace et nanosatellites

Avec l'irruption des intérêts privés dans divers champs thématiques de l'observation de la Terre, le *NewSpace* a considérablement modifié la perception des possibilités offertes par le spatial. Cette évolution (projets de constellations, orientation sur les usages aval) mobilise des ressources financières et humaines insoupçonnées. Cependant, le peu d'importance accordé pour l'instant à la qualité des mesures est peu compatible des exigences scientifiques. L'arrivée d'acteurs privés pose également la question de la nécessité, à terme, de l'achat des données, comme l'illustre le cas de la fourniture payante à des centres de prévision numérique du temps de paramètres thermodynamiques de l'atmosphère obtenus à partir de données de radio-occultation GNSS issues de programmes privés.

Les réponses à l'appel à contribution du SPS ont montré un intérêt certain de la communauté scientifique pour les nanosatellites qui se retrouve dans les missions définies comme prioritaires. Bien que leur utilisation à des fins non pédagogiques en Sciences de la Terre reste très récente, la disponibilité de nouvelles plateformes de type nanosat ou microsat peut favoriser l'émergence de nouveaux projets visant à emporter, selon un cahier des charges précis, un instrument développé en laboratoire, avec une attention particulière à la rapidité de mise en œuvre (lancement compris). Il convient cependant de rappeler qu'en Sciences de la Terre, la question de l'étalonnage des instruments est fondamentale. Une réflexion sur la complémentarité entre étalonnage au sol et en orbite compatible d'un emport sur nanosat est donc à mener afin d'assurer la stabilité spatiale et temporelle des mesures, vérifiée sur un système de référence.

## 4. Stratégie programmatique

### 4.1.1. Mode de réalisation des missions spatiales en Sciences de la Terre

Pour la plupart des missions spatiales des Sciences de la Terre qu'il pilote, le Cnes s'appuie sur des partenariats internationaux. Le choix et la mise en place de ces partenariats visent à garantir la tenue de la performance de la mission qui répond aux besoins exprimés par la communauté scientifique. Généralement, ce besoin se traduit par la prise de responsabilité par le Cnes de la réalisation de la charge utile ou d'éléments critiques assurant la performance de l'instrument. Le Cnes assure ensuite le lien entre la communauté scientifique (qui définit les objectifs scientifiques, les niveaux de performances requis pour les atteindre, et propose des concepts instrumentaux validés en laboratoire, sous ballon ou sur avion) et les maîtres d'œuvre industriels (qui assurent la réalisation instrumentale de la charge utile sous pilotage des équipes projets). Les activités de calibration/validation (de la mission elle-même ou des produits générés) et la création des produits scientifiques mono ou multi missions sont ensuite réalisées dans un partenariat variable suivant la mission entre l'agence spatiale, les industriels et la communauté scientifique.

#### 4.1.2. Le programme multilatéral du Cnes

Le programme multilatéral du Cnes est fondé sur des coopérations multilatérales avec des agences spatiales du monde entier. Les relations internationales du Cnes, mais aussi le Ceos (*Committee on Earth Observation Satellites*), qui rassemble les agences spatiales impliquées en observation de la Terre, ont vocation à instruire le montage des coopérations. Les trois grands partenaires hors Europe sont la Nasa, l'Isro et la CNSA, avec lesquelles des missions ambitieuses sont engagées selon un partage équilibré des coûts et de la responsabilité technique. De part et d'autre existent des communautés scientifiques fortes, avec lesquelles des liens durables peuvent être établis.

La coopération avec des pays plus émergents dans le spatial pose souvent la difficulté de s'accorder sur des enjeux scientifiques communs et de garantir la performance mission au niveau souhaité. Les nombreuses demandes de partenariat sont autant d'opportunités à saisir, mais leur format de réalisation ne satisfait généralement pas complètement les besoins scientifiques identifiés lors des prospectives précédentes.

***Le TOSCA rappelle que des décisions essentiellement politiques de réalisation de missions, pour légitimes qu'elles soient, ne doivent mettre en danger ni la réalisation des missions prioritaires pour la communauté scientifique qui ont fait l'objet du présent travail de prospective, ni le leadership de la communauté nationale. Le TOSCA propose la création d'un catalogue de missions répondant à des besoins identifiés de la communauté qu'il faudrait privilégier dans le cadre de coopérations bilatérales imposées.***

#### 4.1.3. Le programme Enveloppe de l'Esa

Le programme enveloppe de l'Esa (bientôt renommé *Future EO*) permet la réalisation de missions scientifiques ambitieuses appelées *Earth Explorer* (EE), dont la dernière mission Aeolus/EE5 a été lancée en 2018. La programmation se fait via des appels à propositions ouverts, et une sélection progressive d'une unique mission à mener à bien. Cette sélection dépend d'analyses techniques de faisabilité et de recommandations scientifiques par le comité Aceo (*Advisory Committee on Earth Observation*). Elle est décidée par le comité de programme PB-EO, sans besoin d'unanimité des états-membres. L'action du Cnes est plus dans le soutien à la communauté nationale en amont pour l'élaboration de propositions et l'accompagnement des développements, que dans le processus de sélection Esa.

Dans le cadre EE9, deux missions sont en compétition : Skim et Forum. La mission **Skim**, portée par la France, vise à permettre pour la première fois une mesure directe du courant de surface total, une *Essential Ocean Variable* (EOV) complémentaire des mesures de topographie par altimétrie. La vitesse totale accessible par Skim diffère des courants géostrophiques accessibles par l'altimétrie, et informe les transports très en surface, les courants à l'équateur (divergence, upwelling) et au voisinage des glaces, et l'amélioration du suivi des spectres de vagues. La mission **Forum** vise quant à elle à fermer le bilan radiatif terrestre en couvrant une bande spectrale originale (IR lointain), en partie complémentaire à la bande spectrale couverte par les sondeurs infrarouges hyperspectraux Iasi/Iasi-NG.

Dans le cadre EE10, trois missions candidates ont été retenues par l'Esa. **Steroids** a pour objectif de mesurer les faibles variations de la surface de l'océan, des glaciers et de la surface de la Terre à l'aide d'un radar à synthèse d'ouverture qui volerait en formation avec Sentinel-1. **Daedalus**, basée sur un satellite mère, qui transporterait une suite d'instruments ainsi que quatre petits satellites transportant un sous-ensemble d'instruments libérés dans l'atmosphère, vise à quantifier les quantités d'énergie déposées dans la haute atmosphère. Enfin, **G-Class** serait équipée d'un radar à synthèse d'ouverture sur une orbite géosynchrone afin d'étudier le cycle de l'eau diurne de l'Afrique et des régions méditerranéennes. La communauté française n'est que peu impliquée dans ces missions.

***Une analyse du faible engagement de la communauté dans les missions EE10 est à réaliser afin de préparer au mieux les propositions portées par la communauté française lors du prochain processus de sélection. Plus généralement, le TOSCA encourage la mise en place d'un cadre bien défini pour l'accompagnement des équipes françaises dans les missions EE, de la conception à l'exploitation, comme cela a été fait pour la mission EE7/Biomass.***

#### 4.1.4. Le programme des satellites météorologiques opérationnels

Le programme européen des satellites météorologiques opérationnels est essentiellement porté par l'Esa et Eumetsat, avec une organisation long terme pour assurer les besoins spécifiques à cette branche opérationnelle de l'observation de la Terre. Cependant, ce programme fournit également une couverture sur le long terme d'observations pertinentes pour les activités de recherche. Diverses missions d'intérêt pour la communauté française sont prévues dans les prochaines années.



Prenant la suite des sondeurs infrarouges hyperspectraux Iasi lancés à bord des trois satellites Metop depuis 2006, la mission **Iasi-NG** (qui sera lancée sur les trois satellites Metop-SG du programme EPS-SG d'Eumetsat) poursuivra sur 20 années supplémentaires le suivi de paramètres thermodynamiques essentiels à la prévision numérique du temps, mais aussi de nombres variables atmosphériques essentielles pour l'étude de la composition atmosphérique et du climat, avec une précision et une couverture verticale de l'atmosphère accrues. Ces observations seront complétées par les observations issues d'une suite d'instruments micro-ondes (vapeur d'eau, température, nuages de glace, précipitations), du polarimètre **3MI** hérité de Polder (nuages et aérosols) et des sondeurs UV/Vis/NIR/SWIR de Sentinel-5 (qualité de l'air). L'utilisation synergétique des différents instruments ouvre des perspectives très intéressantes pour mieux caractériser la composition atmosphérique et comprendre les processus atmosphériques. Les sondeurs infrarouges **IRS**, très attendus pour la prévision numérique du temps à échelle régionale (phénomènes extrêmes notamment), et les sondeurs UV/Vis/NIR Sentinel-4 sur les plateformes géostationnaires MTG viendront compléter le dispositif et permettront d'étudier la variation diurne des principaux polluants.

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

#### 4.1.5. Le programme Copernicus Long Term Scenario

Au-delà des 6 missions Sentinel actuelles, le *Long Term Scenario* vise à planifier à moyen et long-termes (2025-2035) l'ensemble de la composante spatiale du programme Copernicus de l'Union Européenne en proposant, d'une part, six nouvelles missions dites *High Priority Copernicus Missions* ou Sentinel-Expansion et, d'autre part, l'évolution des missions actuelles avec six Sentinel-NG. Les missions envisagées sont décrites dans le tableau 4.

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

**Tableau 4.** Description des missions Sentinel-Expansion et Sentinel-NG du programme Copernicus *Long Term Scenario*

Noms	Objectifs scientifiques	Technique de mesure	Lancement
<b>Chime</b>	Agriculture et biodiversité [ER4]	Spectromètre dans le proche IR	2028
<b>Cimr</b>	Océan et glace de mer en Arctique [ST3]	Radiomètre micro-ondes à haute résolution	2028
<b>CO2M</b>	Emissions anthropiques de CO <sub>2</sub> [ST2, CG1]	Spectromètre dans le proche IR	2026
<b>Cristal</b>	Epaisseur de la glace de mer et des calottes glaciaires [ST3]	Radar multi-fréquences	2026
<b>Lstm</b>	Température de surface [CG2]	Infrarouge thermique à haute résolution	2027
<b>Rose-L</b>	Surveillance des écosystèmes terrestres, de l'humidité des sols et de la glace [CG2, ST3]	SAR Bande-L	2027
<b>S1-NG</b>	Surveillance de l'environnement marin et de l'Arctique, suivi des surfaces [ST3, CG1, CG2]	Suite de Sentinel 1	2030, 2032
<b>S2-NG</b>	Suivi des surfaces continentales à haute résolution [CG2, ER4]	Suite de Sentinel 2	2032, 2034
<b>S3-NG</b>	Océanographie et suivi de la végétation [CG2, ER4]	Suite de Sentinel 3	2029, 2031
<b>S6-NG</b>	Altimétrie [CG1]	Suite de Sentinel 4	2030, 2032

Le développement des Sentinel-Expansion vise à répondre à l'accroissement des besoins en Sciences de la Terre en proposant de nouvelles observables. Parmi les six missions, trois sont d'un intérêt majeur pour la communauté française et adressent des objectifs scientifiques prioritaires :

- **CIMR [ST3]**. Cette mission s'intéresse aux changements rapides de l'océan et de la glace de mer en Arctique via l'observation à haute résolution (15km) en micro-onde de la température de surface, de la concentration de la glace de mer, de l'épaisseur fine de la glace de mer et de la salinité de surface. La communauté française participe activement à la définition des spécifications de cette mission.
- **Cristal [ST3]**. Cette mission est dédiée à l'étude des changements rapides de l'océan et de la glace de mer en Arctique grâce à l'observation de l'épaisseur de la glace de mer et des calottes glaciaires. Elle prendra la suite de Cryosat-2 tout en améliorant ses performances grâce à l'ajout de la bande Ka pour correction épaisseur neige. La communauté française est leader sur la technologie et joue un rôle fondamental dans la définition des spécifications et dans l'exploitation de ce type d'observation.
- **CO2M [ST2, CG1]**. Cette mission vise à détecter, quantifier, comprendre et suivre les évolutions des puits et des sources de CO<sub>2</sub>, à la fois naturel et anthropiques, et à vérifier que les politiques mises en place pour réduire les émissions fonctionnent. Elle repose sur l'utilisation de spectromètres imageurs opérant dans le proche infrarouge. Grâce au développement des missions MicroCarb, Merlin et à l'exploitation des données des missions Gosat et OCO-2 soutenues par le Cnes ces dernières années, la communauté scientifique française jouera un rôle de premier plan dans l'exploitation de CO2M.

## 5. Priorités et recommandations

### 5.1. Priorités sur les missions en multilatéral

#### 5.1.1. Missions en priorité haute

**Quantification précise des bilans hydriques et énergétiques des surfaces [ST1, ERI, ST4]**. Le projet **Trishna** (*Thermal infraRed Imaging Satellite for High-resolution Natural resource Assessment*) est une mission infrarouge thermique engagée en collaboration entre le Cnes et l'Isro pour un lancement envisagé à l'horizon 2025. Les caractéristiques de la mission (50 m, 3 jours) répondent au besoin récurrent de caractériser le stress hydrique des végétaux, en particulier pour les surfaces agricoles, mais aussi d'étudier le climat urbain, la cryosphère et l'hydrologie continentale et côtière. La mission Sentinel-Expansion Lstm projette d'acquérir des données de nature très similaire mais avec des conditions angulaires d'observation différentes qui ne permettent pas d'éviter les phénomènes de hot spot aux latitudes intertropicales, et à un horizon plus lointain (au plus tôt 2027). *Le TOSCA soutient la poursuite du développement de Trishna qui permettra de préparer la mission Lstm proposée dans le cadre Sentinel-Expansion et de bien positionner la communauté française pour jouer un rôle majeur dans Lstm.*

**Impact radiatif des aérosols et des nuages [CG1, ST1]**. Le projet **Mescal** est un lidar multi-longueurs d'onde à haute résolution spectrale pour l'étude des nuages et des aérosols visant à assurer la continuité de la série d'observation entamée avec Calipso et poursuivie par Aeolus et EarthCare, sur une durée compatible des études de leur rôle sur l'évolution du climat. Mescal ira sensiblement plus loin que ses prédécesseurs en ouvrant la voie à une spéciation des aérosols observés, essentielle pour comprendre l'impact radiatif des aérosols et leur rôle dans la formation des nuages, principales sources d'incertitudes sur le bilan radiatif terrestre. La mission devrait en outre permettre d'accéder à la mesure de la couleur de l'océan par lidar. Mescal est proposée dans le cadre programmatique ACCP (*Aerosols Clouds Convection Precipitation*) mis en place par la Nasa en réponse aux priorités affirmées dans le *Decadal Survey* (2018). Le Cnes a exprimé son intérêt auprès de la Nasa sur deux contributions potentielles : une composante du lidar multi-longueurs d'onde et, en moindre priorité, un radiomètre micro-ondes. *Le TOSCA considère la participation de la communauté française au futur observatoire international ACCP comme une opportunité majeure et, dans ce cadre, soutient de manière prioritaire la mission Mescal afin de valoriser l'expertise française dans la filière des lidars nuages-aérosols et de répondre aux objectifs de suivi sur le long terme des propriétés des aérosols et des nuages.*

#### 5.1.2. Priorités à moyen-terme sur les grosses missions

**Amélioration du système de référence et mesure du champ de pesanteur [CG3, ST3, ST4, CG1]**. La mission **Marvel** répond au double besoin d'avoir accès à une connaissance précise du système de référence tout en fournissant des observations gravimétriques à haute résolution. Elle propose une amélioration inédite en termes de précision et de résolution du champ de pesanteur via une amélioration des données de positionnement et de la configuration orbitale. La mission combine de manière originale une double constellation comprenant un satellite haut (reprenant le concept de la mission **Grasp**) et un satellite gravimétrique en orbite basse. Les performances annoncées rendent cette mission très attractive pour plusieurs domaines d'intérêt du TOSCA. Fondamentalement, le système de référence terrestre et le suivi de la redistribution des masses sont des éléments-clés dans le suivi du stock total d'eau, y compris les calottes

polaires, et de sa dynamique, et dans la compréhension des mécanismes responsables de l'augmentation du niveau de la mer et du bilan énergétique de la planète.

**Dynamique des zones côtières [ST4, CG2]** Le développement d'une mission géostationnaire couleur de l'océan sur l'Europe (**GEO-OCAPI**) a été mise en priorité forte au dernier séminaire de prospective scientifique afin d'améliorer nettement la couverture spatio-temporelle par rapport aux satellites défilants et de bien mieux contraindre les modèles biogéochimiques via l'assimilation de données. Une étude de faisabilité a été menée par le Cnes, mais aucun cadre programmatique n'a été trouvé. Le besoin d'une telle mission étant aussi prioritaire pour le service marin de Copernicus, le TOSCA recommande d'étudier la possibilité d'inscrire cette mission dans le cadre du *Copernicus Long Term Scenario* et d'une insertion à plus long terme sur les futures plates-formes Meteosat (4<sup>ème</sup> génération).

### 5.1.3. Priorité à moyen-terme sur les petites missions

**Développement des nuages convectifs [ST1]** Le projet de constellation de nanosats **C3iel** est dédié à l'observation des nuages convectifs, actuellement mal observés depuis l'espace, du fait de leur petite taille et de leur développement très rapide. Il s'agit d'un train de 2 à 3 nanosatellites capables d'observer la même scène nuageuse sur 80km à haute résolution (20m) sous différents angles pendant environ 200s. La charge utile envisagée combine sur chaque satellite un imageur visible, une caméra vapeur d'eau et un détecteur d'éclairs. En combinant à la fois une haute résolution spatiale et temporelle, la mission est très novatrice et offre une capacité d'observation inédite sur une thématique scientifique prioritaire. Un cadre de coopération avec Israël est envisagé, pour un lancement en 2024.

**Humidité des sols [ST1, CG1].** Le projet **ULID** vise à vérifier le principe de mesure interférométrique bande L à partir d'éléments d'antennes disposées sur différents nano-satellites (de 2 à 4 satellites en formation) afin de préparer la poursuite de la mission Smos et le futur de la filière de radiométrie en bande L au sein de la communauté nationale (**Smos-HR** puis **Smos-Next**). L'objectif est l'amélioration de la résolution spatiale des cartes d'humidité du sol et d'épaisseur optique de la végétation ainsi que des cartes de salinité des océans à l'échelle globale, afin notamment de mieux évaluer les risques d'inondation et de sécheresse et de contribuer à une meilleure gestion des ressources en eau et une meilleure connaissance du cycle du carbone.

## 5.2. Priorités sur les missions Esa à venir

Dans le cadre EE9, le TOSCA soutient avec une très forte priorité la mission **Skim**, tant pour la compréhension de la dynamique océanique de surface que pour l'océanographie opérationnelle et les applications. Dans le cas d'une non sélection à EE9, une analyse de cette décision devra être réalisée afin de déterminer quel cadre programmatique pourrait être trouvé.

Dans le cadre EE10, le TOSCA recommande d'accompagner les membres français qui participeraient aux travaux préparatoires de la mission sélectionnée et encourage le Cnes et ses partenaires à analyser les raisons de la faible participation de la communauté française dans les missions candidates.

**Mesure du champ magnétique terrestre [CG3].** Le projet **Nanomagsat**, mission française en cours d'investigation, vise à améliorer la qualité de la détermination spatiale du champ magnétique permise actuellement par la mission Swarm de l'Esa lancée en 2013. Elle vise également à pérenniser le suivi de cette observable sur le long terme en exploitant des nanosatellites et des magnétomètres miniaturisés ce qui améliorera la connaissance sur la dynamique du noyau, la conductivité dans le manteau, le magnétisme de la croûte, et la météorologie de l'espace. Grâce à la mission Swarm, la communauté scientifique nationale et internationale du géomagnétisme interne et externe est bien structurée. Le TOSCA soutient la proposition de cette mission au *SmallSat Challenge* de l'Esa.

## 5.3. Priorités sur les missions Copernicus

Dans le cadre de la préparation des Sentinel-Expansion (>2025), le TOSCA recommande que le Cnes s'assure que les besoins des communautés françaises seront bien pris en compte dans les quatre domaines suivants : la conception des missions, la tenue des performances, l'accès aux produits et l'accompagnement de l'exploitation scientifique, en particulier pour les missions **Cimr**, **Cristal** et **CO2M**.

Dans le cadre de la préparation des missions Sentinel-NG (>2030), le TOSCA recommande au Cnes de porter les priorités et demandes française dans la définition du programme et de défendre la continuité des missions Sentinel d'intérêt pour la communauté nationale. En particulier, la mission **Wisa/Sentinel-3-NG**, envisagée comme suite opérationnelle de la mission Swot pour l'altimétrie [**CG1**], a pour objectif la détermination de la topographie de surface à haute résolution (mésoméchelle et submésoméchelle océanique et côtier). La

communauté française est leader dans ce domaine et joue un rôle fondamental dans la définition des spécifications et dans l'exploitation de ce type d'observation.

#### 5.4. Priorité sur la R&T

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

**Miniaturisation.** Dans certains domaines, des « petits satellites », voire des nanosats, pourraient prendre la suite de filières dont on maîtrise bien la performance : magnétomètre, sondeur infrarouge avec des micro-spectromètres, altimétrie radar, radiomètre micro-ondes. Les verrous techniques, propres à ces filières, devront être identifiés. En lien avec la miniaturisation des capteurs, et de manière plus générale pour les actions R&T, une réflexion est à mener sur l'organisation et le développement de l'utilisation de la filière avion/ballon/drone.

**Lidar H<sub>2</sub>O.** La répartition tridimensionnelle de l'humidité relative est la variable sans doute la moins bien documentée dans la troposphère. Les instruments spatiaux actuels ne donnent qu'une idée grossière de sa répartition verticale, notamment dans les basses couches atmosphériques. Pour accéder à une résolution fine, la technologie lidar semble la plus prometteuse. Un effort de R&T est nécessaire sur la technologie des lasers et sur la possibilité de réaliser des lidars à multi-visée ou à balayage afin d'augmenter la densité d'observations. De manière générale, un besoin de lidars profileurs robustes, fiables, simples et d'un coût modéré existe pour suivre l'évolution des gaz (notamment CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>), des nuages et des aérosols.

**Algorithmie.** Le TOSCA rappelle que le travail permanent sur les algorithmes est une composante essentielle de la réussite d'une filière et encourage le Cnes à poursuivre son soutien aux équipes algorithmiques (niveaux 1 et 2), en assurant néanmoins une bonne coordination entre les différentes agences partenaires et entre les différents programmes du Cnes (R&T, projets en développement, APR). L'augmentation des volumes de données couplée à l'augmentation des résolutions spatiales ou spectrales imposeront le recours à des méthodes de traitement de données innovantes, utilisant les techniques du big data, de l'HPC et de l'IA, que ce soit pour les aspects algorithmiques, applicatifs mais aussi le contrôle qualité lors de la cal/val et tout au long de la mission. Le TOSCA recommande qu'un effort particulier soit porté sur l'estimation des incertitudes associées à ces méthodes innovantes.

#### 5.5. Priorité sur les infrastructures

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

**Mesures au sol.** Le succès de toute mission spatiale repose sur l'accès à des mesures *in-situ* et de télédétection au sol fiables et disponibles sur le long terme, que ce soit pour des activités de calibration/validation ou pour l'exploitation des missions spatiales elles-mêmes. L'enjeu est de mettre en place un support programmatique pérenne pour l'observation nécessaire aux activités cal/val (non limité à une mission particulière) et à l'exploitation des missions. Ceci inclue en particulier l'archivage à long terme et pérennisé des données de cal/val. **Le TOSCA recommande que le Cnes participe activement à la définition des infrastructures de mesures *in-situ* et de télédétection au sol, en particulier des sites de cal/val, en partenariat avec les organismes nationaux et avec les autres agences (Esa, Eumetsat, Copernicus).**

**Ballons.** **Le TOSCA salue la mise en place de l'infrastructure de recherche Hemera et recommande de soutenir les actions de positionnement de la communauté scientifique française associée aux ballons dans cette stratégie européenne.** Le TOSCA encourage également une meilleure intégration des ballons, en

synergie avec les avions de recherche, dans les plans de cal/val des missions spatiales que ce soit sur le site d'Aire-sur-l'Adour (via l'accueil pérenne de moyens de mesures *in situ* et l'hébergement d'équipes lors de campagnes ponctuelles, telle la campagne Magic préparant les missions Merlin et MicroCarb) ou lors de campagnes dédiées. Le TOSCA rappelle en particulier la demande récurrente de la communauté scientifique, toujours non satisfaite, de disposer d'un site de lâcher équatorial permettant d'envisager des campagnes dans cette région d'intérêt pour l'étude des cycles biogéochimiques et de la dynamique atmosphérique.

## 5.6. Recommandation sur l'accompagnement des missions spatiales

### 5.6.1. Recommandation sur l'accompagnement des missions spatiales à l'Europe

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

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

### 5.6.2. Recommandations sur les données et les pôles de données

Priorité du dernier séminaire de prospective, la mise en place des pôles, qui s'appuient sur un partenariat multi-organismes, est un succès de ces dernières années. Il apparaît désormais nécessaire d'améliorer la cohérence de leur fonctionnement et de leurs services, notamment dans le cadre de la création du pôle Data Terra. Le TOSCA rappelle que l'accès aux compétences et aux services associés aux données spatiales doit être facilité par la mise en place d'un point d'entrée unique pour les utilisateurs, permettant un accès facilité à l'expertise basée sur la capitalisation des expériences passées. **Afin de mener à bien ces missions, le TOSCA encourage fortement le Cnes et les organismes partenaires à mettre en place les moyens humains supplémentaires permettant aux pôles d'assurer leurs missions.**

L'augmentation du volume des données à traiter et à retraiter implique des moyens de stockage et de calcul massifs. Avec la quantité et la diversité croissante des données, le traitement et l'accès aux données doivent être considérés comme un tout. Le développement des plates-formes Dias et Peps va dans ce sens, même si le positionnement des pôles de données par rapport aux Dias devra être clarifié. **Le TOSCA recommande d'engager une réflexion multi-organismes sur le rapprochement effectif des pôles de données et des moyens de calcul permettant de prendre en compte les nouvelles stratégies algorithmiques.**

### 5.6.3. Recommandations sur l'accompagnement de la recherche spatiale

Une attention particulière doit être portée à l'adéquation entre les missions demandées à la communauté scientifique spatiale et au Cnes, et les moyens disponibles, afin d'assurer correctement les ambitions affichées. Même si, pour les Sciences de la Terre, les instruments sont généralement réalisés par l'industrie, il est nécessaire de s'appuyer sur des compétences fortes dans les laboratoires dans le domaine de la physique de la mesure, de l'analyse de la donnée et de la conception instrumentale. La pérennisation de ces compétences est indispensable afin d'assurer l'exploitation des nombreuses missions spatiales prévues et être source de proposition pour de nouveaux concepts. Le recours à des CDDs successifs ou à de l'assistance technique ne peut répondre à ce besoin.

Le TOSCA recommande particulièrement de faire reconnaître et de valoriser (par exemple par la mise en place de partenariats) auprès des universités et organismes de recherche l'investissement des chercheurs et des enseignants-chercheurs dans le spatial et les actions du Cnes. Ceci passe notamment par un meilleur accompagnement des enseignants-chercheurs qui désirent prendre des responsabilités dans des missions spatiales. L'absence de perspectives et de valorisation est un frein non seulement à l'attraction des filières universitaires et au recrutement des meilleurs étudiants en physique de la mesure, mais aussi à l'investissement de chercheurs et enseignants-chercheurs dans la recherche spatiale.

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