



HAL
open science

Cartographie stratégique du spatial à l'INSU

Anne Davaille, Susan Conway, Rosemary Morrow, Jérôme Riedi, Simon Gascoin, Olivier De Viron, Etienne Pointecouteau, François Poulet, Eric Defer, Benoît Lavraud, et al.

► **To cite this version:**

Anne Davaille, Susan Conway, Rosemary Morrow, Jérôme Riedi, Simon Gascoin, et al.. Cartographie stratégique du spatial à l'INSU. INSU, CNRS. 2023. hal-04712664

HAL Id: hal-04712664

<https://hal.science/hal-04712664v1>

Submitted on 27 Sep 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Cartographie stratégique du spatial à l'INSU

Anne Davaille (CS Terre Solide), Susan Conway (CS Terre Solide), Rosemary Morrow (CS Océan Atmosphère), Jérôme Riedi (CS Océan Atmosphère), Simon Gascoin (INSU), Olivier De Viron (CS Surfaces et Interfaces Continentales), Etienne Pointecouteau (CS Astronomie & Astrophysique), François Poulet (CS Astronomie & Astrophysique), Eric Defer (CS Instrumentation Innovante et Transverse), Benoît Lavraud (CS Instrumentation Innovante et Transverse) & François Leblanc (Axe transverse Affaires Spatiales)

Table des matières

Introduction.....	3
I Les objectifs scientifiques & enjeux sociétaux du spatial	3
<i>I.1 Terre Solide</i>	3
<i>I.2 Océan-Atmosphère</i>	3
<i>I.3 Surfaces et Interfaces Continentales</i>	4
<i>I.4 Astronomie & Astrophysique</i>	4
II Rôle du spatial, instrumentation, données et acteurs principaux	4
<i>II.1 Le rôle de la composante spatiale</i>	4
<i>II.2 L'instrumentation</i>	5
<i>II.3 Les données et les outils d'analyse</i>	5
<i>II.4 Les acteurs clefs.</i>	5
III Enjeux actuels et futurs.....	6
<i>III.1 Les enjeux actuels</i>	6
<i>III.2 Quels développements présents et futurs ?</i>	6
IV Le Spatial à l'INSU	7
<i>IV.1 Rôle du spatial pour la recherche à l'INSU</i>	7
<i>IV.2 Rôle de l'INSU dans l'exploration de l'Espace</i>	7
<i>IV.3 Données</i>	8
<i>IV.4 Partenaires</i>	9
<i>IV.5 Evolutions</i>	9
V L'INSU comme acteur clef du spatial.....	10
Remerciements.....	12
Annexe II.1 <i>Le rôle de la composante spatiale</i>	13
Annexe II.2 <i>L'instrumentation</i>	15
Annexe II.3 <i>Les données et les outils d'analyse</i>	17
Annexe II.4 <i>Les acteurs-clef</i>	20
Annexe III.1 <i>Les enjeux actuels</i>	23
Annexe III.2 <i>Quels développements actuels et futurs ?</i>	25
Annexe <i>Liste non-exhaustive des missions spatiales en développement ou en exploitation</i> .27	

Introduction

Avoir un état des lieux du spatial à l'INSU couplé à une vision des attentes de la communauté scientifique quant à son évolution est essentiel pour construire une politique de soutien pérenne de nos activités.

Les objectifs de ce document sont de :

- construire une cartographie en 2023 de la place du spatial dans les recherches de l'INSU,
- identifier les axes stratégiques de développement,
- proposer des approches pour les atteindre et évaluer les ressources nécessaires et manquantes.

Il s'agit de mettre en évidence la spécificité du spatial à l'INSU, d'améliorer sa visibilité, d'identifier ses forces et faiblesses, les axes inter-domaines stratégiques pour l'INSU et de préparer une feuille de route INSU sur laquelle nous pourrions nous appuyer lors de la prospective CNES en 2024.

I Les objectifs scientifiques & enjeux sociétaux du spatial

Le spatial occupe une place prépondérante dans les recherches menées par l'INSU. Qu'ils soient tournés vers notre planète ou vers l'espace les satellites sont des moyens d'observations privilégiés pour répondre à des questions motivées par des enjeux sociétaux forts (impact du changement climatique, risques géologiques) ou des questions scientifiques plus fondamentales (processus biogéochimiques, origine de la vie, formation de l'univers...).

1.1 Terre Solide

Du fait de la possibilité d'une observation continue, globale et homogène, à la fois dans le temps et l'espace, de la Terre, le spatial prend une importance croissante dans la prévision des risques géologiques et dans la détermination de la structure et de la dynamique interne de notre planète, ces missions s'appuyant la plupart du temps sur une coordination entre observations sol et espace. Le spatial permet également d'explorer les différentes planètes et satellites du système solaire, permettre de cartographier la répartition de l'eau dans le système solaire, déterminer l'évolution des différentes planètes et identifier les conditions propices à la vie.

1.2 Océan-Atmosphère

- **Atmosphère**

L'objectif est d'observer l'état de l'atmosphère et de ses constituants gazeux, liquides et condensés pour comprendre à différentes échelles les processus atmosphériques et leurs interactions avec le système Terre. L'enjeu est de suivre l'évolution de l'état de l'atmosphère de l'échelle locale à l'échelle globale à différentes échelles temporelles pour le climat, la météorologie et le suivi d'événements spécifiques.

- **Océanographie**

Les satellites jouent un rôle majeur en océanographie dans un système intégré (modèles, observations et in-situ) pour les besoins variés (recherche, climat, santé de l'océan, prévision & services océaniques). Ils permettent d'accéder à des observations de paramètres de surface clés pour la compréhension, le suivi et la prévision des océans : niveau de la mer et courants géostrophiques, température et salinité de surface de la mer, biogéochimie marine (chlorophylle, matières en suspension, matières organiques dissoutes colorées), rejets fluviaux et transport sédimentaire, vagues, vents, glace de mer, suivi d'efflorescence d'algues

nuisibles/toxiques et invasives (e.g. algues vertes, algues brunes-Sargasses), habitats benthiques et bathymétrie. La télédétection spatiale apporte une couverture unique : globale, à haute résolution (spatiale et temporelle) et à long terme.

1.3 Surfaces et Interfaces Continentales

Les enjeux sociétaux pour le domaine de l'étude de la surface et interfaces continentales (SIC) sont liés à la nécessité de garantir les besoins primaires des sociétés (ressources en eau, production alimentaire, sécurité - risques géophysiques, technologiques et sanitaires) et à des besoins de connaissance (fonctionnement des cycles biogéochimiques et des écosystèmes terrestres). Ces enjeux sont exacerbés par les changements globaux incluant le changement climatique, les changements d'usages des surfaces et de façon générale, la pression humaine croissante sur les écosystèmes terrestres. Dans la prospective 2018-2022, les objectifs scientifiques de l'INSU-SIC sont répartis dans quatre thèmes : (1) flux de matière et d'énergie, (2) fonctionnement des écosystèmes continentaux et littoraux, (3) dynamique des éléments et des contaminants, et (4) paléo-environnements. La contribution du spatial est bien établie pour les thèmes (1) et (2), émergente pour le thème (3), marginale pour le thème (4).

Un défi scientifique transverse pour la communauté SIC est la méconnaissance des propriétés notamment physiques de la zone critique, qui sont très variables à de multiples échelles spatiales. L'approche empirique est souvent nécessaire, ce qui justifie un fort besoin d'observations spatialisées. Sur le plan plus fondamental, l'émergence du concept de zone critique dans le domaine SIC favorise la combinaison de données in situ et spatiales avec la modélisation pour répondre à ces enjeux sociétaux et scientifiques.

1.4 Astronomie & Astrophysique

Toutes les disciplines en A&A s'appuient très fortement sur l'observation de l'espace depuis le sol mais aussi depuis l'espace, notamment :

- Observation de notre système solaire
 - des plasmas spatiaux, des relations Terre-Soleil et du Soleil (météorologie de l'espace et impacts à la fois sociétaux et technologiques sur l'accès à l'espace et sur les infrastructures sol),
 - de tous les corps planétaires afin de comprendre la formation, l'évolution du système solaire et l'habitabilité des corps extraterrestres.
- Observation de l'Univers à toutes les échelles pour :
 - la recherche et caractérisation des exoplanètes,
 - la caractérisation de la physique stellaire et du milieu interstellaire,
 - la caractérisation de la physique de l'accrétion et de l'éjection,
 - l'étude des galaxies et de leur évolution,
 - l'observation des grandes structures de l'Univers,
 - la cosmologie,
 - l'astronomie multi-messagers et le ciel transitoire.

II Rôle du spatial, instrumentation, données et acteurs principaux

II.1 Le rôle de la composante spatiale

L'espace représente pour l'ensemble des domaines de l'INSU l'opportunité d'accéder à un observatoire fournissant une couverture spatiale globale et locale avec un suivi temporel potentiellement à haute fréquence et sur le long terme. Il permet de construire des longues

séries temporelles, que cela soit des propriétés de l'atmosphère terrestre ou des surfaces continentales et océaniques que celles du Soleil et de leurs interactions avec l'environnement Terrestre, mais aussi de construire les grands relevés du ciel, éléments incontournables de l'observation de l'Univers. L'analyse de ces données s'appuie également fortement sur leur combinaison avec des observations sol, particulièrement dans le cas de l'observation de la Terre. L'observation spatiale est utilisée pour valider les paramétrisations des modèles géophysiques. La donnée spatiale est aussi assimilée dans les modèles opérationnels. En observation de la Terre, la donnée spatiale est utilisée pour caractériser les effets du changement climatique à l'échelle du globe et pour suivre les effets des événements extrêmes sur notre environnement. L'espace est aussi un objet d'exploration et d'observation en soit propre car il nous permet d'accéder à des milieux astrophysiques ou à des longueurs d'onde autrement inaccessibles.

II.2 L'instrumentation

L'expertise et la maîtrise instrumentale sont essentielles pour l'ensemble des domaines. Cette expertise va de la définition, conception, réalisation, test et opération d'instrument (par exemple en A&A pour ce dernier point), à la maîtrise de la physique de la mesure, au support à l'analyse de données (développement de produits de niveaux élevés et calibration/valorisation de données spatiales). Rester proche de l'instrumentation embarquée est un objectif commun à tous les domaines. L'enjeu est de maintenir d'une part la dynamique de l'utilisation de la donnée spatiale et d'autre part une capacité à accéder facilement à des données adaptées à la recherche, de rester au plus proche des instruments pour maîtriser et améliorer la physique de la mesure, mais aussi de proposer et chercher de nouveaux concepts d'observation à travers une capacité de R&T en amont de tout nouveau projet. La construction de versions aéroportées et terrestres, voire de laboratoire, de l'instrumentation spatiale et leur maintien en condition opérationnelle sont essentielles aux activités de recherche de tous les domaines de l'INSU.

II.3 Les données et les outils d'analyse

Ce qui semble commun à tous les domaines est la nécessité du développement de chaînes de traitement des données allant du capteur aux produits à haute valeur scientifique ajoutée (calibration sol et amont, validation et suivi instrumental), afin ensuite de les assimiler dans les modèles par exemple météorologiques, océanographiques... Ces développements requièrent des ressources de calcul et de stockage suffisamment dimensionnées pour le traitement de masse.

L'autre problématique est la mise en valeur des données traitées, leur stockage pérenne et leur accès facile, ce pour quoi il semble indispensable de s'appuyer sur les SNO/ANO et les centres de données et d'expertises constitués au niveau national pour rendre accessible et mettre à disposition des données d'archives (et en garder la souveraineté). Enfin, se pose le problème grandissant du stockage et du traitement de volumes de données de plus en plus importants.

II.4 Les acteurs clefs.

Le CNES est le premier partenaire de nos laboratoires dès lors qu'un projet scientifique a une composante spatiale. Le CNES est également en charge de définir et d'accompagner la programmation spatiale, notamment son volet scientifique. Pour cela, il s'appuie sur des comités d'experts composés en partie de chercheurs et chercheuses de nos laboratoires qui l'aident également à définir sa prospective quinquennale. Au niveau international, c'est le CNES qui représente la France et défend les priorités de notre communauté dans les instances européennes ou internationales. Au niveau national, le CNES soutient financièrement les

activités d'accompagnement scientifique des programmes spatiaux, de développements instrumentaux, de recherche et développement, d'analyse et de traitement de données. Le CNES finance ou co-finance également des positions de post-doctorants et doctorants dans nos laboratoires. Il participe également à la vie de notre communauté à travers le financement des programmes nationaux de l'INSU ainsi qu'à celui d'un certain nombre d'infrastructure de recherche, notamment Data Terra ou Paradise.

Le consortium instrumental qui se construit autour d'un PI et de ses Co-PI reste la structuration classique de toutes les missions spatiales. Cette structuration souligne le rôle clef du PI et de l'importance pour les chercheurs de l'INSU d'assumer ce rôle et d'en être reconnu/soutenu par l'INSU.

Les laboratoires de l'INSU travaillent avec un très grand nombre de partenaires, institutionnels, industriels et agences spatiales que cela soit au niveau national ou international. Mais ce qui ressort très clairement est le rôle central du CNES. Notons toutefois des relations entre laboratoire et le CNES très différentes en fonction du rôle des laboratoires dans les projets spatiaux, que cela soit du niveau de la décision, de la définition et du suivi des missions spatiales, de la valorisation des données ou des relations avec l'industrie. Le paysage semble en pleine évolution dans le domaine de l'observation de la Terre, avec le rôle grandissant des géants du numérique.

III Enjeux actuels et futurs

III.1 Les enjeux actuels

L'observation depuis l'espace joue un rôle primordial pour l'observation de la Terre, surtout dans un contexte de suivi du changement climatique, de prédiction et suivi des événements extrêmes et d'appui à la décision. L'accès à la haute résolution spatiale dans toute la gamme spectrale couplée à des capacités de revisite temporelle définissent les grandes lignes des évolutions attendues dans ce domaine, car l'observation depuis l'espace devient de plus en plus un outil d'application opérationnelle.

L'exploration de l'espace joue un rôle essentiel pour l'exploration de notre environnement (physique des plasmas, et météorologie de l'espace par exemple) et de notre système solaire, à travers l'exploration planétaire in situ et demain le retour d'échantillon. Pour l'observation de l'Univers, l'observation depuis l'espace permet d'accéder à une gamme spectrale inaccessible depuis le sol couplé à une couverture et une résolution spatiale et temporelle, toujours meilleures.

III.2 Quels développements présents et futurs ?

En premier lieu, il faut maintenir et consolider la capacité des laboratoires d'investir sur tous les compartiments du spatial : de la R&T, aux moyens de calibration et validation sol des données spatiales (cal/val pour SIC, TS et OA, et moyens d'essai pour AA), à la préparation et la conception des futures missions spatiales, à la connaissance de la physique de la mesure et à l'instrumentation de demain, à leur développement et exploitation. Toutes ces questions mettent en évidence le rôle clé du partenariat INSU-CNES et du besoin de maintenir et de renforcer chez ces deux organismes leurs capacités actuelles. La préservation, la production et la mise en valeur des données font parties aussi des grands enjeux de demain, avec des quantités et une diversité qui vont aller de plus en plus en nombre et complexité. A ce titre, le rôle des SNO/ANO et d'IR comme Data Terra, DINAMIS est exemplaire et souligné par tous les domaines.

IV Le Spatial à l'INSU

IV.1 Rôle du spatial pour la recherche à l'INSU

L'apport du spatial pour l'INSU est central à ses recherches. C'est **un observatoire offrant une couverture spatiale globale couplée à de la haute résolution spatiale et potentiellement sur de grande échelle temporelle avec possiblement de grandes fréquences d'observation**. Un des enjeux d'aujourd'hui pour la communauté scientifique est de pouvoir construire de longues séries temporelles que cela soit pour le suivi des changements globaux ou pour l'observation de l'Univers pour le ciel transient. L'exploration depuis l'espace permet aussi d'accéder à des milieux inaccessibles sur Terre (régime de plasma, accès aux objets planétaires du système solaire), à une gamme spectrale invisible depuis le sol et à des conditions physiques permettant la réalisation d'expériences de physique fondamentale irréalisables sur Terre (par exemple de micro-gravité).

IV.2 Rôle de l'INSU dans l'exploration de l'Espace

Les chercheurs et ingénieurs des laboratoires de l'INSU ont un rôle majeur dans **l'élaboration d'une mission spatiale**. La question scientifique est la première étape de tout projet de mission spatiale. Pour y répondre, **des méthodes pour produire les données nécessaires à la résolution des questions scientifiques doivent être imaginées**. La première étape consiste donc à réaliser une preuve de concept ou/et de vérification que les mesures attendues apporteront une plus-value et permettront d'accéder aux performances et précisions voulues. Cela nécessite de modéliser le milieu et la variable géophysique à mesurer/restituer, la physique de la mesure, le fonctionnement de l'instrument et son mode d'observation. Cette première étape devient de plus en plus nécessaire pour **soutenir le choix d'une instrumentation dans un contexte international extrêmement compétitif**. Cette instrumentation sera soit sous maîtrise des laboratoires de l'INSU (ce qui est le cas généralement pour le domaine AA pour des instruments de taille modeste ou/et des sous-systèmes instrumentaux), soit sous maîtrise du CNES ou industrielle (ce qui est le cas pour les domaines de l'observation de la Terre). Le corollaire de toute identification d'observable est la **création de produits de haut niveau distribués à la communauté et capables de répondre aux questions scientifiques**. Ce qui reste toujours sous responsabilité des laboratoires, dans tous les domaines de l'INSU, est le **développement d'analyses et de traitements des données novateurs et répondant aux besoins de la recherche** (curation des données, inter opération, exploitation scientifique, amélioration des algorithmes, validation et définition des futures besoins). Un des enjeux aujourd'hui est la science ouverte, c'est-à-dire, **d'assurer un accès libre et gratuit aux produits de la recherche** ce qui n'est possible que si les données sources sont libres, condition indispensable pour optimiser une exploitation aussi complète que possible des données produites. C'est aussi un moyen de garantir une transparence scientifique et donc de maintenir la confiance des citoyens vis à vis du savoir produit par l'INSU (très important pour des sujets comme le changement climatique). Tous ces travaux ne peuvent se faire uniquement au niveau national et nécessitent depuis le début une collaboration scientifique internationale la plus ouverte et la plus riche possible, d'où le besoin constant d'un support et un accompagnement des institutions.

La chronologie typique d'une mission scientifique est résumée par la Figure 1. Elle commence par la définition de l'objectif scientifique suivi par un investissement en recherche et développement instrumental. La maîtrise d'œuvre instrumentale implique un rôle essentiel tout au long d'une mission scientifique. L'avantage d'une telle participation est de pouvoir contrôler, au plus près, l'adéquation entre objectifs scientifiques, profil de la mission et

performances instrumentales. Il permet aussi de maintenir un potentiel technique et d'ingénierie dans nos laboratoires, source d'innovation indispensable pour la compétitivité de nos laboratoires au niveau international. **Notons que dans le cas du domaine AA, les techniques instrumentales sont pour la plupart trop spécialisées pour être à maîtrise industrielle et nécessitent donc d'être développées entièrement par les laboratoires et en collaboration avec le CNES. Ce n'est pas le cas dans le domaine de l'observation de la Terre, qui doit s'appuyer sur un savoir-faire industriel pour la construction des instruments et donc concilier avec des capacités et intérêts industriels pour bâtir ses missions scientifiques.**

Les phases communes à tous les domaines de l'INSU restent les phases 0 et A et la phase E2 de calibration et validation des données obtenues (Figure 1). La phase E2 consiste dans le cas de l'observation de la Terre en une phase d'expériences et d'observations au sol ou aéroportées (ballons, avion, IR ANVOLE, et sol) ou en laboratoire et dans le cas du domaine AA en un ensemble de calibration en laboratoire (IR PARADISE) et de tests en support aux opérations.

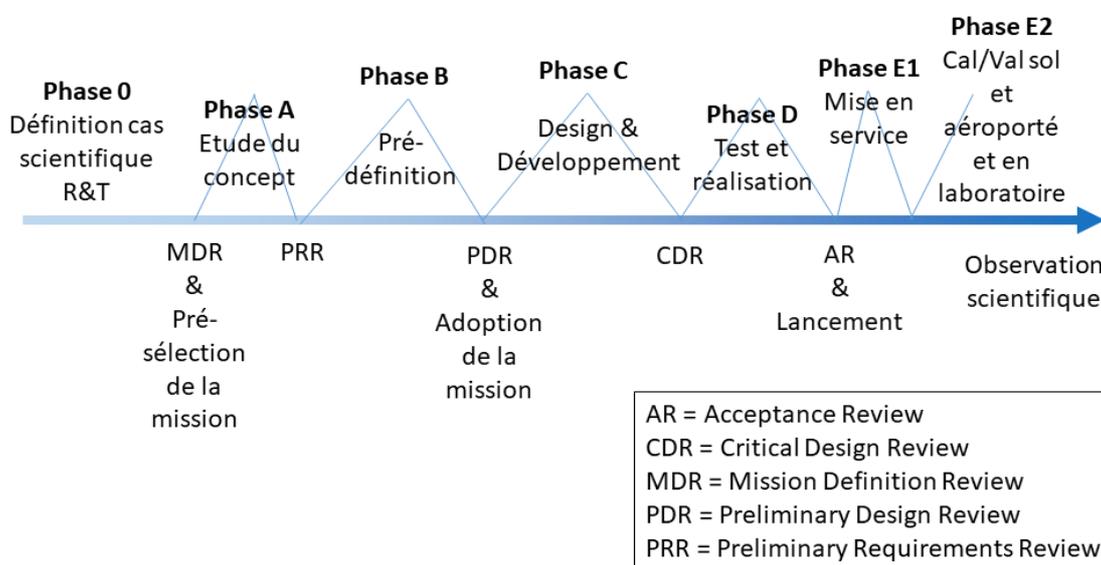


Figure 1 : Frise chronologique d'une mission spatiale

IV.3 Données

La donnée d'observation depuis ou de l'espace est au cœur de tous les domaines scientifiques de l'INSU. Leur maîtrise depuis leur production à leur stockage et à leur analyse implique le développement/maintien de moyens importants au niveau national et international. La donnée d'observation est donc un enjeu d'autant plus crucial aujourd'hui dans un contexte de concurrence économique de plus en plus important avec une présence croissante des GAFAM et le risque d'impacter l'accès libre et ouvert aux données, cœur du modèle de la science promue par nos communautés. Pour y faire face, la communauté scientifique doit continuer à s'organiser autour de grandes bases de données interopérables et gérées par des centres de données suffisamment dimensionnés pour y produire des données de haute valeur ajoutée, originales et libres d'accès. Les institutions nationales ou européennes doivent quant à elles s'organiser pour mettre à disposition des ressources et outils de traitement souverains.

IV.4 Partenaires

Les laboratoires de l'INSU travaillent avec un très grand nombre de partenaires, qu'ils soient institutionnels ou industriels au niveau national ou international. En dehors des grands acteurs du spatial européen comme Thalès et Airbus, ils existent une multitude de PME et grands groupes sous contrats ou contractualisant nos équipes de recherche. L'exploration de l'espace est le théâtre de grands changements depuis une dizaine d'années, avec l'émergence de nouveaux acteurs aux Etats Unis. **Travailler avec ces nouveaux acteurs**, communément identifié comme acteurs du NewSpace, **pose de nombreuses questions dont en premier lieu l'intérêt de telles collaborations pour nos recherches à l'INSU.**

Ce qui fait la particularité du spatial français est le rôle prédominant du CNES qui accompagne les laboratoires de la conception initiale d'une mission spatiale à toutes les étapes d'une mission (Figure 1), jusqu'à l'archivage pérenne des données des missions à responsabilité française. Le CNES, par accord cadre avec le CNRS, est d'ailleurs juridiquement l'unique interlocuteur avec les instances internationales, agences spatiales, instituts ou nations partenaires. C'est le CNES qui signe MOU et accord de coopération au nom du CNRS et qui livre les contributions instrumentales. Cette délégation de la responsabilité juridique pose d'ailleurs le problème de la reconnaissance et de la protection intellectuelle de l'apport de nos équipes dans ces missions scientifiques qui sont rarement proprement identifiés dès le début. C'est également le CNES qui défend les priorités et intérêts de la communauté scientifique dans les instances internationales et notamment au niveau européen. **Basé sur une collaboration au plus proche entre laboratoires et le CNES, ce fonctionnement satisfait la communauté scientifique, tant que cette proximité et cette coopération entre nos deux organismes sont préservées et consolidées dans l'optique d'optimiser la plus-value scientifique des missions spatiales.**

Notons les recommandations de l'audit « Evaluation de la conduite des projets spatiaux impliquant des laboratoires » mené par le CNES en étroite association avec l'INSU qui rappellent que toute décision d'engagement français sur une mission spatiale doit être accompagnée par un processus d'évaluation à la fois menée par le CNES mais aussi par l'INSU (recommandation A1). **Une analyse par l'INSU de la participation de nos laboratoires dans une mission doit être réalisée de manière indépendante au processus du CNES afin de connaître clairement la criticité de tout engagement sur une nouvelle mission en termes de moyens et de ressources humaines côté INSU.**

IV.5 Evolutions

Ce qui ressort des différents éléments discutés au cours de cet exercice de cartographie du spatial est l'existence de plusieurs enjeux auxquels doit faire face la communauté scientifique française des laboratoires INSU :

- le premier est celui du traitement des données. Au-delà de leur production qui restent une des responsabilités majeures des équipes INSU, le traitement d'un ensemble de données de plus en plus complexes et nombreuses pose des difficultés nouvelles, nécessitant des développements nouveaux et innovants comme l'utilisation de l'IA mais aussi et surtout le renforcement d'un ensemble de bases de données nationales qui assurent un accès libre et efficace à ces données. **Développer les outils de collaboration (du type actions spécifiques par exemple) avec les instituts du CNRS spécialisés sur les techniques d'analyse des données est donc nécessaire.**

- le deuxième enjeu est celui des nouveaux types de mission spatiales. Avec l'objectif d'une amélioration des couvertures spatiales et temporelles des observatoires actuels, les missions

spatiales utilisant des constellations et/ou essaims de plateformes sont de plus en plus proposés pour l'observation de la Terre et pour l'observation des plasmas spatiaux et des environnements planétaires dans le système solaire en AA. Concevoir et instrumentaliser de telles missions va nécessiter une adaptation de nos laboratoires peu adaptés à la production en série (surtout dans le domaine AA). Cela renforce la nécessité de **pérenniser les compétences instrumentales et techniques dans nos laboratoires, en recrutant et formant de nouveaux personnels IT dans un contexte compétitif international de plus en plus important**. Cela illustre également l'importance pour nos laboratoires de maintenir et de développer une capacité d'innovation en instrumentation. L'inter-étalonnage de mesures scientifiques issues de telles constellations de qualité variable pour des missions à faible coût reste une priorité pour les laboratoires INSU en lien avec les partenaires CNES/ESA et du secteur privé.

Du point de vue de la gouvernance, on peut aussi noter plusieurs défis pour nos laboratoires et pour l'INSU :

- **savoir construire une gouvernance commune et efficace de la recherche spatiale avec l'INSU et le CNES organisant de manière optimale et concertée l'investissement en termes de ressources humaines et financières,**
- **renforcer le rôle de l'INSU dans le spatial en mettant en exergue sa place essentielle dans le dispositif de la recherche et innovation.**

V L'INSU comme acteur clef du spatial

Les recommandations qui émergent de cet exercice ayant l'objectif de renforcer la visibilité et la capacité de piloter la recherche s'appuyant sur l'espace sont formulées ci-dessous :

1. **La structuration de l'INSU autour des SNO et IR doit permettre à la communauté de répondre aux grandes évolutions dans le traitement et l'accès aux données.** Renforcer celui des SNO comme acteurs principaux pour la calibration/valorisation des données leur permettrait de bénéficier des financements du spatial (par exemple ceux de l'ESA). Pour les agences spatiales, cela permettrait d'avoir un site avec un historique et une multitude d'observations complémentaires au-delà de la variable spécifiquement visée par la mission. Les pôles de données et les IR ont aussi un rôle de créer plus de synergie thématique pour mieux insérer le spatial dans les moyens d'observation disponibles.
2. **La relation privilégiée entre l'INSU et le CNES est nécessaire au succès des missions spatiales scientifiques.** En plus de l'implication de la communauté scientifique lors de la prospective du CNES et aux différents comités mis en place par le CNES pour l'aider à la décision, **une amélioration du retour vers la communauté scientifique sur les décisions du CNES est souhaitable.** On constate très souvent une circulation imparfaite de l'information depuis les comités TOSCA, CERES ou CPS vers la communauté scientifique, notamment sur les processus d'engagement des missions, sur les discussions bilatérales qui sont menées par le CNES et sur les choix du CNES sur les grands programmes européens. La communauté scientifique et l'INSU en général apprécient beaucoup la volonté du CNES d'impliquer plus directement et systématiquement leurs représentants dans le suivi des projets et souhaitent que cette implication soit poursuivie.

Plus généralement, **travailler en concertation avec les autres tutelles de nos laboratoires, les universités, le CNES, les autres instituts du CNRS, les autres organismes de recherche comme le CEA, l'ONERA, Météo-France, l'IRD... est nécessaire** mais nécessite une meilleure coordination de nos prospectives pour la rendre plus efficace.

3. **La maîtrise de la performance instrumentale par les équipes des laboratoires INSU est la clé pour atteindre les objectifs scientifiques des missions spatiales.** Les différents domaines de l'INSU suivent généralement des modèles de développement assez différents. Dans le domaine AA, les laboratoires sont maîtres d'œuvre des instruments ou d'une partie. Cela a l'avantage d'impliquer la communauté dans toutes les étapes du développement de la mission mais a l'inconvénient d'un coût en ressource humaine de plus en plus difficile à soutenir en raison de la baisse des postes ITA de ces 10 dernières années et de la concurrence avec le privé en termes de salaire limitant de fait le recrutement de personnel de très haut niveau. Le modèle des domaines SIC, TS et OA se traduit par la délégation à l'industrie des phases de développement instrumental et de privilégier le maintien d'une expertise sur la physique de la mesure. Il a l'avantage de réduire le coût en ressources humaines pour les laboratoires, mais pas le coût financier, et limite la capacité de suivi par la communauté scientifique des développements instrumentaux. Dans ce cas de figure, le rôle du CNES est crucial puisque c'est assez souvent le CNES qui assure les échanges entre les communautés scientifique et industrielle. **Dans les deux cas, il apparaît nécessaire de maintenir une compétence forte en physique de la mesure et donc assez logiquement une maîtrise instrumentale dans les laboratoires**, ne serait-ce que pour fournir les produits d'ordre élevés à partir des données d'observation, de définir et démontrer des systèmes instrumentaux spécifiques, assurer une veille technologique, et contribuer aux activités de calibration/valorisation. Cette dernière activité **s'appuie très fortement sur l'observation in situ qui permet de valider les observations spatiales, de compléter l'observation spatiale pour les zones inaccessibles et produire des cartes 4D via l'interpolation des données.**
4. **Maintenir et renforcer le personnel d'IT et de chercheurs dans les laboratoires pour préserver la capacité de l'INSU à répondre aux enjeux de l'exploration de et depuis l'espace.** Maintenir des compétences techniques dans nos laboratoires représente un des enjeux principaux pour le futur de l'exploration de l'espace et depuis l'espace. Du fait de la diminution du nombre de personnels, il est aujourd'hui difficile pour les laboratoires de maintenir le potentiel instrumental et d'innovation, et les connaissances en physique de la mesure. Nos laboratoires sont donc contraints d'externaliser de plus en plus de métiers non essentiels dans le meilleur des cas ou de renoncer à des opportunités. Cette érosion est extrêmement inquiétante car elle met à mal nos capacités actuelles de maintenir l'excellence de nos laboratoires de l'INSU. Il est donc important de rappeler, en premier lieu, l'importance de **maintenir du personnel d'ITA et de chercheurs pour préserver la capacité de l'INSU à répondre aux enjeux de l'exploration de et depuis l'espace.** Pour le court/moyen terme, on pourrait aussi accueillir plus d'agents CNES dans les labos mixte CNRS/CNES sur des missions ou projets. En complément de cet effort, **développer des outils communs à tous les laboratoires travaillant dans le spatial pour rationaliser l'accès à un ensemble d'industries** spécialisées dans les métiers qui

commencent à manquer dans nos laboratoires aiderait nos laboratoires à pallier momentanément le manque de ressources. C'est ce qu'a commencé à faire l'INSU avec la création de marché AP/AQ. Néanmoins cette solution palliative a un coût élevé et elle doit s'accompagner des financements afférents vers les laboratoires/projets. Dans la même idée, l'organisation de nos laboratoires autour d'une centrale d'achat pour les composants semble aujourd'hui également une nécessité (organisation qui devrait logiquement se faire à l'échelle du CNRS si possible).

5. **Former les étudiants** dans les disciplines du spatial, c'est-à-dire, en instrumentation, physique de la mesure, et dans le traitement massif de données. Il faut renforcer les dispositifs permettant à nos disciplines de former de nouvelles générations d'étudiants et de chercheurs. Cela passe en premier lieu par l'intégration d'enseignants-chercheurs et professeurs universitaires de nos thématiques dans les projets spatiaux de l'INSU et la participation des chercheurs de l'INSU aux formations universitaires (cours de master, écoles thématiques, formation continue, apprentissage...). Renforcer les soutiens aux personnels universitaires pour permettre leur investissement dans des projets spatiaux souvent très chronophages est nécessaire. Enfin, la formation doctorale est un outil essentiel à la formation de la future génération de chercheurs ou enseignants-chercheurs. Développer et renforcer les dispositifs de financement des doctorants est donc primordial pour maintenir notre capacité à attirer des étudiants dans nos disciplines.

Remerciements : Nous remercions les Comités Scientifiques de l'INSU, les programmes nationaux pour leurs commentaires et recommandations, ainsi que S. Biancamaria, F Karbou, A Bègue, L Kergoat, F. Arduin, F. Birol, P. Bonnefond, J. Boutin, A. Minghelli, E. Autret.

Annexe II.1 *Le rôle de la composante spatiale*

II.1.1 *Terre Solide*

- Observations de la Terre : par satellites (géostationnaires, constellation basse altitude et de nano-satellites), drones et avions pour la télédétection,
- Planétologie : exploration in situ et à distance des corps du système solaire (orbiteurs, atterrisseurs et rovers) et retour d'échantillons extra-terrestres.

II.1.2 *Océan-Atmosphère*

- Observation spatiale essentielle pour l'étude du niveau de la mer et du cycle de l'eau, de la chaleur et du carbone dans les océans et l'atmosphère depuis l'échelle régionale jusqu'à l'échelle planétaire,
- Télédétection comme outil incontournable pour une couverture globale à l'aide de satellites scientifiques et/ou opérationnels par des instruments passifs ou actifs à des résolutions spatiales et temporelles différentes (orbite défilante versus orbite géostationnaire) délivrant des observations 2D (position), 3D (position + altitude/temps), 4D (position + altitude + temps),
- Utilisation de porteurs (avion, ballon) pour activités scientifiques (campagnes dédiées ou d'opportunité), pour démonstration de preuve de concept (validation de l'instrumentation et des méthodes d'inversion de la donnée géophysique) et pour la validation des produits de données issus de l'observation spatiale principalement lors de campagnes aéroportées, terrestres et in-situ marines,
- Validation des paramétrisations des modèles de recherche et opérationnels,
- Assimilation des données dans des modèles de recherche et opérationnels,
- EU : Copernicus met en œuvre de capacités opérationnelles de suivi du système Terre avec une vision à long terme (> 20 ans). Celles-ci s'appuient sur une composante spatiale remarquable (les missions Sentinel) et un ensemble de services, dont le service marin (CMEMS) piloté par la France (Mercator Ocean).

II.1.3 *Surfaces et Interfaces Continentales*

- L'observation spatiale est essentielle pour les travaux sur le cycle de l'eau et du carbone dans les écosystèmes terrestres depuis l'échelle du territoire jusqu'à l'échelle planétaire.
- A l'échelle des territoires, les produits issus de la télédétection sont fréquemment employés pour caractériser l'usage des sols et spatialiser des modèles éco-hydrologiques permettant de mieux quantifier les ressources en eau et la dynamique de la végétation.
- A l'échelle planétaire, la télédétection est un outil incontournable pour le suivi des changements globaux (urbanisation, déforestation, irrigation, variation du stock d'eau, diminution des glaciers, érosion des côtes etc.). Avec le programme Copernicus¹, la

¹ Les données Copernicus sont libres pour la recherche et les applications aval ce qui facilite le transfert vers les entreprises et les gestionnaires des méthodes développées dans les laboratoires :

- TS : cartographie des mouvements de la surface terrestre liés aux séismes (Sentinel-1 et 2), glissements de terrain (Sentinel-1 et 2), etc.
- OA : suivi des efflorescences algales (imagerie optique Sentinel-2 et 3), de la température de l'océan (infrarouge thermique Sentinel-3), du niveau des océans (altimétrie Sentinel-3), de la rugosité de surface lié aux vents (Sentinel-1), etc.

téledétection est aussi devenue un outil majeur pour caractériser les événements extrêmes (inondations, sécheresses, incendies, etc.) car la revisite est améliorée et les données sont en accès libre.

- Le spatial est utilisé pour le suivi à (de plus en plus) long terme du système Terre, avec une résolution spatiale presque homogène, et donc la comparaison à l'échelle globale de la dynamique et de l'évolution des surfaces continentales.

II.1.4 Astronomie & Astrophysique

- Télédétection à différentes résolutions spatiales dans la majeure partie du spectre électromagnétique (mm, IR, VIS, UV, X, gamma), inaccessible au sol du fait de l'absorption atmosphérique, menée depuis des satellites mais aussi des ballons stratosphériques (démonstration, prototypage...) pour la caractérisation des structures de l'univers à toute échelle (corps planétaires, Soleil, plasmas, étoiles, milieu interstellaire, galaxies, grandes structures, cosmologie).
- Observations in-situ nécessaires (orbiteurs, constellations, atterrisseurs et rovers) pour l'exploration planétaire des surfaces et atmosphères, pour la physique des plasmas spatiaux et météorologie de l'espace (particules chargées, neutres, champs électriques et magnétiques, ondes) ou pour les expériences de physique fondamentale en micro-gravité,
- Dans le périmètre du NewSpace, l'utilisation des cubesats reste très marginale (ex : PICSAT) car les charges utiles imposées par les besoins scientifiques font rapidement passer les projets de nano à micro satellites à minima. On note néanmoins l'intérêt potentiel pour les essais/constellations pour la physique des plasmas spatiaux et la météorologie de l'espace et l'accompagnement scientifique de certaines missions d'exploration.

- SIC : suivi des glaciers et du manteau neigeux (Sentinel-2), cartographie de l'occupation des terres (Sentinel-2), déforestation (Sentinel-1 et 2), surfaces inondées (Sentinel-1 et 2), surfaces agricoles irriguées (Sentinel-2), etc.

Annexe II.2 *L'instrumentation*

II.2.1 *Terre Solide*

Instrumentation dédiée à l'acquisition d'informations pluri-disciplinaires en géomorphologie, géochimie/pétrologie, cosmochimie, géophysique et astrobiologie :

- Caméras : l'imagerie visuel, (hyper/multi) spectrale (VIS-NIR-IR-thermale),
- Spectrométrie (VIS, IR, UV...),
- Radar, InSAR, GPR,
- Altimétrie laser (ou "lidar" aéroporté sur Terre, sinon satellitaire),
- Sismomètres sur des atterrisseurs,
- Magnétomètres,
- Rovers: instrumentation en géochimie miniaturisée: raman, ablation laser, spectromètre de masse,
- GPS-GNSS,
- Géodésie spatiale fondamentales (VLBI, DORIS, SLR),
- Gravimétrie spatiale,
- Analyses des échantillons extraterrestres en laboratoire (météorites ou échantillons ramenés sur Terre),

Une partie du développement instrumental pour les missions spatiales est fait dans les laboratoires.

II.2.2 *Océan-Atmosphère*

Atmosphère

- Radiométrie et polarimétrie passive : UV, visible, infrarouge, sub-millimétrique, micro-onde; imageurs 2D (caméra) et 1D (push broom), radiomètre mono-pixel scannant,
- Instrumentation active : lidar (fauchée limitée), radar (fauchée limitée ou relativement étendue), SAR,
- Radio-occultation,
- Versions aéroportées de certains capteurs spatiaux opérés depuis les avions de Safire (par exemple le radar de nuage RASTA lié aux missions américaine CloudSat et européenne EarthCARE; l'imageur OSIRIS lié au capteur 3MI de la mission européenne Post-EPS),

Océanographie :

- Altimétrie de large fauchée pour l'étude de la dynamique océanique à haute résolution et l'hydrologie (SWOT), Altimétrie laser.
- Radiométrie visible et infra-rouge (couleur de l'eau, Température de surface)
- Radiométrie hyper-fréquence avec antennes à ouverture réelles (eg., SST) ou à synthèse d'ouverture (Salinité de surface, SMOS),
- Diffusiométrie vent / vagues (CFOSAT)

Toutes les mesures satellites doivent être complétées par des mesures in-situ permettant d'étalonner et de valider les observations spatiales, d'apporter la dimension verticale et de donner un contexte historique à long terme – validation pendant la phase initiale de calibration et pendant toute la période d'exploitation d'une mission.

La définition technique en amont de l'instrumentation est faite par l'agence spatiale (CNES, ESA) selon les objectifs de la mission et des spécifications scientifiques de l'instrumentation définis par les laboratoires. Le développement des nano-satellites est limité en océanographie,

à cause de la grande précision nécessaire de la mesure, et le manque de structures nationales clairement identifiées par la communauté océanographique pour inciter les scientifiques à déposer des idées de nanosatellites.

II.2.3 Surfaces et Interfaces Continentales

Il y a peu de développement instrumental pour le spatial dans les laboratoires SIC, la réalisation instrumentale industrielle est généralement sous la responsabilité d'une agence spatiale. La communauté SIC utilise une gamme très variée de capteurs avec des résolutions spatiales, temporelles aussi variées depuis la très haute résolution optique multi-angulaire (Pléiades) jusqu'aux imageurs micro-onde passive (SMOS) en passant par les altimètres nadir, les imageurs SAR (Sentinel-1), les radiomètres multispectraux (Sentinel-2). La définition technique en amont de l'instrumentation est faite par le CNES dans la plupart des cas. On note (i) l'arrivée de nouveaux acteurs avec l'émergence des nano-satellites mais pas de rupture scientifique majeure à ce jour et (ii) le souhait de pouvoir initier des développements instrumentaux dans les laboratoires.

II.2.4 Astronomie & Astrophysique

- Instrumentation de télédétection couvrant l'ensemble du spectre électromagnétique (imagerie, spectroscopie et séries temporelles en mm, IR, optique, UV, X, gamma) à différentes résolutions spatiales,
- Instrumentation in-situ (spectromètre de masse et énergie, magnétomètre, sonde de Langmuir et à impédance mutuelle, mesure de champ électrique...), spectro-imagerie multi-longueurs (UV, visible, IR, LIBS, Raman, etc), analyse chimique par gaz-chromatographie d'échantillons, désorption laser...),

Le développement technique des instruments se déroule sur plusieurs années (~5-10 ans) au sein de consortia internationaux dans la plupart des cas. Il s'appuie sur des équipes intégrant scientifiques et ITAs des laboratoires spatiaux de l'INSU (maitre d'œuvre dans certains cas) avec le soutien technique et financier du CNES (souvent maitre d'ouvrage). L'éco-système du développement technique et de l'évaluation des performances d'une contribution instrumentale implique de nombreux acteurs et interactions et le besoin de suivre l'instrument de la phase de définition jusqu'à la livraison, puis lors des phases d'opérations et d'exploitation scientifique. Le développement technique et l'étalonnage des sous-systèmes ou de l'instrument complet intégré utilisent les installations techniques des laboratoires et/ou des partenaires institutionnels et industriels français et étrangers. Ces installations doivent être mises à niveau ou développées selon les spécificités des instruments à développer et à caractériser.

Annexe II.3 Les données et les outils d'analyse

II.3.1 Terre Solide

Les enjeux

- Développement des chaînes de traitement des données,
- Calibration, analyse des données brutes,
- Traitement du signal qui concerne toutes les données de géodésie spatiale (SLR, DORIS, GNSS, VLBI, gravimétrie, sismique, magnétisme),
- Analyse spectrale,
- Photogrammétrie.

Les outils

- Analyse spectrale – ENVI et libraires spectrales par ex. SSHADE (OSUG),
- Photogrammétrie, Micmac, metashape, BAE socetset ou GXP, Ames Stereo Pipeline,
- Intégration/assimilation des données spatiales comme contraintes dans les modèles (par ex. du climat martien), Pôles Surfaces Planétaires
- l'IR DataTerra/Form@ter a un rôle central pour la mise à disposition de données spatiales et la mise en place de traitements à la demande,
- DINAMIS.

Les évolutions

- Intelligence artificielle et « big data »,
- Google earth engine – monitoring par télédétection,
- Mise en valeur des données traitées (SNO/ANO), leur stockage et leur accès.

II.3.2 Océan-Atmosphère

Atmosphère

Les enjeux

- Assimilation de la donnée spatiale dans les modèles météorologiques,
- Synergie des données spatiales entre elles et avec des observations sols et avec des sorties de modèle,
- Approche satellite-modèle pour validation des représentations de la physique,
- Des méthodologies d'inversion de la donnée spatiale conçues et testées dans les laboratoires français,
- Le transfert radiatif,
- Une quantité de données à analyser en croissance exponentielle.

Les outils

- Un pôle de données dédié : AERIS,
- Un IR Data Terra / AERIS pour le développement d'outils d'analyse en ligne (Virtual Research Environnement),
- l'IR In Air pour les moyens d'observation aéroportés de calibration/validation des données spatiales et la mesure in situ,
- Les IR d'observation in situ : Actris pour les aérosols et l'ozone, ICOS pour les gaz à effet de serre.

Les évolutions

- Vers un usage plus systématique de l'IA dans l'exploitation et la gestion des données

Océanographie

Les enjeux

- Développement de nouveaux algorithmes et de produits démonstrateurs en amont nécessitant un traitement et un stockage en laboratoire,

- Soutien aux grands centres de développement en R&D et diffusion de produits spatiaux,
- Des méthodologies d'inversion innovantes de la donnée spatiale conçues et testées dans les laboratoires français,
- Assimilation de la donnée spatiale dans les modèles de recherche et opérationnelle (Météo-France, Mercator-Océan Internationale),
- Synergie des données spatiales multi-capteurs avec des observations in-situ et avec les sorties des modèles,
- Approche satellite-modèle pour la validation des représentations de la physique.

Les outils

- Pôles de données Data Terra, ODATIS (données spatiales océaniques standards).
- Centres de données et d'expertise : CERSAT : multi-satellite, SNO-CTOH : altimétrie, CATDS – salinité...).
- ILICO pour l'observation des systèmes littoraux et côtiers.
- Le Service National d'Observation ARGO

Les évolutions

- Un grand volume de données spatiales à traiter nécessitant des nouvelles techniques de classification et de traitement de Big Data/AI, et des moyens de stockage et de calcul massifs.

II.3.3 Surfaces et Interfaces Continentales

Les enjeux

- Rôle clé du CNES dans la distribution des données spatiales et la fourniture de chaînes de traitements opérationnelles et adaptées aux besoins utilisateurs,
- Combiner données in situ et spatiales avec la modélisation

Les outils

- Structuration des observatoires SIC en cours menant à une meilleure interopérabilité des bases de données via les IR (OZCAR, ILICO),
- DINAMIS est une coopérative d'images soutenue par le CNES, l'INSU, l'IGN, l'IRD et le CIRAD permettant l'obtention gratuite de données satellitaires commerciales à très hautes résolutions (Pléiades, SPOT 6/7),
- THEIA : fédère les activités autour de l'exploitation des données de télédétection via ses centres d'expertises scientifiques et facilite les échanges avec les acteurs du territoire via le réseau d'animation régionale de Theia.

Les évolutions

- Rapprochement entre pôle de données spatiales et in situ en cours facilitant la cal/val ou l'évaluation des produits issus du spatial,
- Co-construction entre producteurs des données et utilisateurs (ex. pour la calibration/validation) ; besoin d'œuvrer vers la mise en place de bases de données "prêtes à l'emploi" ne nécessitant pas des prétraitements préalables pouvant être massifs (ex. SAR/InSAR),
- Liens à renforcer avec les communautés mathématiques et science de la donnée pour faire évoluer les outils d'analyse existants,
- Les outils des GAFAM sont devenus incontournables pour l'accès et le traitement des données ce qui pose un problème de souveraineté (Google Earth Engine, Microsoft Planetary Computer, Amazon Web Services). Ce rôle est renforcé par l'essor de l'intelligence artificielle qui permet de résoudre des problèmes scientifiques par le calcul intensif.

II.3.4 Astronomie & Astrophysique

Les enjeux

- Données d'observations spatiales de différentes natures : imagerie, spectroscopie, temporelle, échantillon collecté...
- Leur traitement du niveau 0 (données brutes instrumentales) au niveau 2 (produits avancés en valeurs physiques – exemple : images, spectres, séries temporelles) s'appuie sur des moyens d'étalonnage sol qui permettent la caractérisation des instruments,
- Traitements partiellement à bord et finaux au sol dans les centres de données instrumentaux intégré aux segments sols des missions (ex : Instrument Science Center),
- Segments sols gérant le suivi de la santé des instruments et les opérations (sous la responsabilité des laboratoires spatiaux dans la plupart des cas) aussi responsables de la livraison des données formatées, pour mise à disposition des produits de niveaux supérieurs (1, 2, voir 3) aux utilisateurs de la communauté.

Les outils

- Des centres d'opération participant au planning et à la gestion des instruments,
- Des centres de données et d'expertises constitués au niveau national pour rendre accessible et mettre à disposition des données d'archives. Ces centres assurent l'interopérabilité des bases de données existantes connectées, proposent des outils et des services aux communautés scientifiques (ex : CDS, MEDOC, CDPP),
- Des outils d'analyse et d'interprétation propres aux objectifs scientifiques et à la nature des données, développés au sein des laboratoires.

Les évolutions

- Traitement de données massif, apport de l'IA (traitement à bord massif, pré-sélection de données, en particulier pour son utilité face au big data).

Annexe II.4 *Les acteurs-clef**II.4.1 Terre Solide*

Organismes internationaux

- ESA, NASA, DLR, JAXA, Roscosmos, CSA...

Organismes nationaux

- CNES, BRGM, IGN, SHOM

Laboratoires

- Impliqués dans Earth Observation et EO+Planeto : IPGP, ISTerre, GET, CEREGE, Geoazur, Geosc. Montpellier, Geosc. Rennes, LGL-TPE (Lyon), ISTO (Orléans), LMV, LPG, GEOPS, Geo-Ocean (Brest), CRPG, LG-ENS, IMPMC, IRD-LEGO, ITES, IMPMC.

Les Infra-Structures de Recherche et Pôle de données

- DataTerra/Form@ter,
- Data Terra/DINAMIS

Industries

- Airbus DS, Thales

II.4.2 Océan-Atmosphère

Atmosphère

Organismes internationaux

- ESA, EUMETSAT, NASA, NOAA; DLR (Allemagne); JAXA (Japon) ; ISRO (Inde); ISA (Israël)

Organismes nationaux

- CNES, Météo-France, IRD, (IGN), CEA, ONERA, DGA; Commission Européenne (Copernicus)

Laboratoires

- LOA, LATMOS, LMD, LEGOS, LAERO, LaMP, LISA, LSCE

Les Infra-Structures de Recherche

- SAFIRE/In Air, Data Terra/AERIS, ACTRIS-FR, CLIMERI
- ICOS, ILICO

Industries

- Airbus Defense & Space, Thales; partenaires industriels des laboratoires de l'INSU; CS-Group, ACRI, Noveltis, HYGEOS, SPASCIA, GRASP-Global

Océanographie

Organismes internationaux

- NASA, NOAA; ESA (Earth Explorer ; CCI); ASI (Italie), EumetSat, ISRO (Inde); CSA (Chine), UKSA, CSA (Canadien), commission Européenne (Copernicus)

Organismes nationaux

- CNES, Météo-France, Mercator-Océan, IRD, Ifremer, DGA

Laboratoires

- LEGOS, LOPS, LOCEAN, MIO, IGE, LOG, LOV, LATMOS, LERMA, LIENS, LIS, Observatoire de Paris.

Les Infra-Structures de Recherche et Pôle de données

- Data Terra/ ODATIS,
- Euro-ARGO,

Industries

- Airbus Defence and Space, Thales Alenia Space; partenaires industriels du CNES ou des laboratoires de l'INSU: CLS, Noveltis, ACRI, Hygeos, Magellium, C-S Group; start-ups CNRS, etc.

II.4.3 Surfaces et Interfaces Continentales

Organismes internationaux

- ESA (Earth Explorer/BIOMASS, CCI, programme Copernicus...), EU (Copernicus/Sentinel, investissement de la CE sur plusieurs décennies permettant des observations fiables), NASA, DLR, JAXA, ISRO, CSA...

Organismes nationaux

- CNES (expertise unique en qualité image, altimétrie, conception de mission, industrialisation des algorithmes..., présence de personnels CNES dans les UMR, un élément essentiel de la collaboration CNES avec le monde de la recherche), INRAE, Météo-France, IRD, CIRAD, IGN...

Laboratoires

- CESBIO (PIs de TRISHNA, BIOMASS, SMOS, VEN μ S...: hydrologie, agronomie, cal/val de missions spatiales, traitements d'image), LEGOS (PI de SWOT, SMASH, préparation MAGIC, MAG Sentinel-3 Next Generation...: hydrologie, altimétrie (lacs, rivières), gravimétrie, cal/val, traitements d'image, glaciers), GET (hydrologie, qualité de l'eau, projets SCO, préparation SWOT, gravimétrie, préparation MAGIC), HSM (cal/val, préparation TRISHNA, assimilation de données dans modèles de la surface continentale, hydrologie), IGE (préparation SWOT, TRISHNA : cryosphère, hydrologie), CNRM (SWOT, TRISHNA : hydrologie, modélisation du cycle de l'eau et du carbone à l'échelle globale), M2C (SWOT), METIS (préparation SWOT), ICube, Sertitt

Les Infra-Structures de Recherche et Pôle de données

- OZCAR, ILICO,
- Data Terra/THEIA.
- Data Terra/DINAMIS

Industries

- GAFAM (cloud pour le traitement des données massives), industrie aéronautique (Airbus Defense & Space, Thales... : conception d'instruments, exploitation de satellites, services issu du spatial), startups en lien avec les laboratoires publics (Telescop, Kormap, Kavros, MEOSS...), entreprises (Magellium, C-S Group, CLS...)

II.4.4 Astronomie & Astrophysique

Organismes internationaux

- ESA (programmes obligatoires et optionnels), agences nationales européennes, NASA, JAXA, CAS...

Organismes nationaux

- Universités, CNES (agence de moyen et technique), CEA, ONERA. En Cosmologie et l'étude des grandes structures de l'Univers, les hautes énergies et l'astronomie multi-messagers, l'IN2P3 est le principal institut partenaire de l'INSU, tandis qu'avec l'INP ou l'INC les collaborations sont plus ciblées.

Laboratoires

- AIM, CRAL, GEOAZUR, GEOPS, GEPI, IAP, IAS, IMCCE, IPAG, IPGP, IRAP, LAB, LAGRANGE, LAM, LATMOS, LERMA, LESIA, LISA, LGL-TPE, LMD, LPC2E, LP2I, LPG, LUTH, SYRTE

Les Infra-Structures de Recherche et Pôle de données

- CDS, CFHT, IRAM, LOFAR-FR, PARADISE, Instrum-ESO,
- MEDOC, CDPP.

Industries

- Grands groupes opérant dans le domaine de l'aérospatial (ex : Thales, ADS) avec quelques exemples européens : Sodern, LDO, Airliquide, Safran et un tissu de PME de l'aérospatial.

Annexe III.1 *Les enjeux actuels*

III.1.1 *Terre Solide*

- Le spatial est essentiel pour anticiper et analyser les aléas naturels, et mitiger les risques associés. Par ex. glissements de terrain, séismes, éruption volcanique...
- Il fournit des données clés pour comprendre le climat et son évolution, incluant les questions de ressources (en eau notamment), des données pour aider à l'adaptation et variabilité temporelle du littoral (migration des sédiments),
- Il a un rôle clé pour étudier l'intérieur de la Terre et la tectonique (magnétisme, gravité, géodésie...),
- Il a un rôle important dans la définition de références géodésiques stables dans le temps, dans lesquels toutes les données satellitaires sont exprimées (ex: International Terrestrial Reference Frame, ITRF, dont l'IPGP/IGN à la charge), facteur limitant aujourd'hui dans la mesure du niveau des mers par exemple.
- Il est indispensable pour la recherche en planétologie, guère possible sans le spatial.

III.1.2 *Océan-Atmosphère*

Atmosphère

- Le spatial fournit des longues séries temporelles pour le suivi du climat à maintenir tant sur l'exploitation et la pérennisation de données du passé et actuelles, que sur la mise en orbite de nouvelles missions poursuivant des mesures identiques voire meilleures,
- Une couverture globale et permanente de l'atmosphère,
- Avec de la haute résolution spatiale (si possible dans tout le spectre) et de la haute revisite temporelle (géostationnaires ou essaim de satellite par exemple) à considérer désormais pour mieux comprendre les processus de petites échelles,
- Le spatial permet une agilité pour suivre des événements spécifiques (par ex une éruption volcanique, feux),
- Pour le recensement et suivi des sources de pollution,
- Des applications opérationnelles comme par exemple le suivi et les alertes sur l'état de l'atmosphère (météorologie, pollution, qualité de l'air, incidents/accidents industriels, catastrophes naturelles « hazards »).

Océanographie

- Le spatial permet la continuité : Observation continue et sur le long terme de l'ensemble des océans permettant de comprendre, décrire et prévoir l'évolution de ses propriétés physiques et biogéochimiques, mieux connaître le rôle de l'océan dans le cycle du carbone global, caractériser l'impact du changement climatique sur les océans et appuyer les politiques visant à réduire les effets climatiques et à s'y adapter,
- Mais aussi l'expansion : seules les mesures spatiales peuvent fournir les observations avec une couverture globale et un échantillonnage spatio-temporelle adaptés aux priorités du suivi du climat, du côtier et du littoral, des fines échelles spatio-temporelles, de la biogéochimie et de l'écologie marine, et des zones polaires.

III.1.3 Surfaces et Interfaces Continentales

- Le spatial permet la profondeur temporelle, la fréquence d'observation, la résolution spatiale et la richesse spectrale grâce à des programmes institutionnels généralistes comme Landsat (USA) et Copernicus (EU),
- et des missions spatiales conçues pour répondre spécifiquement aux enjeux scientifiques associés à la surface continentale en cours (ex. SMOS/SMAP, ICESat-2, GRACE-FO, SWOT...) et à venir (BIOMASS, TRISHNA...).

III.1.4 Astronomie & Astrophysique

- Le spatial est avant tout un moyen d'étude pour l'ensemble des disciplines A&A, allant de l'environnement terrestre jusqu'aux grandes structures de l'Univers,
- Le spatial est complémentaire des moyens d'observation sol, car il donne accès à une gamme spectrale et des résolutions spatiales inaccessibles depuis le sol,
- Le spatial permet de réaliser des mesures in situ dans tout le système solaire (orbiteur, atterrisseur, rovers...), mesures indispensables pour atteindre des échelles spatiales et réaliser des mesures irréalisables depuis le sol,
- Il permet un accès à des conditions de mesure inaccessibles au sol (physique fondamentale, physique des plasmas...),
- Le retour d'échantillon depuis l'espace ouvre une nouvelle fenêtre en planétologie en donnant accès à des méthodes d'analyse inaccessible depuis l'espace.

Annexe III.2 *Quels développements actuels et futurs ?*

III.2.1 *Terre Solide*

- Mettre en valeur des données traitées avec le soutien des SNO/ANO – investir dans le stockage et la maintenance, inciter les chercheurs à rendre leur données FAIR,
- Rendre accessibles et facilement utilisables les données, à l'image par exemple de Form@ter, DINAMIS ou EarthEngine,
- Renforcer le traitement de la donnée et l'accès aux données en planétologie (par exemple à travers la création d'un pôle Surfaces Planétaires ou petits corps),
- Continuer à fournir des composants technologiques (ex: optique, camera, TWTA...) à ESA/NASA pour les missions spatiales.

III.2.2 *Océan-Atmosphère*

Atmosphère et océanographie

- Maintenir voire renforcer les pôles de données, développer des Virtual Research Environment (VRE) et la virtualisation des accès aux données en lien avec tous les domaines (Data Terra),
- Partager des méthodologies de traitement des données et d'inversion,
- Explorer davantage l'IA pour les missions en cours et à venir (à bord et au sol),
- Favoriser les développements synergiques entre missions spatiales et entre missions spatiales et services d'observation de l'INSU,
- Favoriser des nouveaux concepts de mission tout en consolidant les concepts/missions existants,
- Favoriser les échanges entre scientifiques et industriels pour les développements technologiques possibles à moyen terme (recensement de systèmes, sous-systèmes, et expertise de l'existant chez les partenaires industriels).

Océanographie

- S'assurer de la continuité de mesures actuelles pour les séries climatiques et leur expansion vers la plus haute résolution spatiale et temporelle dans les zones prioritaires (le côtier et le littoral, régions polaires) et pour le biogéochimie et l'écologie marine,
- Renforcer les centres d'expertise spatiale (CERSAT, SNO-CTOH, CATDS, ...) et les pôles de données pour permettre par exemple l'implémentation d'algorithmes d'inversion développés par la communauté nationale (ODATIS, Data Terra),
- Maintenir et développer la capacité d'observation aéroportée (Lidar, démonstrateurs des nouveaux capteurs : vagues, courants...),
- Explorer le développement de micro-satellites / géostationnaire en océanographie côtière,
- Renforcer les nouvelles techniques de Calibration-Validation in-situ par drone aérien ou marin.

III.2.3 *Surfaces et Interfaces Continentales*

- Formation
 - Former les étudiants dans les disciplines de l'instrumentation et le traitement de données spatiales,
- Évolution des pratiques de la recherche dans le spatial

- Améliorer la capacité des scientifiques à pouvoir exploiter la masse de données disponibles (déplacement des calculs auprès de la donnée et l'utilisation de plus en plus courante d'algorithmes d'IA),
- Adresser les questions éthiques liées aux offres des GAFAM (souveraineté, opacité, propriété intellectuelle) et pratiques (coût du passage à l'échelle, absence de lien avec les données in situ),
- Renforcer le rôle de Data Terra, (facilité d'accès et de traitement de gros volumes de données, bancarisation et de l'interopérabilité des données in situ à poursuivre),
- Sujets de recherche
 - Développer de nouveaux concepts de mission, notamment pour l'accès à certaines variables mal contraintes (eaux souterraines, évapotranspiration, manteau neigeux, polluants dans les eaux et les sols...),
 - Croiser les données spatiales avec l'observation in situ pour permettre le changement d'échelle des modèles mécanistes développés à l'échelle expérimentale pour aller au-delà de l'observation par télédétection
- Gouvernance
 - Encourager la coordination entre les agences spatiales et des organismes de recherche pour que les missions ne soient plus développées indépendamment les unes des autres, mais placées dans un contexte global d'observation, afin d'identifier les redondances éventuelles et les manques d'observations,
 - Renforcer le rôle des laboratoires dans des partenariats public-privé, pour des services à destination du grand public ou pour le bénéfice d'institutions publiques et ainsi réduire le fossé entre l'offre et les besoins des acteurs publics ou privés, améliorer la chaîne du satellite à la prise de décision – en collaboration avec les sciences humaines et sociales.

III.2.4 Astronomie & Astrophysique

- Recenser les expertises des laboratoires spatiaux : pérenniser les compétences et savoir-faire techniques dans les laboratoires, développer et acquérir de nouvelles compétences (ex : sur l'ensemble des chaînes de détections). Maintenir et développer des activités de R&T stratégiques,
- Assurer les maîtrises d'œuvre instrumentales à l'échelle de l'INSU, mieux adapter la politique d'externalisation de service et de réalisation (compliquée/complexes et très coûteuse, menant à une évaporation à termes des savoir-faire techniques, avec le danger d'une déconnexion progressive entre réalisation instrumentale et objectif scientifique),
- Organiser à l'échelle du CNRS et conjointement avec le CNES de manière similaire à ce que propose l'ESA une plateforme d'approvisionnement nationale de composants spatiaux pour alléger les procédures, centraliser les besoins, optimiser les délais et les coûts d'acquisition, mutualiser la gestion des stocks et leur recyclage/réutilisation,
- Etudier une mutualisation des plateformes expérimentales et de tests à l'échelle nationale en partant de l'IR Paradise (permettre aux personnels des laboratoires de continuer à investir dans les composantes de segments sol qui fournissent les cadres et les outils du traitement et de l'analyse rigoureuse des données).

Annexe Liste non-exhaustive des missions spatiales en développement ou en exploitation

Mission	Thème	Lancement	Partenaires
En développement			
SVOM	Astronomie - gamma	20/12/23-15/01/24	Chine
PHARAO - ISS	Physique	2024/2025	ISS
EUCLID	Cosmologie	01/07/2023	ESA M2
Exomars	Mars	2028	ESA, Russie
JUICE	Jupiter	14/04/2023	ESA L1
Einstein Probe	Astronomie - X	05/11/2023	ESA, Chine
MMX	Phobos	2024	Japon
Chang'e 6	Lune	2024	Chine
Nancy Grace Roman Telescope	Cosmologie	2027	NASA
Dragonfly	Titan	2026	NASA
PLATO	Exoplanètes	fin 2026	ESA M3
ARIEL	Exoplanètes	2028	ESA M4
Comet Interceptor	Petits corps	2028	ESA F1
ATHENA	Astronomie - X	>2031	ESA L2
LISA	Astronomie - OG	2034	ESA L3
SOLAR C	Physique solaire	Juillet 2028	Japon
LiteBird	CMB	>2028	Japon
FSS/CLPS	Lunaire	Janvier 2025	JPL
HelioSwarm	Vent Solaire	2029	NASA
Veritas	Venus	2029 (?)	NASA
MicroCarb	Gaz à Effet de Serre	fin 2023/début 2024	Fr
IASI-NG MetOp-SG(x3)	Météo	2024, 2031, 2038	EUMETSAT, ESA
BIOMASS	SIC - végétation	05/2024	ESA – EE7
Earthcare	OA – meteo	>09/2023	ESA, Japon
MTG-I, MTG-S	OA – meteo	>2022	EUMETSAT, ESA
C3IEL	OA – meteo	2026	ISA (Israël)
Pre-ACE	OA – océans	>=2022	NASA
FORUM/Earth Explorer	OA- Earth radiation	2026	ESA
FLEX/Earth Explorer	SIC – végétation	2024	ESA
MERLIN	Gaz à Effet de Serre	2024	Allemagne
TRISHNA	SIC – IR thermique	2025	Inde
AOS (ex ACCP)	OA – météo	2028	NASA/CNES/JAXA
Harmony / EE10	OA - Courants de surface	2029	ESA
OdySea	OA- Spectres de vagues ou du vent	>2029	CNES/NASA
CO2-M/Copernicus	OA - CO2	2026	ESA
LSTM – Sentinel/Copernicus	SIC – Land surface temperature	2028	ESA
CHIME - Sentinel/Copernicus	SIC – Hyperspectral imaging of the surface	>2026	ESA

CARTOGRAPHIE SPATIALE INSU

ROSE-L – Sentinel/Copernicus	SIC – Radar mapping glace, forêt, océan	>2026	ESA
CIMR – Sentinel/Copernicus	OA – glaces, température de surface, salinité	>2026	ESA
CRISTAL – Sentinel/Copernicus	OA-topographie océan en zone polaire, suivi calottes polaires	>2026	ESA

En exploitation			
Bepi Colombo	Mercure	2018 / 2025	ESA, Japon
Solar Orbiter	Soleil	2020 / 2023	ESA M1
Parker Solar Probe	Soleil	2018 / 2024	NASA
JWST	Astronomie	12/2021	ESA, NASA
Mars2020 - Perseverance	Mars	2020	NASA
CHEOPS	Exoplanètes	2019	ESA - S
INSIGHT	Mars	2018	NASA
OSIRIS-REX	Petits corps	2016 - 2023	NASA
MICROSCOPE	Physique	2016	Fr seule
HAYABUSA2	Petits corps	2014 – 2020	JAXA, Allemagne
MAVEN	Mars	2013	NASA
GAIA	Astronomie	2013	ESA
JUNO	Jupiter	2011	NASA
MSL-Curiosity	Mars	2011	NASA
FERMI	Astronomie – HE	2008	NASA
Mars Express	Mars	2003	ESA
INTEGRAL	Astronomie – gamma	2002	ESA
CLUSTER	Magnétosphère	2000	ESA
XMM	Astronomie – X	1999	ESA
SOHO	Soleil	1995	ESA/NASA
HST	Astronomie	1990	NASA - ESA
SWOT	OA – océans	12/12/2022	NASA
CFOSAT	OA – vents	2018	Chine
AEOLUS-Aladin	OA-vents	2018	ESA
IASI - MetOp (x3)	Météo	2018	EUMETSAT, ESA
GRACE-FO	TS – géoïde	2018	NASA, DLR
Venus	SIC – agriculture	2017	Israël
Jason - 3	OA – Océans	2016	NASA, EUMETSAT, NOAA
MSG 1, 2, 3 et 4	OA – météo	2002 - 2015	EUMETSAT, ESA
Sentinel 1 à 3 et 5	Copernicus	2014 - 2018	ESA - EU
SWARM	Terre Solide	2013	ESA
SARAL	OA – Océans	2013	Inde
Megha-Tropiques	OA – cyclones	2011	Inde
CRYOSAT-2	OA – Glaces polaires	2010	ESA
SMOS	SIC – humidité	2009	Fr seule
CALIPSO	OA – nuages, aérosols	2006	NASA
Sentinelle 6 / Jason CS	Altimétrie, Océans	11/2020	UE, ESA, EUMETSAT

CARTOGRAPHIE SPATIALE INSU

Stratéole 2 – ballons	OA – atmosphere	2021 à 2024	USA, Inde, Italie, Australie
AMS - ISS	Physique	2011	NASA, CERN
ISS	SdM, SdV, Physique	1998	Coopération internationale