

CONCLUSIONS



© CNES, Rachel Barranco, 2014

JEAN-LOUP PUGET,
Président du comité
des Programmes Scientifiques du CNES

Les sciences spatiales ont le privilège d'aborder des questions scientifiques qui ont d'abord été, et sont encore, des questions philosophiques qui intéressent l'humanité depuis l'Antiquité. Ce sont en particulier les questions liées aux origines, celle de la Terre, de l'Univers et de l'humanité elle-même, qui font partie de toutes les grandes mythologies. Mais les phénomènes naturels comme les orages, les sécheresses et les inondations, les éruptions volcaniques et les tremblements de terre ont aussi occupé d'abord les mythologies et les religions avant d'évoluer vers l'approche scientifique moderne.

Les scientifiques de la recherche spatiale sont les héritiers de cette longue tradition qui a progressivement changé l'image que l'humanité a du monde dont elle fait partie. Les missions spatiales contribuent aujourd'hui à cette évolution. Le rôle de la recherche spatiale quand les missions alimentent des recherches fondamentales est d'abord culturel. Les missions spatiales ont aussi un rôle sociétal grandissant quand elles observent la Terre et contribuent à notre compréhension de l'évolution du climat, des ressources naturelles en eau ou biologiques, de l'environnement ou du rôle de la gravité sur les êtres humains. L'espace donne une vision planétaire globale et homogène sur de longues périodes, indispensable et complémentaire de celle donnée par des mesures *in*

situ ou aéroportées. Avec l'exploration spatiale de notre Système solaire, la communauté scientifique spatiale est enfin l'héritière des grands explorateurs de la Terre.

La prospective scientifique du CNES qui a été menée depuis un an et qui s'est conclue par le séminaire de La Rochelle est exemplaire du point de vue de l'identification de grandes questions scientifiques dans tous les secteurs de la recherche spatiale qui sont presque toutes liées à des questionnements fondamentaux.

Depuis le séminaire de prospective de Biarritz, on constate, comme il faut s'y attendre dans le domaine spatial où les temps de développement des projets sont de 10 à 20 ans, que les grandes priorités scientifiques qui ont été élaborées en 2009 subsistent, avec cependant un petit nombre de questions prioritaires nouvelles.

La stratégie scientifique de chaque discipline ainsi identifiée doit permettre à la communauté française correspondante de participer aux projets répondant aux questions scientifiques prioritaires au niveau adéquat : Investigateur Principal (PI) d'instrument ou de mission, co-Investigateur apportant un élément significatif en instrumentation ou en traitement de données, simple utilisateur des données.

La taille, les antécédents de la communauté française, et ses atouts technologiques et scientifiques sont les premiers critères pour le choix du niveau d'implication, et le choix entre le cadre ESA ou bi ou multilatéral. Ce travail de prospective passe donc par l'identification de la stratégie possible de mise en œuvre des priorités. Cette stratégie est donc, avec les grandes questions scientifiques prioritaires, ce qu'on attend d'une prospective scientifique.

Le Comité des Programmes Scientifiques révisera régulièrement les stratégies scientifiques d'implémentation des recommandations du séminaire de façon à éviter que le calendrier des opportunités ne devienne le facteur dominant de choix parmi beaucoup de projets scientifiques intéressants mais qui demandent néanmoins à être scientifiquement interclassés. La hiérarchie des phases successives de préparation est l'outil de cette optimisation.

Le bilan depuis le séminaire de prospective scientifique de Biarritz montre que cette stratégie est payante. Ce bilan est en effet très positif puisque les grands projets européens adressant les grandes priorités scientifiques définies en 2009 ont vu des participations majeures des équipes françaises. Les missions d'opportunité sont venues en complément et le nombre de projets en opération et en cours d'exploitation n'a jamais été aussi grand.

En Sciences de l'Univers, les grandes questions cosmogoniques et cosmologiques sur

- l'origine du Système solaire et les systèmes planétaires extrasolaires, l'origine de la vie et la recherche de vie extraterrestre d'une part,
- la géométrie et l'histoire de l'Univers et en particulier l'origine du Big Bang, et la formation des étoiles et galaxies et leur évolution d'autre part, ont dominé la période passée depuis le dernier séminaire de prospective et dominant encore les recommandations pour la période à venir.

Dans un programme exemplaire du statut dans le monde de l'Europe spatiale, la sonde Rosetta a été amenée à une trentaine de kilomètres en orbite autour de la comète Churyumov-Gerasimenko avec l'objectif ambitieux d'y poser, en novembre 2014, la sonde Philae avec un programme scientifique défini il a plus de 20 ans (objectif finalement atteint).

Les priorités pour le futur de l'exploration du Système solaire et de la recherche de signes d'activité biologique ou pré-biotique, sont d'une part l'exploration des satellites de glace de Jupiter, avec Juice, première grande mission du programme Cosmic Vision de l'ESA (L1), mission dans laquelle la participation des équipes françaises à un niveau important est impérative ; d'autre part, la suite de l'exploration de Mars en préparation du retour sur Terre d'échantillons martiens, avec la mission européenne ExoMars. L'implémentation d'ExoMars reste problématique, ce qui exige de conserver une collaboration avec la NASA dans ce domaine si elle nous est proposée dans le programme Mars 2020.

Les missions Planck et Herschel pour l'Univers lointain, CoRot pour les planètes extrasolaires, ont été de grands succès, adressant là encore des questions fondamentales de physique, cosmologie et cosmogonie. La mise en œuvre de la mission Euclid (comme seconde mission moyenne de Cosmic Vision) avec la France en position de leader est la suite naturelle pour déterminer les propriétés de l'énergie noire et la recherche de planètes extrasolaires de masse terrestre avec Plato (comme troisième mission moyenne de l'ESA) couvre un sujet ou les équipes françaises ne peuvent être absentes. Les observations des ondes gravitationnelles générées lors de l'accélération initiale de l'Univers (à la suite de Planck), l'étude de l'Univers chaud et le rôle des trous noirs dans l'évolution des galaxies (avec Athena comme seconde grande mission de Cosmic Vision) et le début de l'astronomie des ondes gravitationnelles (avec eLisa comme troisième grande mission) complètent ce programme.

Les programmes Cosmic Vision et exploration de l'Agence Spatiale Européenne couvrent la quasi-totalité des priorités scientifiques de cette communauté : la participation, à un niveau ambitieux, de la communauté

française à l'instrumentation, au segment sol scientifique et à l'exploitation de toutes les missions de ces programmes doit donc rester la priorité des cinq années à venir. Du côté du programme multilatéral, les coopérations avec la NASA ont été dans les années passées et seront toujours à l'avenir extrêmement fructueuses, que ce soit du point de vue technique ou du point de vue scientifique.

En Sciences de la Terre (observation de la Terre depuis l'espace), les grands enjeux sont très fortement liés à des questions sociétales d'importance capitale comme l'évolution du climat, le suivi des ressources et des aléas naturels, et l'environnement en général. En effet le système Terre est un système bio-physico-chimique complexe ou de nombreux processus interviennent simultanément et réagissent les uns sur les autres. Pour de tels systèmes, seule l'observation globale, homogène et sur de longues durées permet une approche scientifique en confrontant l'ensemble des observations à des modèles globaux. C'est une approche systémique du fonctionnement du système Terre et de ses évolutions, qui a été utilisée pour définir les grandes questions scientifiques prioritaires contrairement à l'approche par milieu utilisée dans le passé (atmosphère, océan, surfaces continentales, Terre solide). Il faut cependant garder en parallèle une approche par milieu pour les observations et l'analyse de processus physiques élémentaires où une observable est plus directement liée à un petit nombre de paramètres.

L'évolution du climat et le rôle des causes anthropiques est l'exemple emblématique de cette démarche où aucune observation ne donne seule une réponse à une question que se posent les scientifiques et qui intéresse les décideurs.

Deux cycles bio-géo-chimiques dominent le fonctionnement du système Terre : celui de l'eau et celui du carbone. De plus, des paramètres environnementaux globaux du système Terre critiques dans la modélisation doivent être contraints par des mesures de paramètres qui leur sont très directement liés. Ces deux types d'objectifs structurent les grandes questions qui doivent guider la stratégie scientifique de l'observation spatiale de la Terre.

Il faut observer et modéliser les liens entre vapeur d'eau, nuages, précipitations, l'interface avec l'océan et sa circulation et l'atmosphère, le cycle du carbone qui implique des observations de la biosphère océanique et continentale, l'évolution de la cryosphère (glaciers et calottes glaciaires) auxquels s'ajoutent maintenant les interactions avec la Terre interne. Une des questions importantes pour l'évolution du climat et la qualité de l'air est celle de la mesure des aérosols.

La nécessité d'observer tous ces éléments en même temps, sur de longues périodes et avec une résolution spatiale croissante, impose une coordination et des collaborations à l'échelle européenne et mondiale. Il y a une complémentarité entre d'une part les missions de recherche avec des techniques d'observations nouvelles, et d'autre part les missions opérationnelles qui assurent la continuité à long terme d'observations répondant à des besoins sociétaux avec des techniques bien établies : on peut citer l'exemple de l'altimétrie, initialement utilisée pour les mesures océaniques, et dont la précision accrue permet d'envisager le suivi des eaux continentales. Cette complémentarité allant de pair avec une diversité des modes de financement exige, pour la partie scientifique, une stratégie globale tenant compte de ces deux types de missions et des plans établis pour des objectifs opérationnels.

En complément à la mesure des stocks de carbone (mission Biomass, ESA), les grandes missions prioritaires jusqu'en 2020 pour les équipes françaises sont (sans classement)

- la mesure des gaz à effet de serre dans l'atmosphère depuis l'espace à la précision requise reste un défi. La combinaison de plusieurs approches proposée pour répondre à ce défi demande une stratégie globale qui n'est pas encore acquise. Plusieurs missions spatiales sont envisagées : Merlin pour la mesure du méthane par lidar (cadre bilatéral avec l'Allemagne), mesure du CO₂ depuis l'espace avec Carbonsat (cadre Earth Explorer 8, ESA) ou avec le projet Microcarb visant une meilleure résolution spectrale. Les différents contextes de financement et options de mise en œuvre exigent l'élaboration de différents scénarios.
- les mesures océaniques de la couleur de l'eau associée au contenu biologique (mission Ocap (cadre Earth Explorer 9, ESA)
- mesure de l'état hydrique des couverts agricoles (cycle du carbone, environnement, climat), mission Thirsty (coopération NASA/CNES)
- d'une manière plus générale, des mesures des surfaces continentales à haute résolution et répétabilité centrées sur l'Europe,
- l'amélioration du référentiel absolu Grasp (CNES/NASA).

Dans le cadre ballons, le projet Strateole 2 est le projet prioritaire destiné à des mesures portant sur les processus et mécanismes de transport dans la haute troposphère-basse stratosphère. Ce programme a un objectif de validation du satellite Aeolus de l'Agence Spatiale Européenne.

Le grand nombre des missions opérationnelles et des projets de missions scientifiques nouvelles implique une démarche rigoureuse d'établissement de scénarios d'implémentations, de leur calendrier probable et de

leur regroupement par grande question scientifique permettant de faire des priorités (et de les faire évoluer) en évitant que l'ordre d'apparition des opportunités ne remplace les arbitrages scientifiques. Le coût des études de phase A ne permet pas d'en réaliser sur tous les projets sans affecter significativement les capacités de réalisation. Des priorités devront être établies entre les phases O et A à la lumière des scénarios élaborés les plus probables. Ce travail reste à faire.

Il faudra en particulier préparer les sélections des missions Earth Explorer de l'Agence Spatiale Européenne par un soutien aux études amont pour les types de mission mis en haute priorité par le comité et susceptibles d'être réalisées dans ce cadre.

L'utilisation des données doit être globale et non limitée aux missions sur lesquelles les équipes françaises ont contribué directement au segment spatial. Elle ne peut rester attachée à chaque mission et le rôle de l'Union Européenne, essentiel, doit s'inscrire dans une stratégie globale. C'est bien l'objet des pôles thématiques multi agences qui se mettent en place, pavant l'ensemble du système Terre, destinés moins à la distribution des données qu'à la production de produits scientifiques de haut niveau utilisables par des communautés scientifiques non impliquées directement dans le segment spatial. Le partage des coûts de ces pôles avec les agences non spatiales est essentiel.

L'exploration spatiale comporte une partie vols habités et une partie exploration par des missions robotiques. La première a reçu une grande attention du public et des autorités gouvernementales dans les années 60 et 70. L'exploration de Mars, et plus encore du Système solaire lointain ne se conçoit dans un avenir proche (20 à 30 ans) que par des missions robotiques, pour des raisons qui tiennent aux difficultés fondamentales d'envoyer des humains au delà de la Lune dans un environnement très hostile. De plus, contrairement à certaines idées reçues, le grand public est plus intéressé aujourd'hui par les tribulations des robots sur Mars que par celles des cosmonautes sur la Station Spatiale Internationale. Cependant, il faut remarquer que l'exploration habitée du Système solaire n'est pas une entreprise scientifique, mais représente le prolongement de l'exploration de notre planète entreprise depuis l'Antiquité ; c'est de plus un formidable outil de coopération pacifique à l'échelle mondiale dont la France ne devrait pas rester absente.

Sciences en microgravité

Par rapport à l'ensemble de l'activité scientifique en médecine, biologie fondamentale ou sciences de la matière, la part des recherches en microgravité reste minoritaire, mais peut présenter des apports uniques, comme le montre l'exemple de la médecine spatiale, au départ une recherche appliquée, mais qui a apporté

des résultats fondamentaux importants sur le rôle de la gravité sur l'organisme humain (circulation, squelette, système nerveux). La variabilité entre individus de la sensibilité aux radiations ionisantes est un autre résultat scientifique non programmé et avec des implications fondamentales pour les mécanismes de réparation de l'ADN.

Les sciences de la vie adoptent une approche intégrée allant de la cellule aux organismes complexes et l'utilisation, en parallèle aux expériences dans l'espace, d'analogues aux vols spatiaux comme les alitements prolongés et les expériences d'isolation, ou de travaux fondamentaux reliés comme des études sur l'hibernation.

En sciences de la matière, là encore une partie des activités est orientée vers les recherches appliquées pour les vols habités futurs, avec notamment des études sur la combustion en microgravité. Certaines recherches fondamentales sur les transitions de phase (microstructures de l'interface en solidification) ont apporté des résultats importants qui n'auraient pu être obtenus dans des expériences courtes type vols paraboliques.

L'exploitation de la Station Spatiale Internationale est prolongée jusqu'en 2020, avec un financement pas entièrement bouclé côté ESA, et peut-être 2024 mais sans aucune certitude d'engagement hors États-Unis. Le séminaire de prospective scientifique a donc recommandé d'exploiter au mieux les possibilités de la Station Spatiale Internationale dans les secteurs où les équipes françaises sont fortes. Il faut poursuivre la métrologie ultime des changements d'état comme l'étude de la crise d'ébullition et la combustion froide dans l'eau supercritique. Le développement d'une nouvelle génération de l'instrument DECLIC, une coopération CNES-NASA, est le projet majeur proposé. L'engagement de son développement dépendra des décisions en Europe sur l'exploitation de la Station Spatiale Internationale.

L'évolution du dispositif de recherche. Enfin le rôle des différents acteurs de la recherche spatiale, qui a fait l'objet de recommandations de l'Académie des Sciences qui demandent à être mises en œuvre, doit probablement être revisité compte tenu de l'évolution rapide du dispositif de recherche en France. Les évolutions du dispositif requièrent des discussions entre le CNES et ses partenaires, industries, agences spécialisées et académiques : universités, grandes écoles, et grands organismes. Ces questions concernent la réalisation des charges utiles les plus novatrices pour lesquelles les développements amont, les concepts et les tests systèmes doivent rester dans les laboratoires de recherche universitaire. Ce dernier point est à souligner : ces activités préparant l'avenir, elles ne

doivent pas être sacrifiées à l'accélération du calendrier de réalisation des missions que ce soit en astronomie et physique fondamentale ou en sciences de la Terre.

Elles concernent aussi l'analyse des données et plus particulièrement l'élaboration de produits à haute valeur ajoutée qui, là encore, doivent impliquer fortement les laboratoires. L'élargissement des disciplines utilisatrices de telles données aux sciences de l'environnement ou aux sciences humaines et sociales demandera des accords avec ces nouveaux partenaires.

Que ce soit pour les segments sol en astronomie, physique fondamentale et observations de la Terre ou le prolongement des recherches en micropesanteur commencées dans l'espace mais prolongées au sol, il faudra rechercher des co-financements hors des agences spatiales (par exemple ANR, H2020 ou ERC).

Pour conclure, la recherche spatiale n'est plus l'affaire des chercheurs spécialisés sur quelques sujets pointus mais un acteur majeur de grandes questions scientifiques. Le bilan des réalisations et résultats depuis le séminaire de prospective scientifique de Biarritz est impressionnant et le Comité des Programmes Scientifiques travaillera à ce que les recommandations du séminaire de La Rochelle puissent, dans cinq ans, être comparées aussi favorablement aux résultats et mise en œuvre que le précédent.

CONCLUSIONS

JEAN-LOUP PUGET,

Chairman of the CNES

Science Programmes Committee

Space sciences are in the privileged position of addressing scientific issues that were initially philosophical questions that have troubled mankind since Antiquity and continue to do so. In particular these concern our origins, that of the Earth, of the Universe and of humanity itself, which feature in all the great mythological systems. Mythologies and religions also originally attempted to account for natural phenomena such as thunderstorms, droughts and floods, volcanic eruptions and earthquakes, before the modern scientific approach took over.

Scientists working on Space research are the heirs to this long tradition, which has gradually changed humanity's view of the world, a perspective which continues to evolve as today's space missions unfold. When missions provide material for fundamental research, the role of space research is primarily cultural. Space missions also increasingly serve the public-interest when they observe the Earth and contribute to our understanding of climate change, of the Earth's water or biological resources, of the environment or the effect of gravity on human beings. Satellite observation allows a comprehensive and consistent view of the planet over long periods, which is essential for complementing that given by in situ or airborne measurements. With space exploration of our solar system, the space science community has finally inherited the mantle of the great terrestrial explorers of the past.

CNES scientific forward-looking analysis, conducted over the past year and which concluded with the seminar of La Rochelle, is exemplary as regards the identification of major scientific issues in all sectors of space research, almost all of which are related to fundamental questions.

As one might expect in the field of space, for which project development takes from 10 to 20 years, it can be seen that the major scientific priorities established at the Biarritz seminar of 2009 remain, though with a small number of new priorities added.

The scientific strategy of each discipline thus identified must enable the corresponding French scientific community to participate in projects that address the priority issues at the appropriate level: Principal Investigator (PI) for an instrument or mission, Co-Investigator providing a significant

element in instrumentation or in data-processing, or simply as a user of the data.

The size and past achievements of the French scientific community, and its technological and scientific strengths are the first criteria for choosing the level of involvement, and choosing between an ESA framework or bilateral or multilateral agreements. Forward planning thus first requires outlining a possible strategy for implementing these priorities. We therefore expect forward scientific planning to establish this strategy, together with the major scientific priority issues.

The Science Programmes Committee will regularly review the scientific strategies for implementing the recommendations of the seminar, to ensure that the calendar of opportunities does not become the dominant factor for choosing between many worthwhile scientific projects, which nevertheless need to be scientifically classified according to various criteria. This optimisation is achieved by establishing the successive phases of preparation needed.

The results obtained since the forward planning seminar at Biarritz show that this strategy pays off. The results are indeed very positive, since French teams have taken an important role in the key European projects addressing the major scientific priorities defined in 2009. The missions of opportunity have complemented these and the total number of projects under way and in operation has never been so great.

In Sciences of the Universe, the major cosmogonic and cosmological questions about

- *the origin of the solar system and extrasolar planetary systems, the origin of life and the search for extraterrestrial life on the one hand, and*
- *the geometry and history of the Universe and in particular the origin of the Big Bang and the formation of stars and galaxies and their evolution on the other hand,*

have been in the forefront since the last forward-looking prospective seminar and again dominate the recommendations for the coming period.

In a programme exemplifying the international status of Europe's space sector, the Rosetta probe was placed in orbit about thirty kilometres from the comet Churyumov-Gerasimenko with the ambitious goal of landing the Philae probe on it in November 2014. The scientific programme was defined more than 20 years ago. This landing took place successfully on November 12, 2014.

The priorities for the future exploration of the solar system and the search for signs of biological or pre-biotic activity are, on the one hand, the JUpiter ICy moons Explorer (Juice), the first « Large » mission of ESA's Cosmic Vision programme (L1), in which it is imperative that French teams participate at a significant level and, on the other hand, the follow-on to Martian exploration by preparing for the return of samples to Earth with the European mission ExoMars. There are still problems to be resolved for ExoMars, which require continued collaboration with NASA in this area if we are offered the chance to participate in the Mars 2020 programme.

The Planck and Herschel missions for the distant Universe and CoRoT for extrasolar planets were highly successful, once again addressing the fundamental questions of physics, cosmology and cosmogony. The Euclid mission (as the second « medium » or M-Class mission of the Cosmic Vision programme) with France as leader is the natural follow-on for determining the properties of dark energy, and it is essential that French teams participate in Plato (ESA's third « medium » mission) which will search for extrasolar planets with an Earth-like mass. The observations of gravitational waves generated during the initial acceleration of the Universe (as a follow-on to Planck), the study of the hot Universe and the role of Black Holes in the evolution of galaxies (with ATHENA as the second « large » mission – L2 – of the Cosmic Vision programme) and the beginning of gravitational wave astronomy (with LISA as the third « large » mission) complement this programme.

ESA's Cosmic Vision and Exploration programmes cover virtually all the scientific priorities for this community; the significant participation of the French community in the instrumentation, the scientific ground segment and the exploitation of all the missions of these programmes must therefore remain the priority of the next five years. As regards the multilateral programme, cooperation with NASA has been extremely fruitful in the past and will continue to be so in the future, whether from a technical or a scientific point of view.

In Earth Sciences (Earth observation from space), the major stakes are very strongly related to societal issues of paramount importance such as climate change, the monitoring of resources and natural hazards, and the environment in general. The Earth system is, after all, a complex bio-physico-chemical system in which many processes occur simultaneously and interact. For such systems, global, homogeneous observation over long periods is required to enable scientists to compare the entire set of observations with simulations made by global models. A systemic approach has been adopted to

study the functioning of the Earth system and its developments and to define the major priorities for scientific investigation, unlike the previous approach based on studying each environmental compartment in turn (atmosphere, ocean, continental surfaces, inner Earth). However, a compartmental approach should still be used for the observation and analysis of elementary physical processes for which an observable feature is more directly linked to a small number of parameters.

Climate change and the role of anthropogenic causes is the best example of this approach as no single observation can answer a question posed by scientists and of interest to policy makers.

Two bio-geo-chemical cycles dominate the functioning of the Earth system: the water and carbon cycles. In addition, certain environmental parameters of the global Earth system that are critical for modelling must be forced by feeding in measurements of parameters that are directly related to them. These two types of objective underlie the major issues that should underpin the scientific strategy for space-based Earth observation.

It is necessary to observe and model the links between water vapour, clouds, precipitation, ocean circulation and the interface between the ocean and atmosphere, the carbon cycle, which involves observations of the oceanic and continental biosphere, and the evolution of the cryosphere (glaciers and icecaps), to which must now be added the interactions with the Earth's inner layers. One of the important issues for understanding climate change and air quality is the measurement of aerosols.

The need to observe all these elements at the same time, over long periods and with increasing spatial resolution, requires coordination and collaboration at both the European and global scales. There is a complementarity between research missions using new observation techniques on the one hand, and on the other, operational missions, which provide the long-term continuity of observations to meet society's needs with proven techniques: one example would be altimetry, originally used for ocean measurements, and whose increased accuracy could now be used to monitor inland waters. As this complementarity goes hand in hand with a range of financing methods, an overall strategy for the scientific part requires that both types of missions be taken into account together with plans drawn up to achieve operational objectives.

In addition to the measurement of carbon stocks (ESA's BIOMASS mission), the major priority missions for the French teams until 2020 are (in no particular order):

- the space-based measurement of greenhouse gases in the atmosphere at the required precision. The proposed solution of combining several approaches to respond to this challenge requires a comprehensive strategy which has not yet been agreed upon. There are plans for several space missions: Merlin, to measure methane by lidar (bilateral agreement with Germany), measurement of CO₂ from space with CarbonSat (ESA's 8th Earth Explorer mission) or the MicroCarb project aiming to achieve better spectral resolution. The different contexts for financing and options for implementation require that different scenarios be drawn up.
- measuring ocean water colour in relation to the organic content (OCAPI, ESA's 9th Earth Explorer mission)
- measuring the hydration state of land cover (carbon cycle, environment, climate – THIRSTY, a joint NASA/CNES mission)
- more generally, the measurement of the continental surfaces at high resolution and high revisit capability, centred on Europe,
- improvement of the absolute reference frame with the GRASP project (Geodetic Reference Antenna in Space) (CNES/NASA).

Among balloon programmes, Strateole 2 is the priority project intended to take measurements related to the transport processes and mechanisms in the upper troposphere-lower stratosphere. One goal of this programme is to validate ESA's Aeolus satellite.

The vast majority of operational missions and projects for new scientific missions require a rigorous process for drawing up implementation scenarios, their likely timing and grouping them together by major scientific issue for establishing (and changing) priorities, while ensuring that the order in which opportunities come up does not outweigh scientific considerations. The cost of phase A studies means they cannot be done for all projects without significantly reducing the number of projects in implementation phases. Priorities must be established between the O and A phases according to whichever scenarios seem the most probable. This task remains to be done.

In particular, CNES should prepare for the selection of ESA's Earth Explorer missions by supporting upstream studies for the types of mission that the Committee has declared to be high priority, and that are suitable for development in this framework.

Data should be used by all projects and not limited to the missions for which the French teams have contributed directly to the space segment. The data must not remain mission-specific and it is essential that the European Union deploy a comprehensive strategy. This is the purpose of the thematic multi-agency data centres (« pôles thématiques ») which are being set up, to cover all aspects of the Earth system. Their role is less to distribute data than to generate high-level scientific products for scientific communities not directly involved in the space segment. It is essential that the costs of these data centres be shared with non-space agencies.

Space exploration includes both manned-flights and robotic missions. The first type received considerable attention from the public and government authorities in the 1960s and 1970s. As far as the near future is concerned (20 to 30 years), the exploration of Mars, and even more that of the distant Solar system, can only be envisaged using robotic missions, because it is extremely difficult to send humans beyond the Moon in an extremely hostile environment. In addition, contrary to certain widely-held ideas, the general public is more interested today in the difficulties encountered by robots on Mars than by those faced by the astronauts on the International Space Station. However, it should be pointed out that manned exploration of the Solar system is not important primarily for scientific reasons, but rather because it extends the exploration of our planet which has been pursued since ancient times; it is also a powerful tool for peaceful cooperation on a global scale, in which France must play a role.

Microgravity sciences

Compared to the full range of scientific activity in medicine, fundamental biology or materials sciences, the proportion of research in microgravity remains small, but may offer unique opportunities, as shown for space medicine, initially conducted as applied research, but which has achieved important fundamental discoveries about the effect of gravity on the human body (movement, skeleton, nervous system). The varying vulnerability of individuals to ionising radiation is another unexpected scientific result with fundamental implications for our understanding of the mechanisms behind DNA repair.

For life sciences, an integrated approach ranges from the cell to complex organisms and involves, in parallel with experiments in space, experiments under conditions analogous to space flight such as extended bed-rest and isolation experiments, or related fundamental studies such as studies on hibernation.

In condensed matter sciences as well, a part of the activity is devoted to applied research for future manned flights, with particular studies on combustion in microgravity. Some fundamental research on phase transitions (microstructures of the interface during solidification) has yielded important results which could not be obtained in short microgravity experiments such as those conducted on parabolic flights.

The exploitation of the International Space Station has been extended until 2020, with funding not yet finalised on ESA's side, and perhaps until 2024 but without any certainty of a commitment by countries other than the États-Unis. The seminar for scientific forward planning therefore recommended making the most of the opportunities of the International Space Station in areas in which the French teams are strong. We must continue applying ever-more-precise metrological techniques for phase changes such as the study of the boiling crisis and cold combustion in supercritical water. The development of a new version of the DECLIC instrument, a joint CNES-NASA product, is the major project proposed. The commitment to develop it will depend on what Europe decides to do concerning exploitation of the International Space Station.

Upgrading research arrangements

Lastly, the role of the various players in space research should probably be reappraised in light of rapid developments in research in France. In this respect the Academy of Sciences has made recommendations that should be implemented. Changes in the way research is organised in France require discussions between CNES and its partners, manufacturers, specialised agencies and academic institutions: universities, grandes écoles and large organisations. This concerns production of the most innovative payloads, for which upstream developments, conceptualisation and system tests should still be done by university research laboratories. This last point should be emphasised: since these activities prepare the future, they must not be sacrificed simply to speed up the timetable for missions, whether in astronomy and fundamental physics or in the Earth sciences.

This also concerns the analysis of data and more particularly the development of high-value-added products in which, once again, laboratories must remain heavily involved. Broadening the list of disciplines using such data to include the sciences of the environment or the human and social sciences will require agreements with these new partners.

Whether for ground segments in astronomy, fundamental physics and Earth observation or an

extension of research in microgravity begun in Space but pursued on the ground, it will be necessary to find co-financing from outside the space agencies, for example from the French National Research Agency (ANR), the European Commission's Horizon 2020 programme (H2020) or the European Research Council (ERC).

To conclude, space research is no longer the exclusive affair of space scientists investigating a few highly specialised subjects. On the contrary, it is a field which plays a vital role in major scientific issues. The achievements and results since the seminar for scientific forward planning in Biarritz is impressive and the Science Programmes Committee will strive to ensure that the recommendations of the seminar of La Rochelle can, in five years, compare as favourably as the results and implementation of the previous one.