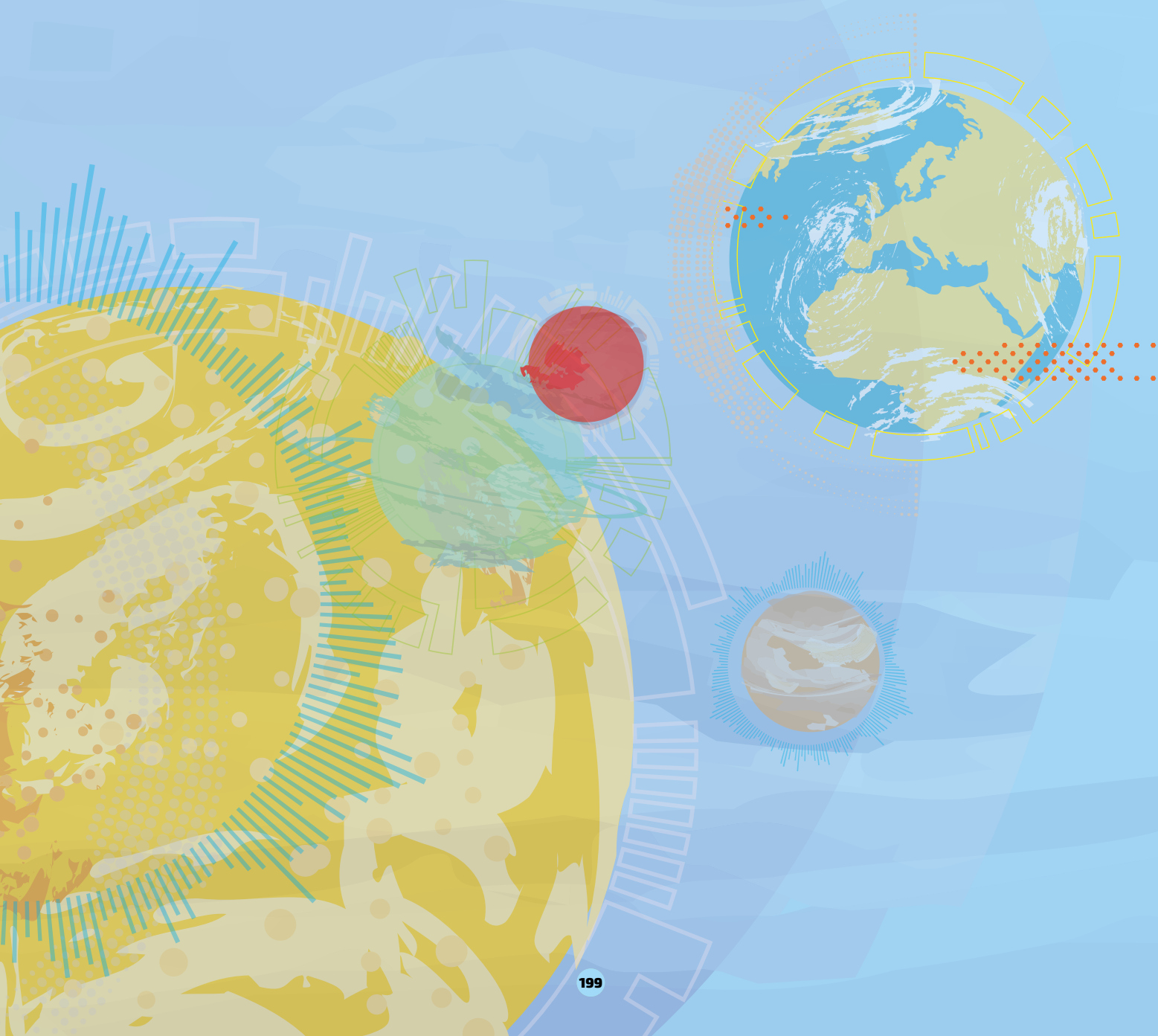


CONCLUSION



Le Séminaire de Prospective Scientifique (SPS) qui vient de s'achever est la conclusion d'un long travail préparatoire qui s'est étendu sur plus d'un an et qui a fortement mobilisé la communauté scientifique ainsi que les personnels de diverses directions et sous-directions du CNES. L'essentiel de la réflexion a porté sur les questionnements scientifiques qui apparaissent comme prioritaires et potentiellement porteurs d'avancées majeures dans les prochaines années. Mais ce SPS s'est aussi attaché à conduire une analyse des évolutions récentes du monde spatial et des conséquences qui pouvaient en découler pour la science.

Au niveau scientifique, les grandes questions avaient été identifiées dans la décennie précédant ce séminaire et les principales missions qui seront réalisées dans les cinq à dix, voire quinze prochaines années sont, de fait, déjà définies. Elles sont souvent la concrétisation d'une réflexion programmatique internationale dans laquelle les divers acteurs français du spatial ont joué un rôle important. Plus rarement (vu le temps de développement des expériences spatiales), de nouvelles questions ou inflexions marquantes dans quelques thématiques majeures sont néanmoins apparues.

Ainsi, dans le domaine des Sciences de l'Univers, le SPS a souligné à nouveau le rôle structurant du programme scientifique obligatoire de l'ESA. Ce programme ne couvre cependant pas certaines thématiques importantes pour lesquelles les équipes françaises ont des compétences à la fois scientifiques et instrumentales. Il a donc été rappelé qu'il fallait réserver une place substantielle aux collaborations bi ou multilatérales hors ESA et ce sera le rôle du CPS d'y veiller.

Si aucune grande question nouvelle n'a émergé, deux domaines scientifiques déjà identifiés lors du précédent SPS à La Rochelle (et même avant) sont aujourd'hui mûrs pour prendre une place grandissante au cours de la décennie à venir : les missions comme **Euclid**, **Lisa** et **Athena** dédiées à l'étude du lentillage et des ondes gravitationnelles (y compris celles associées aux phases inflationnaires de l'Univers) et de la population des trous noirs vont permettre de tester une physique nouvelle (comme la nature de l'espace-temps), grâce à des observations qui vont très au-delà de ce qu'on peut observer en laboratoire.

De même, les missions scientifiques dédiées à l'étude des exoplanètes et plus largement des exo-systèmes stellaires telles que programmées dans le cadre de l'ESA (**Cheops**, **Plato**, **Ariel**) ouvrent des champs de recherche nouveaux autour de l'habitabilité planétaire et des déterminants de l'organisation des systèmes stellaires. La recherche des origines de la vie et des premières traces de vie si difficiles à identifier sur Terre reste naturellement un enjeu majeur. À côté des missions d'exploration in situ du système solaire (comme **Juice** à l'ESA ou **MMX** et **Hayabusa** dans le cadre bi-latéral) une participation française active au retour d'échantillons, notamment martiens, dans le cadre du programme d'exploration E3P est une forte priorité. Pour cela, le SPS a recommandé que la communauté nationale œuvre pour convaincre l'Europe de développer un centre de curation, traitement et analyse de ces échantillons.

Il est à noter que nombre des missions évoquées précédemment feront appel pour leur exploitation scientifique à de nombreuses observations réalisées depuis le sol. Le SPS s'est inquiété de l'absence de mécanisme programmatique clair permettant de prendre en compte dans ces missions cette nécessité d'observations réalisées par des observatoires majeurs (ESO, ALMA, ...). Il est souhaitable qu'à l'avenir une coordination formelle des agences concernées en amont des décisions de réalisation de mission soit mise en place.

Dans le domaine des Sciences de la Terre, un besoin rappelé depuis de nombreuses années est celui visant à assurer la continuité dans le temps des mesures d'un certain nombre d'observables indicateurs des évolutions des milieux sous l'effet des changements globaux, et notamment climatique. Ce suivi est essentiel pour cerner la dynamique de ces évolutions et tenter d'anticiper au mieux leurs impacts. Les dix dernières années ont été marquées par la mise en place opérationnelle du programme Copernicus qui permet d'assurer cette continuité d'observations. Associé au programme spatial d'EUMETSAT, l'ensemble des variables pour lesquelles la continuité de mesures est assurée est très satisfaisant. Le savoir-faire français, en altimétrie, imagerie, spectroscopie... a beaucoup contribué à la mise en opération de ces satellites. Naturellement, le SPS soutient les nouvelles phases de développement de ces programmes et souhaite que l'implication française dans la mise en place de ces missions au travers des expertises acquises reste très forte.

Par ailleurs, en Sciences de la Terre, plus que l'accès à de nouveaux observables, c'est l'amélioration des résolutions spatiales, temporelles et spectrales qui sera dimensionnant pour le futur. En effet, les questions scientifiques émergentes font une large place à la prise en compte des effets d'intermittence, aux rôles des événements extrêmes ou des hétérogénéités spatiales dans les tendances observées. De même, l'étude des interfaces entre milieux (côtier/littoral, milieux urbain/rural...), entre écosystèmes impose, elle aussi, des résolutions toujours plus fines. Enfin, les impacts des changements globaux s'évaluent à des échelles aussi proches que possible de l'échelle des organisations humaines. Pour répondre à ces améliorations souhaitées, des développements technologiques innovants tant sur les instruments que sur les systèmes de vol vont être nécessaires.

Comme mentionné précédemment, le SPS a également conduit une réflexion spécifique sur les évolutions du monde du spatial et ses implications sur la nature des missions elles-mêmes, mais également sur les aspects situés en amont et en aval des missions.

Les missions les plus novatrices dépendent très souvent de la capacité à mettre en œuvre des technologies nouvelles répondant aux besoins exprimés (parfois depuis longtemps !) d'une nouvelle mesure. Pour répondre au mieux à cela, il faut étendre les activités de recherche et technologie (R&T) à des communautés scientifiques situées au-delà du périmètre classique des laboratoires thématiques de la recherche spatiale (i.e., physique, chimie, biologie, ingénierie, informatique, mathématiques appliquées...). Des filières technologiques existent et il sera essentiel d'être en mesure d'identifier celles qu'il est nécessaire de soutenir, même en l'absence de mission pouvant les utiliser à un horizon immédiat, sous peine de perdre des compétences difficilement remplaçables. Cela demandera d'élargir la diffusion des appels d'offres R&T vers les communautés mentionnées précédemment et probablement d'envisager d'émettre un appel d'offre R&T dédié spécifiquement aux aspects mathématiques, numérique et informatique.

Les nanosatellites ont fait l'objet d'une réflexion particulière visant à identifier dans quelles configurations ces vecteurs pourraient être en mesure de réaliser des missions d'intérêt scientifique. Les vols en formation ou les essaims de nanosatellites offrent des possibilités de mesures très originales dans le domaine de l'observation de la Terre ou de la planétologie. Ces stratégies multisatellites sont apparues comme les plus intéressantes pour la recherche.

Le domaine des données est quant à lui au centre de beaucoup d'enjeux et en très forte évolution : la volumétrie des données explose, le traitement requis pour passer de l'observation à la donnée est de plus en plus complexe et consommateur de ressources et l'information recherchée nécessite de plus en plus de combiner ou hybrider les données spatiales entre elles ou avec des observations autres, le plus souvent depuis le sol et/ou de les associer à des modèles, souvent via des techniques d'assimilation.

Ainsi, les missions demandant toujours davantage de sensibilité, il sera nécessaire de recourir de plus en plus souvent à des arbitrages de concepts de mission, notamment pour la mesure de certains paramètres instrumentaux extrêmement difficiles à conduire au sol et dont la détermination ne pourra se faire qu'en vol en utilisant à la fois les redondances dans les données acquises et des méthodes d'apprentissage profond permettant de les extraire de ces données en vol. Cela nécessite par exemple des simulations dites end-to-end intégrant une modélisation des instruments et réalisations Monte Carlo pour analyser les incertitudes.

Par ailleurs, notamment dans le domaine des sciences de l'environnement, l'accès ouvert aux données publiques et l'existence de marchés potentiels pour des produits de prévision et gestion des risques, de surveillance réglementaire ou d'aménagements du territoire ont fait émerger des acteurs nouveaux, en particulier privés, ce qui ne va pas aller sans poser quelques questions de souveraineté. L'ensemble de ces éléments a conduit le SPS à définir ce domaine des données comme un chantier prioritaire tant dans les domaines techniques, numériques, informatiques qu'organisationnels.

Ces évolutions demanderont d'avoir recours à des centres de calcul de grande rapidité et capacité en mémoire qui ne pourront probablement être que des centres nationaux ou européens. Il semble également indispensable d'établir, mission par mission, une organisation de la chaîne de traitement permettant de prendre en compte d'une part la nécessité de proximité liée à un besoin de traitement des données brutes par les instrumentalistes pour les opérations, et d'autre part les besoins des analyses scientifiques qui ne peuvent se faire que sur des grands centres de calcul et de données multi-thématiques. Cela suppose d'associer dès les phases d'étude tous les acteurs impliqués dans une mission (y compris sa phase d'exploitation).

Enfin, beaucoup des éléments évoqués ci-dessus vont nécessiter des moyens humains (en nombre et compétence) et matériel qui risquent souvent de dépasser les moyens qu'un seul organisme de recherche peut mettre en œuvre seul. Le partenariat, à différents niveaux (i.e., entre organismes nationaux, au niveau européen et au niveau mondial) va devoir être renforcé et probablement sur des bases de coopération revues car nécessitant plus de partage et de mise en commun. Quelques initiatives de ce type ont déjà été mises en place et vont dans le bon sens (infrastructure nationale de pôles de données DataTerra ou encore le SCO, Observatoire Spatial du Climat au niveau international). Mais les enjeux sont tels qu'ils nécessitent d'aller encore bien plus loin dans la construction de ces partenariats, le CNES devant, pour sa part, s'assurer de la bonne marche de l'ensemble de la chaîne allant de l'observation à la production de l'information scientifique.

On voit que les années qui viennent vont dessiner un nouveau paysage du spatial. Dans ce contexte, la recherche, au travers de son potentiel d'innovation technologique et scientifique, aura un rôle essentiel à jouer dans le positionnement du CNES et de ses partenaires. Nous espérons que les réflexions conduites dans cet exercice de prospective scientifique y contribueront efficacement.