

## Stratégie Spatiale Nationale pour la Science

*Gilles BERGAMETTI, Jean-Loup PUGET, Jean-Claude SOUYRIS & al*

*Ce texte résulte des discussions menées au sein du groupe stratégie pour la science, au sein des groupes de travail thématiques et transverses et des échanges qui ont eu lieu lors des ateliers préparatoires au Séminaire de Prospective. Il a aussi pris en considération les conclusions des auditions des laboratoires spatiaux.*

*Il adresse les recommandations sur la stratégie du CNES pour la science en essayant de prendre notamment en compte le contexte et les évolutions attendues dans le domaine des sciences spatiales à moyen et long termes.*

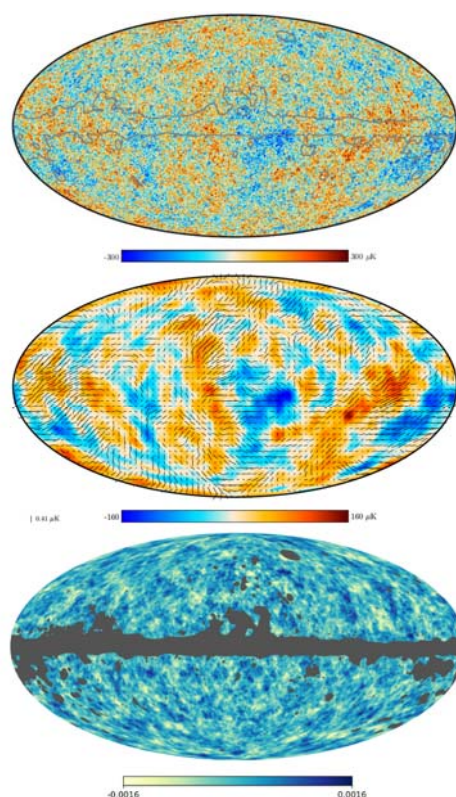
### 1- Un Contexte en évolution rapide

La science spatiale s'est depuis toujours attachée à satisfaire une soif naturelle de connaissances du monde perceptible, toujours plus vaste. Cette science a trait pour beaucoup à la compréhension du fonctionnement du système Terre avec ses nombreuses implications sociétales (climat, biodiversité, pollution, risques naturels) mais elle nous interpelle aussi fortement avec des questions fondamentales et philosophiques ayant rapport à nos origines (formation de la Terre et du système solaire, apparition de la vie, origine de l'Univers, lois de la physique...). Les observations depuis l'espace, que ce soit pour l'astronomie ou pour la Terre ont été reconnues très tôt comme des apports indispensables aux progrès de la connaissance, notamment pour le nouveau point de vue qu'elles offraient et par l'accès à des observables auparavant inaccessibles. On pourrait faire une liste interminable de ces apports du spatial à l'accroissement des connaissances. On se contentera ici d'en citer quelques-uns, récents, emblématiques et surtout porteurs de leçons pour l'avenir objet de ce travail.

La mission Planck a mesuré les anisotropies du fond cosmologique micro-onde. Ces mesures sont essentielles car ces anisotropies reflètent les fluctuations quantiques de la densité d'énergie dans l'Univers primordial qui ont donné naissance à toutes les structures qui peuplent l'Univers aujourd'hui (les galaxies et leur distribution dans la toile d'araignée cosmique). Planck a permis de vérifier les prédictions génériques du modèle standard de la cosmologie et paradigme de la phase d'inflation qui accélère l'expansion primordiale de l'Univers. La fin de l'inflation coïncide avec la création de la radiation et de la matière à partir de l'énergie du champ inflationnaire, et donne une origine physique au « Big Bang ». La plupart des prédictions générique de l'inflation ont été vérifiées par les données de la mission Planck. Il est intéressant de noter la coïncidence des prédictions de l'inflation avec celle du boson de Brout-Englert-Higgs. Ce boson scalaire est de même nature que le champ inflationnaire nécessaire au Big Bang et l'expansion accélérée observée aujourd'hui.

Il faut noter que cette mission européenne est venue après un siècle durant lequel toutes les expériences clé de la cosmologie ont été américaines et que c'est finalement grâce à une technologie originale de réfrigérateur à dilution spacialisable provenant d'un laboratoire de

physique qu'elle a pu être réalisée. Il y a là une première leçon à retenir pour l'avenir sur les technologies générées hors des laboratoires spatiaux. Il faut organiser une veille technologique très ouverte.



Légende : Les cartes du fond cosmologique micro-onde : de haut en bas l'image des fluctuations de densité tracée par l'intensité, la polarisation du rayonnement engendrée par la vitesse de la contraction des structures, le potentiel gravitationnel mesuré par le lentillage gravitationnel du fond cosmologique.

L'arrivée de la sonde Rosetta de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) près de la comète Churyumov-Gerasimenko a également été une première majeure dans le domaine de l'exploration spatiale. Notamment, l'arrimage du module Philae sur la comète a été un tour de force technologique des équipes de l'ESA. Cette mission était risquée (elle a été choisie en 1983 dans le cadre du programme Horizon 2000 !). Les résultats scientifiques qui découlent d'une telle mission sont multiples. On peut citer à titre d'exemple l'anomalie isotopique du xénon de l'atmosphère terrestre (le U-Xénon), au regard de celle de la comète suggérant que la composition de l'atmosphère terrestre primitive était à 20% cométaire et 80% chondritique et donc que les comètes du même type n'auraient que faiblement contribué à la formation de la Terre. Il faut faire une certaine proportion de missions risquée !

Enfin les cinq dernières années ont aussi vu l'apparition d'un nouveau porteur d'information prédit par la relativité générale mais jamais observé auparavant : les ondes gravitationnelles. La détection de ces ondes a été faite par les détecteurs au sol LIGO<sup>1</sup> (USA), mais l'étape suivante en termes de

<sup>1</sup> Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

détecteurs d'ondes gravitationnelles sera réalisée dans l'espace avec la mission européenne LISA<sup>2</sup>. En 2017, les observations spectaculaires de l'onde gravitationnelle engendrée par la fusion de deux étoiles à neutrons en un trou noir par LIGO et VIRGO<sup>3</sup> a provoqué un sursaut de rayonnement Gamma puis de rayons X détecté par des détecteurs spatiaux. Ces rayonnements sont venus une seconde et demi après la fin de l'onde gravitationnelle qui marque la formation du trou noir. Les ondes gravitationnelles sont sorties au travers de la matière ultra dense qui entourait encore le trou noir alors que les rayons X et Gamma ont été libérés dans l'éjection d'une partie de la matière, phénomène connu sous le nom de « kilo nova ». La mission LISA qui était proposée dans Cosmic Vision en 2005 sera lancée vers 2030 mais on sait aujourd'hui avec ces observations qu'elle ouvrira la voie à une nouvelle astronomie.

L'appropriation par la communauté scientifique française de l'outil spatial est révélatrice d'une ambition qui vise à comprendre le monde qui nous entoure dans sa globalité. Aussi est-il logique que ces grands enjeux scientifiques soient largement mondialisés et que les priorités de la recherche française intègrent fortement cette dimension de coopération internationale. Ainsi, l'implication conjointe de la communauté française et du CNES avec la NASA dans la conception et la réalisation des filières TOPEX-Poseidon<sup>4</sup> puis JASON<sup>5</sup> a conduit à l'acquisition de données altimétriques très précises qui ont permis notamment de démontrer la non-linéarité de l'augmentation du niveau de la mer au cours du temps et en particulier son accélération significative entre 1993 et 2017. Dans la continuité de cette filière, la mission SWOT<sup>6</sup> aura la capacité, grâce à un radar interférométrique à large fauchée, de mesurer le niveau des eaux continentales (lacs et grands fleuves).

La recherche spatiale est également un générateur d'informations exceptionnelles pour répondre aux besoins de la société dans des domaines aussi variés que la météorologie, la topographie, l'agriculture, la prévision et la gestion des risques... Récemment, l'instrument IASI<sup>7</sup> développé par le CNES en collaboration avec Eumetsat<sup>8</sup> dans le cadre des missions météorologiques opérationnelles Metop<sup>9</sup> a permis, une fois ses données assimilées dans les modèles, de significativement améliorer la prévision météorologique. Mais le même instrument a aussi permis de documenter de façon unique la composition de l'atmosphère et de cartographier pour la première fois les principales sources d'ammoniac, toutes reliées à des activités anthropiques, majoritairement à la production de fertilisants et à l'agriculture intensive, soulignant à nouveau que mission opérationnelle et résultats scientifiques majeurs ne sont pas incompatibles.

Mais, au-delà de satisfaire notre soif de connaissances et de contribuer à répondre à des enjeux sociétaux, la science spatiale est aussi, pour les pays en ayant la capacité, une vitrine politique et une façon de démontrer leur savoir-faire technologique de haut niveau. Il suffit de voir, par exemple, comment aujourd'hui des pays comme la Chine ou les Etats-Unis utilisent l'exploration spatiale comme un outil de démonstration de leur puissance respective.

---

<sup>2</sup> *Laser Interferometer Space Antenna, mission visant à constituer un gigantesque interféromètre optique à partir de 3 satellites disposés selon un triangle équilatéral de 2,5 millions de kilomètres de côté*

<sup>3</sup> *Interféromètre de Michelson européen isolé des perturbations extérieures (miroirs et instrumentation suspendus, faisceaux laser sous vide) et dont chacun des bras mesure trois kilomètres de long*

<sup>4</sup> *Satellite permettant de réaliser des mesures altimétriques radar développé conjointement par la NASA et le CNES et lancé en 1992*

<sup>5</sup> *JASON/Ocean Surface Topography Mission ou OSTM pour la NASA*

<sup>6</sup> *Surface Water and Ocean Topography, mission en collaboration NASA-CNES*

<sup>7</sup> *Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge*

<sup>8</sup> *Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques*

<sup>9</sup> *Metop est constituée d'une série de trois satellites en orbite polaire dont l'objectif principal est de fournir des observations essentielles à la prévision météorologique*

### De nouveaux acteurs

Le domaine du spatial, depuis son émergence il y a plus d'un demi-siècle, a toujours été caractérisé par une forte dynamique d'évolution portée notamment par des innovations techniques continues, financées jusqu'à présent exclusivement par les pouvoirs publics. Le CNES, une des premières agences spatiales créées, a clairement joué un rôle majeur dans l'histoire du spatial.

Ces réussites, nombreuses et répétées, ont aussi établi le niveau de qualité technique et de fiabilité des lanceurs et des systèmes orbitaux (notamment ceux du CNES) et des champs d'application toujours plus larges se sont ouverts pour les technologies spatiales. Des acteurs privés se sont donc progressivement positionnés au cours des dernières années sur des domaines jugés potentiellement économiquement rentables à court ou moyen termes avec comme ambition principale de fournir des offres de lanceurs, de systèmes orbitaux ou de services découlant d'observations spatiales au meilleur coût. Même si les annonces concernant la réduction du coût des lancements et des infrastructures spatiales qui pourraient résulter de l'action de ces compagnies peuvent apparaître aujourd'hui encore comme très optimistes, elles ouvrent néanmoins le monde du spatial à de nouveaux acteurs, y compris institutionnels, notamment dans des pays de plus petite taille que ceux qui le dominaient jusqu'à présent. Bien évidemment, ces évolutions majeures impactent en retour de façon significative le positionnement des acteurs historiques du spatial.

### Un changement de dimension dans le monde des données

Parallèlement à ces évolutions d'acteurs, le domaine du spatial est confronté à une évolution encore plus rapide que celle précédemment mentionnée pour les infrastructures spatiales : celle qui concerne le domaine des données. En effet, les ambitions scientifiques, les progrès des instruments d'observation et les besoins sociétaux ont conduit (et vont conduire encore plus dans les années prochaines) à une explosion du volume d'observations avec de nouveaux paramètres mesurés et des capteurs dotés de canaux de détection bien plus nombreux et mieux résolus.

De plus, les exigences de la recherche scientifique spatiale induisent également une complexité accrue du traitement des observations : les méthodes d'extraction statistique des signaux pertinents et de post-traitement adaptés à ce nouveau type de données nécessitent dans de nombreux cas de faire appel à des procédures itératives qui deviennent rapidement très lourdes en besoin de calcul et requièrent des capacités de transmission de données importantes dès lors que le nombre d'observations acquises s'accroît fortement.

Le nouveau porteur d'information que sont les ondes gravitationnelles (une dizaine d'événements à mi 2019) permet d'illustrer immédiatement ce problème. L'univers étant extrêmement transparent pour ces ondes, il y a un fond stochastique d'ondes gravitationnelles primordiales remontant jusqu'à la formation des premiers objets dans l'univers. dû à toutes les paires d'objets gravitationnellement liés. Ce fond se superpose au fond d'ondes gravitationnelles primordiales généré dans l'inflation primordiale. L'étude détaillée de ces fonds demandera de reprendre toutes les données de tous les détecteurs et de les corrélérer entre elles.

Par ailleurs, la mise à disposition en libre accès des données spatiales institutionnelles fait, notamment dans le domaine de l'observation de la Terre, que la donnée de base perd beaucoup de sa valeur, celle-ci se trouvant de plus en plus transférée dans l'information géophysique au sens large, c'est-à-dire dans la valeur ajoutée liée à l'exploitation scientifique de la donnée d'observation. La production de cette information pertinente nécessite de plus en plus d'hybridation de données

provenant de différentes sources, c'est à dire à la fois de différents capteurs spatiaux mais également de données in situ, d'outil de modélisation, et ceci au moyen d'algorithmes originaux aussi bien pour répondre aux questions scientifiques qu'aux besoins sociétaux. L'arrivée dans le domaine spatial d'acteurs privés spécialistes du Big Data (en particulier les GAFA) dans des secteurs jusqu'à présent réservés à la recherche scientifique fondamentale ou applicative est inévitable et doit faire partie intégrante de toute réflexion stratégique. Ces évolutions impliqueront nécessairement de repenser la stratégie et le positionnement du CNES et de ses partenaires (universités, grands organismes de recherche, centre nationaux de calcul, agences de moyens publiques) en termes de bases de données et de politique de valorisation des données produites.

### *L'innovation: un atout à préserver*

La science a toujours été un des moteurs de l'innovation technologique et instrumentale dans le domaine spatial. Les questions scientifiques qui émergent challengent en effet souvent nos possibilités techniques en faisant appel à de nouveaux observables ou en nécessitant des améliorations de précision ou de résolution accessibles seulement au travers de concepts instrumentaux totalement nouveaux. A titre d'exemple, la plupart des grandes questions scientifiques, notamment dans le domaine des Sciences de l'Univers, nécessitent des détecteurs de plus en plus sensibles impliquant, pour certains, de les refroidir à des températures inférieures à 1°K !

Par ailleurs, certains besoins d'observations pérennes, notamment ceux requis pour caractériser l'évolution du climat et de l'environnement ou remplir certains des objectifs de développement durable (ODD) affichés par l'ONU pour 2030 sont, aujourd'hui, largement repris par l'Europe au travers de programmes ESA, Eumetsat ou plus récemment Copernicus<sup>10</sup>. Ceci devrait offrir la possibilité de concentrer encore davantage l'action du CNES sur la préparation du futur, élément stratégique essentiel dès lors que les développements réalisés en recherche et technologie ne débouchent souvent sur la réalisation d'une mission qu'une décennie plus tard.

*On pourrait voir un risque pour le CNES dans ces évolutions rapides et, en particulier, pour la place de la Science au CNES. Mais ces évolutions peuvent aussi être une opportunité si l'on sait tirer profit des atouts que représentent l'expérience et l'excellence française acquises dans ce domaine : la combinaison des savoir-faire complémentaires du CNES et des laboratoires scientifiques est probablement unique et doit permettre de continuer à développer des produits à très haute valeur ajoutée, qu'il s'agisse d'instruments, de concepts de mission ou de données.*

## **2- Les Technologies critiques du futur**

Il faut renforcer les programmes de R&T sélectionnés par les réponses à AO en le complétant par l'identification des besoins potentiels à long terme fait par une structure de veille science/technologie associant les comités scientifiques CNRS-CERES-TOSCA et un groupe ad-hoc du CNES. Dans ce contexte, il est évidemment essentiel de veiller à maintenir sur le long terme un bon équilibre entre d'une part les filières d'observations dans lesquelles le CNES est fortement engagé qui sont les missions assurant la continuité d'une mesure pour des études d'évolutions mais reposant sur un progrès uniquement incrémental, et d'autre part l'implication dans des filières technologiques nouvelles conduisant à la mise en œuvre d'instrumentations réellement innovantes.

<sup>10</sup> Programme européen de surveillance de la Terre dont l'objectif est de doter l'Europe d'une capacité opérationnelle et autonome d'observation de la Terre.

### Quels choix technologiques pour les missions de demain

L'innovation en R&T instrumentale se fait aujourd'hui par un appel d'offre suivi d'une sélection. Ce mécanisme partant de la base des chercheurs est efficace en particulier pour les R&T nécessaires pour des missions en phase O ou A. Ce mécanisme, indispensable doit évidemment être préservé. Mais, en complément, les stratégies de long terme concernant des filières technologiques d'excellence à maintenir et/ou à développer sans avoir obligatoirement de mission programmée et en vue dans le paysage immédiat doivent être renforcées. Les développements de R&T instrumentale émergent dans les équipes instrumentales des laboratoires spatiaux souvent associées à des laboratoires de physique, chimie, ingénierie qui, s'ils ne sont pas soutenus de façon continue pendant un temps assez long peuvent perdre leur intérêt.

Quelques filières d'excellence technologiques ou au contraire des technologies susceptibles d'être nécessaires à long terme et pouvant relever d'un tel mécanisme peuvent être identifiées dans les réponses de la communauté et dans les rapports des groupes de travail.

Les accéléromètres basés sur l'interférométrie atomique sont une technologie avancée pouvant servir les communautés de physique fondamentale et de Sciences de la Terre (géoïde). De même et comme mentionné précédemment, l'altimétrie satellitaire, notamment dans sa version interférométrique, est une des filières françaises d'excellence qui demande à être maintenue. Les LIDARs ont fait l'objet de développements continus dans des laboratoires français et ces techniques actives seront certainement très utilisées dans l'avenir, notamment par les filières de satellites d'observation de la Terre. Le problème est ainsi une question de partage de savoir-faire entre les laboratoires, le CNES et l'industrie.

Les détecteurs infrarouges, au regard de leurs applications nombreuses (civiles aussi bien que militaires) constituent un enjeu stratégique. Les USA sont très souvent en avance sur l'Europe et le reste du monde et dominant le marché, notamment pour les détecteurs à bas flux et à bas bruit. Au regard des investissements requis et des retours possibles, les industriels européens sont aujourd'hui réticents à s'engager dans les développements nécessaires, au point même de ne pas répondre parfois aux appels d'offre. Une politique publique, sans doute européenne, inscrite sur du long terme serait probablement de nature à générer des conditions plus favorables à leur engagement.

La cryogénie spatiale est aussi une spécialité où la France a beaucoup d'atout aussi bien dans l'industrie que dans les laboratoires de recherche. Elle devrait faire l'objet d'une analyse et d'une programmation des besoins à long terme.

Pour certains besoins scientifiques bien identifiés, il apparaît que des missions multi-satellitaires constituées de nanosatellites de coût individuel raisonnable sont une option intéressante. Cela va nécessiter de travailler activement sur les technologies de communications entre satellites d'un essaim ou entre ceux-ci et un satellite mère.

Enfin, les missions interplanétaires vont exiger une autonomie encore plus importante, bien au-delà de ce qui existe aujourd'hui. Il faut garder à l'esprit que les progrès qui devront être réalisés en robotique et en informatique embarquée auront des retombées industrielles et sociétales importantes. Il faut aussi noter que ces missions, comme celles impliquant des rover martiens qui



adressent, entre autres, la question fondamentale de l'exobiologie, ont un impact sur le grand public souvent comparable à celui des vols habités. Des missions comme Curiosity<sup>11</sup> ou Rosetta<sup>12</sup> l'ont très bien démontré.

Ces exemples, bien évidemment non exhaustifs des besoins, permettent d'illustrer l'équilibre qui devra être trouvé entre les différents types d'action de R&T dans les années à venir.

Les recommandations qui suivent proposent, quant à elles, une réflexion sur de nouveaux outils institutionnels pouvant améliorer les actions de R&T pilotées par le CNES dans un cadre pluri-organismes et dans une prospective à long terme.

#### [Renforcer les capacités industrielles en innovation de technologies pour l'instrumentation spatiale en liaison avec les organismes de recherche publics](#)

Pour des raisons d'indépendance et de compétitivité des industriels européens, il est également essentiel de soutenir la R&T industrielle concernant les composants stratégiques même si des technologies existent ailleurs. Ceci permet de s'affranchir d'éventuelles contraintes du type IEOGAR (International Traffic in Arms Regulations) et de se prémunir contre d'éventuelles surfacturations et allongements des délais de livraison de composants étrangers. Le CNES est impliqué dans divers programmes, notamment européens ayant cette finalité.

#### [Renforcer nos capacités en matière d'innovation instrumentale dans les laboratoires](#)

Le développement d'une instrumentation très nouvelle, en sciences de l'Univers et en observation de la Terre requiert bien évidemment des compétences de haut niveau, souvent très spécifiques. L'absence depuis plusieurs années de tout programme multi-organismes d'envergure significative visant à supporter de l'innovation instrumentale dédiée aux Sciences de la Terre et de l'Univers n'a pas aidé à l'émergence d'une nouvelle génération d'instrumentalistes : elle a non seulement réduit progressivement notre capacité à développer des missions scientifiques très novatrices mais a aussi rendu plus difficile d'attirer dans notre communauté des chercheurs instrumentalistes venant de laboratoires de physique ou d'ingénierie alors que leur apport est réellement essentiel. Un exemple parmi d'autres est la physique du signal, domaine dans lequel la communauté des Sciences de la Terre et de l'Univers a clairement besoin de se renforcer. L'existence d'un tel programme permettrait donc de lancer de vrais défis instrumentaux, de donner un cadre de travail lisible aux instrumentalistes motivés par les Sciences de la Terre et de l'Univers et offrirait également par ricochet des perspectives scientifiques nouvelles d'utilisation des porteurs de classe intermédiaire (ballon, drone, avion, nanosatellite...).

On rajoutera que, dans nos domaines, les commissions de recrutement sont thématiquement fléchées et donc le plus souvent composées de membres adaptés pour recruter de bons chercheurs sur ces thématiques mais forcément moins sensibles à la dimension instrumentale de la recherche (d'autant que celle-ci fait de plus en plus appel à des disciplines différentes : physique, chimie, biologie...). Ceci rend très difficile le recrutement de chercheurs ayant un profil de concepteur d'instruments nouveaux. Pour pallier à cette difficulté, il pourrait être envisagé dans les organismes ayant à voir avec les Sciences de la Terre et de l'Univers, la création d'une commission de recrutement dédiée au développement d'instrumentation innovante, ayant en son sein, à côté de quelques spécialistes des thématiques scientifiques au fait des besoins scientifiques, des spécialistes

<sup>11</sup> Curiosity est un rover qui a atterri sur Mars en 2012 dans le cadre de la mission NASA Mars Sample Laboratory (MSL) dans laquelle le CNES et la communauté française sont très impliqués

<sup>12</sup> Sonde européenne qui a orbité autour de la comète Churyumov-Gerasimenko afin de l'analyser, mais aussi larguer à sa surface un atterrisseur (Philae) chargé d'étudier la composition de son sol

en instrumentation et en systèmes d'observation. Un modèle existe, de telles sections ayant été mises en place au CNRS pour favoriser le recrutement de chercheurs développant des approches interdisciplinaires.

Enfin, la diminution subie ces dernières années du nombre et mais aussi du niveau d'expérience des personnels de support technique dans les laboratoires, notamment les chefs de projet et experts techniques, est telle qu'elle amène le CNES à s'interroger sur l'option d'une réalisation plus fréquente qu'actuellement des instruments dans l'industrie. Le recours au CDD n'a fait qu'augmenter ces dernières années, y compris pour couvrir trop souvent des besoins pérennes que le faible nombre d'ouvertures de concours ne permettait pas de satisfaire. Ce point concerne au premier chef les laboratoires du domaine des Sciences de l'Univers au sein desquels beaucoup d'instruments sont encore développés. Si le transfert vers l'industrie peut se justifier pour tout ou partie de certains instruments, cela ne doit se faire qu'en préservant une capacité d'innovation instrumentale dans les laboratoires et en leur conservant la maîtrise des tests de validation des instruments (tests qu'ils sont plus à même de conduire jusqu'aux limites des instruments, souvent bien au-delà des spécifications nominales que ne le ferait un industriel qui se contentera de satisfaire les spécifications du cahier des charges). Ceci dit, et quoi que l'on fasse, toute diminution des ressources humaines en instrumentation dans les laboratoires, tant au niveau chercheur qu'ingénieur, finira par impacter directement le niveau d'ambition de la recherche spatiale française.

*La diminution continue dans les laboratoires du nombre de chefs de projets et de chercheurs ayant une formation d'instrumentalistes, souvent à l'origine de concepts de missions innovantes, est très inquiétante. Le CNES se doit de rapporter auprès des organismes de recherche concernés ce problème. Les procédures permettant le recrutement de chercheurs instrumentalistes devraient notamment être revues. Des cadres programmatiques inter-organismes doivent être dédiés au développement instrumental innovant.*

#### [Accueillir en France un centre européen de réception et d'analyse d'échantillons extra-terrestres \(y compris martiens\)](#)

Le domaine de la planétologie et de l'exobiologie touche à des questions parmi les plus fondamentales (évolution des planètes, existence de vie extraterrestre, origine de la vie sur Terre), Les retours sur Terre d'échantillons de Mars et d'autres petits corps programmés pour les prochaines décennies constituent une formidable perspective de découvertes scientifiques. En effet, comparé aux mesures in situ qui sont réalisées avec des instruments optimisés pour des contraintes de charge et d'énergie imposées, des échantillons ramenés sur Terre pourront être étudiés avec les techniques analytiques les plus performantes et devraient donc offrir des informations bien plus riches sur la composition de la matière organique ou sur les structures minérales présentes. L'Europe est fortement engagé dans la mission Mars Sample Return (MSR) pour laquelle elle devrait fournir une contribution à la sélection d'échantillons via l'instrument



Supercam<sup>13</sup>, la fourniture du rover qui ira récupérer les échantillons qui auront été collectés et le vaisseau de retour.

La distribution de ces échantillons ne se fera que lorsqu'ils auront été certifiés sans danger et cette certification ne sera obtenue qu'après des études préliminaires menées dans des installations spécialisées et dédiées. Disposer d'une installation permettant de mettre en quarantaine des échantillons martiens et disposant de facilités analytiques de haut niveau permettant d'analyser tout type d'échantillons extra-terrestres renforcerait notablement les possibilités d'accès rapide à ces échantillons et donc de découvrir d'éventuelles traces de vie présentes ou passées. Cela permettrait également de dupliquer les analyses nécessaires à la certification dont on n'imagine pas qu'elle puisse reposer que sur les seuls résultats d'un unique centre. Il s'agit évidemment d'un investissement majeur, financièrement équivalent à une mission de taille moyenne, uniquement envisageable dans un cadre européen et multidisciplinaire. Mais il s'agit aussi d'un investissement à longue durée de vie qui permettra à l'Europe d'être pleinement partie prenante de découvertes majeures à fort impact sociétal. Un tel projet donnerait aussi un cadre très motivant pour le développement de méthodes analytiques innovatrices et à très hautes performances dont on peut facilement imaginer le bénéfice au-delà du seul domaine planétaire. Une installation ad hoc capable de réceptionner des échantillons martiens et disposant de capacités analytiques (en physique, chimie, biologie) au meilleur niveau mondial permettrait à l'Europe de remplir la place qui doit être la sienne dans ces missions de retour d'échantillons. La France, de par ses compétences reconnues en planétologie, exobiologie et minéralogie, semble particulièrement bien placée pour accueillir une telle installation.

*Compte tenu de l'intérêt scientifique et stratégique à moyen terme de disposer en Europe d'un centre de réception permettant la mise en quarantaine et l'analyse d'échantillons extra-terrestres, et notamment martiens, le CNES doit recommander à la France de porter un tel projet, de se proposer pour l'accueillir et de mettre en place les moyens de renforcer encore les compétences analytiques dans les domaines biologique, chimique et minéralogique.*

---

<sup>13</sup> Super Cam : instrument faisant suite à Chemcam, ensembles de spectromètre sIR et raman permettant une analyse minéralogique après ablation laser

### 3- La nouvelle dimension des données

#### Des données à l'information

C'est aujourd'hui une évidence que la production des informations pertinentes pour tout problème géophysique, environnementaux ou astronomique posés va nécessiter de plus en plus de combiner des données de nature variée. L'interprétation finale des données spatiales fait de plus en plus appel à leur hybridation avec des données sol variées tant sur le plan disciplinaire (données chimiques, physiques, biologiques, sociétales), sur le plan géographique (local, régional, global selon les capacités d'agrégation) sur leur nature (données de réseau, aéroportées, de campagnes...) ou encore institutionnel (provenant d'organismes divers : CNRS, CEA, IFREMER, IGN, INRA, IRD, Météo-France, ONERA, ... pour se limiter aux seuls partenaires nationaux). En effet, et même si le rôle de la donnée spatiale ne fait que croître, les questions abordées ne se résolvent que rarement de façon totalement satisfaisante avec les seules données spatiales : si celles-ci jouent un rôle majeur de par leur répétitivité et leur couverture spatiale, elles doivent être associées à des données in situ complémentaires (plus précises, parfois mieux résolues verticalement malgré leur caractère souvent ponctuel). Les problèmes associés à ces besoins multi-sources sont nombreux, au premier rang desquels se trouvent évidemment l'interopérabilité, l'accès par portail unique aux diverses données, etc... Il impose aussi une présence d'expertise autour de ces données et notamment de positionner correctement cette expertise (souvent liée à un laboratoire) par rapport à la gestion/distribution des données.

Dans le domaine des Sciences de la Terre, le développement de questionnements scientifiques de plus en plus systémiques et l'existence d'enjeux sociétaux impliquant d'évaluer les impacts des changements environnementaux ou ceux résultant d'aléas dans divers milieux de façon conjointe, s'imposent et dimensionnent différemment les besoins en termes d'accès et de combinaison de données. Un exemple nouveau de ce type d'organisation, par sa vocation mondiale, est l'Observatoire Spatial du Climat (OSC) qui affiche comme ambition d'utiliser des données satellitaires, combinées à des données régionales et des capacités de modélisation afin de comprendre et mesurer les impacts du changement climatique à différentes échelles.

La mise en place des pôles de données, dans laquelle le CNES a joué un grand rôle, puis leur intégration dans l'Infrastructure de Recherche Data Terra ont, entre autres, pour objectif de gérer les diverses contraintes mentionnées ci-dessus. Pour l'astronomie et la physique deux pôles de données ont été créés pour les données solaires et pour les plasmas interplanétaires au vu de leurs implications environnementales. Au regard des enjeux, leur mise en place doit être accélérée et les moyens liés aux ambitions assignées à ces pôles doivent être correctement dimensionnés, leur attribution planifiée et les partenariats finalisés. Une analyse de l'état d'avancement des pôles au regard des objectifs et une identification des éventuelles difficultés qui pourraient subsister doivent être réalisées.

Pour les missions du programme obligatoire de l'ESA (astronomie, planétologie, physique fondamentale, exploration), l'équivalent des pôles de données est mis en œuvre par l'ESA. Par contre, les missions de ce type mais hors cadre ESA restent sans cadre défini et les données sont traitées de façon ad-hoc.

Dans les sciences de l'Univers, les missions d'exploration de planétologie dans le système solaire n'ont pas de problème majeur de volume de données mais des problèmes de transmission des

données et vont nécessiter des capacités accrues en calcul bord. En fait, les grandes masses de données résultent des missions d'astronomie ciblées (pas observatoires) Planck, GAIA ou Euclid aujourd'hui, Ariel, Athena, Bepi-Colombo et LISA dans le futur. Ces missions ont des objectifs scientifiques spécifiques et difficiles à atteindre sans utiliser la totalité (ou au moins une grande fraction) des données disponibles. Il faut comprendre en détail les effets systématiques et, si ceux-ci dominent le bruit, construire des simulations dites « end to end » de façon à caractériser leur correction et les résidus de ces effets systématiques. Il faut aussi séparer les différentes contributions qui composent l'image sur le ciel avec, par exemple pour la cosmologie, les émissions diffuses d'avant plan dues aux galaxies ou aux émissions de notre galaxie et parfois du système solaire.

Ces séparations de composantes sont complexes et demandent des spécialistes d'autres thématiques de l'astronomie. Elle laisse des résidus non gaussiens qui ne permettent pas d'utiliser les approches analytiques de la vraisemblance. Il faut alors faire des simulations massives (plusieurs milliers) pour évaluer les incertitudes sur les résultats. L'utilisation des données est alors liée à l'accès aux simulations développées par ceux qui ont construit et testé les instruments. Une telle situation change par plusieurs ordres de grandeur la quantité de données à manipuler.

Les observatoires spatiaux (HST, XMM, Newton, Herschel, JWST,...) ont en gros les mêmes problèmes que les grands observatoires au sol et les données sont accessibles par un petit nombre de portails communs. Les logiciels de traitement sont là aussi développés par les équipes qui ont construit et testé les instruments. Les observations demandées par un observateur sont livrées par l'observatoire. Cette organisation est bien rodée et ne semble pas nécessiter d'être révisée.

Si ces efforts d'organisation, de structuration et de mise à disposition des données nationales sont essentiels, ils doivent cependant être vus que comme une étape, certes indispensable, vers une structuration du même type à l'échelle européenne. L'échelle européenne est en effet la seule capable de répondre aux offres privées qui émergent de la mise à disposition de données d'origine variées et de moyens de calcul (voir par exemple l'offre Google Earth Engine). Un cadre naturel pour cela pourrait être trouvé au sein du Programme Copernicus. L'ESA est en effet engagée avec l'Union Européenne dans le domaine de la valorisation des données spatiales de ce programme au travers des DIAS (Data and Information Access Services), « plateforme destinée à faciliter le développement de services applicatifs par et pour des utilisateurs finaux, privés comme publics, et faire ainsi entrer de plein pied les données satellitaires dans l'économie digitale ». Il faudra néanmoins veiller à ce que les bases de données envisagées dans ce programme, très liées aux services, ne conduisent pas à sectoriser trop fortement les différents domaines scientifiques.

*La mise en œuvre de l'Infrastructure de Recherche Data Terra et des pôles de données qui y concourent doit être accélérée et les moyens ad hoc pour atteindre les objectifs fixés doivent être dégagés. En parallèle, il est indispensable de conduire les actions permettant de faire émerger au niveau européen un ensemble offrant des services compétitifs en moyens de calcul et de bases données environnementales.*

*Dans le domaine des Sciences de l'univers il y a Google Sky pour le grand public mais qui ne se donne pas pour but d'être un point d'entrée pour les chercheurs.*

### Les moyens de calcul nécessaires

Comme mentionné précédemment, le volume de données issues d'observations spatiales explose. A titre d'exemples, l'archive des données d'observation de la Terre à l'ESA s'élèvera à 20 Po<sup>14</sup> en 2020 et Copernicus générera 5Po/an. L'archive liée aux satellites Spot<sup>15</sup> (depuis 1985, de Spot 1 à Spot 5) représente trente millions de scènes et un volume d'environ 15 Po. La mission d'astrométrie GAIA qui a mesuré les mouvements propres d'1.7 milliard d'étoiles a nécessité une puissance de calcul de 6 Teraflops/sec sur un cluster de 6000 cœurs.

Par ailleurs, le traitement de ces données fait de plus en plus appel à leur combinaison avec des données de réseau sol (par exemple la combinaison de mesures multi-longueurs d'onde de Planck<sup>16</sup>, WISE<sup>17</sup> et avec le CFHT<sup>18</sup>; les données du télescope spatial EUCLID<sup>19</sup> et celle du Large Synoptic Survey Telescope (LSST) ; combinaison de données multi-longueurs d'onde d'ozone troposphérique avec des données de surface...). Ces données sol, indispensables à l'analyse des données spatiales, demandent aujourd'hui, elles-aussi, des capacités de calcul et de stockage exceptionnelles : par exemple, le LSST produira près de 15 TBytes par nuit et le projet SKA<sup>20</sup> qui devrait être opérationnel vers 2024 générera des flux de données de l'ordre du Tbytes par seconde. De très grandes capacités de calcul associées à des méthodes de traitement de haut niveau seront donc nécessaires pour exploiter ces masses de données. Il faudra aussi anticiper les évolutions attendues des types d'architecture de calcul (GPU, calcul vectoriel...) pour développer des algorithmes de calcul compatibles.

Comme nous l'avons vu, dans les domaines de l'astronomie et de la physique fondamentale, les problèmes sont liés à la complexité des traitements et à la nécessité de recourir aux simulations pour déterminer les incertitudes et donc répéter de nombreuses fois le traitement sur des données simulées (Planck, Euclid). Ceci rend nécessaire l'appel à des centres de calcul nationaux ou européens.

Il n'est, par ailleurs, guère envisageable d'imaginer transférer ces énormes masses de données de façon régulière entre centre de réception de données, pôles de données et centre de calcul. En conséquence, la proximité physique entre centres de données et centres de calcul va devenir indispensable. Il semble aussi établi que les besoins en calcul requis par le traitement de données massives provenant de différentes sources seront suffisamment importants à relativement court terme pour ne pouvoir être envisagés qu'au niveau de centres de calcul nationaux (par exemple Genci<sup>21</sup>) voire européens (par exemple au travers de EuroHPC<sup>22</sup> ou de l'infrastructure European Grid Initiative). Cela nécessite de réfléchir rapidement au possible positionnement des données et/ou

---

<sup>14</sup> Petaoctet

<sup>15</sup> Spot : Satellite Pour l'Observation de la Terre, filières de satellites imageurs à haute résolution (visible)

<sup>16</sup> Satellite européen qui a analysé le fond diffus cosmologique rayonnement dans le domaine micro-onde montrant l'Univers tel qu'il était 380 000 ans après le Big Bang

<sup>17</sup> Wide-Field Infrared Survey Explorer, télescope spatial américain qui observe l'ensemble du ciel dans l'infrarouge

<sup>18</sup> Canada-France-Hawaii Telescope, télescope optique et infrarouge de 3,58 mètres situé à 4200m d'altitude à Hawaï

<sup>19</sup> Télescope spatial de l'Agence Spatiale Européenne observant en lumière visible et dans le proche infrarouge qui devrait être lancé vers 2022

<sup>20</sup> Square Kilometre Array, Radiotélescope géant qui et couvrira une gamme de longueurs d'onde allant d'environ 50 MHz à plus de 20 GHz

<sup>21</sup> Grand équipement national de calcul intensif

<sup>22</sup> Euro HPC : projet High Performance Computing qui consiste à mutualiser les moyens des pays européens pour construire et partager des supercalculateurs de classe exaflopique

pôles de données au sein même de ces centres de calcul et à la façon de maintenir le lien nécessaire avec les centres d'expertise que sont les laboratoires.

Dans ce contexte, les technologies qui permettent d'augmenter les capacités d'autonomie et de calcul embarquées deviennent également critiques. Elles permettent d'accroître le nombre de détecteurs en optimisant la répartition entre volume et flux des données à transmettre et les moyens de calcul au sol.

Même si les poids respectifs que représentent, dans la problématique de données, les questions liées à la volumétrie, à la complexité des traitements de la donnée satellitaire, à l'hybridation de ces données spatiales avec des observations sol ou des modèles, diffèrent selon que l'on s'intéresse aux Sciences de l'Univers ou aux Sciences de la Terre, il faut garder en tête leur caractère générique et les risques qu'un manque d'anticipation ferait peser sur ces sciences.

*Disposer d'une puissance de calcul compétitive est une nécessité absolue au regard des flux de données attendus et de l'appel à des simulations massives des observations et des effets instrumentaux. Un rapprochement des bases de données et des outils de traitement avec les centres de calcul de niveau national et plus encore européen est indispensable à moyen terme. Ceci implique aussi d'envisager avec ces centres les évolutions technologiques à venir dans le domaine des calculateurs et d'évaluer leurs conséquences potentielles sur la structure des algorithmes de traitement de données.*

#### Des besoins en méthodes numériques de traitement

De façon complémentaire, les sciences mathématiques et informatiques ont un rôle essentiel à jouer dans les développements de méthodologie de traitement et d'analyse de données et dans l'optimisation des modèles à mettre en regard des données afin de transformer les données brutes en connaissances scientifiques directement utilisables.

Les chaînes linéaires de traitement, de plus en plus sophistiquées, produites par des acteurs séparés ne suffisent plus pour répondre à la demande d'informations élaborées et complexes qui nécessitent la combinaison de données provenant d'origines multiples. De même, les méthodes classiques de traitement de données divisées en niveau de données produites par des groupes soutenus par des agences différentes (CNES, grands centres de recherche, laboratoires universitaires), que l'on pourrait qualifier de façon caricaturale de « manuelles », deviennent clairement inadaptées aux traitements demandés et le recours à des méthodes automatiques est inévitable : l'utilisation de méthodes dérivées de l'intelligence artificielle (apprentissage profond, adaptation de domaine, approche non supervisée, recours à des simulations massives, réduction de la dimensionnalité des données,...) apparaît comme incontournable.

Les algorithmes de simulations font appel à des représentations statistiques qui utilisent des techniques nouvelles en mathématiques appliquées quand les incertitudes ne sont plus gaussiennes. Les simulations de milieux turbulents par exemple posent des problèmes similaires en cosmologie (avant plans interstellaire turbulents) et en Sciences de la Terre.

Enfin, la production de données à forte valeur ajoutée nécessite, au-delà de la mise en place de bases de données organisées mêlant données sol et spatiales, le développement d'algorithmes de

plus en plus complexes, d'abord pour traiter puis pour pouvoir inter-opérer des données n'ayant pas les mêmes dimensionnalités et enfin pour les assimiler dans des modèles.

C'est clairement un domaine où la perception des problèmes par les communautés concernées est très claire mais pour lesquels leur formulation concrète et plus encore les méthodologies de résolution sont en élaboration. Pour couvrir ces besoins, des compétences scientifiques nouvelles dans le domaine des mathématiques appliquées doivent être convoquées. Il existe déjà des initiatives intéressantes (par exemple le GDR CNRS MADICS<sup>23</sup> ou de l'initiative Mathématiques et Complexité du Système Terre<sup>24</sup>) dont certaines actions sont clairement orientées vers le traitement des données spatiales en Sciences de la Terre ou en astrophysique et desquelles il est indispensable de se rapprocher plus formellement que par la simple participation volontaire et individuelle de chercheurs.

*Les évolutions attendues dans le domaine des données imposent de mettre en place une politique volontariste du CNES, des organismes de recherche et des tutelles gouvernementales autour des enjeux en informatique et mathématiques appliquées.*

#### **4- Le Partenariat, un atout à cultiver**

##### Les liens avec la communauté scientifique

La communauté académique joue un rôle majeur dans la définition, la réalisation et l'exploitation des missions spatiales. Nombre de missions qui ont été de grandes réussites n'auraient pu être réalisées, ni même parfois imaginées, sans la contribution de la communauté scientifique. Ce partenariat, historique, est un atout majeur de la politique spatiale française.

Néanmoins, les niveaux d'intervention de la communauté scientifique sont assez différents selon les domaines concernés. Si en Sciences de l'Univers, nombre de laboratoires ont conservé des capacités de réalisation de charges utiles ou a minima de production et tests de composants de ces charges utiles, ces mêmes charges utiles sont, en Sciences de la Terre, très majoritairement réalisées dans l'industrie, notamment en raison de l'émergence progressive de filières permettant à l'industrie d'élaborer un modèle économique viable. Le corollaire de cela a été une diminution continue de la capacité de réalisation d'instruments dans les laboratoires des Sciences de la Terre. En contrepartie, ceux-ci sont très fortement impliqués dans le traitement des données, leur exploitation scientifique et leur valorisation, y compris parfois jusqu'à la réalisation de démonstrateur de services.

Les activités des chercheurs sont soutenues par le CNES dans le cadre de l'APR<sup>25</sup> dont l'objectif principal est de préparer au mieux les missions en développement et de faire rayonner les missions en exploitation. Dans un contexte très international et concurrentiel, ce soutien est essentiel pour maintenir et/ou développer l'expertise des équipes françaises et les aider à jouer un rôle de premier plan dans les résultats futurs de la mission.

##### Le partenariat inter-organismes

Le CNES n'a pas de laboratoire de recherche en propre mais travaille en partenariat avec les laboratoires de recherche placés sous la tutelle d'universités ou d'organismes publics. Aujourd'hui,

<sup>23</sup> Groupement de recherches : Masses de Données, Informations et Connaissances en Sciences

<sup>24</sup> Atelier prospectif supporté par l'ANR, hébergé par l'Institut Henri Poincaré et soutenu par l'Institut National des Sciences Mathématiques et de leurs Interactions (INSMI/CNRS)

<sup>25</sup> Appel à Proposition de Recherche du CNES, programme de préparation et d'accompagnement scientifique des projets



le système d'organisation de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (ESR) rend le partenariat inter-organismes plus compliqué à mettre en œuvre qu'il ne l'a été dans le passé alors que les évolutions des questionnements scientifiques (notamment vers les problèmes d'interfaces et d'interactions) et des méthodes imposent encore davantage la mise en commun des techniques, des données, des ressources et des compétences de divers organismes.

Si le CNES veut s'assurer de la pleine valorisation des données qu'il contribue à produire, son partenariat avec les organismes de recherche doit être prolongé jusqu'au niveau de la production de l'information visée et ne pas s'arrêter à la seule fourniture de la donnée spatiale qualifiée et géo-référencée. Ce genre de positionnement est particulièrement urgent à mettre en place en Sciences de la Terre où à la fois l'existence de nombreuses données in situ et une demande sociétale forte sur des informations environnementales précises rend cette co-construction absolument nécessaire. Mais cela est également vrai en Sciences de l'Univers où de plus en plus de missions nécessitent une forte interaction entre réseaux sol et observations spatiales pour délivrer des informations scientifiques pertinentes. Dans le contexte actuel, il est indispensable d'utiliser toutes les possibilités de coopération inter-organismes existantes, voire d'en inventer de nouvelles, lorsque cela est nécessaire.

*Le partenariat inter-organismes est une clé de voûte de l'excellence spatiale française. L'évolution des questionnements, notamment la nécessaire combinaison des données spatiales avec des données sol, nécessite de revisiter ce partenariat. En particulier, le CNES doit se sentir non seulement responsable de la production de la donnée spatiale mais également concerné par sa valorisation sous forme d'information finale.*

#### La dimension européenne

Le CNES n'a pas la capacité financière pour être le prescripteur unique de missions scientifiques. Une grande mission dont le CNES assurerait l'essentiel (plateforme, charge utile, lancement et exploitation) atteindrait un coût correspondant à plusieurs années du budget Science, même avec une ambition scientifique limitée. Les futures grandes missions du CNES verront donc nécessairement le jour soit sous la forme de coopérations négociées avec d'autres agences, soit sous la forme d'un support à des consortia scientifiques qui soumettent des propositions à de grandes agences prescriptrices comme cela est déjà le cas pour les missions du programme obligatoire ESA.

Les grands projets spatiaux nécessitent donc pour leur réalisation un cadre de coopération internationale établi. Pour la communauté française, c'est d'abord à l'échelle européenne que doit être définie une politique spatiale d'envergure. A ce titre, l'ESA, EUMETSAT et la Communauté Européenne constituent les cadres naturels pour développer des missions ambitieuses et innovantes inscrites dans des cadres programmatiques définis et structurés (Cosmic Vision, Earth Explorer, Copernicus...).

La contribution de la France aux missions de l'ESA est de tout premier plan, notamment en Sciences de l'Univers. Concernant le programme Earth Explorer, la contribution nationale a été très importante dans des missions comme Smos, Cryosat, Swarm ou encore Biomass.

Néanmoins, il faut noter que les dernières sélections ont été moins favorables de ce point de vue, la participation française aux missions sélectionnées ou présélectionnées étant assez limitée. Une analyse des réussites passées dans ce programme permettra sans doute d'identifier les processus permettant à la communauté française de faire à nouveau émerger des concepts instrumentaux innovants et de contribuer à établir des consortia européens de qualité autour de ces propositions. Par ailleurs, s'il s'avérait que les missions Earth Explorer sélectionnées n'adressaient pas des questions scientifiques considérées par la communauté française comme prioritaires, cela nécessiterait évidemment de s'interroger sur les raisons de telles divergences d'intérêt.

La place particulière de l'Europe dans le partenariat international doit naturellement être réaffirmée : au regard du nouveau contexte très concurrentiel du spatial et des perspectives scientifiques nouvelles et porteuses de découvertes majeures qu'offrent par exemple le retour d'échantillons martiens, les missions cosmologiques ou l'observation de la Terre, il est essentiel que l'ESA dispose des moyens nécessaires pour maintenir, voire renforcer, sa position d'agence spatiale de premier plan.

*Néanmoins, renforcer les moyens alloués à l'ESA, notamment ceux liés au programme obligatoire, n'a de sens que si cela est accompagné d'une augmentation raisonnable du budget propre du CNES. En effet, il est indispensable que le CNES dispose des moyens nécessaires pour contribuer efficacement aux charges utiles du programme obligatoire tout en conservant une capacité suffisante pour le partenariat bi ou multi-latéral.*

#### Le partenariat bi (multi)latéral

Par ailleurs, une des forces et des missions du CNES, résultant à la fois de ses compétences technologiques et de l'excellence de la communauté scientifique française, est sa capacité à être partenaire de grandes missions bilatérales portées par des agences étrangères comme la NASA, Roscosmos, la JAXA, la CNSA, l'ISRO... Les instruments ChemCam<sup>26</sup> et Sam<sup>27</sup> ou le sismomètre SEIS<sup>28</sup> embarqués respectivement sur les missions CURIOSITY et INSIGHT<sup>29</sup> de la NASA et les programmes SVOM<sup>30</sup>, CFOSAT<sup>31</sup> avec la Chine, JASON avec le JPL sont de bons exemples de la réussite de telles coopérations. A côté de la contribution française à l'ESA, il est donc indispensable de pouvoir continuer de disposer des moyens de conduire de telles coopérations à très fort retour sur investissements, tant sur le plan scientifique qu'en terme de valorisation du savoir-faire français.

Enfin, les nouvelles approches d'accès au spatial issues du Newspace (dont on a vu qu'il a l'ambition de contribuer à réduire le coût de l'accès à l'espace) amènent de nouveaux pays à se positionner dans le domaine spatial. L'ambition de ces nouveaux « entrants » est variée visant aussi bien le développement d'applications sociétales (observation de la Terre, télécommunications, navigation...) qu'un développement économique dans le domaine ou encore un rayonnement accru

<sup>26</sup> ChemCam (pour Caméra Chimique), analyseur spectral induit par ablation laser permettant de déterminer la composition élémentaire des roches

<sup>27</sup> Sample Analysis at Mars, ensemble de trois instruments (spectromètre de masse quadrupolaire, chromatographe en phase gazeuse (GC), spectromètre à diode laser)

<sup>28</sup> Sismomètre conçu par l'Institut de Physique du Globe de Paris et fourni sous maîtrise d'œuvre du CNES

<sup>29</sup> Mission martienne de la NASA visant à étudier la structure interne de la planète

<sup>30</sup> SVOM (Space Variable Objects Monitor) est une mission franco-chinoise qui a pour objectif de détecter les sursauts gamma et d'en déterminer les caractéristiques

<sup>31</sup> CFOSAT (China-France Oceanography SATellite) est une mission franco-chinoise dont l'objectif est de mesurer les vents et les vagues à la surface des océans.

sur la scène internationale. Dans ce cadre, le CNES est régulièrement sollicité pour soutenir l'action diplomatique, économique et stratégique de la France avec ces nouveaux pays au travers de partenariats.

Ceci a conduit à ce que certaines missions à vocation scientifique ont pu parfois être décidées en dépit d'un niveau de priorité scientifique modérée dans les recommandations du CPS. Cette dimension diplomatique étant incontournable, il est nécessaire de réfléchir en amont à des sujets de coopération scientifique couvrant un spectre large en terme de type de coopération (missions, démonstrateurs, développements technologiques, formation, traitements des données ...) qui puissent être proposés comme objet de partenariat et faire que cette coopération puisse se développer dans un cadre aussi gagnant-gagnant que possible.

Le SCO (Space Climate Observatory) est un outil qui permettra de développer des collaborations avec les grandes puissances du spatial sur ce besoin sociétal majeur par l'échange de données de haut niveau en Sciences de la Terre et l'optimisation du dispositif mondial en minimisant les duplications. Il permettra aussi de fournir à nombre de pays émergents dans le domaine spatial, des données et des algorithmes de traitement leur permettant de conduire des études d'impact du changement global aux échelles locale ou régionale.

## 5- La formation aux sciences et applications spatiales

Comme mentionné précédemment, le marché autour du spatial se développe faisant clairement du spatial un secteur porteur de croissance et créateur d'emplois. Il existe notamment un réel potentiel de création d'emplois dans les services et applications liés au spatial. On notera à cet effet que certains pays (comme le Royaume-Uni) ont déjà décidé de faire porter leur effort dans le domaine du spatial principalement sur le segment aval, c'est-à-dire celui des applications à forte valeur marchande. Dans ce contexte, il y a une nécessité à développer/renforcer les filières de formation aux métiers du spatial ou à ceux en lien avec le traitement des données spatiales.

Les liens du CNES avec l'enseignement supérieur concernent principalement la recherche et il s'agit souvent de liens reposant davantage sur la tutelle CNRS des UMR que sur les établissements d'enseignement supérieur en tant que tels. Actuellement, les interventions du CNES en terme de formation concernent donc essentiellement la formation pour et par la recherche : chaque année, le CNES attribue une centaine d'allocations de recherche (thèses et post-doctorats) à des étudiants en sciences en co-financement avec d'autres institutions ou acteurs privés, notamment des PME.

Néanmoins, dans le nouveau contexte, le CNES doit renforcer sa visibilité dans le monde académique et sensibiliser davantage les étudiants et futurs ingénieurs aux enjeux du spatial.

La multiplication récente des Campus Spatiaux Universitaires (CSU) traduit une sensibilisation plus grande des IDEX, regroupements d'universités et d'écoles d'ingénieurs, aux formations de haut niveau et débouchés potentiels qu'offrent les sciences spatiales.

*La dimension « formation » de ces campus spatiaux universitaires doit être accompagnée à la fois par le MESRI et par les acteurs institutionnels et privés du spatial si l'on veut former les spécialistes des sciences spatiales dont on va avoir besoin tant pour développer les projets scientifiques de demain que pour assurer leur valorisation.*

C'est sans doute notamment le rôle du CNES de faciliter la mise en réseau de ces CSU. De façon plus générale, cela implique que le CNES établisse des relations plus directes et institutionnalisées, focalisées sur la formation, avec les universités et les écoles d'ingénieurs. L'accent mis sur les nanosatellites dans ces campus universitaires ne doit pas faire oublier le potentiel de formation par les stages offerts au sein des équipes projet des grandes missions spatiales qui offrent une formation à la conduite de grands projets internationaux. Cette voie déjà exploitée doit être renforcée.

## 6 - L'organisation et le fonctionnement

### Organisation des projets

Compte-tenu du retour d'expérience et des enjeux à venir, notamment au regard de l'envergure de certaines missions, une procédure permettant une concertation bien en amont du montage des projets doit être mise en place au niveau français. Cette concertation qui devrait déboucher sur un plan d'implémentation du projet considéré devrait concerner d'une part les différents organismes et tutelles impliqués (depuis le concept de mission jusqu'à la valorisation des données) et d'autre part les laboratoires parties prenantes de la mission. L'objectif est de pouvoir construire très tôt une contribution nationale concertée, correctement dimensionnée et visant à optimiser les implications des équipes, l'utilisation des ressources nationales et de bien prendre en compte toute la chaîne d'actions, notamment la phase d'exploitation dont le dimensionnement réel est souvent trop tardif. Ceci devrait également limiter la fragilité potentielle que peut constituer le morcellement des contributions françaises lors du montage d'un projet international. Des contributions coordonnées à l'échelle nationale devraient également permettre de limiter les contributions extérieures d'opportunité mal appropriées alors qu'il existe des expertises maîtrisées au niveau national.

Les directeurs de laboratoires ont, par ailleurs, souligné, à juste titre, l'intérêt qu'il y avait à se partager les tâches en fonction de leurs spécificités propres. Une telle approche, basée sur des centres de compétences identifiés, pourrait effectivement permettre de maintenir leur potentiel humain au-dessus des seuils critiques indispensables pour mener des projets d'envergure à forte valeur ajoutée.

*Lors de la mise en place des projets, et lorsque cela est possible, la constitution d'une équipe intégrée laboratoire/CNES constituerait un atout certain, non seulement pour les interactions technologiques mais également afin d'optimiser les circuits d'information et de décision lors du déroulement du projet. Les réticences sur les équipes intégrées, basées sur une colocation devraient être dépassées au vu du développement des méthodes de communications et de travail à distance.*

### Les modes d'intervention du CNES

Avec l'accélération et la complexification du paysage spatial, il est nécessaire de renforcer le partage stratégique au niveau national entre le CNES et ses partenaires, mais également entre les laboratoires de manière à avoir une politique spatiale française concertée.

L'animation de ces étapes préalables indispensables repose sur le rôle clé des équipes thématiques du CNES (« thématiciens »), qui suivent le cycle complet d'une mission, de l'incubation (R&T/APR), au développement et à l'exploitation.

Les missions se construisent à travers les phases préliminaires du développement projet (phases 0 et A). Avec ses partenaires, le CNES y mobilise ses experts techniques et ses analystes financiers. Dans cette phase, le CNES confronte plusieurs critères : 1) l'intérêt scientifique 2) Le caractère innovant des technologies mises en jeu 3) l'opportunité de coopération internationale, en lien avec la plupart des grandes agences internationales, mais également avec les pays émergents 4) Les enjeux de maintien de compétences françaises publiques et privées 5) Les contraintes de réalisation liées à la soutenabilité financière (en dépenses externes du développement à l'exploitation) et à la soutenabilité en personnel (RH CNES et laboratoires, y compris les compétences clés).

En amont des propositions et en lien avec la recommandation précédente, **la préparation de chaque top priorité issue du SPS doit être concertée au niveau national de manière proactive** pour se donner les meilleures chances.

#### *Les recours à l'industrie*

L'industrie du spatial, notamment les acteurs français, est maintenant d'une grande maturité. **Les grands industriels maîtres d'œuvre sont adaptés à la réalisation de projets très bien spécifiés** et à risques technologiques maîtrisés. Pour les objets plus originaux ou plus innovants, donc plus difficiles à développer, le CNES peut être amené à prendre la maîtrise d'œuvre en s'appuyant sur des PME spécialisées, afin d'assumer directement les risques.

Par ailleurs, il existe une offre variée d'assistance technique, souvent spécialisée (par exemple dans les domaines mécanique, thermiques ou électrique) avec laquelle il serait judicieux de développer des **logiques de partenariat**, en élargissant l'assiette d'intervention de ces réseaux partenaires, par exemple dans le domaine de l'intégration et des tests.

Pour accompagner le transfert de savoir-faire des laboratoires vers l'industrie, et assurer la construction de la confiance indispensable aux différentes parties, il faut permettre aux laboratoires d'acquérir la visibilité nécessaire sur les développements industriels afférents notamment aux concepts issus de ces laboratoires. Cette condition de confiance est un élément crucial dans l'élaboration de logiques de partenariat triangulaire plus marquées entre laboratoires, industriels et CNES. Dans cette perspective, des scientifiques issus des laboratoires peuvent être intégrés dans les équipes de suivi industriel CNES ou dans l'industrie pour le suivi de certaines réalisations. Ces médiateurs scientifiques, utilisés en consultance et sans rôle opérationnel, pourraient aider à résoudre les difficultés rencontrées lors des transferts technologiques et identifier quelles améliorations de performance sont possibles tout en respectant le cadre d'un contrat industriel.

#### *L'intervention des labos spatiaux*

Sans remettre en cause le rôle des laboratoires spatiaux dans l'instrumentation scientifique et leur rôle clé dans les propositions de concepts innovants et la réalisation de prototypes sols, il semble que plusieurs chantiers seraient profitables :

- 1) Etudier au cas par cas **l'industrialisation des filières d'instruments les plus utilisés** (exemple sondes magnétiques, spectromètres) en prévoyant éventuellement que des scientifiques puissent aider l'industriel dans le cadre d'une consultance en dépassant la notion de propriété d'un concept instrumental. Cette pratique est la plus employée dans le domaine de l'observation de la Terre.
- 2) **Mutualiser les moyens d'intégration et de tests** en bannissant le financement ou la mise à niveau de moyens pour lesquels des alternatives existent dans d'autres laboratoires, en associant les différentes tutelles aux décisions selon un principe de subsidiarité (en lien avec la dynamique du Groupement d'Intérêt Scientifique PARADISE).

- 3) **Renforcer la validation des prévisions des laboratoires** pour mieux anticiper d'éventuels problèmes liés à la surcharge des équipes, comme par exemple des besoins financiers supplémentaires ou des supports techniques imprévus.
- 4) **Garantir le respect du référentiel de qualité**, notamment pour les réalisations matérielles liées aux modèles de vol, y compris les moyens sol. On peut songer à mettre en place une labellisation « spatiale » régulièrement vérifiée.

Dans ces conditions cette spécificité et richesse françaises que constituent les laboratoires spatiaux pourra être maintenue, voire amplifiée. **Le CNES maintient sa confiance dans le rôle des laboratoires spatiaux et est prêt aux efforts collectifs nécessaires pour affronter une exigence qui évolue et contrôler les risques qu'elle induit.**

#### *Les exploitations*

Le succès des missions se traduit par les publications qu'elles suscitent, soit directement, soit indirectement par la production de données utiles à plusieurs thématiques. Traditionnellement, les phases initiales d'exploitation se partagent au début entre coûts opérationnels et coûts d'analyse des données et finissent par ne concerner que les coûts d'analyse, notamment lorsque la mission ne produit plus de données.

La durée de vie parfois maintenant très longue de certaines missions a suscité des inquiétudes de financement, mais c'est aussi une opportunité. En réalité, les plus gros postes de dépenses concernent des développements logiciels dans le cadre de missions en cours ou à venir.

Une réflexion sur **les outils logiciels utilisés en exploitation** pourrait aboutir à des réductions de coûts en répondant aux questions suivantes :

- 1) La **recherche systématique d'outils communs** à plusieurs missions, avec les maintenances, montées de versions qu'ils impliquent, est-elle justifiée par rapport à des développements dédiés plus simples ?
- 2) Le développement des outils d'exploitation peut-il devenir collaboratif ? C'est-à-dire, à partir d'une description d'interface et d'objectifs, faire appel à **des contributeurs volontaires** dont la seule rétribution serait la satisfaction de voir leur proposition acceptée et utilisée ?
- 3) **Quelles règles appliquer aux demandes de financement** des laboratoires vers le CNES concernant les exploitations, notamment lorsqu'il s'agit de prolonger l'exploitation d'une mission. Des règles peuvent être proposées pour la part de financement CNES : recours à des publications gratuites, limite des frais de missions par personne, limite du pourcentage de RH effectué sur contrat financé par le CNES.

Enfin, comme nous l'avons abordé précédemment, les besoins croissants en simulations massives, en archivage qui deviennent parfois l'élément dimensionnant (climatologie, fond diffus cosmologique) devront faire l'objet d'une réflexion collective dédiée autour de l'avenir des pôles de données.

#### *Les relations européennes*

Le partenaire principal du CNES en termes de programme scientifique est évidemment l'ESA, avec laquelle les relations institutionnelles sont très fortes et bien codifiées (programme scientifique obligatoire, programme d'observation de la terre,...). Les programmes scientifiques de l'ESA sont le premier poste de dépenses du CNES en matière scientifique, mais lui offrent un effet de levier important. Quelques pistes permettraient d'améliorer l'efficacité du processus et d'amplifier l'effet de levier :



- 1) **La gestion précoce, par des équipes d'ingénierie système**, par exemple mixtes entre ESA et CNES, des interfaces entre les consortia scientifiques et les industriels, afin d'éviter la juxtaposition tardive de réflexions aboutissant à des incompatibilités.
- 2) **La reconnaissance de la maturité des processus du CNES et de ses partenaires**, et notamment de la pertinence de son plan qualité et de sa capacité à organiser des revues.
- 3) **Un mécanisme permettant à l'ESA de financer les parties des contributions nationales qui sont d'une maturité suffisante, par exemple au stade des modèles de vol**, Ceci permettrait d'augmenter l'effet de levier et de focaliser l'effort du CNES sur sa capacité d'innovation. La nécessité actuelle de financer le modèle de vol augmente considérablement le coût des innovations portées par le CNES.

On note aussi, le rôle majeur de l'UE dans des programmes comme Copernicus ou Galileo, dont les données fournies sont de plus en plus utilisées par la communauté scientifique française.

#### *Les relations avec les agences*

Le CNES entretient des relations bilatérales avec quasiment toutes les agences. Selon les cas, les possibilités de coopération sur des missions scientifiques sont d'emblée très politiques ou bien basées sur les réponses à appels à propositions. Dans ce dernier cas, on pourra chercher à ce que, en préalable de discussions bilatérale, l'information du CNES soit totale concernant les vellétés de participation de scientifiques français à des consortia formés pour ces appels à propositions. **Une règle saine serait que les scientifiques français qui envisagent une participation en informent le CNES en même temps que la direction de leur unité dès le premier contact, faute de quoi leur proposition devrait vivre sans support technique, ni organisationnel ni financier du CNES et des organismes partenaires.**

#### *Fonctionnement du CPS*

Le CNES doit être en capacité de proposer au CPS des scénarios montrant les conséquences, tant financières qu'en ressources humaines, d'une décision de mission sur les missions prioritaires restant dans le paysage. Les conseils scientifiques (CERES, TOSCA, CPS) peuvent proposer un scénario prioritaire et demander au CNES l'étude de scénarios alternatifs ne remettant pas fondamentalement en cause les capacités budgétaires prévisibles du CNES. Ce processus étant achevé, il revient à la direction du CNES de prendre une décision aussi consensuelle que possible, en prenant en compte l'intérêt scientifique mais également les autres paramètres, souvent nombreux, qui peuvent exister.

*La communauté nationale, au travers des complémentarités construites entre son agence spatiale et les organismes de recherche a une forte capacité d'innovation, tant dans le domaine instrumental que dans celui de la production de données à forte valeur ajoutée, ce qui est un atout majeur dans ce contexte évolutif. Pour être saisies et plus encore concrétisées, surtout dans un marché devenu concurrentiel, les nouvelles opportunités qui apparaissent devront être accompagnées par une impulsion politique forte, un soutien des pouvoirs publics volontariste et à la mesure des enjeux, au moins en phase avec ceux déployés par les autres acteurs majeurs du spatial à l'échelle internationale. Actuellement, les ressources du CNES consacrées aux activités scientifiques sont au mieux stables en euros courants et celles des grands organismes de recherche partenaires généralistes (comme le CNRS ou les universités) ou thématiques (Météo-France, Ifremer, IGN, CEA...) sont, pour certains, en diminution et de ce fait insuffisantes pour permettre de tirer le plein bénéfice du partenariat original que CNES et organismes ont su construire au cours des cinquante dernières années.*

*En conclusion, le challenge à relever consiste à répondre aux évolutions rapides qui affectent le domaine spatial pour en tirer le meilleur profit. Ces évolutions doivent conduire à faire de **la science spatiale un axe majeur de développement pour les décennies à venir au sein du CNES**. Il a vocation, avec ses partenaires, à proposer à ses tutelles de fédérer les multiples contributions évoquées dans cette prospective scientifique.*

- :- :-