

Bilan TOSCA

2009-2013

Présentation Synthétique

INTRODUCTION

La prospective CNES issue du Colloque qui s'est tenu à Biarritz en mars 2009 dégageait ses priorités en termes d'objectifs pour la période 2009-2013 autour de trois types d'enjeux :

- des enjeux de connaissance,
- des enjeux de détection et de quantification des changements planétaires,
- des enjeux de gestion de l'environnement.

Ces divers enjeux s'inscrivaient d'une part dans une démarche visant à favoriser le développement d'une approche plus systémique des sciences de la planète Terre et d'autre part dans un contexte de demande institutionnelle et citoyenne toujours plus forte en matière de données et résultats à même de favoriser un usage raisonné des ressources, une gestion optimale des risques environnementaux ainsi que des approches d'adaptation et remédiation aux changements globaux attendus.

Cette prospective n'était donc pas organisée, comme classiquement, par milieux physiques mais par questionnements scientifiques, souvent transverses aux milieux. Elle soutenait à la fois la nécessaire continuité de certaines mesures indicatrices de l'évolution de l'environnement et des missions plus novatrices, à même de fournir la mesure de nouvelles variables d'intérêt ou celles de variables déjà mesurées mais à plus haute résolution spatiale et temporelle, ou avec une meilleure précision.

Enfin, une des recommandations fortes issues de ce séminaire portait sur le nécessaire effort de R&T à conduire, notamment sur certaines techniques nouvelles (au moins pour les sciences spatiales) à même d'ouvrir les filières instrumentales de demain.

Pour des raisons à la fois scientifiques, politiques et budgétaires, la plupart des actions envisagées devaient être conduites dans le cadre de partenariats internationaux, soit au travers des programmes de l'Agence Spatiale Européenne soit par le biais d'accords bilatéraux.

Ce document introductif, présenté selon l'organisation adoptée pour la prospective en 2009, est volontairement assez bref et a pour objectif de mettre en lumière quelques faits marquants de la période 2009-2013. Il est donc par nature non exhaustif et trop peu détaillé au regard de la qualité des travaux conduits. Il est pour cela complété par les rapports de bilan rédigés par les quatre groupes du TOSCA (Terre Solide, Océan, Surfaces Continentales, Atmosphère), rapports beaucoup plus détaillés et précis. Ces rapports sont joints en annexe de ce document introductif.

LES ENJEUX DE L'OBSERVATION DE LA TERRE DEPUIS L'ESPACE

Cycles biogéochimiques

Concernant le **cycle du carbone** et ses implications climatiques, nous avons insisté lors du Séminaire de Prospective Scientifique de Biarritz sur la nécessité à la fois de documenter les stocks de carbone, notamment ceux entachés d'une forte incertitude, et de progresser dans la quantification très précise des concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre.

Le projet *BIOMASS* (radar en bande P à synthèse d'ouverture) qui vise à déterminer la biomasse des forêts du globe à forte densité ainsi que les stocks de carbone à échelle fine (50-100 m) avait été retenu pour une phase 0 en 2006 puis pour une phase A en 2009 par l'ESA dans le cadre des propositions soumises dans le cadre de l'appel à proposition 7 du programme Earth Explorer. Le TOSCA a fortement accompagné l'équipe proposante tout au long des quatre dernières années, notamment en soutenant ses travaux sur la robustesse des algorithmes d'inversion de la biomasse, sur la mise en place d'un réseau international et d'une base mondiale de données d'estimation *in situ* de la biomasse forestière, et enfin sur le développement original d'un schéma d'intégration de données de biomasse aérienne dans le modèle dynamique de végétation ORCHIDEE. Un succès majeur de ces quatre dernières années a été de voir cette démarche récompensée au travers de la sélection officielle et définitive de *BIOMASS* par l'ESA le 6 mai 2013 en tant que mission du programme Earth Explorer 7.

Une autre approche mise en œuvre, concernant cette fois les sources et puits de gaz à effet de serre, repose sur la mesure très précise de leurs champs de concentrations, lesquels couplés à des modèles fonctionnant en mode inverse doivent permettre de localiser et quantifier ces sources et puits. Cependant, la mesure depuis l'espace des concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre à la précision requise reste un défi très difficile. Aussi, les recommandations soulignaient la nécessité de combiner plusieurs approches : (i) des observations depuis l'espace en tentant d'utiliser au mieux les méthodes de télédétection passive existantes (l'instrument IASI sur METOP pour le CH₄ et l'ozone troposphérique ou encore celles fournies par GOSAT/TANSO pour le CO₂) et d'initier des projets reposant sur des méthodes actives (projets Lidar pour le CO₂ ou le CH₄) ; (ii) l'acquisition de données et modèles spectroscopiques adaptés aux précisions recherchées ; (iii) le soutien au développement de réseaux de mesure *in situ*, complément indispensable des mesures satellitaires ; (iv) enfin, le développement d'outils et d'applications préparant l'exploitation optimale des mesures, notamment par des techniques de modélisation inverse.

L'ensemble de ces approches complémentaires ont été soutenues au travers des projets financés par le TOSCA au cours de la période 2009-2013. En ce qui concerne les nouvelles missions, on soulignera plus particulièrement le travail réalisé lors de la phase A du projet MICROCARB (mesure du CO₂ dans l'IR), qui doit servir de démonstrateur pour une constellation permettant le suivi sur le long terme des flux de CO₂ aux échelles régionales ($\approx 500 \text{ km}^2$). Pour le méthane, la mission franco-allemande MERLIN (mesure du CH₄ par Lidar) a pour objectif de fournir des données dont l'inversion conjointe avec celles des mesures des réseaux au sol permettrait de restituer les sources et les puits de cette espèce. La mission MERLIN a trouvé un contexte politique favorable puisqu'elle a notamment bénéficié, au travers de la plate-forme Myriades évolution, d'un financement du PIA qui va sans doute permettre de la réaliser dans un délai raisonnable. En accompagnement de cette mission, le TOSCA a soutenu des travaux visant à développer un simulateur des signaux lidar et à mettre au point un simulateur d'observations. Le TOSCA a été très attentif à ce que (et a essayé de faire en sorte que) le partage des rôles avec nos collègues allemands

soit aussi équilibré que possible, notamment en ce qui concerne les développements autour de la spatialisation de la technique Lidar.

Priorité affichée en 2009, le **cycle hydrologique** a également fait l'objet d'avancées significatives durant ces quatre années, et ce dans différents compartiments du Système Terre pour lesquelles les mesures depuis l'espace étaient très insuffisantes. Un des succès les plus marquants dans lequel la communauté française a été très impliquée a été la mission SMOS (radiomètre interférométrique en bande L), mission du Programme ESA Earth Explorer, avec la fourniture de cartes dynamiques de l'humidité du sol et la production de nombreux autres résultats géophysiques de premier plan. Les équipes françaises se sont notamment beaucoup investies dans l'évaluation et l'amélioration des algorithmes de niveau 2 et 3, contribuant ainsi fortement à la qualité des produits délivrés. Dans le même esprit, la mission franco-indienne MEGHA-Tropiques qui fournit des mesures simultanées de divers éléments du cycle de l'eau atmosphérique (vapeur d'eau, nuages, eau condensée, précipitations, évaporation) et du bilan radiatif en zone tropicale a été lancée avec succès et les données, malgré quelques problèmes initiaux, semblent maintenant de très bonne qualité. Au travers de ces missions, pour lesquelles elle a joué un rôle majeur, la communauté française a affirmé sa très grande compétence dans le domaine de la radiométrie micro-ondes.

Concernant la caractérisation des surfaces d'eau continentales et leurs variations relatives en hauteur, le TOSCA a fortement soutenu les activités autour de la mission SWOT (altimétrie interférométrique), aujourd'hui en phase A, qui devrait permettre de mesurer les hauteurs d'eau des fleuves et des étendues d'eau douce avec une résolution horizontale de l'ordre de 50 à 100 m.

Dans le domaine océanographique, la mission SMOS a également été fortement soutenue par le TOSCA. Elle permet en effet d'observer avec une résolution spatio-temporelle nouvelle les grands contrastes de salinité des eaux de surface océaniques, comme le panache dessalé de l'Amazonie, les variations de salinité associées aux passages de cyclones mais aussi des contrastes de plus grande échelle liés par exemple aux événements ENSO. On mentionnera également les efforts d'accompagnement faits par le TOSCA de la mission franco-chinoise CFOSAT dont les objectifs scientifiques prioritaires concernent l'étude des processus à la surface océanique et dans les couches limites atmosphériques et océaniques. La mission comporte également un objectif opérationnel sur l'utilisation des **observations de vent et de vagues** en temps quasi-réel pour la prévision des états de mer et la prévision atmosphérique (assimilation de données pour les modèles de prévision météorologique et des vagues). Le TOSCA a en particulier soutenu les travaux visant le développement d'algorithmes de traitement et les campagnes de validation aéroportées.

La mission SWARM constitue un des enjeux majeurs de la communauté des sciences de la Terre pour les prochaines années. Elle a en effet pour objectif la mesure du **champ magnétique** terrestre par une constellation de trois satellites identiques dont les orbites originales permettront de séparer les différentes contributions au champ géomagnétique (contributions produites par la dynamo du noyau, les courants induits dans la Terre, la lithosphère aimantée, les courants induits dans les masses d'eau océanique en mouvement, ainsi que les courants ionosphériques et magnétosphériques). La mission SWARM a été sélectionnée à l'ESA en 2004 comme la troisième « Mission d'opportunité » du programme Earth Explorer et a été être lancée fin novembre 2013. Le CNES et la communauté magnétique française participent très activement à ce projet, en fournissant les magnétomètres absolus et la validation scientifique des données acquises.

Les indicateurs de l'évolution de l'environnement

Il est souvent difficile de faire une ligne de partage nette entre les observations spatiales apportant des informations spécifiques pour des questionnements scientifiques ciblés de celles utilisées comme indicateurs de l'évolution du Système Terre sous l'effet des changements globaux. Souvent, les données acquises dans le cadre de la nécessaire continuité des observations, compte tenu de leur richesse et de l'amélioration de la qualité des produits au cours du temps, sont utilisées par la communauté de façon bien plus large que pour la seule mise en évidence d'évolutions temporelles. Par ailleurs, la demande sociétale, ainsi que des programmes comme GMES/Copernicus, génèrent une demande forte de données à vocation applicative voire « commercialisables ». Ceci implique une certaine garantie de service dans la durée, initiée par la série des missions SENTINEL. Le choix de présenter dans telle ou telle rubrique tel ou tel type d'observation peut donc parfois apparaître comme un peu arbitraire.

Une filière historique d'observations satellitaires de variables d'intérêt géophysique est bien sûr l'**altimétrie**. On dispose aujourd'hui de longues séries d'observations. Une des préoccupations majeures affichées par le TOSCA durant tout son mandat a été de s'assurer de la continuité de ces mesures altimétriques, la situation étant devenue très préoccupante suite aux arrêts d'ENVISAT et Jason 1. La réussite du lancement en février 2013 de la mission SARAL/ALTIKA a été une très bonne nouvelle ; elle devrait permettre d'assurer cette continuité jusqu'à l'arrivée de Jason3/Sentinel3. Par ailleurs, la mission SWOT devrait par sa très bonne résolution horizontale permettre d'étudier les variations de hauteur d'eau liées aux structures de méso et sub-méso échelles, et donc offrir un nouveau champ de recherche très prometteur pour l'océanographie autour des mesures altimétriques.

La mesure du **champ de gravité** relève du même besoin de continuité des mesures. Les missions CHAMP, GRACE et GOCE ont permis d'améliorer significativement les modèles de champ statique (géoïde, champ de gravité) en fournissant une information précise et homogène. La mission GRACE a fourni par exemple pendant plus de dix ans une information unique sur les variations temporelles de gravité à grande échelle associées à des redistributions de masse au voisinage ou à l'intérieur de la Terre. La continuité de ces mesures a été partiellement assurée par la mission GOCE, lancée en 2009 dans le cadre du Programme ESA Earth Explorer. Au-delà de la continuité des mesures, cette mission a permis d'obtenir pour la première fois, grâce à des mesures gradiométriques 3D, des observations directes des différentes composantes du champ de gravité. Si le TOSCA a naturellement soutenu plusieurs projets liés à l'exploitation des données GRACE et GOCE, il a aussi soutenu plusieurs actions visant à étudier et proposer les prochaines missions gravimétriques de façon à permettre une certaine régularité de ce type d'observation.

En ce qui concerne la **composition de l'atmosphère en gaz traces réactifs** et **la qualité de l'air** pour laquelle une forte demande existe au-delà de la communauté scientifique, les travaux soutenus par le TOSCA ont été concentrés sur la pollution troposphérique notamment au travers de l'exploitation des données de l'instrument IASI avec lesquelles les équipes françaises ont apporté des éléments très novateurs tant en termes de détection d'espèces qu'en termes de quantification des contenus troposphériques d'O₃ et de CO. La communauté autour de cette mission est aujourd'hui très bien structurée et a ainsi activement préparé les prochaines versions de l'instrument IASI (IASI-NG), notamment par le développement de simulateurs d'observations. Dans ce domaine, la continuité semble assurée pour les 15-20 prochaines années en ce qui concerne les mesures en

orbite basse. Ceci résulte en grande partie du fait que l'instrument IASI est un élément des satellites météorologiques de type METOP dont la vocation opérationnelle est établie.

Enfin, on notera que certaines missions très fortement mises en avant par la communauté scientifique en 2009 n'ont que peu avancé sur le plan programmatique. C'est notamment le cas de la mission MISTIGRI (estimation de la température de surface à une résolution spatiale de 50 m et une répétitivité temporelle journalière) et de la mission OCAPI (couleur de l'océan à partir de l'orbite géostationnaire). Néanmoins, des travaux ont été soutenus par le TOSCA pour permettre à ces missions d'atteindre des niveaux de maturité tels qu'elles puissent profiter de toute opportunité de collaborations internationales ou d'appels d'offres européens futurs avec les meilleures chances de succès. Il n'est guère étonnant que ces missions émergent à nouveau comme des missions prioritaires lors du présent séminaire de prospective scientifique.

ACTIVITES DE R&T

Le TOSCA avait fortement souligné lors du Séminaire de Prospective Scientifique de Biarritz, comme cela a déjà été rappelé, l'importance des travaux de R&T. Même si ceux-ci sont le plus souvent développés en dehors du cadre du TOSCA, ce dernier a un rôle très important dans le choix des actions à mener en priorité. Notamment, les réflexions conduites lors des séminaires de prospective fournissent des éléments d'orientation des travaux de R&T menés au CNES en liaison avec les laboratoires. Parmi les priorités soulignées en 2009 apparaissaient principalement des besoins en matière de fort taux de revisite et d'échelle régionale, et dans le domaine de la technologie lidar. En effet, beaucoup de propositions impliquaient le recours à des techniques de détection active comme le lidar ou s'intéressaient, notamment en lien avec des questionnements sociétaux, à des observables très évolutifs dans le temps (espèces chimiques réactives, couleur de la mer notamment en zones littorales ou encore variables liées à la gestion des risques de diverses natures). Sur le premier de ces points, un travail important a été conduit et on doit espérer que la mission MERLIN sera un levier permettant de transférer la forte compétence qui existe en France dans le domaine de la technique Lidar (sol ou aéroporté) vers le domaine spatial. Pour les forts taux de revisite, la solution a priori « évidente » mais très coûteuse de l'orbite géostationnaire a été confrontée à différents types d'orbites, associant parfois plusieurs satellites en orbite basse. Le travail a permis de mieux définir les stratégies à déployer pour répondre aux besoins exprimés par les scientifiques en données très régulièrement rafraîchies.

STRUCTURATION DE LA COMMUNAUTE

Le TOSCA s'est efforcé de structurer à la fois les communautés thématiques mais plus largement la communauté des chercheurs faisant appel à l'observation spatiale pour leurs travaux. En effet, les missions spatiales, de par leur dimension, sont naturellement des projets scientifiques qui imposent à la communauté scientifique de s'agréger et de s'organiser autour d'un programme de développement, validation et exploitation cohérent. Le TOSCA a fortement poussé, au cours des quatre années passées, à la structuration de propositions de recherches conjointes et organisées, avec des mises en priorité partagées, pour les principales missions en cours ou décidées (IASI, BIOMASS, SWOT, A-TRAIN...). Ces regroupements, parfois difficiles à réaliser, se sont néanmoins révélés positifs. Dans le même esprit, pendant ces quatre dernières années, un effort important de structuration a également été conduit autour de quelques concepts instrumentaux novateurs, dont l'application couvre plusieurs milieux : c'est notamment le cas des sujets mentionnés dans la partie R & T comme la technique Lidar, au travers de groupes de travail associant des spécialistes dans le domaine de l'atmosphère, des surfaces continentales et de la Terre solide.

Le TOSCA a organisé pour la première fois au printemps 2012 un colloque de restitution des travaux qu'il soutient. Ce séminaire, qui s'est déroulé sur deux jours dans les locaux de l'Université Paris-Diderot, avait pour premier objectif de présenter aux scientifiques et plus largement aux communautés intéressées les résultats scientifiques issus des projets financés dans le cadre du TOSCA entre 2007 et 2010. Ce colloque de restitution a également permis de faire un point, environ trois ans après le Séminaire de Prospective Scientifique de Biarritz, sur les résultats acquis et de préparer ainsi, sur des bases partagées, l'exercice de prospective de La Rochelle. Ce colloque a été un franc succès de par sa participation (près de 200 personnes, à « guichets fermés ») et de la satisfaction exprimée par la plupart des participants. Il semble clair que ce colloque de restitution répond à un besoin et a sa place dans une programmation précédant (et donc aidant à préparer) une prospective. Conçu pour croiser les milieux physiques (ce qui n'était pas sans risques), le programme a réellement permis des échanges scientifiques et surtout techniques entre communautés thématiques.

Enfin, le TOSCA avait fortement attiré l'attention du CNES sur l'intérêt de la mise en place rapide de pôles thématiques pour les domaines des Surfaces Continentales et de la Terre Solide, capables de jouer un rôle structurant pour les communautés concernées et facilitant pour les différents types d'utilisateurs l'accès à l'information spatiale. Pour les surfaces continentales, la convention de création du Pôle Thématique de données spatiales « Surfaces Continentales » (THEIA) a été ratifiée le 6 décembre 2012 par neuf organismes publics : CEA, CNES, CIRAD, CNRS, IGN, INRA, IRD, IRSTEA et Météo France. Pour la Terre Solide, un document de synthèse consécutif à plusieurs réunions de la communauté et au traitement d'un blog (<http://poleterresolide.free.fr/>, impliquant plus de quarante scientifiques) a été produit et a convergé sur la création d'un pôle Terre Solide, baptisé ForM@Ter. Deux groupes de travail ont été identifiés (Gravimétrie-Géodésie et Imagerie de surface) pour conduire la réflexion sur les besoins et états des lieux de ces différentes communautés scientifiques directement impliquées.

Plus largement, pour les applications scientifiques, il est de plus en plus fréquent que les données spatiales soient exploitées en synergie avec d'autres données spatiales ou des données *in situ*. Le TOSCA a ainsi maintenu son soutien aux systèmes d'observation *in situ* dont les données sont utilisées pour la calibration, la validation ou l'exploitation des données.

Ce sont notamment ces différents constats qui ont conduit le TOSCA à proposer au CNES d'engager un processus de réflexion sur l'évolution des pôles thématiques. Un groupe de travail sur ce thème a donc été commandité par le CNES et l'INSU. Animé par Alain Podaire, ce groupe dans lequel le TOSCA a joué un rôle actif a travaillé près de deux ans et auditionné les différents acteurs (producteurs de données, utilisateurs de diverses nature, donneurs d'ordre...). Le rapport du groupe, articulé autour de recommandations fortes sur les évolutions nécessaires, notamment pour favoriser l'intégration européenne de ces pôles, a été officiellement présenté aux tutelles le 16 octobre 2013.

Enfin, le TOSCA a également réalisé son propre bilan, notamment en ce qui concerne son mode de fonctionnement. Il a produit une note à ce sujet qui comporte une analyse de son organisation, de ses missions, de ses procédures et modes opératoires. Si dans l'ensemble le rôle joué par le TOSCA est considéré comme très positif pour les sciences spatiales, certains aspects de ses modes de fonctionnement demandent à évoluer. Des pistes sont envisagées pour cela dans cette note.