



Recommandations du Comité des sciences de l'environnement et du Comité de la recherche spatiale de l'Académie des sciences destinées au Séminaire de Prospective scientifique spatiale du CNES

Le Comité des sciences de l'environnement et le Comité de la recherche spatiale de l'Académie des sciences ont consacré deux séances à l'examen des résultats acquis par la communauté scientifique française dans le domaine de l'observation de la Terre, de l'environnement et du climat, grâce à l'utilisation des systèmes d'observation spatiaux (29 octobre 2013 et 14 janvier 2014). Ces auditions ont permis de faire ressortir des besoins nécessaires pour mieux répondre aux grandes questions scientifiques actuelles de cette discipline et maintenir la communauté scientifique française à son rang mondial au cours des prochaines années. Les comptes rendus de ces réunions sont consignés dans les annexes 1 et 2. L'annexe 3 décrit la situation des systèmes spatiaux à l'échelle internationale.

1 - Les grands acquis et le rôle du CNES

Comme pour toutes les sciences de l'univers, notre connaissance des enveloppes fluides de la Terre a connu des avancées majeures depuis quelques décennies grâce à l'observation depuis l'espace d'un grand nombre de paramètres environnementaux, sur de longues durées et avec une couverture globale. Parmi les résultats les plus remarquables, on peut citer :

- (1) la mesure d'un grand nombre de paramètres décrivant l'état physique et la composition chimique de l'atmosphère (bilan radiatif, profils verticaux de température et d'humidité ; propriétés de la couverture nuageuse en termes de phase, de taille de gouttelettes ou de contenu en eau ; teneur en gaz à effet de serre ou en gaz chimiquement actifs, etc.) permettant la prévision météorologique précise à court terme, l'étude du changement climatique, ainsi que des alertes en cas de pollutions ;
- (2) la mesure d'un grand nombre de paramètres océaniques (température et salinité de surface, concentration planctonique, état de la mer, courants, niveau de la mer, etc.) permettant de mieux comprendre la dynamique océanique et le rôle de l'océan dans le climat ;
- (3) le suivi de nombreux paramètres hydrologiques (précipitations, humidité des sols, niveaux d'eau de surface, stock total d'eau, etc.) en lien avec le cycle global de l'eau et les ressources en eau, l'observation de la banquise et des glaces continentales, et de leur rôle dans l'évolution du climat ;
- (4) l'observation des surfaces continentales (occupation des sols, évolution de la végétation, feux, etc.) et de leur impact dans les changements planétaires globaux.

La communauté scientifique française, énergiquement stimulée et soutenue par le CNES, a tenu et tient une place éminente dans ce mouvement général. Les séminaires de prospective quadriennaux du CNES ont constitué un rouage décisif dans le processus qui mène de l'idée à sa réalisation, à l'exemple de Topex-Poséidon au séminaire des Arcs en 1980 ou de la plateforme Protéus à Dinard en 1998.

2 - Les grands défis scientifiques actuels

Pour mieux comprendre les changements globaux affectant la planète, et en tout premier lieu le changement climatique, discerner les effets respectifs de la variabilité naturelle du système et des forçages anthropiques ou encore caractériser les impacts régionaux et locaux de ces changements, il est impératif d'assurer l'observation sur le long terme d'un grand nombre de variables environnementales, avec des performances toujours améliorées. De telles observations permettent non seulement de suivre l'évolution du système mais aussi de valider les modèles climatiques développés pour les projections.

Dans une mise à jour récente (*Systematic observation requirements for satellite-based data products for climate, 2011*), le GCOS (Global Climate Observing System) a récemment fourni une liste de variables climatiques essentielles (ECV, Essential Climatic Variables) dont le suivi depuis l'espace est hautement recommandé afin de répondre aux grands défis scientifiques identifiés par le WCRP (World Climate Research Programme) et l'UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate change) dans le domaine du climat. Cette liste comprend une trentaine de variables relatives à l'atmosphère, à l'océan et aux surfaces continentales (sur un total de 50), ainsi que les systèmes spatiaux associés.

De son côté, le WCRP a redéfini récemment (document WCRP 2013) les grandes priorités scientifiques de la recherche sur le climat à mener dans les années qui viennent, afin de répondre aux attentes de la société et des décideurs politiques en charge des questions d'adaptation aux changements globaux. Ces priorités de recherche nécessitent de progresser tant au plan des observations que de la modélisation, et de leur synergie. Elles s'organisent autour de 6 grands défis (Grand Challenges), qui, en addition du suivi à long terme des variables essentielles, relèvent d'études ciblées vers des processus qui constituent des verrous de la connaissance :

- le rôle des nuages et des aérosols dans le système climatique ;
- le cycle global de l'eau et les ressources en eau ;
- le rôle de la cryosphère dans le climat ;
- les variations régionales du climat ;
- les événements extrêmes ;
- la circulation océanique, les variations régionales de la mer et les impacts côtiers.

Les défis du WCRP recoupent en partie ceux du *Living Planet Programme* de l'ESA, remis à jour en 2013, avec cependant une focalisation plus marquée dans le programme de l'ESA pour les cycles biogéochimiques des surfaces continentales et de l'océan, le cycle du carbone anthropique et les processus côtiers.

Chacun de ces grands défis identifie de nombreuses questions scientifiques à résoudre pour lesquelles l'observation précise de certains paramètres clés, sur le long-terme ou pendant des périodes ciblées d'observation intensive, apparaît incontournable.

La communauté scientifique française contribue de façon majeure à chacun des domaines ci-dessus, grâce notamment à son implication dans un large ensemble de missions spatiales, en cours ou décidées, nationales ou en collaboration avec l'ESA et d'autres agences (ex., ADM-Aeolus, Biomass, Cryosat, EarthCARE, Jason, Megathropiques, MetOp, SARAL/AltiKa, Sentinels, SMOS, SWOT, etc.). Elle doit aussi jouer un rôle important dans l'identification de nouveaux systèmes d'observations destinés à combler certaines lacunes scientifiques (par exemple, une meilleure compréhension de la microphysique des nuages et des interactions aérosols/nuages, la mesure fine de la température de la stratosphère, le suivi des redistributions de masse dans les enveloppes fluides de la Terre par gravimétrie spatiale nouvelle génération, la mesure absolue du bilan énergétique net au sommet de l'atmosphère et

le suivi à long terme de l'irradiance solaire, la mesure des variations spatiotemporelles des émissions de GES ainsi que des sources et puits de CO₂, etc.).

3. Quelles pistes pour assurer continuité des observations, le développement de nouveaux systèmes et le maintien de la communauté scientifique française au premier plan de la compétition internationale ?

3.1 La question des moyens

Dans les dernières années, la communauté scientifique française en général a souffert d'une baisse des soutiens en moyens financiers, matériels et humains nécessaires à son action. Cette tendance s'est accompagnée d'une réduction significative des moyens accordés au développement de l'instrumentation scientifique spatiale (voir ci-dessous). Le relais de ces soutiens nationaux (CNES, CNRS, ANR, etc.) par des sources européennes (ESA, Commission européenne) n'a pas été à la hauteur des espoirs.

Cette déconvenue a été aggravée par la réduction drastique de la contribution française aux programmes d'observation de la Terre de l'ESA, réduite de façon significative pour le segment spatial (programme scientifique *Earth Explorer*) et en dessous du minimum vital pour le segment exploitation scientifique, notamment l'Initiative Changement Climatique (CCI) pour lequel le retour français (de l'ordre de 4 à 5 %) condamne nos laboratoires à l'exclusion de ce programme d'une importance fondamentale.

Recommandation : augmenter le soutien du CNES aux programmes d'observation de la Terre de l'ESA et au CCI ; poursuivre les pistes de collaboration bilatérale pour des missions innovantes.

3.2 - R&D instrumentale

La Recherche et Développement instrumentale nécessaire aux programmes spatiaux résulte d'un partenariat entre laboratoires de recherche, agences spatiales et entreprises privées. Elle réclame une continuité et une préservation des grandes filières de compétences mais elle se développe actuellement dans un contexte de faiblesse structurelle de plusieurs laboratoires spatiaux dans le domaine de l'Observation de la Terre : par exemple la quasi-disparition de la radiométrie infrarouge au LMD, une situation critique de renouvellement des compétences au LATMOS, un sous-effectif persistant dans le domaine des lidars. Or ces compétences sont nécessaires pour préparer la conception d'instruments et l'analyse de leurs résultats, même si le développement est désormais très souvent effectué en milieu industriel.

Plus généralement, il faut souligner que les laboratoires ont besoin de moyens leur permettant d'aller de la conception à l'analyse d'ensembles de mission, moyens que leurs tutelles ne sont plus toujours en mesure de fournir.

Recommandation : un état des lieux concerté entre CNRS/INSU et CNES est nécessaire pour dégager une stratégie à moyen terme de soutien aux filières en difficulté et qui sont jugées stratégiques par rapport aux enjeux scientifiques prioritaires définis plus haut.

3.3 - Micro et nanosystèmes pour des flottilles

L'étude, à partir de l'espace, des phénomènes climatiques et de leur forçage requiert la continuité des observations à l'échelle de plusieurs décennies. La communauté scientifique voit dans l'emploi de flottilles de nanosatellites lançables en « piggyback » le moyen de remplir de nouvelles missions accomplissant cette tâche. Par exemple, le programme en coopération NOAA – TAIWAN, utilise l'occultation des signaux GPS pour une mesure des

paramètres météorologiques principaux qui est en train de devenir opérationnelle. Un autre exemple est la surveillance des flux solaire et terrestre discutée dans la communauté scientifique américaine.

Recommandation : que le CNES poursuive son analyse de ces idées, en formant un groupe mixte composé de membres de la communauté scientifique et de spécialistes de technologie spatiale.

3.4 - L'avenir des filières

Une originalité remarquable du programme spatial national (de fait, généralement bilatéral) en sciences et observation de la Terre a été sa structuration en filières, une démarche dépassant la seule conception du système spatial proprement dit pour aller jusqu'à l'exploitation des observations, en passant par la mise en place de laboratoires scientifiques mixtes (tels que le LEGOS ou le CESBIO), le soutien en moyens humains (bourses, CDD), la constitution de pôles thématiques (tels que AVISO, ETHER, ICARE, etc.) et la modélisation (telle que MERCATOR Océan).

Plusieurs filières sont en bonne voie (altimétrie avec Jason-C et SWOT). L'altimétrie en bande Ka, inaugurée par SARAL/Altika, doit être envisagée. L'avenir de la filière IASI semble aussi assuré dans le cadre EUMETSAT, mais l'amélioration des performances de ce remarquable instrument doit rester une priorité. Il en va de même de la filière aérosols-nuages-rayonnement (POLDER, ScaRaB) qui pourrait être poursuivie par 3MI et de Végétation, désormais prolongé par Proba-V et bientôt Sentinelle-2. Il revient au CNES et à ses partenaires de concevoir les instruments futurs permettant à la fois la continuité de l'acquisition des observations et l'amélioration de leur qualité.

La connaissance et la surveillance de la structure, de la composition et de la dynamique de l'atmosphère offrent de multiples défis que le CNES et les scientifiques français doivent être en situation de relever. La communauté française a fait une priorité forte de certaines de ces études, qu'il s'agisse par exemple de mesure des gaz à effet de serre, de surveillance du cycle de l'eau ou de la pollution, d'étude des processus nuageux, et la recherche instrumentale dans nos laboratoires reste une référence au niveau international. Nos industries, y compris des « start-up » comme Leosphère, ont su développer une activité de haut niveau.

Recommandation : que chacune des initiatives lancées par le passé et celles à venir soient soutenues jusqu'à ce que leur avenir soit assuré par des entités pérennes au titre de leur mission.

3.5 - Le couplage données – modélisation

L'utilisation des données spatiales s'effectue désormais de manière très étroite en interaction avec la modélisation : (1) pour tout ce qui est prévision météorologique et océanique (au niveau des méthodes d'assimilation par exemple), (2) pour les études climatiques. Dans ce dernier cas il s'agit à la fois de favoriser l'analyse des séries longues de variables essentielles (réanalyses, études de détection et attribution du changement climatique, compréhension des mécanismes de variabilité naturelle), et des études ciblées de processus jouant un rôle clef dans l'évolution climatique. L'ensemble de ce travail se situe de plus aujourd'hui dans un cadre interdisciplinaire, renforcé par l'émergence de programmes comme « Future Earth » : les interactions entre processus dynamiques, physiques, chimiques, biogéochimiques sont au cœur des nouveaux enjeux scientifiques. La valorisation de l'information spatiale dans ces domaines se décline au niveau international, et s'articule aussi avec le projet *Copernicus* et la

demande Services Climatiques. Cette valorisation doit être confortée au niveau national, et le CNES doit jouer un rôle fort pour accompagner cette évolution, en particulier au niveau des outils d'accès aux données dans un cadre « multi-mission », et des méthodes d'analyse.

Recommandation : conforter la synergie observation-modélisation, les efforts d'analyse « multi-paramètres », soutenir les réanalyses de séries climatiques (ex. par le CCI/ESA) et la production de produits climatiques validés (observations et sorties de modèles) destinés à alimenter les futurs services climatiques.

4 - Coordination Internationale des systèmes d'observation

Les moyens limités que chaque nation peut consacrer à l'observation de la planète ne peuvent être pleinement valorisés que dans le cadre d'une coordination internationale.

Les mécanismes de base de cette coordination existent en principe, avec des entités comme le CGMS, le GCOS, le CEOS, le GEO. Cependant, ces divers niveaux de coordination sont très hétéroclites, allant du « club d'agences » (le CEOS) à l'accord intergouvernemental (le GEO). Et la caractéristique commune à tous ces assemblages est l'absence de dispositions contraignantes (le consensus est la règle) et d'échanges de fonds. En conséquence, la continuité et l'amélioration des systèmes d'observation spatiaux ne reposent que sur la bonne volonté des partenaires. Bien que l'OMM (WMO), le CEOS et le CGMS se soient accordés pour tenter de mettre en place une « architecture pour la surveillance du climat à partir de l'espace », de nombreux efforts et de très nombreuses années seront encore nécessaires avant que cette architecture déjà approuvée sur le plan « logique » le devienne sur le plan « pratique ».

Au-delà de ces considérations générales, il faut aussi :

- soutenir la participation active de la communauté française à l'utilisation des données spatiales, en aidant le développement des projets qui constituent des contributions aux objectifs du WCRP et de GCOS ;
- soutenir la participation active de la communauté française à la planification à long terme de l'ESA et autres agences, notamment par une réflexion approfondie et la proposition d'initiatives sur la suite des programmes Jason, IASI, Sentinelles... au-delà de 2030.

Par ailleurs, dans le contexte de la Conférence des Nations unies sur le Changement Climatique prévue à Paris en 2015, il pourrait être envisagé de mettre en place une année internationale dédiée à la recherche sur les changements globaux, à l'image de l'Année Géophysique Internationale (1957) ou plus récemment de l'Année Polaire Internationale (2007). Celle-ci devrait avoir lieu en 2017, 10 ans après l'Année Polaire Internationale et être centrée sur le thème rassembleur du programme « Future Earth ». Au moment où un effort financier important sera envisagé par de nombreux pays pour l'adaptation au changement climatique, il apparaît indispensable que le soutien à la science, à ses méthodes et à sa communauté organisée se concrétise par un geste fort de la France, apportant des moyens en crédits, matériels et personnels et renversant la tendance à l'essoufflement qui frappe nombre de programmes avec la baisse mondiale des budgets spatiaux.

Recommandation : intensifier et valoriser la participation de la communauté scientifique française dans les mécanismes internationaux existants ; soutenir une initiative française de haut niveau dans la mise en place d'une année internationale dédiée à la recherche sur les changements globaux.

Annexe 1

Conclusions de la réunion commune du Comité des sciences de l'environnement et du Comité de la recherche spatiale

29 octobre 2013

Étaient présents : Jean-Claude Duplessy, Édouard Bard, Jacques Blamont, Marie-Lise Chanin, Henri Décamps, Jean Dercourt, Pierre Fayet, Patrick Lavelle, Yvon Le Maho, Henri Leridon, Jean-Loup Puget.

Jean-Yves Chapron, Joëlle Fanon, Nathalie Zajdman.

Invités : Nicolas Viltard (LATMOS), Hélène Chepfer (LMD) Simon Munier (LEGOS) et Nicole Papineau (CNES).

Étaient excusés : Bernard Meunier, Jean-Claude André, Alain Benoit, Alain Berthoz, René Blanchet, Christian Bordé, Sébastien Candel, Anny Cazenave, Catherine Césarsky, Michel Combarrous, Françoise Combes, Christian Dumas, Uriel Frisch, François Gros, Patrick Huerre, Henri Korn, Jean Kovalevsky, Michel Le Moal, Ghislain de Marsily, Dominique Meyer, Georges Pédro, Daniel Rouan.

Lors de la réunion commune du 29 octobre 2013 dédiée à l'apport des moyens spatiaux à la compréhension du cycle de l'eau, le Comité des sciences de l'environnement et le Comité de la recherche spatiale ont auditionné :

- Hervé Le Treut (LMD) :

Nuages et cycle de l'eau au cœur des incertitudes météorologiques et climatiques ;

- Nicolas Viltard (LATMOS) :

La mission Mégha-tropiques : bilan d'eau et d'énergie dans les tropiques

- Hélène Chepfer (LMD) :

Apport des approches multisatellites pour l'étude des processus hydrologiques dans l'atmosphère ;

- Simon Munier (LEGOS) :

Le cycle de l'eau sur les surfaces continentales.

Le cycle de l'eau contrôle l'une des ressources indispensables au développement de la vie sur Terre. C'est aussi une composante active du système climatique, parce qu'il joue un rôle essentiel sur le bilan énergétique de l'atmosphère et de la surface de notre planète. Le développement des prévisions météorologiques à court terme (quelques jours) a conduit au déploiement de systèmes d'observations satellitaires (à partir de satellites de recherche ou de satellites opérationnels). Ces systèmes d'observations sont aussi pertinents pour l'analyse à plus long terme du cycle de l'eau, car ils fournissent de longues séries de données qui peuvent être assimilées en continu ; c'est ainsi

que les données obtenues par l'interféromètre IASI embarqué sur METOP ont été à l'origine de progrès majeurs pour la prévision météorologique, la recherche en chimie de l'atmosphère et la recherche climatique.

Néanmoins le rôle des nuages sur le changement climatique à long terme reste une source considérable d'incertitudes. Les modèles simulent maintenant raisonnablement bien la distribution des nuages aux grandes échelles qui sont pilotées par la circulation générale de l'atmosphère, mais ils présentent une grande variabilité de réponses aux échelles régionales, preuve que les processus de « petite échelle » (de la microphysique à la convection) qui gouvernent les différents types de nuages sont insuffisamment compris, en grande partie parce que la structure tri-dimensionnelle n'est accessible que depuis peu d'années à des mesures globales, et donc satellitaires. Même lorsque la couverture nuageuse est correctement représentée, les précipitations associées ne sont pas estimées avec une précision suffisante pour les besoins d'une modélisation hydrologique opérationnelle, en raison en particulier de la mauvaise estimation des événements extrêmes. Le besoin d'observations spatiales est là aussi essentiel : dans un contexte de réduction des observations au sol des stocks et niveaux d'eau en milieu continental, ce sont bien les observations satellitaires (altimétrie, imagerie optique ou micro-onde, gravimétrie spatiale) qui permettent les prévisions des crues à 5 jours.

Si l'on fait le bilan des dernières décennies, les observations spatiales, couplées à un effort de modélisation mené activement dans les laboratoires universitaires et les centres météorologiques ont donc été à l'origine de progrès majeurs tant pour la prévision météorologique que pour la compréhension de la réponse du système climatique aux perturbations anthropiques. Elles n'ont par contre pas été en mesure d'empêcher que les nuages et le cycle de l'eau continuent de représenter une source d'incertitudes majeures à lever, si l'on veut mieux prévoir à la fois l'amplitude des changements climatiques à venir, et leur déclinaison régionale.

Les progrès ne peuvent venir que d'une meilleure compréhension des processus physiques et microphysiques qui gouvernent le cycle de l'eau et la formation des nuages.

Les progrès instrumentaux de la dernière décennie montrent que les observations spatiales nouvelles, validées par des mesures au sol, sont en situation d'apporter une contribution décisive à l'effort de recherche scientifique à mener, en raison de leur grande couverture géographique, de leur répétitivité, de la variété des paramètres mesurés, du développement de méthodes multiples assurant l'interface entre modèles et données. Mais ceci passe par le développement d'une stratégie globale qui dépasse l'analyse de chaque mission prise isolément.

Le Comité des sciences de l'environnement recommande que le CNES soit, pour la communauté nationale, un acteur actif contribuant à développer une stratégie scientifique qui utilise pleinement les observations des diverses missions spatiales (en cours ou programmées), pour élaborer des programmes innovants, bénéficiant de la synergie des observations fournies par les différentes constellations de satellites. Cette stratégie, associant étroitement modèles et données, devra mettre en œuvre toutes les approches complémentaires nécessaires pour aborder la complexité des processus hydrologiques et nuageux. Ceci se fera en coordination étroite avec l'INSU. Elle valorisera alors pleinement l'effort spatial national.

Le Comité de la recherche spatiale dans son rapport de 2010 avait recommandé de former des équipes intégrées laboratoires, CST-CNES que ce soit pour le management ou le suivi système, liaison étroite avec les équipes industrielles impliquées. Il avait recommandé de veiller à l'équilibre entre les grands projets à long temps de développement et contraintes fortes de fiabilité des technologie mises en jeu, et les projets petits et moyens plus innovant, donnant des résultats plus rapides et testant les nouvelles technologies préparant les grands projets et formant les jeunes générations de chercheurs et ingénieurs.

En outre il est recommandé que dans la prospective spatiale et INSU on discute en parallèle des projets issus de la communauté et d'une stratégie globale pour l'observation de la Terre et de l'environnement comprenant une stratégie scientifique à long terme dans laquelle les questions critiques soulevées par les exposés scientifiques devront être intégrées, la prise en compte des informations venant des missions opérationnelles, et l'évolution du contexte international. Ce dernier comprend l'ESA, les collaborations avec les États-Unis, le Japon, les nouveaux acteurs (Chine, Inde, Brésil et pays émergents dans le spatial) ou ré-émergent comme la Russie et constitue un paysage complexe et mouvant. Cette réflexion qui devra être régulièrement révisée sera un outil précieux pour les laboratoires, le CNES et les instances gouvernementales pour préparer d'éventuelles collaborations et éviter celles qui émergent au gré des rencontres entre dirigeants gouvernementaux sans s'inscrire dans un plan cohérent.

Annexe 2

Conclusions de la réunion commune du Comité des sciences de l'environnement et du Comité de la recherche spatiale de l'Académie des sciences

14 janvier 2014

Lors de sa réunion du 14 Janvier 2014 dédiée à l'apport des moyens spatiaux à l'observation de la surface de la Terre, le Comité des sciences de l'environnement et le Comité de la recherche spatiale de l'Académie des sciences ont auditionné :

- Yann Kerr (CESBIO) – Apport du spatial pour l'étude et le suivi des surfaces continentales : quelques exemples
- Juliette Lambin (CNES) - L'apport des satellites à l'océanographie
- Cathy Clerboux (LATMOS) - Sondage de l'atmosphère par satellite : ce qu'on voit (et ce qu'on ne voit pas)
- Jean-Louis Fellous (COSPAR) et Anny Cazenave - Assurer la continuité des observations de la Terre
- Jean-Loup Puget - Rôle des comités de l'EASAC

La télédétection spatiale permet l'observation de la Terre à une échelle globale. Elle s'est développée progressivement au cours des quarante dernières années en bénéficiant de nombreuses coopérations internationales et de la synergie entre les équipes scientifiques et les laboratoires industriels.

À la surface des continents, l'hydrologie constitue une variable clé de l'environnement. L'observation spatiale produite par différents types de capteurs (altimétrie radar et laser, gravimétrie spatiale, micro-ondes, etc.) permet d'évaluer l'extension des eaux superficielles et des marécages, les niveaux des lacs, l'humidité des sols et sa variabilité, l'évapotranspiration du couvert végétal, ainsi que les variations du stock d'eau total dans les sols. En combinant des différentes observations, on peut déduire l'évolution temporelle des eaux souterraines, quantité autrement inaccessible globalement. L'observation spatiale permet aussi de suivre l'évolution des glaciers de montagne et, dans les hautes latitudes, le bilan de masse des calottes glaciaires. Toutes ces informations constituent un apport majeur aux programmes de recherche sur le cycle de l'eau et le climat, et contribuent également à une gestion raisonnée des ressources en eau nécessaire pour les cultures, notamment dans les pays en voie de développement. Les observations acquises sur le long terme sont un élément essentiel pour évaluer l'impact d'une politique agricole et des choix de cultures.

L'observation spatiale a aussi entraîné une véritable révolution de l'océanographie, en permettant la mesure de plusieurs paramètres physiques de l'océan avec une couverture globale et un temps de revisite de quelques jours, complétant ainsi les mesures effectuées pendant des campagnes océanographiques ou à bord des navires de commerce. Les océanographes disposent ainsi d'un suivi continu et global de la température et de la salinité des eaux de surface, de la topographie de la surface de la mer – permettant d'en déduire les courants-, des vents, de l'état de la mer, de l'extension et de l'épaisseur de la glace de mer. Les satellites permettent également de recevoir les données enregistrées par divers flotteurs, en particulier les flotteurs Argo, voire par des animaux marins équipés de balises Argos. Les

données physiques sont assimilées dans des modèles de circulation générale océanique (par exemple, Mercator), ce qui permet de reconstituer l'état de l'océan et de prévoir son évolution à l'échelle de une à deux semaines. L'observation de la couleur de la mer depuis l'espace a par ailleurs ouvert la voie à la mesure de la concentration en chlorophylle et des floraisons planctoniques. Enfin l'altimétrie spatiale a aussi permis le suivi de l'évolution du niveau global de la mer, avec une précision inégalée. Il s'agit d'une information capitale, permettant de suivre le comportement de toutes les composantes du système climatique dans le contexte des changements en cours.

Les satellites sont maintenant susceptibles d'embarquer une grande variété d'instruments pour caractériser l'état physique et la composition chimique de l'atmosphère. Cette variété permet d'acquérir des profils de température et d'humidité, l'extension des nuages, le bilan radiatif au sommet de l'atmosphère, des profils intégrés de gaz à effet de serre ou chimiquement actifs comme CH₄, O₃, N₂O, CO, SO₂ et l'extension des aérosols naturels (poussières désertiques, cendres volcaniques) ou d'origine anthropique (feux de brousse, aérosols industriels). Pour ces mesures, la validation par des mesures effectuées depuis le sol reste un élément de validation indispensable. La série de satellites METOP, placés en orbite polaire et qui embarquent une dizaine d'instruments dont l'interféromètre IASI, contribuent avec succès au suivi de l'évolution du climat et à l'obtention des données nécessaires à la prévision météorologique. À partir de 2020 3 satellites de nouvelles générations devraient succéder au programme METOP pour garantir la continuité des données sur une période d'au moins 15 ans. Des satellites chinois pourraient également contribuer à l'acquisition de données supplémentaires.

L'observation des enveloppes superficielles de notre planète a été une source de progrès pour la recherche en météorologie, océanographie, hydrologie et climatologie, parce qu'elle a permis d'obtenir de longues séries d'observations d'un grand nombre de variables clés, et conjointement avec la modélisation de mieux comprendre les processus bio-physico-chimiques en jeu dans les évolutions observées. Ces observations ont aussi prouvé leur intérêt pour des applications opérationnelles ; par exemple :

- évaluer les pratiques agricoles ;
- choisir les meilleures routes pour les navires de commerce en fonction de l'état de la mer et de l'extension de la glace de mer ;
- fournir les données qui seront assimilées pour permettre au modèle d'océan de décrire l'état de l'océan, en surface comme en profondeur, et prévoir son évolution au cours des prochaines semaines ;
- évaluer l'indisponibilité de l'espace aérien en raison de la présence de concentrations atmosphériques élevées en cendres volcaniques ;
- fournir en temps réel les données nécessaires aux prévisions météorologiques journalières.

Le Comité des sciences de l'environnement recommande au CNES de jouer un rôle actif pour assurer le développement de nouvelles missions adaptées aux grandes questions scientifiques actuelles dans le domaine de l'environnement et de contribuer avec d'autres acteurs au suivi à long terme des changements globaux affectant la planète – qu'ils soient d'origine naturelle ou liés aux activités humaines –, ainsi qu'au transfert des activités d'observation de la Terre vers l'opérationnel, comme cela a été réussi pour la météorologie. Le succès d'un tel transfert nécessite d'une part d'assurer la continuité des observations avec une couverture globale, sans perte de qualité des mesures et d'autre part d'assimiler les données satellitaires et des mesures in-situ dans un modèle performant.

Le Comité des sciences de l'environnement recommande aussi de poursuivre l'effort d'innovation dans l'observation de la planète. Par exemple, dans l'atmosphère, améliorer le traitement des nuages et la précision des mesures de plusieurs paramètres-clés de l'environnement (CO₂, CH₄) ; accroître la fréquence des mesures et leur résolution verticale ; dans l'océan ouvert, amplifier les observations aux échelles fines pour décrire la dynamique de l'océan et les interactions air-mer ; se rapprocher des côtes pour mieux observer les interactions entre l'océan et les systèmes côtiers, et les impacts du changement climatique dans ces régions, enfin, d'analyser les interactions biogéochimiques entre le continent et l'océan.

Un bilan au plan international montre qu'il y a dans plusieurs domaines pléthore de satellites ou d'instruments, de qualité très inégale, lancés souvent pour des raisons de prestige et sans concertation internationale. **Il est donc nécessaire de renforcer la coordination internationale** pour réaliser une planification coordonnée des missions, ce qui permettrait d'assurer une meilleure utilisation des fonds disponibles. Le CGMS (Groupe de coordination des satellites météorologiques) assure avec succès la complémentarité des systèmes météorologiques. Le CEOS (Comité des satellites d'observation de la Terre) coordonne les activités d'observation de la Terre (hors météorologie) des agences spatiales de 25 pays. Le concept de « Constellations virtuelles », proposé par la France, que le CEOS promeut est porteur d'une convergence souhaitable des systèmes nationaux. Pour tous les systèmes, spatiaux ou non, le GCOS (Système mondial d'observation du climat) assure l'adéquation des systèmes en place, le recueil des besoins d'amélioration et la proposition d'un plan de mise en œuvre soumis aux états signataires de la Convention climat. Ses recommandations reçoivent l'appui du programme mondial de recherche climatique (WCRP), ce qui constitue un gage de qualité scientifique. L'EASAC est supposée jouer un rôle de coordination des travaux des académies en Europe ; elle constitue un outil pour générer des recommandations.

Le comité des sciences de l'environnement recommande que **l'engagement français dans les contextes du GEO/GEOSS, du CEOS et d'EUMETSAT soit poursuivi et renforcé**, et que la contribution française aux programmes phares de l'ESA en observation de la Terre retrouve les niveaux des années 1980-90.

Le comité des sciences de l'environnement décide de mettre en place un groupe de travail pour alimenter la prospective du CNES et écrire des recommandations à l'intention des décideurs. Ce groupe de travail est constitué de JC. André, J. Blamont, R. Blanchet, A. Cazenave, ML. Chanin, JC. Duplessy, G. de Marsily, JL. Puget. R.M. Bonnet et J. Lambin sont invités à participer à ces réflexions. Les contributions seront centralisées par JC. Duplessy. Elles devront parvenir pour le 10 février afin de préparer un premier brouillon qui sera distribué au groupe de travail le 15 février et discuté lors d'une réunion du groupe de travail dans une salle de l'Académie le **mercredi 26 février matin à 9H30**.

Annexe 3

Situation des systèmes spatiaux à l'échelle internationale

Panorama présenté par Jean-Louis Fellous

(réunion du 14 janvier 2014)

1. Introduction

La situation des systèmes spatiaux d'observation de la Terre offre une image très contrastée :

- Pléthore de satellites ou d'instruments dans certains cas (imagerie des surfaces continentales) – mais de qualité très variable et dont l'accès est parfois restreint ;
- Confiance raisonnable dans la continuité et le recouvrement des observations dans d'autres cas (topographie océanique, température de surface de la mer, vent de surface océanique) ;
- Disponibilité très limitée (chimie atmosphérique, salinité superficielle, humidité des sols, profil de vent dans la profondeur de l'atmosphère) ;
- Absence totale pour certaines variables (champ et gradient de gravité).

Le déséquilibre ainsi observé reflète à la fois le caractère opérationnel (limité à ce jour aux systèmes d'observation météorologique et à certains systèmes d'observation optique ou radar à caractère commercial des terres émergées) ou expérimental (c'est-à-dire financé sur des budgets non pérennes de R&D et soumis à des systèmes de sélection compétitive pour le renouvellement éventuel) et l'engouement des petits états pour la possession de « leur satellite », à la fois pour des raisons de fierté nationale et éventuellement de sécurité de l'accès aux images.

L'expérience montre toutefois que ce type de mini-satellites (dont la vente fait le bonheur des industriels spatiaux des pays du Nord – dont les groupes franco-européens Astrium ou Thalès-Alenia-Space) ne permet de satisfaire les besoins nationaux des diverses catégories d'utilisateurs que de manière très marginale, et ne contribue en rien à compléter le système d'observation global.

2. Observation opérationnelle et expérimentale

Avant d'être opérationnels, les instruments ou systèmes d'observation sont expérimentés à petite échelle. Le passage au statut opérationnel suppose en général le transfert de la responsabilité (et notamment du financement) de l'institution de recherche vers une entité dont la mission comporte l'acquisition de données de manière continue. D'autre part, le nombre croissant d'instruments à vocation opérationnelle se heurte à la constance, sinon la décroissance des budgets nationaux alloués aux systèmes d'observation, et plus généralement aux budgets de R&D, ce qui aboutit à mettre en concurrence la recherche et l'opérationnel.

De surcroît, l'obsolescence rapide et le progrès parallèle des technologies (qui doit être vivement soutenu) conduisent à substituer de nouveaux instruments aux anciens, au détriment de la stricte continuité, ce qui soulève de nombreux problèmes d'inter-étalonnage et impose si possible le recouvrement des séries de données pour distinguer les dérives instrumentales des tendances climatiques. De fait, le développement technologique doit davantage être situé du côté de la solution, en permettant de substituer des instruments plus performants, plus compacts, de plus longue durée de vie, et partant moins coûteux aux générations précédentes.

Le débat continuité-innovation et la question du transfert de l'expérimental vers l'opérationnel n'a pas jusqu'à présent trouvé de réponse satisfaisante.

Les agences spatiales de R&D, telles que le CNES ou l'ESA, s'efforcent de trouver « un reprenneur » pour les missions expérimentales qu'elles ont développées, mais cette démarche – qui s'apparente selon l'Académie des Sciences américaine à la traversée de la Vallée de la Mort – n'est pas toujours couronnée de succès. On pense notamment aux observations de l'atmosphère au limbe, pour lesquelles aucune perspective ne semble se concrétiser après la perte de l'instrument SCIAMACHY passager du satellite Envisat (dont le fonctionnement s'est interrompu brutalement en avril 2012) ou

aux mesures de température et d'humidité par radio-occultation GPS, dont la densité risque d'être dégradée sévèrement après la fin de la mission COSMIC (USA-Taiwan).

Les trois cas connus de transition réussie (altimétrie de précision, sondage atmosphérique infrarouge et diffusiométrie radar) ont suivi des chemins différents. Par ailleurs, la gestion et l'archivage des données opérationnelles se traduisent par une croissance exponentielle des budgets dévolus à ces activités indispensables, au détriment des budgets consacrés aux missions nouvelles.

Dans ce panorama, on peut toutefois se féliciter du rôle de l'Union Européenne qui ambitionne d'apporter, avec le programme Copernicus, une réponse efficace sur un nombre limité, mais déjà très honorable, d'observables : imagerie radar (Sentinelle 1), imagerie optique à moyenne résolution (Sentinelle 2), observation océanique (Sentinelle 3 : température, couleur, altimétrie), surveillance de l'atmosphère (constituants minoritaires, qualité de l'air (Sentinelles 4 et 5), altimétrie de référence (Jason-CS/Sentinelle 6). Cet effort est remarquable à différents égards :

- Prise en main par une entité supranationale (la Commission) de la problématique de transition vers l'opérationnel ;
- Contribution de l'Europe au GEOSS ;
- Programme de qualité, allant au-delà d'un besoin opérationnel au sens strict ;
- Assurance de continuité sur au moins quinze ans d'un bouquet d'observations d'importance-clé.

En tout état de cause, il convient pour le CNES comme pour l'ESA de travailler – comme cela a été fait avec succès pour l'altimétrie avec la série Topex/Poséidon/Jason-1-2-3 et devrait se poursuivre avec Jason-CS (projet dont la décision sera au menu de la Conférence Ministérielle de l'ESA en novembre 2014), pour IASI et pour SCAT/ASCAT entre ESA et EUMETSAT – à assurer la poursuite et l'amélioration, dans un cadre adéquat, des observations des variables climatiques essentielles définies par le GCOS (cf. ci-après).

3. La coordination internationale des systèmes d'observation

La coordination internationale des systèmes d'observation globale comporte plusieurs volets :

- Le CGMS (Groupe de coordination des satellites météorologiques a été créé le 19 Septembre 1972, lorsque les représentants de l'Organisation européenne de recherches spatiales (devenue l'ESA en 1975), le Japon, les États-Unis d'Amérique, les observateurs de l'Organisation météorologique mondiale (WMO/OMM) et le Groupe mixte de planification du programme de recherche sur l'atmosphère globale (GARP) s'est réuni à Washington pour discuter des questions de compatibilité entre les satellites météorologiques géostationnaires. Le CGMS assure avec succès la complémentarité des systèmes météorologiques en orbite polaire et géosynchrone.
- Le CEOS (Comité des satellites d'observation de la Terre) a été créé en Septembre 1984 à la suite d'une recommandation d'un groupe d'experts sur la télédétection spatiale, mis en place sous l'égide du Groupe de travail des Nations industrielles sur la croissance, de la technologie et de l'Emploi du Sommet économique du G7. Le CEOS coordonne les activités d'observation de la Terre (hors météorologie) des agences spatiales de 25 pays. Le concept de « Constellations virtuelles » (proposé par la France) qu'il promeut est porteur d'une convergence souhaitable des systèmes nationaux.
- Le GCOS (Système mondial d'observation du climat) est une initiative conjointe de l'OMM, la Commission océanographique intergouvernementale (IOC) de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation la science et la culture (UNESCO), le Programme des Nations Unies pour l'environnement (UNEP) et le Conseil international pour la science (ICSU).Pour tous les systèmes, spatiaux ou non, le GCOS assure depuis 22 ans l'évaluation de l'adéquation des systèmes en place, le recueil des besoins d'amélioration et la proposition d'un plan de mise en œuvre soumis aux états signataires de la Convention climat. Ses recommandations reçoivent l'appui du programme mondial de recherche sur le climat (WCRP).
- Le GCOS est identifié comme le bras armé du GEO (Groupe d'observation de la Terre, créé en 2005) dont les 89 pays membres (auxquels s'ajoutent 77 organisations participantes) ont décidé en janvier 2014 la prolongation pour une deuxième période de 10 ans, jusqu'en 2025. Le mandat du GEO recouvre les besoins en termes d'observation de neuf domaines d'intérêt sociétal (tels que l'agriculture, la santé, l'énergie, etc.).

Ces divers niveaux de coordination font intervenir des mécanismes très hétéroclites, allant du « club d'agences » (le CEOS) à l'accord intergouvernemental (le GEO), la caractéristique commune à tous ces assemblages étant l'absence de dispositions contraignantes (le consensus est la règle) et

d'échanges de fonds (avec tout au plus la mise en place d'un fonds fiduciaire pour les dépenses de fonctionnement du Secrétariat du GEO ou celui du GCOS, les autres dépenses étant supportées par l'organisme qui se porte volontaire pour assurer ce genre de fonction (comme EUMETSAT pour le CGMS).

En conséquence, la continuité et l'amélioration des systèmes d'observation ne reposent que sur la bonne volonté des partenaires – d'où les déséquilibres notés en introduction. Bien que l'OMM, le CEOS et le CGMS se soient accordés pour tenter de mettre en place une « architecture pour la surveillance du climat à partir de l'espace », de nombreux efforts et de très nombreuses années seront nécessaires avant que cette architecture déjà approuvée sur le plan « logique » le devienne sur le plan « physique ».

L'idée en apparence attrayante de la constitution d'une agence mondiale de l'environnement, qui assurerait la continuité des observations globales, se heurte à de nombreux obstacles : opposition américaine et chinoise à tout nouveau mécanisme de type onusien dans ce domaine ; assurance de qualité des observations, qui requiert un suivi scientifique scrupuleux par des équipes motivées. Sur ce dernier point, il faut prendre conscience de l'aspect intergénérationnel, sur plusieurs décennies, qui est un aspect essentiel de la continuité requise, comme en témoignent par exemple les difficiles discussions au tour de la préparation d'un « composite » des variations de la « constante » solaire sur plusieurs générations de scientifiques au cours des 4 derniers cycles solaires.

4. Stratégies française et européenne

Au niveau français, la contribution à ces systèmes et à ces mécanismes de coordination témoigne d'engagements fluctuants. Les principaux organismes concernés sont le CNES, METEO France et l'IFREMER et à un moindre degré, le CNRS et les autres établissements publics de recherche. La France s'est investie de manière significative dans le CEOS (le CNES assure pour deux ans la présidence de son équipe stratégique, le SIT) et dans le GEO, dont le premier directeur, de 2005 à 2012, était José Achache.

Au niveau européen, l'ESA a pris (sous l'impulsion initiale de Roger-Maurice Bonnet) une position en pointe avec son programme de Sentinelles (*Earth Watch*), qui permettra la continuité sur au moins quinze ans d'un grand nombre d'observations essentielles de l'atmosphère, des océans et des terres émergées, ainsi qu'avec ses missions innovantes (*Earth Explorer*) et de son initiative « Changement climatique » qui permet le retraitement de précision des archives spatiales pour 13 variables climatiques essentielles, en lien étroit avec les équipes de modélisation. La contribution française à ces programmes est très en-dessous de ce qui était le poids scientifique national, en résultat des trente années antérieures de politique volontariste qui avait fait de la communauté scientifique française dans ces domaines la première d'Europe. Les chercheurs français sont aujourd'hui sous-représentés dans ces programmes, et sont réduits à brader leurs compétences au bénéfice des concurrents allemands et anglais et des industriels.

5. Recommandations

5.1. Au Séminaire du CNES

Il serait souhaitable que l'engagement français dans les contextes du GEO/GEOSS, du CEOS et d'EUMETSAT (ce dernier incombant à Météo-France) soit poursuivi et renforcé, et que la contribution française aux programmes phares de l'ESA en observation de la Terre retrouve les niveaux des années 1980-90 (de 22 à 25 % sur les missions ERS et ENVISAT, contre de 4 à 16 % aujourd'hui* !).

5.2. Au niveau national

Même si la piste de la création d'une agence mondiale de l'environnement paraît irréaliste à court terme, pour les raisons indiquées plus haut, elle n'en vaut pas moins la peine d'être soulevée.

* Le taux de contribution étant calculé sur l'ensemble des contributions effectivement souscrites par les états-membres de l'Agence, et non sur le montant total demandé par l'Exécutif de l'ESA, la contribution française à la Phase 4 du programme EOEP (programme enveloppe d'observation de la Terre, comprenant principalement les missions expérimentales *Earth Explorer*) souscrite en novembre 2012 a « miraculeusement » atteint le pourcentage de 16 %, correspondant à son taux GNP, sa contribution au regard du montant total du programme proposé n'en atteignant que la moitié...

L'actuelle situation insatisfaisante décrite aux paragraphes précédents ne trouvera de solution qu'à travers une démarche un peu plus contraignante conduisant les pays à orienter leurs budgets spatiaux de manière plus cohérente. Des exemples existent qui démontrent qu'un meilleur partage international de l'effort est possible :

- C'est le cas au niveau de l'océanographie du système ARGO, flotteurs profonds de type « *pop up* » dont le fonctionnement repose sur l'existence de systèmes spatiaux de localisation et de collecte de données (dont le système semi-public Argos, concurrencé par l'opérateur privé Iridium, plus onéreux), et auquel contribuent plus de 20 pays (la contribution française est de l'ordre de 8 % du réseau, dont un centre de données, de nombreux flotteurs et des campagnes de déploiement).
- C'est le cas de la météorologie spatiale opérationnelle en orbite polaire, pour lequel la Chine a consenti à reconfigurer sa série de satellites FY pour occuper l'orbite de 6h30 (« *early morning* »), les USA et l'Europe s'avouant incapables de fournir ce service qui améliorera considérablement de nombreuses prévisions immédiates (« *nowcasting* »).

D'autres idées ont été imaginées (et parfois même explorées de manière détaillée, jusque et y compris par l'industrie spatiale française), mettant à contribution l'emport d'instruments d'observations sur des constellations de satellites commerciaux (en l'occurrence, la nouvelle constellation de 64 satellites Iridium qui était à l'initiative de cette suggestion). Le principe envisagé aurait consisté à fournir à l'industrie les plans d'une série de capteurs miniaturisés et simplifiés (altimètres, radiomètres large bande, capteurs de mesure d'ozone, de couleur de la mer, etc.), l'investissement initial étant assuré par l'industrie, et l'ensemble des observations étant accessible à tous les pays participants pour le prix d'un abonnement annuel selon une échelle de contributions fondée sur le PNB. D'autres scénarios ont été évoqués, partant de la puissance d'entreprises telles que Google – dont le *Google Earth* donne aisément le modèle. Si ces idées sont peu susceptibles d'être mises en pratique à court terme, elles méritent d'être explorées plus avant, et ne peuvent que bénéficier d'un engagement dynamique dans la voie d'une collaboration internationale accrue et sans restrictions.

Il est plus que temps de doter la Terre d'un système d'observation à la hauteur des besoins et des enjeux. La France accueillera les prochaines discussions sur le climat en 2015 et ce sera une occasion unique pour notre pays (enfin) d'imprimer une marque volontariste et créatrice en proposant une initiative nouvelle.