

# BILAN TOSCA

## 1- ATMOSPHERE

### 1-A INTRODUCTION

#### 1-Périmètre

La compréhension du système climatique et de son évolution (réchauffement, modification du temps météorologique, de la composition atmosphérique,...) sont des enjeux majeurs pour nos sociétés. En particulier, de trop nombreuses incertitudes demeurent encore quant au bilan des gaz à effet de serre (puits et sources peu ou mal connus) ou quant à certaines contraintes ou rétroactions présentes au sein du système climatique (rôle des nuages, des aérosols, de la vapeur d'eau et de leurs couplages par exemple).

Le suivi des concentrations des principaux gaz à effet de serre (GES) et la compréhension des processus (de formation, de transport, ...) qui y sont associés est l'un des défis majeurs pour les sciences atmosphériques. L'observation de la Terre depuis l'espace, du fait de la couverture spatio-temporelle qu'elle permet, constitue sans aucun doute l'un des piliers pour progresser significativement dans le domaine. La mesure par télédétection des GES au niveau de précision requis pour certaines applications importantes comme l'estimation, par des méthodes inverses, des flux (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>...) à la surface est particulièrement difficile: les tendances éventuelles, les variabilités diurne, synoptique, saisonnière et interannuelle sont en effet de deux ordres de grandeur inférieures aux valeurs de fond.

Le réchauffement lié aux GES est modulé par l'effet des aérosols qui jouent un rôle essentiel dans le bilan radiatif terrestre et dans sa distribution spatiale et temporelle. L'aérosol atmosphérique est ainsi un acteur majeur du climat par son interaction directe avec le rayonnement solaire, ou indirectement par son rôle sur la formation et la durée de vie des nuages. Des progrès significatifs ont été réalisés ces dernières années pour améliorer notre compréhension du cycle des aérosols et de son couplage avec celui de l'eau grâce à l'observation spatiale. Que ce soit à partir de plateformes géostationnaires (MSG/SEVERI) ou de plateformes défilantes (TERRA-AQUA/MODIS, PARASOL, CALIPSO/CALIOP), ou via le couplage des deux, les restitutions à l'échelle planétaire des propriétés optiques et granulométriques des aérosols ont permis de mieux cerner le rôle de cet acteur fondamental du système climatique terrestre.

Les nuages, quant à eux, constituent le modulateur principal du rayonnement atmosphérique puisqu'ils exercent un rôle double sur le bilan d'énergie de la planète : ils réfléchissent le rayonnement solaire et tendent ainsi à diminuer l'énergie absorbée ; ils contribuent à l'effet de serre en absorbant le rayonnement infrarouge sortant vers l'espace. Mieux comprendre le rôle des nuages dans le système climatique actuel, les rétroactions nuageuses et les effets indirects des aérosols sur les nuages sont des objectifs qui nécessitent une description sans cesse améliorée des nuages et de la distribution de l'eau dans l'atmosphère.

Les espèces chimiques réactives présentes dans l'atmosphère affectent de manière directe ou indirecte la qualité de l'air et le climat. La nécessaire adaptation des sociétés au réchauffement climatique a conduit les scientifiques à décliner ses effets à l'échelle régionale en terme de qualité de l'environnement, en particulier de l'air dont le contenu en espèces oxydantes – l'ozone par exemple – a des répercussions sensibles sur la santé humaine et conduit les autorités à développer des systèmes d'alerte. Ces systèmes ne peuvent se contenter d'observer ce qui se passe à l'échelle locale ou régionale, mais doivent prendre en compte le transport sur de longues distances et la transformation chimique progressive des polluants. Ces dernières années, en augmentant de manière considérable le nombre de composés chimiques identifiables depuis l'espace, le sondeur IASI (Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge) a contribué de façon majeure à affiner

notre connaissance de la composition chimique de l'atmosphère et des polluants.

Enfin l'adaptation au changement climatique passe aussi par notre capacité à nous protéger des événements extrêmes et climatiques violents. Les tempêtes, les pluies diluviennes et les crues éclair associées en font partie. Ici encore le cycle de l'eau est central dans notre besoin de connaissance de la physique de l'atmosphère autant pour améliorer la prévision de ces phénomènes extrêmes à courte et moyenne échéance que pour l'étude du climat actuel et futur. Malgré le rôle central joué par les systèmes nuageux précipitants ou non précipitants dans le système climatique, les nuages restent relativement mal représentés dans les modèles de grande échelle et demeurent toujours la source majeure d'incertitude pour la météorologie (les quantités de précipitation restent difficile à quantifier et à prévoir de manière précise).

C'est à l'intérieur de ce périmètre scientifique qu'en 2008-2009, lors de la phase préparatoire au séminaire de prospective de Biarritz, le groupe Atmosphère du TOSCA a identifié un certain nombre d'enjeux et de priorités qui ont servi de lignes directrices au travail du groupe dans les années qui ont suivi. La réflexion qui avait été menée en amont à la préparation du séminaire de Biarritz a conduit à segmenter le champ d'application du domaine « Atmosphère » en quatre sous-domaines qui sont repris ici dans la section relative aux avancées scientifiques de ces dernières années. Il nous a semblé plus cohérent de conserver cette structuration même si, dans quelques cas, elle n'a pas facilité de rendu des activités menées dans nos laboratoires et équipes.

## 2-Enjeux 2009s

Lors du précédent exercice de prospective les grands enjeux que la communauté scientifique de l'atmosphère avait mis en avant étaient :

- de consolider l'état des connaissances et de lever les incertitudes qui subsistent sur les forçages dominant des gaz à effet de serre, des aérosols et des nuages sur le bilan radiatif et sur la redistribution de l'eau sous toutes ses formes dans l'atmosphère. Cela signifie aussi réduire les incertitudes qui demeurent sur le fonctionnement des cycles biogéochimiques (cycle de l'eau, cycle du carbone (puits et sources))
- de développer une étude du climat à l'échelle régionale pour laquelle la variabilité des forçages est accrue et où des facteurs non climatiques comme la pollution interviennent. Cela impliquait aussi qu'au-delà de l'échelle globale, il devenait nécessaire de mieux documenter les échelles régionales à haute fréquence de revisite.
- Inscrire dans la durée un certain nombre d'observations ou de paramètres clés, indicateurs de l'état de la planète (par exemple le contenu atmosphérique en GES, la couverture nuageuse, les aérosols, les précipitations). Assurer la pérennité de la mesure de ces « paramètres de bases ».

## 3-Priorités du séminaire de Biarritz 2009 (rappel)

En 2009 les priorités du groupe Atmosphère, *incluant la mise en place de **phase 0/A***, étaient les suivantes :

### A court terme

- Un accompagnement soutenu indispensable pour l'exploitation des missions en cours comme Picard, celles de l'A-Train ou IASI et des prochaines missions importantes comme Megha-Tropiques et Earthcare ;
- Améliorer la qualité des prévisions météorologiques. L'équipement des satellites de nouveaux systèmes GNSS, permettant à moindre coût par radio occultation de sonder l'atmosphère météorologique ; Cette proposition a été rapidement abandonnée faute d'utilisateurs potentiels.

### A moyen terme

- Pour la chimie atmosphérique, soutenir le nouvel instrument **IASI-NG** qui doit pouvoir répondre aux besoins d'assurer la suite des activités engagées pour mesurer les concentrations d'ozone, de vapeur

d'eau et des autres gaz traces avec une meilleure résolution spectrale et un accès à des profils verticaux plus qu'à des colonnes intégrées, avec une bonne couverture spatiotemporelle pour identifier les pics de pollution et les variations diurnes de certains composés chimiques. Cadre Post-EPS (EPS-SG)

- Assurer la continuité des mesures aérosols/nuages pour déterminer leur forçage radiatif après l'A-Train et Earthcare, via l'association de mesures microphysiques et optiques en utilisant la complémentarité de plusieurs instruments, notamment lidar et radar, mais aussi des capteurs de type polarimètres multidirectionnels, multispectraux, multipolarisation, tel que **3MI** qui pourraient déjà s'envisager dans le cadre de Post-EPS ou Earthcare ;

#### A long terme

- Au-delà de 2020, une mission multi-capteurs permettant d'étudier, de quantifier et de caractériser les divers particules atmosphériques, de l'aérosol aux hydrométéores liquides et glacés et aux précipitations, sur l'exemple de l'A-TRAIN, combinant un **lidar à balayage, un radar doppler et de la radiométrie submillimétrique** constituerait un vrai saut innovant à horizon plus lointain ;

- La mesure des sources et des puits de gaz à effet de serre en s'appuyant sur l'instrument passif **Microcarb**, en poursuivant la réflexion en accord avec le contexte international et aussi en développant pour l'avenir de nouvelles technologies prometteuses plutôt fondées sur des mesures actives (lidars DIAL), à étudier en suivant les recommandations de l'ESA ;

- Il est aussi clairement apparu le besoin d'une **mission géostationnaire chimie** pour suivre l'évolution diurne des polluants.

Toutes ces missions sont évidemment à définir en fonction du contexte européen (ESA, Eumetsat, Sentinelles GMES aujourd'hui Copernicus) et international (NASA, JAXA, ISRO, Programmes Corée/Chine...).

Le séminaire de prospective de 2009 avait également été l'occasion pour le groupe Atmosphère de rappeler le besoin d'investir dans des moyens d'accompagnement avant, pendant et après les missions, pour les besoins de validation et d'exploitation scientifique des données. Enfin le groupe avait insisté sur la nécessité de développer de nouveaux instruments sol, aéroporté ou sous ballon pour étudier la faisabilité de nouveaux concepts et de concevoir ainsi de nouvelles méthodes d'analyse, l'idée étant alors de bénéficier de la complémentarité des observations spatiales, des mesures sol et in situ.

## **1-B LES AVANCEES SCIENTIFIQUES**

### **1-B-1 Les incertitudes majeures du changement climatique**

#### 1) Gaz à effet de serre

La stratégie scientifique élaborée en 2009 mettait en avant plusieurs priorités: la proposition de futures missions dédiées utilisant des méthodes de télédétection active et passive ; l'exploitation des mesures satellitaires existantes (en particulier MetOp/IASI pour le CH<sub>4</sub> et l'ozone troposphérique, ainsi que GOSAT/TANSO pour le CO<sub>2</sub>) ; le soutien au développement de réseaux de mesure *in situ*, complément indispensable des mesures satellitaires ; enfin, le raffinement des données spectroscopiques et le développement d'outils et d'applications pour exploiter pleinement les mesures, notamment par des techniques de modélisation inverse. Toutes ces priorités ont été abordées au travers des projets financés par le TOSCA au cours de la période.

#### *Proposition de nouvelles missions*

Dans le cadre du développement de la mission satellitaire MicroCarb des travaux ont été menés afin de répondre aux besoins de spécifications non pas en terme d'instrumentation (partie pilotée par le CNES) mais en terme de définition des caractéristiques observationnelles (résolution spatiale,

pointage...) nécessaires pour atteindre les objectifs de la mission, à savoir la mesure de la concentration de CO<sub>2</sub> avec une précision suffisante qui permettra, via une modélisation adaptée, une évaluation des flux à la surface afin de mieux comprendre les échanges entre les différents réservoirs de carbone et leur fonctionnement. La mission MicroCarb revêt un intérêt politique notable : la présence de l'Europe dans l'observation des gaz à effet de serre depuis l'espace. Si les difficultés instrumentales peuvent être surmontées et que l'objectif d'un emport sur microsatellite peut-être maintenu, la mission MicroCarb présentera l'avantage de donner accès soit à une constellation de satellites augmentant la densité de mesure, soit à une suite de satellites offrant un suivi sur le long terme plus que souhaitable. Un groupe mission MicroCarb a été créé en 2011 pour organiser les travaux de la communauté sur cette mission stratégique (voir ci-dessous la section « avancement des missions à venir »)

La mission MERLIN porte sur la mesure du méthane (CH<sub>4</sub>) via un système lidar IPDA (Integrated Path Differential-Absorption) à deux longueurs d'onde voisines de 1,64 μm. Elle vise à une meilleure compréhension des flux de méthane à la surface, et en particulier, à la détermination des sources de cette espèce par modélisation inverse. MERLIN serait un apport significatif dans le dispositif d'observation déjà existant, composé de réseaux de mesure à la surface, de mesures aéroportées déjà utilisées pour les flux et des instruments spatiaux de radiométrie passive dans l'infrarouge thermique (e.g. IASI, GOSAT) principalement utilisée pour l'étude de la chimie atmosphérique. MERLIN n'a pas vocation à remplacer tout ou partie de ce dispositif. Cette mission est en phase A avec un lancement prévu d'ici 2019. Les travaux spécifiques soutenus par le TOSCA ont permis le développement d'un simulateur des signaux lidar et la mise au point d'un OSSE (Observing System Simulation Experiment) de la mesure de la colonne de méthane. Une base de données de réflectance de surface à 1,64 μm, dans les conditions d'observations du lidar, a également été construite. La mise en place du simulateur pour l'inversion des flux de CH<sub>4</sub> est effective et des travaux se poursuivent concernant la caractérisation fine des propriétés spectroscopiques du milieu atmosphérique à la longueur d'onde d'émission du laser.

Des études de sensibilité réalisées en soutien à la préparation de la mission IASI-NG ont permis de quantifier l'apport de l'amélioration de la résolution spectrale et des performances radiométriques sur les produits restitués par la mission, en particulier pour la précision et la résolution verticale. Cette mission est actuellement en phase B, l'industriel qui doit construire les 3 modèles de vol ayant été sélectionné par le CNES.

Il faut mentionner également le soutien du CNES au développement d'un démonstrateur aéroporté de lidar CO<sub>2</sub> à haute précision pour intégration dans la mission EXCALIBUR. La mission EXCALIBUR a été soumise en 2010 à l'appel à propositions « Earth Explorer 8 » de l'Agence Spatiale Européenne, mais n'a pas été retenue dans ce cadre. On notera également le soutien à la mission PREMIER, candidate pour la sélection « Earth Explorer 7 » qui devait permettre d'améliorer nos connaissances sur la région de l'UTLS (Upper Troposphere Lower Stratosphere), région clé de l'atmosphère pour comprendre l'évolution du climat. Courant mars 2013, nous avons appris que la mission PREMIER n'avait finalement pas été sélectionnée par l'ESA.

#### *Exploitation des mesures satellitaires existantes*

Etant donné l'échec de la mission OCO (Orbiting Carbon Observatory), l'exploitation des mesures de la mission GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite) a représenté une des seules chances de pouvoir améliorer la quantification des sources et puits de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>. Les travaux financés par le TOSCA au cours de ces dernières années ont permis de réaliser l'étalonnage spectral des bandes TANSO-FTS dans l'IR thermique par rapport à IASI. Des méthodologies classiques d'inversion de colonnes de CO<sub>2</sub> par code de transfert radiatif (4A-SWIR) ont également été mises en œuvre sur des cas test. Le couplage TIR/SWIR pour améliorer la précision a aussi été étudié. Les données ont été validées par rapport aux données FTIR de Qualair et du Trainou.

Une chaîne d'inversion du CO<sub>2</sub> et du CH<sub>4</sub> à partir des mesures de IASI a été développée pour les latitudes tropicales. On peut noter que ces produits n'ont pas été systématiquement évalués par rapport aux produits distribués par EUMETSAT, mais ces derniers sont notoirement de qualité médiocre. L'état de maturité de la mission IASI permet aujourd'hui de générer et distribuer des cartes journalières de monoxyde de carbone, d'ozone et d'ammoniac, notamment via le Pôle Ether (pour le CO).

#### *Mesures surface, in situ et validation*

Les laboratoires français sont impliqués dans le réseau international NDACC de surveillance de la composition chimique de l'atmosphère depuis le sol afin de détecter et comprendre principalement les tendances des concentrations pour les composés traces dans la stratosphère. Il s'agit d'établir les liens entre changement climatique et composition de l'atmosphère, valider les observations satellitaires et tester et améliorer les modèles. L'évolution de la teneur en ozone stratosphérique à moyenne latitude a été évaluée à l'aide des mesures Lidar de l'OHP, en mettant en œuvre une méthodologie pour évaluer les biais éventuels au cours du temps et de caractériser ces mesures par rapport aux autres mesures Lidar du réseau NDACC et, les mesures sol SAOZ et sondages ozones, ainsi que des mesures satellites (SAGE II, HALOE, GOMOS et MLS). Ainsi, 15 ans de données avec 7 instruments différents ont permis de conclure qu'avant 1997 la diminution d'ozone aux moyennes latitudes était principalement due à l'augmentation des espèces halogénées. Cependant, la tendance positive depuis 1996 n'est pas seulement due à la diminution des halogénés : il a été constaté que d'autres facteurs comme la QBO, la variabilité du flux solaire, les aérosols, l'activité ondulatoire, ou encore la NAO participent à cette augmentation.

Le développement des grandes infrastructures de recherche ICOS (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) et IAGOS (ozone, vapeur d'eau, aérosol...) a par ailleurs progressé au plan international, avec une contribution française très importante. Bien que ces développements ne soient pas directement soutenus via des financements du CNES, ils constituent un pendant indispensable à la préparation des futures missions satellitaires et à leur validation.

#### *Spectroscopie, outils et applications*

Les activités financées par le TOSCA se sont essentiellement inscrites dans le cadre de la préparation de Microcarb. Elles ont porté principalement sur la validation du code de transfert radiatif 4A dans les bandes d'absorption du CO<sub>2</sub> à 1.6 et 2.1µm, par comparaison aux mesures sol TCCON. De nouveaux développements, réalisés avec l'appui de l'équipe projet CNES, ont également été nécessaires pour une bonne prise en compte du spectre solaire, de la réponse spectrale de l'instrument et une bonne définition des profils verticaux de CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O à considérer. Les résultats sont très encourageants, mais il reste du travail, en spectroscopie notamment, pour reproduire correctement la forme de certaines raies d'absorption. Une autre partie des activités a concerné la méthode d'inversion de la colonne de CO<sub>2</sub> et l'amélioration de la restitution des profils de température et de vapeur d'eau à partir du spectre du CO<sub>2</sub> vers 13 µm.

Les travaux d'inversion de sources et/ou puits à la surface, et de développement des outils numériques associés occupent une part croissante de la communauté nationale. Le TOSCA a, en particulier, soutenu le développement d'une chaîne d'inversion multi-espèces au LSCE pour la détermination des flux de GES, et différentes inversions couplant données *in situ* et satellitaires. Cette activité est parfaitement intégrée au plan international, au travers de projets européens comme CARBONES et MACC-II.

## 2) Interactions Aérosols-Nuages-Rayonnement

A l'issue du séminaire de prospective de 2009, plusieurs axes prioritaires avaient été identifiés :

accompagner les missions en cours et à venir comme l'A-Train et EarthCare ; assurer la continuité des mesures aérosols/nuages pour caractériser le forçage radiatif de la Terre ; utiliser davantage la synergie instrumentale déjà disponible (A-Train) et à venir (Post-EPS, EarthCare) couplant techniques actives (radar, lidar) et passives (visible, proche et moyen infrarouge ; luminances polarisées ou non ; multi-angulaires) et enfin travailler à la définition d'une mission large spectre de l'aérosol aux nuages liquides et glacés (à l'horizon 2020). Ces différentes actions devaient répondre aux besoins de caractériser d'une part la distribution et la variabilité des propriétés des nuages afin de vérifier leur bonne représentation dans les modèles climatiques, et d'autre part de suivre sur une longue durée les propriétés des nuages et des aérosols tant du point de vue quantitatif que géographique.

Les activités soutenues par le CNES durant ces dernières années ont permis d'assurer l'exploitation d'observations spatiales pour des applications opérationnelles et de recherche, de réaliser des validations d'observations spatiales et de produits dérivés, de développer de nouveaux produits et de réaliser des comparaisons entre produits issus de la donnée spatiale. S'appuyant sur l'expertise du TOSCA, le CNES a aussi soutenu différentes activités scientifiques en lien avec l'exploitation des observations spatiales comme par exemple l'étude des traînées de condensation à partir d'observations AIRS ou la caractérisation des nuages sub-visibles à l'aide du lidar de CALIPSO.

Il faut souligner ici que depuis sa mise en place en 2003, le centre thématique ICARE (CNES, CNRS, Conseil régional Nord-Pas-De-Calais, et Université de Lille) a permis de soutenir la production et la distribution des produits des missions spatiales en relation avec les projets sur les nuages (e.g. CALIPSO, CLOUDSAT, PARASOL) et les aérosols (e.g. PARASOL). D'autres missions sont aussi entrées dans le champ d'activités d'ICARE comme Megha-Tropiques. Les données et produits « nuages-aérosols » hébergés par ICARE sont utilisés non seulement par la communauté française mais aussi par la communauté internationale.

#### *Caractérisation des aérosols*

Plus en détail, et pour les aérosols, l'exploitation des observations spatiales des différentes missions (SAGE III, OMI, ACE-FTS et GOME-2, MSG, POLDER/PARASOL, MODIS/AQUA, synergie lidar/radar, synergie actif/passif) a permis une meilleure caractérisation des aérosols à l'échelle du globe. Des comparaisons entre produits (par exemple l'épaisseur optique des aérosols) ont été réalisées à partir des observations des missions POLDER/PARASOL et MODIS/AQUA au-dessus des océans. De plus la communauté s'est impliquée dans des activités de suivi temporel, saisonnier et régional des aérosols stratosphériques et des propriétés des aérosols troposphériques (épaisseur optique, rayon effectif, sphéricité).

Différentes activités de validation d'observations spatiales et de produits dérivés ont été menées en exploitant des observations sol du réseau AERONET/PHOTONS mais aussi en assurant des opérations de CAL/VAL à l'aide de moyens mobiles (e.g. lidar mobile, avion Falcon20) et d'instrumentation déployée sur des sites de référence (OHP, OPAR). Par ailleurs des campagnes scientifiques spécifiques ont été menées pour étudier non seulement des éruptions volcaniques, mais pour caractériser le soulèvement des aérosols désertiques à l'aide d'observation sol et aéroportée (avion Falcon20) pour une meilleure prévision des tempêtes de poussières - par les modèles AROME et ALADIN. Le CNES a aussi soutenu de nouveaux développements algorithmiques et de techniques d'inversion afin de caractériser les couches d'aérosols (e.g. altitude de la couche, aérosols au-dessus des nuages), ou de restituer le type et la granulométrie des aérosols dans l'Infrarouge à haute résolution spectrale, ou encore l'épaisseur optique des aérosols à la résolution spatiale du diamètre du faisceau lidar sans hypothèse sur la microphysique.

#### *Caractérisation des nuages*

Différentes propriétés des nuages (épaisseur optique, nébulosité, phase, pression, altitude) ont pu

être estimées à partir d'instruments de l'A-Train (Calipso, POLDER/PARASOL, MODIS/AQUA, CloudSat...) ou autres (IASI). De nouveaux algorithmes et produits opérationnels et de recherche ont été développés. Pour les techniques actives, on citera par exemple le produit DARDAR (utilisant la synergie Radar/Lidar pour l'identification de la phase nuageuse (liquide vs glace grâce à des signatures particulières)). Pour Calipso, un simulateur d'observable a été construit pour permettre une comparaison quantitative tridimensionnelle des propriétés nuageuses observées et celles simulées par les modèles météorologiques ou climatiques. Ce simulateur est aujourd'hui utilisé par plus d'une trentaine de modèles météorologiques ou climatiques. Un produit spécifique, CALIPSO-GOCCP, a été développé pour être pleinement cohérent avec le simulateur, et ces observations sont utilisées par une communauté encore plus large. En technique passive, différentes activités ont permis d'explorer la synergie entre mesures de différents instruments (produits combinés, données combinées, produits comparés) et de proposer aux utilisateurs de nouveaux paramètres (e.g. altitude et épaisseur de la couche, base et sommet nuageux, aérosols au-dessus des nuages). La communauté a aussi réalisé différentes études sur des comparaisons entre 12 produits «nuage» à l'échelle globale (moyenne mensuelle ; 1° x 1°). D'autres travaux ont porté sur des comparaisons de produits IASI/AIRS avec le produit américain de référence pour la mission A-Train ou sur des comparaisons avec des produits issus de la radiométrie passive visible et IR (MODIS). A noter aussi qu'il a été démontré que la radiométrie sub-millimétrique passive permettait la caractérisation des nuages de glace et des précipitations.

Des activités de CAL/VAL ont été menées pour valider les produits opérationnels, les produits recherche (issus par exemple des algorithmes DARDAR et SODA), ainsi que l'étalonnage de CALIOP, IIR et PARASOL. Enfin un soutien financier non négligeable a permis d'équiper la Plateforme Microphysique Aéroportée (PMA) de sondes de microphysique *in situ*, nécessaires à la caractérisation complète de la distribution en taille des hydrométéores, de leur propriétés géométriques et de leur phase au sein du nuage.

#### *En résumé*

Pour répondre aux recommandations formulées dans le précédent document de prospective, divers moyens d'accompagnement (e.g. PHOTONS/AERONET ou PMA) ont été mis en place afin de valider et exploiter des missions soutenues par le CNES (A-Train, IASI, Megha-Tropiques) et préparer les futures missions portées par la communauté (e.g. ADM-AEOLUS, EarthCARE). Le développement de nouvelles méthodes d'analyse et d'inversion a été fortement soutenu par le CNES, comme la synergie instrumentale (e.g. produit DARDAR par synergie radar/lidar) ou de nouvelles approches (e.g. approche multi-pixel développée pour PARASOL). Il est important de souligner que l'on est aux prémices de la synergie ACTIF-PASSIF et que ce nouvel axe devra être fortement soutenu dans les années qui viennent.

Il faut noter aussi l'effort de coordination de la communauté française pour proposer des activités de recherche davantage intégrées dans le domaine des nuages et des aérosols. C'est le cas pour l'exploitation de CALIPSO et la préparation de EarthCare et aussi pour l'exploitation de IASI. Ainsi la distribution et la variabilité des propriétés des nuages déduites des observations de la mission A-Train ont été étudiées afin de vérifier leur bonne représentation dans les modèles climatiques. Le suivi sur une longue durée des propriétés des nuages et des aérosols tant du point de vue quantitatif que géographique a été réalisé à l'aide de produits issus des radiomètres passifs (MODIS, PARASOL). Enfin même si certains paramètres sont désormais accessibles depuis les observations spatiales, comme la phase des nuages, des efforts restent à faire sur la granulométrie.

A noter aussi qu'une base de codes de transfert radiatif et de propriétés optiques des aérosols et des nuages a été réalisée avec le soutien du CNES suite aux conclusions de l'atelier TRATTORIA (2008).

#### *Proposition de nouvelles missions*

Il faut rappeler ici les contributions significatives de différentes équipes françaises aux projets TOPASE (Twinview Observing Polarimeters for Atmospheric Structure Exploration) et CloudIce en réponse à l'appel « Earth Explorer 8 » de l'ESA. TOPASE était dédié à la caractérisation de la structure 3D des nuages et du champ de vapeur d'eau à partir d'observations passives dans le visible et le proche infrarouge obtenues à partir de capteurs embarqués sur deux satellites volant en tandem. CloudIce était une mission pour la caractérisation des nuages de glace par radiométrie sub-millimétrique.

Depuis le séminaire de 2009 on peut regretter que très peu de nouveaux développements instrumentaux aient été réalisés. Le TOSCA a tout de même soutenu un certain nombre d'activités technologiques comme celles en relation avec les lidars ou des études prospectives, comme celle démontrant la pertinence de la radiométrie sub-millimétrique passive pour la caractérisation des nuages de glace et de la pluie visant un déploiement sur une plateforme géostationnaire. Même si les équipes françaises se sont associées entre elles au sein de projets scientifiques liés à des missions spécifiques (le projet EECLAT par exemple), il n'y a pas eu de développement spécifique sur une mission large spectre comme cela avait été envisagé en 2009. Il apparaît nécessaire de poursuivre l'exploitation des données A-Train en recommandant une plus grande interaction entre les communautés « ACTIF » et « PASSIF » afin de réellement appréhender les bénéfices de la synergie multi-instrumentale, multi-spectrale pour décrire la colonne atmosphérique dans son ensemble et de caractériser les processus physiques reliant aérosols, microphysique nuageuse et rayonnement radiatif. Plus inquiétante, la perte de continuité n'a pas pu être évitée sur les missions aérosols/nuages pour caractériser le forçage radiatif de la Terre même si les missions EarthCare et 3MI sont annoncées.

## **1-B-2 Les évènements extrêmes – Le climat régional**

### **1) Cycle de l'eau, phénomènes extrêmes, météorologie**

Dans le cadre de l'exercice bilan/prospective de 2009, la partie « cycle de l'eau, phénomènes extrêmes, météorologie » pouvait se résumer à quelques points essentiels, si on se limite aux aspects spécifiquement liés à ce thème : à court terme il était prévu un accompagnement soutenu à Megha-Tropiques et à l'A-Train ; à moyen terme le groupe « Atmosphère » avait proposé d'orienter les efforts plus directement vers la caractérisation des nuages en s'appuyant sur Cloudsat-Calipso-EarthCare, mais cet aspect concerne marginalement le thème traité ici ; enfin à long terme, il était proposé de mener une réflexion autour d'une mission intégratrice regroupant les thèmes nuages et précipitations avec des instruments actifs et passifs multi-spectraux (lidar à balayage, radar doppler, radiomètre submillimétrique, polarimètre multiangulaire, ...). Ce dernier aspect rejoint totalement les réflexions de la communauté « Aérosols-nuages-rayonnement » concernant le besoin d'une mission large spectre.

Depuis 2009, les activités concernant ces thématiques ont essentiellement été portées par 2 projets : Megha-Tropiques et l'étude de phase 0 de la mission franco-brésilienne BOITATA et du radar Doppler associé (connu précédemment sous le nom de KARMA). Cette thématique a été également abordée de façon plus marginale via certaines activités portant sur l'exploitation de Cloudsat-Calipso-Earthcare ainsi que sur l'utilisation de la plateforme aéroportée pour les mesures microphysiques (PMA). On constate donc à l'issue de ces années que les activités abordées dans ce thème, si elles ont été bien soutenues financièrement et en termes de ressources humaines (au travers de Megha-Tropiques principalement), sont relativement minoritaires au sein du TOSCA, et l'on peut s'en étonner, voire s'en inquiéter.

Plus inquiétant encore, après l'arrêt par le CNES en fin de phase 0 du projet BOITATA, peu de propositions ont émergé pour soutenir et porter la thématique à moyen et long terme. La mission BOITATA elle-même résultait d'un fort contexte politique de coopération franco-brésilienne et la



phase 0 n'a existé que dans ce contexte. Par ailleurs aucune convergence n'a émergé clairement entre les thématiques précipitations, nuages et rayonnement sauf peut-être au travers de certains efforts autour de l'étude de la microphysique glacée (ISMAR, RASTA, validation de MT). Beaucoup de choses ont été accomplies grâce au soutien du CNES au travers du TOSCA sur les activités de démonstrateurs aéroportés (RASTA, plateforme microphysique, ISMAR de manière très marginale) et ces efforts ont globalement porté leurs fruits, principalement avec la réalisation de plusieurs campagnes de terrain en particulier dans le cadre de la validation des algorithmes et des produits de Megha-Tropiques. Un effort de valorisation de ces campagnes est toutefois encore nécessaire pour apprécier leur impact réel sur les algorithmes mis en œuvre pour la mission spatiale.

Pour le moment, peu d'exploitations scientifiques ont donc été réalisées sur les thèmes « cycle de l'eau.... », sauf sur certains aspects plus climat-météorologie de Cloudsat-Calipso-EarthCare, soutenu par le CNES à travers la proposition EECLAT qui regroupe une large part de la communauté française depuis 2011. Dans le contexte de la mission Megha-Tropiques les efforts sont encore très orientés vers des développements algorithmiques pour la restitution de la pluie, de produits vapeur d'eau, des flux radiatif TOA (Top Of the Atmosphere), et vers la validation de ces derniers, ce qui est consommateur de temps et de ressources humaines.

De manière générale, les aspects « météorologie », au sens générique de l'étude des systèmes précipitants et de leur cycle de vie proprement dit, sont peu présents au sein des activités soutenues par le groupe « Atmosphère » et il y a peut-être là un problème d'articulation des efforts avec Météo-France et Eumetsat/ESA. De la même façon, on note peu d'activité sur les événements extrêmes proprement dit, peut-être en partie pour les mêmes raisons.

#### *Propositions de nouvelles missions*

Sur ce thème il y a eu peu de propositions de nouvelles missions, si ce n'est l'étude de phase 0 de la mission franco-brésilienne BOITATA et du radar Doppler associé, effectuée peu de temps après la sortie du séminaire de Biarritz, dans le contexte de la collaboration bilatérale entre le Brésil et la France, mais qui n'a finalement pas abouti (faute de moyens ?, autres ?)

Il n'y a pas de perspective à court terme pour le moment dans la suite de Megha-Tropiques. Toutefois l'activité autour de la mesure spatiale des précipitations est très forte dans les années qui viennent avec le lancement en 2014 du *Global Precipitation Measurement Core Satellite* par la NASA et la JAXA (radiomètre imageur type TMI et radar double fréquence 14-35 GHz). Ce projet international fédérateur dont Megha-Tropiques est une composante va structurer l'activité dans les 5 à 10 ans qui viennent en étendant les mesures de la zone 40N-40 S de l'ère TRMM à l'ensemble du Globe. Au-delà, l'accommodation d'un radiomètre imageur sur Post-EPS (*Micro Wave Imager*, MWI, héritage MADRAS) démontre si besoin est l'importance croissante de la mesure des précipitations y compris pour les systèmes opérationnels.

## 2) Le rôle de la chimie atmosphérique sur le changement climatique et la qualité de l'air

Depuis le colloque de prospective de 2009 les thèmes abordés par les projets TOSCA dans le domaine de la chimie atmosphérique ont concerné majoritairement la pollution troposphérique. En effet, peu de projets ont porté sur la stratosphère ou l'UTLS, régions qui sont pourtant déterminantes en ce qui concerne l'évolution du climat. L'activité s'est concentrée sur IASI et les futurs sondeurs qui permettront de mieux documenter la composition de la troposphère en relation avec des problématiques liées à la qualité de l'air.

La mission IASI a permis de documenter la composition atmosphérique avec une résolution spatio-temporelle inégalée. Les actions soutenues par le CNES ont porté sur le traitement des données IASI depuis la spectroscopie jusqu'à l'assimilation. Des avancées importantes ont été effectuées en ce qui

concerne l'O<sub>3</sub> et le CO, les deux gaz réactifs pour lesquelles IASI apporte une information quantitative dans la troposphère. En particulier, le développement de codes de restitution de profils de ces gaz a permis d'aller au-delà de la restitution de colonnes intégrées. La validation des données restituées avec des données *in situ* indépendantes (MOZAIC, sondes d'O<sub>3</sub>) a mis en évidence la capacité de IASI à documenter les variations du contenu en O<sub>3</sub> dans la basse troposphère, dans l'UTLS et dans la stratosphère. Un exercice de comparaison des trois algorithmes de restitution d'ozone aujourd'hui disponibles dans la communauté nationale a permis d'évaluer ces algorithmes avec des mesures indépendantes, et montre de bons résultats pour deux d'entre eux. Ceci ouvre la voie à des traitements en routine, opérationnels, et au retraitement de l'ensemble de la période IASI.

Cependant, certaines limitations ont aussi été mises à jour telles que la surestimation de la quantité d'O<sub>3</sub> dans l'UTLS ou la contamination des restitutions d'O<sub>3</sub> par les poussières désertiques. Des efforts sont donc encore nécessaires pour améliorer la qualité de la restitution de l'O<sub>3</sub> à partir de sondeurs IR thermique tels que IASI actuellement et IASI-NG dans le futur. Pour CO et O<sub>3</sub>, la validation a aussi mis en évidence la limitation de la sensibilité du sondeur près de la surface d'autant plus importante que le contraste thermique est faible. Malgré cette limitation, des études ont montré que l'assimilation de données d'O<sub>3</sub> IASI dans un modèle de chimie transport conduisait à l'amélioration de la distribution de l'O<sub>3</sub> de surface particulièrement en été au-dessus du bassin méditerranéen. Pour pallier au manque de sensibilité, des études ont aussi porté sur l'assimilation conjointe de données IASI et de données de surface. Les données IASI ont aussi été mises à profit pour l'estimation « top-down » des inventaires d'émissions de CO.

Des études collaboratives avec des équipes belges (ULB) ont montré de manière très surprenante que IASI permettait de détecter des gaz qui jouent un rôle important en chimie atmosphérique mais présentent des absorptions peu intenses. En particulier, les premières distributions globales d'ammoniac, d'acide formique et de méthanol ont ainsi été produites.

Il faut souligner que le CNES a également soutenu de manière significative la validation des différents produits géophysiques issus des missions spatiales. Cela a été conduit à travers le soutien à des actions d'inter-comparaison d'algorithmes et de produits scientifiques (comme dans le cas de SAGEIII, GOME, ACE-FTS par exemple) ou le soutien à la mise en place de campagne de terrain, la plus significative étant sans doute CONCORDIASI ces dernières années.

### *Propositions de nouvelles missions*

Les performances limitées de l'instrument IASI en termes de sensibilité dans la couche limite et de résolution verticale permettent difficilement de documenter les processus qui pilotent la composition chimique de la basse troposphère et les échanges verticaux associés. La communauté nationale s'est fédérée et a conduit des études pour définir au mieux le successeur de IASI. Avec une résolution spectrale et un bruit radiométrique amélioré, l'instrument IASI-NG permettra d'accéder à plus d'information verticale pour O<sub>3</sub> et CO et de passer de la détection à la mesure plus systématique pour les espèces minoritaires telles NH<sub>3</sub> (voir ci dessous « avancement des missions à venir »). D'autres voies sont également explorées pour obtenir des mesures plus représentatives de la basse troposphère. Le couplage de plusieurs régions spectrales est une voie qui est étudiée avec notamment une inversion de l'O<sub>3</sub> couplant TIR+UV à partir de IASI, et GOME2 sur MetOp. La faisabilité de l'utilisation du visible, très sensible à la surface, est également à l'étude. D'autre part, avec une revisite toutes les 12 heures, IASI ne permet pas de suivre l'évolution diurne des polluants. Pour pallier cette limitation, la mission géostationnaire MAGEAQ (O<sub>3</sub> et CO) a été proposée en réponse à l'appel « Earth Explorer 8 » de l'ESA mais non retenue. Des études pour consolider le concept de mission et les besoins en répétitivité et pour évaluer l'impact de telles observations sur l'analyse et la prévision de la qualité de l'air ont été menées notamment à travers la mise en œuvre d'OSSEs.

## **1-C MISSIONS EN COURS ET AVANCEMENT DES MISSIONS**

### **1-C-1 Les missions en cours**

#### **PARASOL/POLDER**

La mission PARASOL avec à son bord l'instrument POLDER a été lancée en décembre 2004 et a rejoint AURA et AQUA dans la constellation du A-Train. Après deux extensions de mission successives en 2009 et 2011, PARASOL est resté en orbite mais a quitté le A-Train fin 2009. La mission a pris fin en décembre 2013. POLDER/PARASOL est la troisième version de l'imageur-polarimètre multispectral POLDER qui avait volé par deux fois à bord des satellites japonais ADEOS en 1996 et 2002.

Comme souligné dans la section « Interactions Aérosols-Nuages-Rayonnement » l'instrument POLDER sur PARASOL a fourni une série de données et de paramètres géophysiques originaux dont l'intérêt et la qualité sont aujourd'hui reconnus au niveau international. Les paramètres « standards » dérivés de cet instrument ont été utilisés dans différents exercices d'intercomparaison de produits géophysiques (Cloud Assessment du GEWEX ou le projet CREW pour les nuages, CCI aérosols de l'ESA pour les aérosols). Certains paramètres (phase thermodynamiques des nuages, modèles d'aérosols) ou méthodologies développées dans le contexte de POLDER/PARASOL (par exemple l'invalidation de modèles microphysiques de glace via la polarisation) sont aujourd'hui considérés comme des références par une large communauté scientifique.

Ces dernières années certains paramètres géophysiques standards ont légèrement évolué suite à différentes études menées dans les laboratoires avec le soutien du CNES, mais il faut souligner que les plus gros efforts ont été menés sur la complémentarité des mesures et produits POLDER avec ceux d'autres instruments du A-Train, en particulier l'imageur multispectral MODIS et le lidar CALIOP.

#### **CALIPSO**

La mission CALIPSO est une initiative franco-américaine. Elle embarque le système lidar CALIOP développé par les Américains et l'imageur infrarouge IIR développé en France. La plateforme est de type PROTEUS. La mission a été lancée en orbite moyenne héliosynchrone le 28 avril 2006, vers 705 km. Le CNES via son Comité Scientifique a été fortement impliqué dans la validation et la valorisation des deux instruments embarqués sur la plateforme. La mission devait durer 3 années et a été reconduite deux fois ; elle est toujours opérationnelle à l'heure actuelle. La mission CALIPSO trouve toute son ampleur dans le cadre de l'A-Train et le couplage multi-instrumental ainsi favorisé. Des résultats nouveaux permettant de progresser sur notre connaissance des aérosols et des nuages sont issus de cette configuration spatiale d'avant-garde.

Une suite doit être trouvée à cette mission. Les missions ADM-AEOLUS et EarthCare sont une suite intéressante, mais qui ne présentent pas le même potentiel de synergie de mesure. Il est important pour la communauté scientifique de définir, dès à présent, une nouvelle mission qui permettra de poursuivre les observations lidar depuis l'espace afin de disposer de jeux de données à caractère climatique dans le contexte d'une pression anthropique qui ne s'infléchit pas.

#### **IASI**

IASI est un instrument conçu par le CNES, qui fait partie de la charge utile des satellites météorologiques européens en orbite polaire de la série Metop. IASI constitue une avancée technologique et scientifique en fournissant aux météorologues des spectres infrarouges de l'atmosphère leur permettant d'établir des profils de température et d'humidité avec une résolution verticale de 1-2 km et une précision de 1 Kelvin et de 10 %. Les données IASI contribuent également aux études de chimie atmosphérique et à la surveillance du climat. Le système IASI est composé d'un logiciel de traitement de données intégré dans la composante sol EPS (Eumetsat Polar System) et de

trois instruments successifs montés sur les trois satellites en orbite polaire successifs Metop. L'instrument comprend un spectromètre à transformée de Fourier auquel est associé un imageur. Le 1er modèle de vol de l'instrument IASI (IASI-A) a été lancé le 19 octobre 2006 sur Metop-A. A ce jour, l'instrument IASI-A fonctionne de façon nominale et il ne montre pas de signes de vieillissement. Avec plus de six ans de mesures, la mission IASI est clairement un succès. Eumetsat a manifesté l'intention de poursuivre l'exploitation de Metop-A et de IASI-A bien au-delà du lancement de Metop-B, lancé en mai 2012. Une demande d'extension de mission de IASI-A pour deux ans a été acceptée par le CNES, ce qui permet aujourd'hui de continuer à exploiter ses mesures en même temps que celles de IASI-B.

Les retours scientifiques montrent la forte utilisation des données IASI aussi bien pour la météorologie opérationnelle que pour des activités scientifiques en composition atmosphérique. IASI est utilisé au-delà de son objectif premier avec un fort champ de recherche sur les gaz traces. Eumetsat va intégrer des chaînes de traitements françaises sur ces gaz dans son centre opérationnel (dans le cadre du O3M-SAF) ce qui montre la qualité du travail de la communauté française.

Bien que les applications en météorologie opérationnelle ne relèvent pas du champ d'action du TOSCA il faut tout de même souligner que, sur ce plan, l'utilisation des données de IASI a beaucoup évolué. Le nombre de canaux utilisés dans les modèles est en augmentation avec 102 canaux pour la température et 9 canaux pour la vapeur d'eau sur la mer (un peu moins sur terre). Il y a une amélioration continue des chaînes de traitement de Météo-France pour mieux prendre en compte l'ensemble des canaux IASI. Le nombre de pixels utilisables s'accroît grâce à une meilleure prise en compte des pixels nuageux. IASI permet 4h de gain sur la prévision météorologique à 72h. Avec METOP-A, Météo-France va continuer à améliorer le niveau d'opérationnalité de ces chaînes. Le système opérationnel de Météo-France est déjà capable d'assimiler les données de 2 instruments. Le fait d'avoir deux IASI en vol en même temps, décalés de 50 minutes permettra de combler des trous de mesure.

Les travaux de recherche scientifique autour de la mission IASI impliquent de nombreux chercheurs, répartis dans plusieurs laboratoires (LMD, LSCE, LATMOS, LISA, LA, Cerfacs, etc...). IASI est un important contributeur pour l'étude des changements de composition, grâce aux 24 espèces chimiques mesurées (colonnes totales ou profils) ou détectées (présence de la molécule). Les corrélations des données IASI avec d'autres capteurs comme ceux du projet MOZAIC montrent la qualité des données inversées à partir des spectres. Les données CO produites par la communauté française sont assimilées par le centre européen (ECMWF) dans le cadre du projet MACC. IASI est aussi utilisé pour la mesure de gaz réactifs : ainsi, une cartographie de l'ammoniac a pu être réalisée pour la première fois depuis l'espace. IASI montre sa pertinence sur des actions d'avertissement de la population lors d'éruptions volcaniques, aussi bien le jour que la nuit. Par ailleurs, un service d'alerte pour l'aviation civile a pu se développer. IASI est donc à ce jour à la frontière entre la science et l'activité pré-opérationnelle.

Le maintien de IASI-1 devrait permettre d'asseoir le niveau de connaissance acquis et de continuer à développer de nouveaux produits, tout en organisant en parallèle la validation de IASI-2 sur METOP-B. De plus, la cohabitation des deux instruments devrait augmenter les possibilités « opérationnelles », améliorer les études statistiques et minimiser les zones non couvertes. L'observation des démarrages de phénomènes (démarrage de feux, développement d'épisode de pollution,..) devrait aussi être facilitée.

### **Megha-Tropiques**

Megha-Tropiques est une mission franco-indienne qui a pour objectif d'étudier le bilan d'eau et d'énergie des systèmes convectifs dans les tropiques, en mesurant avec une bonne répétitivité des observables liés aux flux radiatifs, à la vapeur d'eau, aux précipitations.

L'originalité de la mission vient de l'association instrumentale et de son orbite, inclinée de 20 degrés

sur l'équateur, permettant une haute répétitivité des mesures. La charge utile comporte trois instruments : un imageur hyperfréquences pour les nuages et la pluie (Madras), un sondeur hyperfréquences de vapeur d'eau (Saphir) et un instrument à bande large destiné à la mesure des flux radiatifs (ScaRaB).

La mission Megha-Tropiques contribue aussi à la surveillance du climat en complétant les mesures de la NASA du bilan radiatif et des précipitations en offrant un échantillonnage augmenté aux tropiques. Idem pour la vapeur d'eau. Megha-Tropiques fait officiellement parti de l'effort international Global Precipitation Mission (GPM) coordonné par la NASA et la JAXA via la fourniture des observations de MADRAS et de SAPHIR.

La proposition Megha-Tropiques est soumise au TOSCA depuis plus de 15 ans. Elle a abouti récemment avec le lancement de la mission fin 2011 dans le contexte d'une collaboration avec l'ISRO, l'agence spatiale indienne. Malgré un lancement réussi, le segment sol indien de la mission s'avère particulièrement lent à mettre à disposition les données auprès des scientifiques. Les fichiers « orbite » sont seulement disponibles depuis mi-janvier 2012 au fil de l'eau pour SAPHIR et SCARAB. L'archive n'est actuellement pas complète du tout. L'instrument MADRAS a été déclaré hors-service à partir de janvier 2013. On disposera donc d'environ 15 mois de données entre le lancement et l'arrêt de l'instrument. Les données elles-mêmes sont de bonne qualité car la partie radiofréquence de l'instrument a été particulièrement soignée. Elles requièrent toutefois des traitements complexes pour être exploitables car même en période fonctionnelle, l'instrument a rapidement été affecté de deux problèmes dans sa partie électronique.

Côté CNES la mission Megha-Tropiques a été fortement soutenue depuis le dernier exercice de prospective en 2009, à la fois sur le volet « mission et algorithmes » et sur le volet « validation » qui a nécessité notamment la mise en place de campagnes de mesures sol et aéroportées intensives . On notera cependant un problème récurrent de hiatus entre les groupes « projet » et « mission » de Megha-Tropiques. Il semble au regard des remarques du TOSCA que l'exploitation scientifique de la mission n'ait pas été suffisamment préparée au niveau des agences CNES-ISRO (délai dans la définition des niveaux 1, délai dans la fournitures des niveaux 1 synthétiques, délai dans la mise à disposition des données après lancement, délai dans la diffusion de l'information sur l'état de MADRAS, etc...) et l'on peut suivre sur les 3 années passées la persistance de ces problèmes.

### **1-C-2 Avancement des missions à venir**

#### **IASI-NG**

L'objectif de l'instrument IASI-NG est d'améliorer notre connaissance de la structure verticale des variables chimiques et climatiques de l'atmosphère, en particulier la répartition verticale de la température, de la vapeur d'eau et des espèces clés pour l'étude de la pollution et du climat (aérosols et gaz). Cet objectif permettra en outre d'obtenir de meilleures mesures de ces diverses variables à proximité de la surface, ce qui fait défaut actuellement avec l'instrument IASI.

Il est indéniable que les paramètres visés, de surcroît dans le contexte opérationnel du programme EPS-SG d'EUMETSAT qui permet d'assurer une longue série de mesures, sont essentiels pour étudier l'interaction entre l'évolution de la composition chimique de l'atmosphère et le changement climatique à l'échelle globale, donc de faire du suivi climatique, de la chimie atmosphérique et de la pollution.

C'est d'ailleurs à ce titre que la mission a été proposée lors du dernier Appel à idée du CNES en 2008. La mission a été fortement soutenue par le groupe « Atmosphère » du TOSCA lors de l'exercice de prospective qui a eu lieu en 2009 et qui s'est conclu par le séminaire de restitution de Biarritz. Le

groupe « Atmosphère » a notamment mis l'accent sur le fait que les objectifs scientifiques ambitieux proposés par les porteurs du projet étaient tout à fait novateurs et qu'ils apportaient une réelle plus-value intéressante pour la communauté française et pour le CNES, par rapport à une mission récurrente dédiée à la Prévision Numérique du Temps (PNT). Il est toutefois important de noter qu'il y a une forte synergie entre les objectifs accrus en termes de PNT (meilleures précisions sur les profils de température et vapeur d'eau) et ceux nécessaires à un suivi du climat et de la chimie proche de la surface.

Pour atteindre les objectifs scientifiques visés, l'équipe scientifique a proposé le développement d'un spectromètre à transformée de Fourier de type IASI, mais avec résolution spectrale au moins deux fois meilleure et un bruit radiométrique réduit d'un facteur 2. Le point crucial de cette mission IASI-NG se trouve dans le défi technologique pour améliorer la résolution verticale et la précision de restitution des paramètres, afin de mieux isoler les différents processus (notamment dans la couche limite) et de mieux séparer la contribution des espèces étudiées. IASI-NG est destiné à être embarqué sur la prochaine génération des plateformes polaires d'EUMETSAT, MetOp-SG du programme EPS-SG. Il a été envisagé de faire voler des instruments IASI au travers de l'initiative américaine concernant le programme météo en orbite polaire qui doit succéder à NPOESS, le programme JPS de la NOAA, ce qui viendrait renforcer la couverture temporelle (ce projet est abandonné pour l'instant).

La communauté scientifique française qui soutient le projet IASI-NG relève de différents laboratoires qui apportent chacun leur savoir-faire spécifique à la mission et partagent un besoin commun pour la haute résolution spectrale dans l'infrarouge thermique. Cette communauté est solide, basée sur l'héritage de IASI, et reconnue nationalement et internationalement pour son excellence scientifique dans le domaine. Deux membres du groupe français font partis du PMET (Post-EPS Mission Expert Team).

En 2009-2010 deux industriels ont mené des études de Phase A, en parallèle, et proposé un concept instrumental différent afin de réaliser la compensation de champ devenue indispensable du fait des améliorations de performances visées par IASI-NG. Les deux solutions nominales sont innovantes et présentent des challenges techniques. Elles permettent de répondre aux attentes des scientifiques puisqu'elles sont globalement conformes au niveau « Breakthrough » du Mission Requirement Document .

Les solutions instrumentales proposées par les deux industriels pour concevoir l'instrument IASI-NG permettent de répondre aux objectifs ambitieux, en termes de capacités à tenir les spécificités (résolution spectrale et bruit radiométrique améliorés d'un facteur 2 par rapport à IASI). Ceci est atteint pour un coût de mission IASI-NG = IASI +~20%. Les pistes de relaxation envisagées par le CNES n'ont pas conduit à des réductions de coût significatives.

***Fin 2011, le TOSCA a estimé à partir des différents documents mis à disposition que la faisabilité de la mission IASI-NG telle que spécifiée par les Pls était avérée et a recommandé au CPS de poursuivre le développement de la mission.***

Le sondage infrarouge au nadir est aujourd'hui pour la France une filière d'excellence scientifique et technique. Une communauté forte, structurée, diversifiée et reconnue internationalement s'est fédérée autour des projets IASI et IASI-NG.

### **MICROCARB**

MICROCARB est destiné à l'évaluation de la concentration de la colonne atmosphérique du CO<sub>2</sub> à partir de mesures de rayonnement passif dans le proche et moyen IR (0,7 µm, 1,6 µm et 2,2 µm). Cette mesure est entre autres possible grâce à une fonction de poids pratiquement homogène sur la

colonne d'air. MICROCARB est destiné, en premier lieu, à la mesure des concentrations de CO<sub>2</sub> afin de déterminer les flux de CO<sub>2</sub> en particulier sur les continents et au-dessus de la végétation, à partir d'une assimilation dans un modèle. Ce sont avant tout les flux naturels qui sont visés et surtout le suivi de ces flux afin de mieux comprendre les mécanismes qui permettent à la biosphère, à l'heure actuelle, de jouer le rôle de puits de carbone anthropique.

Ces objectifs scientifiques passent par une mesure précise et non biaisée de la colonne de concentration du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Une précision de 0.3 ppmv (0.25%) est visée sur la concentration moyenne de CO<sub>2</sub>. La démarche proposée (on mesure des concentrations, mais on veut obtenir des flux) nécessite également l'utilisation d'un modèle de transport qui soit le plus fiable et crédible possible. Il est absolument nécessaire de bien maîtriser la composante « transfert radiatif » du projet car elle est cruciale puisque l'instrument va utiliser une technique d'absorption différentielle du rayonnement passif dans le domaine solaire.

Le paysage international est déjà dense afin de répondre aux attentes de la communauté scientifique et des gouvernements sur les questions concernant le CO<sub>2</sub>. Le satellite GOSAT de la JAXA est dans l'espace depuis 2009. OCO2 sera lancé par la NASA vers 2014 et l'ESA a récemment sélectionné CARBONSAT dans le cadre de l'EE-8, lancement prévu d'ici 2022. Dans le cas du projet MICROCARB, l'accent est clairement mis sur la volonté de concevoir un démonstrateur « peu coûteux », ce qui permettrait ensuite d'envisager une constellation (~ 4 satellites en orbite) et le suivi à long terme des flux de CO<sub>2</sub> aux échelles régionales.

La mission MICROCARB devrait être complémentaire aux missions GOSAT (JAXA) et OCO2 (NASA). Pour renforcer ce dispositif, une nouvelle mission sur le suivi de flux de CO<sub>2</sub> n'a de sens qu'au niveau européen. Il faut donc adopter une démarche volontariste conduisant à la fusion, si elle est possible, des projets CARBONSAT et MICROCARB afin d'augmenter les chances d'avoir une mission Européenne pour la mesure du CO<sub>2</sub> pour la prochaine décennie.

Cette mission est en phase A au CNES depuis fin 2010 et l'étude doit se poursuivre jusqu'à début 2014. Le périmètre de la phase A porte sur la consolidation du besoin mission, la définition système et le choix du concept instrumental optimal pour un emport à bord d'un microsatellite de la gamme Myriade Evolution. Le (PASO du ?) CNES a engagé début 2011 des études de phase A sur la mission MicroCarb. L'objectif de ces études est de démontrer la faisabilité d'une mission de mesure du CO<sub>2</sub> atmosphérique compatible avec un microsatellite de la gamme Myriade Evolutions.

Un point clé tenu en octobre 2011 avait permis de retenir un Spectromètre à Réseau Dispersif comme concept instrumental de référence. Ce concept a fait l'objet depuis d'une phase de consolidation industrielle. Des activités ont été également menées sur la définition du système, le développement d'outils d'inversion, le simulateur instrument et sur la maquette d'ingénierie instrument.

L'intérêt premier de mener la phase A de MICROCARB reste de permettre à la communauté française de se structurer sur la problématique des flux de CO<sub>2</sub> à travers un projet qui intègre les observations spatiales, le transfert radiatif, les observations sols et les modèles de transports. Les scientifiques de la mission MICROCARB sont déjà impliqués dans les autres missions à venir (OCO2 et CARBONSAT) et l'acquis du groupe français pourra être exploité dans le contexte de ces autres missions, même si MICROCARB ne se fait pas. Les forces scientifiques actuellement mobilisées pour cette mission sont principalement au LSCE et plus marginalement au LMD, LISA et LATMOS.

***Les propositions faites en février 2011 en termes de stratégie restent d'actualité :***

- ***poursuivre et consolider la phase A de MICROCARB qui doit aboutir mi 2014,***
- ***attendre la fin de la phase A de CARBONSAT pour connaître le concept qui sera retenu par l'ESA***
- ***conclure ensuite sur l'intérêt d'effectuer ou pas une phase B pour MICROCARB et développer une maquette aéroportée, afin de vérifier la solidité du concept retenu et***

## ***des algorithmes d'inversion***

### **MERLIN**

Le système d'observation actuel du CH<sub>4</sub> repose sur des tours instrumentées peu nombreuses, des spectromètres à transformée de Fourier (SCIAMACHY, MIPAS/ENVISAT et TANSO/GOSAT) et des mesures aéroportées. Les instruments spatiaux mesurent le rayonnement solaire (il sont donc limités en latitudes) ou Infrarouge Thermique et sont des concepts volumineux.

MERLIN est destiné à la mesure de CH<sub>4</sub> via un système lidar DIAL à la longueur d'onde de 1,64 μm. La mission est dédiée à une meilleure compréhension des flux de méthane à la surface et en particulier à la détermination des sources de CH<sub>4</sub>. Le rapport de mélange du CH<sub>4</sub> en air sec puis les flux de CH<sub>4</sub> sont obtenus à partir de la mesure de l'épaisseur optique d'absorption par méthode différentielle sur laquelle la précision attendue est au minimum de 2% en erreur aléatoire et 0.2 % de biais. Comme pour la mission MICROCARB la démarche proposée (on mesure des concentrations, mais on veut obtenir des flux) nécessite l'utilisation d'un modèle de transport qui soit le plus fiable et crédible possible. Il est également nécessaire de bien maîtriser la composante « transfert radiatif » du projet car elle est cruciale.

MERLIN est une mission proposée dans le cadre d'une initiative franco-allemande pour le climat ; le lidar est allemand (contribution du DLR) et la plateforme française, une plateforme Myriade Evolution du CNES. Au CNES cette mission est inscrite dans le PIA (au titre du soutien à la filière Myriade Evolution). Le lancement de MERLIN est prévu d'ici 2019. La mission est conçue pour durer 3 ans + 1 ans de prolongation possible. Cette mission a été en phase A (faisabilité technique) au CNES de début 2011 jusqu'à l'été 2012. La phase B (définition préliminaire du système) a débuté à l'automne 2012 suite aux discussions avec le partenaire allemand sur les modalités de coopération pour cette nouvelle phase. Elle doit se poursuivre jusqu'à mi 2015.

Parmi les points forts de la mission MERLIN il faut mentionner :

- l'expertise « lidar » qui se trouve dans les laboratoires français et qui est reconnue internationalement. Elle a conduit à plusieurs propositions de lidar spatiaux ces dernières années (par exemple A-SCOPE en 2005, EXCALIBUR en 2009). L'équipe lidar du LMD a évidemment l'expertise pour jouer un rôle dans le développement de l'instrument allemand.
- la spectroscopie du méthane (cette dernière n'apparaît cependant pas comme clairement identifiée dans les documents du groupe mission – quel est l'intérêt de mettre ce commentaire ??)
- l'expertise sur l'analyse des colonnes verticales pour remonter au flux de surface (CEA/LSCE). L'implication du LSCE est incontournable pour passer des niveaux 3 (colonnes de CH<sub>4</sub>) au niveau 4 (flux de surface) et justifie pleinement le développement d'un simulateur des mesures de flux.

Depuis 2011 le groupe « Atmosphère » a encouragé la poursuite de la mission de MERLIN car (1) la mission pourrait permettre de lever le verrou scientifique lié à la variabilité spatiale et temporelle des flux de CH<sub>4</sub> à l'échelle globale, (2) l'expertise des équipes de lidaristes français est importante et doit être soutenue, (3) les services de recherche et développement du CNES doivent s'impliquer dans le développement des lidars et cela doit être encouragé. Le groupe « atmosphère » du TOSCA a estimé en effet qu'il y a un risque majeur à terme de ne plus avoir de filière industrielle « lidar » en France si le CNES ne s'impliquait pas dans la conception de lidar spatiaux. Cependant, la position du CNES, qui consiste à proposer une plateforme pour embarquer un lidar étranger, n'est pas tenable à moyen-terme, même si elle a tout de même permis aux collègues lidaristes français de participer à des groupes missions par le passé.

Il est néanmoins rassurant de constater que, si le DLR est responsable *in fine* de la définition de l'instrument et l'élaboration du processeur des niveaux 1 (A & B), il est clairement acté que cela



résulte d'une discussion en amont des solutions proposées et des prototypes/simulateurs développés en France et Allemagne.

Il a été convenu de mettre en place un Groupe de travail franco-allemand pour le suivi de la définition de l'instrument pendant la phase B (dans un cadre formel et régulier). Le fonctionnement de ce groupe au cours de la phase B préfigure les nécessaires synergies franco-allemandes en amont des décisions qui sont prises sous la responsabilité d'une des 2 agences

## **1-D STRUCTURATION DE LA COMMUNAUTE**

### 1) Les Pôles Icare et Ether

#### **Le Pôle thématique ICARE (<http://www.icare.univ-lille1.fr>)**

Le Pôle thématique ICARE a pour vocation de soutenir la production et la distribution des produits géophysiques en relation avec les nuages, les précipitations, les aérosols et le rayonnement. Les données et produits hébergés par ICARE sont utilisés par une large communauté.

Le Pôle ICARE est composé de deux Centres d'Expertise Scientifiques (l'IPSL et le LOA) et d'un Centre de Traitement et de Gestion des Données, le CGTD ICARE, situé à l'Université Lille 1. Le CGTD est une UMS (CNES, CNRS, Conseil régional Nord-Pas-De-Calais, et Université de Lille) constitué d'un effectif de 14 personnes. Il fournit d'une part des services de gestion et de traitement de données, d'autre part des services de développement pour élaborer des chaînes de traitement en collaboration avec les scientifiques, ou développer des services facilitant l'accès aux données et leur utilisation.

Le centre ICARE a acquis et déployé dès 2005 un important système informatique capable d'archiver et traiter les données des missions spatiales d'observation de l'atmosphère utilisées par les acteurs et les utilisateurs du pôle ICARE. Le CGTD ICARE possède en 2013 une capacité de stockage de 1200 Téra-octets et une puissance de calcul de 60 serveurs totalisant 400 cœurs de calcul.

#### **Quels données et services en 2013 ?**

ICARE collecte de façon routinière les données d'environ 25 missions spatiales provenant d'une quinzaine de centres fournisseurs distants. Au total, plus de 250 produits différents sont ainsi collectés en permanence, parmi lesquels les produits des missions de l'A-Train (PARASOL, CALIPSO, CLOUDSAT, MODIS, etc.), l'ensemble des satellites géostationnaires météorologiques (METEOSAT, GOES, MTSAT), ainsi qu'un grand nombre de satellites défilants (AMSU, TMI, Megha-Tropiques, etc.). Dans le cas particulier des missions PARASOL et Megha-Tropiques, le CNES a confié au centre ICARE le développement du segment sol scientifique de la mission, c'est-à-dire l'ensemble du développement des chaînes de traitement, de la production opérationnelle des produits, et des services de diffusion des données. Dans le cadre de la mission CALIPSO co-pilotée par le CNES et la NASA, ICARE a la responsabilité du développement des chaînes de traitement françaises et de la rediffusion des produits générés par la NASA. Au-delà des chaînes de traitement opérationnelles, ICARE offre également des services aux utilisateurs qui souhaitent bénéficier d'une aide particulière pour accéder à certaines données ou encore réaliser des traitements lourds sur des jeux de données présents à ICARE. Le système de production ICARE héberge 90 chaînes de traitement différentes qui génèrent de façon routinière 575 produits distincts. Enfin, ICARE offre à ses utilisateurs la possibilité de disposer de ressources de calcul sur des serveurs ouvrant l'accès à l'ensemble de l'archive, de manière à ce qu'ils puissent développer et tester des traitements sur de longues séries temporelles en complète autonomie. ICARE développe aussi de nombreux outils et services qui facilitent l'utilisation des données de l'archive.

ICARE a également développé une expertise dans la gestion des bases de données d'observation au sol, notamment depuis 2011 avec le développement du SOERE ORAURE dédié à l'observation des aérosols, et dans lequel ICARE est le centre d'archivage et de traitement des données. ICARE apporte aussi un soutien similaire au SOERE ROSEA dédié à l'observation de l'eau dans l'atmosphère. ICARE centralise également les données des contributeurs français au projet européen ACTRIS pour servir de relais au NILU qui gère la base de données européenne et faciliter l'accès aux données au niveau de la communauté française. ICARE apporte également un soutien au projet MISTRALS pour faciliter l'accès aux données spatiales sur la région méditerranéenne. Enfin, dans la cadre de l'Equipex IAOOS, ICARE a la responsabilité de la collecte, l'archivage, le traitement, et la diffusion des observations réalisées par les plates-formes flottantes déployées dans l'océan arctique par le projet.

Sur la scène européenne, ICARE s'investit également dans le projet MACC en fournissant des produits aérosols dérivés de SEVIRI en quasi-temps réel pour permettre leur assimilation par le modèle de prévision des aérosols développé par ECMWF. Dans le cadre du programme GMES-MDD, ICARE développe des produits opérationnels générés en quasi-temps réel à partir des observations sol pour permettre leur utilisation par des acteurs opérationnels tels que MACC dans le contexte de la préparation de GMES/Copernicus. ICARE s'investit également dans le projet CCI de l'ESA, d'une part en fournissant plusieurs produits aérosols (PARASOL, MERIS) pour leur comparaison aux autres produits proposés par les partenaires du projet, d'autre part en offrant au projet CCI un service d'hébergement des produits et un espace de travail privé pour les différents partenaires du projet.

#### Les interactions avec le TOSCA

Les activités du Pôle ICARE sont principalement centrées sur les missions spatiales et les points d'entrée vers ICARE et le CGTD sont de deux types. Soit par les missions nominales (PARASOL, Megha-Tropiques, CALIPSO-IIR...) soit par les projets utilisateurs. Si les équipes associées aux missions nominales sont des utilisateurs naturels du CGTD, les projets utilisateurs sont soumis au Comité des Utilisateurs (CU) pour être approuvés. Le TOSCA n'a pas de rôle spécifique vis-à-vis d'ICARE ou du CGTD, ni en terme de contrôle ni en terme d'évaluation. Il en est de même d'ailleurs vis-à-vis du Pôle ETHER (voir plus loin).

Au cours du dernier mandat du TOSCA, celui-ci a, à diverses reprises, recommandé que des demandes de soutiens, soit sous la forme de CDD soit sous la forme de sous-traitance, soient redirigés vers ICARE et plus spécifiquement le CGTD pour que les tâches considérées y soient effectuées. Malheureusement, il est rare que le comité bénéficie d'un retour sur ces actions. Il est difficile de savoir si la recommandation a été suivie ou si la requête a été positivement reçue au niveau du CU et enfin si elle a été traitée par le CGTD. Pour les missions nominales, le retour est un peu plus aisé car les actions sont plus suivies dans le temps.

Dans l'ensemble, il apparaît que le retour d'expérience des utilisateurs du Pôle ICARE est extrêmement variable selon le type de tâche et leur complexité. De façon très schématique, pour toute la partie archivage et collection de données, ainsi que pour la partie distribution, il ne semble pas qu'il y ait de problème et l'ensemble des utilisateurs est satisfait. Pour la partie traitement, les choses sont probablement plus nuancées. En effet, les systèmes complexes demandant une forte interaction avec les centres d'expertise ou les utilisateurs peuvent poser des problèmes. La complexité de la phase de développement va impacter la complexité de la phase d'exploitation ainsi que la complexité des procédures à mettre en œuvre pour vérifier et qualifier les chaînes de traitement.

Vu depuis le TOSCA le bilan global du Pôle ICARE est positif. Afin d'améliorer le suivi des actions à l'interface entre le TOSCA et le pôle ICARE, une suggestion est d'ajouter explicitement dans le document « appel à propositions de recherche » du CNES, une rubrique « soutiens ICARE demandé/obtenu » avec quelques éléments d'information (durée du travail, volume, période etc...) à compléter par le proposant.

### **Le pôle thématique ETHER (<http://www.pole-ether.fr>) :**

Au service de la communauté scientifique française (et internationale), le pôle de compétence thématique Ether couvre les domaines d'étude de la composition et de la chimie atmosphérique, depuis la basse troposphère jusqu'à la stratosphère. Il prend en compte les moyens de mesure embarqués à bord de satellites, de ballons, d'avions, ainsi que les expériences au sol. Les activités de modélisation font aussi partie de son périmètre. Le pôle thématique Ether, opérationnel depuis novembre 2000, met à disposition de la communauté scientifique, les informations, produits et services à valeur ajoutée relatifs à la composition et à la chimie de l'atmosphère.

Ce projet s'inscrit dans le cadre d'un partenariat avec le CNRS-INSU régi par une convention CNES/CNRS/INSU établie jusqu'à fin décembre 2015. Les décisions stratégiques et financières sont prises au sein d'un Comité directeur CNES-CNRS qui contrôle les moyens issus des deux organismes, en s'appuyant sur des recommandations émises par un comité d'utilisateurs.

Ether est composé de Centres d'Expertises Scientifiques (CES) situés dans divers laboratoires de recherche et, depuis le premier semestre 2011, de deux Centres de Traitement et de Gestion des Données (CGTD). Les activités Ether sont réparties sur ces deux CGTD l'un installé dans les locaux de l'IPSL (depuis l'origine du pôle) et un deuxième CGTD récent situé à l'OMP, qui assurent la maîtrise d'ouvrage tandis que la cohérence d'ensemble, avec le suivi du plan d'activité, est assurée par une "cellule de coordination". Ether bénéficie du cluster de calcul IPSL CICLAD, qui permet de stocker les données et de faire tourner les codes de traitement localement.

### **Quels données et services en 2013 :**

- Le CGTD IPSL récupère les produits de niveau L1C (radiance) issus de la mission satellite IASI sur MetOp-B via Eumetsat, en plus de ceux fournis par IASI/MetOp-A. Dans un premier temps ces données IASI-B ont été réservées à l'équipe du LMD qui participait, en complément des équipes CNES, à la Calibration/Validation des données. Les produits de niveau 2 issus de différentes chaînes de traitement (Eumetsat pour H<sub>2</sub>O et T, ULB/LATMOS pour CO) sont aussi distribués et peuvent être visualisés à l'aide des « quick-looks ». A noter la mise à disposition de données complémentaires à IASI : AMSU, HMS et HIRS pour l'inter comparaison et le suivi avec IASI d'une part et GOME2 pour des traitements d'inversion multi-spectrale par couplage IASI (TIR)/GOME2 (UV VIS) d'autre part. Pour la suite, il est question de distribuer en avance de phase par rapport aux produits officiels Eumetsat, des produits L2 issus des algorithmes du LATMOS/ULB, et aussi des produits originaux (pas encore prévus dans la distribution Eumetsat) comme l'ammoniac, l'acide formique, le méthanol, O<sub>3</sub>, GOME2/IASI, les aérosols.

- Les produits GOSAT niveaux 1 et 2 (CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>) des instruments TANSO-FTS (Spectromètre à Transformée de Fourier) et TANSO-CAI (Imageur nuages et aérosols) sont reçus « on-line » nominalement, depuis mi-décembre 2012. Par ailleurs les produits GOSAT relatifs à l'année 2010, retraités avec la version actuelle ont aussi été récupérés « off-line ». Dans le cadre d'un accord avec la JAXA (MOU), l'ensemble de ces données est mis à disposition de l'équipe dédiée LATMOS/IPSL afin de proposer des améliorations suite aux inter-comparaisons avec IASI. Ces données GOSAT sont également distribuées plus largement à la communauté scientifique, notamment dans le cadre de la validation des algorithmes d'inversion développés dans la cadre de futures missions CO<sub>2</sub> ou CH<sub>4</sub> (MICROCARB, OCO2, Carbonsat..).

- Plusieurs types de données issues de campagnes ou de services d'observations labélisés INSU sont gérés par ETHER : données de campagnes Ballon (ANR TROPICO et « Enriched»), ECCAD : Emissions of atmospheric Compounds & Compilation of Ancillary Data, IAGOS : In service Aircraft for a Global Observing System, NDACC : Network for Detection of Atmospheric Composition Change.

- Plusieurs services à valeurs ajoutées issus d'études en laboratoires ou de modèles : base de données cinétiques et photochimiques internationale IUPAC (depuis juin 2013 en accès libre sur portail Ether), TAPAS: un service en ligne gratuit utilisé par la communauté astronomique, qui permet de filtrer le spectre observé par le spectre de transmission simulé pour obtenir le spectre cible "hors de l'atmosphère", Girafe : logiciel permettant le calcul de prévision de trajectoires de panaches de feux et autres composés, MIMOSA : modèle d'advection permettant le calcul et la

visualisation de champs de vorticité potentielle (analyse et prévision) utile à la prévision de lâcher de ballon, REPROBUS : modèle 3D de chimie-transport calculant l'évolution temporelle de 55 espèces chimiques dont gaz traces, ...

#### Quelle évolution envisagée :

Les statistiques d'accès et de téléchargement des produits Ether, qui ont été mises en place récemment, démontrent que le pôle remplit un service apprécié par la communauté scientifique. La structure et les aménagements à mettre en place pour répondre au contexte européen et international en mutation autour du thème du changement climatique et des implications atmosphériques restent à définir.

Le pôle Ether participe ou a participé, avec une plus ou moins grande implication, aux projets européens : IAGOS-ERI/FP7, MACC/FP7, MEGAPOLI, GEOMON. Dans le projet de service GMES (Copernicus) MACC II, le pôle Ether représenté par le CNRS/INSU (le CNES est représenté comme tierce partie) participe au travers de son soutien aux projets IASI, IAGOS et ECCAD.

#### Les interactions avec le TOSCA

Les missions spatiales actuellement opérationnelles et dans le périmètre d'activités du Pôle ETHER sont peu nombreuses (IASI, GOSAT) mais représentent des volumes de données très importants. Les activités et campagnes « ballons » représentent une part substantielle de l'activité du Pôle mais ne sont plus suivies par le TOSCA depuis plus de 4 ans et relèvent du CSTB. Par conséquent le groupe « Atmosphère » du TOSCA a peu d'interactions directes avec le Pôle ETHER.

#### Remarque générale concernant les pôles

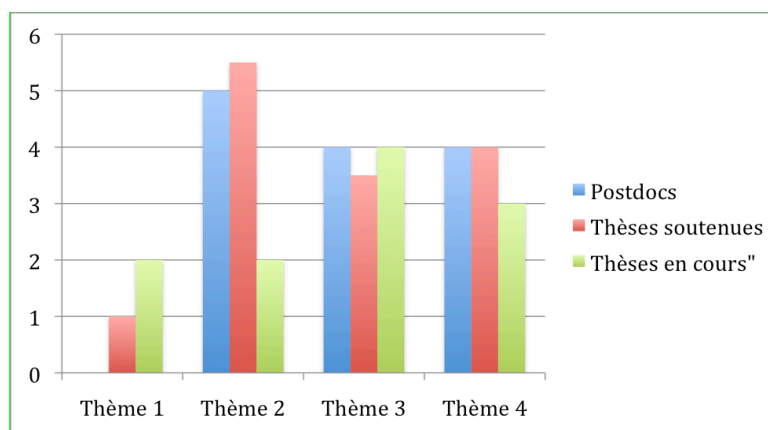
Dans le cadre des réflexions nationales multi organismes sur les pôles de données, il a été proposé de rassembler les 2 pôles atmosphère ETHER et ICARE afin d'offrir un système plus intégré et cohérent à la communauté scientifique et aux utilisateurs. Ce chantier devrait être mis en place courant 2014, en essayant de tirer profit des recommandations du séminaire de prospective scientifique et de l'évolution du contexte européen (ESA, Eumetsat, DLR,..).

#### 2) Les propositions thématiques coordonnées (IASI, MT, EECLAT, ADM-AEOLUS, IASI-NG)

Depuis quelques années, afin de répondre à un ensemble de problématiques scientifiques sous-tendues par la mise en orbite de différentes missions spatiales, les équipes françaises se sont associées et ont répondu de manière coordonnée aux appels à propositions de recherche du CNES. C'est le cas notamment pour les activités menées autour des missions en cours IASI, Megha-Tropiques et CALIPSO et autour des missions à venir EarthCare, ADM-AEOLUS et IASI-NG. L'intérêt principal attendu de ces propositions thématiques coordonnées est d'amener toute la communauté intéressée par une mission spatiale, à identifier en commun les axes et les objectifs scientifiques prioritaires, à y travailler ensemble en associant toutes les compétences nécessaires et disponibles dans les différents laboratoires, et à ainsi valoriser au maximum les données spatiales et l'expertise française dans le domaine. Le retour d'expérience sur la mise en place de ces propositions thématiques multi laboratoires est mitigé. Certaines propositions ne sont pas suffisamment coordonnées pour aboutir à la mise en avant de priorités scientifiques qui doivent se décliner en demandes de moyens financiers et humains prioritaires. Le travail d'évaluation de ces propositions par le groupe Atmosphère devient alors très difficile, voire impossible. Il est urgent de réfléchir en commun avec les organismes qui sont souvent à l'origine de ces demandes de regroupement, avec les responsables des autres comités d'évaluation auxquels sont soumis ces projets (PNTS, LEFE par exemple) et avec les responsables des projets eux-mêmes à l'intérêt de poursuivre dans cette voie.

#### 3) Ressources Humaines (Doc, Postdoc, CDD)

Le graphe ci-dessous présente le nombre de thèses et de postdoctorats financés sur la période 2009-2012 par le CNES en accompagnement des projets scientifiques relevant du spatial dans le domaine de l'atmosphère (hors allocations de thèse R&T CNES). Pour certains ces soutiens ont bien entendu débuté avant la période considérée ou se termineront après cette période. La répartition est effectuée en fonction des quatre thématiques scientifiques dont le bilan est présenté en section 1-B. Thème1 = « Gaz à effet de serre », Thème 2 = « Interactions Aérosols-Nuages-Rayonnement », Thème 3 = « Cycle de l'eau, phénomènes extrêmes, météorologie », Thème 4 = Le rôle de la chimie sur le changement climatique et la qualité de l'air ». Certaines thèses ou postdoctorats soutenus peuvent relever de deux thèmes.



Dans le domaine de l'Atmosphère et en moyenne sur l'ensemble des thèmes, le CNES a cofinancé 2 à 3 allocations de recherche en thèse et a financé 1 à 3 postdoctorats par an, ces quatre dernières années. Le bilan d'attribution des financements de postdoctorat n'est pas satisfaisant comparé à celui des autres volets thématiques du TOSCA. Les raisons principales identifiées sont que les dossiers de candidature étaient souvent moins étoffés et les candidats mal ou peu préparés à l'entretien avec les membres de la commission de sélection.

Hormis pour le thème 1 on constate que la répartition des allocations de thèses et de postdoctorats est équilibrée sur l'ensemble des thèmes, ce qui est cohérent avec la nécessité de soutenir les laboratoires qui ont travaillé sur les missions en cours ou engagées depuis quelques années sur ces thèmes (A-Train, IASI, Megha-Tropiques, ...). Le thème 1 est plus récent, les missions spatiales encore peu nombreuses, mais il n'a pas été oublié ces deux dernières années.

On peut mentionner que le CNES est aussi aujourd'hui un des rares organismes qui accompagne les recherches de la communauté scientifique en offrant la possibilité aux laboratoires de recruter des ingénieurs contractuels. Au cours de la période 2009-2012, le groupe « Atmosphère » a recommandé le recrutement ou le renouvellement d'environ 20 postes d'ingénieurs par an dans les laboratoires.

## 1-E CONCLUSION

Durant la période 2009-2013 la communauté « Atmosphère » française, soutenue à la fois par le CNES et les différents organismes de tutelles, a réussi à mener des activités de recherche fructueuses s'appuyant sur plusieurs missions spatiales déjà engagées, et à initier la plupart des nouveaux projets qui avaient été affichés dans son document de prospective rédigé pour le séminaire de Biarritz.

L'engagement que le CNES avait pris, à travers le TOSCA, d'assurer l'accompagnement des communautés travaillant sur les missions en exploitation (A-Train/PARASOL/CALIPSO, IASI-A) ou qui ont débuté durant la période 2009-2013 (Megha-Tropique, IASI-B) a été tenu. Il a permis d'obtenir de nombreux résultats scientifiques significatifs qui sont repris dans la section 1-B de ce document. On notera que pour plusieurs de ces missions la durée d'exploitation a largement dépassé la durée

nominale initialement prévue, permettant ainsi à la communauté d'atteindre des objectifs qu'elle n'avait pas nécessairement anticipés.

Comme pour la plupart des missions d'envergure précédentes, le soutien à l'accompagnement des missions qui étaient à venir mais déjà engagées en 2009 (EarthCare, ADM-AEOLUS) s'est mis en place via un soutien à des propositions thématiques coordonnées qui ont été des éléments importants de la structuration de la communauté autour de ces futures missions. Néanmoins, comme cela a été mentionné dans la section 1-D, le retour d'expérience sur la mise en place de ces propositions thématiques multi laboratoires est mitigé. Un axe de réflexion proposé par le groupe « Atmosphère » est d'essayer à l'avenir de mieux définir les rôles et soutiens respectifs du CNES et des organismes vis-à-vis de la définition des algorithmes et produits scientifiques et opérationnels, de leur évaluation et de la CAL/VAL, de l'exploitation scientifiques de ces produits et de leur évolution possible. Les rôles respectifs des PI « mission » et des porteurs de projet scientifiques doivent être intégrés dans cette réflexion.

Un rapide tour d'horizon des priorités qui avaient été affichées par le groupe en 2009 permet de constater, qu'au delà du soutien aux diverses missions listées ci-dessus, la plupart des objectifs définis pour le moyen ou le long terme ont été atteints :

- les instruments IASI-NG et 3MI ont été sélectionnés dans le cadre de la mission EPS-SG d'EUMETSAT qui devrait être lancée vers 2020. L'emport sur les satellites opérationnels défilants d'EUMETSAT assure à la communauté scientifique une continuité de mesure sur près de 20 ans pour la chimie atmosphériques et les aérosols.
- La phase A de l'instrument MicroCarb a abouti à un concept instrumental très prometteur pour obtenir les flux naturels de CO<sub>2</sub> aux échelles régionales. La fin de phase A prochaine de l'instrument CarbonSat, sélectionné par l'ESA, devrait être une des étapes importantes pour définir ce que sera la suite à ce projet CNES.

Lors des deux derniers séminaires de prospective du CNES, le groupe « Atmosphère » a insisté sur la forte nécessité de développer et consolider l'expertise lidar en France en coordination entre les laboratoires, le CNES et les industriels. Ce besoin devait permettre notamment à la communauté française d'être à l'avenir force de proposition pour une mission multi-capteurs combinant lidar à balayage, radar doppler, radiométrie submillimétrique, etc...pour caractériser l'ensemble des particules atmosphériques.

Le groupe avait également souligner l'importance de développer l'expertise lidar puisqu'elle pouvait permettre d'acquérir un savoir-faire à plus long terme sur les nouvelles technologies prometteuses plutôt fondées sur des mesures actives (lidars DIAL) pour documenter notamment le cycle du carbone (flux de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) et la vapeur d'eau. Si la mission MERLIN permet de répondre à un objectif scientifique important (flux de CH<sub>4</sub>), il est peu probable que la collaboration franco-allemande mise en place dans ce contexte permette de répondre aux attentes de la communauté concernant le développement et le soutien de l'expertise lidar en France.

Depuis le séminaire de 2009 on peut regretter que très peu de nouveaux développements instrumentaux n'aient été réalisés, en particulier pour répondre au besoin de mettre en orbite une mission large spectre (actif, passif, de l'UV au submillimétrique) comme cela avait été envisagé. Le TOSCA a tout de même soutenu un certain nombre d'activités technologiques ou des études prospectives, comme celles démontrant la pertinence de la radiométrie submillimétrique passive pour la caractérisation des nuages de glace et de la pluie, ou la phase 0 du projet BOITATA et du radar associé. Il faut néanmoins souligné que jusqu'à présent aucune convergence n'a émergé entre les thématique nuages, précipitations et rayonnement, peut-être en partie parce que la communauté était encore trop impliquée dans les missions en cours (A-Train, Megha-Tropiques, ...).

Le séminaire de Biarritz avait également été l'occasion de rappeler le besoin à l'horizon 2025 d'une mission géostationnaire chimie pour suivre l'évolution diurne des polluants, qui n'est pas couverte par les instruments IASI. La mission MAGEAQ, même si elle n'a pas été retenue suite à l'appel « Earth Explorer 8 » de l'ESA, a contribué à structurer la communauté scientifique autour de cet objectif qui reste d'actualité.