

Prospective CNES 2014

Bilan Surfaces Continentales 2009-2012

3. SURFACES CONTINENTALES

3.1 INTRODUCTION

3.1.1 Périmètre et enjeux 2009

Le contexte de la prospective 2009 était déjà marqué par les grandes questions planétaires du réchauffement climatique, de la sécurité alimentaire, de la crise énergétique, de la dégradation de l'environnement. Comme le mentionnait le rapport du groupe Surfaces Continentales, toutes les recherches menées autour de ces thématiques demandaient une connaissance améliorée du fonctionnement de la biosphère et de son interaction avec l'environnement. Elles reposaient sur des approches complémentaires couvrant une gamme d'échelles spatiales allant du local (lieu privilégié de compréhension des processus) au régional (où s'exprime fortement le poids des actions anthropiques) et au global (indispensable pour le suivi et la prédiction des changements lents). Elles se traduisaient par des efforts accrus d'observation et de modélisation des phénomènes physiques et biologiques impliquant la surface.

Dans ce contexte, les cycles de l'eau et du carbone apparaissaient comme la cible privilégiée des efforts de recherche, dans la mesure où autour d'eux se dessine l'évolution, respectivement, (1) d'une ressource fondamentale dont la plus ou moins grande disponibilité régit la satisfaction directe des besoins humains et les conditions de la production agricole ; (2) d'un élément majeur dans la problématique du changement global, dont le bilan et la dynamique dans la biosphère terrestre (incluant réservoirs et flux) étaient encore très mal évalués.

Aussi les tendances fortes de la recherche sur les surfaces continentales montraient-elles :

- un accent renforcé sur la compréhension des processus (anthropiques, biologiques, physiques, chimiques), de leurs interactions à toutes les échelles et des dynamiques de fonctionnement ;
- une tendance, pour cette raison, à aborder les échelles spatiales et temporelles très fines ;
- un poids important, déjà mis en exergue lors de la prospective de 2004, sur les échelles intermédiaires (paysagères, régionales), lieux privilégiés d'interaction de l'homme avec son environnement ;
- un intérêt évident vers le global et les échelles de temps longues, où l'on cherche à déceler des tendances (intensification des sécheresses, changements phénologiques, déplacement d'espèces...), faire de la prédiction à long terme sous scénarios climatiques et anthropiques, développer des indicateurs et outils d'aide à la décision.

La place de la télédétection apparaissait ainsi comme évidemment fondamentale pour la recherche dans tous ses domaines : actions anthropiques, fonctionnement et dynamique des écosystèmes, interactions surfaces-atmosphère, hydrologie, etc. Elle permet en effet d'abord l'identification d'objets, la cartographie, l'établissement de typologies de surface. Elle produit également de nombreuses variables utilisées dans l'étude du fonctionnement de la végétation, des échanges biosphère-atmosphère, des cycles biogéochimiques : variables radiatives (albédo, émissivité) ; variables liées à l'état de surface (hauteur, rugosité) ou à la structure de la végétation ; variables liées à l'état hydrique et énergétique des surfaces (température, humidité) ; variables représentatives de

la quantité et du type de végétation présente (biomasse, teneur en chlorophylle, fraction de rayonnement utile absorbée...).

3.1.2 Priorités du séminaire de Biarritz 2009

En ce qui concerne les missions spatiales, les priorités affichées en 2009 étaient celles de nouvelles observations qui soient de nature à permettre un bond en avant dans le suivi des surfaces et la modélisation de leur fonctionnement. Le groupe Surfaces Continentales s'était ainsi prononcé clairement pour les deux priorités suivantes :

- à court terme la mission MISTIGRI (priorité 1) pour l'estimation de la température de surface à une résolution spatiale de 50 m, une répétitivité temporelle journalière et l'acquisition simultanée de mesures dans les bandes « visible » et « proche infrarouge » à une résolution spatiale de 20 m (fonctionnement des surfaces, bilans hydriques et énergétiques) ;
- à moyen terme la mission KaRIN/SWOT (priorité 2) pour une meilleure caractérisation des surfaces d'eau libre et leurs variations relatives en hauteur (estimation des débits des grands fleuves).

Deux missions à plus long terme (au-delà de 2020) avaient également été mises en avant :

- une mission géostationnaire visant à répondre à la forte demande en besoin de haute revisite temporelle avec une résolution décamétrique pour l'étude de la végétation et des processus associés ainsi qu'à une meilleure compréhension des processus liés aux risques naturels ;
- une mission Lidar spatial pour la détermination de la structure verticale de la végétation, permettant l'accès à une meilleure compréhension et modélisation du fonctionnement des surfaces.

Au-delà de la définition de ces missions, le groupe avait manifesté son souhait d'un solide accompagnement national aux missions l'intéressant tout particulièrement (Venüs, SMOS, BIOMASS, MISTIGRI, SWOT, etc.). L'esprit de cet accompagnement était de favoriser non seulement la mise à disposition de produits élaborés, mais aussi la structuration des communautés concernées et la progression de travaux méthodologiques et technologiques innovants (par exemple, radar en bande P autour de BIOMASS, mesures d'humidité superficielle à plus fine échelle autour de SMOS, interférométrie large fauchée pour SWOT). Concernant BIOMASS en particulier, mission dédiée à l'estimation de la biomasse globale et à une meilleure connaissance de la composante terrestre du cycle de carbone, un soutien actif était demandé, visant à maximiser les chances de voir cette mission finalement retenue par l'ESA ; elle faisait à l'époque partie des missions choisies pour entrer en phase A.

Enfin, le groupe Surfaces Continentales avait fortement attiré l'attention du CNES sur l'intérêt de la mise en place rapide d'un pôle thématique, capable de jouer un rôle structurant pour la communauté SIC et facilitant son accès à l'information spatiale (données satellitaires, algorithmes de traitement, produits biogéophysiques, méthodes de spatialisation adaptées aux thématiques). Au-delà de ce rôle structurant et incitatif, l'enjeu d'un tel pôle était de donner aux expertises nationales une visibilité à l'échelon européen et de positionner ainsi la communauté scientifique française sur les futurs enjeux européens dans le cadre de Copernicus (ex-GMES), et en particulier la suite du LMCS (Land Monitoring Core Service) après Geoland2.

3.2 LES AVANCEES SCIENTIFIQUES

3.2.1 Cartographie des surfaces

Occupation du sol

Des cartes d'occupation du sol ont été produites à l'échelle d'une petite région à partir de séries pluriannuelles d'images SPOT HRV à 10 m (SPOT-5) et 20 m (SPOT-4), visant à préparer l'arrivée des

données SENTINEL-2. L'aspect novateur de ce travail réside dans la prise en compte, qui semble revêtir un caractère opérationnel, des aspects dynamiques de la végétation dans la cartographie régionale. De manière plus prospective, l'extension de l'analyse spectrale d'objets à l'analyse d'autres propriétés (forme, contour, texture, topologie) a montré, grâce à des descripteurs géométriques et de texture notamment, que l'on pouvait cartographier de façon plus précise l'occupation des sols et suivre leur changement. De telles études valorisent l'analyse spatio-temporelle d'images satellitaires THR (très haute résolution spatiale, environ 2 m), et la prépare à l'utilisation des images PLEIADES.

En ce qui concerne le littoral, il a été montré que l'utilisation de données SPOT et LANDSAT permettait de suivre l'évolution du trait de côte en continuité avec de précédentes études réalisées jusqu'en 2006 (travail sur la morphodynamique du littoral amazonien). Par ailleurs, l'utilisation simultanée de données optiques et radar THR par une approche multi-capteurs et multi-dates a permis de détecter et de cartographier des habitats lagunaires intertidaux et supratidaux.

Topographie des surfaces

La valorisation de données existantes (ERS-1 et ERS-2 /ENVISAT, Icesat) a permis de faire progresser l'altimétrie radar pour la cryosphère. Dans le cadre de la problématique de l'évolution du volume des calottes polaires, et donc du niveau des mers, les actions menées ont également permis de rechercher des algorithmes nouveaux d'exploitation de missions futures (Cryosat-2, SWOT).

A l'occasion de l'Année Polaire Internationale, l'utilisation de données SPOT5 stéréoscopiques a permis de bâtir des MNT (modèles numériques de terrain), mis à disposition de la communauté internationale, qui ont fourni d'intéressants résultats sur les pertes de masse des glaciers d'Alaska, l'évolution des glaciers émissaires du Groënland, ou la vidange d'un lac sous-glaciaire en Antarctique. Ces résultats sont d'une grande visibilité internationale.

Produits biophysiques

Un nombre régulier de propositions a permis d'établir des cartes de variables journalières LAI (indice foliaire) et fAPAR (fraction de rayonnement utile à la photosynthèse) à échelle fine en exploitant la synergie entre réseau de capteurs au sol et images satellitaires à haute résolution (région Crau-Camargue). De même des produits cartographiques LAI et fAPAR élaborés à partir d'acquisitions saisonnières FORMOSAT sur le site de Barrax (Espagne) ont servi à étudier la répétitivité future de Venµs ou SENTINEL-2. Dans le cadre de la préparation de ces missions, un prototype de traitement des données a pu être testé avec les données FORMOSAT2 et LANDSAT, facilitant ainsi l'exploitation des images et, incidemment, réduisant leur coût d'accès. La mise à disposition auprès de la communauté scientifique de nombreuses séries temporelles a permis de réaliser différentes applications thématiques décrites dans ce qui suit.

La préparation de l'exploitation de séries temporelles d'images HR (Venµs, LANDSAT 8 et SENTINEL-2) a été l'occasion d'améliorer les méthodes de traitement de données sur une grande échelle, en affinant la correction atmosphérique, la détection des nuages et la prise en compte des aérosols. La production de cartes d'occupation des sols est programmée, ainsi que celle de variables biophysiques (LAI, albédo, fAPAR, fCover, biomasse, rendement et évaporation) pour estimer les besoins en eau des cultures pour les régions méditerranéennes.

A partir de la production de classifications à haute résolution et de dynamiques temporelles de variables biophysiques à moyenne et haute résolution, un certain nombre d'indicateurs paysagers ont pu être élaborés, permettant de caractériser les paysages agricoles de façon plus riche, sur les deux volets essentiels de la problématique agriculture-paysage-biodiversité : pratiques agricoles et comportements des communautés constituant la biodiversité.

Enfin, une étude de la texture basée sur une analyse bidimensionnelle de Fourier a permis de mesurer le grain de canopée dans les images THR pour l'estimation des paramètres forestiers des peuplements de mangroves de forte biomasse.

Biomasse

La mission originale BIOMASS (radar en bande P), affichée dans les priorités du CNES lors du séminaire de prospective de mars 2009, est dédiée à l'estimation de la biomasse des forêts du globe à forte densité ainsi que celle des stocks de carbone à échelle fine (50-100 m). Le soutien constant du TOSCA, notamment au travers des mesures aéroportées en Guyane du projet TROPISAR, a permis aujourd'hui sa sélection par l'ESA. Cette mission a permis de développer une forte synergie de travail entre les différentes équipes nationales et d'offrir une bonne visibilité internationale de l'expertise des laboratoires.

Structure de la végétation

Dans la perspective d'un futur satellite géostationnaire observant la surface à une résolution spatiale décimétrique, la mesure des propriétés optiques de la surface a été étudiée pour répondre à des configurations géométriques d'observation particulières à l'aide de maquettes 3D DART servant à simuler des paysages naturels et urbains. Ce volet d'étude, qui reçoit un soutien à la fois du CNES et de l'ESA, a su évoluer au cours du temps vers un outil opérationnel de simulation de mesures de satellite géostationnaire tenant compte du bruit du signal de mesure.

L'utilisation de mesures lidar pour améliorer la précision des MNT et caractériser la hauteur et la structure 3D de la végétation a fait l'objet d'efforts pluriannuels qui ont permis de fédérer de nombreuses équipes de recherche. La mesure lidar apporte des informations sur la quantité de végétation selon sa répartition verticale et permet d'éviter la saturation du signal, rencontrée avec d'autres techniques de mesures (optique, micro-ondes), dans l'estimation de la biomasse des forêts tropicales. En effet, les missions spatiales de type ICESat, DESDynI et ICESat-2 ne permettent pas d'accéder à la hauteur du fait de la perte du signal rétrodiffusé par le sol pour des taux de couvert supérieurs à 95%.

L'étude des capacités d'échantillonnage spatial d'un système de télédétection actif lidar à moyenne empreinte (2.4 m) s'est poursuivie de façon constructive et prometteuse. La technique envisagée avec une configuration à deux polarisations croisées quantitatives doit permettre d'étudier l'impact de la résolution horizontale sur la détermination des distributions des hauteurs d'arbre. L'ensemble reste à mûrir pour répondre de façon originale et convaincante aux problématiques de la communauté scientifique.

Un autre projet s'est concentré sur l'analyse d'impact des caractéristiques d'un système lidar spatial (longueur d'onde, taille d'empreinte, énergie incidente, échantillonnage spatial...) sur la dynamique du signal de retour et sur la qualité des paramètres forestiers dérivés des formes d'onde lidar (hauteur, LAI, volume de bois et biomasse aériens).

Il existe maintenant une activité coordonnée autour d'un projet Lidar porté par le CEA, visant au développement d'un prototype lidar spatial embarqué. La poursuite d'un soutien aux mesures lidar à large empreinte requiert probablement une concertation entre le CNES et le CEA.

Propriétés des sols

Le potentiel des données hyper-spectrales est en cours d'analyse afin d'évaluer leur intérêt pour la caractérisation des sols (propriétés pérennes, humidité) et fournir des recommandations sur les spécifications de la mission HYPXIM en termes de résolution spatiale et radiométrique. Les activités dans ce domaine s'appuient sur des campagnes expérimentales regroupant plusieurs laboratoires aux expertises complémentaires.

Des études menées avec un SAR basse fréquence ont montré l'intérêt de ce dernier dans l'étude des zones arides, par exemple pour la détection de zones humides du sous-sol, la cartographie de la paléo-hydrologie et l'archéologie.

3.2.2 Fonctionnement des surfaces

Bilans hydriques et énergétiques

La préparation de la mission MISTIGRI a permis de fédérer la communauté française autour du traitement et de l'assimilation de données infrarouge thermique pour l'estimation des bilans hydriques et énergétiques des surfaces continentales. Plusieurs projets ont permis de définir les besoins en termes d'instrument, que ce soit pour la résolution spatiale (50 m), la fréquence de revisite (1 ou 2 jours pour atteindre une image claire tous les cinq jours) ou l'heure de passage optimale (11h00–12h00) qui permettent la meilleure détermination possible des bilans énergétique et hydrique. Ces projets couvrent aussi le traitement du signal avec en particulier les corrections des effets directionnels et l'évaluation de l'erreur liée à la turbulence atmosphérique sur la mesure de la température de surface, l'impact de l'hétérogénéité des surfaces ou encore le développement de méthodes d'assimilation.

Fonctionnement de la végétation

Les propositions concernant le fonctionnement des écosystèmes ont reposé sur l'étude d'un nouveau concept de mesure Lidar visant à extraire la fluorescence utile pour déduire la photosynthèse de la canopée. Le degré de maturité des projets dans ce domaine s'étant avéré assez variable, on peut penser que cette thématique est appelée à se développer dans le prochain quadriennal. La participation française au projet de mission FLEX (Fluorescence Explorer) porté par l'ESA en témoigne. Pour se développer pleinement, cette thématique nécessite un travail de précision sur les objectifs et la définition des instruments ainsi qu'une meilleure coordination des acteurs à l'échelon national.

Dans le cadre de la préparation des missions SENTINEL-2 et Venùs sont également apparus de nouveaux projets d'assimilation des données à haute résolution et multi-capteurs pour l'estimation en temps réel des rendements agricoles ou la mise en place de systèmes d'alerte précoce.

Phénologie

Des travaux ont été menés sur l'estimation par satellite de paramètres phénologiques de forêts pyrénéennes (début et fin de cycle), selon le gradient d'altitude. Il est notamment proposé une comparaison originale avec des données de terrain obtenues à l'aide de capteurs PAR. Dans le cadre du projet Venùs, le début d'exploitation de telles données à haute résolution spatiale et haute répétitivité temporelle cherche à désagréger l'information au niveau de l'essence.

3.2.3 Hydrologie

Humidité du sol

Les principales avancées dans le domaine de l'humidité des sols résultent du lancement en novembre 2009 de SMOS, deuxième mission Earth Explorer de l'ESA. Elles ont concerné (1) l'évaluation et amélioration des algorithmes de niveau 2 et 3, (2) le développement de produits de niveau 4 et (3) un certain nombre de travaux thématiques.

L'évaluation et l'amélioration des algorithmes de niveau 2 et 3 représentent une activité importante : SMOS étant la première mission micro-ondes passives utilisant un radiomètre en bande L, il n'a pas été en effet possible d'appuyer le développement de l'algorithme sur des mesures spatiales avant son lancement. L'algorithme SMOS est ainsi dans une phase d'évaluation et d'amélioration permanente au fur et à mesure que s'enrichit la série temporelle des observations. Des ré-analyses régulièrement conduites avec la dernière version des algorithmes sur l'ensemble des données acquises depuis le lancement produisent des cartes d'humidité des sols. Il faut mentionner que dès le lancement la communauté française a été très active dans les travaux d'évaluation des produits SMOS en s'appuyant sur les mesures collectées sur les principaux sites de cal/val et les grands réseaux de mesures in situ ISMN (SCA aux USA, OZNET en Australie, SMOSMANIA en France, etc.), les sorties de modèles atmosphériques (ré-analyses ECMWF, MERRA-LAND, etc.), les cartes issues

d'autres capteurs spatiaux de l'humidité du sol (AMSR-E, ASCAT) et les observations conduites lors de la campagne aéroportée CAROLS. En parallèle les travaux ont porté sur l'amélioration de la modélisation des effets sol et végétation dans l'algorithme qui s'appuie sur l'inversion du modèle direct L-MEB. Les résultats les plus marquants ont porté sur la modélisation de la permittivité du sol et des effets de la rugosité et de la structure de la végétation et des forêts. L'épaisseur optique de la végétation déduite de SMOS a pu être mise en relation avec les indices de végétation issus du capteur optique MODIS.

De nombreuses actions sont également engagées pour évaluer et valoriser le potentiel de SMOS sur de nouveaux produits dits de niveau 4. La communauté française a ainsi progressé sur (1) la désagrégation du signal SMOS à une échelle kilométrique, voire sub-kilométrique, bien adaptée aux applications en hydrologie ; (2) l'eau du sol dans la zone racinaire et la définition d'indicateurs de sécheresse ; (3) l'évaluation du potentiel de SMOS sur le manteau neigeux ou glacé, sa longueur d'onde importante (environ 21 cm) permettant d'accéder à une information sur les couches profondes qui était encore inaccessible (travaux sur le site du Dôme C en Antarctique).

Une série de travaux ont été en outre conduits sur diverses thématiques : estimation des précipitations sur les sites d'AMMA en Afrique de l'ouest, estimation de la fraction d'eau libre en surface du sol notamment sur les zones couvertes de végétation dense, assimilation des données SMOS dans les modèles hydrologiques intégrés, cartographie de l'avancée des zones gelées dans les régions nordiques.

En parallèle, et surtout lors de la préparation de la mission, l'avion de recherche a été équipé d'un nouvel instrument CAROLS, double radiomètre en bande L réalisé par le LATMOS. Son utilisation lors de campagnes au-dessus des terres et des océans a permis de valider certains aspects des modèles et de préparer les algorithmes d'inversion.

Hydrologie spatiale

Ces dernières années ont été marquées par une augmentation très importante des propositions dans ce sous-thème, liée à l'émergence de la mission SWOT qui présente un volet très novateur pour le suivi des étendues d'eau continentales par altimétrie à large fauchée. Cette émergence répond aux recommandations de la prospective 2009 ; elle a permis d'attirer de nouvelles équipes et de conduire les différents laboratoires à se structurer, en développant une approche concertée. Les approches les plus prometteuses ont été privilégiées de façon très constructive. De nombreux projets ont été soutenus pour préparer la mission SWOT, et le TOSCA a su créer la coordination nécessaire après la phase de foisonnement initial. Il reste encore à organiser des réunions générales et des colloques ou ateliers afin de parfaire ce consortium et commencer à jeter les ponts entre les différents sous-thèmes de SWOT, repris ci-dessous et concernant (1) l'altimétrie, (2) les inondations et (3) le cycle de l'eau.

Les activités en altimétrie sont fortement structurées autour du LEGOS. La période a vu le renforcement des activités Hydroweb initiées autour de l'altimétrie nadir, avec la mise à disposition d'une base de données couvrant plus de 1000 stations virtuelles (lacs et fleuves) de par le monde. Ces données servent notamment de référence pour les nombreux projets SWOT, favorisant l'émergence de nouvelles pistes : étalonnage et validation, approches multi-variables et multi-capteurs, modélisation et assimilation de données. Ces travaux seront grandement facilités avec la mise en commun d'outils (simulateur de mission) et de données (campagne aéroportée AirSWOT à venir). En revanche, on n'a pas encore vu émerger de proposition réellement convaincante pour déduire vitesse et débit des cours d'eau à partir des champs 2D d'élévation de l'eau, autrement que par assimilation dans des modèles hydrauliques. Le TOSCA a aussi soutenu des projets reposant sur des technologies « nouvelles » : exploitation de constellations GPS pour l'altimétrie par réflectométrie GNSS, lidar (en milieu côtier seulement).

En ce qui concerne les inondations, la préparation de la mission SWOT a été là encore extrêmement incitative et structurante. En effet, avec les spécifications promises, cette mission devrait permettre

un suivi des champs d'inondation avec une résolution spatiale de 50-100 m, et une répétitivité au nadir de 22 jours, fournissant en fait un suivi plus fréquent étant donné le recouvrement des fauchées. Plusieurs projets ont été soutenus pour produire des données d'étendue des surfaces en eau et de leur dynamique, pour deux types d'objets, les lacs et les plaines d'inondations des grands fleuves. Une première gamme d'approches repose sur des combinaisons multi-capteurs (radar et visible) visant à fournir des données de référence pour SWOT, ou visant des applications thématiques (ressources en eau dans l'Altiplano, éco-hydrologie en Amazonie). Une deuxième gamme d'approches repose sur le simulateur SWOT (collaboration CNES/JPL), qui tient compte d'erreurs instrumentales et permet de quantifier l'apport de l'instrument, d'identifier les possibles problèmes de mesure et de tester différents algorithmes d'inversion. Les variables d'intérêt sont les hauteurs d'eau, les surfaces en eau et les volumes d'eau, en lien avec la bathymétrie.

Des projets ont également cherché à réaliser des bilans d'eau à partir de plusieurs types de données spatiales indépendantes : (1) gravimétrie GRACE qui donne accès aux variations du stock total d'eau souterraine, et contributions à ces variations par les sols (via SMOS, AMSR, etc.), par les cours d'eau et zones inondées (voir ci-dessus), par la cryosphère (voir 3.2.4) ; (2) précipitations (in situ ou télédéfectées) ; (3) évaporation (nombreuses méthodes d'estimations indirectes par combinaison de données télédéfectées et de modèles, voire de réanalyses météorologiques) ; (4) niveau de la mer (altimétrie). Cette démarche est à promouvoir car elle permet une forme d'inter-validation des produits, avec la possibilité de contraindre les variables « résidu » des bilans réalisés, et des valorisations intéressantes sur les tendances liées aux changements globaux, si tant est que la continuité des observations soit assurée. Ce type de recherche est encore très exploratoire, et mérite d'être développé et bien articulé avec SWOT et avec la continuité de GRACE.

Qualité des eaux

La thématique de la qualité des eaux reste très marginale en domaine continental. Les principaux travaux sur ce thème sont surtout ciblés sur le domaine estuarien et sur l'amélioration des produits de couleur de l'eau en milieu turbide (bouchon vaseux) à partir de données à haute résolution spatiale et spectrale, avec une valorisation pluridisciplinaire attendue pour la modélisation hydro-sédimentaire. Les cours d'eau sont des objets trop petits et trop dynamiques pour être abordés en termes de couleur avec les instruments actuels, mais les lacs pourraient sans doute être abordés. Par ailleurs, certains projets thématiques centrés sur l'exploitation de données spatiales pour développer et valider des modèles hydrologiques proposent des valorisations sur la qualité de l'eau (impact de l'anthropisation dans l'Altiplano ; éco-hydrologie et biodiversité en Amazonie).

3.2.4 Cryosphère

Caractérisation de la neige et de la glace

La caractérisation des propriétés physiques de la neige et de la glace est essentielle pour comprendre les processus physiques et thermodynamiques qui déterminent l'évolution des régions englacées et pour permettre leur modélisation, notamment en réponse aux fluctuations du climat.

Le suivi de l'englacement des étendues d'eau continentale a été abordé par une approche multi-capteurs dans le contexte des lacs et mers intérieures de l'Hémisphère Nord. Il s'agissait non seulement de mieux comprendre la phénologie de la glace (dates d'englacement et de débâcle), mais aussi d'estimer la quantité de glace (étendue et épaisseur) et les propriétés intrinsèques de la glace et de la neige qui la recouvre. Les travaux réalisés ont notamment permis de mieux comprendre les énigmatiques anneaux qui apparaissent à la surface du lac Baïkal dans le visible et l'infra-rouge.

La caractérisation de la neige et des glaciers, ainsi que leurs variations temporelles, ont également été abordées grâce aux instruments SAR, avec un accent mis sur les techniques PolInSAR. En parallèle de l'exploitation des SAR embarqués sur les missions spatiales (ENVISAT, ALOS, RADARSAT2, TerraSAR X), des travaux de développement d'un tomographe SAR de terrain ont été menés dans le but de caractériser finement la stratigraphie du manteau neigeux.

Enfin, la caractérisation du névé Antarctique par télédétection micro-ondes passive a été abordée dans le volet glaciologique du projet SMOS. Les travaux visent à comprendre le signal singulier offert par l'observation à basse fréquence du radiomètre MIRAS, pour ensuite l'exploiter afin d'extraire des grandeurs géophysiques d'intérêt pour les glaciologues et climatologues. Ce projet a permis notamment le développement d'un modèle de micro-ondes passives dédié à la neige.

Contribution des calottes et glaciers au niveau des mers

La contribution de la glace continentale à l'évolution du niveau des mers et la détermination des mécanismes en jeu constituent un thème de recherche majeur pour la cryosphère, en relation avec le changement climatique.

Les algorithmes utilisés pour déterminer l'altitude et autres paramètres géophysiques liés à la topographie des calottes polaires ont été affinés pour une large gamme d'altimètres spatiaux existants (ERS, ENVISAT), ainsi que dans les domaines de nouvelles missions (e.g. AltiKa) et de nouveaux concepts d'instruments altimétriques (e.g. Cryosat-2, SWOT). Les retraitements de l'ensemble des missions altimétriques radar ont permis ces dernières années de produire une base de données complètes et cohérentes incluant 1002 traces sur une période de 2002 à 2010 (soit 85 cycles répétitifs).

Les capacités stéréoscopiques de SPOT5-HRS ont par ailleurs été exploitées pour obtenir des MNT à haute résolution (40 m). Initiés dans le cadre de l'Année Polaire Internationale, ces travaux ont permis d'établir une archive de près de 150 couples ortho-images/MNT couvrant 3 000 000 km² en Antarctique, Arctique, Himalaya et Patagonie. Ces données, distribuées gratuitement, ont déjà été utilisées dans plus de 60 publications avec, entre autres, des résultats majeurs sur l'évolution des glaciers en Himalaya.

Enfin, le suivi GPS d'une langue de glace flottante en bordure de la calotte Antarctique a permis d'affiner notre compréhension de l'interaction entre glace continentale et dynamique océanique côtière.

3.2.5 Côtier et littoral

Trait de côte

Le thème du trait de côte a essentiellement concerné la morphodynamique du littoral amazonien : il s'agissait de mieux comprendre la dynamique de l'écosystème côtier, dans l'optique d'une meilleure adaptation des activités socio-économiques aux contraintes du littoral. Les travaux ont été menés à partir de la combinaison de modélisation, d'expérimentation in situ et d'observations à distance, reposant sur des données SPOT et LANDSAT et des photographies aériennes, ces dernières permettant un suivi de la position du trait de côte depuis 1950. L'envasement des côtes est un phénomène complexe qui dépend de leur morphologie et de la variabilité des forçages climatiques ; en outre le suivi des bancs de vase est difficile car il est étroitement lié à leur extension subtidale (parties non visibles par imagerie optique mais approchable indirectement par l'étude de la déformation de la houle). Sans doute l'exploitation de données des altimètres radar (Topex, Jason et AltiKa par exemple) pourra-t-elle permettre de progresser. Concernant l'étude des forçages hydrodynamiques sur la morphodynamique, deux résultats majeurs sont issus de ce projet : (1) de fortes houles favorisent la formation de grandes barres vaseuses qui servent alors de substrat à une colonisation opportuniste par la mangrove ; (2) le rôle majeur de la topographie sur la morphodynamique (granulométrie et concentrations de la vase, extension de la mangrove) a clairement été mis en évidence.

Habitats lagunaires

Des avancées d'ordre méthodologique ont été réalisées pour détecter et cartographier des habitats lagunaires intertidaux et supratidaux, ainsi que pour identifier des méthodes de mesure de paramètres biologiques (composition, abondance spécifique, répartition surfacique) et sédimentaires

(minéralogie, teneur en eau). Elles reposent sur l'exploitation simultanée de données optiques et radar à très haute résolution spatiale, ce qui est innovant dans la mesure où jusqu'à présent les données radar ont été rarement introduites dans les stratégies de cartographie thématique en domaine littoral, à l'exception des zones humides côtières. Une première analyse des données TerraSAR-X de la base de données Kalideos Littoral a révélé que les habitats côtiers ont des signatures radar spécifiques en termes d'intensité et de polarisation préférentielle du signal ; leur intérêt réside dans l'accès à une meilleure estimation de la teneur en eau du sol, mais aussi de la biomasse pour des niveaux élevés auxquels les données optiques arrivent à saturation. La prise en compte du mode polarimétrique pourrait permettre de progresser.

En outre, une riche base de données composée de données GPS, de photographies aériennes et de mesures in-situ (mesures de la teneur en eau massique, de la teneur en eau volumique, de la granulométrie, de la rugosité de surface, de la biomasse) a permis d'initier une validation des produits radar sur le site de la lagune d'Arcachon.

Eaux fluviales et estuariennes

Des travaux ont été menés sur la surveillance des milieux estuariens, dont la turbidité naturelle très marquée (bouchon vaseux) a un impact prépondérant sur les bilans sédimentaires, les processus biogéochimiques et la qualité biologique des milieux (oxygénation). Le développement des produits couleur de l'eau en milieux turbides reste un défi à l'heure actuelle, que ce soit à partir de capteurs moyenne (MODIS, MERIS) ou haute (LANDSAT, Sentinel-2 et 3) résolutions spatiales. En effet, même si les données MODIS et MERIS semblent adaptées à la cartographie de la turbidité en milieu estuarien, il est préférable de les utiliser en dehors des zones les plus turbides ; quant aux données SPOT ou Landsat (et celles des futurs Sentinel-2 et 3), qui ne sont pas disponibles quotidiennement, les bandes dans le rouge et le proche infrarouge se sont révélées être d'un grand apport pour la restitution des matières en Suspension (MES) dans des eaux très turbides. Enfin, des tests ont également été proposés à partir du capteur à haute résolution HYPERION, ce qui semble très original et sans doute un thème d'avenir du fait de la richesse spectrale de ce capteur, dont la fauchée est cependant assez réduite.

Le défi majeur lié à la couleur de l'eau en milieu turbide est en grande partie lié à la qualité des corrections atmosphériques appliquées à ces capteurs. Ainsi, l'une des actions manquantes est d'ordre méthodologique : proposer une étude comparative des schémas de corrections atmosphériques et les valider pour chacun des capteurs utilisés. Une telle étude est possible via la base de données biogéochimique du réseau opérationnel de mesures in-situ MAGEST dans l'estuaire de la Gironde.

3.3 MISSIONS EN COURS ET AVANCEMENT DES MISSIONS

3.3.1 SMOS

Lancée en novembre 2009, la mission SMOS est opérationnelle depuis la fin de la recette en vol soit mai 2010. En novembre 2012 elle a été prolongée pour deux ans afin d'effectuer les cinq ans prévus en orbite. Les financements « opérations » ESA sont garantis jusqu'en 2017.

Les cartes d'humidité du sol sont produites via (1) l'algorithme de niveau 2 par l'ESL SMOS (ESA Expert Support Laboratory, qui comprend le CESBIO, EPHYSE et l'Université de Rome), et distribuées par l'ESA, et (2) l'algorithme de niveau 3 dont le principe général est assez proche de celui du L2, et distribuées par le CATDS.

Ces quatre dernières années ont donc permis la concrétisation d'un projet soutenu de longue date par le CNES (TAOB puis TOSCA). Les perspectives à court terme sont de continuer à améliorer produits et applications (assimilation dans les modèles hydrologiques, désagrégation, études synergiques et applications diverses), et à développer de nouveaux thèmes de recherche. Les travaux vont aussi porter sur la création de longues séries temporelles, la collaboration avec les

missions « sœurs » (Aquarius, SMAP), et sur le plus long terme la définition d'une nouvelle génération de capteurs (SMOS NEXT).

Ce projet apparaît comme une grande réussite, tant sur les terres que sur mers et glaces. On compte plus de 400 publications portant SMOS dans leurs mots clés. Au-delà de la mesure des paramètres géophysiques, les différentes équipes impliquées ont obtenu des résultats significatifs dans des domaines nouveaux et non escomptés (voir 3.2.3). La seule véritable déception dans cette mission a été le niveau très élevé d'interférences radio (RFI) malgré la protection de la bande ; grâce à la volonté internationale, la situation s'est toutefois beaucoup améliorée en Europe et aux Etats-Unis, où l'on peut à nouveau travailler correctement.

Sur le plan scientifique la France a été et est restée leader en Europe, malgré la volonté (normale) de l'ESA de favoriser d'autres pays, notamment par le biais du retour géographique. Les forces scientifiques françaises mobilisées pour cette mission représentent tous les grands instituts (CNRS, plusieurs Universités, INRA, CNES, IRD, etc.) et les principaux laboratoires impliqués dans le domaine. Grâce au soutien du CNES depuis le tout début du projet (mission mini-satellite CNES en 1997), la communauté française SMOS dispose maintenant d'une reconnaissance internationale, et est devenue un acteur majeur dans le domaine des observations de télédétection en radiométrie micro-ondes. Cette communauté a su en outre développer un réseau de collaborations internationales particulièrement riche, et a toujours essayé de travailler en liaison avec les missions « sœurs » comme AMSRE ou AMSR2, Aquarius et SMAP.

3.3.2 Venùs et SENTINEL-2

Venùs est une mission d'imagerie optique visible et infra-rouge de résolution décimétrique, à haute répétitivité et à couverture partielle. Sentinel-2 observera la totalité des terres émergées tous les dix jours (tous les cinq jours avec les deux satellites), avec une résolution de 10 m à 60 m, dans 13 bandes spectrales allant du visible au moyen infra-rouge. La préparation de ces missions a fait l'objet de nombreuses propositions, souvent communes. Un travail important de coordination a été fait autour de ces missions par le CESBIO.

Ce travail s'est d'abord concentré sur le développement d'algorithmes de niveau 2 et 3 à partir de séries Formosat et Rapid-Eye. Il a ensuite visé à constituer des séries temporelles de qualité, à hautes résolutions spatiale et temporelle. Trois étapes ont été suivies : (1) développement d'une chaîne prototype de traitement de données à haute résolution Landsat, (2) validation des produits sur le site de La Crau, et (3) réalisation d'un ensemble d'applications thématiques portées par neuf équipes à partir de ces données (cartographie de l'occupation des sols, détection de zones humides, détection de neige, estimation de variables biophysiques, estimation de biomasse...). Ces applications ont préfiguré ce qui a été proposé par la communauté à l'occasion du désorbitage de SPOT4 (appel d'offre CNRS SPOT4/Take 5).

Les travaux de préparation se sont poursuivis avec la construction, toujours en cours, d'une structure informatique offrant une forte capacité de calcul et de stockage de données, appelée Centre d'Algorithmie et de Validation (CALVADOVS). Ce centre sera dédié au traitement des données Venùs et SENTINEL-2 et reposera sur une amélioration des méthodes de traitement de données développées au cours des programmes précédents (notamment en travaillant sur la reproductibilité des méthodes sur d'autres sites). Le projet se focalise sur la mise au point de méthodes de corrections atmosphériques et de détection des nuages, et une amélioration de la prise en compte des aérosols. Il vise aussi à produire des cartes d'occupation des sols sur de grandes régions en développant des méthodes judicieuses de classification à partir de séries temporelles. Enfin, des variables biophysiques seront dérivées des séries temporelles à travers l'estimation spatialisée de LAI, albédo, fAPAR, fCover, biomasse, rendement et évaporation (application « besoin en eau des cultures »).

En marge de ces projets, d'autres études ont vu le jour sur des sites non couverts par les jeux de données du Cesbio : utilisation de techniques de fouille de données pour traiter les séries

temporelles d'images en vue d'applications agricoles dans les pays du Sud, travail sur la couleur de l'eau, utilisation conjointe de séries temporelles optiques et radar dans un modèle agrométéorologique...

En conclusion, la communauté scientifique française est maintenant bien préparée à l'arrivée des missions satellitaires Venüs et Sentinel-2 en termes de traitement des images. Ses travaux permettent d'alimenter les réflexions du groupe mission Copernicus. Sur les applications thématiques, la communauté française est importante, mais il est encore trop tôt pour faire le bilan des réalisations et des points restant à approfondir.

3.3.3 MISTIGRI

Le projet de mission MISTIGRI sélectionné au séminaire de prospective de 2009 avait pour originalité de combiner une haute résolution spatiale (environ 50 m) avec une revisite élevée (1 à 2 jours) dans l'infrarouge thermique. Son objectif général était le suivi (1) des bilans énergétiques et hydriques de la biosphère continentale, (2) du fonctionnement énergétique des environnements urbains, et (3) des eaux côtières et continentales. Une phase A a été menée en collaboration avec l'Université de Valencia (Espagne) dans le but de consolider les spécifications de mission, et d'en démontrer la faisabilité à partir d'un concept instrumental basé sur l'emploi de matrices de microbolomètres. Ces travaux ont permis de répondre à l'appel d'offre ESA Earth Explorer Opportunity Mission EE-8 en Mai 2010 avec une proposition TIREX (Thermal InfraRed EXplorer), mais sans succès. A l'issue d'une évaluation favorable en fin de phase A, le TOSCA puis le CPS ont réaffirmé à l'automne 2011 leur intérêt pour la mission, et formulé des recommandations concernant l'établissement de partenariats sur le projet. Le contexte évolue aujourd'hui sur ce plan avec la mise en place d'une collaboration avec la NASA autour d'une mission THIRSTY (Thermal InfraRed SpaTial sYstem) fédérant les acquis des projets MISTIGRI/CNES et HypIRI/JPL (Jet Propulsion Laboratory) qui affichent des objectifs de mission communs ou très complémentaires. THIRSTY a été proposé en réponse à l'appel à idées du CNES pour le séminaire de prospective de 2014.

Comme on l'a évoqué plus haut, la préparation de cette mission a donné lieu à plusieurs projets méthodologiques couvrant notamment les spécifications elles-mêmes de la mission, les corrections des effets directionnels, l'évaluation de l'erreur liée à la turbulence atmosphérique sur la mesure de la température de surface, l'impact de l'hétérogénéité des surfaces et le développement de méthodes d'assimilation. Elle a permis de fédérer les quelques équipes particulièrement actives dans ce travail de préparation, tout en élargissant la communauté intéressée au-delà du cercle des laboratoires focalisés sur les surfaces continentales.

3.3.4 BIOMASS

Le projet BIOMASS, retenu pour la phase 0 en 2006 puis pour la phase A en 2009 par l'ESA dans le cadre des propositions soumises au programme Earth Explorer, a été officiellement sélectionné le 6 mai 2013. Sur les quatre dernières années, grâce notamment à des financements TOSCA et ESA, les études conduites par la communauté française BIOMASS ont contribué à répondre comme suit à trois principales recommandations formulées par le comité scientifique de l'ESA.

En ce qui concerne l'évaluation de la robustesse des algorithmes d'inversion de la biomasse sur des forêts à forte densité, les financements TOSCA sont venus soutenir la réalisation de la campagne aéroportée TropiSAR en Guyane (Août 2009) et l'expérience continue TROPISCAT sur la tour Guyaflux (2001-2012). Les études du Cesbio et de ses partenaires du projet BIOMASS ont exploité les données de TROPISAR pour consolider les algorithmes d'inversion (reposant sur l'intensité de rétrodiffusion et la technique PolInSAR) et évaluer l'impact des sources d'erreur. La phase ultérieure est d'évaluer le caractère générique des algorithmes développés sur la forêt tropicale humide de Guyane à d'autres sites tropicaux et d'autres biomes (forêt boréale), et d'exploiter les données continues particulièrement originales acquise lors de TROPISCAT.

Une stratégie pour calibrer et valider les produits de biomasse sur les différents biomes à l'échelle globale a été définie. Les financements TOSCA ont soutenu les efforts en cours pour le développement d'un réseau international et la mise en place d'une base mondiale de données d'estimation in situ de la biomasse forestière. Ce réseau est en cours de montage.

Enfin, une évaluation de l'apport des données BIOMASS pour l'estimation du stockage à long terme de carbone par les écosystèmes forestiers a été entreprise grâce au développement d'un schéma d'intégration de données de biomasse aérienne dans le modèle dynamique de végétation ORCHIDEE. Une capacité pionnière a ainsi été acquise en assimilation des données de biomasse, au travers notamment de l'introduction d'un module de gestion forestière (éclaircies, coupes rases, compétition entre individus...). Les données satellitaires de biomasse pourraient ainsi permettre d'améliorer la prise en compte de la disponibilité en nutriments des sols, les schémas d'allocation entre organes et la mortalité.

Le bilan du projet BIOMASS sur les quatre dernières années est particulièrement riche et prometteur. Au-delà du succès récent de la sélection officielle par l'ESA, le projet a permis de fédérer un grand nombre d'acteurs nationaux sur une très large palette de compétences (modélisation électromagnétique, expertise instrumentale, modélisation dynamique de la végétation, estimation de la biomasse in situ et par lidar, etc.) et de développer un large réseau de collaborations internationales.

Si la grande diversité des approches d'inversion possibles est une richesse, elle peut toutefois également freiner la finalisation de l'algorithme. Le principal défi à relever est donc maintenant de faire des choix pour consolider et stabiliser un algorithme d'inversion de référence qui soit générique pour une large gamme de biomes forestiers, et dont les performances et la sensibilité aux incertitudes (mesures, données auxiliaires, etc.) soient bien caractérisées.

3.3.5 SWOT

La mission SWOT, développée en partenariat entre la NASA et le CNES, repose sur l'altimétrie interférométrique à large fauchée en bande Ka (instrument KaRiN). Elle vise à fournir des images 2D avec une résolution horizontale de l'ordre de 50-100 m, sous une trace au sol de 120 km de large. L'objectif est de couvrir tous les lacs, rivières, réservoirs et océans de la Terre, au moins deux fois tous les 21 jours, avec des précisions de l'ordre de 10 cm sur la verticale (en moyennant sur des superficies de 1 km²), de 1 cm/km sur l'estimation des pentes d'eau et de 25% sur les masques d'eau. SWOT pourra observer les fleuves et rivières ayant une largeur supérieure ou égale à 100 m et les zones en eau (lacs, réservoirs...) ayant une superficie supérieure ou égale à 250 m².

Alors qu'on ne dispose actuellement que de mesures ponctuelles de hauteurs d'eau, l'acquisition par SWOT de données spatialisées devrait permettre de mieux appréhender les variations spatiales de ce champ, ce qui est essentiel pour estimer la vitesse des cours d'eau et donc les débits, ainsi que les variations temporelles des stocks d'eau dans les hydrosystèmes de surface. Cette capacité nouvelle permettra de surveiller l'évolution des stocks d'eau douce dans le contexte du changement climatique, notamment dans les zones où peu d'observations existent. Ceci fait de SWOT la première mission spatiale conçue pour l'hydrologie des surfaces continentales, ce qui justifiait son choix comme l'une des deux priorités du groupe « Surfaces Continentales » en 2009. Il faut noter que ces spécificités permettent en parallèle d'aborder les circulations océaniques à méso-échelle (voir partie « Océan »).

Le CNES et la NASA ont obtenu des financements substantiels en 2010 et 2011, et la mission est entrée en phase A en novembre 2012, pour un lancement prévu en 2019. Le TOSCA a eu une action incitative majeure pour développer les projets liés à cette mission, ce qui s'est traduit par une forte croissance des soumissions et des soutiens : si aucune proposition ne mentionnait SWOT en 2009, treize projets spécifiquement SWOT ont été soumis à l'appel d'offres 2012, ainsi que quatre propositions liées. Une grande majorité d'entre elles a été retenue pour financement. L'année 2012 a

aussi vu la sélection de chercheurs français pour participer avec leurs collègues américains au Science Definition Team de SWOT (sept binômes avec spécialités thématiques variées).

Logiquement, les recherches sont principalement orientées sur la préparation de la mission, avec traitement de données pour la cal/val (données in situ, altimétrie nadir, surfaces en eau multi-capteurs), développement du simulateur de données SWOT (collaboration CNRS/JPL) et premières utilisations pour tester les algorithmes d'inversion, mise en place de modèles hydrologiques ou hydrauliques pouvant bénéficier des futures données SWOT, techniques d'assimilation, et enfin préparation de la mission aéroportée AirSWOT avec campagnes en France prévues à partir de fin 2013 (delta du Rhône, Garonne, Seine). La principale faiblesse thématique à ce jour concerne les études portant sur la quantification des débits (en France mais aussi aux USA), qui est pourtant un des objectifs innovants de la mission.

On note enfin un réel effort de coordination au sein de la communauté, avec un soutien spécifique pour des actions de coordination d'une majorité des propositions ci-dessus, sous la houlette du Legos. Le TOSCA recommande que l'effort de coordination soit poursuivi, voire amplifié, selon les lignes suivantes : utilisation accrue du simulateur SWOT, meilleur partage des données de référence (réseaux de mesure in situ, altimétrie nadir, images de surfaces en eau multi-capteurs), harmonisation des efforts sur la modélisation hydrologique visant à éviter la prolifération de modèles (en France et aux USA).

3.3.6 Géostationnaire

Une mission d'observation de la surface par satellite géostationnaire avait été mise en avant lors de la prospective 2009, avec la recommandation d'une résolution spatiale décimétrique. Cette mission a fait l'objet d'un projet financé par le TOSCA, qui reposait sur la simulation des propriétés optiques de surfaces « naturelles » (savanes, dunes, forêt) et urbaines dans les conditions géométriques d'observation propres à cette mission. Le simulateur s'appuie sur le modèle DART qui a bénéficié pour l'occasion de quelques adaptations et améliorations : direction solaire selon la date et le lieu de la surface terrestre observée, prise en compte de la rotondité de la Terre, ré-échantillonnage des images DART à la résolution souhaitée, amélioration des directions discrètes et des fonctions de phase discrètes pour assurer un meilleur suivi journalier des luminances TOA. Les travaux ont donné naissance à une chaîne opérationnelle de simulation de luminances horaires – avec différents bruits expérimentaux associés au paysage et à l'atmosphère – pour tout site du continent africain et pour toute date. Au-delà de ce simulateur, des analyses sur l'inversion des mesures pour obtenir le LAI ont été effectuées.

Cette unique proposition sur le géostationnaire a ainsi pu fournir de remarquables éléments de préparation d'une future mission spatiale.

3.3.7 Lidar

La préparation d'une mission spatiale Lidar a fait l'objet de propositions régulières au TOSCA durant ces quatre dernières années.

Un projet initial porté par l'UMR Tetis sur la période 2005-2009 s'est intéressé au problème peu exploré de l'utilisation des formes d'onde Lidar pour la caractérisation de la végétation, avec des approches précises d'amélioration de l'estimation de MNS-MNT. Ce projet a permis, avec l'appui du TOSCA, d'initialiser une fédération des équipes de recherche nationales dans l'optique de définir un projet de mission spatiale. Sur cette lancée, cette communauté a poursuivi ses travaux par une série de projets (2010-2013) relatifs à l'évaluation de la biomasse aérienne et proposant des développements méthodologiques, des études de sensibilité ainsi que l'utilisation de données annexes radar.

Sur la même période 2010-2013 s'est constitué autour du LSCE un axe d'étude parallèle portant sur la résolution et l'échantillonnage spatial d'un Lidar à empreinte moyenne. L'objectif était de définir d'une part les contraintes d'échantillonnage spatial pour l'estimation de paramètres bio- et géo-

physiques de couverts forestiers et d'autre part d'étudier les possibilités de caractérisation de la structure de ces couverts.

Suivant les recommandations du comité TOSCA, les propositions relatives à ces deux axes de recherche se sont progressivement synchronisées à partir de 2011 pour clarifier les rôles des laboratoires impliqués et parvenir à un partage des tâches et des thèmes d'investigation. Leur fusion au sein d'un même projet de taille plus importante, fortement recommandée par le comité à l'occasion de l'examen des réponses à l'appel à idées 2013 du CNES, devrait conférer à ce projet commun un poids et une efficacité accrues dans la définition d'une mission spatiale.

Dans le même esprit, un effort doit être mené pour affiner la position d'un tel projet de mission spatiale Lidar vis-à-vis d'autres types de mission, notamment les SAR opérationnelles ou envisagées. Premier exemple, la mission TerraSAR-X et Tandem-X délivre des MNT d'une haute précision et la valeur ajoutée d'une éventuelle mission Lidar devra être évaluée par rapport à ces produits. Par ailleurs, la mission en bande P BIOMASS récemment acceptée par l'ESA comprend un volet sur l'estimation de la structure par polarimétrie et multi-interférométrie (PolinSAR et tomographie), techniques qui devraient être moins sujettes à des phénomènes de saturation comme l'ont montré des résultats obtenus sur des mesures aéroportées ou de terrain. Il semble donc tout à fait souhaitable que certains volets des études portant sur une mission spatiale Lidar prennent en compte ces autres moyens de mesure pour d'une part positionner le potentiel du Lidar et d'autre part mettre en évidence les avantages d'éventuelles synergies.

3.4 STRUCTURATION DE LA COMMUNAUTE

3.4.1 Pôle Surfaces Continentales

La convention de création du Pôle Thématique Surfaces Continentales (Théia) a été ratifiée le 6 décembre 2012 par neuf organismes publics : CEA, CNES, CIRAD, CNRS, IGN, INRA, IRD, IRSTEA et Météo France.

La vocation du Pôle est de faciliter l'usage des images issues de l'observation des surfaces continentales depuis l'espace, autour de questions liées à l'impact des pressions anthropiques et du climat sur les écosystèmes et les territoires ; à l'observation, la quantification et la modélisation des cycles de l'eau et du carbone ; au suivi des évolutions des sociétés et de leurs activités ; à la compréhension des dynamiques de la biodiversité. Pour ce faire, il entend mettre à disposition de la communauté scientifique nationale et internationale, et des politiques publiques environnementales, des images, des produits, des méthodes et des services, depuis l'échelle des écosystèmes et des territoires jusqu'à l'échelle planétaire. Son ambition est d'articuler les compétences françaises dans le domaine, d'alimenter plus de 400 laboratoires et plus de 100 écoles doctorales sur le territoire national, et d'assurer une visibilité de ces activités au plan international.

Le Pôle s'appuiera sur une infrastructure de production de données spatiales, le Centre de Gestion et de Traitement des Données (CGTD), bâti autour de l'Equipex GEOSUD, du CNES et de l'IGN, ainsi que sur des centres d'expertise scientifique localisés dans différentes régions.

Les produits et services offerts par Théia, de qualité contrôlée, couvriront de larges territoires et de longues périodes : couvertures satellitaires annuelles du territoire national, séries temporelles de réflectance de surface à haute ou très haute résolution, séries temporelles de produits biogéophysiques à l'échelle globale (biomasse, hauteurs d'eau, humidité de surface, etc.), outils d'aide à la visualisation et au traitement des données (Orfeo Tool Box), méthodes et algorithmes de traitement et des procédures de validation.

3.4.2 Le rôle fédérateur des missions

Comme on l'a vu, les missions spatiales en cours ou en préparation ont joué un important rôle fédérateur pour la communauté, qui a été fortement accompagné et appuyé par le TOSCA, tant par le financement de projets de recherche et de bourses doctorales et post-doctorales que par des

recommandations directes adressées aux équipes concernées. Ce rôle fédérateur s'est exprimé selon des modalités propres à chacune des missions.

L'infrarouge thermique intéresse depuis longtemps la communauté des équipes travaillant sur le l'énergétique des surfaces et le fonctionnement de la végétation. Après les projets IRSUTE et SEXTET des années 90, la mission MISTIGRI a joué elle aussi un rôle fédérateur évident en faisant converger compétences et intérêt d'une communauté relativement éclatée mais qui a su saisir l'opportunité de se rassembler, notamment à travers sa présence dans le groupe de mission CNES et le dépôt régulier auprès du TOSCA de projets concertés.

Dans le cas de SWOT on pourrait parler de création d'une communauté, voire d'une nouvelle discipline, l'hydrologie spatiale, dans la mesure où les possibilités offertes par la mission offrent des perspectives tout à fait nouvelles. En témoigne l'explosion récente du nombre de propositions, qui a bénéficié d'un réel effort de coordination au sein de cette communauté, doté d'un soutien spécifique. Comme on l'a dit plus haut, il est important de poursuivre, voire d'amplifier, cet effort de coordination afin d'optimiser notamment le partage des données et les actions de modélisation.

Compte tenu des caractéristiques des missions Venùs et Sentinel-2, les équipes de recherche qui s'y intéressent sont nombreuses et proviennent d'horizons très divers, multi-thématiques. Alors que le risque n'était pas négligeable de les voir développer des projets indépendants et parcellaires, ces équipes ont su dans une large mesure se regrouper autour de quelques propositions phares, fort efficacement coordonnées, et qui ont eu un rôle véritablement fédérateur. Il y a fort à parier que les lancements proches de ces missions consolideront ce rôle, à l'instar de SMOS qui, comme on l'a vu, fédère toute une communauté.

Autour de la mission Biomass s'est également constituée une communauté forte, qui a su évoluer en fonction de la définition de la mission et des contributions respectives des équipes. On trouve associés à cette mission un noyau dur de quelques partenaires porteur de la proposition et indispensable à sa réalisation ; puis un premier cercle de partenaires apportant chacun une contribution s'inscrivant dans des thématiques innovantes et bien ciblées ; enfin un groupe d'équipes « périphériques », à la présence plus fluctuante dans le temps. L'ensemble, doté d'une coordination de très bonne qualité, a su porter le projet avec le succès que l'on sait.

Enfin, pendant ces quatre dernières années il a été possible d'apprécier un effort important de structuration de la communauté nationale Lidar, ainsi que des développements méthodologiques, métrologiques et thématiques que le CNES pourrait encourager afin de permettre la maturation de ce concept et son positionnement par rapport aux autres techniques de mesure et aux équipes étrangères. Il semble indispensable pour cela que cette communauté nationale se coordonne en bonne intelligence et parvienne à se regrouper derrière une mission spatiale unique.

3.5 CONCLUSION

On l'aura compris à la lecture de ce bilan, les recommandations formulées lors de l'exercice de prospective de 2009 ont constitué le fil conducteur des activités de recherche menées en observation des surfaces continentales, et ont joué un rôle majeur dans la structuration de la communauté nationale.

La priorité 1 de Biarritz concernant MISTIGRI a abouti à la réalisation d'une phase A pour cette mission de démonstration. En juin 2011 le passage en phase B a été suspendu et conditionné à l'établissement d'une coopération internationale. Après les pistes espagnoles et israéliennes, il semble maintenant que la plus prometteuse soit la définition d'une mission commune entre le CNES et le JPL autour d'une mission THIRSTY, héritage de MISTIGRI et de la composante IRT de HypIRI.

La priorité 2 concernait SWOT. On a vu l'engouement de la communauté pour cette mission, avec une augmentation très forte du nombre de projets scientifiques déposés au TOSCA, ainsi que des demandes de bourses doctorales et post-doctorales. On a vu également la qualité de ces propositions qui a abordé de nombreux aspects liés à la préparation de la mission. L'ensemble de la

communauté concernée a commencé à se structurer de façon forte ; un groupe de sept chercheurs français fait maintenant partie de la Science Definition Team de SWOT.

A plus long terme, les perspectives évoquaient deux missions, autour du Lidar et du géostationnaire respectivement. Plusieurs équipes intéressées par le Lidar ont fait avancer le concept sur plusieurs plans, tout en commençant à se structurer. L'enjeu est maintenant de faire converger les propositions faites au récent appel à idées du CNES vers une mission unique. En ce qui concerne le géostationnaire, il a fait l'objet d'une seule proposition de trois ans, mais qui s'est avérée d'une excellente qualité, en fournissant de remarquables éléments de préparation d'une future mission spatiale.

Un message fort dans les perspectives de 2009 avait été adressé sur la nécessité d'un accompagnement fort par le CNES de missions à différents stades d'avancement : SMOS, maintenant lancé et dont les données sont à l'origine de nombreux travaux de grande qualité menés par une communauté bien épaulée ; Venµs et Sentinel-2, qui devraient être lancées prochainement et qui elles aussi ont bénéficié d'un bon accompagnement ; Biomass, sélectionné finalement par l'ESA grâce à la qualité de la proposition et de l'appui qui a été apporté aux équipes proposant.

Enfin, le groupe Surfaces Continentales avait fortement attiré l'attention du CNES sur l'intérêt de la mise en place rapide d'un pôle thématique, capable de jouer un rôle structurant pour la communauté SIC et facilitant son accès à l'information spatiale. C'est chose faite depuis décembre 2012.

Comme on le voit donc, toutes les perspectives ont été mises en œuvre effectivement ; avec le recul, elles paraissent toutes pertinentes. Seule la mission MISTIGRI n'a pu aller aussi loin qu'il était souhaité, faute de financement ; la piste de la coopération avec le JPL paraît néanmoins en mesure de faire avancer le concept.