

**Rapport de prospective du
Groupe Surfaces Continentales du Tosca
8 mars 2009**

1. Enjeux scientifiques et besoins d'observation

Réchauffement climatique, explosion de la demande alimentaire mondiale et de la pression sur les terres, crise énergétique, dégradation de l'environnement, menaces sur la biodiversité... Tous ces éléments de notre contexte pèsent de plus en plus en fortement sur notre façon d'appréhender le monde qui nous entoure. Ainsi le changement climatique va-t-il profondément modifier les conditions environnementales dans lesquelles se développent les écosystèmes cultivés, et nous allons devoir adapter en conséquence nos systèmes de production, y compris vers des filières énergétiques, ou valorisant la biodiversité. Une possible intensification de l'occurrence d'évènements extrêmes devrait affecter d'autant plus le fonctionnement des écosystèmes terrestres. La société humaine, de fait, se montre de plus en plus préoccupée par l'environnement, le développement durable et la gestion des territoires et des ressources, l'impact des changements globaux sur le fonctionnement de la planète et des sociétés à diverses échelles spatiales et temporelles.

Ces dernières années, ce contexte global est devenu très prégnant dans les programmes de recherche de la communauté Surfaces Continentales, comme en témoignent tous les exercices de prospective récemment menés par les divers organismes. On cherche à évaluer les conséquences du changement global, comme à étudier les possibilités de mitigation ou d'adaptation. On cherche à réduire les impacts environnementaux des systèmes de production intensifs, à proposer de nouveaux systèmes, innovants, durables et garantissant la sécurité alimentaire. On cherche de nouvelles voies de gestion environnementale des milieux, visant à limiter les risques de pollution ou de dégradation (qualité de l'eau, pollution et érosion des sols, émission de gaz à effet de serre, dispersion des pesticides...). On cherche à mieux gérer les ressources (eaux continentales, usage des sols, aménagement des paysages, maintien de la biodiversité) et les crises (inondations, incendies, tempêtes, sécheresses...).

Toutes les recherches menées autour de ces thématiques demandent une connaissance améliorée du fonctionnement des écosystèmes, de leurs interactions avec l'environnement ; elles s'appuient sur des approches complémentaires menées sur une gamme d'échelles balayant le local (lieu privilégié de compréhension des processus), le régional (où s'exprime fortement le poids des actions anthropiques), le global (indispensable pour le suivi et la prédiction des changements lents) ; elles se traduisent par des efforts accrus d'observation et de modélisation des phénomènes.

Dans ce contexte, les cycles de l'eau et du carbone sont une cible privilégiée des efforts de recherche, dans la mesure où autour d'eux se dessine l'évolution (1) d'une ressource fondamentale dont la disponibilité ou l'absence régissent 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 (réservoirs et flux) sont encore très mal évalués.

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

- un intérêt renforcé pour 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 (re)venir sur des échelles spatiales et temporelles très fines ;

- un poids important, déjà mis en exergue lors de notre dernier exercice de prospective en 2004, sur les échelles intermédiaires (paysagères, régionales), lieux privilégiés d'interactions 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 est évidemment fondamentale dans le contexte de ces recherches et dans celui du suivi des phénomènes, et ce aussi bien en ce qui concerne les actions anthropiques, le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes, les interactions surfaces-atmosphère, l'hydrologie. Elle permet en premier lieu l'identification d'objets, la cartographie, l'établissement de typologies de surface. Elle produit également nombre de variables utilisées dans l'étude du fonctionnement de la végétation, des échanges biosphère-atmosphère, des cycles biogéochimiques : des variables radiatives (albédo, émissivité) ; des variables liées à l'état de surface (hauteur, rugosité) ou à la structure de la végétation ; des variables liées à l'état hydrique et énergétique des surfaces (température, humidité) ; des variables représentatives de la quantité et du type de végétation présente (biomasse, teneur en chlorophylle, fraction de rayonnement utile absorbée...).

Son utilisation est actuellement très active dans certains secteurs de la communauté des surfaces continentales et devrait s'étendre dans les années à venir, notamment vers les équipes de SHS. Lors du dernier exercice de prospective nous avons mis en évidence quelques priorités, dont l'intérêt est confirmé par le panorama des enjeux et questions de recherche que nous venons de dresser : la nécessité de disposer d'une continuité dans les observations, ne serait-ce que pour suivre des phénomènes lents ; celle de disposer de capacités d'observation à toutes les échelles, depuis les très fines (décamétrique, voire métrique) jusqu'à la globale ; la nécessité de pouvoir descendre à des résolutions temporelles fines impliquant des revisites de l'ordre de la journée.

Nous allons dans ce nouvel exercice revenir dans un premier temps sur la continuité des observations ; nous aborderons ensuite des éléments dont l'importance a été souligné plus haut, celui du fonctionnement des surfaces continentales à fine échelle, puis celui des grands cycles, eau et carbone ; nous nous attacherons ensuite à l'accompagnement de missions engagées, et envisagerons des perspectives de développement à plus long terme ; avant de conclure sur nos recommandations, nous aborderons le problème de la structuration de la communauté Surfaces Continentales.

2. Besoins de continuité des observations : le cadre GMES

Lors de la prospective 2004, en invoquant le suivi de phénomènes lents (climatiques par exemple), l'assimilation de données sur de longues séries temporelles ou encore des applications opérationnelles, le groupe Surfaces Continentales avait mis en avant la priorité d'une continuité des observations liées au suivi de l'occupation du sol (filiale SPOT) et au fonctionnement de la végétation aux échelles régionale à globale (dans la lignée des missions telles que VEGETATION, POLDER, MERIS). Dans le premier cas il s'agissait principalement d'optique à 10-30 m à haute répétitivité et de radar SAR, dans le second d'optique à 100 m. Si ce besoin de continuité est toujours évidemment d'actualité, on peut estimer que l'évolution ces

dernières années du contexte GEO et GMES, par le biais du programme Sentinelles de l'ESA, y apporte des réponses allant dans le bon sens.

Le programme Sentinelles a pour vocation de répondre de façon opérationnelle aux besoins de données satellitaires définis par l'Union Européenne en matière de services GMES, axés sur l'environnement et la sécurité. Il repose sur une série de satellites réutilisant des concepts validés, dont un rôle majeur est précisément d'assurer la continuité des observations spatiales, notamment pour l'étude et le suivi des processus continentaux : Sentinelle 1 prendra le relais du radar ASAR d'ENVISAT, Sentinelle 2 complètera notamment le programme d'observation de la Terre SPOT, et Sentinelle 3 comportera des instruments similaires à MERIS (continuité des données Végétation) et AATSR présents sur ENVISAT.

La communauté Surfaces Continentales, aujourd'hui coutumière des programmes ISIS (Spot puis Pléiades) et Kalideos du CNES, sera une utilisatrice active des données du programme Sentinelle. De façon générale il conviendra de l'inciter à mobiliser de façon plus active les données des satellites de l'ESA ainsi que son programme Third Party Missions facilitant pour les scientifiques l'accès à des données de satellites hors ESA.

Notons qu'avant la mise en place des futures infrastructures spatiales opérationnelles GMES Sentinelle 2, la mission Venus menée en coopération avec l'ISA devrait être capable de concilier hautes résolutions spatiale et temporelle, de développer de nouveaux produits (haute résolution, haute répétitivité, richesse spectrale, qualité image) et de qualifier de nouvelles chaînes de traitement au sol des images (voir 3.1 et 5.2) ; elle préparera donc la venue des Sentinelles 2. Notons également l'existence d'initiatives nationales telle que celle de la Belgique avec son programme Vegetation follow-on (résolution de 300 m journalière) qui permettra de faire le lien entre la fin de SPOT-5 Végétation et Sentinelle 3.

Si la continuité semble ainsi assurée dans une certaine mesure, elle est toutefois incomplète. Les projets Venus et Misisgri, qui sont des démonstrateurs, ont des caractéristiques qui ne seront pas présentes dans Sentinelle 2 (très haute revisite temporelle, haute résolution spatiale, présence de bandes spectrales dans l'infrarouge thermique). Ces caractéristiques sont demandées depuis très longtemps par la communauté scientifique et il est indispensable d'en prévoir dès à présent la relève. Ceci semble réalisable de manière adéquate par le géostationnaire qui permettrait, par l'utilisation de techniques innovantes, une pérennisation des observables (voir 4.1).

Il importe également d'assurer la pérennité des mesures en soutenant fortement au niveau européen (Eumetsat, GMES) les missions dites « follow-on » satisfaisant un besoin scientifique avéré. Il en va ainsi par exemple de la mission SMOS-FO, qui, une fois le concept SMOS validé après sa recette en vol, devra être fortement appuyée, au-delà du soutien des entités opérationnelles internationales (ECMWF).

3. Les besoins en nouvelles missions de la communauté Surfaces Continentales

3.1 Fonctionnement des surfaces à échelles fines

Les surfaces continentales se distinguant par une hétérogénéité spatiale élevée, résultant en partie des activités humaines, une résolution au moins décimétrique est souvent nécessaire pour appréhender pleinement cette hétérogénéité. En outre, la présence de végétation et son évolution saisonnière jouent un rôle majeur dans le fonctionnement des surfaces, en y régulant les échanges de matière et d'énergie. Les cycles de la végétation doivent être appréhendés avec un échantillonnage temporel de l'ordre de 7 à 10 jours, sur l'ensemble du cycle, ce qui compte tenu de la couverture nuageuse implique une répétitivité de l'ordre de la journée.

Les besoins identifiés comme prioritaires sur la connaissance du **fonctionnement de la végétation** à échelle fine et le **suivi des bilans associés (eau, énergie, CO₂)** consistent à disposer d'informations à de telles résolutions spatiale et temporelle fortes, couvrant les bandes spectrales du visible, du proche infrarouge, de l'infrarouge thermique et des micro-ondes. Si à long terme des technologies satellitaires innovantes émergent pour couvrir ce besoin à l'échelle globale (cf. partie 5.1 sur la haute revisite temporelle), il est déterminant pour la communauté Surfaces Continentales de disposer à court terme de **démonstrateurs** permettant de développer les approches d'assimilation de données dans les modèles spatialisés de fonctionnement de la végétation et de montrer tout le potentiel de ces données.

En ce qui concerne les bandes du visible et du proche infrarouge, les caractéristiques de la mission Venüs (une dizaine de bandes, visite quasi-journalière, résolution décimétrique, possibilité de multi-angulaire) sont donc particulièrement intéressantes pour la communauté SIC (voir en partie 5.2 quelques recommandations d'accompagnement).

Pour l'**infrarouge thermique (IRT)**, qui donne accès à la variable clé qu'est la **température de surface**, les besoins ne sont pas couverts. Parce que sa valeur est directement fixée par l'état hydrique et le niveau des échanges énergétiques à la surface, et parce qu'elle permet d'accéder plus directement aux flux que les autres observables, la température de surface est en effet une variable déterminante pour décrire le fonctionnement de la végétation. Elle apporte ainsi des informations particulièrement importantes pour de nombreuses thématiques : les changements globaux, leurs impacts et les politiques d'adaptation pour y faire face ; en agriculture, le suivi de l'état hydrique des sols, la gestion de l'irrigation et des ressources ; en environnement la caractérisation des microclimats, la détection des rejets dans les cours d'eau, etc.

L'intérêt de l'IRT a été largement démontré depuis le milieu des années 70 à partir de travaux basés sur des séries de données à basse résolution issues des satellites météorologiques, et à l'occasion de campagnes aéroportées dédiées. Ces travaux ont ainsi mis en évidence le besoin de combiner haute résolution spatiale (imposée par la taille du parcellaire et la variabilité spatiale des pratiques culturales et des caractéristiques du sol) et haute fréquence de revisite (imposée par la sensibilité temporelle de la température de surface aux conditions météorologiques en particulier).

La communauté se heurte aujourd'hui à une pénurie de moyens assurant la conjonction de ces deux caractéristiques. La haute répétitivité (1 jour) n'est en effet accessible qu'au prix de la faiblesse de la résolution spatiale (de l'ordre du km avec MODIS et AVHRR), que ne peuvent pallier les techniques de désagrégation trop peu fiables dans l'IRT au contraire du domaine solaire, tandis que les systèmes fournissant une résolution supérieure (120 m avec Landsat TM, 90 m avec ASTER) n'offrent qu'une revisite très faible de l'ordre de la quinzaine de jours. Ce paysage n'est pas appelé à évoluer dans les années à venir, faisant perdurer le dilemme entre haute fréquence de revisite et basse résolution spatiale.

De là est né le projet de **démonstrateur Mistigri**, directement issu de la prospective 2004, et pour lequel une phase 0 vient d'être menée. Son originalité est de fournir des mesures dans l'infrarouge thermique associant une résolution décimétrique à une répétitivité temporelle de un à deux jours. Quatre bandes IRT (à environ 50 m) sont associées à quatre bandes dans le visible et le proche infrarouge (à 20 m). **Ce type de mesures n'est actuellement fourni par aucun satellite civil et à notre connaissance aucun projet similaire n'existe au niveau international.**

Sur le même principe que celui de Venüs, la mission Mistigri repose sur une stratégie d'observation d'un réseau de sites répartis sur l'ensemble du globe, instrumentés et suivis par des équipes scientifiques ainsi mobilisées. Elle permettrait d'abord de tester des modèles de processus localisés et des applications relatives au fonctionnement de la biosphère continentale

et couvrant un large spectre d'applications. Un choix judicieux des sites permettrait d'alimenter d'autres thématiques, liées à l'environnement côtier, l'urbain, la géologie et pédologie, les risques et accidents (vulnérabilité au feu par exemple). Enfin, sa vocation d'être une mission de démonstration permettrait de préparer des missions palliant la pénurie actuelle et à moyen terme de données IRT adaptées, ainsi que des missions futures comme un satellite géostationnaire à haute résolution permettant d'exploiter les cycles diurnes.

La mission Mistigri, réalisable d'ici 2015, constitue la première priorité du groupe Surfaces Continentales. Après les projets Irsute et Sextet qui n'ont pu aller jusqu'au bout, il s'agit de la **troisième mission IRT défendue par la communauté Surfaces Continentales.** Le contexte scientifique est de surcroît très favorable actuellement :

- il existe en France une forte communauté IRT motivée et structurée de longue date entretenant des liens avec l'international (Europe, USA, Canada notamment) ; elle a déjà porté les projets Irsute et Sextet en réponse à de précédents appels à idées du CNES et a été en partie impliquée dans des projets de l'ESA (Prism, Spectra) ;

- la communauté possède des acquis solides tant sur le plan thématique (maîtrise des processus de surface et de leur modélisation), que sur les plans méthodologique (effets directionnels, émissivité, modélisation du signal), et technologique ;

- enfin, bien que non phasées, les missions Venüs et Mistigri (de caractéristiques répétitivité/résolution spatiale analogues) sont très complémentaires, les acquis de la première devant se voir valorisés par la présence de canaux visible et proche infrarouge sur Mistigri.

3.2 Le cycle de l'eau continentale

La dynamique des eaux continentales constitue un régulateur du fonctionnement des écosystèmes terrestres, aquatiques et côtiers, ainsi que des activités économiques des sociétés humaines (irrigation, industries, énergie, transport). Elle est très fortement impactée par le changement global : en premier lieu par les activités anthropiques et à moyen et long terme par le changement climatique. Le **suivi de la dynamique des eaux continentales** est donc un enjeu scientifique majeur pour la recherche sur le fonctionnement hydrologique des bassins et des réseaux hydrographiques, pour la recherche sur le cycle de l'eau global et le climat, et pour l'étude des relations entre hydrologie et écosystèmes. A terme vient s'ajouter un enjeu opérationnel pour la gestion des ressources en eau.

La mission SWOT a pour objectif d'accéder à une nouvelle observable de la dynamique des eaux continentales : le **champ spatialisé des niveaux d'eau des fleuves, lacs et zones d'inondation.** Sur la base de l'héritage de l'altimétrie radar nadir, l'interférométrie spatiale à large fauchée en bande Ka (**instrument KaRIN**) devrait permettre de mesurer les niveaux d'eau continentaux sur une fauchée de 120 km de large (bande aveugle au nadir de 20 km de large) à une résolution décimétrique (50 m) et avec une précision meilleure que décimétrique (centimétrique sur les océans), ainsi que de quantifier les pentes à une précision meilleure que le cm/km. Les données de la mission SWOT doivent renseigner sur les variations temporelles de stock d'eau dans les hydrosystèmes de surface et sur les dynamiques d'écoulements. Couplées à des modèles de géoïde de précision (GOCE) et à des modèles numériques de terrain précis, elles doivent permettre une amélioration radicale des modèles hydrodynamiques fluviaux menant, selon des méthodes à fiabiliser, à des estimations des débits.

Cette mission constitue la **première mission** conçue en réponse aux **spécificités des eaux de surface continentales.** Elle fait l'objet d'une collaboration étroite entre scientifiques français et américains et s'inscrit dans la lignée de la collaboration NASA-CNES sur l'altimétrie radar (Topex/Poseidon, Jason) : elle permettra à la communauté scientifique des hydrologues et hydrauliciens fluviaux de franchir un cap dans l'approche spatialisée des dynamiques fluviales,

des échelles locales à l'échelle globale. Elle requiert au niveau national une collaboration étroite entre spécialistes des techniques spatiales radar et spécialistes de l'hydrodynamique fluviale, et une animation adaptée de cette double communauté. En effet, de par le caractère très innovant de cette mission – l'altimétrie à large fauchée –, des efforts importants en termes de développement algorithmique sont nécessaires pour accompagner la communauté dans la réalisation de produits hydrologiques complètement nouveaux.

La mission SWOT présente également des intérêts spécifiques pour la communauté des océanographes pour l'étude de processus à fine résolution. Les interactions entre les deux communautés « hydrologie » et « océanographie » se concrétiseront particulièrement sur les zones côtières et sur l'estimation des exports d'eau douce des fleuves vers les océans.

La mission SWOT, avec son instrument KaRIN, réalisable à échéance 2015-2020, est la deuxième priorité du groupe Surfaces Continentales.

3.3 Le cycle du carbone

La connaissance des flux de carbone entre l'atmosphère et la biosphère reste largement insuffisante, dans la mesure où les estimations associées à la **partie continentale du cycle du carbone** présentent d'énormes incertitudes. Pour mieux comprendre cette composante essentielle du cycle, il est important d'évaluer avec précision le stock de carbone des surfaces émergées ainsi que sa dynamique, et ce à l'échelle du globe, avec une méthodologie uniforme. C'est l'objectif principal de la mission Biomass, une des trois missions candidates Earth Explorer de l'ESA sélectionnées pour un passage en phase A suite au « User consultation meeting » de Lisbonne en Janvier 2009. Les produits visés sont une carte de la biomasse forestière à l'échelle du globe à une résolution de 100 m, ainsi que le suivi de son évolution (déforestation, reforestation). L'instrument proposé est un radar polarimétrique en bande P et les techniques d'estimation de la biomasse ou de la hauteur des arbres reposent sur une analyse radiométrique des signaux rétrodiffusés ou sur l'interférométrie polarimétrique. Les équipes françaises sont très impliquées dans le projet (le PI est Thuy le Toan du Cnes) et ont démontré leur expertise sur ces techniques. Le groupe Surfaces Continentales du Tosca estime que les objectifs de la mission rentrent bien dans le cadre des besoins de la communauté. Il recommande **un soutien fort du CNES au cours de la prochaine phase A de la mission Biomass**. La télédétection radar à basse fréquence (bande P à 435 MHz) représente un défi technologique (taille d'antenne, correction des effets ionosphériques). Il est cependant à souligner que des concepts CNES (polarimétrie compacte) peuvent être utilisés dans la conception de cette innovante mission. Il est recommandé **un fort accompagnement de la communauté scientifique française, qui devrait se structurer autour d'une mission originale**. L'objectif est que la mission soit finalement sélectionnée par le Programme ESA Earth Explorer (voir partie 5.3 pour l'accompagnement).

4. Nouveaux besoins et défis technologiques à plus long terme

Si les priorités exposées en partie 3 se rapportent à du court terme (avant 2015 pour Mistigri) ou du moyen terme (2015-2020 pour SWOT) le groupe Surfaces Continentales a également identifié des besoins en observables de la communauté scientifique qui devront être couverts sur le plus long terme. Compte tenu des enjeux scientifiques exposés plus haut, deux options sont avancées, constituant actuellement des défis technologiques.

4.1 Haute revisite pour la compréhension des dynamiques temporelles

La compréhension de la dynamique des espaces naturels, des terres agricoles, des milieux aquatiques, des territoires ruraux et des zones urbaines impose de les observer à différentes

échelles de temps : diurne et saisonnier (fonctionnement), interannuel (variabilité et évolution), toutes échelles (détection de changements). Le suivi des dynamiques temporelles pose aujourd'hui des difficultés majeures, liées aux limitations des systèmes satellitaires en opération : manque de résolution des systèmes à haute répétitivité temporelle (horaire pour les géostationnaires – GEO – ou journalière théorique pour les orbites basses – LEO –), irrégularité de l'échantillonnage temporel effectif par rapport au théorique en raison de la nébulosité, hétérogénéité des sources satellitaires, difficulté à constituer des archives.

Une mission satellitaire permettant un suivi à haute résolution spatiale (multispectral à 20 m avec une composante infrarouge thermique à 50 m) et haute répétitivité temporelle (journalière, voire horaire), fournirait un socle homogène pour étudier les dynamiques des systèmes agricoles et environnementaux à différentes échelles de temps. A la différence de démonstrateurs comme Venüs et Mistigri, elle devra permettre un **suivi global de la planète ou d'une grande zone d'intérêt particulière**. Si deux voies technologiques sont envisageables, GEO et LEO, il semble que la première présente quelques avantages sur la seconde, notamment en termes (1) de couverture homogène des différentes échelles de temps (horaire à interannuel), (2) d'innovation technologique, (3) de coût (cf. étude du PASO). Dans ce contexte, il faudra poursuivre l'étude Geo Risques.

La communauté scientifique concernée par une telle mission couvre l'ensemble très large des laboratoires travaillant sur la gestion des milieux et ressources, sur les dynamiques des écosystèmes et de la surface terrestre, sur les dynamiques des populations et des sociétés. Elle devra être accompagnée et animée autour des méthodes de traitement de séries de données temporelles, des méthodes de changement d'échelle, de l'assimilation de données dans la modélisation de systèmes complexes.

4.2 Lidar et structure 3D de la végétation et des surfaces

L'accès aux caractéristiques de **structure 3D de la végétation** (hauteur, stratification, structure des peuplements, densité verticale de la biomasse, trouées...) est très utile pour caractériser les espaces naturels, comprendre la structure et le fonctionnement des écosystèmes forestiers, évaluer leur productivité et leur rôle dans le bilan de carbone, caractériser leur dynamique en réponse à des pressions liées au changement climatique et aux activités humaines, comprendre les échanges à l'interface sol-atmosphère. Actuellement ces caractéristiques sont acquises localement par mesures in situ, et plus récemment par mesures Lidar aéroportées.

La technologie Lidar est la seule à donner accès à distance aux caractéristiques 3D des surfaces. Le signal Lidar, émis au nadir depuis une plateforme satellitaire, interagit avec la surface sur une tache de 50 m de diamètre au sol, où il est réfléchi par les différentes strates de cette surface. Le traitement de la forme d'onde écho permet de quantifier les caractéristiques morphologiques avec une résolution verticale métrique. Opérationnelle sur plateformes aéroportées, la technologie a atteint un niveau de maturité qui rend réaliste sa programmation sur une mission satellitaire innovante dédiée au suivi global de la structure verticale des surfaces, avec pour objectifs secondaires mais de grand intérêt le suivi altimétrique des eaux et la détermination de modèles numériques de terrain de haute résolution et précision. Le développement de la technologie satellitaire nécessite des travaux sur la spécification des mesures, la modélisation et le traitement du signal, le choix de capteurs, l'orbitographie. Ce projet de mission se conçoit en complémentarité avec les missions existantes et à venir en imagerie optique et radar (en attendant la possibilité de développement de Lidars imageurs), ainsi qu'en altimétrie et interférométrie radar. Ce couplage permettra par exemple des avancées dans le domaine de la caractérisation de la structure 3D des paysages.

Une telle mission permettrait l'acquisition de données environnementales critiques pour la connaissance et la gestion des milieux et des ressources renouvelables (forêts, espaces

naturels, eau) et pour la prévision des risques naturels (propagation des feux de forêt, inondations, érosion, glissements de terrain, volcanisme). Grâce notamment au soutien pendant ces dernières années du groupe Surfaces Continentales du Tosca, la communauté scientifique nationale est aujourd'hui structurée (groupe de travail Lidar, projet Ex-Folio) et rassemble des laboratoires spécialisés dans le développement de la technologie, des capteurs et des instruments Lidar (LMD, EADS, DGA...) et des laboratoires dédiés aux champs d'application, méthodes de traitement et de modélisation du signal, spécifications de mesure (Cemagref-TETIS, IGN-MATIS, IFREMER, CIRAD-AMAP, INRA, IPGP...), en association avec des utilisateurs aval (ONF, IFN, SHOM, BRGM...).

Ce projet devra prendre en compte l'évolution du projet de mission DESDynI de la NASA qui envisage de coupler un radar à synthèse d'ouverture en bande L avec polarisations multiples et un Lidar multifaisceau dans l'infrarouge (1064 nm), avec une résolution spatiale de 25 m et une résolution verticale de 1 m, dans une configuration optimisée pour l'étude des risques environnementaux et du changement global (il n'est pas exclu d'embarquer les deux capteurs sur des plates-formes distinctes).

5. Accompagnement de missions

Toute mission doit naturellement être assortie de moyens d'accompagnement, permettant par exemple le développement d'algorithmes adéquats de traitement des données, la production de variables élaborées (produits biophysiques, hydrologiques, etc.), la mise au point de techniques d'assimilation de données, ou encore la formation de la communauté des utilisateurs. Ceci est d'autant plus vrai que la technique envisagée est innovante (comme on l'a vu plus haut avec SWOT par exemple) ou que la communauté potentielle des utilisateurs est large (comme on l'a évoqué avec un géostationnaire à échelle fine). Avant d'exposer en partie 6 quelques réflexions sur les besoins en un pôle thématique au service de la communauté Surfaces Continentales, nous voudrions ici évoquer trois exemples de mesures d'accompagnement concernant une mission en phase finale de préparation (SMOS, dont le lancement est prévu vers la mi-2009), une mission bien avancée (Venus, qui devrait être lancée début 2011) et une dernière qui vient d'être sélectionnée pour une phase A par l'ESA (Biomass).

5.1 SMOS

SMOS, dont les premières données alimenteront les recherches en hydrologie spatiale et météorologie, a permis de fédérer la communauté française, notamment celle des surfaces continentales, et de réaliser un modèle d'émission micro-ondes communautaire (L-MEB) validé par plusieurs expériences (observations in situ et aéroportées). Ce modèle sert de base à la mise au point des chaînes de niveau 2, 3 et bientôt 4. Ces dernières années, des progrès significatifs ont été obtenus dans la reconstruction d'images interférométriques et leur étalonnage, l'analyse des phénomènes perturbateurs (Gibbs) et la modélisation de couverts particuliers (litière, couverts forestiers, rugosité, événements spécifiques de type gel/dégel et rosée), ainsi que la modélisation de la constante diélectrique des sols (notamment les sols sableux secs et chauds). Un instrument (radiomètre CAROLS en bande L) a été développé et équipe maintenant l'avion de recherche français ATR-42. Cet instrument pourra bientôt être utilisé pour la calibration/validation des produits SMOS, et notamment des produits de niveau 3 et 4 en cours de réalisation : amélioration de l'humidité de surface de niveau 3 par synergie avec d'autres capteurs (pluie TRMM, humidité du sol par diffusiomètre...), production de produits « humidité du sol » désagrégés à 1 km, extraction de l'humidité de la zone racinaire... Ces trois pistes sont étroitement liées et s'appuient à la fois sur des données de télédétection auxiliaires et sur des sorties de modèles météorologiques et de fonctionnement des surfaces continentales. Compte tenu de la difficulté d'interprétation des campagnes aéroportées et du caractère

novateur de l'instrument SMOS, de nouvelles campagnes synchrones au passage du satellite sur des sites déjà bien instrumentés en terme d'humidité du sol seront sans doute nécessaires, ainsi qu'une étude plus poussée sur des surfaces en limite de performance pour les algorithmes de niveau 2 et 3 (topographie contrastée, couvert végétal dense, zones gravillonnaires...). La variable de surface « humidité superficielle » et l'estimation de l'eau disponible dans la zone racinaire qui en est déduite sont extrêmement importantes pour la prévision météorologique, le suivi du cycle de l'eau et les aspects climatiques qui en découlent, ainsi que la prévision des événements extrêmes. Si la mission SMOS a pour vocation de fournir, pour la première fois, cette donnée avec un échantillonnage spatiotemporel adapté (50 km et mieux que 2.5 jours), le prochain défi consistera à pouvoir fournir aux utilisateurs les données nécessaires au suivi et à la gestion des ressources en eau à une échelle plus fine et adaptée. Le défi technologique consistera donc à trouver une approche permettant de satisfaire ce besoin, i.e., des champs globaux et fréquents (mieux que 3 jours) d'humidité superficielle et racinaire avec une résolution spatiale au moins dix fois meilleure (5 km ou mieux).

5.2 Venùs

La mission Venùs (à l'heure actuelle, déjà, pour partie Formosat, et probablement à partir de 2014 Sentinel 2) permettra pour la première fois d'avoir des séries à haute résolution et haute répétitivité dans le domaine visible, avec une géométrie de prise de vue constante. La qualité obtenue (notamment en terme de bruit atmosphérique) sera alors inégalée à cette échelle, d'où une facilité d'emploi et de nouvelles possibilités d'utilisation (suivi des labours, détermination des cultures intermédiaires, analyse diachronique de la phénologie...). Ceci concerne aussi bien les classifications multitemporelles (suivi de la végétation, suivi des fleuves et des zones inondées) que la production de chroniques de variables biophysiques pour le pilotage de modèles d'échanges sol-plante-atmosphère ou de croissance de végétation. Les algorithmes de niveau 2 et 3, y compris la déconvolution des contributions de voisinage, sont en cours de calibration/validation sur un grand nombre de sites à l'aide de données in situ, et la mise au point d'algorithmes automatiques à l'échelle du globe est un défi pour les années qui viennent. Comme pour SMOS, il reste à définir les produits de niveau 4 (LAI, fAPAR...), valider les produits « réflectance » (niveau 3) et évaluer les inversions de variables intermédiaires (colonne d'eau atmosphérique, épaisseur optique des aérosols). Des améliorations des niveaux 2, 3 et 4 sont attendues d'une exploitation combinée de la richesse spectrale de Venùs et des séries temporelles.

5.3 Biomass

En dehors de ces deux missions, dans lesquelles le CNES est fortement impliqué, il est nécessaire d'accompagner les travaux de la phase A de la mission Biomass, en vue de sa sélection finale. Il s'agit notamment de valider et d'améliorer les algorithmes d'estimation de la biomasse et de la hauteur des couverts forestiers. Les techniques classiques basées sur la radiométrie doivent être validées sur les couverts très denses (> 600 t/ha) que l'on rencontre fréquemment en région tropicale. Des techniques plus novatrices, comme l'interférométrie polarimétrique, doivent être affinées, en particulier pour intégrer la non-simultanéité des mesures interférométriques. Un des progrès significatif de ces dernières années repose sur l'utilisation combinée de ces deux techniques et les premiers résultats obtenus doivent être confirmés sur des couverts tropicaux. Par ailleurs, la télédétection radar en bande P recèle des potentiels importants dans d'autres domaines d'application : cartographie de la géologie du sous-sol en zone aride, mesure de l'humidité des sols, suivi de la dynamique des pergélisols et des glaciers, cartographie des courants marins à grande échelle. Ces domaines constituent des objectifs secondaires importants de la mission Biomass. Ils doivent être étudiés lors de la phase A de la mission, notamment à l'aide d'acquisitions de radar aéroportés sur des sites tests représentatifs. En résumé, les efforts à fournir concernent une consolidation des méthodes et

des algorithmes de traitement, à partir d'expérimentations et de données réelles acquises lors de campagnes aéroportées. On pourra pour cela bénéficier des travaux réalisés par le CNES sur la polarimétrie compacte, et mettre en oeuvre le système bande P aéroporté développé par l'ONERA.

6. Structuration de la communauté : pôle(s) thématique(s) et centre(s) de traitement

Le constat a été fait à différentes reprises que les données de télédétection sont relativement sous-exploitées par la communauté SIC, par rapport aux autres communautés du Tosca, alors que l'évolution des recherches nécessite de plus en plus d'informations spatialisées. Ceci est en partie lié à la grande diversité de cette communauté, tant par ses objets de recherche que par ses méthodes spécifiques d'acquisition de données in situ. Des freins résident également dans l'accès aux données : malgré le programme ISIS (données SPOT), toutes les données acquises par les différents capteurs ne sont pas accessibles rapidement et facilement, alors qu'elles pourraient être valorisées par des méthodes de fusion permettant de réaliser des suivis réguliers des surfaces. Enfin, une autre composante de la sous-exploitation réside dans l'absence d'un centre technique dédié, dont le rôle serait de faciliter l'accès aux données et de stimuler leur utilisation par la communauté scientifique. Le groupe Surfaces Continentales réaffirme les forts besoins de la communauté dans un pôle qui permettrait de mutualiser les moyens informatiques et humains pour le traitement des données et qui aurait aussi un rôle de formation, d'animation et d'accompagnement méthodologique. Son organisation et son fonctionnement pourraient être inspirés des pôles ICARE ou ETHER qui semblent donner satisfaction dans les communautés concernées.

La communauté SIC est très large et exprime des besoins très diversifiés (1) en données satellitaires, (2) en produits (variables) biogéophysiques spatialisés et (3) en méthodes de spatialisation adaptées à des problématiques émanant parfois des gestionnaires des territoires. En même temps, les méthodes et instruments d'observation sont souvent communs et les observables terrestres (biosphère et cryosphère) utilisées dans les différentes thématiques dérivent pour une large part des mêmes modes de traitement. S'il est sans doute illusoire de vouloir tout unifier, il est fort probable qu'une décentralisation complète de tous les services d'accompagnement, par échelles spatiales ou par thématiques, conduise à une grande perte d'efficacité.

Un (des) pôle(s) thématique(s) « Surfaces Continentales » doi(ven)t fournir à la communauté scientifique des services en matière d'accès à des données satellitaires de qualité, de fourniture de produits biogéophysiques sélectionnés, d'accompagnement méthodologique sur les approches de spatialisation thématiques mobilisant l'information satellitaire. De manière à respecter la double spécificité évoquée (des données, au départ uniques, utilisées pour de très nombreuses applications nécessitant des méthodes adaptées), notre recommandation est d'orienter la recherche de solutions vers un pôle thématique « Surfaces Continentales » à deux niveaux articulés entre eux :

- un centre de traitement chargé d'élaborer et de rassembler des algorithmes de traitement des données satellitaires et de délivrer des produits biogéophysiques de niveau 1. Ce centre pourrait mettre à disposition des méthodes de traitement des données satellitaires et des moyens informatiques en fonction des besoins des utilisateurs, en assurant le cas échéant leur formation, de façon à faciliter l'interprétation des données et à en améliorer la qualité. Il pourrait aussi contribuer à mutualiser les données satellitaires et l'information géographique au sein de la communauté scientifique SIC : la mutualisation des données satellitaires acquises par les équipes scientifiques nous semble être un levier très fort pour stimuler leur utilisation et les échanges d'expérience entre laboratoires ; la mutualisation de l'information géographique au

sens large pourra se faire par le développement et l'hébergement d'une bibliothèque de métadonnées qui permettrait de renforcer le lien entre les équipes spécialistes de la télédétection, les équipes thématiques et les utilisateurs aval. Les données concernées sont sans limitation d'échelle (spatiale et temporelle), et on y trouverait en particulier des séries temporelles de longue durée, indispensables aux études de plus en plus nombreuses d'impacts de l'évolution du climat sur les écosystèmes ;

- un réseau de centres thématiques, plus proches des équipes thématiques et des utilisateurs aval, dont le rôle serait de fournir des produits de niveaux plus élevés (2 et 3), des méthodes de spatialisation adaptées à des champs thématiques, et un accompagnement méthodologique aux équipes de recherche qui le souhaitent. Ces centres pourront avoir une vocation régionale ou thématique (voire les deux à la fois). Ils contribueront eux aussi à la définition, à la capitalisation et à la mutualisation d'algorithmes et de méthodes de spatialisation, et pourront également jouer un rôle de formation, pour des besoins plus thématiques que ceux traités par le centre de traitement.

Ce dispositif de pôle thématique « Surfaces Continentales » à deux niveaux (centre de traitement et centres thématiques) devrait avoir un pilotage multi-organismes, rassemblant l'ensemble des partenaires concernés par l'utilisation du spatial pour les Surfaces Continentales. Il nous semble ainsi important que les contours du centre de traitement ne soient pas dessinés sur des échelles (spatiales ou temporelles) mais plutôt sur des niveaux de traitement, et donc de généralité d'applications, en fonction de besoins établis avec les utilisateurs. La séparation globale/régionale n'est pas nécessairement pertinente car les données et les méthodes sont souvent communes et l'évolution des recherches tend vers une exploitation multicapteurs et multi-échelles de la télédétection. Le centre de traitement, voire le pôle thématique dans son ensemble, devrait être aussi défini et positionné par rapport à l'offre internationale et en particulier européenne, un des enjeux à plus long terme étant la place de la France dans le service de base « Land Monitoring Core Service » de GMES.

7. En conclusion : les recommandations du groupe Surfaces Continentales

7.1 Les missions spatiales

Les priorités affichées sont 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 se prononce ainsi clairement pour les **deux priorités** suivantes de missions spatiales :

- 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) ;

- la mission **KaRIN/SWOT** (priorité 2) pour une meilleure caractérisation des surfaces d'eau libre et leurs variations relative en hauteur, permettant une estimation des débits des grands fleuves.

La première est envisageable à court terme (d'ici 2015) et la seconde à moyen terme (2015-2020).

Le groupe recommande également qu'un **fort soutien** soit apporté à la mission **Biomass** pour l'estimation de la biomasse globale et une meilleure connaissance de la composante terrestre du cycle de carbone, l'objectif étant sa sélection finale par le programme ESA Earth Explorer.

Le groupe met également en avant **deux missions à plus long terme (au-delà de 2020) :**

- une mission **géostationnaire** visant à répondre à la forte demande en besoin de haute revisite temporelle pour l'étude de la végétation et des processus associés ainsi qu'à une meilleure compréhension des processus liés aux risques naturels (l'étude trade-off Geo/Leo en phase 0 au CNES montre l'avantage du géostationnaire sur une constellation en orbite basse) ;

- 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.

7.2 Un besoin fort d'accompagnement des missions

Le groupe demande un **solide accompagnement national** aux missions qui l'intéressent tout particulièrement (Venus, Smos, Biomass, Mistigri, SWOT, etc.). Cet accompagnement doit 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, mission choisie par l'ESA pour entrer en phase A, un soutien actif est demandé, visant à maximiser les chances de voir cette mission finalement retenue.

Enfin, le groupe Surfaces Continentales attire fortement l'attention du CNES sur **l'intérêt d'un pôle thématique, à mettre en place rapidement, 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, un tel pôle donnerait aux expertises nationales une visibilité à l'échelon européen et positionnerait ainsi la communauté scientifique française sur les futurs enjeux européens dans le cadre de GMES, et en particulier la suite du LMCS (Land Monitoring Core Service) après Geoland2.

Composition du groupe Surfaces Continentales (février 2009)

Gilles Boulet	(IRD, Cesbio, Toulouse)
Yves Brunet	(Inra, Ephyse, Bordeaux) Président
Jean-Christophe Calvet	(Météo-France, CNRM, Toulouse)
Pascale Dubois-Fernandez	(ONERA/DEMRSAR, Salon)
Martine Guérif	(Inra, Emmah, Avignon)
Yann Kerr	(CNES, Cesbio, Toulouse)
Pascal Kosuth	(Cemagref, Tetis, Montpellier) jusqu'au 01/01/2009
Catherine Ottlé	(CNRS, LSCE, Gif-sur-Yvette)
Philippe Paillou	(Université Bordeaux, LAB, Bordeaux)
<i>Selma Cherchali</i>	Secrétaire CNES (<i>responsable thématique Surfaces Continentales et hydrologie</i>)