

GROUPE DE TRAVAIL THEMATIQUE

SURFACES CONTINENTALES

Clément ALBERGEL, Agnès BEGUE (Co-Présidente), Xavier BRIOTTET, Laurent FERRO-FAMIL, Simon GASCOIN, Jean-Pierre LAGOUARDE, Fabienne MAIGNAN, Philippe MAISONGRANDE (Thématicien CNES), Nadège MARTINY, Thierry PELLARIN, Ghislain PICARD, Anne PUISSANT, Jean-Louis ROUJEAN (Président), Frédérique SEYLER, Kamel SOUDANI, Cécile VIGNOLLES (Thématicienne CNES)

INTRODUCTION

Les enjeux et les questions scientifiques

D'ici à 2050, la population mondiale va passer de 7.7 à 9.8 milliards d'habitants. Cela accentuera des déséquilibres environnementaux et sociaux déjà en cours. Il y a donc urgence à réfléchir à des voies de transition écologique, nutritionnelle et épidémiologique. L'observation spatiale des surfaces continentales est un atout majeur pour surveiller des objets d'étude très variés qui forment des paysages rapidement évolutifs sous contraintes anthropique et climatique. Les défis prioritaires concernent le suivi et la prévention des risques environnementaux, l'optimisation des ressources (nourriture, eau, énergie) (10% de la population est sous-alimentée, l'accès à l'eau potable reste difficile), et la réponse apportée à une urbanisation en plein expansion (+3% par an). Les enjeux ciblés sont l'impact des aléas (vulnérabilité littorale et climat, pression sur la ressource), la sécurité alimentaire, le risque sanitaire (épidémiologie, pollution), la gestion des territoires (aménagement, urbanisation, artificialisation, littoral, trames vertes et bleues, foncier) et la résilience à la perte de biodiversité (disparition rapide des espèces et des écosystèmes). Les travaux de recherche menés aident à mieux comprendre les processus pour mieux répondre aux besoins environnementaux et sociétaux. La multiplicité des missions spatiales - proposant de nouvelles mesures ou assurant leur continuité - améliore notre connaissance des processus physiques mis en jeu pour répondre aux grands questionnements scientifiques autour des thèmes fédérateurs que sont les cycles de l'eau et du carbone, et l'usage des terres.

Le cycle de l'eau

L'eau est un sujet transverse qui implique tous les compartiments clés de la 'zone critique' (du socle rocheux au sommet de la canopée), lieu des interactions atmosphère/ hydrosphère/ lithosphère/ biosphère. Un bilan d'eau amélioré aide à spécifier la disponibilité, la qualité, la distribution, la localisation des stocks, les zones inondées, l'endoréisme, et le fonctionnement des grands bassins. Les composantes principales du cycle de l'eau sont mesurables de façon directe ou indirecte depuis l'espace : précipitations, évaporation, transpiration (des végétaux), interception, ruissellement, infiltration, percolation, réserves de la nappe souterraine. Les missions en vol permettent déjà de dresser un bilan satisfaisant de l'évolution de la ressource en eau via une modélisation des échanges principalement verticaux. Des améliorations sont souhaitables au regard des échanges latéraux avec une augmentation de la résolution spatiale. Il manque à ce jour d'établir des cartographies à haute résolution spatiale de l'évaporation.

Le cycle du carbone

Ce thème est aussi transverse car le carbone existe sous forme gazeuse, dissoute, minérale et est aussi stocké dans les sols et les plantes. Pour lutter contre un rejet anthropique atmosphérique d'environ 4 Gt C/an, la surface peut renforcer son rôle de puits en misant sur la reforestation et aussi la mise en place de pratiques agricoles. Les missions spatiales mesurant la biomasse aérienne renseignent sur les stocks de carbone des forêts, ce qui est informatif sur l'allocation et la régénération du biome. La mesure de fluorescence représente la photosynthèse et détecte des stress alors que l'occupation des sols documente le parcellaire agricole, ce qui supporte des enjeux de décision et de gestion concernant les moyens de lutter contre le réchauffement climatique à partir de leviers d'atténuation, un objectif du *Space Climate Observatory*.

L'usage des terres

Les processus liés aux activités humaines et à l'utilisation des sols ainsi que les services écosystémiques associés sont regroupés sous le terme « Land System » dans lequel l'occupation et l'utilisation des sols utilisant des données multi-sources et multi-résolutions ont un rôle central vis-à-vis de la plupart des applications thématiques. Au premier rang, l'urbain car près de 60% de la population vit en ville et cela va augmenter, notamment dans les pays émergents. L'aménagement de l'urbanisme, la nature en ville, la gestion des risques, et

le suivi de grands territoires sont des sujets centraux. L'usage des terres cultivables pour la sécurité alimentaire peut être optimisé à partir d'inventaires cartographiques. La télé-épidémiologie s'intéresse aux bouleversements anthropiques de l'environnement (urbanisation, déforestation) sur l'émergence des épidémies. L'érosion du littoral est aussi quantifiable. La perte de biodiversité, causée par une anthropisation croissante, se traduit par des indicateurs : rapide disparition d'espèces et d'écosystèmes, fragmentation des habitats naturels. Les missions spatiales proposant une haute résolution spatiale avec une revisite fréquente et du multi-spectral détectent déjà les tendances et les ruptures pour les objets étudiés.

1. Bilan et avancées depuis la prospective 2014

1.1. Les priorités du SPS 2014

Les recommandations faites lors de la prospective 2014 visaient à améliorer notre compréhension du fonctionnement et des dynamiques spatio-temporelles des surfaces et interfaces continentales, sous forçage anthropique et climatique : nature et dynamique des paysages, fonctionnement des surfaces (énergie, eau, carbone), évolution des ressources en eau. Le tableau ci-dessous dresse un état des lieux.

La Rochelle 2014	Le Havre 2019
P1 (2015) : THIRSTY (IRT 50 m, 3 jours)	TRISHNA (coll. ISRO). Phase A (fin en juillet 2019)
Continuité (2020) : SWOT (altimétrie eau)	Forte mobilisation, études préparatoires convaincantes
BIOMASS : Sélection ESA en 2013, 7 ^e mission EE	Forte mobilisation, études préparatoires convaincantes
Plus long terme : hyper-spectrale HYPXIM	Forte mobilisation, études préparatoires confortant la mission. Phase A HSP (depuis mai 2019)
Plus long terme : géostationnaire OCAPI	Un projet TOSCA/SC
Plus long terme : lidar végétation	Une communauté, des études scientifiques et techniques
Démarrage du pôle thématique THEIA	De nombreux CES et des ART
FLEX - Sélection ESA en 2013, 8 ^e mission EE	Une communauté, des études prospectives

Une mission proposant des mesures dans l'infrarouge thermique avec une haute résolution spatiale avait été jugée prioritaire. Initialement envisagée en collaboration avec le JPL/NASA, qui a depuis concentré son effort sur la mission ECOSTRESS à bord de l'ISS, une telle mission, baptisée TRISHNA et conduite en collaboration avec l'ISRO, arrive en fin de phase A. Le vœu d'accompagner des missions scientifiques Earth Explorer de l'ESA comme FLEX (2023) et BIOMASS (2021) a été bien suivi, ainsi que l'exploitation des données des missions actuelles S2 et Venùs dédiées à la cartographie et au suivi des ressources végétales. Les études préparatoires ont concerné une mission hyper-spectrale destinée à caractériser la biodiversité végétale, les eaux côtières et continentales et le milieu urbain. Une telle mission, initialement HYPXIM rebaptisée HSP, démarre une Phase 0/A (coll. avec Singapour). Enfin la recommandation de développer un LIDAR végétation aura permis de démarrer des études scientifiques et techniques, de même pour la mission géostationnaire à haute résolution spatiale OCAPI. L'évaluation des besoins en eau pour la consommation humaine et la production agricole ainsi que l'appréciation du risque sanitaire s'appuient sur des programmes spatiaux en cours (SMOS, S1 & S2) et en préparation (SWOT, en 2021) en ce qui concerne l'altimétrie des eaux continentales. Des études préparatoires visent à prolonger le succès de SMOS avec une amélioration de la résolution d'un facteur 10 pour SMOS-HR.

1.2. Les avancées scientifiques

Des cartographies multi-échelles des paysages et des variables biophysiques sont indispensables pour suivre les changements des effets anthropiques et climatiques, et quantifier les ressources naturelles. Décrire l'usage des terres apparaît comme une nécessité pour obtenir une stratification du paysage qui sert d'appui aux modèles hydriques et de carbone distribués.

Une meilleure connaissance de la ressource en eau

Les variables et les compartiments liés au cycle de l'eau ont bénéficié de la richesse des données spatiales pour accroître le rôle intégrateur de l'hydrologie dans le système socio-écosystème, ce qui est essentiel pour appréhender la variabilité spatio-temporelle de la 'zone critique'. Les mesures gravimétriques réalisées par le

passé avec GRACE - et sa suite récente GRACE-FO – mesurent les fluctuations des stocks d'eau dans les réservoirs continentaux (eau des sols, eaux souterraines et manteau neigeux). Concernant l'altimétrie, HydroWeb a fourni une banque de données globales de séries temporelles de hauteurs d'eau sur les grands fleuves (Amazone, Congo, Mekong, Niger), les lacs et les réservoirs, et les zones inondées (SARAL/AltiKa, Sentinel-3). La préparation de la mission SWOT a motivé un projet d'envergure internationale sur les estuaires et les zones côtières visant à caractériser les phénomènes hydrodynamiques complexes, ce qui représente des enjeux économiques et écologiques majeurs. L'humidité des sols est mesurée par l'instrument micro-ondes SMOS qui évalue aussi les risques d'inondation et de sécheresse. L'assimilation des données SMOS améliore la prévision de la température de l'air dans le modèle du CEPMMT et précise le rôle de la végétation dans le cycle hydrologique (via la zone racinaire). Les données SMOS se sont aussi révélées pertinentes pour le suivi de la banquise et de l'intérieur de la masse des calottes glacières. Pour préparer SWOT, le modèle CTRIP a été utilisé pour simuler les débits sur plusieurs grands fleuves (exemple du Mississippi en Figure SC-1)) en assimilant des débits estimés à partir de séries altimétriques de cotes d'eau ENVISAT.

Les travaux sur la cryosphère de montagne ont concerné notamment une mise en production opérationnelle des cartes d'enneigement sur le relief (France, monde) réalisées à partir des données Sentinel-2. Grâce à deux décennies de données ASTER retraitées, on a mesuré un amincissement des glaciers des hautes montagnes d'Asie plus faible, soit une contribution 3 fois moindre à la hausse du niveau des mers évaluée par les modèles (Figure SC-2). La qualité des eaux continentales est maintenant renseignée grâce au transport sédimentaire à partir des données Sentinel. L'évaporation due à la végétation a été cartographiée à partir des données Landsat. Les produits liés au cycle de l'eau sont maintenant délivrés par le pôle THEIA au travers de nombreux CES (voir Annexe), ce qui contribue à améliorer la gestion de la ressource en eau.

Une meilleure connaissance du cycle, des flux et de stocks de carbone

Les satellites sont un outil majeur pour une meilleure représentation de la grande variabilité spatiale et temporelle des flux et des stocks de carbone. L'estimation multi-échelle des attributs structuraux et fonctionnels des agro-écosystèmes, des écosystèmes aquatiques, des paysages, ainsi que des variables biophysiques sert à paramétrer et valider les modèles de la biosphère. La teneur en carbone organique des sols à l'échelle de la France a été cartographiée à la résolution de 90 m selon la nomenclature GlobalSoilMap en utilisant des données Sentinel-1 & -2 et des modèles statistiques multi-variés. La typologie des changements de biomasse a été exploitée pour établir une cartographie des modifications de stocks de carbone pour les forêts sèches africaines à partir du VOD (Vegetation Optical Depth) en bande L de SMOS. Pour préparer BIOMASS, les données ALOS de données de biomasse aérienne et de hauteur du couvert à la résolution de 200m ont servi à quantifier les aires déforestées à l'aide de modèles calibrés in situ (forêt du Gabon). Pour préparer FLEX, la fluorescence induite par le soleil (SIF) dérivée de GOME-2 et OCO-2 assimilée dans les modèles de surface continentale offre une contrainte inégalée pour estimer les variations de production primaire. La donnée LIDAR estime les variables dendrométriques (hauteur et densité) et par fusion avec l'optique, la structure verticale forestière pour accéder à la biomasse aérienne.

Un usage et une dégradation des terres mieux déterminés (urbain, littoral, végétation)

L'avènement des missions S1 & S2, et les progrès en termes de prétraitements de séries temporelles décimétriques (corrections atmosphériques, gap filling) ont contribué à mieux cartographier l'occupation et l'utilisation des sols sur de grandes surfaces (exemple de la carte annuelle sur la France). La complémentarité entre optique et radar a été mise en œuvre pour le suivi des surfaces et des pratiques agricoles dans différents systèmes de production : le riz en Camargue, dans le delta du Mékong (Figure SC-3) et sur les hauts plateaux malgaches. La fusion de données optiques multi-résolutions (MODIS, S1, S2, Landsat-8 et SPOT 6/7) a été exploitée pour cartographier les zones de feu, les agro-systèmes, les surfaces dégradées, la petite agriculture des pays du Sud, et pour délimiter des unités paysagères.

La haute répétitivité de S2 a été valorisée pour bâtir des séries temporelles pluriannuelles d'indices spectraux (STIS), de variables biophysiques, et dériver des métriques phénologiques et des dates clés caractéristiques des dynamiques des états de surface. Ces observables sont utilisées pour étudier les effets combinés de la saisonnalité naturelle et des activités humaines pour suivre la dynamique des systèmes naturels ou anthropisés (dégradation et régénération forestières en Amazonie, fonctionnement des roselières dans le delta du Danube, etc.). Les méthodes de détection des changements ont débouché sur des produits opérationnels pour la surveillance de la déforestation, des inondations ou des glaciers. La typologie des changements et des tendances basée sur l'analyse des STIS est en plein essor ; l'analyse des tendances du NDVI MODIS sur 10-15 ans a permis d'étudier la dégradation des terres en Afrique sub-saharienne et ses déterminants climatiques et anthropiques. Le développement de méthodes de fouille de données a conduit à caractériser l'évolution de phénomènes spatio-temporels (état de changement d'un lac, division de parcelle agricole) par analyse orientée objet via des techniques de représentation sous forme de graphes.

Pour étudier les EBV (variables essentielles de biodiversité), des campagnes aéroportées et le modèle de

transfert radiatif DART ont montré l'apport de la richesse spectrale pour identifier les espèces à une échelle unitaire et à l'échelle du groupement d'arbres. La structure 3D des forêts tempérées et tropicales est estimée à partir de données Lidar. Le maintien de la biodiversité repose sur le maintien des mosaïques paysagères, i.e. la fermeture des milieux naturels entraîne la disparition d'habitats et l'homogénéisation des paysages, et augmente les risques d'incendies. L'hétérogénéité des paysages est étudiée par analyse fréquentielle d'image à très haute résolution ou par le calcul d'indices paysagers à partir de cartes d'occupation des sols. En Californie, la résilience d'une végétation après une période de sécheresse intense a été bien mise en évidence à partir de la chlorophylle dérivée de l'imagerie hyper-spectrale AVIRIS (Figure SC-4).

Les maladies infectieuses telles que paludisme, dengue, méningite bactérienne, ou maladies diarrhéiques sont multifactorielles et difficiles à prévenir, dépister et contrôler. Pour identifier les facteurs environnementaux, démographiques et météorologiques favorables à l'émergence et à la propagation de ces maladies, des études en télé-épidémiologie s'appuient sur des produits issus de l'exploitation de données optiques et radar (occupation des sols, présence de poussières désertiques, qualité de l'eau, qualité de l'air, indices paysagers, étendue des eaux de surface et matières en suspension).

La fusion de données optiques multi-résolutions (MODIS, S1, S2, Landsat-8 et SPOT 6/7) a été exploitée pour détecter les surfaces artificialisées et les tissus urbains en zones tempérée et tropicale. Des travaux exploitant la stéréoscopie THR de Pléiades ont permis une meilleure connaissance 3D des bâtiments et de la distribution de la végétation urbaine. L'infrarouge thermique a été mis à profit pour cartographier les îlots de chaleur urbaine qui valident les schémas de bilan d'énergie en zone urbaine.

Les données Pléiades ont été utilisées pour caractériser le trait de côte en zone Aquitaine, ainsi que le continuum bathymétrie-MNT. De telles informations sont utiles pour l'estimation de la vulnérabilité des zones littorales aux événements extrêmes et donc à leur aménagement. De plus, le littoral fait l'objet d'un projet transverse sur l'érosion des falaises de craies à partir de l'imagerie Pléiades.

1.3. Les programmes nationaux et internationaux

Une bonne dynamique nationale

On relève une structuration forte de la communauté nationale autour des missions spatiales en opération (SMOS, S1 & S2, Pléiades, Venus) et en préparation (SWOT, BIOMASS, FLEX) et à l'étude (TRISHNA, SMOS-HR, HYPXIM,...), avec des projets combinant des données radar et optique (forêts tropicales, cultures). Plusieurs projets se sont focalisés sur l'assimilation de ces données, ce qui atteste de leur qualité. Des communautés émergentes se fédèrent autour des thématiques lidar et hyper-spectral. Un élément structurant est le pôle de données et de services pour les surfaces continentales THEIA qui, depuis 2012, s'est doté de 22 Centres d'Expertise Scientifiques (CES) développés autour de 10 thèmes et de 8 réseaux d'Animation Régionale THEIA (ART) (voir Annexe). Les CES développent des méthodes innovantes de mobilisation des données satellitaires, aéroportées et in situ pour en dériver des méthodes, des outils et des démonstrateurs. Les ART ont pour ambition d'accompagner les acteurs régionaux dans la maîtrise de l'observation spatiale pour répondre aux enjeux majeurs territoriaux en France et dans la ceinture inter tropicale. Les CES bénéficient d'un soutien financier via l'APR, ce qui représente 35% des projets soumis en 2018, pour valoriser les données spatiales et positionner la communauté française sur les futurs enjeux européens dans le cadre du programme Copernicus.

Certains projets initiés dans le cadre de l'APR ont trouvé un prolongement avec des programmes nationaux (PNTS, ANR, LEFE). Une communauté spatiale urbaine s'est fédérée à partir de 2016 autour de l'atelier annuel TEMU (Télé-détection pour l'Étude des Milieux Urbains) ouvert aux acteurs du monde socio-économique. La communauté hyper-spectrale est maintenant structurée et organise un colloque national dans le cadre de la SFPT Groupe hyper-spectral, réunissant environ 80 personnes chaque année, depuis 2014.

Participation aux programmes internationaux

Le Global Land Service du programme Copernicus amplifie la visibilité et l'usage de bases de données bio-géophysiques issues du spatial. C'est par exemple le cas du *CES Hydroweb* qui propose des produits sur la hauteur d'eau des fleuves et des lacs à partir de différents altimètres. Dans le cadre du programme *Climate Change Initiative* (CCI) de l'ESA, qui a pour objectif de bâtir de longues séries temporelles d'*Essential Climate Variables* (ECV), la recherche spatiale française contribue aux produits 'Biomass', 'Soil Moisture' et 'Lakes'. Elle participe aussi à la définition des variables essentielles de biodiversité.

Des équipes françaises sont impliquées dans des projets européens (FP7 SIGMA, ESA Sen2Agri, H2020 SENSAGRI, MULTIPLY). Dans le cadre du CEOS, un rapport a été produit pour définir les besoins de la communauté nationale hyper-spectrale pour l'étude des eaux côtières et continentales (coll. CSIRO).

2. Recommandations du groupe

2.1. Les priorités scientifiques

Le cycle de l'eau

La connaissance du stress hydrique des végétaux, accessible par télédétection dans l'infrarouge thermique, conditionne le réalisme des estimations d'évapotranspiration issues des modèles. Aujourd'hui les observations thermiques disponibles avec S3-SLSTR, MODIS et Landsat-8 n'offrent pas de résolutions spatiales et temporelles suffisantes pour aborder les besoins en eau à l'échelle des parcelles agricoles. Avec SMOS, la radio-interférométrie bande L permet depuis 11 ans l'élaboration de cartes d'humidité du sol, d'indices de sécheresse et de risques d'inondation à l'échelle globale mais avec une résolution de 40km. Depuis 2019 l'assimilation de ces cartes dans le modèle du CEPMMT améliore les prévisions météorologiques et l'évaluation des risques d'inondation et de sécheresse. Autre composante du cycle de l'eau observable par satellite, les niveaux des fleuves et des rivières bénéficient des missions altimétriques conventionnelles (nadir) passées, actuelles et à venir (TOPEX, JASON1&2, SARAL/AltiKa, JASON-CS/S6, S3, HY-2) et à fauchée (avec SWOT en 2021 puis WISA vers 2028). On note cependant qu'aucune de ces missions ne propose de répétitivité journalière. L'altimétrie à fauchée est également très utile au suivi pluriannuel des fluctuations de volume des calottes polaires. La gravimétrie renseigne directement sur le contenu total d'eau (liquide et calottes glaciaires) sous la trace de satellites comme GRACE et GRACE-FO. A ce jour l'Europe ne possède pas de mission gravimétrique et n'en prévoit pas.

Le cycle du carbone

Les enjeux de compréhension du cycle du carbone à l'échelle globale nécessite de caractériser le rôle essentiel de la végétation. À partir de 2021, la quantité de biomasse sera renseignée directement à partir d'observations en bande P (mission BIOMASS) avec, selon les densités observées, une sensibilité complémentaire en bande L en mode passif (produits SMOS L-VOD). Les mesures de fluorescence issues de FLEX renseigneront sur la production primaire brute. Le domaine thermique fournira une information complémentaire sur le stress hydrique aux résolutions spatiales et temporelles déjà évoquées pour l'eau.

Land system

La description des surfaces et de leurs types de couvert par imagerie satellitaire bénéficie directement de toute amélioration de résolution, qu'elle soit spatiale, temporelle ou spectrale (les résolutions S2&1 servant de référence actuelle). Souvent évoqué pour satisfaire les besoins du thème biodiversité, l'apport de l'hyper-spectral pourra faire ses preuves avec PRISMA. Les données Pléiades et SPOT 6/7 ont montré l'intérêt de la très haute résolution avec cependant un déficit de revisite que la future mission CO3D ne compensera que partiellement.

Dans ce contexte programmatique, les priorités de la communauté Surfaces Continentales (SC) sont déterminées principalement selon 4 critères:

- l'émergence de mesures physiques fondamentales manquantes à un des 3 thèmes
- la continuité des observations ayant fait la preuve de leur utilité
- l'existence d'une communauté thématique structurée autour d'un besoin démontré que renseigne une mission spatiale
- l'amélioration des résolutions spatiales et temporelles des observations selon la dynamique des processus et la taille des objets étudiés

Parmi les propositions reçues et selon ces critères, le groupe identifie 3 missions prioritaires :

TRISHNA (en fin de Phase A) est une mission d'imagerie dans l'infrarouge thermique engagée en collaboration avec l'agence spatiale indienne ISRO. Actuellement en fin de phase A, le lancement est prévu pour 2025. La spécificité de la mission (résolution spatiale de 50 m, revisite à 3 jours) répond à un besoin récurrent affiché par l'Inde et la France : caractériser le stress hydrique des végétaux, en particulier pour les surfaces agricoles. Viennent ensuite d'autres objectifs thématiques importants comme le climat urbain, la cryosphère, l'hydrologie continentale et côtière, ainsi que le suivi des eaux côtières et continentales. La mission Européenne LSTM projette - dans l'hypothèse de sa sélection parmi les 6 candidats prioritaires Copernicus - d'acquérir des données de nature très similaire (résolutions spatiales et temporelles, canaux). Si cette perspective de pérennisation de la mesure dans un contexte opérationnel Copernicus est fortement souhaitable, le concept proposé ne s'inscrit que dans un horizon plus lointain (vers 2028). La mission TRISHNA apparaît donc comme un précurseur indispensable pour la maîtrise de cette mesure et permettra de positionner la communauté

française en pointe avec pour perspective Copernicus. **Le groupe SC soutient le démarrage de la phase B TRISHNA, assorti d'un fort accompagnement de la communauté de recherche et aval.**

Le projet SMOS-HR (en fin de Phase 0) a pour objectif d'assurer la continuité de SMOS avec des mesures d'humidité du sol dont la résolution spatiale sera améliorée d'un facteur 4 (10km pour SMOS HR contre 40 pour SMOS aujourd'hui). Ainsi SMOS contribuent notamment à une meilleure gestion des ressources en eau et une meilleure connaissance du cycle du carbone (biomasse aérienne des arbres). Dans le domaine bande L passive dont il est ici question, **ULID** est un projet visant à vérifier le principe de mesure interférométrique bande L à partir d'éléments d'antennes disposés sur différents nanosatellites (de 2 à 4 satellites en formations). La base interférométrique ainsi élargie permettrait d'améliorer la résolution de la surface émettrice mesurée. Si le concept ULID est vérifié, il pourrait éventuellement bénéficier à SMOS-HR et surtout être appliqué à une troisième génération (SMOS-NG) dans l'objectif sera d'atteindre la résolution kilométrique à l'horizon 2030. **Le groupe SC soutient l'instruction de la phase A du projet ULID et espère la continuité de la filière radiométrie en bande L au sein de la communauté nationale.**

BIODIVERSITY (étudiée par le CNES en Phase 0 sous le nom de HYPXIM, HYPEX). Cette mission a pour objectif d'évaluer la biodiversité, l'état et le fonctionnement des écosystèmes terrestres, des zones côtières, des eaux continentales et de la végétation urbaine. L'imagerie hyper-spectrale à haute résolution spatiale (< 10 m) avec une revisite de 5 jours sur plus d'une centaine de sites par jour, vise plusieurs variables essentielles de la biodiversité terrestre, intertidale et marine (distribution et abondance des espèces, fragmentation des habitats, phénologie, variables biophysiques de la végétation). L'hyper-spectral vise aussi la concentration des hydrolats, la bathymétrie et l'occupation des petits fonds. Un suivi à haute résolution spatiale sur différents sites est requis afin notamment de faire le lien entre les observations de terrain faites par les écologues sur les assemblages d'espèces, et la diversité fonctionnelle. **Le groupe SC soutient l'idée d'une mission hyperspectrale et suggère d'affiner les spécifications de besoins.**

Le groupe SC exprime son intérêt pour les missions suivantes :

Déjà à l'étude, **SMASH** propose avec une constellation de 10 nanosats une mesure altimétrique nadir des niveaux d'eau des rivières à cadence journalière. La mission apporte une complémentarité temporelle aux autres missions nadir ainsi qu'aux altimètres avec fauchée comme SWOT (prévu en 2021) et WiSA (Wide Swath Altimetry, envisagé vers 2028) qui assureront une couverture spatiale quasi-globale. **MARVEL** propose de mesurer le champ gravimétrique dont une partie correspond au stock total d'eau et sa dynamique, ce qui est d'intérêt pour les estimations de déplétion des nappes phréatiques liées à l'irrigation et le volume des calottes polaires. Cette mission est très complémentaire de GRACE FO. **Le groupe SC recommande de poursuivre les études relatives à ces missions et d'explorer activement les cadres programmatiques envisageables pour leur réalisation.**

SENTINEL-HR propose de fournir 4 fois par an des mosaïques globales, avec une stéréoscopie envisageable, des terres et des côtes à la résolution entre 1 et 5 mètres dans 4 bandes spectrales optique. L'objectif est de déterminer des éléments fins du paysage (haies, couronnes d'arbres, trait de côte) et d'assurer un suivi intra-annuel des changements. **VLOBS** est un projet novateur de radar bi-statique opérant en bande L, complété par un capteur optique, qui mesurera les volumes des forêts, des glaciers, et des mouvements de terrain. La diversité d'angle d'incidence, grâce à l'association entre un récepteur mesurant au nadir et un système actif mono-statique, offre une grande pénétration dans les milieux volumiques naturels (complémentarité avec le ROSE-L). **Pour ces 2 dernières missions, le groupe SC propose que soient entreprises des études de faisabilité pour en estimer le rapport coût /bénéfice/maturité technique et scientifique.**

2.2. L'exploitation des données

Les approches traditionnelles d'extraction de la donnée connaissent des progrès incrémentaux et doivent continuer à être soutenues. Les approches émergentes en Intelligence Artificielle (IA), telles que le *Machine Learning*, et le *Cloud Computing* (services de calculs à distance pour le *Big Data*) soulèvent des enjeux particuliers, notamment la quantité et la qualité des bases de données d'apprentissage. C'est également le cas pour des approches en traitement de l'image (segmentation, classification objet), des signaux temporels (détection et typologie des changements, ondelettes) et de la fusion des données (multi-résolution, multi-sources). Ces approches se fondent sur des modèles mathématiques de l'information analysant des données hétérogènes (spatiales, textuelles, bases de données) pour en extraire une information (*data mining* ou fouille de données hétérogènes). L'inversion du signal radiométrique via des modèles du transfert radiatif ou des simulations de futurs capteurs doit continuer à exister. C'est un domaine plus segmenté par objet d'étude ou par

capteur que les approches précédemment listées, mais la tendance actuelle va vers une genericité des outils et un champ d'application plus large dans lequel l'assimilation des données peut s'appuyer sur l'IA.

Sur le plan technique, l'offre est foisonnante avec les DIAS de Copernicus, les TEP de ESA, *Google Earth-Engine* ou *Amazon Web Services* dans le secteur privé, ou au niveau national l'offre de GEOSUD (IDS). La mise en place de formations est une priorité pour une adoption par la communauté. Toutefois se posent des questions quant aux coûts induits et à la dépendance à telle ou telle offre, particulièrement pour les acteurs du secteur privé dont la feuille de route est inconnue.

2.3. La structuration des programmes nationaux

Des développements au service des scientifiques

Les algorithmes développés dans le cadre des CES et qui répondent à un cahier des charges précis (pertinence, intérêt, données disponibles, etc.) doivent continuer à être mis en production, via l'IDS **THEIA** ou grâce aux ressources de certains programmes internationaux, organismes ou fonds privés. A ce jour, 6 CES sont en phase de production (réflectance de surface, occupation des sols, hauteur des lacs et rivières, humidité des sols BR et HR, surfaces enneigées), et 2 sont en cours de prototypage (variables biophysiques de végétation et qualité des eaux continentales). Le CNES pourra aider les acteurs de THEIA à offrir une vitrine internationale aux produits des CES pour les valoriser, assurer leur pérennité et rentabiliser les moyens investis par le CNES (GEOGLAM, GEOBON) pour faciliter l'édition de métriques nécessaires à la satisfaction des ODD. Pour différentes situations géographiques, ces RS_EBVet RS-ECV doivent aussi démontrer leur capacité à renseigner les modèles écologiques sur de grandes surfaces.

Les **services d'observation** (CRYOBSCLIM, JECAM, etc) doivent être soutenus par le TOSCA pour continuer à exister. Les sites nationaux qui entrent dans un processus de labellisation INSU (SNO, SOERE, ZA) bénéficient d'infrastructures existantes et pourraient être des sites privilégiés mentionnés dans l'appel d'offre. Les sites des infrastructures de recherche (OZCAR pour la ressource en eau, ICOS pour les GES) doivent être considérés pour devenir d'éventuels sites de cal/val multi-missions et multi-agences de façon aussi à valoriser les données spatiales pour un certain nombre d'applications phares. La **proxydétection** est une activité émergente qui consiste à collecter des données in situ via un équipement pérenne de caméras, des drones, des ballons captifs. Des moyens d'accompagnement pour densifier les outils de proxydétection pourraient être mis en place pour affiner la préparation de futures missions spatiales et accompagner les missions en cours (cal/val).

L'**offre SAFIRE** doit servir à mieux préparer les missions en préparation du CNES. Pour cela, elle doit mieux bénéficier d'une instrumentation multi-spectrale dans l'infrarouge thermique pour de la cal/val et préparer la certification des futurs produits de la mission TRISHNA prévue pour 2025. Ce sera également le cas avec une mission hyper-spectrale en gestation destinée à accroître notre connaissance de la biodiversité. Il paraît souhaitable que de nouveaux équipements soient embarqués notamment sur un aéronef ayant un long rayon d'action comme l'ATR pour garantir une meilleure accessibilité et promouvoir de plus amples collaborations, notamment internationales.

Enfin, il est demandé de mutualiser les traitements des données de télédétection et les données in-situ en assurant leur disponibilité future via un **cloud public** (assurer le devenir de PEPS).

Propositions pour le TOSCA

Les liens entre les groupes TOSCA et les programmes nationaux pourraient être renforcés pour donner une meilleure cohérence au niveau de la recherche nationale compte tenu de la prépondérance croissante du volet spatial dû à des observations bien résolues. Des mécanismes de cofinancement pourraient être envisagés. Des membres du TOSCA pourraient également siéger dans des Commissions Spécialisées. Un autre constat est le manque de transversalité avec les agences nationales comme ALLENVI, ce qui ne permet pas toujours la remontée d'informations utiles.

Les liens entre le TOSCA et THEIA sont assurés par la présence dans le groupe SC de personnes engagées dans des CES, et par l'avis consultatif du responsable du pôle THEIA sur les projets labellisés THEIA. On pourrait imaginer des liens renforcés avec le dépôt des données in situ, acquises dans le cadre de projets TOSCA, sur la plateforme de l'IR Data Terra. Les activités de sensibilisation, formation et accompagnement des utilisateurs publics et privés des ART ne sont pas soutenues par le TOSCA, mais elles pourraient être relayées par le comité auprès des services aval du CNES. Compte tenu du volume croissant de propositions, il serait utile de réfléchir à limiter le nombre de propositions à évaluer par membre et de faire désormais plus appel à des évaluateurs externes. Le séminaire à mi-parcours de la prospective est une bonne chose et devrait être maintenu. Les enseignants-chercheurs ont des contraintes d'emploi du temps qui sont prohibitives pour une implication dans une mission spatiale et aspirer à des responsabilités de haut niveau. La mise en place avec le CNES d'un système de partenariat, chaire ou de délégation comme cela est fait par ailleurs, apparaît souhaitable. Le groupe s'inquiète de la perte de physiciens de la mesure, du besoin croissant en ressources informatiques et en moyens humains pour traiter des gros volumes de données.

2.4. Synthèse des recommandations

Type de mesure/d'observables	Cadre de réalisation	R&T associée	Thème scientifique
Température, émissivité	TRISHNA (ISRO)	Chaîne de détection et cryogénie	Stress hydrique des écosystèmes, îlots de chaleur urbains
Humidité du sol	SMOS-HR /ULID	Interférométrie en bande-L	Météo, agriculture, stock de carbone, hydrologie, climat, cryosphère,
Cartographie des écosystèmes	BIODIVERSITY	Imagerie optique hyper-spectrale	Biodiversité, état et fonctionnement des écosystèmes
Niveau des fleuves et rivières	SMASH	Altimétrie nadir bande Ka	Hydrologie continentale
Champ de gravité	MARVEL	Réflecteur ou transpondeur SLR, récepteurs GNSS et DORIS, émetteur VLBI, laser, micro-accéléromètre	Suivi de la dynamique des masses d'eau (glace)
Cartographie THR	SENTINEL-HR	Imagerie optique HR	Mosaïque globale des paysages 4 fois par an
Dynamique des stocks de carbone	VLOBS	SAR bande L bi-statique	Caractérisation dynamique des forêts, mouvements de terrain/glaciers

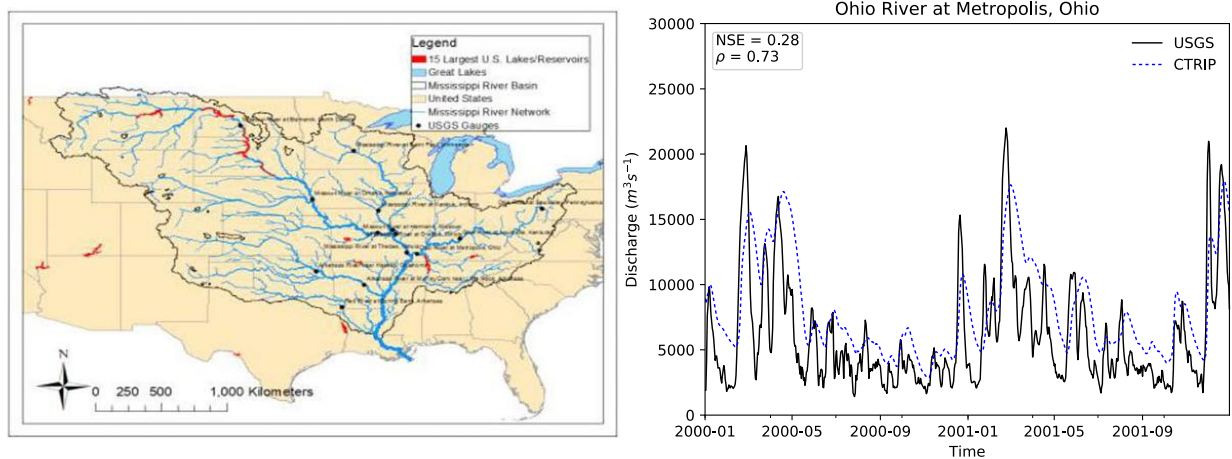


Figure SC-1 : Dans le cadre de la préparation à SWOT, il a été montré le réalisme des simulations avec le modèle CTRIP du CNRM pour obtenir les débits sur 2 ans de la rivière Mississippi dans le cadre du projet RiverMIP en utilisant des données ENVISAT (Crédit David et al., 2017).

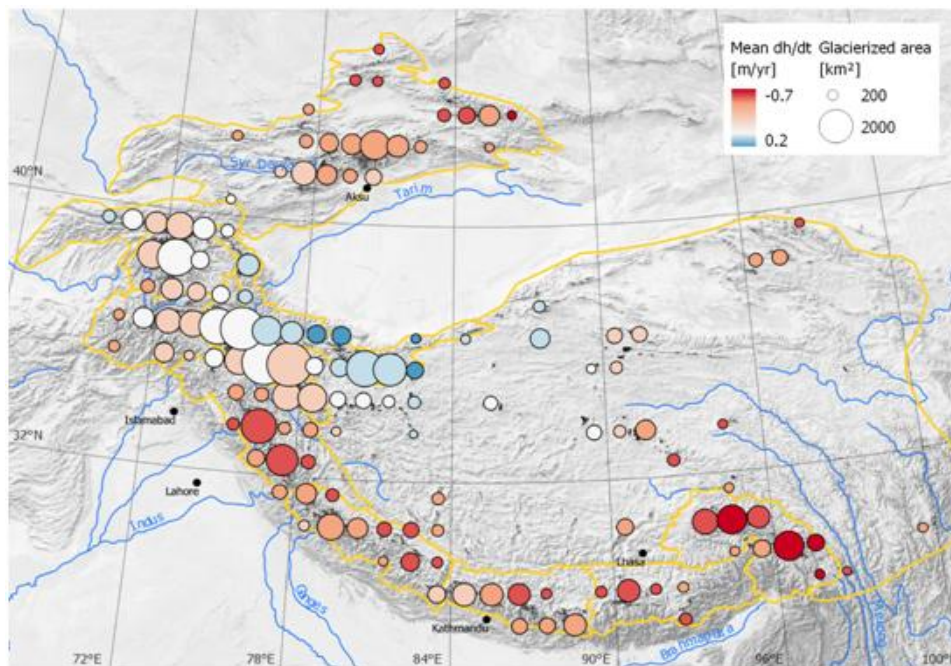


Figure SC-2 : Carte des changements d'épaisseur (en mètres par an) des glaciers des hautes montagnes d'Asie pour la période 2000-2016 à partir de l'archive ASTER. Les cercles rouges correspondent à des zones où les glaciers s'amincissent, les bleus où ils s'épaississent (Crédit Brun et al., 2017).

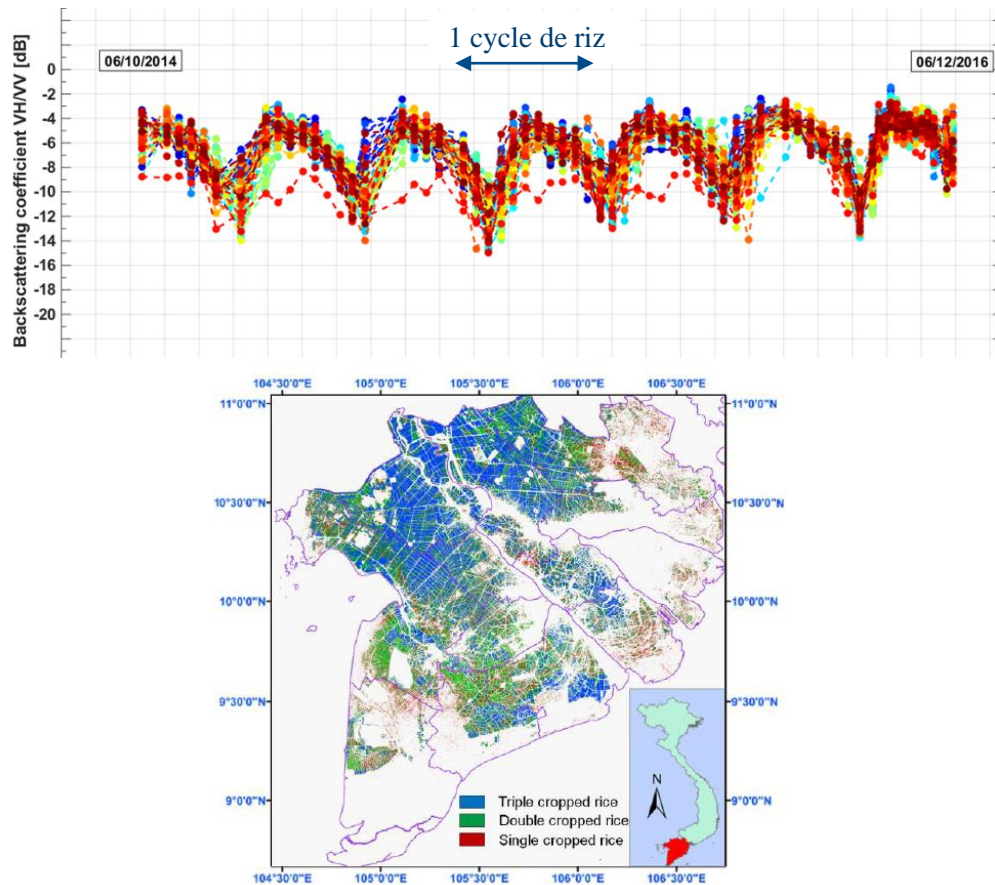


Figure SC-3 : Cycles saisonniers de la culture de riz à partir de l'imagerie radar Sentinel-1 pour la zone cartographiée du delta du Mékong (Crédit *Projet GeoRice ; CESBIO*).

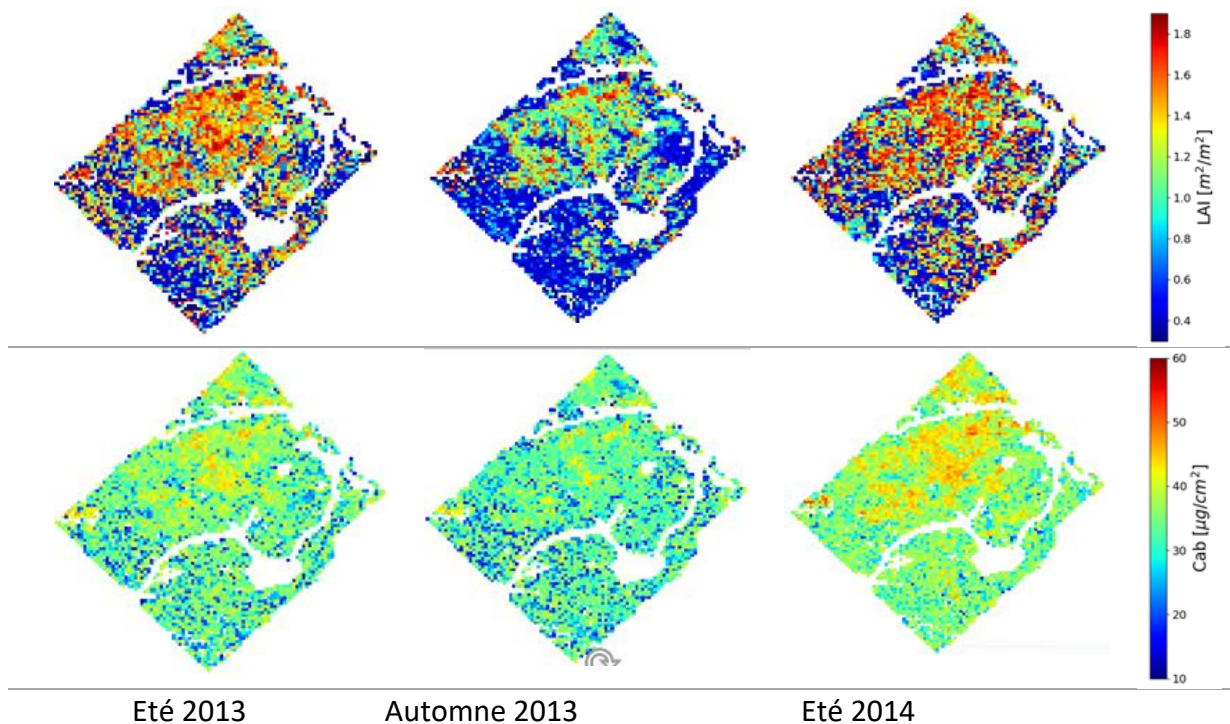


Figure SC-4 : Evolution de variables de la biodiversité pour la densité des feuilles (haut) et la chlorophylle (bas) à partir de l'imagerie AVIRIS sur la zone de Tonzi (Californie) après la période de sécheresse intense de l'été 2013 (Crédit *CSTARS/UCD-USA, NASA, ONERA/DOA, CESBIO*).

Annexe

Répartition des CES de THEIA par grand domaine (principal)

CES en phase de production (6)

CES en cours de prototypage (2)

1. EAU

- **CES Réflectance de surface**
- CES Evapotranspiration
- CES Albédo
- CES Cartographie et suivi des ressources en eau
- **CES Humidité de surface**
- **CES Humidité du sol à très haute résolution**
- CES Irrigation
- **CES Hauteurs des lacs et des rivières**
- CES Température de surface et émissivité
- **CES Surface enneigées**
- CES Altitude de ligne d'équilibre glaciaire
- CES Volumes d'eau
- **CES Qualité des eaux continentales**

2. CARBONE

- CES Biomasse forestière et changement de couverture forestière
- **CES Variables biophysiques de végétation**
- CES Cartographie numérique des sols

3. LAND SYSTEM

- **CES Occupation des sols (OSO)**
- CES Paysages
- CES Détection des changements numériques
- CES Cartographie phytosociologique de la végétation naturelle
- CES Risques maladies infectieuses
- CES Artificialisation – Urbanisation
- CES Incendie