

GROUPE THÉMATIQUE

SURFACES CONTINENTALES

Mélanie Becker, Agnès Bégué (Présidente sortante), Sylvain Biancamaria, Xavier Briottet, Céline Calleya (thématicienne Cnes), Thibault Catry, Jérôme Chave, Samuel Corgne, Sophie Fabre, Pierre-Louis Frison, Simon Gascoin (Président entrant), Olivier Hagolle, Valentine Lebourgeois, Aude Lemonsu, Delphine Leroux (thématicienne Cnes), Fabienne Maignan, Philippe Maisongrande (thématicien Cnes), Albert Olioso, Mireille Paulin (thématicienne Cnes), Thierry Pellarin, Charlotte Pelletier, Anne Puissant, Anne Richer-de-Forges, Jean-Louis Roujean, Aurélien Sacotte (thématicien Cnes), Kamel Soudani, Maguelonne Teisseire

Atténuer et s'adapter au changement climatique, préserver les écosystèmes tout en garantissant la sécurité alimentaire et le bien-être de la population mondiale sont des défis majeurs qui nous imposent de mieux comprendre le fonctionnement des surfaces continentales afin de participer à la mise en place et à l'évaluation de nouvelles stratégies de gestion durable et de partage des ressources.

Les surfaces continentales occupent une place particulière au sein du système Terre en raison de leur grande diversité. Par rapport à l'océan ou l'atmosphère, on connaît très mal les propriétés physiques élémentaires de ce compartiment situé entre la roche mère et l'atmosphère aussi appelé « zone critique ». Cette fine pellicule à la surface des continents est le siège d'une multitude de processus biogéochimiques complexes qui sont de surcroît largement influencés par l'activité humaine. Cette influence anthropique met à mal les approches basées uniquement sur les lois de la physique et renforce le besoin d'observations satellitaires pour mieux contraindre les modèles de fonctionnement de la surface continentale. Hétérogénéité et discontinuités spatiales sont des caractéristiques fondamentales de la surface continentale qui imposent des observations très diversifiées et à haute résolution spatiale (voire temporelle).

Depuis 2019, notre capacité d'observation des surfaces continentales a nettement progressé grâce à l'allongement des séries de mesures de missions emblématiques (e.g. **SMOS**, **Sentinel-1** (S1), **Sentinel-2** (S2), **SPOT**, **Landsat**, **MODIS**, **Pléiades**, **GRACE**), la mise à disposition des données de nouvelles missions (**Venüs** 2017, **ICESat-2** et **GEDI** 2019, **Pléiades-Néo** 2021, **SWOT** fin 2022) et la montée en charge de la constellation **Planet**. La communauté scientifique française s'est activement préparée à l'arrivée des données des futures missions **BIOMASS**, **CO3D** et **FLEX** en 2025, et **TRISHNA** en 2026. L'observation de la Terre (OT) étant loin de répondre à tous les besoins, de nombreuses avancées scientifiques s'appuient sur l'intégration des données spatiales avec des données in situ et des outils de modélisation de plus en plus sophistiqués. Ce triptyque OT/modèle/donnée est maintenant renforcé par l'émergence de nouvelles sources, comme les données textuelles des médias numériques ou le *crowd sourcing*, et des outils issus de l'Intelligence Artificielle (IA).

Grâce à ces données et outils en plein essor, la connaissance des surfaces continentales a progressé sur de multiples fronts de recherche en sciences de la Terre, science du vivant, sciences des données et sciences humaines, en partie grâce à des approches pluridisciplinaires prometteuses et à la mise en place de passerelles entre la recherche et des partenaires publics et privés. Ce partenariat cherche encore son mode de fonctionnement malgré une attente très forte de la société et des réussites notables durant ce quinquennat.

1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

Les projets soutenus par le groupe Surfaces Continentales (SC) s'appuient principalement sur l'accompagnement et l'exploitation des missions spatiales du Cnes et celles du programme Copernicus (**S1** et **S2** principalement). Ceci a permis à la communauté SC de jouer un rôle actif dans le développement de nouveaux produits au service des scientifiques et des gestionnaires. La disponibilité croissante de données à haute résolution spatiale a également favorisé une inflexion scientifique vers l'étude de l'impact des activités humaines sur les grands cycles biogéochimiques. Enfin, la communauté SC a également su tirer parti des progrès en IA pour répondre à des enjeux opérationnels ou résoudre des questions écologiques complexes.

Ces avancées scientifiques sont présentées ci-après par grands compartiments du système Terre (Fig. 1) - le système Terre avec l'étude des cycles de l'eau et du carbone aux échelles globales et régionales (domaine de l'atténuation) et les systèmes socio-écologiques avec l'étude des milieux naturels et anthropisés aux échelles locales et régionales (domaine de l'adaptation) - et leurs multiples interactions.

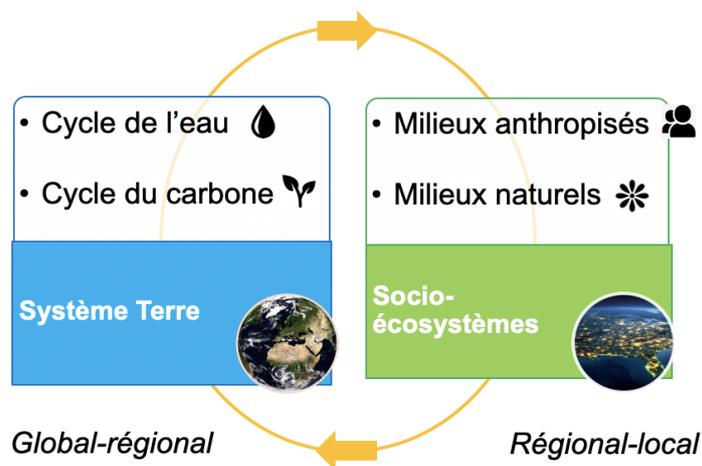


Fig. 1. Les grands compartiments étudiés dans le groupe Surfaces Continentales et leurs interactions.

1.1. LES PRINCIPAUX RESULTATS SCIENTIFIQUES

1.1.1. CYCLE DE L'EAU

L'étude du cycle de l'eau a été stimulée par la préparation des missions **SWOT** et **TRISHNA**. Ces deux « locomotives » ont favorisé des avancées fondamentales utiles pour l'estimation du débit des rivières et de l'évapotranspiration depuis l'espace. L'évapotranspiration est une variable clé qui couple le bilan d'eau et le bilan d'énergie de la surface continentale. Pour le calcul de l'évapotranspiration et du stress hydrique à haute résolution avec **TRISHNA**, des progrès dans la caractérisation des effets directionnels dans l'infrarouge thermique ont été réalisés grâce à l'utilisation de données in situ, aéroportées ou satellitaires déjà disponibles (**ECOSTRESS**, **Landsat**). Ces données ont permis de tester et améliorer des algorithmes pour le calcul de l'évapotranspiration sous des climats variés. L'introduction d'un bilan d'énergie dans le modèle de transfert radiatif DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) représente un atout majeur pour la poursuite de ces activités.

La préparation de la mission **SWOT** lancée fin 2022 a conduit à l'amélioration de méthodes de calcul de débit par télédétection, d'assimilation des hauteurs d'eau dans des modèles hydrauliques et hydrologiques et de variation de volume d'eau. En parallèle, des efforts de Cal/Val se sont poursuivis permettant d'enrichir les bases de données altimétriques de nombreux lacs et rivières, ainsi que des

zones estuariennes et littorales. Ces données ont permis de mettre en évidence le déclin global du stock d'eau dans les lacs naturels et artificiels au cours des trente dernières années.

L'observation de l'humidité du sol à différentes résolutions reste un champ de recherche très dynamique qui mobilise différentes techniques de mesure (micro-ondes passives/actives, optique multi/hyper spectrale). Le travail de plusieurs laboratoires a permis d'améliorer les produits issus de la mission **SMOS** (2009) qui sont aujourd'hui essentiels dans les séries longues d'humidité du sol globales reconstruites par fusion multicapteurs. A plus haute résolution, des progrès ont été réalisés dans l'estimation des volumes d'irrigation par combinaison de données **S1** et **S2**. Des études plus fondamentales ont permis d'améliorer la modélisation de la réflectance spectrale et directionnelle de sols rugueux pour différents taux d'humidité.

Notre connaissance du bilan hydrologique pluriannuel des grands bassins versants tels que l'Amazone ou le Congo progresse grâce à la combinaison des surfaces en eau dérivées des capteurs optique ou micro-onde avec les hauteurs d'eau obtenues par altimétrie et la mesure du stock d'eau total par gravimétrie. De même, la connaissance de l'hydrodynamique des estuaires progresse grâce à ce type de combinaison d'observations multicapteurs.

Les données **S1**, **S2** et **Pléiades** sont utilisées dans le domaine de la cryosphère pour étudier l'étendue du manteau neigeux, la présence d'eau liquide, la vitesse d'écoulement des glaciers et les changements de volumes de glace ou de neige. L'APR a permis le développement d'un algorithme désormais opérationnel pour cartographier l'enneigement dans le cadre du programme Copernicus Land. Des méthodes d'assimilation de données ont été développées pour tirer parti de ces données satellitaires variées, y compris les futures données **TRISHNA** (fin 2026) pour le calcul des ressources en eau d'origine nivale. Enfin, un résultat majeur est le bilan de masse des glaciers entre 2000 et 2019 - établi à l'échelle globale par le traitement d'images stéréoscopiques **ASTER** - qui a permis d'observer l'accélération de la perte de masse des glaciers et de quantifier leur contribution à la hausse du niveau des océans (Fig. 2).

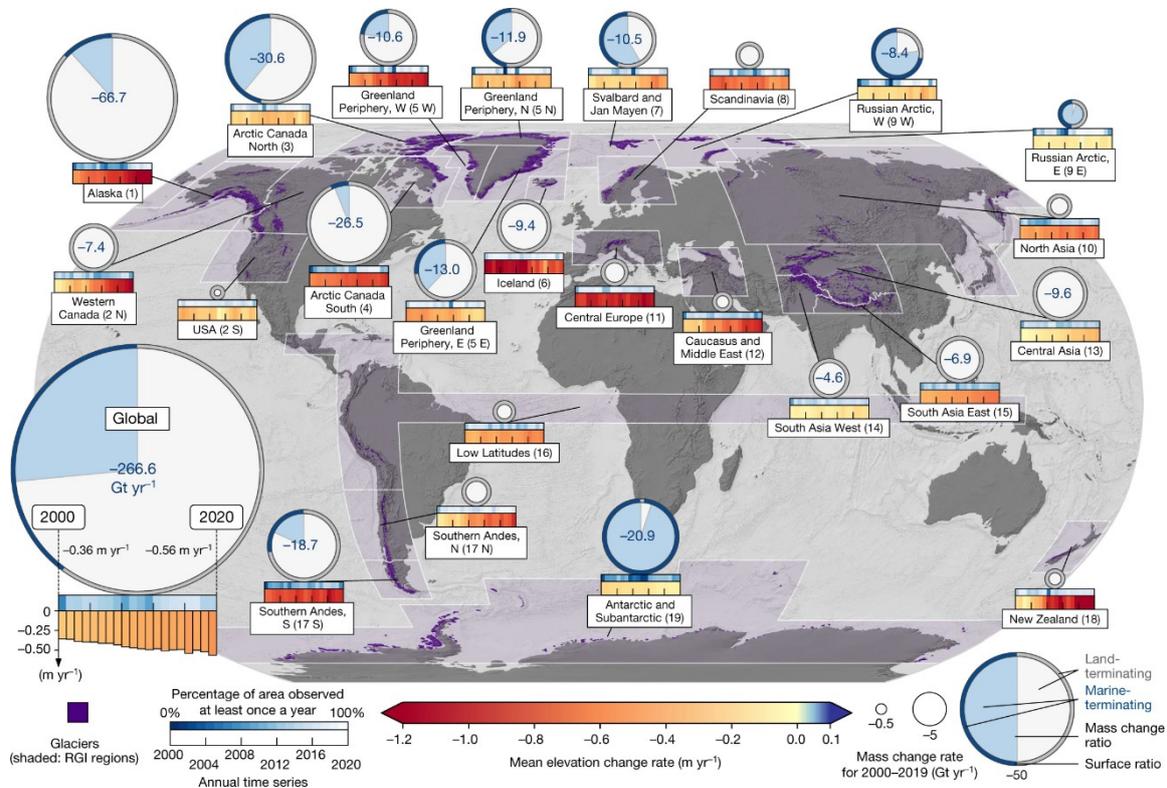


Fig. 2. Evolution du bilan de masse des glaciers entre 2000 et 2019 à partir d'images stéréoscopiques ASTER (Hugonnet et al., 2021).

1.1.2. CYCLE DU CARBONE

L'étude du cycle du carbone s'est poursuivie à travers de nombreux projets, souvent liés aux impacts du changement climatique. Ces projets traitent essentiellement des milieux forestiers et s'appuient sur le suivi de traits fonctionnels afin de définir des modèles de biomasse adaptés, empiriques ou physiques. Les données **S2** ont notamment été utilisées pour estimer les principaux attributs biophysiques et écologiques tels l'indice foliaire, la teneur en chlorophylle, la masse spécifique, la diversité structurale, etc., dans des contextes bioclimatiques variés (méditerranéen et tropical). Le traitement des formes d'ondes des données **GEDI** a montré l'efficacité de ce signal pour estimer avec précision les hauteurs d'arbres (Fig. 3) et pour informer sur la distribution verticale de la végétation ; ces observables sont utilisées soit en combinaison avec les données de l'inventaire forestier national pour produire des résultats à des échelles plus fines, soit seules pour entraîner des réseaux de neurones basés sur des données **S1** et **S2** et produire des cartes de hauteurs à l'échelle du massif des Landes ou de la France, ou pour calculer le volume de bois de plantations d'eucalyptus au Brésil. Pour mieux comprendre le lien entre le signal Lidar et les propriétés structurales du couvert, des méthodes ont été développées pour pouvoir simuler le signal **GEDI** par le modèle de transfert radiatif 3D DART en milieu forestier complexe.

A l'échelle globale, l'étude des flux et stocks de carbone des plantes terrestres bénéficie de la préparation des missions **FLEX**, **BIOMASS** et de la mission **SMOS**. La mesure par **FLEX** de la fluorescence émise par la végétation permettra d'affiner le calcul de la production primaire brute (GPP). L'APR a soutenu un volet instrumental qui a permis d'obtenir des mesures actives et passives in situ (sol, aéroportées) et des études de modélisation qui ont montré que la GPP était plus précise car mieux contrainte, lorsque les données satellitaires **TROPOMI SIF** (Solar Induced chlorophyll Fluorescence) étaient assimilées dans un modèle de surfaces continentales. Les études préparatoires de la mission **BIOMASS** ont permis d'évaluer des approches multicapteurs (**ALOS**, **S1**, **S2**, **GEDI**) pour le développement de produits tels que la biomasse aérienne, la hauteur des arbres, la dynamique forestière et les perturbations, dans des forêts tropicales et tempérées, plus particulièrement dans les zones géographiques non couvertes par **BIOMASS**. Les travaux ont également porté sur l'assimilation des produits de **BIOMASS** dans les modèles dynamiques de peuplement et de surfaces continentales. A partir de données expérimentales acquises sur le site de Paracou en Guyane, il a été montré qu'il faut privilégier les acquisitions satellitaires du matin et en saison sèche pour tirer parti de la synergie des observations SAR (Synthetic Aperture Radar) en bandes P, L et C afin d'estimer la biomasse et l'état hydrique de la végétation.

Concernant le volet agricole, des travaux sur l'estimation des biomasses des cultures sous contrainte climatique ont montré l'impact des pratiques agricoles sur le potentiel de stockage de carbone dans les sols. Les études récentes en cartographie des sols par modélisation statistique montrent également l'amélioration de l'estimation du contenu en matière organique des sols lorsque les données **S1-S2** sont utilisées.

Enfin, des études ont montré l'apport de **S2** et **Landsat** pour estimer les flux de carbone organique dissout dans les grands fleuves arctiques.

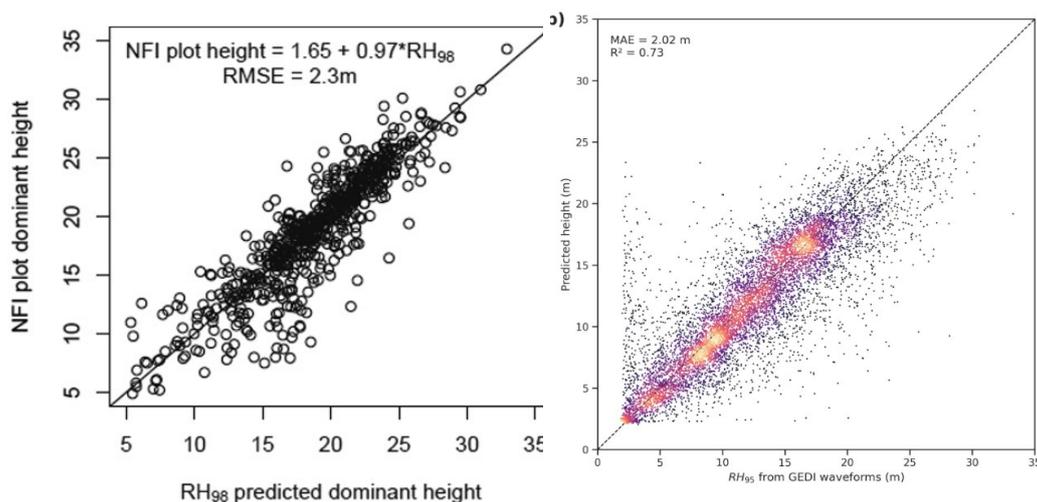


Fig.3. Comparaisons des hauteurs d'arbres mesurées par l'Inventaire Forestier National et estimées à partir de données GEDI (a) pour la forêt de Sologne (Zhang et al. 2022), (b) pour la forêt des Landes en complément de données S1 et S2 (Schwartz et al., 2024).

1.1.3. MILIEUX ANTHROPISES

Concernant la cartographie des surfaces continentales, des progrès significatifs ont été réalisés dans la production annuelle des cartes d'occupation du sol - notamment en ce qui concerne la nomenclature (24 classes à l'échelle nationale) et la précision des cartes - grâce à de nouveaux algorithmes et à des stratégies d'entraînement des modèles de classification de la chaîne Iota² (Infrastructure pour l'Occupation des sols par Traitement Automatique). Des études sont en cours sur la cartographie saisonnière et en temps quasi-réel, sur l'utilisation combinée de séries **S2** et d'images à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) telles que **Pléiades** ou **Spot6/7** (chaîne Moringa), sur la cartographie d'éléments structurants du paysage (contours parcelles...) et le zonage paysager. Portée par la demande, la cartographie de l'usage des sols s'est développée avec notamment des résultats sur la cartographie des pratiques (calendriers culturels, irrigation avec **S2** et **S1**, cultures intermédiaires, jachères...) ouvrant la voie à l'amélioration des modèles de production agricole et une meilleure évaluation de la résilience des systèmes.

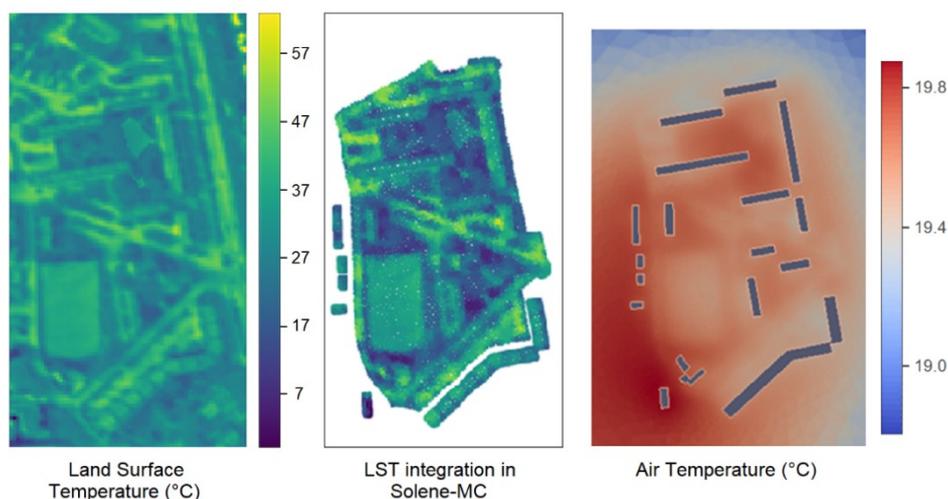
Pour l'urbain, les travaux sur l'apport de l'imagerie satellitaire multisources se sont poursuivis à différentes échelles (tache artificialisée, quartiers, objets urbains) via différentes approches : analyse texturale d'images optiques et radar THRS (chaîne FOTOTEX) pour la cartographie des habitats informels au Brésil, segmentation sémantique d'images **Spot-6/7** et *Deep Learning* pour la cartographie annuelle des bâtiments en France à 1,5 m de résolution, exploitation d'imagerie aéroportée hyperspectrale et multitemporelle pour la cartographie des espèces arborées en milieu urbain.

Enfin, en hydrologie, la cartographie fine des retenues d'eau et la connaissance des pratiques agricoles (calendrier culturel et irrigation) ont été utilisées pour améliorer la modélisation du stockage en eau des retenues.

La combinaison des cartes d'occupation et d'usages des sols (OS/US) avec des modèles thématiques permet d'accéder à de nouveaux indicateurs, en lien avec les sciences humaines et sociales (SHS). La cartographie des habitats hébergeant des vecteurs de maladie (e.g. dengue) et la caractérisation des facteurs environnementaux associés aux épidémies ont gagné en maturité si bien que les facteurs environnementaux issus de l'OT et associés aux épidémies font désormais parties intégrantes d'outils opérationnels (Arbocarto) et de systèmes d'alerte en santé (ClimHealth) ; d'autres travaux ont montré le lien entre couleur de l'eau, matières en suspension et présence de

bactéries dans les eaux continentales en Afrique de l'ouest, ou étudié le lien entre sécurité alimentaire, santé des populations et données hétérogènes (images, données climatiques, OS/US, textes...) ; enfin, grâce à la mobilisation de la communauté urbaine dans la préparation de la mission **TRISHNA** (campagnes aéroportées sur Toulouse), de nouvelles métriques ont été proposées pour estimer le confort thermique à l'échelle du quartier et identifier les populations vulnérables (Fig. 4). Des travaux ont été initiés sur le foncier, via la cartographie des investissements à grande échelle au Sénégal à partir de métriques de changement issues de séries temporelles NDVI **MODIS**, et sur le lien entre dynamique de population et évolution des paysages en milieu rural à Madagascar avec **S2**. Enfin, la communauté a commencé à se structurer autour de l'imagerie (THRS 2D et 3D, Lidar) au service du patrimoine culturel avec un premier séminaire en novembre 2023.

Figure 4. Combinaison de données thermiques aéroportées à haute



résolution et du modèle Solène-MicroClimat pour relier la mesure de température de surface à la température de l'air et au confort thermique dans l'espace extérieur (d'après Bouyer et al., 2022).

1.1.4. MILIEUX NATURELS

Les milieux étudiés sont la forêt (tropicale, méditerranéenne), les prairies et savanes, les zones humides et les eaux de surface ; ils sont caractérisés sous l'angle de leur état, de leur biodiversité et de leur gestion par l'homme.

Le suivi des écosystèmes terrestres fait appel à l'ensemble des domaines de la télédétection pour la cartographie, la caractérisation et le suivi des espèces et des habitats. De nombreux travaux basés sur l'analyse de séries temporelles radar (**S1**, diffusiomètres), de données lidar (**GEDI**, **ICESat-2**), optiques (**S2**) et hyperspectrales portent plus spécifiquement sur les forêts et la réalisation d'inventaires forestiers. Le dépérissement des forêts, dû au stress hydrique ou aux attaques sylvosanitaires, fait l'objet d'une attention particulière dans les projets ; l'état de santé des arbres est appréhendé via l'estimation de traits fonctionnels à partir de données hyperspectrales et d'inversion de modèles de transfert radiatif, et des outils basés sur la détection d'anomalies dans des séries temporelles d'images **S2** sont en cours de développement pour proposer un système de surveillance opérationnel à l'échelle des massifs. Les zones humides sont également étudiées à travers le suivi des mangroves, que ce soit leur cartographie ou leur rôle dans les cycles du carbone et de l'eau.

Sur la biodiversité, des travaux ont montré le lien existant entre des métriques de diversité spectrale calculées à partir de données hyperspectrales et la diversité taxonomique de systèmes tropicaux et tempérés (Fig. 5) ; de même, la prise en compte d'indices spectraux issus de séries temporelles **S2**

dans les modèles de distribution des espèces animales (mammifères, oiseaux, batraciens) permet d'améliorer fortement leurs performances.

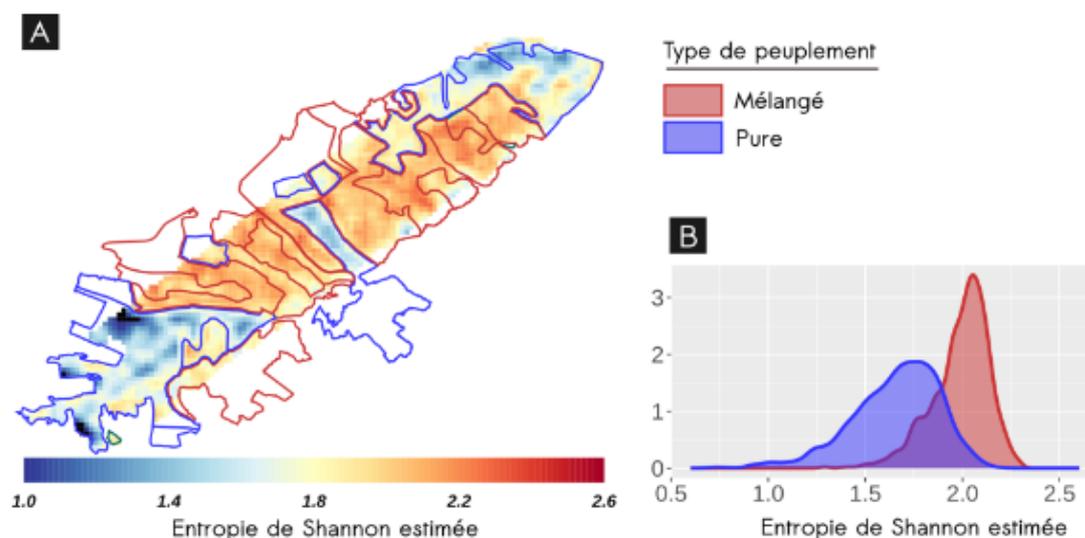


Fig. 5. Carte (A) et distribution des valeurs (B) de l'entropie de Shannon estimée sur le site de Fabas par BioDivMapR, un outil de cartographie de la biodiversité, à partir de données hyperspectrales Hypspx aéroportées (Lang et al., 2023).

Concernant l'exploitation des écosystèmes, le suivi de la déforestation en zone tropicale a été particulièrement mis en avant à partir de données **S1**. Le suivi phénologique des prairies en moyenne montagne est fait à partir de séries temporelles **S2** et **MODIS**. Des travaux émergent mettant en évidence la restauration des écosystèmes au Sahel grâce à l'installation de petits aménagements hydrauliques sur la végétation (programme de la Grande Muraille Verte), et la réhabilitation de sites miniers pollués en France grâce à l'introduction de nouvelles espèces.

Enfin, plusieurs travaux sur la caractérisation des eaux de surface ont été réalisés à partir de données optiques **S2** et **Landsat**, et une chaîne de traitement d'estimation de la couleur des eaux a été transférée à Theia ouvrant la voie à son utilisation opérationnelle.

1.2. BILAN PROGRAMMATIQUE

1.2.1. MISSIONS SPATIALES

Depuis 2019, l'offre en matière d'observables et de précision de ces observables (fréquence de mise à jour et précision spatiale) a continué d'augmenter grâce à l'exploitation en routine des missions en cours (i.e., **Sentinel**), la prise en main de nouvelles missions (**Venüs** en 2017, **Pléiades-Néo** en 2021, **SWOT** fin 2023) et le déploiement opérationnel des constellations massives de nano-satellites (**PlanetScope**).

Le Tableau 1 présente les missions retenues par le groupe SC en 2019. Trois missions avaient été classées prioritaires pour améliorer nos connaissances sur les cycles de l'eau et du carbone (**TRISHNA** et **SMOS-HR/ULID**) et sur la diversité des écosystèmes (**BIODIVERSITY**) ; à ce jour, seule la mission franco-indienne (Cnes/Isro) **TRISHNA**, pour le suivi des conditions hydriques des agro-écosystèmes, est assurée avec un lancement prévu à partir de 2026. Les missions **SMOS-HR**, pour la mesure de l'humidité des sols et de l'épaisseur optique de la végétation, et **BIODIVERSITY**, une mission hyperspectrale pour mieux caractériser les espèces végétales, n'ont pas abouti et sont de nouveau soumises à la prospective 2024. La plupart des missions positionnées en 2^{ème} priorité -

SENTINEL-HR (*Sentinel-Haute Résolution*), **SMASH** (*SMAll Satellites for Hydrology*) et **MARVEL** (*MAss and Reference Variations for Earth Lookout*) - ont été resoumises à l'appel à idées du SPS2024.

Tableau 1. Liste des missions prioritaires identifiées lors du SPS en 2019 (en vert : mission acquise ; en orange : mission non acquise) et état des missions en mars 2024.

Type de mesure / observables	Cadre de réalisation	Priorité	R&T associée	Thème scientifique	Etat en mars 2024
Température, émissivité	TRISHNA	P0	Infrarouge thermique	Stress hydrique des écosystèmes, îlots de chaleur urbains...	Partenariat CNES-ISRO Lancement prévu en 2026.
Humidité du sol	SMOS-HR /ULID	P0	Interférométrie en bande-L (10 km)	Météo, agriculture, stocks de carbone, hydrologie, climat, cryosphère...	SMOS-HR → FRESCH (soumis EE12 de l'ESA & SPS 2024). ULID a été arrêté après Phase A.
Cartographie des écosystèmes	BIODIVERSITY	P0	Imagerie optique hyperspectrale	Biodiversité, état et fonctionnement des écosystèmes...	→ <u>Re-soumis</u> SPS2024
Cartographie THR	SENTINEL-HR	P1	Imagerie optique HR stéréoscopique	Suivi saisonnier des surfaces, cartographie d'éléments fins...	→ 4D-Earth (Esa) <u>soumis</u> SPS2024
Niveau des fleuves et rivières	SMASH	P1	Altimétrie nadir bande Ka	Hydrologie continentale (suivi quotidien)	Phase A terminée (nov. 2022). → un opérateur privé (financement non sécurisé) + <u>re-soumis</u> SPS2024
Dynamique des stocks de carbone	VLOBS	P1	SAR bande L bi-statique	Caractérisation dynamique des forêts, mouvements de terrain/glaciers	En veille
Champ de gravité	MARVEL	P1	Technologies en gravimétrie (positionnement GNSS, Laser, accéléromètres...)	Suivi de la dynamique des masses d'eau	→ NGGM (Esa) de la constellation MAGIC à l'horizon 2030.

1.2.2. AUTRES PRIORITES

En ligne avec les recommandations du SPS2019, les projets multicateurs et multiscalaires sont en augmentation ; au triptyque habituel télédétection - modèles de surface - données in situ, s'ajoutent aujourd'hui les sciences participatives et l'IA. Sur ce dernier point, les contributions méthodologiques des outils basés sur l'IA restent peu développées dans les propositions APR, ce qui pose la question de l'appropriation effective de ces outils par la communauté. De plus, l'utilisation de l'IA nécessite souvent des calculateurs puissants et du *Cloud Computing* ; les opérateurs privés de type *Google Earth Engine* sont à ce jour peu utilisés par la communauté scientifique nationale qui préfère se tourner vers les centres nationaux et les méso-centres publics.

La plupart des recommandations concernant la structuration et le fonctionnement de la communauté scientifique formulées lors du dernier SPS ont été suivies, en grande partie grâce au pôle de données et de services pour les surfaces continentales Theia. Theia a continué à se structurer depuis 2019 autour d'une vingtaine de Centres d'Expertise Scientifiques (CES) avec en appui 4 Centres de Données et de Services (CDS) et un réseau d'Animation Régionale (ART). Une dizaine d'ateliers thématiques et/ou régionaux rassemblant scientifiques et acteurs territoriaux ont été organisés depuis 2021 afin de présenter les produits et retours d'expériences, et d'identifier de nouveaux besoins. Le pôle Theia a également fortement contribué à la mutualisation des traitements des données de télédétection et des données in situ par le développement de plusieurs catalogues et/ou interfaces de visualisation, et propose depuis 2023, un appel à projet pour accompagner la

diffusion de jeux de données et la mise en production de chaînes de traitement développées dans les laboratoires.

L'APR continue de jouer un rôle fédérateur pour la structuration de la communauté scientifique, en soutenant les CES de Theia. L'APR a également un effet structurant sur la communauté scientifique autour des missions, avec notamment des actions Cal/Val (**TRISHNA, SWOT, SMOS, BIOMASS**) et la mutualisation des sites de mesures au sol, et autour des thématiques (e.g. Milieux urbains). Avec la participation de 57 laboratoires en 2023, l'APR demeure un guichet privilégié par la communauté scientifique SC, simple et efficace, qui peut être mobilisé comme tremplin pour des projets nationaux (ANR, PEPR) ou internationaux de plus grande envergure.

Le quinquennat est marqué par de nombreuses incitations pour étendre l'usage de la donnée spatiale en lien avec les entreprises. Dans le cadre du volet spatial du programme France 2030, un premier appel d'offres *Fast Track* dédié à l'hydrologie a permis la sélection de services dédiés au suivi des surfaces, des hauteurs et de la qualité de l'eau, et la détection des surfaces irriguées, à partir de méthodes issues de recherches menées par les laboratoires dans le cadre de l'APR. Créé en juin 2019, le SCO (Space Climate Observatory) est complémentaire des projets APR en termes de maturation technologique (recherche, démonstration, puis service opérationnel ; Fig. 6). Dans la réalité, la chaîne technologique est rarement unidirectionnelle, ce qui conduit à une diversité de connexions entre SCO et APR - mutualisation des moyens, retour de questions scientifiques ou techniques vers l'APR pour lever des points durs ou évaluer les résultats - et nécessite une bonne circulation de l'information entre les parties.

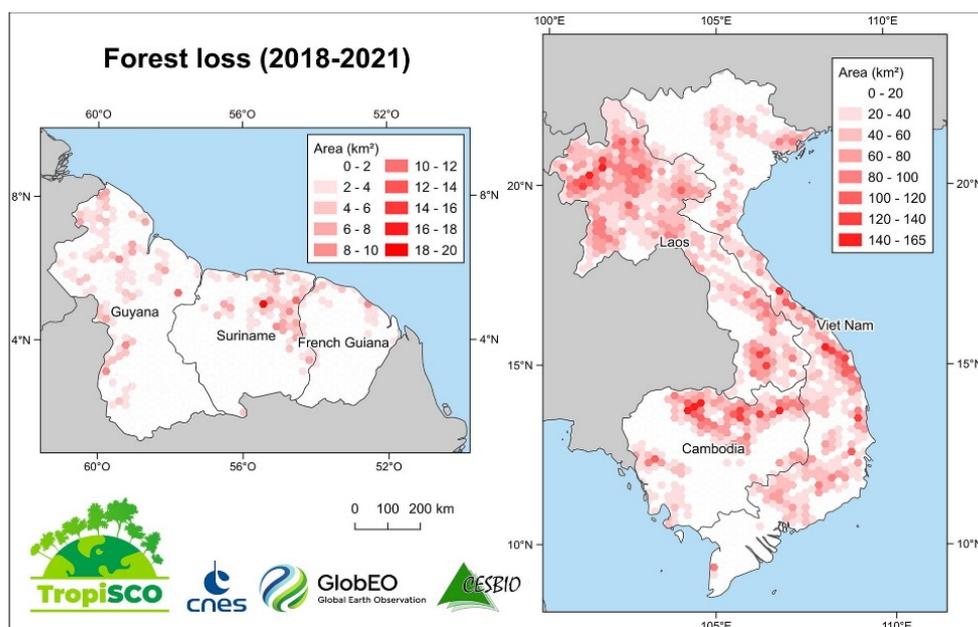


Fig. 6. Exemples de production du projet TropiSCO : Déforestation sur l'Asie et le Plateau des Guyanes de 2018 à 2021 à partir de séries Sentinel-1 (d'après Mermoz et al., 2020).

L'incitation au montage de projets en partenariat Public-Privé vient sans doute combler un retard français dans le domaine, mais son caractère « à marche forcée » inquiète la communauté scientifique qui a parfois du mal à percevoir la logique des différents appels d'offre et s'inquiète de la baisse des moyens et du déséquilibre de l'attractivité privé / public. Les chercheurs sont soucieux de la durabilité de leur activité sur le long terme et souhaitent à ce titre l'aménagement de mécanismes de rétroaction en contrepartie des transferts de savoir-faire. Les accords de partenariats et licences d'exploitation revêtent donc une importance particulière, et doivent garantir la compatibilité *Open Source* avec les *business models* des entreprises.

Les programmes bilatéraux du Cnes menés en partenariat avec les autres agences spatiales (Nasa / **SWOT**, Isa / **Venµs**, Isro / **TRISHNA** ; Photo 1), en complément des programmes Esa (**BIOMASS**), constituent l'ossature de la collaboration internationale. A cela, il faut ajouter depuis 2019 :

- la contribution de la recherche française au programme européen Copernicus avec l'ajout d'une nouvelle série de produits (*Fractional Snow Cover*, niveaux d'eau des lacs et des rivières v2 en temps quasi-réel) au portfolio du *Copernicus Land Monitoring Service* ; la participation au programme *Framework Programme Agreement on Copernicus User Uptake* dédié à la promotion de l'utilisation des données Sentinel ; la participation au Ceos (*Ecosystem Extent Task Team*) avec notamment la co-publication d'un *white paper* sur les types d'observations satellitaires utiles aux EBV (*Essential Biodiversity Variables*).
- la participation de scientifiques français aux MAGs de l'Esa pour préparer les Sentinel NG, et les Sentinel Expansion (**LSTM**, **CIMR** et **CHIME**). Cela a permis notamment d'harmoniser l'heure de passage et la couverture géographique de **LSTM** et de la mission **SBG** de la Nasa et de permettre à l'hydrologie continentale de devenir un objectif prioritaire de **S3NG-T** au même titre que l'étude des océans.

La majorité des projets financés par l'APR concerne des sites d'étude hors du territoire français ; souvent coconstruits avec des partenaires du Sud Global en réponse à des besoins de recherche ou opérationnels bien identifiés, ces projets comportent des volets de transfert et de formation.



Photo 1. Travail collaboratif Cesbio-Isro sur une parcelle de riz à Ahmedabad (Inde), site d'étude des effets directionnels thermiques. Photo Marc Oliver-Soulayrol.

2. PRINCIPALES QUESTIONS, DEFIS SCIENTIFIQUES ET SOCIETAUX

Les grands compartiments décrits en Fig.1 sont porteurs de questions scientifiques propres qui sont résumées ci-dessous. Un autre défi scientifique des prochaines années sera d'intégrer des observations directes et indirectes de l'empreinte anthropique sur les stocks d'eau et de carbone des surfaces continentales, avec de nombreuses questions liées à la comptabilité des échelles spatiales et temporelles.

2.1. CYCLE DE L'EAU

Grâce aux nouvelles données **SWOT** et **TRISHNA**, notre connaissance du cycle de l'eau continental fera un bond de géant au cours du prochain quinquennal. **S3NG-T**, qui devrait être composé de 2 altimètres à large fauchée et lancé après 2030, prolongera les avancées initiées par **SWOT**. Ces

missions contribueront à réduire le nombre d'inconnues dans l'équation bilan du cycle de l'eau continentale jusqu'à des échelles spatiales fines compatibles avec celles de la gestion des ressources en eau. Néanmoins, il reste des défis considérables pour parvenir à fermer le bilan hydrologique aux échelles spatiales de la gestion de l'eau. En premier lieu, la variabilité spatiale des précipitations est encore très mal contrainte dans de nombreuses régions du globe (Q1). La variation régionale du stock d'eau souterraine reste la grande inconnue du cycle de l'eau terrestre (Q2). C'est pourquoi **NGGM** (au sein de la constellation MAGIC) est extrêmement important et doit être soutenu auprès de l'Esa. La méconnaissance du stock de neige dans les régions de montagne limite notre capacité à établir des diagnostics fiables des ressources en eau disponibles en amont des bassins versants (Q3). Par ailleurs, avec 2 à 3 mesures en moyenne tous les 21 jours, la mission **SWOT** restera insuffisante pour capturer les fluctuations hautes fréquences des hauteurs d'eau dans les cours d'eau, les lacs et les zones humides (Q4) ; cette revisite limitée est également inadaptée pour l'étude des crues et inondations, alors que le changement climatique conduit à augmenter leur fréquence et intensité. Mieux modéliser ces aléas hydrologiques dépendra aussi des progrès dans la description des précipitations, du manteau neigeux et de l'humidité du sol à haute résolution.

Enfin, aux échelles de temps climatiques, l'incertitude principale sur l'amplitude et la rapidité de la hausse du niveau des océans est liée à l'évolution des calottes polaires. Il est primordial de mieux comprendre l'évolution des propriétés internes des calottes Antarctique et Groënland où les modèles glaciologiques divergent significativement en raison d'effets non-linéaires (points de bascule) dans leur réponse au forçage climatique (Q5).

Cycle de l'eau	
Questions scientifiques	Observables
Q1 Variabilité spatiale des précipitations	- Précipitations - Humidité du sol
Q2 Variations du stock d'eau souterraine	- Variation du champ de pesanteur
Q3 Variations du stock de neige	- Equivalent en eau - Hauteur du manteau neigeux
Q4 Variations du stock d'eau de surface	- Volumes d'eau - Débit - Pratiques culturelles
Q5 Variation du stock de glace	- Vitesse d'écoulement - Variation du champ de pesanteur - Température - Topographie

2.2. CYCLE DU CARBONE

Notre connaissance du cycle rapide du carbone continental devrait aussi progresser considérablement avec le lancement de deux missions dédiées au suivi de la végétation (**FLEX**, **BIOMASS**). **BIOMASS** apportera des données clés pour estimer les stocks de carbone dans les forêts tropicales où les capteurs actuels saturent. **FLEX** permettra de mieux comprendre la réponse de la photosynthèse au changement climatique y compris en régions agricoles.

Néanmoins la plus grande incertitude actuelle dans le cycle du carbone est la variation du stock de carbone dans le sol (racines, mycorhize, etc.) (Q1). La biomasse racinaire peut être estimée indirectement à travers des relations allométriques mais pour cela des mesures précises et denses de la structure en trois dimensions des forêts sont nécessaires et font encore défaut malgré les progrès considérables réalisés grâce aux lidar **ICESat-2** et **GEDI**.

Une incertitude majeure concerne également l'évolution du pergélisol sous l'effet du changement climatique (Q2). Le relargage du carbone organique stocké dans ces sols gelés pourrait accentuer significativement la hausse de la température atmosphérique planétaire (+0,7°C si 10 % du

pergélisol de l'hémisphère nord dégèle). Pour fermer le bilan carbone des bassins versants arctiques et tropicaux il est important de réduire l'incertitude sur les flux de carbone organique dissous car les mesures in situ font défaut dans ces régions clés (Q3). A l'échelle globale, il est indispensable de continuer à surveiller la réponse de la végétation aux changements globaux : via la photosynthèse la surface continentale absorbe un tiers des émissions humaines de gaz à effet de serre. L'efficacité de ce puits de carbone dépendra de la réponse de la végétation aux perturbations climatiques et pressions anthropiques avec le risque de franchir des points de bascule en cas d'extrêmes climatiques (Q4).

Cycle du carbone	
Questions scientifiques	Observables
Q1 Variation du stock de carbone dans le sol	- Structure 3D des forêts (biomasse racinaire) - Couleur du sol
Q2 Evolution du pergélisol	- Température du sol - Phase de l'eau du sol - Changement de topographie
Q3 Carbone des eaux continentales	- Concentration en carbone organique dissous - Blooms
Q4 Réponse de la végétation aux perturbations	- Variables biophysiques

2.3. SOCIO-ÉCOSYSTEMES

L'enjeu actuel majeur est de quantifier les impacts des changements climatiques, démographiques, économiques, sanitaires et/ou sécuritaires sur les sociétés et les écosystèmes, et d'évaluer leur réponse à ces perturbations. Quelle est la capacité biophysique et socio-économique des sociétés à s'adapter à ces changements globaux ? Quel est le rôle de la biodiversité dans la résilience des écosystèmes face à ces perturbations ? Quels sont les effets des stratégies d'adaptation sur la trajectoire des systèmes ? Est-on capable d'identifier des points de non-retour ?

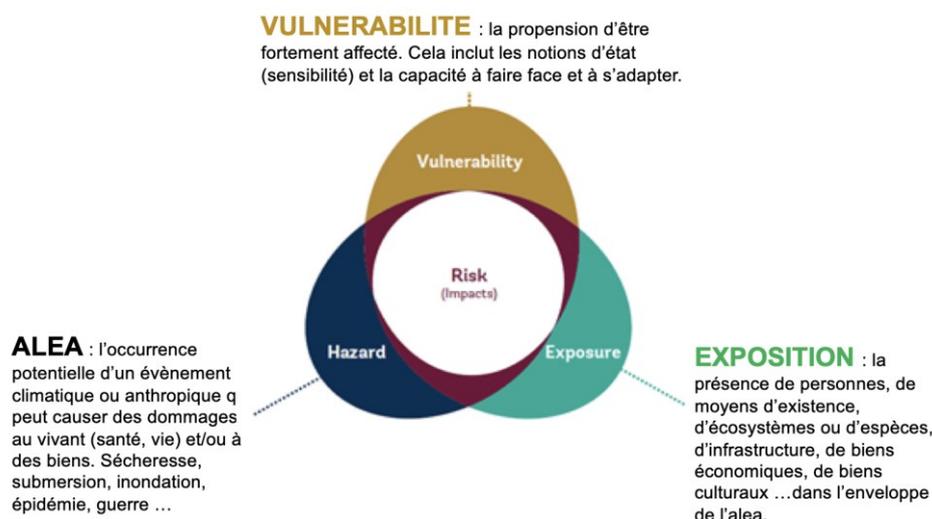


Figure 7. Schéma de la gestion du risque (d'après IPCC 2014).

La réponse à ces nombreuses questions passe par la cartographie précise (l'exposition) des socio-écosystèmes dans toute leur diversité (Q1), et par la caractérisation de leur vulnérabilité (Q2) et de leur dynamique (Q3). L'observable clé de l'exposition (Fig. 7) est la cartographie de l'occupation et de l'usage des sols (OS/US). Notre connaissance de la biodiversité des milieux naturels et des pratiques humaines liées à l'agriculture, à l'habitat, à la gestion des milieux passe par de nouvelles sources de données (à haute résolution spatio-temporelle, hyperspectrales, lidar) et de modèles (i.e.

analyse paysagère). Les observables liés à la vulnérabilité (Fig. 7) décrivent quant à eux l'état des milieux naturels (santé des arbres, qualité de l'eau, des sols...) ou anthropisés (diversification agricole, moyens d'existence, morphologie urbaine...), et la dynamique de ces milieux en termes de changement d'OS/US (déforestation, déprise agricole...), ou de trajectoire (dégradation ou restauration).

Malgré d'énormes progrès récents dans la description des SC, grâce notamment aux données Copernicus, l'étude des socio-écosystèmes souffre encore du manque de données à l'échelle territoriale où se nouent les interactions entre les espèces vivantes. Les impacts des changements globaux et les modalités d'adaptation (aménagement du territoire, changement de pratiques) sont eux aussi fortement liés au contexte géographique et socio-économique local. La cartographie biophysique et anthropique des SC à cette échelle (e.g. contour des parcelles, détection des haies, infrastructures) nécessitent de l'imagerie « métrique », ouverte et disponible en tout point du globe, en complément des séries temporelles **S2** (Q1) qui informent sur la phénologie des surfaces. Pour cartographier la biodiversité terrestre il est nécessaire de caractériser les propriétés spectrales et 3D du couvert végétal jusqu'à l'échelle de l'arbre (Q2). Des indicateurs indirects liés à la biodiversité et aux conditions socio-économiques des populations peuvent être dérivés d'images optiques de nuit à haute résolution spatiale (Q2) et de l'analyse des paysages (Q1). Enfin, pour étudier les perturbations et les points de non-retour il est nécessaire de disposer de séries temporelles homogènes et prétraitées, dont seront dérivées des métriques représentatives des processus de surface et de la résilience des systèmes (Q3).

Socio-écosystèmes	
Questions scientifiques	Observables
Q1 Exposition	<ul style="list-style-type: none"> - Occupation des sols et biodiversité - Usage des sols - Paysages en 3D
Q2 Vulnérabilité	<ul style="list-style-type: none"> - Etat des milieux naturels (végétation, sol, eau) et biodiversité - Etat biophysique et socio-économique des milieux anthropisés
Q3 Dynamique	<ul style="list-style-type: none"> - Changements d'occupation/usage des sols - Métriques de type de changement

3. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

3.1. MISSIONS SPATIALES

Compte tenu du fait que des missions majeures vont venir éclairer le cycle de l'eau (**SWOT, S3NG-T, TRISHNA**) et le cycle du carbone (**FLEX, BIOMASS**) dans les prochaines années, le groupe SC préconise de développer prioritairement les capacités d'observation au service de l'étude des socio-écosystèmes. En particulier il est désormais crucial de mieux caractériser la biodiversité et l'usage des sols à très haute résolution pour comprendre les interactions spatio-temporelles entre sociétés et écosystèmes naturels. Le groupe a identifié les projets **BIODIVERSITY** et **4D-Earth** comme des atouts pour progresser dans ce domaine. **BIODIVERSITY** est un système d'imagerie hyperspectrale à haute résolution spatiale (10 m). Le projet **BIODIVERSITY** vise à couvrir une centaine de sites pour démontrer l'apport de l'imagerie hyperspectrale haute résolution pour caractériser la biodiversité et l'état de santé d'écosystèmes emblématiques (forêts tropicales, savanes...). Cette mission, grâce à sa haute résolution spatiale (10 m) combinée à une voie panchromatique (2.5 m) permettra de mieux analyser et caractériser les surfaces hétérogènes non accessibles avec la future mission Copernicus CHIME (30 m). Ce concept répond aussi à des besoins pour la caractérisation des milieux côtiers (bathymétrie, classification des petits fonds marins et des habitats côtiers), de la pollution industrielle (panaches de quelques gaz ou d'aérosols), des milieux urbains (occupation du

sol plus précise) ou en géologie (détection de minéraux sur des roches nues). Quant à **4D-Earth**, il s'agit d'un projet de mission optique stéréoscopique qui vise une couverture systématique, globale et mensuelle des terres émergées à 2 m de résolution avec quatre bandes spectrales. Vis-à-vis de CO3D, l'apport de 4D-Earth réside dans cette couverture globale et ces observations périodiques fréquentes, avec des données libres et gratuites. En complément aux satellites S2 ou S2NG, les données de 4D-Earth permettront d'atteindre l'échelle pertinente pour caractériser les impacts des activités anthropiques et les risques associés, avec un suivi multi-temporel unique des changements en 3D, qu'ils soient d'origine humaine (constructions, déforestation), tellurique (glissements de terrain, volcans) ou climatique (fonte des glaciers et calottes polaires). Comme montré en phase 0, les données S2NG et 4D-Earth pourront être fusionnées pour fournir des séries temporelles combinant la revisite de S2NG (3 jours) et la résolution de 4D-EARTH (2 m). Le groupe voit une forte complémentarité entre **BIODIVERSITY** et **4D-Earth**, ainsi qu'avec le projet **S2-NG** qui devrait offrir une couverture multispectrale globale à 5 m de résolution avec une revisite de 3 jours. Enfin, pour étudier les trajectoires de ces socio-écosystèmes, le développement de produits *Analysis Ready* issus de l'OT est indispensable.

En parallèle le groupe SC recommande de soutenir activement les projets qui permettent de réduire les incertitudes sur le cycle de l'eau. A cet égard, trois projets de missions proposent des concepts déjà matures techniquement. Le projet **SMASH** vise à fournir des observations journalières de cotes d'eau des rivières, lacs et réservoirs via une constellation d'altimètres radar nadir compacts. Ce concept peut être mis en œuvre à très court terme par le biais du *NewSpace*. Le projet **FRESCH** vise à répondre à des enjeux scientifiques variés aux interfaces océan-terre-glace grâce à un radiomètre en bande L. Ce projet permettrait de décrire l'humidité du sol à 10 km de résolution, ce qui améliore significativement la résolution de **SMOS** et **SMAP**. Le projet **CRYORAD** a pour objectif le suivi de la cryosphère polaire et propose d'exploiter des mesures micro-onde basse fréquence dans un large spectre (0,4-2 GHz) pour établir le profil de température des calottes polaires. Enfin le groupe note l'intérêt d'assurer la continuité des mesures altimétriques des côtes d'eau de surface à travers **S3NG-T** et **SWOT-LOAC**.

Pour progresser dans notre compréhension du cycle du carbone le groupe recommande de soutenir la maturation technique et scientifique de deux projets novateurs. Le projet **GREEN LEAF** (*Lidar for Earth And Forests*) qui avait déjà bénéficié d'une phase 0 (2012-14) et d'une phase Expérimentation-Validation avant phase A coordonnée par le PASO (2016-18), a pour objectif la caractérisation, le suivi et la préservation des écosystèmes forestiers. Il s'appuie sur un lidar couplé à un imageur THRS. Considérant les avancées scientifiques majeures permises par **GEDI** et **ICESat-2** et les points limitants de ces missions NASA, cette proposition affirme le besoin et la possibilité de mesurer avec une résolution verticale inégalée et un échantillonnage optimisé la structure de la végétation au niveau global pour la première fois. A plus long terme, le projet **GEOHYSAR** vise à caractériser l'état hydrique du sol et de la végétation via un système SAR hybride très innovant entre un tandem en orbite géosynchrone et des émetteurs d'opportunité en orbite basse.

3.2. AUTRES PRIORITES

La quantité de données spatiales disponibles va continuer d'exploser au cours du prochain quinquennal ouvrant de nouvelles opportunités de repousser les frontières de la connaissance. A titre d'exemples, les années à venir offriront une diversité de données radar SAR sans précédent en termes de longueurs d'ondes (X, C, L ; S et P venir) offrant un potentiel inégalé pour l'estimation de la biomasse des écosystèmes, et la caractérisation de l'humidité des sols et de la végétation ; la mise à disposition au niveau 2 des millions d'images SPOT acquises entre 1986 et 2015 permettrait de compléter l'existant pour mieux étudier cette période charnière où l'empreinte de l'homme sur les écosystèmes est devenue globale. Dans ce contexte le développement d'une infrastructure distribuée de calcul dédiée au traitement de données spatiales ouverte aux scientifiques est une

urgence. Le centre de calcul du Cnes et d'autres centres de données répartis sur le territoire, sont intégrés dans l'IR Data Terra afin de faciliter le croisement de données hétérogènes. Le développement de ces centres de calcul partagés est la condition sine qua non de l'émergence de jumeaux numériques, tout en garantissant la souveraineté des recherches de la communauté nationale et en limitant l'impact environnemental.

Les sites des services d'observations structurés (Insu, Inrae, IRD...) sont utiles pour la cal/val des missions spatiales, et inversement ils peuvent bénéficier des produits OT dérivés.

Le potentiel de l'IA à explorer des données massives et hétérogènes doit continuer à être exploré, en associant des équipes pluridisciplinaires.

Enfin, le groupe recommande que l'APR soit davantage diffusée, notamment auprès de laboratoires non spatiaux ; l'ouverture aux SHS avec la création d'un nouveau groupe thématique va dans ce sens.

4. CONCLUSION

Questions scientifiques	Observables	Cadre actuel de développement (chronologie*)	Priorité scientifique	Recom.
Impact des changements globaux sur les socio-écosystèmes 	Q1. Biodiversité Q2. Santé des plantes	BIODIVERSITY , Cnes (T1)	P0	
	Q1. Occupation/usage du sol HR Q1. Paysage 3D	4D-Earth (T1)	P0	
Réduire les incertitudes sur le cycle de l'eau 	Q1. Humidité du sol 10 km	FRESCH , Cnes (T1)	P1	
	Q4. Hauteur d'eau journalière	SMASH , Newspace (T0)	P1	
	Q5. Température interne des calottes	CRYORAD , EE12 (T1)	P1	
Réduire les incertitudes sur le cycle du carbone 	Q1. Structure 3D du couvert	GREEN LEAF (T1)	P2	Phase 0 à actualiser
	Q4. Cycle diurne de la végétation	GEOHYSAR (T2)	P2	Phase 0

* T0, T1, T2 : priorité chronologique liée à la maturité technique

Le groupe rappelle que le soutien du groupe à ces missions est conditionné à la **diffusion ouverte des produits**.

5. LES REFERENCES

- Bouyer B., Rodler A., Roupioz L., Guernouti S., Musy M., Briottet, X. (2022), Apport de la télédétection dans la modélisation numérique du microclimat urbain à l'échelle du quartier, 30^{ème} congrès annuel de la Société Française de Thermique (SFT) 2022, May 2022, Valenciennes, France.
- Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounas B., Nuth C., Girod L., Farinotti D *et al.* (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592, 726–731.
- IPCC (2014). Summary for policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field C.B., Barros V.R., Dokken D.J. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.
- Lang M., Ferriere M., De Boissieu F., Briottet X., Fabre S., Sheeren D., Féret J.-B. (2023), Cartographie de la diversité spécifique forestière des milieux tempérés à partir d'imagerie hyperspectrale. In: Badard T., Pouliot J., Noucher M., (Eds), M.V.-O. (Eds.), Spatial Analysis and GEOmatics (SAGEO 2023), Québec, Canada, pp. 107-121.

- Mermoz S., Bouvet A., Koleck T., Ballère M., Le Toan T. (2021), Continuous Detection of Forest Loss in Vietnam, Laos, and Cambodia Using Sentinel-1 Data. *Remote Sensing*, 13(23), 4877.
- Schwartz M., Ciais P., Ottlé C., de Truchis A., Vega C, Fayad I., Brandt M. *et al.* (2024). High-resolution canopy height map in the Landes forest (France) based on GEDI, Sentinel-1, and Sentinel-2 data with a deep learning approach. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*, 128, Article 103711.
- Zhang S., Vega C., Deleuze C., Durrieu S., Barbillon P., Bouriaud O., Renaud J.P. (2022). Modelling forest volume with small area estimation of forest inventory using GEDI footprints as auxiliary information. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*, 114, Article 103072.