

GROUPE THEMATIQUE

SURFACES CONTINENTALES

Mélanie Becker (LIENS), Agnès Bégué (TETIS), Sylvain Biancamaria (LEGOS), Xavier Briottet (ONERA), Thibault Catry (ESPACE-DEV), Pierre-Louis Frison (LASTIG), Simon Gascoin (CESBIO), Aude Lemonsu (CNRM), Fabienne Maignan (LSCE), Philippe Maisongrande (CNES), Albert Olioso (EMMAH), Thierry Pellarin (IGE), Anne Puissant (LIVE), Jean-Louis Roujean (CESBIO), Kamel Soudani (ESE), Maguelonne Teisseire (TETIS).

Table des matières

1. INTRODUCTION	2
2. BILAN et AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019.....	3
2.1. Les priorités du SPS 2019	3
2.1.1. Les observables et missions prioritaires	3
2.1.2. L'exploitation des données	4
2.1.3. La structuration de la communauté scientifique	5
2.1.4. Les relations laboratoires/CNES/industries	6
2.1.5. Le cadre international	7
2.2. Les avancées scientifiques	8
2.2.1. Cycle de l'eau	8
2.2.2. Cycle du carbone.....	10
2.2.3. Milieux anthropisés	11
2.2.4. Milieux naturels.....	13
2.2.5. Conclusion sur les observables	14
3. REFERENCES	15
4. ANNEXES	16
4.1. Annexe 1 : Laboratoires APR 2023-2024.....	16
4.2. Annexe 2 : Complémentarité APR-SCO.....	16

1. INTRODUCTION

Les cinq années qui viennent de s'écouler ont été marquées par l'avènement d'aléas sans précédent au regard de leur fréquence et de leur intensité, et de progrès technologiques qui bouleversent en profondeur notre perception des changements globaux et notre rapport au monde. L'accélération avérée du changement climatique (GIEC 2021) impacte au quotidien le mode de vie des citoyens à l'échelle de la planète (en 2021 canicule dans le nord-ouest du continent américain, en 2022 sécheresse généralisée en Europe et inondations mortelles en Afrique de l'Ouest...). Face à une population mondiale en pleine croissance (8 milliards d'humains atteints le 15 novembre 2022), une pandémie mondiale (la Covid est responsable d'un recul de 5 ans en termes de développement humain ; UNDP) et des conflits armés (un quart de la population mondiale vit dans un pays en guerre ; UNDP) aux conséquences humaines et économiques désastreuses, se dresse devant nous l'urgence d'une meilleure compréhension de notre système Terre (cycles de l'eau, du carbone, énergie...) et des systèmes socio-écologiques (systèmes alimentaires, *One Health*, biodiversité, développement...). La technologie et le numérique prennent de plus en plus de place au quotidien, avec un flux d'informations - parfois contradictoires - du fait du développement de nouveaux systèmes d'observation et de diffusion que l'on doit apprendre à maîtriser, qualifier et interconnecter, à l'aide de nouveaux outils numériques.

L'observation de la Terre apparaît plus que jamais essentielle pour mieux comprendre ces systèmes et participer à la mise en place et à l'évaluation de nouvelles stratégies de gestion durable et de partage des ressources. 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 (Venus en 2017, Pléiades-Néo en 2021, SWOT fin 2023), et le déploiement opérationnel des constellations massives de nano-satellites (Dove de *Planet Labs*). La communauté scientifique est également prête pour exploiter les données à venir de CO3D et BIOMASS en 2024, de FLEX en 2025 et de TRISHNA en 2026. Malgré cette offre spectrale, spatiale et temporelle enrichie, le spatial seul ne peut répondre à tous nos besoins, et en plus du triptyque traditionnel observation spatiale/modèle/donnée in situ, il faut aujourd'hui compter sur l'émergence de nouvelles sources de données (le *crowd-sourcing*, les données textuelles des médias numériques) et de nouveaux outils (l'intelligence artificielle).

Dans le système Terre, les surfaces continentales occupent une place à part car c'est le lieu où interagissent majoritairement les hommes avec leur milieu et où sont mises en place deux principales stratégies visant à faire face au problème du changement climatique - l'atténuation et l'adaptation - à des échelles spatiales et temporelles différentes. Cependant, les surfaces continentales sont difficiles à renseigner, à modéliser et à simuler en raison de fortes discontinuités spatiales des paysages, de processus prépondérants aux petites échelles, et d'une réponse rapide des états de surface, le tout exacerbé par une grande hétérogénéité de la densité humaine et des pratiques de gestion des terres. D'un autre côté, ces surfaces peuvent être équipées de capteurs in situ, et renseignées à partir de « capteurs humains » qui ont aujourd'hui les moyens de communiquer en temps réel sur leur environnement. Notre ère est aussi marquée par de multiples fronts de recherche en sciences de la Terre, en sciences des données et en sciences humaines, avec des approches pluridisciplinaires encore balbutiantes, mais prometteuses, et la mise en place de passerelles entre la recherche et des partenaires publics et privés qui cherchent encore leur mode de fonctionnement.

2. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

2.1. LES PRIORITES DU SPS 2019

2.1.1. LES OBSERVABLES ET MISSIONS PRIORITAIRES

En 2019, trois missions avaient été sélectionnées comme 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 (Tableau 1) ; à ce jour, seule la mission TRISHNA est assurée.

- **TRISHNA** (*Thermal infraRed Imaging Satellite for High-resolution Natural resource Assessment*) est une mission menée en partenariat entre les agences spatiales française (CNES) et indienne (ISRO) et dont le lancement est prévu à partir de 2026. Elle est la première d'une génération de satellites (SBG/NASA en 2027 ; LSTM/ESA en 2029 et 2030) embarquant des instruments thermiques à haute résolution spatiale couvrant le globe plusieurs fois par semaine (répétitivité de 3 jours). Un objectif majeur est la détection du stress hydrique pour les agro-écosystèmes. La Science Team TRISHNA est constituée d'une communauté nationale et de plusieurs partenaires européens. Les TRISHNADAYS organisés en mai 2022 à Toulouse ont réuni 300 participants. Une première version des ATBD (*Algorithm Theoretical Baseline Document*) présentant les méthodes pour obtenir les livrables ont été fournis au CNES en 2023 et en cours de peaufinage avec les partenaires indiens. Le volet CalVal est déjà bien développé et nourrit une collaboration avec la NASA et l'ESA.
- **SMOS-HR/ULID** (*Soil Moisture and Ocean Salinity-High Resolution / Unconnected L-Band Interferometer Demonstrator*) : une étude de Phase A au CNES sur une solution d'interférométrie (SMOS-HR) a montré la faisabilité de la mission. Une étude complémentaire a montré également la faisabilité de l'approche alternative par formation de faisceau (FRESCH soumis à EE12 de l'ESA). Le concept ULID avec 3 nanosatellites, prévu pour réduire la résolution spatiale à 1-4 km, a quant à lui été arrêté après une phase A du CNES.
- **BIODIVERSITY** : imageur hyper-spectral à haute résolution (inférieure à 10 m pour une revisite de 5 jours, soit une résolution trois fois supérieure à celle de la mission CHIME (Copernicus Expansion) et de la mission allemande ENMAP qui opère depuis 2023). Trois phases A réalisées depuis 2019 ont permis de lever des points durs ; un dossier de programme phases B/C/D est en cours pour une décision début 2024.

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 novembre 2023.

Type de mesure / observables	Cadre de réalisation	Priorité	R&T associée	Thème scientifique	Etat fin 2023
Température, émissivité	TRISHNA	P0	Infrarouge thermique	Stress hydrique des agro-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 à EE12 de l'ESA). Après une phase A du CNES, ULID a été arrêté.
Cartographie des écosystèmes	BIODIVERSITY	P0	Imagerie optique hyperspectrale	Biodiversité, état et fonctionnement des écosystèmes...	Un dossier de programme phases B/C/D est en cours (décision début 2024).
Cartographie THR	SENTINEL-HR	P1	Imagerie optique HR stéréoscopique	Suivi saisonnier des surfaces, cartographie d'éléments fins...	→ 4D-Earth (ESA)
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).
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.
------------------	--------	----	--	--	--

Quatre autres missions avaient été identifiées en 2^{ème} priorité (Tableau 1) :

- **SENTINEL-HR** (*Sentinel-Haute Résolution*) pour la production globale de mosaïques trimestrielles continentales et côtières, à résolution métrique, dans quatre bandes spectrales optiques, et un mode stéréoscopique. L'objectif de la mission est d'observer les éléments fins du paysage (artificialisation, végétation urbaine, infrastructures, haies, couronnes d'arbres, trait de côte, hétérogénéités intra-parcellaires, glaciers) et d'assurer un suivi intra-annuel des changements. L'étude technique 4D-Earth de l'ESA s'inspire très largement du dossier de phase 0 Sentinel-HR mené par le CNES de 2020 à 2021, avec l'accent mis sur le besoin scientifique en données topographiques répétées.
- **SMASH** (*SMAll Satellites for Hydrology*) est une proposition de constellation de 10 nanosatellites fournissant le long de la trace de l'orbite des cotes d'eau des rivières, lacs et réservoirs avec une revisite journalière. L'objectif est d'améliorer l'échantillonnage temporel des missions altimétriques passées et actuelles, en embarquant des altimètres nadirs optimisés pour les surfaces continentales. La revue de fin de phase A effectuée par le CNES en novembre 2022 a conclu à la faisabilité du concept. En l'absence de financement dédié au PMT, du potentiel applicatif prometteur de la mission et de l'émergence du New Space poussé par la France, la start-up *Blue Water Intelligence* s'est positionnée, avec le support du CNES, sur ce concept pour en faire une mission privée (les scientifiques ayant accès aux données avec un certain temps de latence). Le groupe mission scientifique qui avait proposé la mission en 2018 a été peu et tardivement associé à cette démarche. A l'heure actuelle, un financement par le volet spatial de France 2030 semble acquis avec une participation complémentaire du CNES.
- **VLOBS** (*Versatile L-band and Optical Bistatic System*) est un projet de radar bi-statique opérant en bande L, assorti d'un capteur optique. L'objectif de cette mission est de mesurer les volumes des forêts, des glaciers, ainsi que les 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 ROSE-L). Le projet est en veille depuis la crise de la Covid. Les résultats expérimentaux en modélisation de configurations bi-statiques sont en cours de valorisation.
- **MARVEL** (*MAss and Reference Variations for Earth Lookout*) est une mission gravimétrique principalement dédiée à la géodésie et au cycle de l'eau. A l'échelle globale, elle peut contribuer à affiner le bilan énergétique terrestre et son déséquilibre lié aux GES (CO₂, CH₄...). La phase 0 a permis d'étudier plusieurs scénarios en coopération avec le JPL, l'ESA et le DLR. Malgré le choix de ne pas continuer en phase A, les objectifs scientifiques ont été repris intégralement dans la future mission NGGM (ESA) qui devrait faire partie de la constellation MAGIC à l'horizon 2030.

2.1.2. L'EXPLOITATION DES DONNEES

En 2019, le SPS recommandait de **développer des méthodes de traitement de données multicapteurs, multisources et multiéchelles**. Au cours de ce quinquennat, on observe une augmentation des projets multicapteurs, et multiscalaires (voir « Avancées scientifiques »). De plus, au triptyque habituel télédétection-modèles de surface-données in situ, s'ajoutent aujourd'hui les sciences participatives (en complément des données in situ) et l'IA (en complément des modèles).

Sur la question de l'IA, il était recommandé d'**accroître son utilisation pour le traitement des images et l'assimilation des données dans les modèles et d'aborder les nouvelles questions associées**. Force est de constater que l'appropriation et les contributions des modèles basés sur l'IA restent peu développées, en dehors de quelques projets APR majoritairement dédiés

au traitement d'images [TEMPOSS, PARCELLE, QUIMONOS, AIM_CEE]¹ et de quelques thèses. Les projets mobilisant des modèles basés sur les réseaux de neurones sont en augmentation dans l'APR 2023-2024, mais la plupart sont sans apport méthodologique et sans démarche critique d'utilisation. Cela pose la question de l'appropriation par la communauté de ces nouvelles techniques et modèles. L'utilisation de l'IA nécessite souvent des calculateurs puissants et du *Cloud Computing*. Les opérateurs privés de type *Google Earth Engine* restent à ce jour peu utilisés par la communauté scientifique nationale - par positionnement idéologique, mais surtout pour garder la maîtrise de la qualité des données - qui préfère se tourner vers les centres nationaux et les méso-centres publics (cf. 2.1.3 La structuration de la communauté scientifique).

2.1.3. LA STRUCTURATION DE LA COMMUNAUTE SCIENTIFIQUE

De nombreuses recommandations concernant la structuration et le fonctionnement de la communauté scientifique ont été formulées lors du dernier SPS. La plupart de ces recommandations ont été suivies en grande partie grâce au pôle de données et de services pour les surfaces continentales Theia - qui a continué à se structurer depuis 2019 autour de plus d'une vingtaine de Centres d'Expertise Scientifiques (CES) avec en appui quatre Centres de Données et de Services (CDS) et un réseau d'Animation Régionale (ART) - et grâce à la nouvelle IR Data Terra qui bénéficie en retour de l'expertise thématique des scientifiques du pôle Theia.

Concernant la recommandation sur **l'accompagnement et l'encouragement du développement de services opérationnels fondés sur l'OT, l'analyse des besoins et le renforcement des compétences des utilisateurs**, des ateliers thématiques et/ou régionaux (eaux continentales, irrigation, maladies infectieuses, santé des forêts, neige, milieux urbains, agriculture...) rassemblant scientifiques et utilisateurs finaux (institutionnels et/ou autres scientifiques non-experts du spatial) sont organisés depuis 2021 avec le soutien du pôle Theia afin d'identifier/présenter les produits et les méthodes, de diffuser des retours d'expériences, d'identifier les limites et les freins ou encore d'imaginer de nouvelles réponses aux besoins des utilisateurs. La participation de Theia et Data Terra au Salon des professionnels de la géomatique (GeoDataDays), à travers un « parcours du Spatial », a permis de faire connaître le Réseau des ART auprès des acteurs du territoire. Ces actions favorisent la mise en relation des acteurs à l'échelle des territoires et ont conduit à la création (en cours) de nouvelles ART (Normandie, Bourgogne Franche-Comté et région parisienne). De même, un travail de structuration des CES a démarré depuis 2022 afin d'assurer une meilleure lisibilité de l'expertise du pôle par les acteurs scientifiques et institutionnels.

Concernant **la mutualisation des traitements des données de télédétection et des données in situ, notamment via un Cloud public, et la mise en production des algorithmes développés dans le cadre des CES**, le pôle THEIA a fortement orienté les développements sur les aspects découverte et accès aux productions de la communauté SC par le développement de plusieurs catalogues et/ou interfaces de visualisation (images prétraitées, produits cartographiques à production systématique en particulier). Une réflexion a démarré début 2023 au sein du pôle afin d'identifier et de définir les services de traitements utiles à la communauté scientifique SC. Cette réflexion sur l'accès à des moyens de calculs distribués et mutualisés a démarré également à l'échelle de Data Terra avec les autres pôles de données dans le cadre du projet ANR GAIA DATA Equipex+. ceci a permis le lancement d'un AAP THEIA mi-2023 pour mettre en production les chaînes de traitement qui répondent à un cahier des charges précis (pertinence, intérêt, données disponibles, etc.) ou proposer des services (par exemple, de calcul à la demande). L'avènement de la plateforme Hydroweb-Next consacrée à l'hydrologie est une avancée importante pour l'exploitation des données ; pensée comme une déclinaison thématique relative à l'hydrologie, la plateforme propose un regroupement de variables disponibles dans Theia sur ce thème. De façon globale, on observe une plus grande pratique du dépôt de données par les scientifiques, mais cette pratique reste hétérogène (data verse institutionnels, Zenodo...). L'ouverture prochaine de l'entrepôt EasyData de l'IR Data Terra devrait faire évoluer les pratiques de la communauté SIC.

Une recommandation portait également sur l'utilisation de **l'offre SAFIRE, afin de mieux préparer les missions et de promouvoir de plus amples collaborations, notamment internationales**. Afin de préparer les futures missions TRISHNA et HYSP/BIODIVERSITY, des

¹ Les projets financés par l'APR TOSCA sont notés entre [].

campagnes d'acquisition d'images aéroportées multispectrales thermiques et VIS/NIR, mais aussi hyperspectrales dans le domaine VIS/NIR/SWIR, se poursuivent sur différents types de paysages (campagne ESA/JPL en imagerie hyperspectrale en 2023 ; campagne AI4GEO/APR CAMCATT sur Toulouse 2021 ; campagne JPJ/APR HYLÀ sur Los Angeles en 2024) ou sont en discussion (projet européen AIRLIFTS).

En termes de ressources humaines, le précédent SPS alertait sur **le manque de disponibilité des chercheurs pour s'impliquer dans une mission spatiale, sur la perte de physiciens de la mesure, et sur le besoin croissant en moyens humains pour traiter des gros volumes de données**. Ces craintes sont toujours d'actualité, et s'étendent aux doctorants et post-doctorants dont le nombre de candidatures décroît.

L'APR continue à jouer un rôle fédérateur pour la structuration de la communauté scientifique, via notamment le soutien financier continu des CES de THEIA pour l'animation scientifique et la production de démonstrateurs / produits cartographiques à valeur ajoutée, et de la ressource humaine pour de grands outils tels que DART et Iota2 [PARCELLE]. L'APR a également un effet structurant sur la communauté scientifique autour des missions (SWOT pour l'hydrologie, TRISHNA, SMOS, BIOMASS, BIODIVERSITY-HYSP pour l'hyperspectral, FLEX) avec notamment des actions CalVal (TRISHNA, SWOT, SMOS, BIOMASS) et la mutualisation des sites de mesures au sol, et autour de thématiques (e.g., TEMU-Milieu urbain). Il nous semble important de rappeler ici l'importance de l'APR pour les activités liées au spatial dans les laboratoires, comme en témoigne la participation d'un grand nombre de laboratoires (57 laboratoires ont déposé au moins une fiche en 2023 ; Annexe 1). L'APR demeure un guichet privilégié par la communauté scientifique - simple et efficace - car c'est un facteur de collaboration fort qui peut être mobilisé comme tremplin pour des projets nationaux ou internationaux de plus grande envergure (**renforcement des liens entre les groupes TOSCA et les programmes nationaux**). Au niveau national, on note la forte implication de Theia dans le lancement du nouveau Plan d'Application Satellitaire (PAS 2024-2028) piloté par le MTECT, le montage de projets ANR dans la suite de projets APR (e.g., projets HiDRATE, DIAMS, HYPE) et enfin la participation des scientifiques du groupe SC à plusieurs PEPR (One Water, Fair-Carbon, Villes Durables et Bâtiments Innovants) qui disposent de Projets Cibles centrés sur la mise en place d'un système d'information facilitant la découverte, l'accès et le traitement de données multisources sur des thématiques précises (eau, carbone, urbain, etc.). L'APR mériterait d'être davantage connue, notamment auprès de laboratoires non spatiaux (déficit d'acculturation des équipes thématiques de nos organismes) ; l'ouverture aux SHS avec la création d'un nouveau groupe (thématicienne : Céline Calleya) au TOSCA va dans ce sens.

Enfin, absente du dernier SPS, la question de l'impact environnemental des projets financés par le TOSCA apparaît chaque année comme plus prégnante.

2.1.4. LES RELATIONS LABORATOIRES/CNES/INDUSTRIES

Ambition Aval, programme SCO, Challenge R&T, Programme France 2030..., ce quinquennat est marqué par de nombreuses incitations pour développer l'usage de la donnée spatiale et l'implication des entreprises privées. Cette mutation vient sans doute combler un retard français dans le domaine, mais son caractère « à marche forcée » inquiète la communauté spatiale qui a parfois du mal à percevoir la logique des différents appels d'offre et s'inquiète de la baisse des moyens dévolus à la recherche et du déséquilibre de l'attractivité privé / public (salaire et conditions de travail).

Le Volet spatial du **programme France 2030** a été initié par le gouvernement en 2021 dans l'idée d'accélérer le développement de la filière spatiale sur les marchés émergents visés par l'entrepreneuriat privé (*New Space*). Dans ce contexte, un premier Appel d'Offres *Fast Track* dédié à l'hydrologie a notamment vu la sélection de services dédiés au suivi des surfaces, des hauteurs et de la qualité de l'eau, ainsi qu'à la détection des surfaces irriguées. Les méthodes choisies sont issues de recherches menées par les laboratoires dans le cadre des CES de Theia.

Créé en juin 2019, le **SCO (Space Climate Observatory)** a pour objectif de proposer des outils d'aide à la décision permettant d'observer, d'évaluer et d'anticiper les impacts des changements climatiques. En termes de TRL (recherche, démonstration puis service opérationnel), les projets SCO se situent en aval des projets APR (complémentarité). Dans la réalité, la chaîne technologique est rarement linéaire, ce qui conduit à une diversité de connexions entre SCO et APR : interaction (recherche et développement sont concomitants), mutualisation des moyens (des

missions par exemple) ou retour de questions scientifiques ou techniques vers l'APR pour lever des points durs ou évaluer les résultats du projet (cf. exemples de projets en Annexe 2).

Devant cette incitation au montage de projets en **Partenariat Public-Privé** qui viennent moissonner des savoir-faire bâtis sur le temps long, les organismes de recherche et leurs 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 consentis. Les accords de partenariats revêtent donc une importance particulière pour que la propriété intellectuelle soit respectée grâce à des licences d'exploitation garantissant la compatibilité avec l'*Open source* (cher à la recherche) avec les *business models* des entreprises. Que ce soit pour la R&D ou pour l'Aval, la disponibilité d'infrastructures nécessaires à l'exploitation et à la valorisation des données est un point fondamental. Avec le soutien de l'Equipex+ Gaia Data, l'IR Data Terra a posé les premiers jalons concrets d'un tel système distribué sur le territoire qui s'articule aujourd'hui avec les infrastructures européennes.

2.1.5. LE CADRE INTERNATIONAL

Les programmes bilatéraux du CNES menés en partenariat avec les autres agences spatiales nationales (NASA pour SWOT, ISA pour Venùs, ESA pour BIOMASS, ISRO pour TRISHNA ; Fig. 1) constituent l'ossature de la collaboration internationale. A cela, il faut ajouter le programme européen Copernicus auquel la recherche française contribue en même temps qu'elle s'enrichit grâce aux satellites Sentinel-1, 2, et 3. Des scientifiques français participent aux MAG de l'ESA pour préparer les Sentinel NG (S2NG, S3NG et NGGM pour la gravimétrie) et LSTM (thermique), aussi pour les Sentinel Expansion (CIMR ; CHIME pour l'hyperspectral). Cela a permis pour S2NG d'argumenter la revisite au détriment de la résolution spatiale, et pour LSTM d'harmoniser l'heure de passage et la couverture géographique, élargi maintenant à la mission SBG de la NASA. Le thème de la biodiversité profite également de l'implication soutenue de l'INRAE au sein de l'EETT (*Ecosystems Extent Task Team*) du CEOS. Cela permet de valoriser les travaux appuyés par le TOSCA concernant la cartographie et la caractérisation des habitats. Ces efforts ont conduit à la publication d'un *white paper* proposant des recommandations sur les types d'observations satellitaires utiles aux EBV (*Essential Biodiversity Variables*), confirmant la pertinence de combiner l'hyperspectral et l'infrarouge thermique. Enfin, la communauté scientifique française participe activement aux réflexions scientifiques de GEOBON (GEO pour la biodiversité) et GEOGLAM (GEO pour l'agriculture).



Fig. 1 : Travail collaboratif CESBIO-ISRO sur une parcelle de riz à Ahmedabad, site d'étude des effets directionnels thermiques (TIRAMISU). Photo Marc Oliver-Soulayrol.

En réponse à la recommandation du Havre sur **la consolidation des ancrages de la production des CES de THEIA dans les dispositifs internationaux**, le *Copernicus Land Monitoring Service* (CLMS) portfolio s'est enrichi depuis 2019 d'une nouvelle série de produits élaborés notamment à partir de méthodologies issues de projets financés par l'APR, le plus souvent dans le cadre des CES. Les produits neige et glace haute résolution (20 m) sur l'Europe ont été complétés par la variable FSC (*Fractional Snow Cover*) obtenue à partir des observations de

Sentinel-2 et diffusés en temps quasi-réel (CESBIO). L'INRAE continue la production de variables biophysiques de végétation (*Leaf Area Index*, *FAPAR* et *FCover*) à 300 m de résolution. Les niveaux d'eau des lacs et des rivières v2 sont aujourd'hui disponibles au format vecteur en temps quasi-réel (LEGOS). Les scientifiques français participent à six projets ECV (*Essential Climate Variable*) du programme *Climate Change Initiative* de l'ESA (Biomasse, Cycle du carbone régional avec responsable scientifique du LSCE, Débit des rivières, Humidité du sol, Lacs et Occupation des sols). En termes de développement de compétences, la communauté française est bien positionnée sur le programme FPCUP (*Framework Programme Agreement on Copernicus User Uptake*) dédié à la promotion de l'utilisation des données Sentinel (Copernicus Academy, WG Africa).

Enfin, il semble important de souligner que les trois quarts des projets de l'APR ont au moins un site hors France (Europe, Asie, Afrique, Amérique Sud, Arctique/Antarctique pour 2023-2024). La plupart de ces projets répondent à des besoins de recherche ou opérationnels locaux, et les partenaires associés sont souvent les utilisateurs finaux des outils et produits développés ; à ce titre, des activités de transfert et de formation sont fréquemment organisées par les porteurs de projet dans les pays de leur partenaire.

2.2. LES AVANCEES SCIENTIFIQUES

Depuis le dernier SPS, les avancées scientifiques notables se sont appuyées sur l'analyse des séries temporelles d'images à haute résolution Sentinel-1 et 2 (utilisées dans 2/3 des projets de l'APR) et le traitement des données THRS avec l'IA, l'exploitation de nouvelles missions scientifiques (lidar GEDI et thermique Ecostress sur ISS ; séries temporelles Venus), l'accompagnement continu des nouvelles missions (SWOT, TRISHNA et BIOMASS) et enfin, grâce aux travaux sur l'amélioration de l'estimation de la réflectance de surface avec Sentinel-2 [PARMA, ADJEFF] et de la température de surface [TRISHNAGU-CUTE].

Ces avancées scientifiques sont présentées ci-après par grands compartiments du système Terre (cycles de l'eau et du carbone) et des systèmes socio-écologiques (milieux anthropisés et naturels), **systèmes qui sont fortement interdépendants** (Fig. 2).

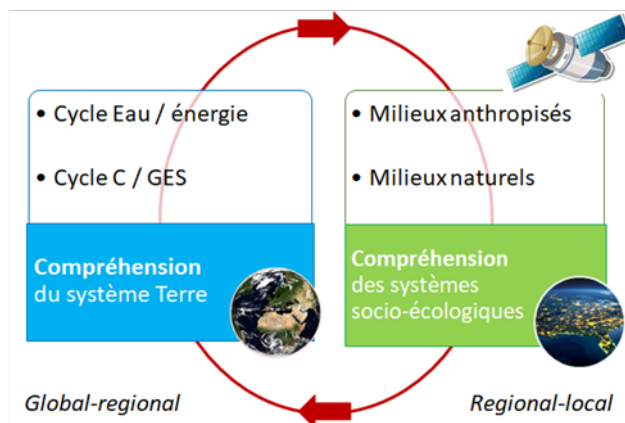


Fig. 2 : Les grands compartiments étudiés dans le groupe Surfaces Continentales et leurs interactions.

2.2.1. CYCLE DE L'EAU

Plusieurs produits opérationnels de visibilité internationale dont l'**évapotranspiration** (ET) restent à améliorer au regard de l'homogénéité spatio-temporelle pour répondre aux besoins. La mission ECOSTRESS a conduit à une cartographie de l'ET à une résolution comparable à TRISHNA et LSTM afin d'en mesurer l'apport. L'étude des effets directionnels dans l'infrarouge thermique a progressé grâce aux mesures in situ, à l'introduction d'un bilan d'énergie dans DART, et de nouveaux modèles paramétrés, avec comme objectif pour TRISHNA de mieux détecter le stress hydrique en éliminant les effets anisotropes.

La connaissance sur les **eaux à surface libre** et les **eaux souterraines** a aussi bien progressé. La base de données Hydroweb du pôle Theia, après s'être développée dans le cadre d'un partenariat public/privé en fournissant une base de données globale de cotes d'eau sur lacs, réservoirs et rivières à partir de données d'altimétrie radar nadir, est aujourd'hui intégrée dans la plateforme Hydroweb-Next auprès d'autres variables hydrologiques essentielles. Hydroweb est

utilisé dans plusieurs projets internationaux (CCI de l'ESA, C3S...). L'estimation de la variabilité des stocks d'eau de surface de grands bassins (Amazone, Congo...) par télédétection (Sentinel-1/2/3, Landsat, altimétrie nadir...) et l'estimation des eaux dans le sol, en combinaison avec les données gravimétriques GRACE, ont permis de suivre la variabilité des stocks d'eau sur une vingtaine d'années, en couvrant le continuum bassin versant/estuaire/océan côtier [DYBANGO, SWHYM]. Il y a aussi une très forte activité autour de la préparation du lancement, puis de la CalVal de la mission SWOT par les équipes impliquées dans la Science Team (ST), et en dehors de la ST, en partenariat avec des équipes internationales. En effet, lancée en décembre 2022 SWOT est une mission très structurante pour l'étude des eaux à surface libre avec la mise en place d'algorithmes de calcul des produits de débit des fleuves et de variation de volume des lacs, avec la mise en place et l'amélioration de méthodes d'assimilation de pseudo-observations SWOT dans des modèles hydrauliques (échelle locale) et des modèles hydrologiques globaux/régionaux, ainsi que la CalVal sur des lacs et rivières dans des bassins couvrant diverses zones climatiques et sur des zones estuariennes et littorales [SWOT-HYDRO, SWOT-3MC, SWOT-DAHM, SWOT-SNORKS, SWOT-SOUTH AMERICA...].

L'observation et l'analyse de l'**humidité du sol à différentes résolutions** reste un champ de recherche très dynamique qui mobilise différentes techniques de mesure (microondes passives/actives, optique multi/hyper spectral) et de nombreux laboratoires. La recherche concerne essentiellement le développement, la production et l'amélioration des produits issus de la mission [SMOS-TE]. Combinées à des données d'autres capteurs, les données SMOS permettent d'obtenir des séries longues d'humidité du sol à diverses profondeurs. La compréhension du signal a aussi progressé via des développements expérimentaux (système de mesure des constantes diélectriques, analyse des profondeurs de pénétration du signal, exploitation de mesures GNSS...). La communauté se fédère autour de futurs concepts de mission pour améliorer notamment la résolution spatiale (de 40 km à 10 km), comme SMOS-HR ou FRESCH. Enfin, des études récentes se focalisent sur l'estimation des volumes d'irrigation à partir d'une connaissance de l'humidité du sol à haute résolution (combinaison données Sentinel-1 et 2), et d'autres études, plus théoriques, portent sur la modélisation de la réflectance spectrale et directionnelle de sols rugueux pour différents taux d'humidité dans le domaine réflectif (modèle MARMIT [MOLIERE]).

L'étude du **manteau neigeux** a largement profité des données gratuites fournies par les constellations Sentinel-1 et Sentinel-2 du programme Copernicus [OSE, SHARE]. En particulier, l'APR a permis le développement et l'évaluation de produits désormais opérationnels à l'échelle européenne pour cartographier l'enneigement à haute résolution spatiale dans le cadre du programme Copernicus Land. D'autres méthodes innovantes exploitent les images Pléiades pour déterminer le volume de neige. Des méthodes d'assimilation de données sont développées pour tirer parti de ces données satellitaires variées [MIOSOTIS], y compris les futures données IRT TRISHNA qui sont prometteuses pour améliorer la modélisation du manteau neigeux.

Le bilan de masse des **glaciers** a pu être établi à l'échelle globale [dMASS-Glaciers] ; entre 2000 et 2019, le traitement d'images stéréoscopiques ASTER a permis de montrer que 200 000 glaciers (couvrant 97.4% de la surface totale des glaciers sur Terre) ont perdu 267 ± 16 Gt par an (Fig. 3). Cette perte s'est accélérée au cours de la dernière décennie. Une étude complémentaire a permis de dresser un atlas des vitesses d'écoulement des glaciers à l'échelle globale et de raffiner la contribution potentielle des glaciers de montagne à la hausse du niveau de la mer.

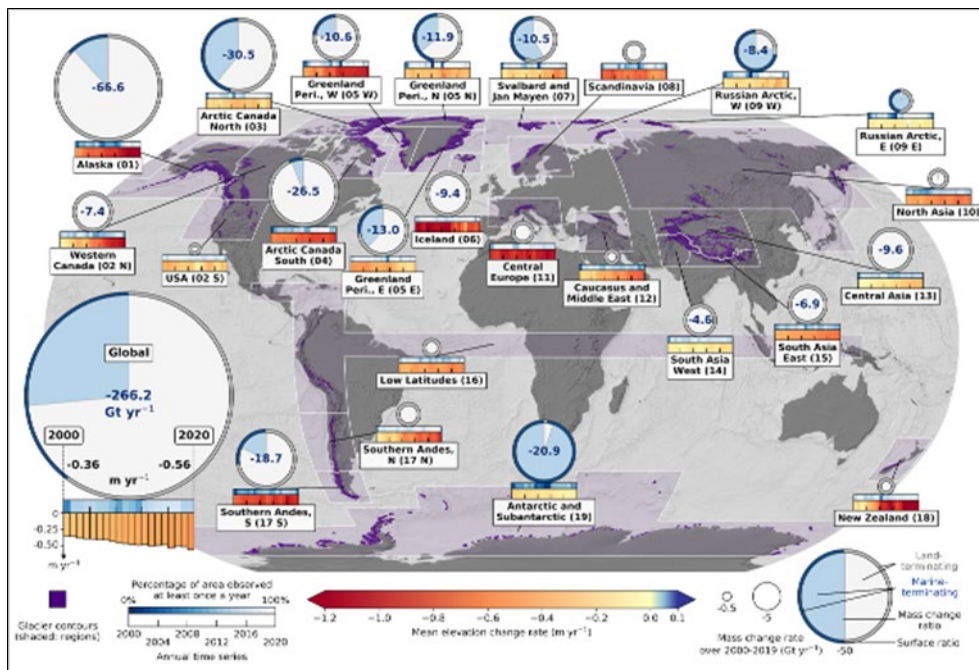


Fig. 3 : Changement des masses des glaciers et évolution entre 2000 et 2019 (Hugonnet et al., 2021)

Enfin, les projets concernant **les estuaires**, à l'interface entre les surfaces continentales et les océans, se développent. C'est ainsi que des observations multicapteurs (satellites, lidar, drones, mesures de terrain) ont été acquises et utilisées pour observer et expliquer l'hydrodynamique de plusieurs estuaires (Seine, Gironde) [SWOT-3MC]. Des workshops sur la compréhension des risques et impacts des inondations côtières dans les deltas d'Asie sont en cours de réalisation pour structurer de la communauté [DELTAASIA].

Qu'elles soient relatives à la cryosphère ou à l'eau liquide, l'association et la mise en cohérence des diverses composantes du cycle de l'eau dans un bilan hydrologique global sont liées à l'étude du niveau global des océans.

2.2.2. CYCLE DU CARBONE

L'étude du cycle du carbone s'est poursuivie à travers de nombreux projets, souvent liés aux impacts du changement climatique (voir les études sur l'état des forêts dans la section « Milieux naturels »). Elle s'est essentiellement concentrée sur les milieux forestiers et s'appuie sur le **suivi de traits fonctionnels** afin de définir des modèles adaptés, empiriques ou physiques. Les données Sentinel-2 ont notamment été utilisées pour estimer les principaux attributs biophysiques et écologiques tels l'indice foliaire (LAI), la teneur en chlorophylle, la masse spécifique, la diversité structurale, etc., dans des contextes bioclimatiques variés : méditerranéen [SENTHYMED] et tropical [SE2COUL, ROMANCE]. Les données lidar GEDI ont contribué à dresser un inventaire forestier en combinaison avec les données Sentinel-1 et 2. Une estimation de la hauteur des arbres à 10 m a ensuite servi à calculer la **biomasse aérienne** et le **volume de bois sur pied** des forêts françaises [GEDI-SLIM] et de plantations d'eucalyptus au Brésil [BIOMASS-Valorisation]. L'exploitation ciblée des données GEDI s'inscrit dans un objectif plus large qui est d'alimenter la base de données de l'inventaire forestier national (IGN) avec un transfert de la mesure locale jusqu'à l'échelle régionale. Pour mieux comprendre le lien entre le signal lidar et les propriétés structurales du couvert, le signal GEDI a été simulé par le modèle de transfert radiatif 3D DART sur des espèces tropicales.

A l'échelle globale, l'étude des **flux et stocks de carbone des plantes terrestres** bénéficie de la préparation des missions FLEX, BIOMASS et SMOS. La mesure de la fluorescence émise par la végétation (SIF en anglais) permettra grâce à FLEX d'affiner le calcul de la production primaire brute (GPP). Un volet instrumental pour obtenir des mesures actives et passives *in situ* et aéroportées a été développé [ECOFLUO, VELIF]. L'assimilation des données satellitaires TROPOMI dans un modèle de surface a montré que la GPP pouvait être plus précise car mieux

contrainte [FORGE]. Le projet [BIOMASS-Val], centré sur la valorisation des données de la future mission BIOMASS, a notamment concerné l'évaluation des approches multicapteurs (ALOS, Sentinel-1/2, SPOT-6/7, 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. Ce projet, qui comporte un volet expérimental important, mené notamment sur le site de Paracou en Guyane, a contribué à des avancées significatives dans la compréhension des synergies entre les bandes P, L et C et le potentiel offert par la tomographie SAR en forêts tempérées et tropicales (cf. Fig. 4). Enfin, en complément des études effectuées pour préparer l'arrivée prochaine de BIOMASS, les études menées à l'échelle continentale ont apporté de nombreuses analyses sur la dynamique inter et intra annuelle du VOD à partir des températures de brillances en bande L [SMOS-TE].

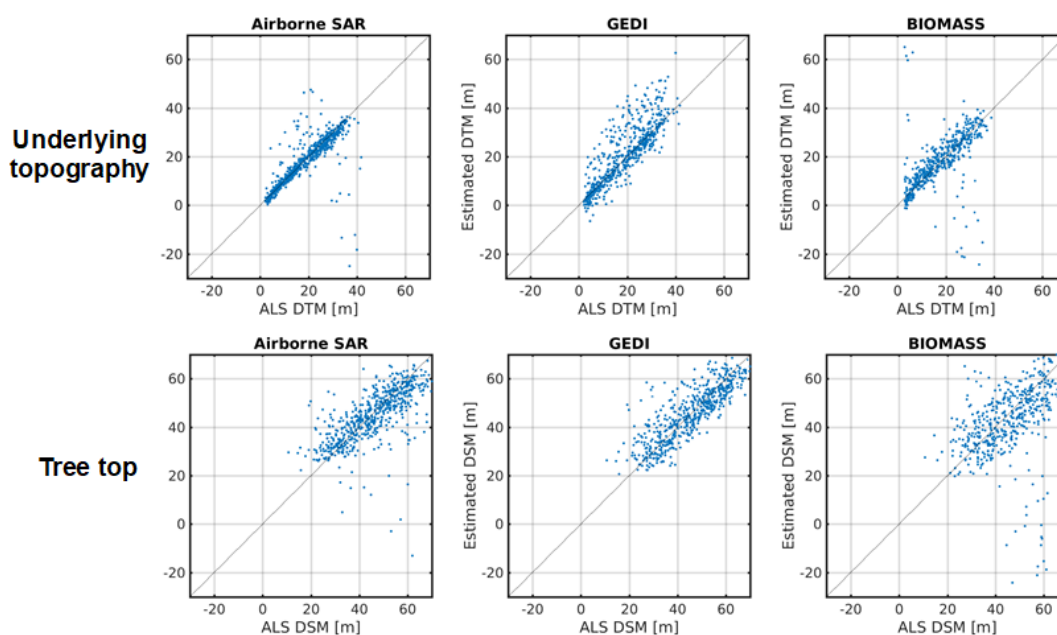


Fig. 4 : Estimation de la hauteur des arbres et de la topographie du sol sous-jacent (Ho Tong Minh et al., 2023); complémentarité BIOMASS-GEDI pour l'étude des forêts tropicales (site de Paracou, Guyane ; 50 m pixel spacing pour BIOMASS).

Concernant le volet agricole, des travaux sur l'estimation des **biomasses des cultures** sous contrainte climatique, et leur impact sur le potentiel de stockage de carbone dans les sols ont été présentés lors de l'atelier régional Occitanie « Télédétection, agriculture & environnement », ainsi que des résultats sur l'amélioration de l'estimation du contenu en **matière organique des sols** en utilisant les données Sentinel-2 [CES Cartographie numérique des sols].

Enfin, des résultats originaux sur le **carbone organique dissout (DOC)** ont été obtenus pour six grands fleuves arctiques en combinant les données Sentinel-2 et Landsat [DOC-RIVERS].

2.2.3. MILIEUX ANTHROPISES

La cartographie de **l'occupation et de l'usage des sols**, et de leur dynamique, est une donnée essentielle pour la compréhension des systèmes socio-écologiques. Dans le cadre du CES OSO, des progrès significatifs ont été faits sur la production annuelle des cartes d'occupation du sol, sur la nomenclature (24 classes à l'échelle nationale) et la précision des cartes grâce aux améliorations de la chaîne Iota² et des stratégies d'entraînement des modèles de classification [PARCELLE]. Des études sont en cours sur la cartographie saisonnière et en temps quasi-réel [NEXTOSO], sur l'utilisation combinée de séries Sentinel-2 et d'images THRS (chaîne Moringa), sur la cartographie d'éléments structurants du paysage (infrastructures, contours parcelles, aménagements hydrauliques [GDSATEL]...) et le zonage paysager [CES PAYSAGE]. Porté par la demande, la cartographie de l'usage des sols s'enrichit grâce à des développements spécifiques.

En **agriculture**, des résultats innovants sont obtenus sur la cartographie des pratiques (calendriers culturels, irrigation, cultures intermédiaires, jachères, épandage...) qui ouvrent la voie à l'amélioration des modèles de rendements - en complément des variables climatiques [SECTEL, TRISHNA-ES, QUIMONOS] et environnementales telles que la salinisation des sols [QUIMONOS] - et des modèles climatiques (cf. Journée thématique THEIA sur l'Agriculture). Pour l'**urbain**, les travaux sur l'apport de l'imagerie satellitaire multicapteur se poursuivent à différentes échelles (emprise de la tache artificialisée, morphotypes urbains à l'échelle des quartiers, objets urbains [AIMCEE]) et mobilisent toutes sources de données et d'outils : analyse texturale d'images optiques et radar THRS (chaîne FOTOTEX ; [DELICIOSA]) pour la cartographie des habitats informels au Brésil [MATHIS], segmentation sémantique d'images Spot-6/7 et DL 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 [HYPERU]. La cartographie des **zones littorales**, à forts enjeux humains et environnementaux, fait aussi l'objet de travaux spécifiques [LITTOZHUMIDES], permettant notamment d'étudier les risques d'inondations dans les deltas de l'Asie [DELTASIA]. Enfin, en **hydrologie**, la cartographie fine des retenues d'eau et la connaissance des pratiques agricoles (calendrier cultural et irrigation) sont utilisées pour améliorer la modélisation du stockage en eau des retenues [AGRHYD].

La combinaison de ces nouveaux observables d'occupation/utilisation des sols et de modèles/expertises permet d'accéder à de nouveaux indicateurs, tels que les **risques sanitaires** (liés aux maladies vectorielles ; à la qualité des eaux de surface ; au confort thermique en ville, cf. Fig. 5), le foncier et la consommation alimentaire. La cartographie des habitats hébergeant des vecteurs de maladie (e.g., maladie de Chagas, dengue, leptospirose) et la caractérisation des facteurs environnementaux associés aux épidémies, gagnent en maturité (ouvrage publié aux éditions Quae en 2022). D'autres travaux montrent le lien entre couleur de l'eau, matières en suspension et présence de bactéries dans les eaux continentales en Afrique de l'ouest [TELESSAO]. Grâce à l'effort de mobilisation de la communauté urbaine dans la préparation de la mission TRISHNA, de nouvelles métriques (température de l'air, indices de confort thermique, indices socio-morphologiques) sont proposées pour identifier le confort thermique à l'échelle du quartier et identifier les populations vulnérables [TRISHNAGU], ainsi que l'acquisition de jeux de données adaptés pour cette mission [TRISHNAGU-CAMCATT]. Dans le domaine des sciences humaines, des travaux émergent sur le **foncier** avec la cartographie des investissements grande échelle (*land grabbing*) au Sénégal à partir de la combinaison de métriques de changement au sein de séries temporelles NDVI MODIS [VISAGE] et l'analyse de l'impact de la certification foncière sur les ressources naturelles au Bénin [FLAIR]. Enfin, des projets exploratoires sont en cours sur l'étude du lien entre **sécurité alimentaire** et indicateurs de sécheresse à Madagascar [SuFECIS] et en Afrique de l'ouest [SCOSSA] à partir de données multisources hétérogènes (SITS, climat, occupation des sols HR, textes...) et de l'IA.

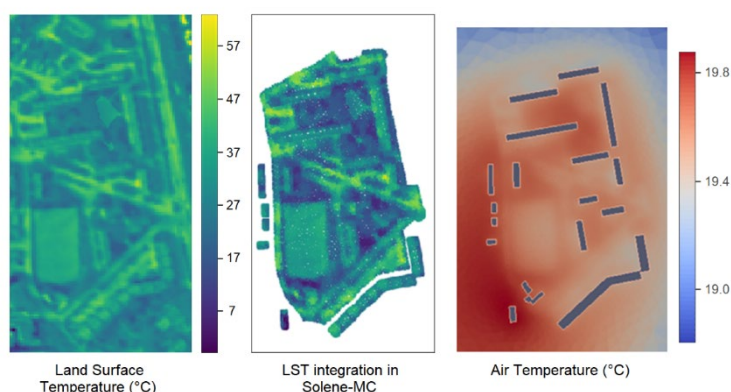


Fig. 5 : Combinaison de données thermiques aéroportées à haute résolution et du modèle Solène-MicroClimat pour relier la mesure de température de surface à la température de l'air et au confort thermique dans l'espace extérieur (Bouyer et al., 2022).

2.2.4. MILIEUX NATURELS

De nombreuses propositions portant sur le suivi des milieux naturels terrestres et aquatiques ont été soutenues par le TOSCA. Les milieux étudiés sont la forêt (tropicale, méditerranéenne), les prairies et savanes, les zones humides et les eaux de surface. Ces milieux sont caractérisés sous l'angle de leur état, de la biodiversité et de leur gestion par l'homme.

Le suivi des écosystèmes terrestres fait appel à l'ensemble des domaines de la télédétection. Il intègre les missions spatiales actuelles (Sentinel-1/2, GEDI, SMOS) et futures (BIOMASS, TRISHNA et BIODIVERSITY) pour la cartographie, la caractérisation et le suivi des espèces et des habitats. De nombreux travaux basés sur l'analyse de séries temporelles radar (Sentinel-1, diffusiomètres), de données lidar (GEDI, ICESat-2) et/ou optiques (Sentinel-2) et de données hyperspectrales portent plus spécifiquement sur les **forêts** et la réalisation d'inventaires forestiers [SLIM, SE2COUL]. Le dépérissement des forêts, dû aux stress hydriques et/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 (taux pigmentaires chlorophylliens et en caroténoïdes, teneur en humidité du combustible vivant, teneur en protéines, indice foliaire et indicateurs phénologiques...) à partir de données hyperspectrales et d'inversion de modèles de transfert radiatif [HYPERMED, SENTHYMED], et des outils basés sur la détection d'anomalies dans des séries temporelles d'images Sentinel-2 [TEMPOSS, SYLVOSANSAT] 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 [SOS-MAMBO] ou leur rôle dans les cycles du carbone et de l'eau [CEMANG, ROMANCE]. Sur le sujet de 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 [HYPERTROPIK] et tempérés [HYPERBIO ; Fig. 6] ; de même, la prise en compte d'indices spectraux issus de séries temporelles Sentinel-2 dans les modèles de distribution des espèces animales (mammifères, oiseaux, batraciens) permet d'améliorer fortement leurs performances.

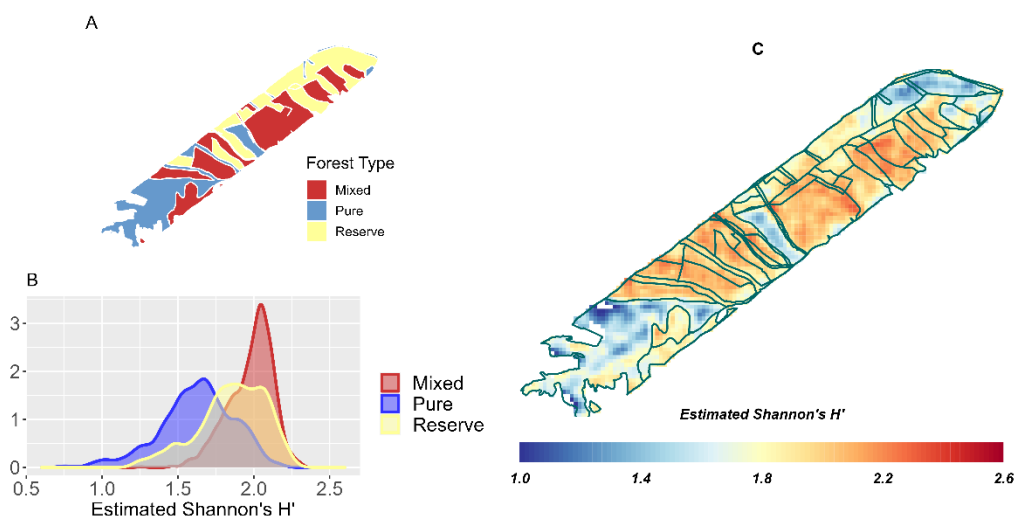


Fig. 6 : Carte de diversité alpha (indice de Shannon) produite à partir de données hyperspectrales aériennes (capteurs Hypspex) avec l'outil biodivMapR, et la carte de peuplements (purs, réserve, mixtes) issue de la BD forêt et des observations de terrain correspondantes (Lang et al., 2023).

Concernant l'**exploitation des écosystèmes**, le suivi de la **déforestation** en zone tropicale à partir de données Sentinel-1 est aujourd'hui un service opérationnel [FORVACCSS ; Fig. 7]. Ces travaux sont en connexion avec l'étude du cycle du carbone afin d'intégrer la variabilité spatio-temporelle dans les modèles globaux. Les études sur les **prairies** ont porté sur la caractérisation et date de fauches [PARCELLE] et leur suivi en moyenne montagne [PHENOMENE]. En parallèle de ces travaux, des applications émergent sur la **restauration des écosystèmes**, telles que le suivi de la reprise de la végétation consécutive à l'installation de petits aménagements hydrauliques dans le cadre du programme de la Grande Muraille Verte au Sahel [GDSATEL] et en France avec le suivi de la végétation sur un site minier pollué en cours de réhabilitation [SHYMI, COMPOST].

Enfin, plusieurs travaux sur la caractérisation des **eaux de surface** ont été réalisés à partir de données optiques Sentinel2 et Landsat [VOLTRANSMEKONG, DOC-RIVERS, TELESSAO-2, SWOT-SPLASH]. Ces travaux s'inscrivent dans l'étude du cycle du carbone (matière organique dissoute, chlorophylle), mais aussi de l'impact des matières en suspension sur la santé. Une chaîne de traitement d'estimation de la couleur des eaux a été transférée au CES THEIA « Couleur des eaux continentales ».

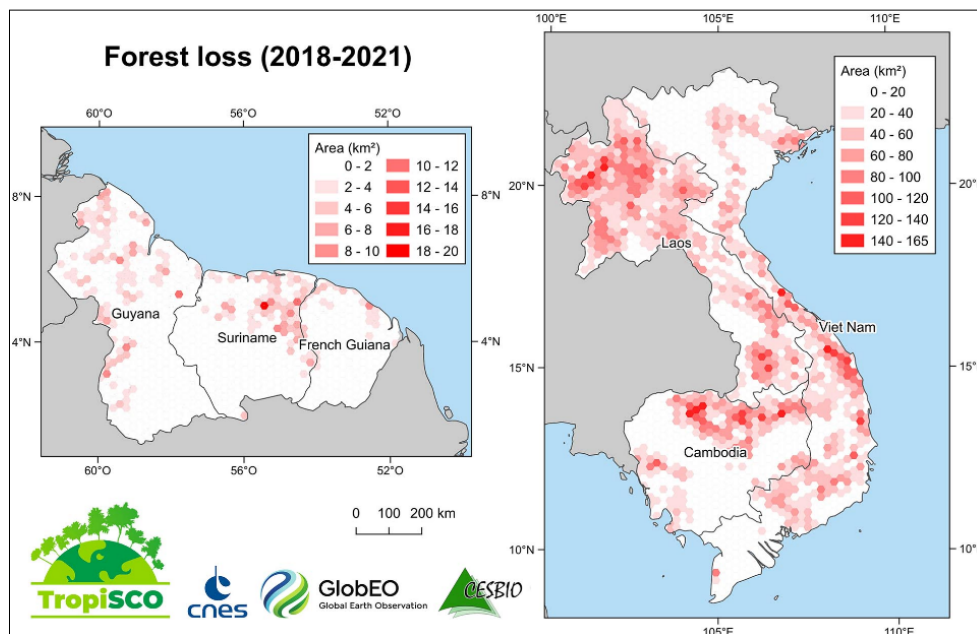


Fig. 7 : Déforestation sur l'Asie et le Plateau des Guyanes de 2018 à 2021 (d'après Mermoz et al., 2020).

2.2.5. CONCLUSION SUR LES OBSERVABLES

Depuis le SPS du Havre en 2019, de nombreuses avancées ont pu être faites dans différents domaines thématiques, notamment sur l'étude du cycle de l'eau et du cycle du carbone grâce à la préparation des missions SWOT, TRISHNA et BIOMASS pour ne citer que les plus importantes en nombre d'équipes impliquées, et la disponibilité de nouvelles données (GEDI). La liste des observables, directs et indirects, tire profit également de travaux de plus en plus nombreux qui mobilisent conjointement différentes missions spatiales et différentes sources de données, et des progrès en modélisation des processus de surface. Avec l'arrivée de SWOT, conjuguée à l'ouverture de la plateforme thématique Hydroweb-Next de Théia, une nouvelle étape est franchie dans l'amélioration de l'accès aux variables issues du satellite pour les besoins de la recherche et des services. Ce foisonnement de nouveaux produits ou de produits améliorés (glaciers, évapotranspiration...) ouvre de nouveaux champs de recherche telle que la qualification des incertitudes, et donc l'accès à des données de validation documentées et de qualité.

Ce quinquennat est également marqué par l'étude à l'échelle territoriale des processus physiques et anthropiques, avec une inflexion nette de travaux sur l'impact des activités humaines sur les différents compartiments du système terre (impact des pratiques agricoles, de la gestion forestière, aménagements hydrauliques...sur le carbone et l'eau). Ces nouveaux travaux sur les systèmes socio-écologiques sont amenés à se développer, ne serait-ce que pour mieux décrire et étudier les milieux à forts enjeux tels que les zones littorales, les milieux urbains ou les zones protégées. Ils ouvrent de nouveaux fronts de recherche sur l'utilisation de données d'observation de la Terre pour estimer des variables indirectes de type socio-économiques, sur l'utilisation de l'IA, et aident à réfléchir à une nouvelle façon d'aborder les questions liées aux changements d'échelle et à la généralité des approches.

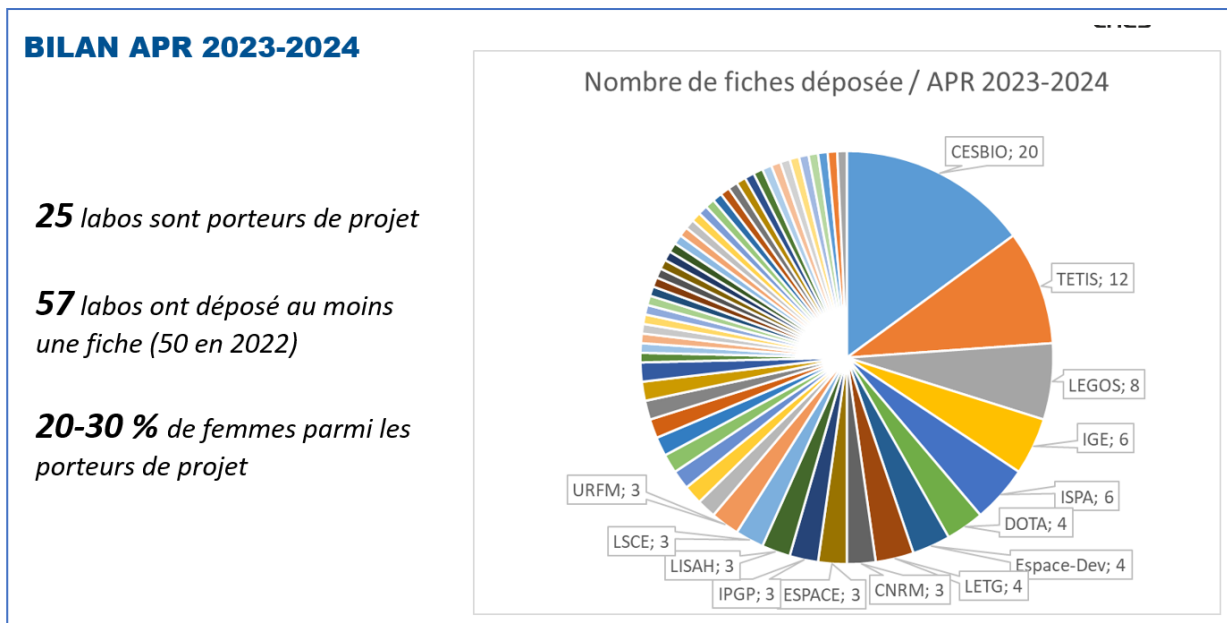
Malgré les importantes avancées, les observations spatiales actuelles ont encore des limites pour le développement d'applications et de services, notamment la fréquence de revisite, encore insuffisante dans les domaines optiques réflectif et émissifs, et la résolution spatiale pour certains observables tels que l'humidité du sol, la couronnes des arbres ou les milieux urbains.

3. REFERENCES

- Bouyer, B., Rodler, A., Roupioz, L., Guernouti, S., Musy, M., and Briottet, X., 2022. Apport de la télédétection dans la modélisation numérique du microclimat urbain à l'échelle du quartier, 30ème congrès annuel de la Société Française de Thermique (SFT) 2022, May 2022, Valenciennes, France. <https://doi.org/10.25855/SFT2022-029>
- Ho Tong Minh D., Ngo, Y.-N., Baghdadi, N., Fayad I., Ferro-Famil, L., Huang Y., Villard L. and T. Le Toan, 2023. Revolutionizing the Estimation of Tropical Forest Vertical Structure with Spaceborne GEDI and SAR Tomography. Conference PolInSAR & BIOMASS, 19-23 June 2023, Toulouse (FR).
- Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E. et al., 2021. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592, 726–731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
- Lang M., Ferriere M., De Boissieu F., Briottet X., Fabre S., Sheeren D. and J.-B. Féret, 2023. Cartographie de la diversité spécifique forestière des milieux tempérés à partir d'imagerie hyperspectrale. Conférence Spatial Analysis and GEOmatics (SAGEO) 2023, Quebec (Canada), 5-9 juin 2023.
- Mermoz, S., Bouvet, A., Koleček, T., Ballère, M., and Le Toan, T. (2021). Continuous Detection of Forest Loss in Vietnam, Laos, and Cambodia Using Sentinel-1 Data. *Remote Sensing*, 13(23), 4877. <https://doi.org/10.3390/rs13234877>.

4. ANNEXES

4.1. ANNEXE 1 : LABORATOIRES APR 2023-2024



4.2. ANNEXE 2 : COMPLEMENTARITE APR-SCO

Exemples de complémentarité entre les projets APR et les projets SCO (voir texte pour détail) :

Mutualisation	Complémentarité	Interaction	Retour vers TOSCA
SEMTI SENT / SCO Chove-Chuva	S2-Lepto / SCO ClimHealth	DELTASIA / SCO BAND-SOS	CUTE / SCO Thermocity
SWOT3MC / SCO OISSEL & SCO OSS ST	MonStockDO / SCO StockWater	CES THEIA Temp Surface et Emissivité / SCO Thermocity	SPLASH / SCO Stockwater
	BIOMASS-Val / SCO TropiSCO	DELTASIA / SCO BAND-SOS	BIOMASS - FORVACCS / SCO TropiSco
	SOS-MAMBO / SCO Mangrove		
	S2SHORES / SCO WACA-WAR		
	TRISHNA / SCO SatBDNB		
	SWOTHDAHM / SCO FloodDAM		