

APPEL À CONTRIBUTIONS - SPS 2024

4D-Earth

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

8000 caractères maximum (espaces compris). Décrire le(s) objectif(s) scientifique(s) associés au projet. Pour rappel, le projet doit expliciter prioritairement l'objectif scientifique avant d'aborder l'éventuelle mission qui pourrait y être associée, la pertinence scientifique étant un critère déterminant d'évaluation. Le projet doit concerner de nouveaux objectifs scientifiques qui pourraient être développés à l'échéance 2030 ou au-delà. Préciser l'originalité du projet, son caractère innovant, notamment par rapport à l'existant, et donc sa plus-value scientifique, instrumentale et/ou technique. Évaluer la place du projet par rapport aux objectifs de recherche et d'innovation du CNES

4D-Earth est une proposition de mission spatiale pour la détection à haute résolution des changements à la surface terrestre. Elle vise une couverture systématique, quasi globale et fréquente (idéalement mensuelle) des terres émergées afin de suivre leur altitude, leurs mouvements et leurs états de surface. Les données générées par la mission, des ortho-images optiques à 2 m de résolution spatiale et des modèles numériques de surface avec une maille de ~5 m, seront en accès libre. Cette proposition s'inspire très largement du dossier de phase 0 "Sentinel-HR" (1) avec l'accent mis sur le besoin scientifique en données topographiques répétées. Elle hérite des travaux de la proposition Z-Earth (candidate Earth Explorer 8 en 2010) présentée au SPS de 2014. Dix ans après, le besoin est plus que jamais présent. 4D-Earth se nourrit également des acquis de la future mission du CNES, Co3D.

L'innovation réside d'abord dans cette prise de vue systématique et régulière à haute résolution et en 3D. Mais l'innovation interviendra aussi sur les développements de nano ou micro-satellites nécessitant une bonne qualité d'image et une assez longue durée de vie.

4D-Earth vise à servir deux grandes familles d'enjeux scientifiques, portés par les communautés cryosphère, surface continentale, terre solide et littoral (et au delà) :

- Le cœur de notre demande est le suivi de la Terre dans ses 4 dimensions c'est-à-dire la caractérisation fine de l'évolution de la topographie des terres émergées, à partir de séries temporelles de modèles numériques de surface (MNS) et d'ortho-images calculées avec un MNS synchrone, synchronicité qui est clef lorsque la dynamique verticale est forte.
- La mission permettra également un rafraîchissement quasi mensuel des états de surface grâce à des ortho-images optiques à résolution métrique. L'hybridation avec les données Sentinel-2 (10 m de résolution, revisite 5 jours) permettra d'affiner la résolution temporelle tout en conservant la résolution de 2 m.

Nous détaillons ces deux grands enjeux :

[1/ Suivi temporel de la topographie des terres émergées](#)

Les terres émergées de notre planète sont en constante évolution, notamment sous l'effet des activités humaines. Le changement de la topographie terrestre est un révélateur des impacts du dérèglement et de la variabilité climatiques (e.g., fonte des glaciers, des calottes polaires et pergélisol, variation des stocks de neige en montagne), des aléas telluriques (e.g., destruction par les séismes, mouvements verticaux du sol des volcans et des glissements de terrain, croissance des coulées de lave, érosion et transferts sédimentaires lors des crues ou tsunamis) ou de la pression anthropique (e.g., urbanisation rapide, coupes forestières, construction de barrages). Pourtant, **aucune mission spatiale ne va assurer la continuité du suivi de la topographie des terres émergées de l'ensemble du globe après 2025.**

Pour rendre concrète l'importance de ce suivi temporel et les lacunes des missions spatiales actuelles, nous développerons le cas de l'observation des glaciers. Le même raisonnement pourrait être conduit pour d'autres applications : glissements de terrain/coulées de lave, urbanisation, forêts, catastrophes naturelles (2). Ces applications sont détaillées dans le rapport de phase 0 Sentinel-HR (1) et abordées rapidement ci-dessous.

Jusqu'à récemment, l'estimation des pertes de masse des plus de 200'000 glaciers à la surface du globe restait entachée de fortes incertitudes à cause d'un échantillonnage spatio-temporel clairsemé. Cette lacune observationnelle affecte notre capacité à, d'une part, boucler les bilans de hausse du niveau de la mer et projeter la hausse future et, d'autre part, estimer le rôle des glaciers comme ressource en eau régionale. Pour leurs projections du devenir des glaciers, les modélisateurs réclament des estimations des pertes de masse glacier par glacier et non moyennés sur des grandes régions. Ils demandent aussi une résolution temporelle suffisante pour séparer les processus hivernaux et estivaux (accumulation vs. fonte).

Or, l'immense majorité des glaciers est de trop petite taille (97% font moins de 10 km²) pour être observée par les méthodes gravimétriques (GRACE) ou par les altimètres radar et laser (3). De plus, les mesures de terrain sont limitées à quelques dizaines de glaciers, mal répartis. Aussi, seule la comparaison de MNS multi-temporels permet un échantillonnage adéquat dans tous les massifs. Ces MNS peuvent être déduits par interférométrie radar, indépendamment du couvert nuageux (4), mais le signal de changement d'altitude est difficile à déconvoluer d'une profondeur de pénétration forte (jusqu'à 10 m pour la bande X de la mission TanDEM-X) et très variable du signal radar (e.g., 5). En construisant 1/2 million de MNS à partir des couples d'images stéréoscopiques de la mission TERRA/ASTER (15 m de résolution "seulement"), Hugonnet *et al.* (6) ont pu réaliser la première estimation globale, exhaustive et résolue des changements de masse des glaciers du globe entre 2000 et 2019 (Fig. 1). Cette étude montre que toutes les régions glaciaires déclinent, que les pertes s'accroissent et que les disparités régionales sont liées à la tendance et la variabilité décennale des températures et des précipitations. La fin de vie d'ASTER est imminente (2025, justement déclarée "International Year of Glaciers' Preservation" par les Nations Unies!) et aucune mission spatiale n'est programmée pour continuer une couverture globale et libre d'accès en couples stéréoscopiques.

4D-Earth vise à reprendre le flambeau d'ASTER (après quelques années d'interruption) pour continuer le suivi des changements de volume des glaciers. Mais 4D-Earth fera beaucoup mieux qu'ASTER. Sa plus haute résolution géométrique et temporelle, et sa plus grande dynamique radiométrique (12 bits) conduiront à des MNS plus complets (peu de saturation des images sur les zones homogènes), plus précis (de l'ordre de la taille du pixel soit ~2 m, un gain d'un facteur 7 par rapport à ASTER) qui, associée à sa revisite quasi mensuelle, rendront observables, à l'échelle globale, des tendances pluri-annuelles mieux contraintes et des évolutions saisonnières jusqu'alors limitées à quelques glaciers (7). Les ortho-images de la mission 4D-Earth permettront également une cartographie saisonnière des vitesses de surface des glaciers pour étudier leur dynamique (8) et mieux contraindre leurs épaisseurs (9).

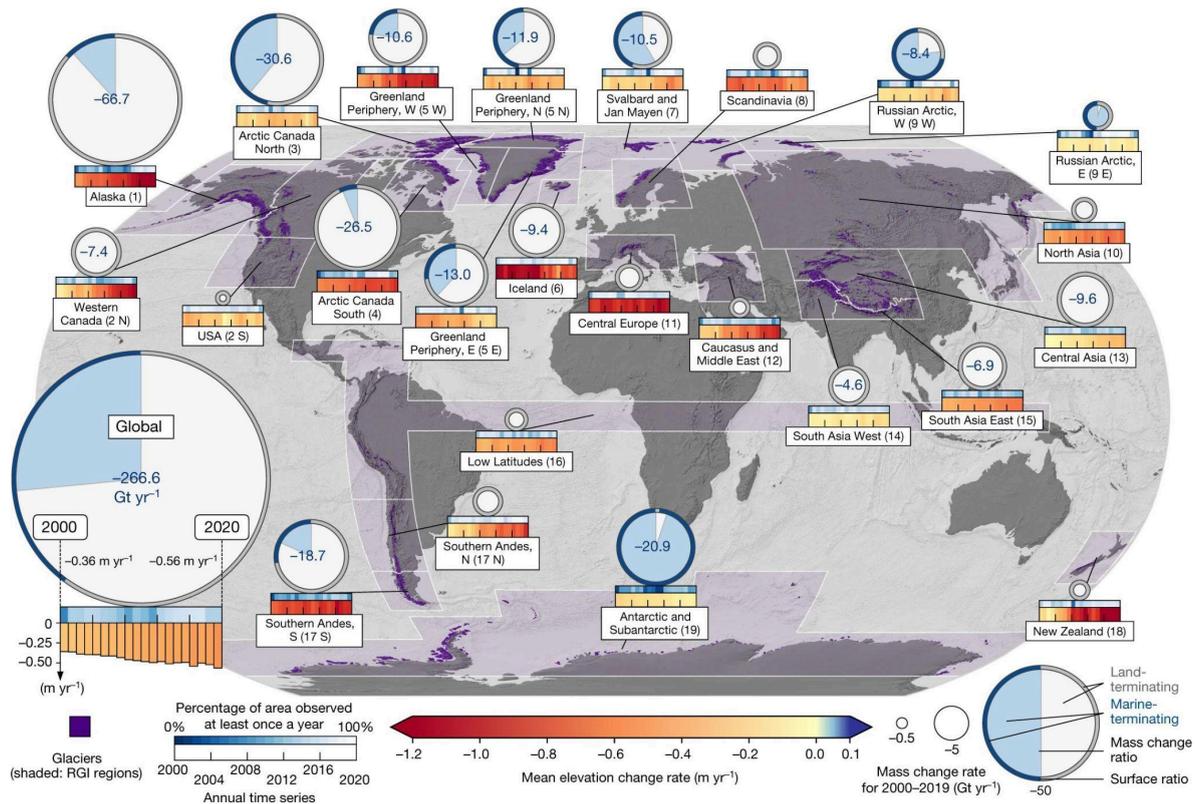


Figure 1: Pertes de masse des grandes régions glaciaires du globe entre 2000 et 2019 déduites de séries temporelles de MNS ASTER. La taille des cercles est proportionnelle à la perte. La frise colorée sous les cercles décrit l'évolution temporelle des taux de changement d'altitude. D'après (6).

Beaucoup d'autres thématiques à fort enjeux scientifiques et sociétaux sont avides de séries temporelles de MNS, nous ne les avons pas détaillées par souci de concision :

- **Calottes polaires** : suivi de la topographie des calottes (notamment dans leurs régions côtières), estimation de la fonte sous-marine, et construction de cartes de vitesse fréquentes pour estimer les flux de glaces à l'océan et détecter d'éventuelles instabilités dynamiques en Antarctique et au Groenland (10–12).
- **Forêt** : Détection des coupes forestières et plantations (13, 14), estimation de leur biomasse grâce à la hauteur de la canopée (15), estimation de variables de structure des peuplements, suivi de croissance/sénescence. Distinction végétation basse/arborée.
- **Aléas telluriques - Volcans, séismes, glissements de terrain** : estimation des transferts de masse associés à ces aléas (16–18). Cartographie répétée des champs de déplacements grâce aux ortho-images (16, 17, 19).
- **Littoral** : réponses morphodynamiques du trait de côte aux variations saisonnières de l'hydrodynamisme et aux événements extrêmes, estimation de l'érosion côtière, des déplacements des dunes, suivi du déplacement des sédiments (20).
- **Urbain** : Consommation d'espace et détection de constructions, hauteur des bâtiments pour suivi des objectifs de densification, distinction végétation basse/haute (21),
- **Hydrologie** : Suivi de la bathymétrie des retenues collinaires agricoles en zones semi-arides, leur construction et leur curage, alors qu'aucune donnée satellite n'existe jusque-là (22). Des MNS hydro-compatibles sont nécessaires pour la modélisation de débits et ou des événements extrêmes (crues).
- **Volcanologie** : modèles numériques d'élévation des nuages volcaniques. Cette observation donne accès à la hauteur d'injection et au débit massique d'une éruption volcanique, deux paramètres clés en volcanologie (23).

- **Neige** : carte de hauteurs de neige en zone de montagne donnée essentielle pour la prévision des stocks d'eau en zone de montagne, la prévision des crues, l'hydro-électricité et la prévision du risque d'avalanche (24, 25).

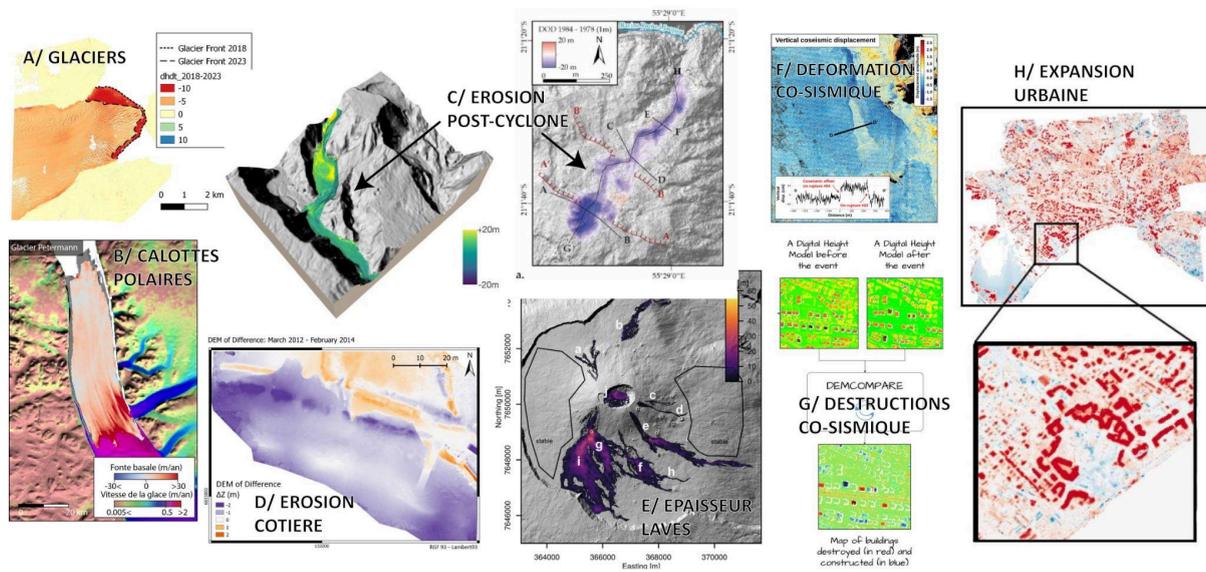


Figure 2: Diversité des thématiques exploitant les DSM multi-temporels pour caractériser la dynamique de notre planète : (A) pertes de masse des glaciers, (B) fonte basale des calottes polaires, (C) érosion/dépôts suite à des événements extrêmes comme les cyclones ou (D) dans les zones littorales, (E) épaisseurs des coulées de lave, (F) mouvements verticaux liés aux séismes, (G) destructions ou (H) expansions urbaines. Refs: (16, 17, 20, 21, 23, 26, 27)

Généralement, les séries temporelles de MNS haute résolution pourront également être utilisées comme source topographique de base, régulièrement mise à jour. 4D-Earth répondrait par exemple aux besoins exprimés dès 2016 par la proposition GOFAT (Global Fault Topography) pour disposer d'une topographie récente en cas d'aléa tellurique. Cette topographie "rafraîchie" est aussi utile pour les traitements InSAR sur de petites cibles fortement dynamiques (volcans, glissements de terrain).

Toutes ces thématiques ont donc un besoin commun, non couvert par les missions programmées par les agences spatiales : des séries de MNS pour caractériser les transferts de masse à la surface de notre planète.

2/ Imagerie à haute résolution spatio-temporelle des surfaces continentales

En parallèle de ces besoins '4D', de nombreuses applications bénéficieraient d'un suivi global et régulier des surfaces continentales avec une imagerie à résolution quasi-métrique, un produit dérivé naturel de la mission 4D. Ces applications sont liées à la détection de changements à haute résolution spatiale. Elles vont d'ailleurs bien au-delà des besoins des communautés scientifiques seules puisque cette mission répondrait aussi aux besoins des administrations nationales et locales pour l'aménagement des territoires. Nous n'en citerons ici que quelques-unes :

- Urbain : Identification, qualification et suivi de l'extension, au regard des objectifs légaux de zéro artificialisation net impliquant de travailler sur les notions d'artificialisation, de densité urbaine, mais aussi de végétation en ville ;
- Aménagement du territoire : mise à jour des cartes topographiques (hors Europe), tracés et suivi des voies de communication et des aléas (ex : végétation le long des voies), accès

secours (ex : incendies de forêt), mesure de l'efficacité des documents d'aménagement et de leur cohérence ;

- Hydrologie : suivi des masses d'eau, de la morphologie des cours d'eau ; extension de l'enneigement en zone de montagne
- Agriculture : support aux déclarations agricoles ou à leur contrôle, cadastre agricole, variabilité intra-parcellaire ;
- Forêts : suivi des forêts, gestion de la végétation naturelle ;
- Environnement et Paysages : suivi des éléments arborés (trames vertes, haies...) du paysage, évolution des écosystèmes (colonisation de parcelles abandonnées, désertification, Parcs Naturels...), contrôle des mécanismes de compensation carbone (REDD+ ...)
- Côtier : suivi du trait de côte et de la bathymétrie de faible profondeur, dynamique des falaises côtières ;
- Risques : évaluation de dommages après catastrophes. 4D-Earth donnerait l'assurance d'avoir une image de référence récente à haute résolution à comparer avec les images acquises après la catastrophe, quelle que soit leur source ;
- Occupation des sols : utilisation de la texture dans l'estimation de l'occupation des sols pour une meilleure précision

TECHNIQUES D'OBSERVATION ET/OU DE MESURE

4000 caractères maximum (espaces compris) : Préciser les concepts ou moyens associés à l'objectif (instrumentation embarquée par exemple), ainsi que leur degré de maturité ou si des besoins de R&T ou d'analyse de mission sont nécessaires. Une instrumentation ou expérimentation sous ballon, à bord d'avions, de drones, de fusées sondes, utilisant les vols paraboliques ou encore les stations spatiales peut être envisagée.

Les travaux de la phase 0 Sentinel-HR ont conclu que la mission 4D-Earth nécessite les caractéristiques suivantes :

- Résolution : 2 m
- 4 bandes : Bleu, Vert, Rouge, Proche-infra-rouge
- Revisite systématique et globale tous les 20 à 30 jours.
- Champ de vue minimal de l'ordre de 15 km
- Stéréoscopie : soit synchrone comme pour CO3D, soit avec un léger décalage temporel utile pour certaines applications.
- Données libres et gratuites
- La précision verticale des MNS serait de l'ordre de la taille du pixel des images, soit 2 m. Cette règle empirique fonctionne sur des terrains de pente modérée mais la précision est très variable selon le contexte et la pente. En moyennant sur des zones larges (e.g. bassin versant, coulée de lave), les erreurs aléatoires sont réduites et la précision meilleure (28).

Nous avons exclu les solutions basées sur des couples stéréos construits via l'agilité des satellites (comme Pléiades) car elle semble incompatible avec un suivi global et continu.

La phase-0 Sentinel-HR a donc étudié deux options :

- Satellites du type Sentinel-2, avec un large champ (70 km), une excellente qualité d'images, et une observation stéréoscopique à faible B/H ;
- Couples de micro-satellites dérivés de [CO3D](#), avec une orbite plus élevée pour élargir le champ de vue, en réduisant la résolution à 2 m, avec un niveau de bruit certes plus élevé, mais compatible avec la mission.

L'étude a exclu la première solution, trop coûteuse, et avec un volume de données tel que la télémétrie en bande-X ne suffit pas. En revanche, une solution basée sur 12 micro-satellites satellites type CO3D permettrait de répondre au besoin.

Bien évidemment, CO3D n'est qu'un exemple permettant de démontrer la faisabilité et de donner un ordre de grandeur du coût de la mission (cf. rapport interne Sentinel-HR intégrant les coûts), mais grâce aux efforts de R&D dans le cadre de la préparation des constellations de satellites imageurs, il doit être encore possible d'optimiser les coûts.

L'ESA a mené une étude de concept sur une mission analogue (dont les rapports ne sont pas publiés). Cette version de la mission n'inclut pas de stéréoscopie, et demande une bande panchromatique à 1 m de résolution. Elle a été menée en parallèle par deux *consortia* pilotés par Airbus et OHB, incluant dans les deux cas des acteurs du *new space*. Nous avons entendu qu'elle conclut aussi à la nécessité de se reposer sur plus d'une dizaine de microsattellites, et identifie une forte difficulté technique et donc un coût élevé d'inclusion d'une bande panchromatique à 1 m. Cette étude renforce notre conclusion de viser une mission globale à 2 m de résolution.

GESTION DES DONNÉES

4000 caractères maximum (espaces compris). Préciser les éventuels besoins d'infrastructure ou d'architecture de données, la centralisation ou le besoin d'hybridation de données, ou toute autre besoin concernant la thématique des données (dissémination par exemple).

Observer les terres émergées à une résolution de 2 m, de manière systématique et globale, avec une revisite de 20 à 30 jours produit une quantité de données conséquente. Le volume des données Sentinel-2 doit être multiplié par 25 pour la résolution, par 2 pour la stéréoscopie, mais divisé par 2 (moins de bandes spectrales) et par 4 (moins de revisites). Au total, le volume d'une telle mission serait donc environ 6 fois supérieur à celui de Sentinel-2.

L'acceptabilité par les services de sécurité et de défense nationaux d'une mission à haute résolution dont les données sont libres d'accès peut limiter la résolution à laquelle peut prétendre le projet 4D-Earth. L'union européenne qualifie de « sensible » toute donnée dont la résolution est meilleure que 2,5 m. Celle visée par 4D-Earth est légèrement inférieure (2 m). Mais cette définition date déjà de 10 ans et pourrait être remise en cause, car de nombreux satellites commerciaux la franchissent déjà. L'UE vient d'ailleurs d'étudier la faisabilité d'une constellation du type Sentinel-HR avec une résolution d'1 mètre en panchromatique, qui pourrait donc devenir acceptable, même si elle est difficile techniquement.

Les données 4D-Earth trouveront naturellement leur place dans les différents pôles de Data-Terra:

- le suivi des surfaces terrestres, de l'agriculture, des forêts, des villes et des glaciers & calottes polaires dans la communauté des utilisateurs de **THEIA**
- le suivi des séismes, volcans, et glissements de terrain pour **Form@ter**
- le suivi des panaches volcaniques et, peut être, la topographie du sommet des nuages dans le pôle **AERIS**
- les données côtières et la bathymétrie, avec continuité terre-mer, à l'interface entre **ODATIS et THEIA**
- les images de référence pluriannuelles seront utiles pour la charte des catastrophes naturelles et les services de sécurité

CALENDRIER ENVISAGEABLE

2000 caractères maximum (espaces compris). Préciser un calendrier possible pour le développement ou la réalisation de l'objectif mentionné.

Assurer la continuité avec ASTER, qui devrait stopper ses acquisitions fin 2025, est bien sûr impossible. Mais si cette lacune observationnelle sera préjudiciable, elle n'est pas rédhibitoire puisqu'il reste toujours possible de comparer des MNS acquis à plusieurs années d'intervalle. Ainsi, 10 ans d'interruption entre les altimètres d'ICESat-1 et ICESat-2 n'empêchent pas de comparer les deux missions pour estimer les changements de volume des calottes polaires (29). Notons que 2025-26 marque aussi la fin de vie de Pléiades 1A et 1B et que l'accès des scientifiques aux données purement commerciales de Pléiades Néo (Airbus) dans des volumes adéquats n'est pas acquis.

Comme montré dans la phase-0 Sentinel-HR, les satellites nécessaires ne sont pas très originaux (hérités de CO3D), même si le champ de vue est plus large et la résolution un peu moins bonne que celle des constellations actuellement envisagées en grand nombre. Les acteurs de ce type de satellites se targuent de pouvoir les réaliser en un temps record (de l'ordre de quelques années). Des satellites proches des CO3D pourraient par exemple être **probablement réalisés en 4 ans**.

CONTEXTE ET COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE IMPLIQUÉE

4000 caractères maximum (espaces compris). L'implication d'une large communauté scientifique doit être privilégiée. Évaluer le dimensionnement de la communauté scientifique impliquée comme par exemple le nombre de laboratoires concernés, le nombre de chercheurs intéressés, ou tout autre indicateur.

4D-Earth vise à servir une très large communauté scientifique (cf liste des participants ci-après). Le besoin en images résolues et répétées d'une part et en données topographiques précises d'autre part est attesté par le succès de missions passées ou existantes comme les Sentinel-2 ou la mission SRTM, ainsi que le nombre de publications sur l'amélioration de la résolution spatiale (super-résolution) des données Sentinel-2 :

- Près de 100 000 utilisateurs ont téléchargé des données Sentinel en 2022, dont $\frac{2}{3}$ pour Sentinel-2 (Source : Copernicus Sentinel Data Access Annual Report 2022, 16 June 2023), et près de 10 000 articles ont Sentinel-2 dans le titre, l'abstract ou les mots clés sur la base de données SCOPUS.
- 135 résultats pour la recherche de "Super-résolution Sentinel2" sur SCOPUS. Bien évidemment, la super-résolution ne remplace pas de vraies images à très haute résolution (THR), mais cela témoigne d'un réel besoin pour une mission de type Sentinel-2 de résolution plus fine. Les méthodes de super-résolution sont aussi applicables aux images THR pour encore améliorer celle-ci.

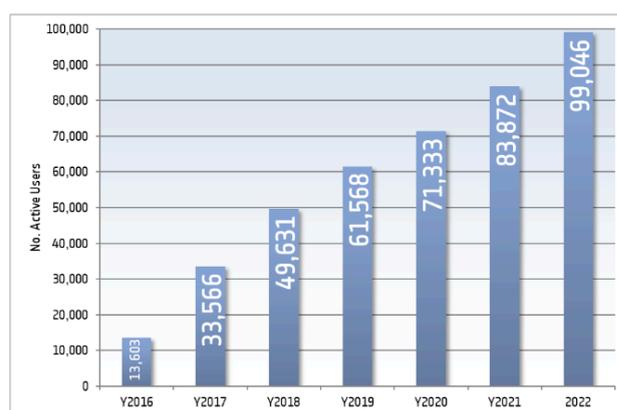


Figure 72: Growth in numbers of active users on the Open Hub between Y2016 and 2022

- Plus de 4500 références sur SCOPUS pour la recherche “SRTM”, et 1450 pour “ASTER DEM”. L'article de référence de la mission SRTM, Farr et al. (30), est lui cité... plus de 7000 fois (Gscholar)

Comme pour les missions Sentinel, 4D-Earth ne s'adresse pas uniquement à la communauté scientifique et serait très utile pour les acteurs locaux de l'aménagement du territoire.

POSITIONNEMENT PAR RAPPORT AU CONTEXTE EUROPÉEN ET INTERNATIONAL

4000 caractères maximum (espaces compris). Préciser le positionnement de l'objectif par rapport aux autres prospectives internationales, ainsi que la complémentarité ou compétition avec d'autres projets visant à atteindre les mêmes objectifs au moyen d'observations au sol ou spatiales. Préciser également les éventuelles possibilités de coopération européenne ou internationale.

Positionnement sur le volet topographie

La seule mission fournissant actuellement des couples d'images stéréoscopiques (et donc des MNS) libres d'accès à l'échelle globale est **Terra/ASTER**. Cette mission vieillissante (lancée fin 1999) va s'achever fin 2025, interrompant la continuité des observations. Malgré sa technologie dépassée (15 m de résolution, radiométrie sur 8 bits), les données de cette mission continuent d'être exploitées grâce à la profondeur temporelle de l'archive et aussi faute d'alternative aux échelles régionales et globales. Les efforts de la communauté internationale pour obtenir une continuité, par exemple *via* une “option” stéréo sur les futurs Landsat-10 ou Sentinel-2 NG, sont restés vains.

Entre 2002 et 2015, **SPOT5-HRS** a acquis des couples stéréoscopiques sur de grandes zones avec une fauchée de 120 km et des segments atteignant 600 km de long (résolution 5 m par 10 m). Cette riche base de données commence à être exploitée par la communauté scientifique puisqu'elle n'est ouverte que depuis 2021 (Spot World Heritage). **SPOT6** et **SPOT7** sont attractifs en termes de résolution (1.5 m) et de capacités stéréoscopiques mais l'accès à ces données commerciales restent du cas par cas (*via* DINAMIS). La fin de vie de SPOT7 en avril 2023 réduit aussi considérablement les capacités d'acquisition.

La dernière génération de capteurs optiques à résolution sub-métrique (**WorldView, Pléiades**, etc...) permet de construire depuis une dizaine d'années des MNS de grande qualité, mais ils sont principalement disponibles pour les régions polaires (Arctique (31) et Antarctique (32) via le Polar Geospatial Center) ou limités à des cibles spécifiques et localisées (3). En outre, ces capteurs répondent surtout à des demandes urgentes, militaires et commerciales, mais n'ont pas vocation ni la capacité à constituer des archives mondiales, libres et ouvertes. Le mode d'acquisition à la demande donne donc lieu à des archives discontinues dans le temps et dans l'espace.

La mission **Co3D** (CNES, lancement prévu en 2024) sera une avancée majeure en générant un MNS global à haute résolution (images à 0.5 m de résolution et MNS à 1 m). En revanche, cette mission ne couvrira pas le besoin de revisite de la topographie globale à haute résolution spatio-temporelle. Le temps de revisite raccourci de 4D-Earth permettra d'augmenter le nombre d'acquisitions exploitables pour les cibles sujettes à une couverture nuageuse, en particulier les zones tropicales. En moyenne pour chaque site, la revisite (20-30 jours) de 4D-Earth devrait permettre d'obtenir **4 images sans nuage par an**. En outre, pour Co3D, seuls les MNS dégradés à 15 ou 30 m de résolution seront libres d'accès. De plus, les hautes latitudes (>70°N et >60°S), qui hébergent (notamment) la majorité des glaciers et les deux calottes polaires, ne seront pas couvertes.

Nos motivations scientifiques sont proches de celles qui ont conduit à la sélection de la mission **Harmony** par l'ESA comme 10e mission Earth Explorer en septembre 2022 (lancement prévu en 2029). D'une durée de 5 années, cette mission permettra de générer des MNS des zones du globe où des évolutions topographiques notables sont attendues (glaciers, calottes polaires, pergélisols,

volcans, etc...) au cours de la **première et la cinquième année seulement**. Harmony ne propose donc pas le suivi continu que vise 4D-Earth. De plus, les altitudes déduites de l'interférométrie radar en bande C sont entachées de biais systématiques (et variables au fil des saisons et des années) liés à la pénétration du signal radar dans la neige, la glace ou la canopée. L'imagerie radar associée est aussi d'interprétation plus complexe et vise une communauté d'utilisateurs moins nombreuse que les ortho-images visibles que proposerait la mission 4D-Earth.

Notons que le besoin pour une mission 3D répétée est également mis en avant dans l'avant-programme Surface Topography and Vegetation (STV) de la NASA.

Positionnement par rapport à Sentinel-2 et les missions à haute résolution commerciales

La mission Sentinel-2 (observations systématiques des terres tous les 5 jours à 10 m de résolution) a pris la succession des missions SPOT. Si les caractéristiques des images de Sentinel-2 (résolution, bruit) sont proches de celles des premiers SPOT, les observations systématiques fréquentes et libres d'accès, avec des données de bonne qualité révolutionnent l'observation de la Terre dans l'optique et dans cette gamme de résolution. Plus de 50'000 utilisateurs ont téléchargé des données Sentinel-2 en 2022, alors qu'on ne dépassait pas quelques centaines par an avec SPOT.

Un besoin similaire apparaît pour les données de résolution métrique (1 à 2 m), avec une capacité d'acquisition systématique permettant une observation sans nuage de toutes les terres 4 fois par an, en moyenne. La demande est d'avoir des données de bonne qualité, peu bruitées, comparables d'une acquisition à l'autre, donc bien étalonnées, avec une bonne correction atmosphérique et des angles d'observation constants.

Un tel besoin n'est pas rempli par les constellations à haute résolution actuelles :

- Les nano-satellites actuels n'atteignent que difficilement une résolution de quelques mètres et ne le font qu'aux prix de l'utilisation de bandes spectrales très larges, qui souvent se chevauchent, et d'une qualité des données très basse.
- Les satellites à très haute résolution actuels, comme Pléiades ou Pléiades Neo ont mis l'accent sur la résolution, et pas sur la capacité d'acquisition. Ils ne peuvent pas, par exemple, observer la France en entier chaque année¹. Ces satellites ne font pas d'acquisitions systématiques, leur plan d'acquisition dépend de la demande de programmation par les utilisateurs, qui ne sont pas sûrs de trouver dans le catalogue la donnée correspondant à leurs besoins. Les acquisitions sont faites avec des angles d'observation très variables.

¹ <https://labo.obs-mip.fr/multitemp/can-commercial-satellites-do-the-job-of-sentinel-hr/>

CONTRIBUTEURS (les trois PI puis par ordre alphabétique)

NOM Prénom	Affiliation	Email	Research themes
BERTHIER Etienne*	LEGOS, Toulouse	etienne.berthier@univ-tlse3.fr	Glaciology, hazards
HAGOLLE Olivier*	CESBIO, Toulouse	olivier.hagolle@cnes.fr	Optical measurements physics applied to vegetation monitoring
MICHEL Julien*	CESBIO, Toulouse	julien.michel@cnes.fr	Data fusion
ALMAR Rafael	LEGOS, Toulouse	rafael.alar@ird.fr	Coastal zone, beach dune erosion
CORPETTI Thomas	LETG, Rennes	thomas.corpetti@cnr.fr	Urban vegetation, pollution and climate, artificial intelligence
de MICHELE Marcello	BRGM, Orléans	m.demichelle@brgm.fr	Earthquakes, volcanoes
DEHECQ Amaury	IGE, Grenoble	amaury.dehecq@univ-grenoble-alpes.fr	Glaciology
DELORME Arthur	IPGP, Paris	delorme@ipgp.fr	Earthquakes, active tectonics
DUMONT Marie	CNRM, CEN, Grenoble	marie.dumont@meteo.fr	Snow science
GRANDIN Raphaël	IPGP, UPC, Paris	grandin@ipgp.fr	Volcanology
JAUD Marion	IUEM, Brest	marion.jaud@univ-brest.fr	HR remote sensing for monitoring coastal morphodynamics
KLINGER Yann	IPGP, Paris	klinger@ipgp.fr	Earthquakes, active tectonics
LACROIX Pascal	ISTerre, Grenoble	pascal.lacroix@univ-grenoble-alpes.fr	landslides
LAGUE Dimitri	Géosciences Rennes	dimitri.lague@univ-rennes.fr	Flood and earthquakes, processing software
LE CORRE Sébastien	LISST /CIEU UT2J Toulouse	sebastien.le-corre@univ-tlse2.fr	Urban planning
LETORTU Pauline	LETG, Brest	pauline.letortu@univ-brest.fr	Coastal cliff erosion, coastal dynamics
LUCAS Antoine	IPGP, Paris	lucas@ipgp.fr	Landslides/avalanches, rivers, dunes
MALET Jean-Philippe	EOST, Strasbourg (lab) SNO ISDEform (national service), OMIV (national service)	jeanphilippe.malet@unistra.fr	landslides, 2D/3D displacement, on-line ForM@Ter satellite processing services

MILLAN Romain	IGE, Grenoble	romain.millan@univ-grenoble-alpes.fr	Glaciology, ice sheets
NABUCET Jean	LETG, Rennes	jean.nabucet@univ-rennes2.fr	Urban vegetation, urban dynamics
PROVOST Floriane	EOST, Strasbourg (lab)	f.provost@unistra.fr	landslides, 2D/3D displacement, on-line ForM@Ter satellite processing services
PUISSANT Anne	LIVE, Strasbourg	anne.puissant@live-cnrs.unistra.fr	Urban monitoring, urban vegetation
RABATEL Antoine	IGE, Grenoble	antoine.rabatel@univ-grenoble-alpes.fr	Glaciology
REGARD Vincent	GET, Toulouse	vincent.regard@get.omp.eu	Rocky coast erosion (incl cliff collapse), coastal zone dynamics. Continental erosion. Earth science teaching
RUPNIK Ewelina	LaSTIG, UGE, IGN-ENSG	ewelina.rupnik@ign.fr	Photogrammetry, 3D forest canopy, 2D displacements
SHEEREN David	DYNAFOR, Toulouse	david.sheeren@ensat.fr	Vegetation, biodiversity, landscape dynamics
YESOU Hervé	ICube-SERTIT, Université de Strasbourg	herve.yesou@unistra.fr	Natural resources and territories monitoring, rapid mapping (emergency)

BIBLIOGRAPHIE

1. J. Michel, O. Hagolle, J.-M. Delvit, M. Thierry, L. Laurent, D. Laubier, J. P. Malet, L. Jérôme, J. Michaud, V.-S. Juan, C. Iliopoulos, S. Le Corre, P. Dusseux, A. Kääh, H. Yesou, J. Mouginot, S. Battiston, S. Clandillon, E. Bergsma, E. Berthier, A. Lucas, J.-F. Dejoux, G. Dedieu, A. Puissant, S. Ferrant, D. Sheeren, A. Lefevre, J.-P. Cantou, J.-F. Crétaux, R. Almar, C. Lelong, P. Maurel, J.-F. Faure, J. Nabucet, T. Corpetti, P.-A. Herrault, "Sentinel-HR Phase 0 Report" (CNES - Centre national d'études spatiales, CESBIO, 2022), (available at <https://hal.science/hal-03643411>).
2. C. Deschamps-Berger, S. Gascoin, E. Berthier, P. Lacroix, L. Polidori, La Terre en 4D : apport des séries temporelles de modèles numériques d'élévation par photogrammétrie spatiale pour l'étude de la surface terrestre. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*. **1**, 23–35 (2020).
3. E. Berthier, D. Floriciou, A. S. Gardner, N. Gourmelen, L. Jakob, F. Paul, D. Treichler, B. Wouters, J. M. C. Belart, A. Dehecq, I. Dussaillant, R. Hugonnet, A. Kääh, L. Krieger, F. Pálsson, M. Zemp, Measuring glacier mass changes from space—a review. *Rep. Prog. Phys.* **86**, 036801 (2023).
4. C. Sommer, T. Seehaus, A. Glazovsky, M. H. Braun, Brief communication: Increased glacier mass loss in the Russian High Arctic (2010–2017). *The Cryosphere*. **16**, 35–42 (2022).
5. A. Dehecq, R. Millan, E. Berthier, N. Gourmelen, E. Trouve, Elevation changes inferred from TanDEM-X data over the Mont-Blanc area: Impact of the X-band interferometric bias. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth. Obs. Remote Sens.* **9**, 3870–3882 (2016).
6. R. Hugonnet, R. McNabb, E. Berthier, B. Menounos, C. Nuth, L. Girod, D. Farinotti, M. Huss, I. Dussaillant, F.

- Brun, A. Kääb, Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*. **592**, 726–731 (2021).
7. L. Beraud, D. Cusicanqui, A. Rabatel, F. Brun, C. Vincent, D. Six, Glacier-wide seasonal and annual geodetic mass balances from Pléiades stereo images: application to the Glacier d'Argentière, French Alps. *Journal of Glaciology*. **69**, 525–537 (2023).
 8. A. Dehecq, N. Gourmelen, A. S. Gardner, F. Brun, D. Goldberg, P. W. Nienow, E. Berthier, C. Vincent, P. Wagnon, E. Trouvé, Twenty-first century glacier slowdown driven by mass loss in High Mountain Asia. *Nat. Geosci.* **12**, 22–27 (2019).
 9. R. Millan, J. Mouginot, A. Rabatel, M. Morlighem, Ice velocity and thickness of the world's glaciers. *Nature Geoscience*. **15**, 124–129 (2022).
 10. J. Mouginot, E. Rignot, A. A. Bjørk, M. van den Broeke, R. Millan, M. Morlighem, B. Noël, B. Scheuchl, M. Wood, Forty-six years of Greenland Ice Sheet mass balance from 1972 to 2018. *Proc Natl Acad Sci USA*. **116**, 9239 (2019).
 11. D. E. Shean, I. R. Joughin, P. Dutrioux, B. E. Smith, E. Berthier, Ice shelf basal melt rates from a high-resolution digital elevation model (DEM) record for Pine Island Glacier, Antarctica. *The Cryosphere*. **13**, 2633–2656 (2019).
 12. J. Mouginot, E. Rignot, B. Scheuchl, R. Millan, Comprehensive Annual Ice Sheet Velocity Mapping Using Landsat-8, Sentinel-1, and RADARSAT-2 Data. *Remote Sensing*. **9**, 364 (2017).
 13. L. Piermattei, M. Marty, W. Karel, C. Ressler, M. Hollaus, C. Ginzler, N. Pfeifer, Impact of the Acquisition Geometry of Very High-Resolution Pléiades Imagery on the Accuracy of Canopy Height Models over Forested Alpine Regions. *Remote Sensing*. **10** (2018), doi:10.3390/rs10101542.
 14. C. Stepper, C. Straub, H. Pretzsch, Assessing height changes in a highly structured forest using regularly acquired aerial image data. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. **88**, 304–316 (2015).
 15. B. Price, L. T. Waser, Z. Wang, M. Marty, C. Ginzler, F. Zellweger, Predicting biomass dynamics at the national extent from digital aerial photogrammetry. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. **90**, 102116 (2020).
 16. A. Stumpf, J.-P. Malet, P. Allemand, P. Ulrich, Surface reconstruction and landslide displacement measurements with Pléiades satellite images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. **95**, 1–12 (2014).
 17. A. Delorme, R. Grandin, Y. Klinger, M. Pierrot-Deseilligny, N. Feuillet, E. Jacques, E. Rupnik, Y. Morishita, *Tectonics*, in press, doi:10.1029/2019TC005596.
 18. P. Lacroix, Landslides triggered by the Gorkha earthquake in the Langtang valley, volumes and initiation processes. *Earth Planets Space*. **68**, 1–10 (2016).
 19. P. Lacroix, A. Dehecq, E. Taipe, Irrigation-triggered landslides in a Peruvian desert caused by modern intensive farming. *Nature Geoscience* (2019), doi:10.1038/s41561-019-0500-x.
 20. M. Jaud, C. Delacourt, N. Le Dantec, P. Allemand, J. Ammann, P. Grandjean, H. Nouaille, C. Prunier, V. Cuq, E. Augereau, L. Cocquempot, F. Floc'h, Diachronic UAV Photogrammetry of a Sandy Beach in Brittany (France) for a Long-Term Coastal Observatory. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. **8**, 267 (2019).
 21. L. Zhang, E. Rupnik, M. Pierrot-Deseilligny, Feature matching for multi-epoch historical aerial images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. **182**, 176–189 (2021).
 22. C. Pascal, S. Ferrant, A. Selles, J.-C. Maréchal, S. Gascoin, O. Merlin, "High-Resolution Mapping of Rainwater Harvesting System Capacity from Satellite Derived Products in South India" in *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS* (2021), pp. 7011–7014.
 23. M. de Michele, D. Raucoles, P. Arason, Volcanic Plume Elevation Model and its velocity derived from Landsat 8. *Remote Sensing of Environment*. **176**, 219–224 (2016).
 24. C. Deschamps-Berger, S. Gascoin, E. Berthier, J. Deems, E. Gutmann, A. Dehecq, D. Shean, M. Dumont, Snow depth mapping from stereo satellite imagery in mountainous terrain: evaluation using airborne laser-scanning data. *The Cryosphere*. **14**, 2925–2940 (2020).
 25. C. Deschamps-Berger, B. Cluzet, M. Dumont, M. Lafaysse, E. Berthier, P. Fanise, S. Gascoin, *Water Resources Research*, in press, doi:10.1029/2021WR030271.
 26. C. Rault, Y. Thiery, M. Chaput, P. A. Reninger, T. J. B. Dewez, L. Michon, K. Samyn, B. Aunay, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, in press, doi:10.1029/2021JF006257.
 27. A. Lucas, E. Gayer, Decennial Geomorphic Transport From Archived Time Series Digital Elevation Models: A cookbook for tropical and alpine environments. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. **10**, 120–134 (2022).
 28. R. Hugonnet, F. Brun, E. Berthier, A. Dehecq, E. S. Mannerfelt, N. Eckert, D. Farinotti, Uncertainty analysis

- of digital elevation models by spatial inference from stable terrain. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. **15**, 6456–6472 (2022).
29. B. Smith, H. A. Fricker, A. S. Gardner, B. Medley, J. Nilsson, F. S. Paolo, N. Holschuh, S. Adusumilli, K. Brunt, B. Csatho, K. Harbeck, T. Markus, T. Neumann, M. R. Siegfried, H. J. Zwally, Pervasive ice sheet mass loss reflects competing ocean and atmosphere processes. *Science*. **368**, 1239 (2020).
 30. T. G. Farr, P. A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank, D. Alsdorf, The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.* **45**, RG2004 (2007).
 31. C. Porter, P. Morin, I. Howat, M.-J. Noh, B. Bates, K. Peterman, S. Keesey, M. Schlenk, J. Gardiner, K. Tomko, M. Willis, C. Kelleher, M. Cloutier, E. Husby, S. Foga, H. Nakamura, M. Platson, M. Wethington Jr., C. Williamson, G. Bauer, J. Enos, G. Arnold, W. Kramer, P. Becker, A. Doshi, C. D'Souza, P. Cummins, F. Laurier, M. Bojesen, ArcticDEM (2018), , doi:10.7910/DVN/OHHUKH.
 32. I. M. Howat, C. Porter, B. E. Smith, M.-J. Noh, P. Morin, The Reference Elevation Model of Antarctica. *The Cryosphere*. **13**, 665–674 (2019).