

CONTRIBUTION DE SPOT WORLD HERITAGE AUX SÉRIES TEMPORELLES D'OBSERVATIONS SATELLITAIRES OPTIQUES ET DÉCAMÉTRIQUES DES MONTAGNES FRANÇAISES

Zacharie Barrou Dumont¹, Simon Gascoin¹, Jordi Inglada¹
¹CESBIO, université de Toulouse, CNES/CNRS/IRD/INRAE/UPS

Résumé

Cet article présente la quantification de l'apport en termes de revisite, de la collection d'images historiques SPOT du pôle Theia, issues du programme SPOT WORLD HERITAGE. Cette quantification est faite par rapport aux archives d'images dans le visible et de résolutions spatiales décamétriques Landsat et ASTER sur les montagnes françaises pour la période 1986-2015. Durant cette période, les satellites SPOT 1 à 5 ont largement contribué au nombre d'acquisitions d'images, la collection Theia participant jusqu'à 36.6 % des dates d'acquisitions entre 1996 et 2005. La mise à la disposition du public de cette collection d'images exploitables offre une nouvelle fenêtre sur les dernières décennies pour des applications variées en écologie, hydrologie et aménagement du territoire.

Mots-clés: Spot World Heritage, Landsat, ASTER, Pyrénées, Alpes, fréquences temporelles

Abstract

This paper presents the quantification of the revisit contribution, of the Theia center's collection of historical SPOT images from the SPOT WORLD HERITAGE program in relation to Landsat's and ASTER's archives of optical images with decametric spatial resolutions over the French mountains between 1986 and 2015. During this period, the SPOT 1 to 5 satellites largely contributed to the number of acquisitions, with the Theia collection contributing up to 36.6% of the acquisition dates between 1996 and 2005. Making this collection of exploitable images available to the public offers a new window on the last decades for various applications in ecology, hydrology and land planning.

Keywords: Spot World Heritage, Landsat, ASTER, Pyrenees, Alps, temporal frequencies

1. Introduction

L'observation de la Terre par satellite est fondamentale, notamment pour mesurer l'évolution des écosystèmes sous la pression anthropique. Le programme américain Landsat, lancé en 1972, est emblématique à cet égard, chacun des satellites de Landsat 1 à Landsat 9 capturant des images de surfaces continentales avec des revisites de 8 ou 16 jours. Au début du programme, les données devaient être transmises à des stations de réception réparties à travers le monde. Avec les stations externes situées aux États-Unis, gérées par des coopérateurs internationaux (CI), 4 millions d'images se retrouvèrent stockées chez des CI en 2006, contre 1.9 millions dans les archives de l'Institut d'études géologiques des États-Unis (USGS) [Goward *et al.*, 2006]. Cet éparpillement poussa l'USGS à lancer en 2010 la consolidation de l'archive globale Landsat (LGAC), qui regroupa les données en une archive centralisée, permettant d'augmenter significativement les profondeurs temporelles du Canada, de l'Australie, de la Chine, de l'Europe et de l'Afrique du Sud [Wulder *et al.*, 2016]. D'abord payantes, ces données de 15 à 120 mètres de résolutions, ortho-rectifiées et prêtes à être analysées, devinrent gratuites et ouvertes au public en 2008 [Woodcock *et al.*, 2008].

Cette ouverture, couplée avec le développement du *cloud computing*, mena à une forte augmentation de l'usage des images Landsat dans des études nécessitant des séries temporelles [Zhu *et al.*, 2019], notamment la cartographie à l'échelle mondiale des habitations humaines [Pesaresi *et al.*, 2016], du changement annuel des forêts entre 2000 et 2012 [Hansen *et al.*, 2013] et des lacs entre 1984 et 2015 [Pekel *et al.*, 2016], le suivi de zones humides en Chine sur quatre décennies [Yang *et al.*, 2020], ainsi que d'autres applications en éducation, aide humanitaire, agriculture, législation, assurances, sécurité du territoire, urbanisation, etc. [Miller *et al.*, 2013]. La convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques est en partie basée sur les données Landsat pour définir la convention de réduction des émissions produites par la déforestation et la dégradation des forêts (REDD+) [De Sy *et al.*, 2012].

Toutefois, la fréquence de huit jours minimum entre chaque image utile (en combinant deux satellites Landsat) n'est pas assurée en raison des difficultés techniques, de contraintes de mission et de la présence de nuages dans la zone d'étude. Une analyse réalisée avant la LGAC de la disponibilité des images ETM+ de Landsat 7 archivées aux États-Unis entre 2000 et 2002, montre qu'une même scène était acquise en moyenne huit fois par an, ce qui représente un tiers du nombre maximal possible d'acquisitions [Ju and Roy, 2008]. Une étude plus récente sur la

variabilité temporelle du nombre de pixels Landsat 1-8 utilisables a montré qu'après le filtrage les pixels par la présence de nuage, ombre de nuage, neige et glace, la majeure partie du monde incluant la France voyait une réduction d'au moins 30 % la quantité de données disponibles [Zhang *et al.*, 2022]. Le programme Landsat seul peut donc être insuffisant pour des applications nécessitant des fréquences de revisite encore plus élevées ou étant facilement affectées par la présence de nuages. Cela est par exemple le cas pour l'obtention de dates précises de stades phénologiques et de fenêtres temporelles critiques à la gestion des récoltes [Deines *et al.*, 2019] ou pour le suivi du manteau neigeux [Gascoin *et al.*, 2019].

L'USGS donne aussi un accès gratuit aux données de l'instrument *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) du satellite Terra, qui capture depuis 2000 des images avec des résolutions de 15 à 90 mètres. L'instrument ASTER ne permet cependant pas d'acquisitions systématiques et ne collecte en moyenne que 8 minutes de données par orbite héliosynchrone de 99 minutes, soit 650 scènes par jour [Abrams, 2002].

Avec le programme Satellites pour l'observation de la Terre (SPOT) [<https://spot.cnes.fr>], le Centre national d'études spatiales français (CNES) a lancé entre 1986 et 2002 cinq satellites d'observation de la Terre. Le programme fut ensuite repris par Airbus *Defense and Space* (DS) avec les SPOT 6 et 7. D'abord commercialisées par Airbus DS Geo (anciennement Spot Image), les images des SPOT 1 à 5 de 1986 à 2015, avec des résolutions de 5 à 20 mètres, sont en libre accès depuis 2015 *via* le programme SPOT World Heritage (SWH) [Nosavan *et al.*, 2017]. Un travail d'archivage et de regroupement fut mené sur les 25 millions de produits SPOT regroupés dans le catalogue REGARDS du CNES d'images de niveau 1A, c'est-à-dire non ortho-rectifiées (<https://regards.cnes.fr/>). En outre, ce programme permet le passage de 100.000 images SPOT au niveau de traitement 1C, c'est-à-dire après ajustement radiométrique et ortho-rectification. Le pôle de données et de services surfaces continentales Theia (<https://www.theia-land.fr/>) abrite ces données ainsi que d'autres images élevées au niveau 1C par la suite par le CNES ou lors de commandes de contributeurs internationaux. Au 1er novembre 2022, on dénombrait ainsi 112.687 images 1C disponibles, principalement au-dessus du territoire français et de l'Afrique.

Tout comme Landsat, SPOT répondait à un besoin de séries temporelles à résolution décimétrique pour des applications variées [Yang *et al.*, 2017], [Davranche *et al.*, 2010], [El Hajj *et al.*, 2009], [Polychronaki and Gitas, 2012]. SWH ouvre donc des perspectives nouvelles vis-à-vis de sujets

pour lesquels les fréquences temporelles de revisite de Landsat restent insuffisantes. Par exemple, [Latifi *et al.*, 2014] ont utilisé cinq images de Landsat 5 et 7 et six images de SPOT 2 et 4 pour l'extraction sur onze ans d'infestations de scolytes. Malgré son potentiel, l'archive SWH est encore méconnue et peu exploitée dans le domaine académique. Cela est probablement dû au fait qu'à la différence de Landsat, il est difficile d'estimer quelle est la revisite moyenne des images SPOT, puisque les acquisitions ont été réalisées à la demande, et non pas en mode systématique.

Dans le cadre du projet TOP « *Trajectories of agro-Pastoral systems in mountains: land management adaptations to climate, ecological and socio-economic changes* » (<https://anr.fr/Projet-ANR-20-CE32-0002>) financé par l'Agence nationale de la recherche, nous avons évalué l'apport en termes de revisite, de l'archive SPOT sur les massifs montagneux français. Les montagnes sont des territoires qui évoluent rapidement, à la fois sous l'effet des changements globaux et des pratiques locales. Ainsi, la déprise agricole entamée en France au début du XXe siècle a-t-elle causé une augmentation moyenne de l'étendue des forêts et une concentration des zones de pâturage. De fortes disparités régionales persistent néanmoins [Vicente-Serrano *et al.*, 2004]. Par ailleurs, le réchauffement climatique a entraîné une réduction des glaciers en altitude [Vidaller *et al.*, 2021], mais les tendances sur l'enneigement sont plus difficiles à détecter [López-Moreno, 2020]. Il est donc nécessaire de mobiliser au maximum les observations disponibles pour documenter l'évolution de la pression exercée sur les écosystèmes de montagne et comprendre leur évolution.

L'objectif de ce travail est donc de quantifier l'apport en termes de revisite des images historiques SPOT 1-5 sur les régions montagneuses françaises de 1986 à 2015. Ce travail se limite à la collection Theia, c'est-à-dire aux produits disponibles au niveau 1C (ortho-rectifiés) qui sont adaptés aux analyses impliquant le traitement massif de séries temporelles, contrairement aux produits au niveau 1A. Nous ne prenons pas en compte l'effet des nuages qui réduisent la revisite effective. Ce type d'évaluation a notamment été réalisé par Li et Roy (2017), afin d'évaluer le gain de revisite introduit par la mission Sentinel-2 depuis 2015. Dans le cas de SPOT, cette étude préalable devrait permettre de mieux faire connaître la plus-value de l'archive SWH auprès de la communauté scientifique française.

2. Données satellitaires

2.1. Landsat et ASTER

La collection 2 de l'USGS contient des données Landsat à trois niveaux de traitement [USGS, 2021]. Les produits de niveau 1 (L1) sont orthorectifiés et disponibles pour les Landsat 1 à 9 en comptes numériques pouvant être convertis en réflectance ou luminance au sommet de l'atmosphère. Les produits de niveau 2 (L2) sont disponibles pour les Landsat 4 à 9 en réflectances et températures de surface, et sont produits à partir des niveaux 1 ayant un angle zénithal solaire de moins de 76 degrés. Les produits de niveau 3 sont des données biophysiques prêtes pour analyse (par exemple : fraction d'enneigement). Les produits L1 de bonne qualité et propices aux séries temporelles sont classés Tier 1. Les autres, classés Tier 2, répondent au même standard radiométrique, mais n'atteignent pas les mêmes spécifications géométriques. Les produits ayant une bande en moyen infrarouge MIR (aussi appelé SWIR pour Short Wave InfraRed) n'apparaissent qu'à partir du lancement de Landsat le 4 en juillet 1982. Chaque produit couvre une surface de taille approximative de 173x183 km². Nous avons utilisé tous les produits L1 Tier 1 et Tier 2 de 1986 à 2015 (Landsat 4-8).

La collection ASTER contient les produits de niveau 1T ortho-rectifiés en luminance au niveau de l'instrument avec 14 bandes dans le visible et l'infrarouge (incluant le MIR et le thermique) [USGS, 2020]. En raison d'un dysfonctionnement, les bandes MIR ne sont plus disponibles depuis le 1er avril 2008. Chaque produit couvre une scène de 60x60 km².

L'USGS permet, *via* l'interface graphique EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), de télécharger dans un fichier de métadonnées les coordonnées des sommets des scènes présentes dans une zone et une période d'intérêt. Pour notre étude, nous avons extrait en octobre 2021 les coordonnées des sommets de toutes les scènes prises le jour par les Landsat 4 à 8 de niveau L1 Tier 1 et Tier 2, et par ASTER de niveau 1T et couvrant, complètement ou partiellement, les Pyrénées, les Alpes et le Massif Central, dans le territoire français, entre 1986 et 2015. Une couche vectorielle a été produite à partir des sommets pour chaque scène, et enregistrée dans un fichier *shapefile*.

2.2. SPOT World Heritage

La plateforme de distribution SWH du pôle Theia (<https://www.theia-land.fr/en/product/spot-world-heritage/>) contient des produits au niveau 1C. Directement téléchargeable depuis le site, chaque produit contient une image multispectrale ortho-rectifiée couvrant une scène de 60x60km² et en réflectances au sommet de l'atmosphère avec trois bandes verte, rouge et proche infrarouge de 10 mètres (SPOT-5) à 20 mètres de

résolution (SPOT 1-4) et une bande de 20 mètres de résolution dans le MIR (SPOT 4-5). Chaque produit vient aussi avec un fichier de métadonnées et des masques de saturations, de *nodata*, de données géophysiques (eau, nuages, neige) et de pixels utiles [THEIA, 2017]. Une vérification des produits au cours de cette étude a montré que la validité des masques n'est pas assurée. Ceux-ci ne sont donc pas pris en compte. Pour l'analyse, les produits SPOT 1 à 5 intersectant les Pyrénées, les Alpes ou le Massif Central dans le territoire français pendant la période de 1986 à 2015, ont été extraits de la plateforme Theia en octobre 2022. Pour chaque produit, nous avons extrait les sommets de la scène présente dans l'image (en excluant les *nodata*) et produit une couche vectorielle enregistrée dans un fichier *shapefile*.

3. Méthode

3.1. Cartographie des acquisitions

La figure 1 représente un quadrillage de 5x5 km² produit avec QGIS *via* l'intersection de la couche vectorielle « *world countries* » [ESRI, 2021] et de la couche vectorielle « *European mountain area* » [EEA,2008]. La taille minimale des carrés tronqués aux bordures des couches vectorielles est de 24 km². Pour chaque groupe, les couches vectorielles des acquisitions ont été appliquées au quadrillage, produisant un quadrillage où chaque carré représente la quantité d'acquisitions qui chevauchent au moins 50 % de la surface.

Bien qu'il soit possible d'extraire la géométrie des scènes Landsat dans Earth Explorer, la plateforme ne permet pour ASTER que l'extraction des sommets du raster contenant à la fois la surface utile et des *nodata* (figure 2). Cela conduit à la surestimation du nombre d'acquisitions ASTER dans les carrés de 5x5 km². La figure 2 montre aussi comment des scènes Landsat peuvent se chevaucher le long d'un tracé d'orbite (hachures rouges) et entre des tracés d'orbites adjacentes (hachures vertes). Alors qu'un chevauchement vert se fait entre différentes dates et augmente la fréquence de revisite, le chevauchement rouge de deux scènes consécutives le long d'une même trace d'orbite correspond à un doublon. Pour éviter de surestimer le nombre d'acquisitions d'images Landsat dans les zones rouges, nous avons fusionné les géométries de scènes prises le même jour par le même instrument. La même chose a été réalisée avec les données ASTER et SPOT. Cette méthode permet de ne pas compter les doublons dans le quadrillage. Nous comptons toutefois les acquisitions prises à la même date par des instruments différents, comme HRG de SPOT 5 et OLI de Landsat 8.

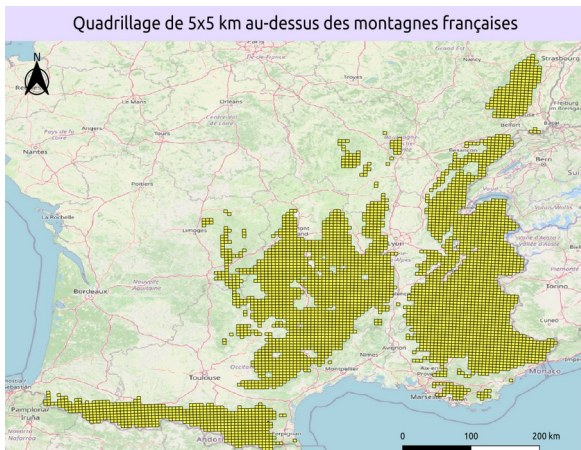


Figure 1: Quadrillage 5x5 km² des montagnes françaises

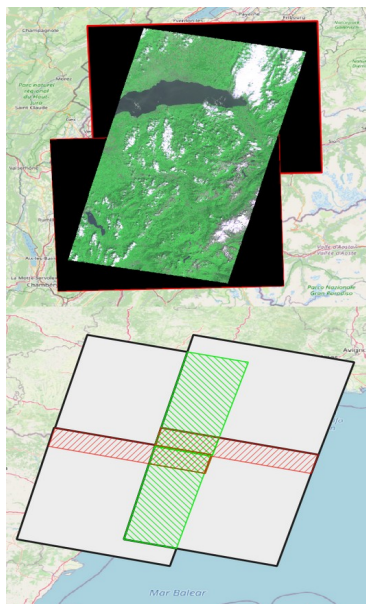


Figure 2: Haut: rasters de 2 scènes ASTER consécutives; Bas: Chevauchements le long d'un tracé (rouge) et entre deux tracés adjacents (vert) de scènes Landsat.

3.2. Cartographie de la contribution de SWH

On quantifie la contribution des données SWH du catalogue Theia aux séries temporelles d'observation satellitaires optiques en calculant, pour chaque carré du quadrillage et pour les périodes 1986-1995, 1996-2005, et 2006-2015, le rapport entre le nombre de dates où seul des acquisitions SWH sont présentes, et le nombre de dates où figurent des acquisitions de Landsat, ASTER ou de SWH.

La bande MIR jouant un rôle clé dans la détection de la neige et des surfaces en eau, nous avons créé un troisième groupe de données regroupant les scènes avec cette bande, et avons calculé la contribution de SWH pour la période 1986-2015.

4. Résultats

4.1. Cartographie des acquisitions

La carte inférieure de la figure 3 montre la distribution des acquisitions de scènes des montagnes françaises par les satellites SPOT 1 à 5 disponibles dans le catalogue THEIA au format L1C sur la période 1986-2015. Les secteurs comportant le plus grand nombre d'acquisitions sont situés dans les Pyrénées centrales, les Alpes françaises occidentales et le massif des Vosges. La moitié sud-est des alpes contient très peu de donnée (<100), car la collection SWH de Theia ne contient pas d'acquisitions prises dans cette zone avant 2009. La carte supérieure montre la distribution de l'ensemble des acquisitions utilisées (Landsat, ASTER, SWH) lors de l'étude.

La figure 3 nous donne déjà un premier aperçu de l'apport de SWH, avec les Pyrénées centrales affichant le maximum d'acquisition dans les deux cartes. Le catalogue Theia contribue pour 1 % à 30 % de l'ensemble des données disponibles dans chaque carré.

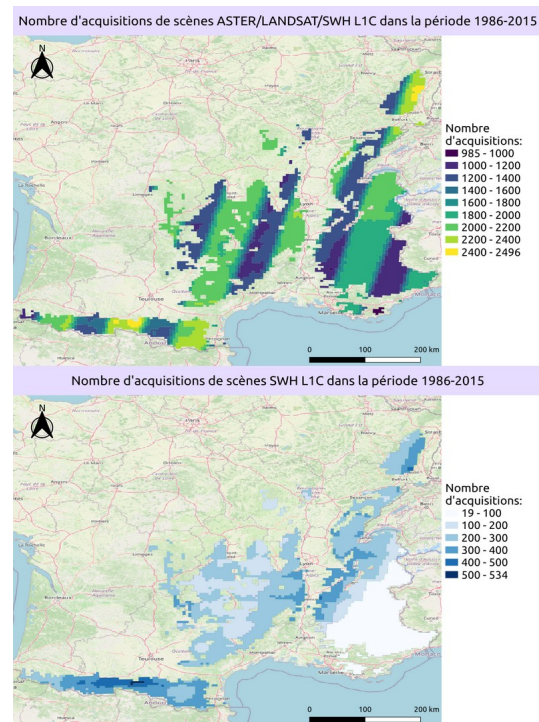


Figure 3 : Distribution des acquisitions dans les montagnes françaises entre 1986 et 2015. Carte supérieure : collections SWH de THEIA, Landsat, et ASTER. Carte inférieure : collection SWH de THEIA.

4.2. Cartographie de la contribution de SWH

La carte supérieure de la figure 4 indique, pour chaque carré du quadrillage, le nombre de dates dans la période 1986-2015 auxquelles une ou des images avec bande MIR ont été acquises par Landsat, ASTER ou SWH. La carte inférieure indique le pourcentage de ces dates auxquelles seules des images SWH ont été acquises. Dans les Pyrénées ainsi que dans les Alpes occidentales, SWH contribue jusqu'à 19 % des dates avec acquisitions. Le pourcentage de contribution est plus fort en dehors des zones de chevauchement des scènes Landsat d'orbites adjacentes.

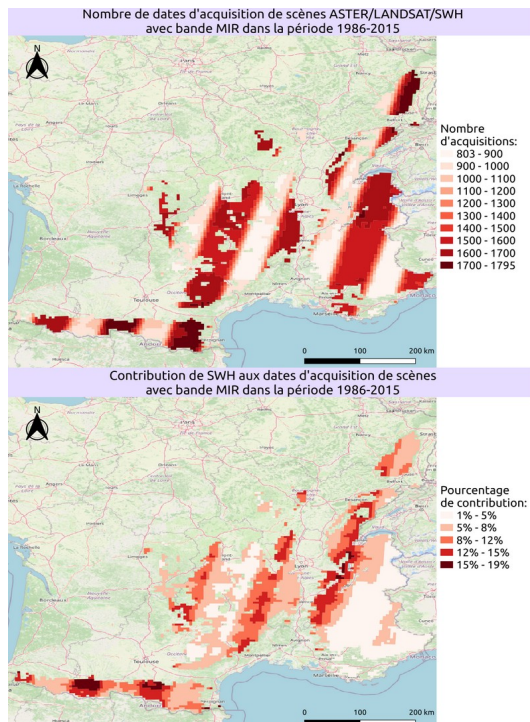


Figure 4 : Contribution de SWH aux acquisitions avec bande MIR dans les montagnes françaises entre 1986 et 2015. Carte supérieure : Nombre de dates d'acquisitions SWH de THEIA, Landsat, et ASTER. Carte inférieure : Pourcentage des dates acquises seulement par SWH.

Pour les périodes 1986-1995, 1996-2005, et 2006-2015, la figure 5 indique, pour chaque carré du quadrillage, le nombre de dates auxquelles une ou des images ont été acquises par Landsat,

ASTER ou SWH, ainsi que le pourcentage de ces dates auxquelles seules des images SWH ont été acquises. Le sud-est des Alpes françaises est absent pour les périodes avant 2009 du fait de l'absence, à ce jour, de données SWH dans la collection Theia. Nous obtenons une moyenne de 11.2 % et un maximum de 32.7 % de contributions pour 2006-2015 (figure 5a), une moyenne de 16.8 % et un maximum de 36.6 % pour 1996-2005 (figure 5c), et une moyenne de 14.3 % et un maximum de 29.1 % pour 1986-1995 (figure 5e). Le nombre de dates d'acquisition a beaucoup augmenté entre 1986-1995 (figure 5f) et 1996-2005 (figure 5d), en passant d'une moyenne de 38.7 dates par an à 53.6 dates par an. Bien que l'on puisse percevoir une augmentation des dates d'acquisitions dans la période 2006-2015 (figure 5b), avec une moyenne de 55.8 dates par an, les valeurs maximales restent entre 700 et 800 dates (avec comme exception le centre des Pyrénées, qui peut atteindre 815 dates). Cela équivaut à des fréquences temporelles de 70 à 80 dates d'acquisitions par année, dans des régions où la contribution du catalogue Theia peut atteindre 20 %, soit 14 à 16 dates par années.

5. Discussion

Les résultats de cette étude ne tiennent pas compte du contenu de chaque acquisition (pixels sans données, nuages). Il a été estimé qu'environ 50 % des pixels de l'instrument MODIS, dans les scènes au-dessus des Pyrénées, étaient masqués par des nuages entre 2000 et 2015 [Gascoin *et al.*, 2015]. On peut également noter la panne « SLC-off » de Landsat 7 qui, depuis 2003, a réduit à 78 % la quantité de pixels disponibles dans chaque scène [USGS, 2003]. Ainsi, il faut s'attendre à trouver moins de données disponibles dans les zones d'intérêt que le nombre d'acquisitions présentées dans cet article. Cependant, les images SPOT contiennent probablement moins de pixels nuageux que les images Landsat, puisque les images SPOT étaient acquises lorsque les conditions étaient jugées favorables par l'opérateur. L'intégralité du catalogue SWH n'étant pas encore disponible au niveau 1C, le CNES a mis en place un outil en ligne permettant à l'utilisateur de passer des images SWH 1A au niveau 1C (<https://swh-2a-carto.fr/>).

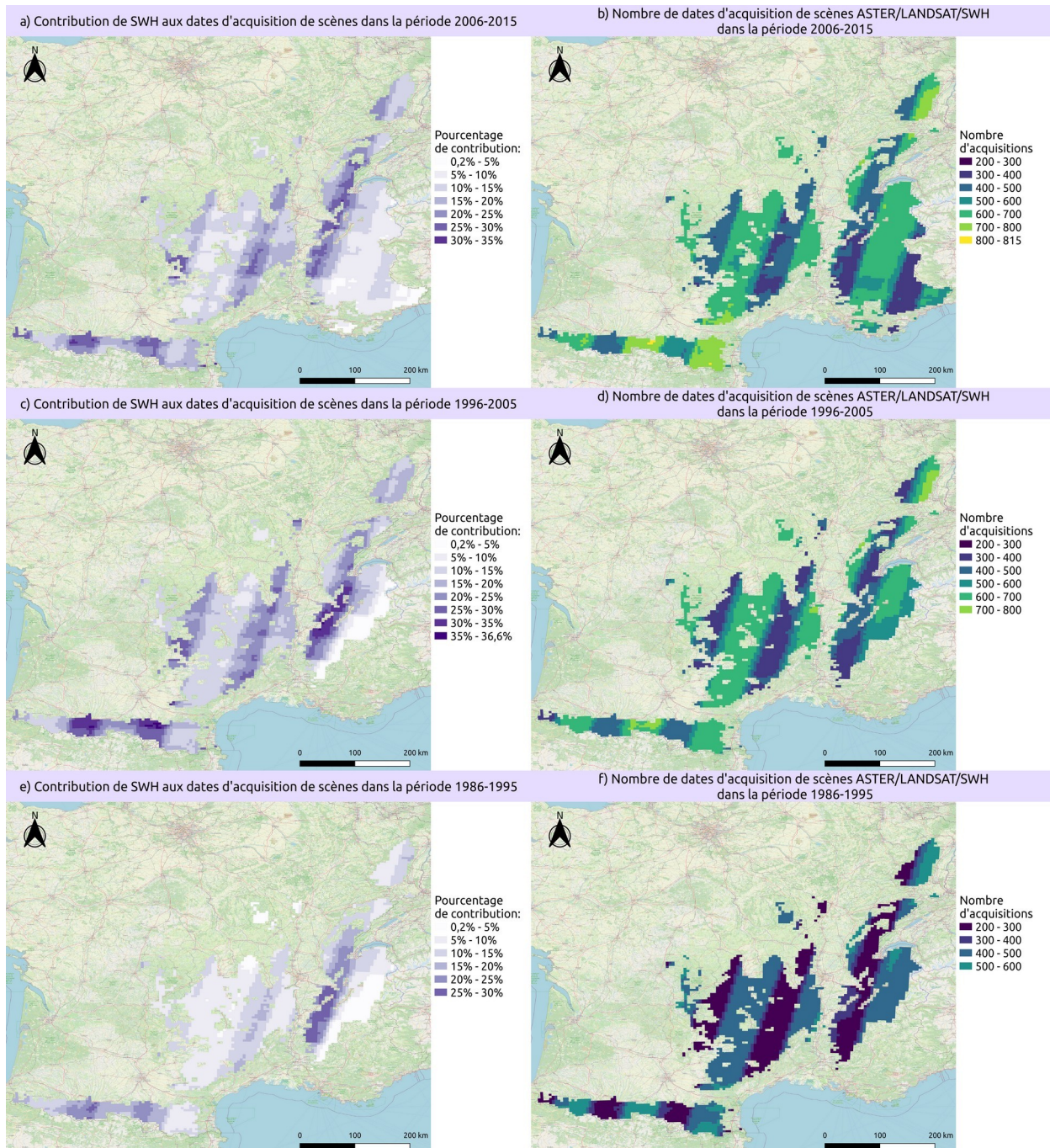


Figure 5 : Contribution de SWH aux acquisitions dans les montagnes françaises entre 1986 et 2015.

Gauche : Pourcentages de contribution aux dates d'acquisition pour les périodes a) 2006-2015 c) 1996-2005 d) 1986-1995.
 Droite : Nombre de dates d'acquisition de Landsat, ASTER et SWH pour les périodes b) 2006-2015 d) 1996-2005 f) 1986-1995.

6. Conclusion

Les régions de montagnes sont des témoins particulièrement sensibles des changements globaux. Le programme SWH augmente considérablement le nombre d'images optiques disponibles sur les massifs français en complément des archives Landsat et ASTER. En particulier, au cours de la décennie 1996-2005, la collection Theia peut contribuer jusqu'à 36,6 % du nombre de dates d'acquisition dans certains

secteurs. La revisite temporelle accrue qui en résulte ouvre des perspectives nouvelles permettant d'étudier les changements environnementaux complexes qui sont à l'œuvre dans ces territoires, comme la dynamique de l'enneigement, l'évolution des surfaces agricoles, du couvert forestier, les inondations, etc. La répartition des données dans la collection Theia n'est pas représentative de l'archive complète de SWH, qui est disponible dans le catalogue REGARDS, et une étude similaire pourrait être

menée à l'échelle globale afin d'identifier les régions et les thématiques qui bénéficieraient particulièrement de cette nouvelle source de données.

Remerciements

Ce travail est financé par l'Agence nationale de la recherche Trajectoires des systèmes agropastoraux en montagne : adaptation des pratiques aux changements climatiques, écologiques et socio-économiques - TOP ANR-20-CE32-0002).

Références

- Abrams, M., Hook, S., Ramachandran, B., 2002. ASTER user handbook, version 2. Jet propulsion laboratory 4800, 135.
- Davranche, A., Lefebvre, G., Poulin, B., 2010. Wetland monitoring using classification trees and SPOT-5 seasonal time series. *Remote Sens. Environ.* 114, 552-562. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.009>
- De Sy, V., Herold, M., Achard, F., Asner, G.P., Held, A., Kellndorfer, J., Verbesselt, J., 2012. Synergies of multiple remote sensing data sources for REDD+ monitoring. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 4, 696-706. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.09.013>
- Deines, J.M., Kendall, A.D., Crowley, M.A., Rapp, J., Cardille, J.A., Hyndman, D.W., 2019. Mapping three decades of annual irrigation across the US High Plains Aquifer using Landsat and Google Earth Engine. *Remote Sens. Environ.* 233, 111400. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111400>
- El Hajj, M., Bégué, A., Guillaume, S., Martiné, J.-F., 2009. Integrating SPOT-5 time series, crop growth modeling and expert knowledge for monitoring agricultural practices — The case of sugarcane harvest on Reunion Island. *Remote Sens. Environ.* 113, 2052-2061. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.04.009>
- ESRI, 2021. Countries WGS84 [WWW Document]. https://hub.arcgis.com/datasets/a21fdb46d23e4ef896f31475217cbb08_1?geometry=29.738,-86.311,5.832,89.339 (accessed 4.27.21).
- European Environment Agency EEA , 2008, European Mountain Areas [WWW Document], <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/european-mountain-areas> (accessed 1.5.22).
- Gascoin, S., Grizonnet, M., Bouchet, M., Salgues, G., Hagolle, O., 2019. Theia Snow collection: high-resolution operational snow cover maps from Sentinel-2 and Landsat-8 data 22.
- Gascoin, S., Hagolle, O., Huc, M., Jarlan, L., Dejoux, J.-F., Szczypta, C., Marti, R., Sánchez, R., 2015. A snow cover climatology for the Pyrenees from MODIS snow products. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 2337-2351. [https://doi.org/10.5194/hess-](https://doi.org/10.5194/hess-19-2337-2015)

19-2337-2015

- Goward, S., Arvidson, T., Williams, D., Faundeen, J., Irons, J., Franks, S., 2006. Historical Record of Landsat Global Coverage. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 72, 1155-1169. <https://doi.org/10.14358/PERS.72.10.1155>
- Hansen, M.C., Potapov, P.V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S.V., Goetz, S.J., Loveland, T.R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C.O., Townshend, J.R.G., 2013. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science* 342, 850-853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Ju, J., Roy, D.P., 2008. The availability of cloud-free Landsat ETM+ data over the conterminous United States and globally. *Remote Sens. Environ.* 112, 1196-1211. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.08.011>
- Latifi, H., Fassnacht, F.E., Schumann, B., Dech, S., 2014. Object-based extraction of bark beetle (*Ips typographus* L.) infestations using multi-date LANDSAT and SPOT satellite imagery. *Prog. Phys. Geogr. Earth Environ.* 38, 755-785. <https://doi.org/10.1177/0309133314550670>
- Li, J., Roy, D., 2017. A Global Analysis of Sentinel-2A, Sentinel-2B and Landsat-8 Data Revisit Intervals and Implications for Terrestrial Monitoring. *Remote Sens.* 9, 902. <https://doi.org/10.3390/rs9090902>
- López-Moreno, J.I., Soubeyrou, J.M., Gascoin, S., Alonso-Gonzalez, E., Durán-Gómez, N., Lafaysse, M., Vernay, M., Carmagnola, C., Morin, S., 2020. Long-term trends (1958-2017) in snow cover duration and depth in the Pyrenees. *International Journal of Climatology* 40, 6122-6136. <https://doi.org/10.1002/joc.6571>
- Miller, H.M., Richardson, L.A., Koontz, S.R., Loomis, J., Koontz, L., 2013. Users, uses, and value of Landsat satellite imagery: results from the 2012 survey of users (USGS Numbered Series No. 2013-1269), Users, uses, and value of Landsat satellite imagery: results from the 2012 survey of users, Open-File Report. U.S. Geological Survey, Reston, VA. <https://doi.org/10.3133/ofr20131269>
- Nosavan, J., Moreau, A., Masse, A., Chausserie-Laprée, B., Caillet, C., 2017. Spot world heritage: spot 1-5 data curation and valorization with new enhanced swh products.
- Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., Belward, A.S., 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 540, 418-422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Pesaresi, M., Ehrlich, D., J. Florczyk, A., Freire, S., Julea, A., Kemper, T., Syrris, V., 2016. The global human settlement layer from landsat imagery, in: 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Presented at the

- 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp. 7276-7279. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7730897>
- Polychronaki, A., Gitas, I.Z., 2012. Burned Area Mapping in Greece Using SPOT-4 HRVIR Images and Object-Based Image Analysis. *Remote Sens.* 4, 424-438. <https://doi.org/10.3390/rs4020424>
- THEIA, 2017, Description des produits muscate l1c spot world heritage [WWW Document]. https://www.theia-land.fr/wp-content/uploads/2018/12/THEIA-NT-411-0406-CN_Ed0100_20171025.pdf (accessed 31.10.22).
- U.S. Geological Survey USGS , 2003, Preliminary Assessment of the Value of Landsat 7 ETM+ Data following Scan Line Corrector Malfunction [WWW Document]. https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/SLC_off_Scientific_Usability.pdf (accessed 31.10.22).
- U.S. Geological Survey USGS , 2020, AST_L1T Product User's Guide [WWW Document]. https://pdaac.usgs.gov/documents/647/AST_L1T_User_Guide_V3.pdf (accessed 31.10.22).
- U.S. Geological Survey USGS , 2021, A Landsat Collection 2 [WWW Document]. <https://pubs.usgs.gov/fs/2021/3002/fs20213002.pdf> (accessed 31.10.22).
- Vicente-Serrano, S.M., Lasanta, T., Romo, A., 2004. Analysis of Spatial and Temporal Evolution of Vegetation Cover in the Spanish Central Pyrenees: Role of Human Management. *Environ. Manage.* 34, 802-818. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-0022-5>
- Vidaller, I., Revuelto, J., Izagirre, E., Rojas-Heredia, F., Alonso-González, E., Gascoin, S., René, P., Berthier, E., Rico, I., Moreno, A., Serrano, E., Serreta, A., López-Moreno, J.I., 2021. Toward an Ice-Free Mountain Range: Demise of Pyrenean Glaciers During 2011-2020. *Geophys. Res. Lett.* 48. <https://doi.org/10.1029/2021GL094339>
- Woodcock, C.E., Allen, R., Anderson, M., Belward, A., Bindschadler, R., Cohen, W., Gao, F., Goward, S.N., Helder, D., Helmer, E., Nemani, R., Oreopoulos, L., Schott, J., Thenkabail, P.S., Vermote, E.F., Vogelmann, J., Wulder, M.A., Wynne, R., 2008. Free Access to Landsat Imagery. *Science* 320, 1011-1011. <https://doi.org/10.1126/science.320.5879.1011a>
- Wulder, M.A., White, J.C., Loveland, T.R., Woodcock, C.E., Belward, A.S., Cohen, W.B., Fosnight, E.A., Shaw, J., Masek, J.G., Roy, D.P., 2016. The global Landsat archive: Status, consolidation, and direction. *Remote Sens. Environ.* 185, 271-283. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.032>
- Yang, L., Wang, Lunche, Yu, D., Yao, R., Li, C., He, Q., Wang, S., Wang, Lizhe, 2020. Four decades of wetland changes in Dongting Lake using Landsat observations during 1978-2018. *J. Hydrol.* 587, 124954. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124954>
- Yang, M.-D., Chen, S.-C., Tsai, H.P., 2017. A Long-Term Vegetation Recovery Estimation for Mt. Jou-Jou Using Multi-Date SPOT 1, 2, and 4 Images. *Remote Sens.* 9, 893. <https://doi.org/10.3390/rs9090893>
- Zhang, Y., Woodcock, C.E., Arévalo, P., Olofsson, P., Tang, X., Stanimirova, R., Bullock, E., Tarrío, K.R., Zhu, Z., Friedl, M.A., 2022. A Global Analysis of the Spatial and Temporal Variability of Usable Landsat Observations at the Pixel Scale. *Frontiers in Remote Sensing* 3. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.894618>
- Zhu, Z., Wulder, M.A., Roy, D.P., Woodcock, C.E., Hansen, M.C., Radeloff, V.C., Healey, S.P., Schaaf, C., Hostert, P., Strobl, P., Pekel, J.-F., Lymburner, L., Pahlevan, N., Scambos, T.A., 2019. Benefits of the free and open Landsat data policy. *Remote Sens. Environ.* 224, 382-385. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.016>