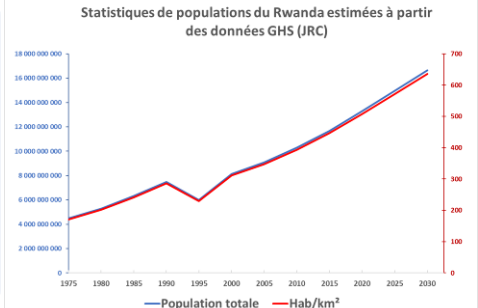


Le Rwanda, surnommé « pays des mille collines », est un pays enclavé et densément peuplé de l'Afrique de l'Est, avec des terres fertiles dans les collines et une population d'environ 13 millions d'habitants (2020). La figure ci-contre montre l'évolution de la population estimée à partir des données [Global Human Settlement](#) du JRC entre 1975 et 2030 (voir [animation](#)).

Le Rwanda est bordé à l'ouest par la République Démocratique du Congo (RDC), et est délimité par la Tanzanie à l'est, l'Ouganda au nord et le Burundi au sud. Le Rwanda est constitué de 5 provinces : -Nord, -Est, -Sud, -Ouest et -Ville de Kigali (Fig.1a). L'ensemble du Rwanda est vallonné et à plus de 1 000 mètres d'altitude, avec le point le plus bas situé le long de la rivière Rusizi à 950 mètres d'altitude (Fig.1b).



Rwanda vue de l'espace

Sentinel-1, Sentinel-2, DEM

[2D layer stack](#)

D'un point de vue conservation, Le Rwanda englobe 4 parcs nationaux : -Parc National des Volcans, -Parc National de l'Akagera, -Parc National de Nyungwe et -Parc National de Gishwati Mukura. Fig.2a et Fig.2b montrent respectivement des vues Sentinel-1 radar et Sentinel-2 optique du Rwanda et de ses parcs nationaux.

Fig.1: Provinces et districts du Rwanda (a) et modèle numérique de terrain (b).

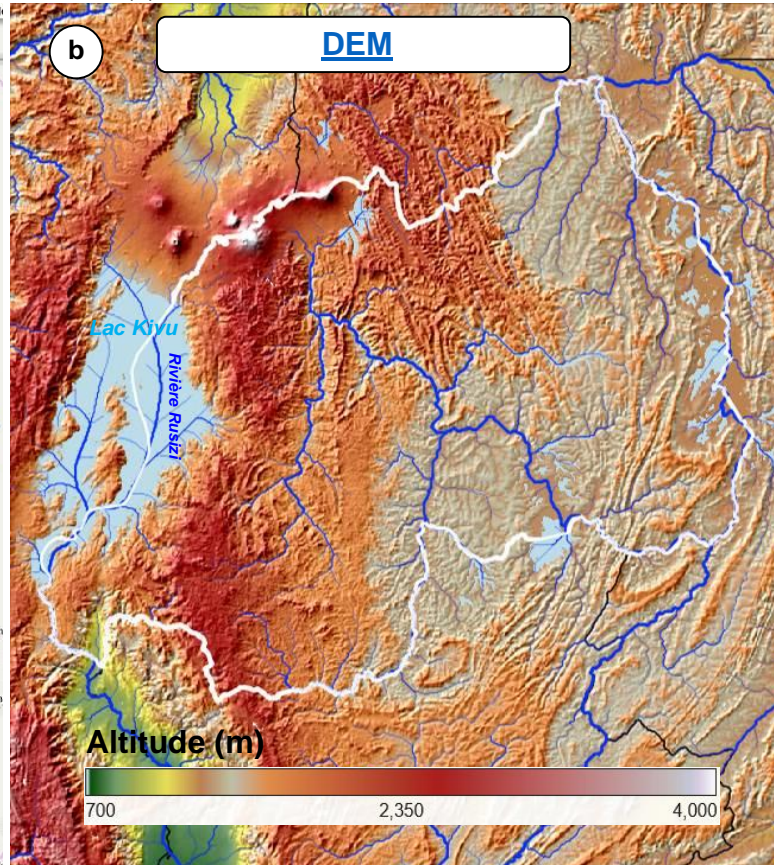
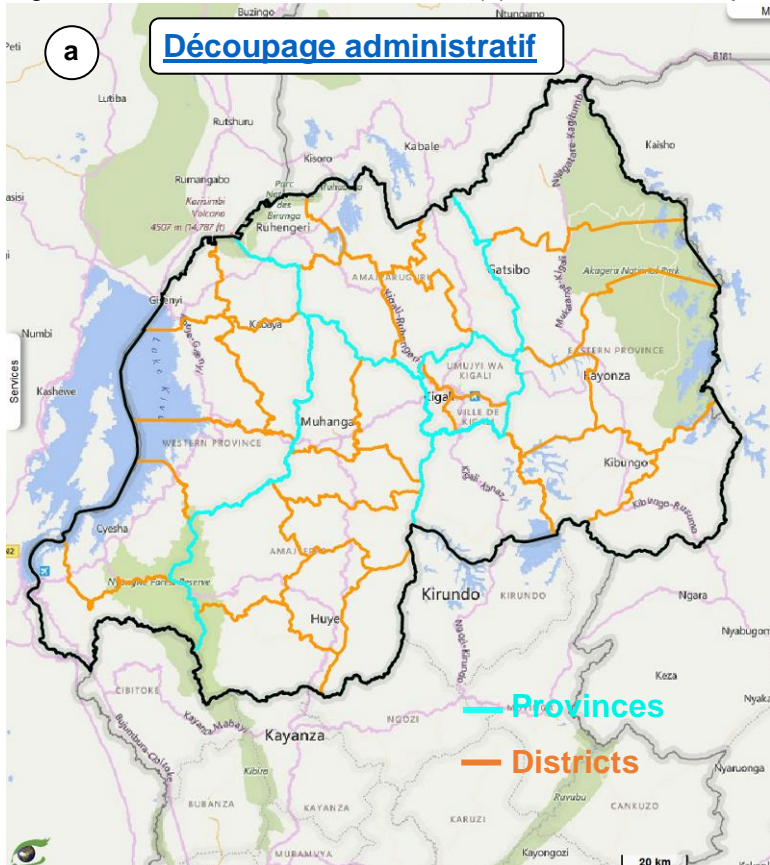
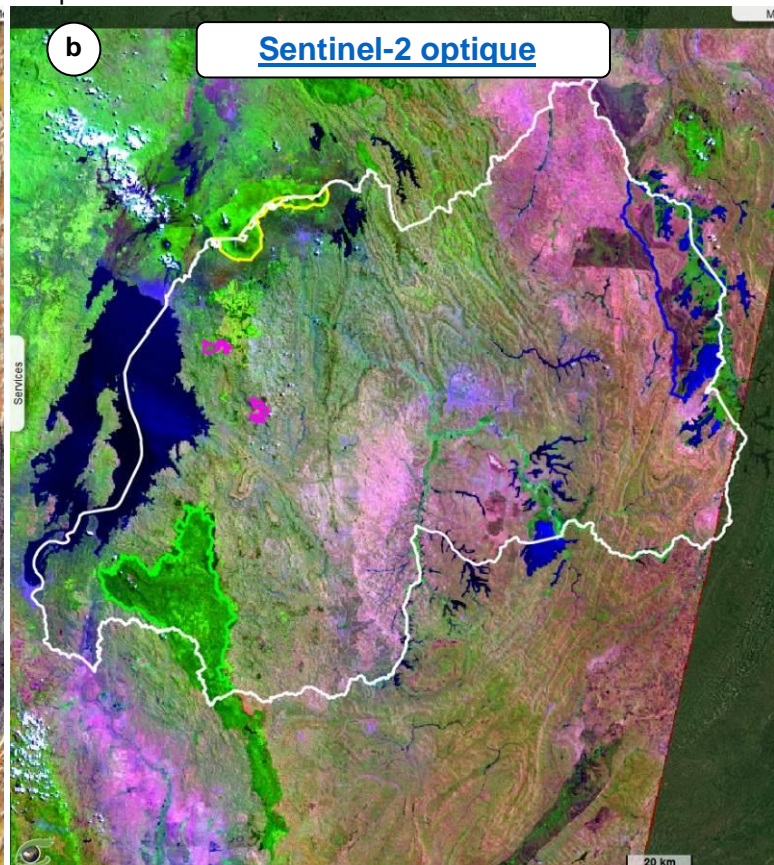
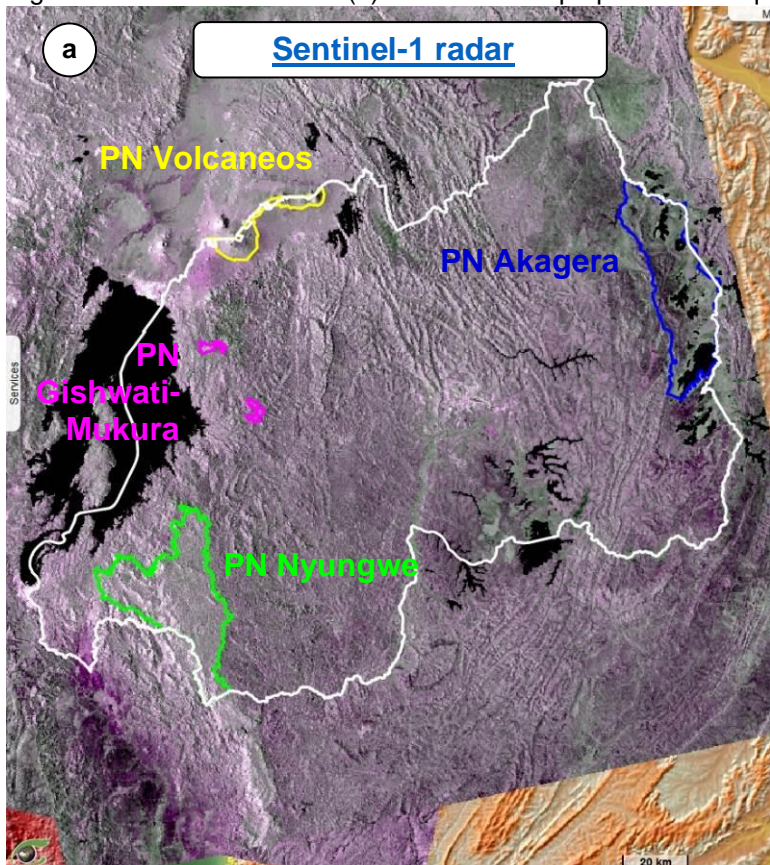


Fig.2: Vues Sentinel-1 radar (a) et Sentinel-2 optique avec les quatre parcs nationaux du Rwanda.



L'agriculture joue un rôle majeur dans l'économie et le marché du travail du Rwanda. Le secteur agricole représentait un tiers du PIB du pays en 2009-2013 et employait plus de 80 % de la population rwandaise (Banque Mondiale, 2015). Le secteur agricole rwandais est caractérisé par six zones agro-écologiques (Fig.3a), dominé par les petits exploitants (Source) et profite de deux saisons sèches et deux saisons de pluies (Fig.3b). Cependant, avec un contexte de changement climatique imposant et une population croissante, l'agriculture se trouve face à de nombreux défis.

Dans ce contexte, VisioTerra propose des outils / solutions de surveillance, alerte précoce et évaluation agricole saisonnière en utilisant les données de l'Observation de la Terre. Ces géoservices fournissent aux administrateurs et agriculteurs la capacité de suivre et d'évaluer leurs parcelles à travers des indicateurs de végétation, d'humidité de surface, de précipitations, de températures...

Ce document montre un exemple de suivi / analyse d'une parcelle située dans le district du Bugesera (polygone jaune de la Fig.5a) appartenant à la région agro-écologique «Eastern Plateau & Eastern Savanna» (FAO). Fig.4a montre le calendrier culturel des cultures dominantes dans cette région agro-écologique.

Suivi de l'agriculture Saisons et calendrier culturel

Fig.3: Zones agro-écologiques (a) et précipitations mensuelles moyennes sur les 4 dernières années (ERA5) sur le Rwanda.

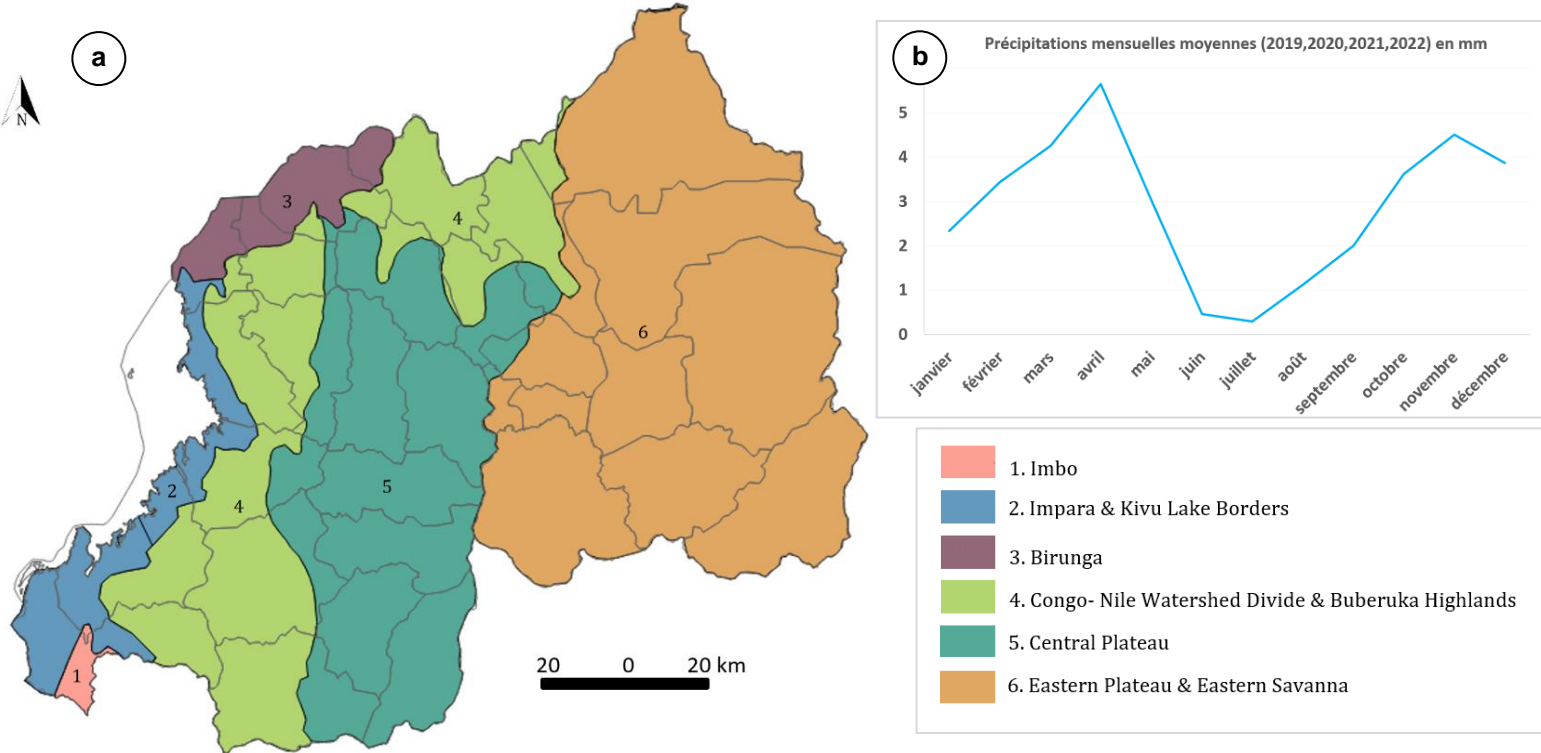
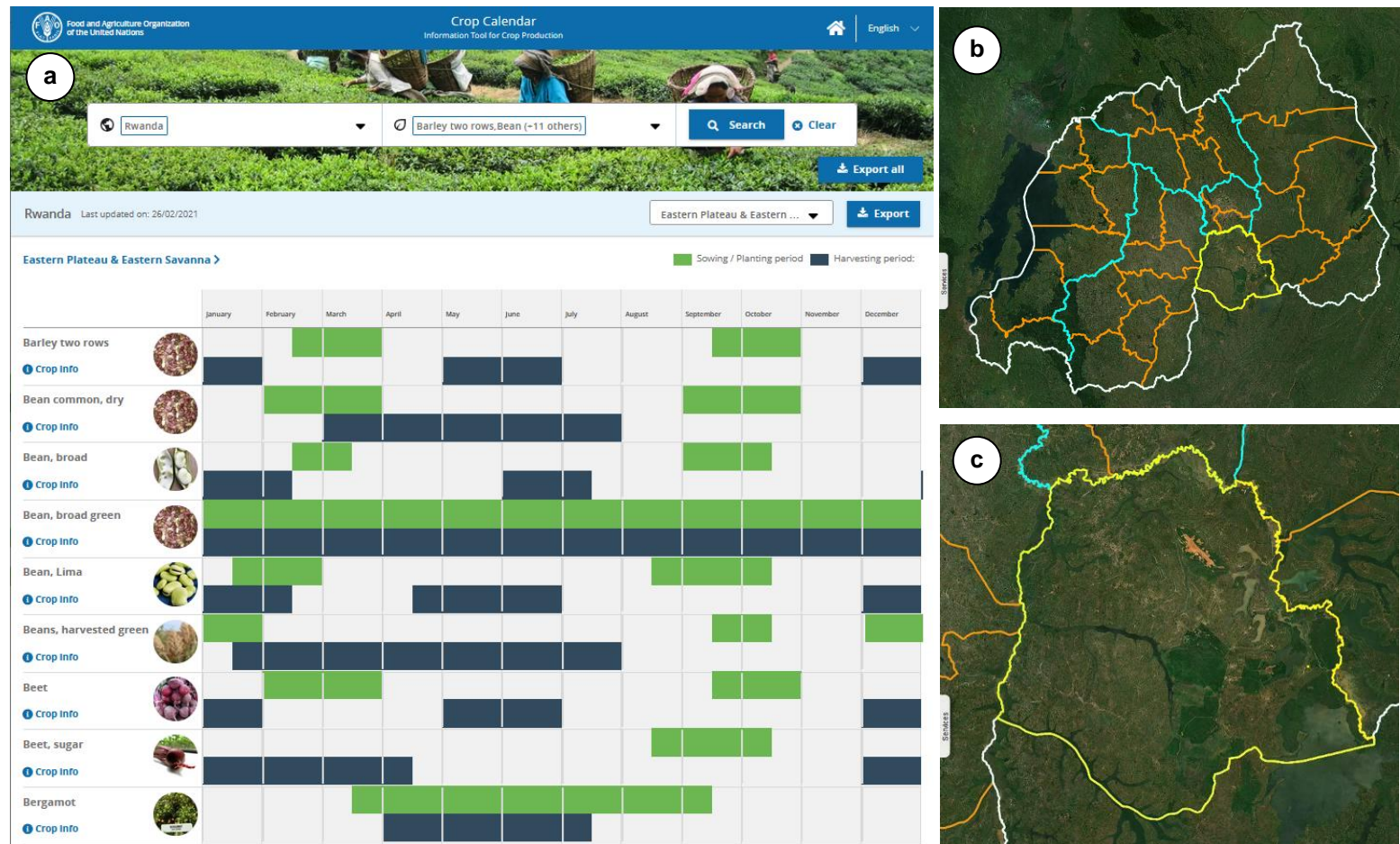


Fig.4: Calendrier culturel de la région agro-écologique « Eastern Plateau & Eastern Savanna » (a) qui contient le district Bugesera.



Cet exemple montre une parcelle que nous supposons être de haricots (à confirmer). La Fig.5a montre une image très haute résolution (*Bing Map*) et la Fig.5b montre une image Sentinel-2 (observée le 19.03.2019) centrées sur la parcelle. Les Fig.6a et Fig.6b montrent respectivement l'indicateur de végétation (NDVI) et l'indicateur d'humidité du sol (NDWI-SM).

Le **NDVI** (*Normalised Difference Vegetation Index*) est parmi les indicateurs les plus couramment utilisés pour surveiller le pourcentage du couvert végétal dans une zone.

Le **NDWI-SM** (*Normalised Difference Water Index – Soil Moisture*) a été développé par [Gao \(1996\)](#) et mesure l'eau liquide imprégnant les couverts végétaux.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad , \quad NDWI - SM = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Où **NIR** (*Near Infrared*) est une des deux bandes proche infrarouge (bande 8) du capteur MSI du satellite Sentinel-2, **SWIR** (*Short-Wave Infrared*) est la première bande de l'infrarouge moyen (bande 11) de Sentinel 2 et **R** est la bande rouge (bande 4).

Suivi de l'agriculture Indicateurs de végétation et d'humidité

Fig.5: Parcelle dans le district du Bugesera vue par Bing (a) et Sentinel-2 (19.03.2019).

[vue gauche](#) [vue droite](#)

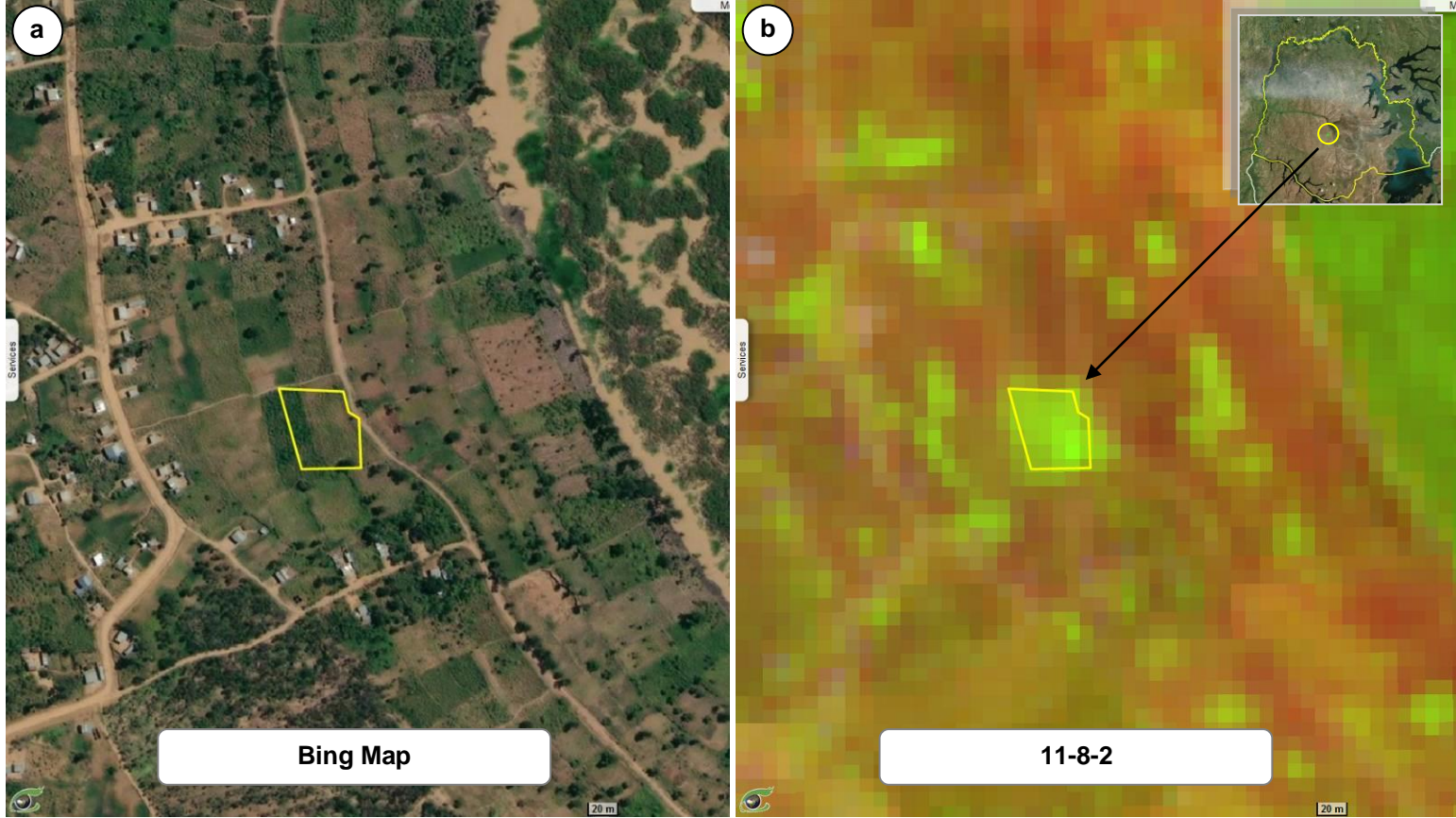


Fig.6: Indices de végétation (a) et d'humidité du sol (b).

[vue gauche](#) [vue droite](#)

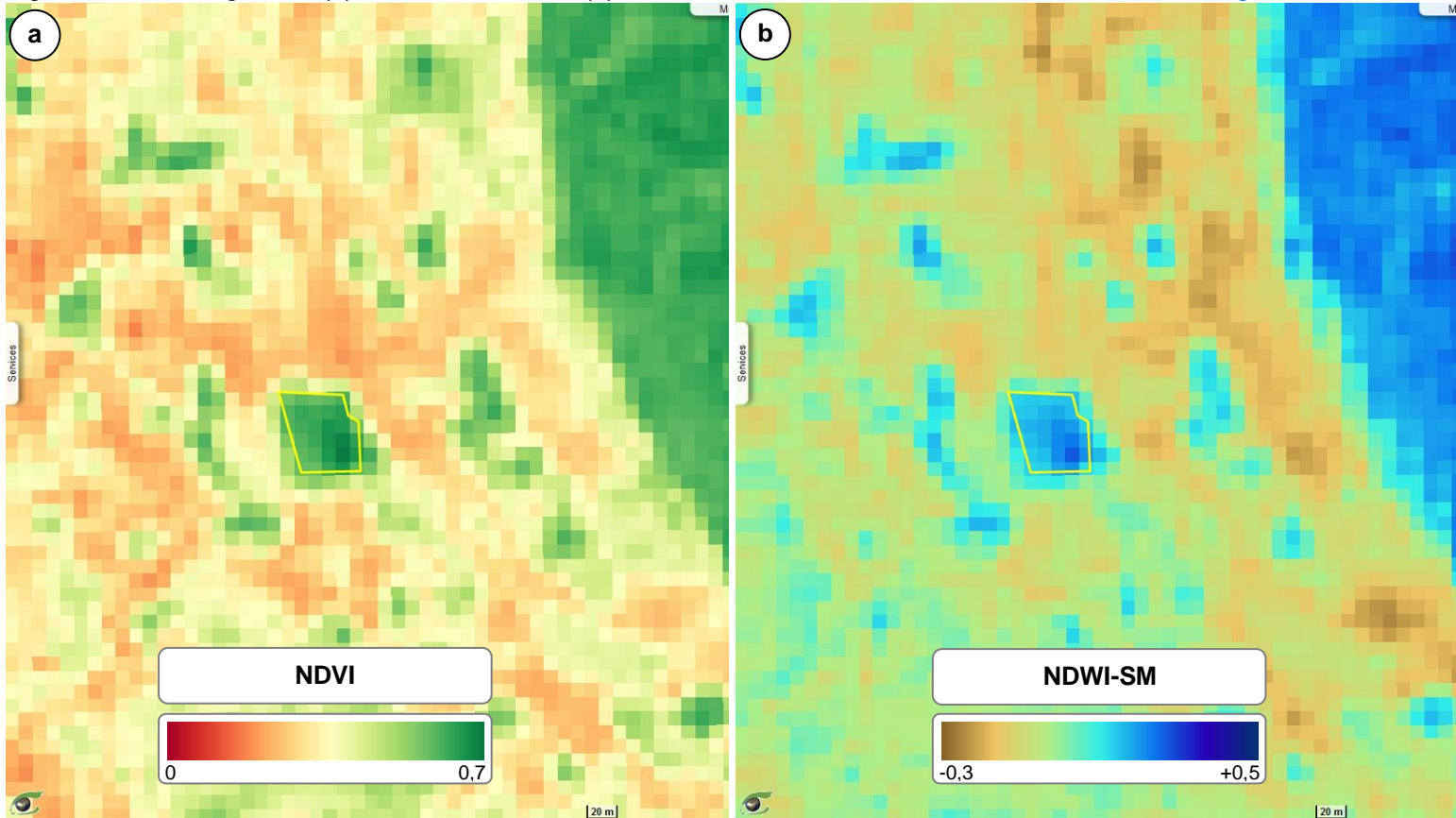


Fig.7 montre les précipitations calculées sur cette parcelle entre 2019 et 2022. Cette figure montre deux saisons sèches et deux saisons de pluies (de février à juin et de septembre à janvier).

L'indicateur de végétation (Fig.9) montre aussi deux saisons de croissance. La première saison se situe entre février et mai et la seconde entre septembre et décembre.

Les précipitations, l'humidité du sol (Fig.8) et l'indicateur de végétation montrent tous une bonne concordance de 2019 à 2022. Cela suggère que cette parcelle est de culture pluviale (c.à.d. non irriguée). L'indicateur de végétation correspond au cycle phénologique des haricots (à vérifier) tel que laisse supposer le calendrier cultural (Fig.4-a). Cette culture est caractérisée par une période de semis débutant en février, une période de croissance entre mars et avril et une période de récolte entre mai et juillet pour la première saison de pluie (saison A). Pour la deuxième saison pluvieuse (saison B), la période de semis débute en septembre avec une période de croissance entre novembre et mi-décembre et une période de récolte entre mi-décembre et janvier. Le faible NDVI pendant l'année 2022 suggère un rendement moindre par rapport aux autres années.

Suivi de l'agriculture

Analyse des séries temporelles

Fig.7: Séries temporelles entre 2019 et 2022 des précipitations mensuelles sur la parcelle en vue saisonnière.

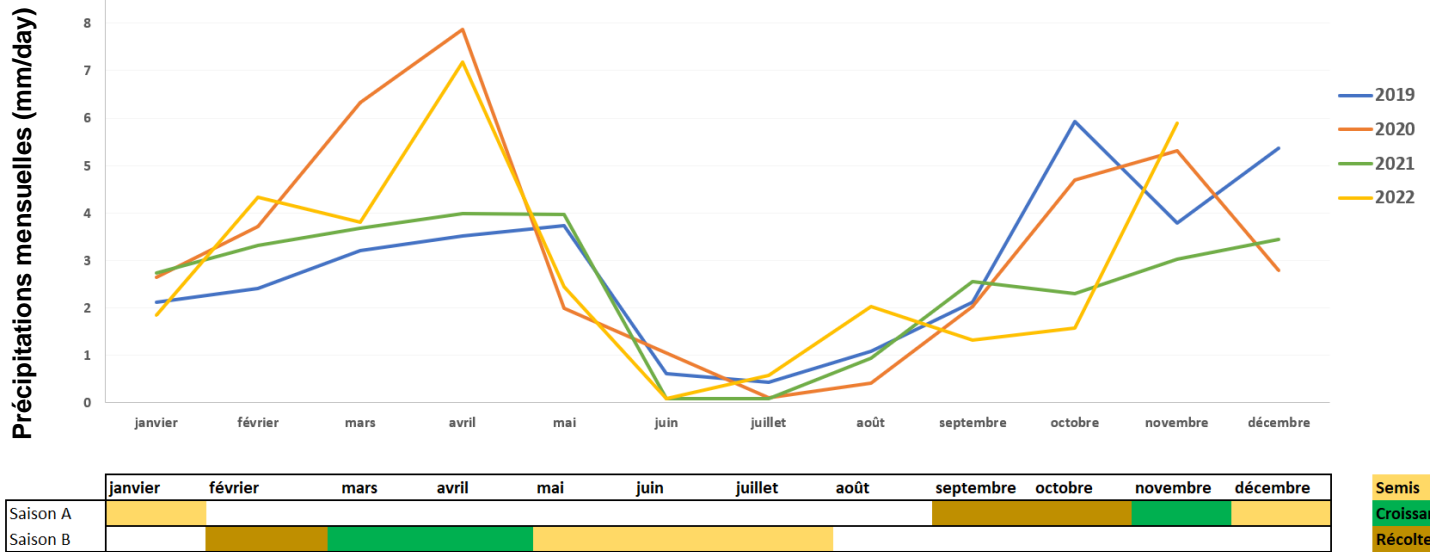


Fig.8: Séries temporelles entre 2019 et 2022 de l'indice d'humidité du sol (NDWI-SM) en vue saisonnière.

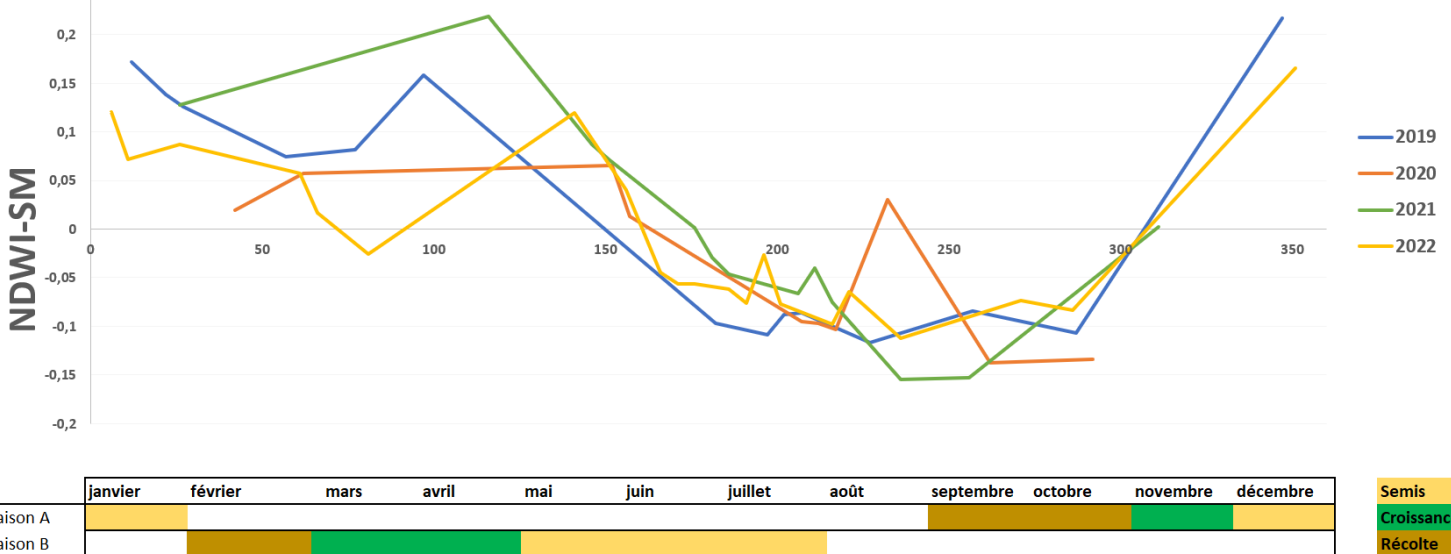
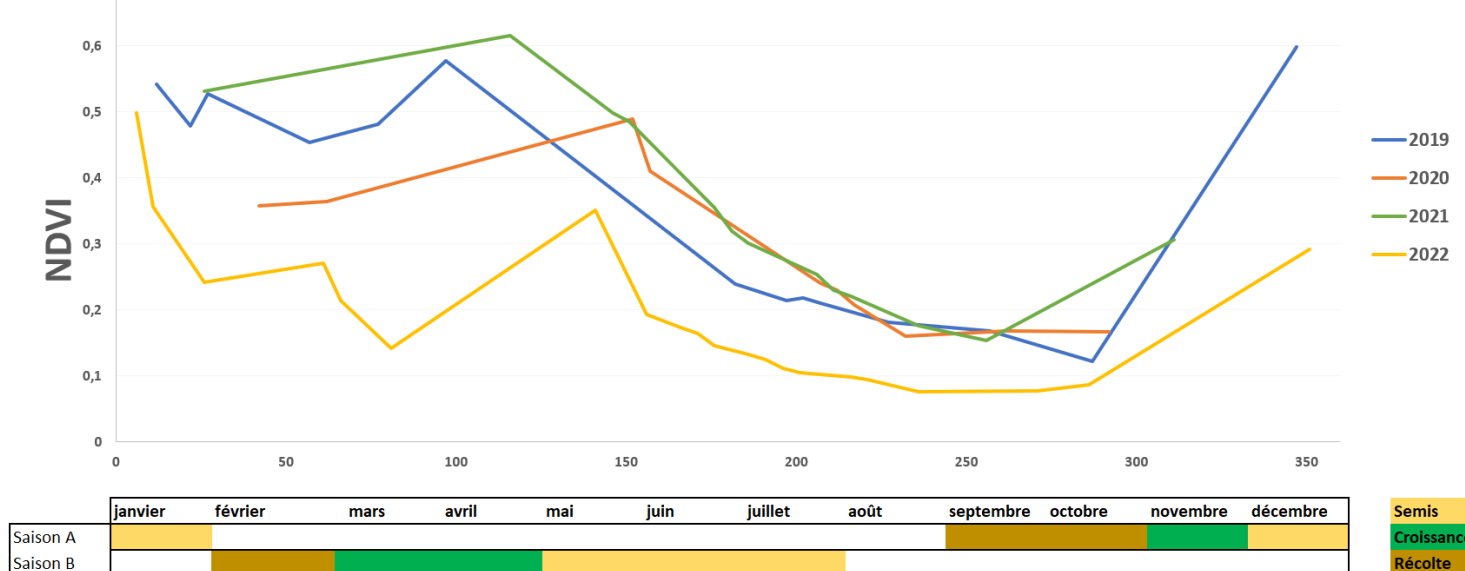


Fig.9: Séries temporelles entre 2019 et 2022 de l'indice de végétation (NDVI) en vue saisonnière.



Le Rwanda est un pays sujet à un large éventail de risques naturels, notamment les inondations fluviales, qui, chaque année, pèsent sur les communautés les plus vulnérables et ont des conséquences néfastes en termes de pertes économiques et de vies humaines. VisioTerra a mis en place des indicateurs d'inondations calculés à partir des données radar Sentinel-1 en utilisant des méthodes de *Machine Learning* basées sur un grand nombre de parcelles d'apprentissage. Cette méthodologie consiste en deux étapes :

1. Séparer la classe « Eau » des autres classes d'occupation du sol (sols nus, végétation basse, végétation haute, savane, bâti...) détectables à partir des données radar Sentinel-1.
2. Détecter la classe de changement « Inondation » qui correspond aux zones qui ne sont habituellement pas couvertes en eau mais qui ont été envahies par de l'eau à un moment donné suite à des précipitations. La récurrence des inondations mesure la probabilité d'inondation.

Le produit final est une **cartographie des risques d'inondation**. Les figures ci-dessous montre un exemple d'inondations fluviales survenues au sud de Kigali le 21/11/2022. Les images radar de Sentinel-1 sont acquises tous les 12 jours (cas d'un seul satellite) ou tous les 6 jours (cas de la constellation des deux satellites Sentinel-1). Le signal radar traversant les nuages, la régularité de ces observations est garantie. Pour chaque nouvelle image (Fig.11), on calcule la différence entre les pixels classés comme « eau » avec ceux de l'image précédente (Fig.10). Cette différence produit une occurrence supplémentaire de la classe « inondation » (Fig.12).

Risque d'inondations fluviales

Sud de Kigali

Les inondations dans cette zone sont dues à la situation géographique et les caractéristiques topographiques de Kigali (Fig.13), conjuguées au manque d'infrastructures de drainage et de solutions permettant d'accroître l'infiltration et de ralentir le ruissellement, exposent la ville à de fréquentes inondations ainsi qu'à des glissements de terrain ([World Bank](#)).

Fig.10: Image Sentinel-1 acquise avant des inondations fluviales survenues le 21 novembre 2022 10km au sud de Kigali. [vue 2D](#)

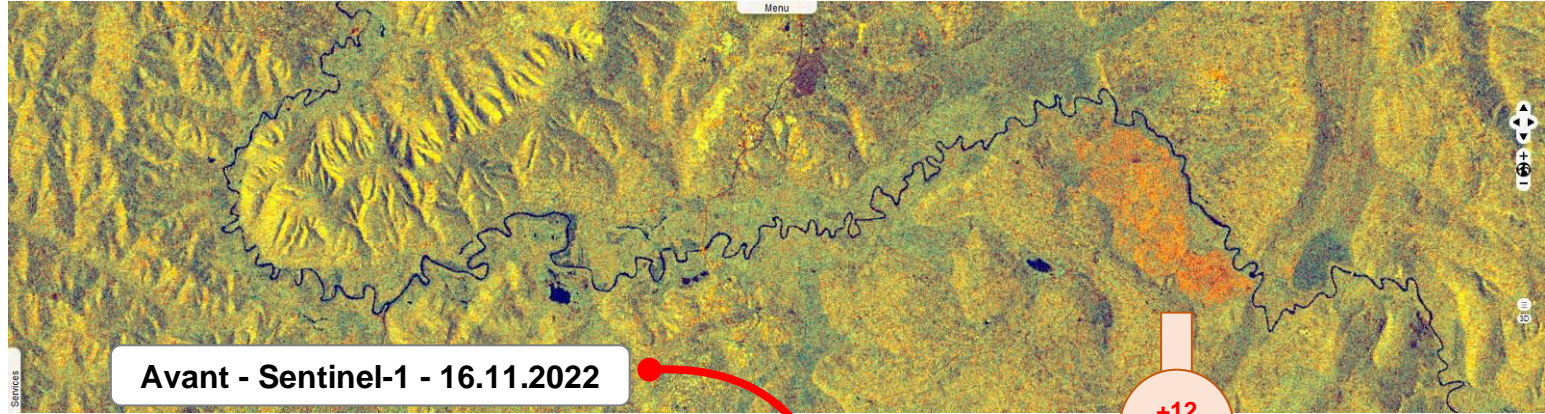


Fig.11: Image Sentinel-1 acquise après les inondations fluviales.

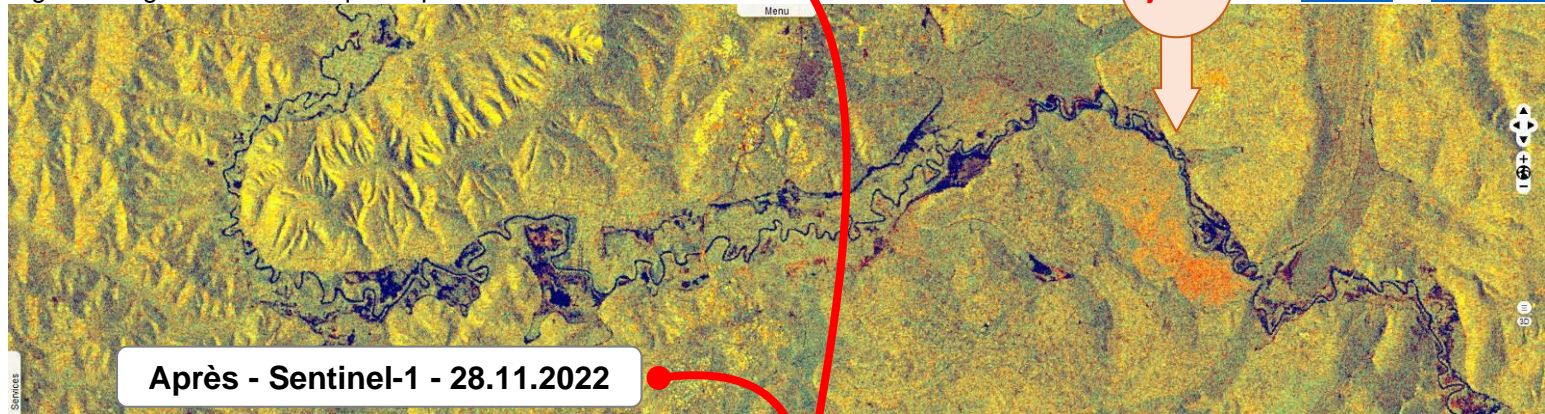


Fig.12: Zones inondées (rouge) superposées à un fond OSM.

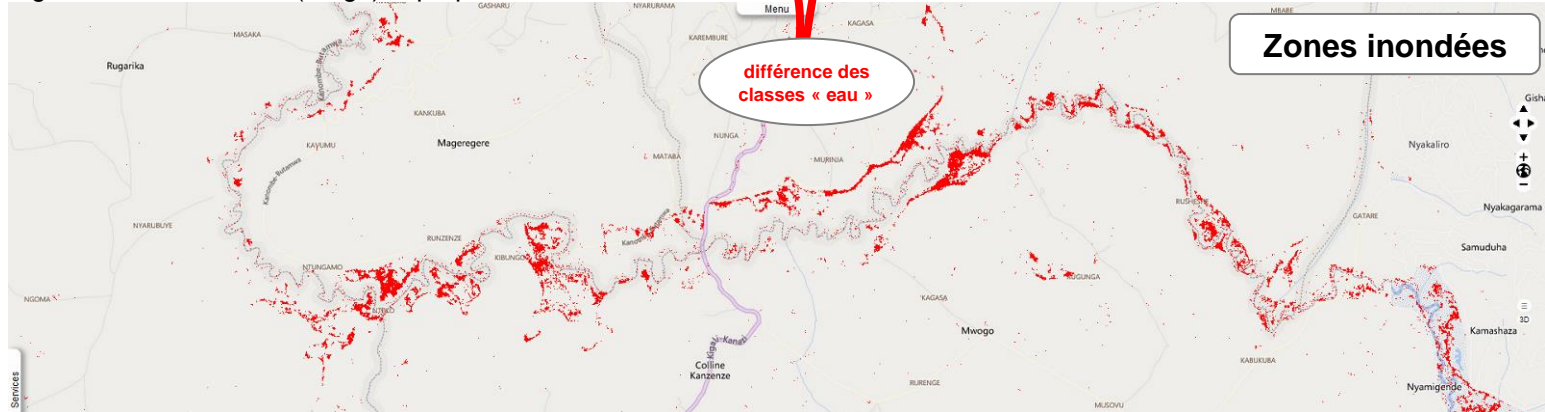
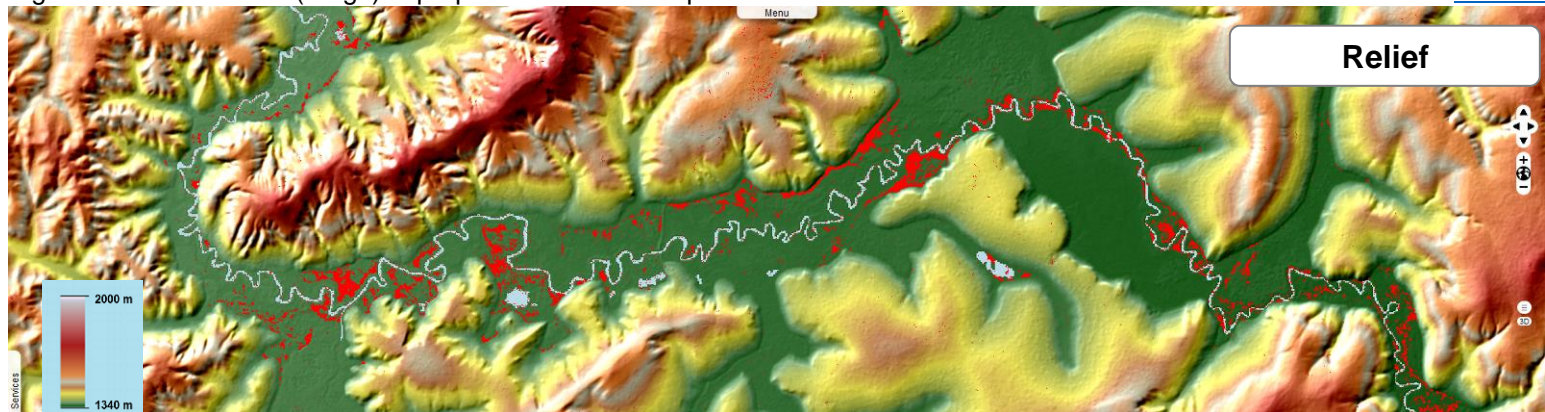


Fig.13: Zones inondées (rouge) superposées au MNE Copernicus.



En plus du suivi de l'agriculture et de certains risques naturels tel que les inondations fluviales, VisioTerra propose aussi des géoservices permettant la détection, le suivi et la visualisation interactive d'indicateurs d'aires brûlées et de feux actifs.

Fig.14a montre une image Sentinel-2 qui exploite la richesse des bandes spectrales de son instrument multispectrale MSI. Ici, les bandes 11, 8 et 2 correspondent au moyen-infrarouge, au proche infra-rouge et au bleu. Ces trois bandes 11, 8, 2 ont été affectées aux plans rouge, vert et bleu respectivement.

La tuile Sentinel-2 (Fig.14a) a été acquise en saison sèche le 6 juillet 2022. Les aires brûlées survenues au sud-ouest du Parc National Akagera sont détectées automatiquement et sont restituées en rouge (Fig.14b).

Fig.15 montre un autre exemple d'aires brûlées détectées automatiquement au nord du Parc National Akagera.

L'indicateur des aires brûlées est calculé à partir de données optiques Sentinel-2 en utilisant un algorithme dérivant d'une analyse de classification par des méthodes de « *Machine Learning* ».

Aires brûlées

Park National Akagera

Fig.14: Image Sentinel-2B acquise le 21-01-2019 (a) et les aires brûlées détectées automatiquement (b).

[animation](#)

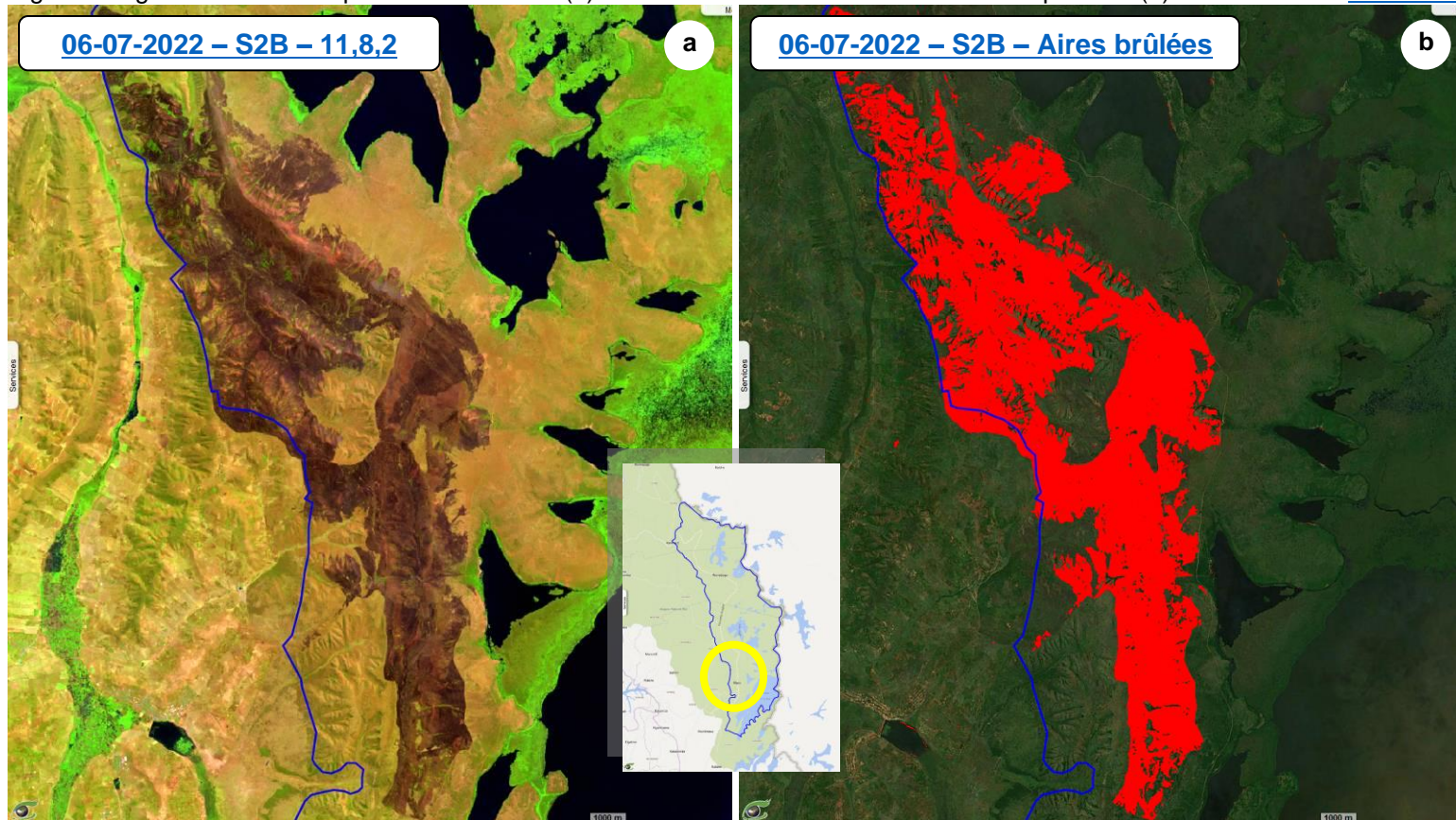


Fig.15: Vue zoomée de la fig.23.a (a) et les aires brûlées détectées automatiquement (b).

[animation](#)

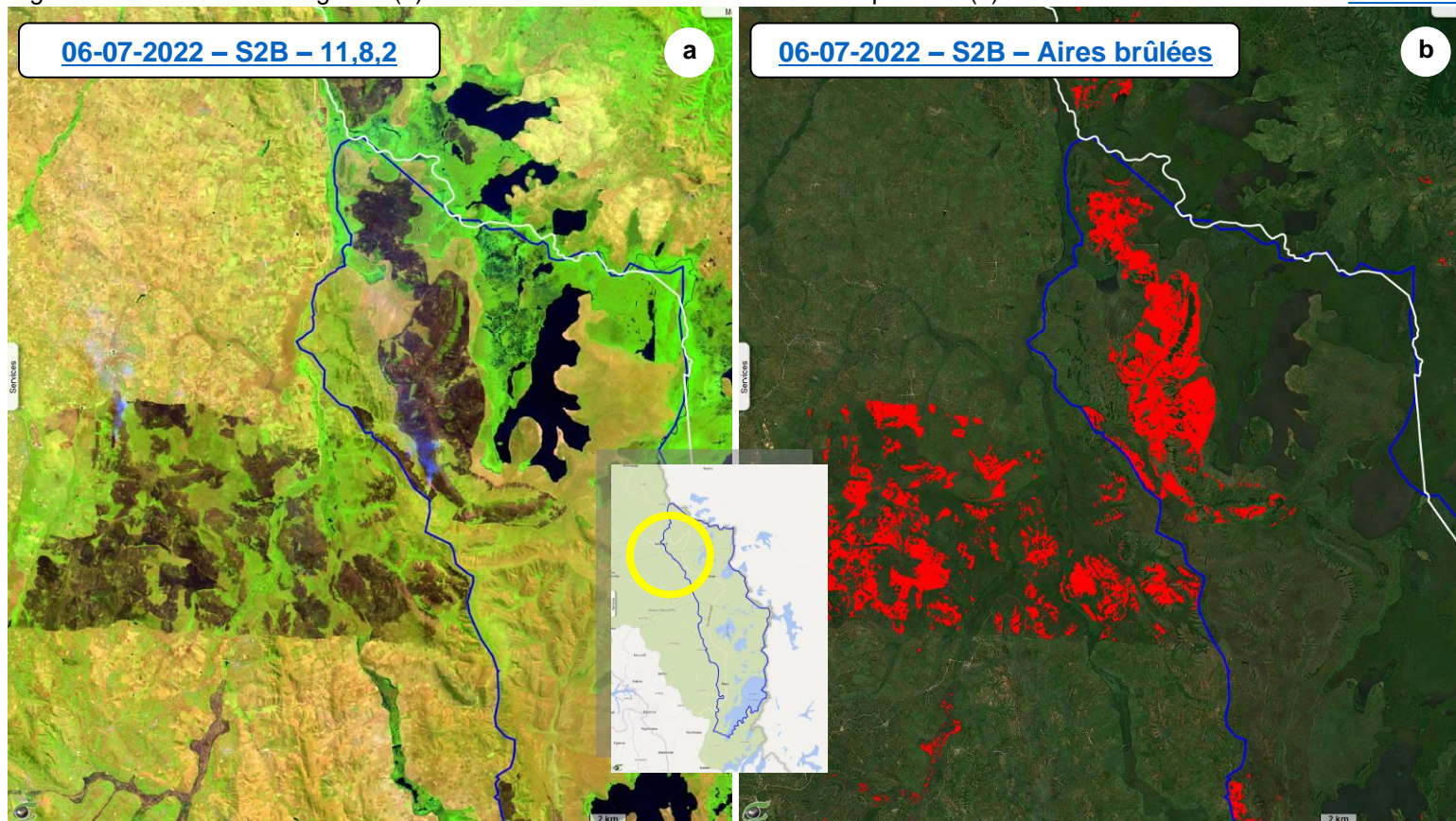


Fig.16 montre une image Sentinel-2 acquise le 6 juillet 2022 en composition colorée 11,8,2 (Fig.16a) et en composition colorée 12,11,2 (Fig.16b). Les deux compositions colorées montrent des fronts de feux actifs. Fig.16c montre le résultat des feux actifs détectés automatiquement pour la même date, restituées en rouge.

L'indicateur des feux actifs est calculé à partir de données optiques Sentinel-2 en utilisant l'indice BAIS2 (Burned Area Index for Sentinel-2).

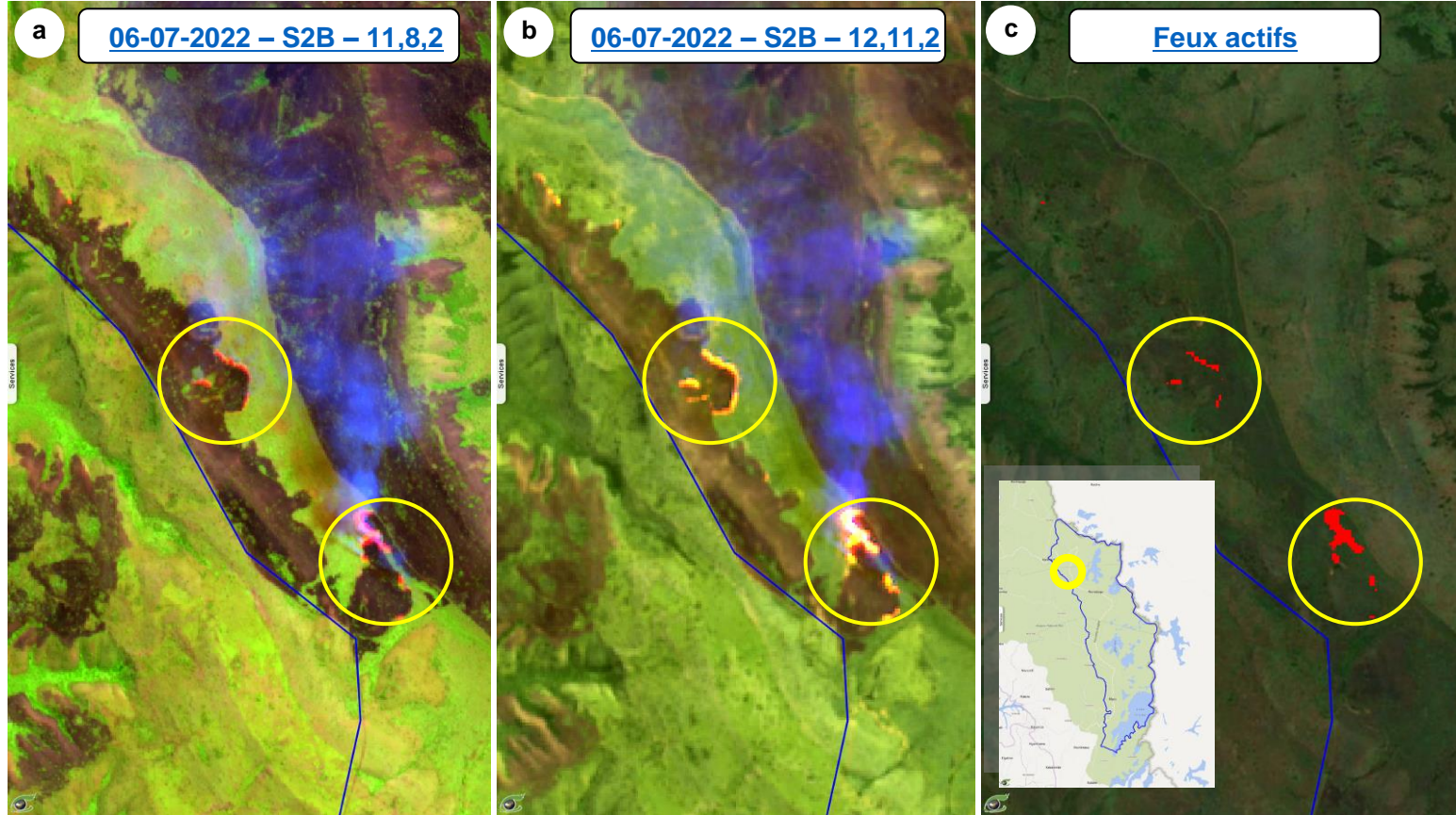
$$BAIS2 = \left(1 - \sqrt{\frac{B06 * B07 * B8A}{B4}} \right) * \left(\frac{B12 - B8A}{\sqrt{B12 + B8A}} + 1 \right)$$

Feux actifs

Park National Akagera

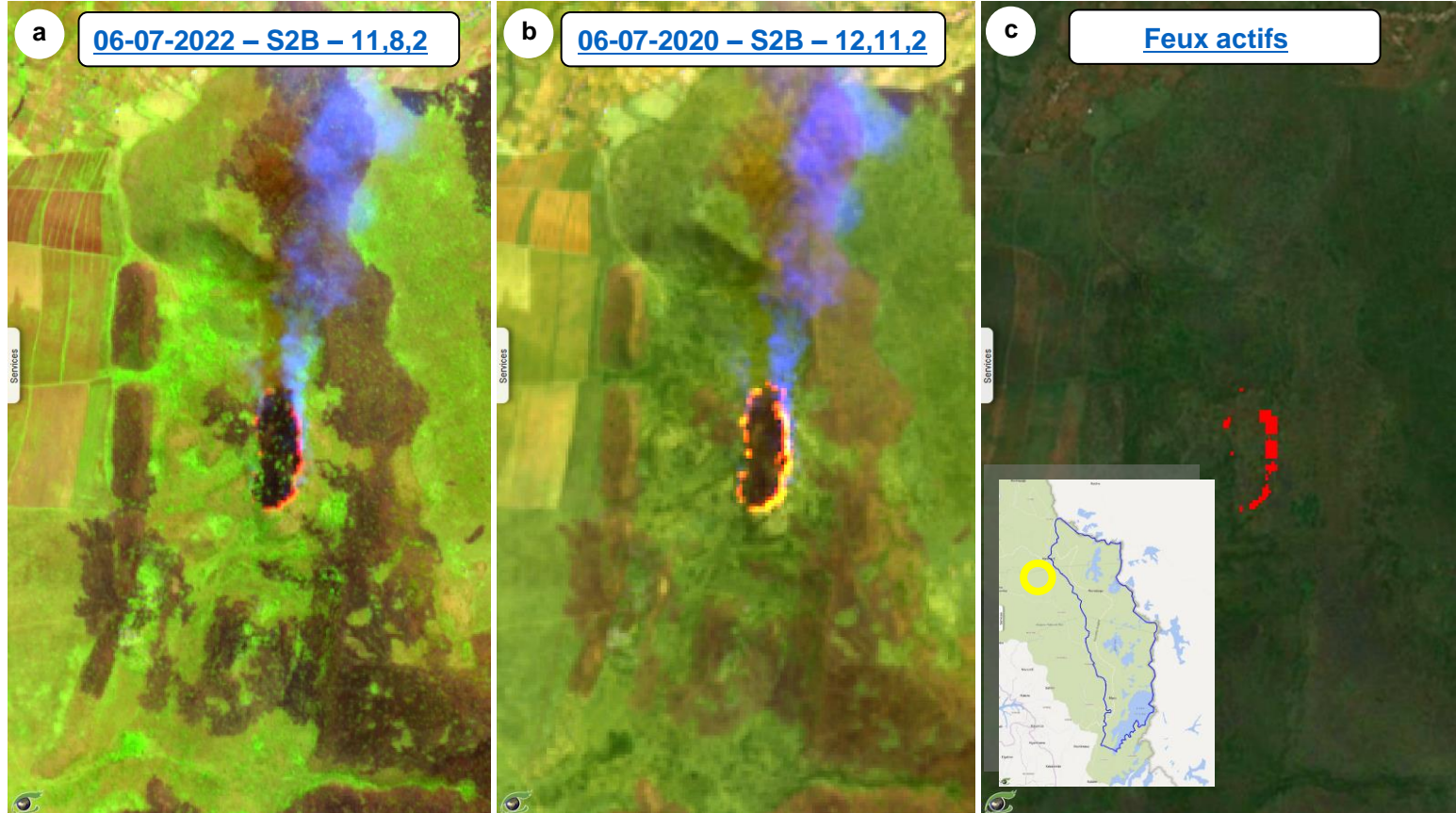
[animation](#)

Fig.16: Image Sentinel-2B acquise le 06-07-2022 (a, b) et les feux actifs détectés automatiquement (c).



[animation](#)

Fig.17: Image Sentinel-2B acquise le 06-07-2022 (a, b) et les feux actifs détectés automatiquement (c).



[animation](#)

Le satellite ICESat-2 (Ice, Cloud, and Elevation Satellite) embarque l'instrument ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System), un altimètre laser permettant de mesurer avec une grande précision les différentes variations de surface.

Le GEDI (Global Ecosystems Dynamics Investigation Lidar) utilise lui aussi une technologie laser pour produire des profils d'élévation de la Terre.

Les Fig.18 et 19 montrent par exemple 2 profils altimétriques, un de GEDI (24/08/2021, avec des contours verts) et un d'ICESat (07/03/2022, avec les contours rouges). Les deux acquisitions sont espacées de 7 mois et on ne note pas de changements significatifs de hauteur du niveau du Lac.

VisioTerra développera en 2023 un outil de « stations virtuelles de hauteur d'eau » utilisant les données de plusieurs satellites d'altimétrie ainsi que les données LiDAR embarquées dans des satellites et la station spatiale internationale.

Altimétrie spatiale Hauteur d'eau du Lac Kivu

Profils altimétriques de GEDI et ICESat-2

Fig.18: Deux profils altimétriques acquis le 24/08/2021 et le 07/03/2022 sur le Lac Kivu et scènes S1 de décembre 2021. [vue 3D](#)

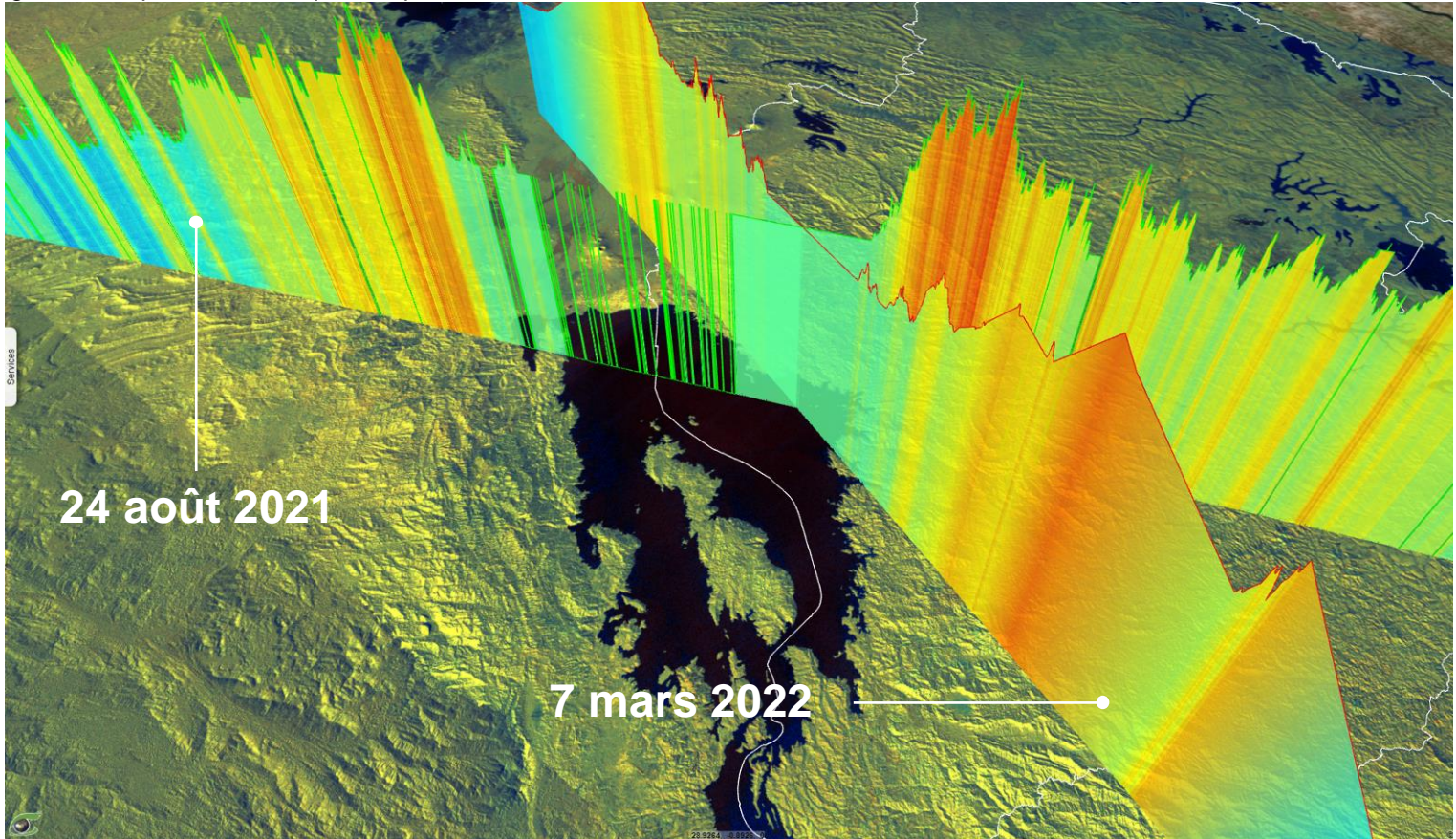


Fig.19: Deux profils altimétriques acquis le 24/08/2021 et le 07/03/2022 sur le Lac Kivu et scènes S1 de décembre 2021. [vue 3D](#)

