

La Côte ivoirienne possède divers écosystèmes et ressources naturelles (lagunes côtières, estuaires, les forêts, les plages...) qui sont d'une grande importance pour le développement du pays. La richesse et la diversité de ces ressources naturelles sont menacées par les effets des activités anthropiques et du [changement climatique](#). Ces risques sont liés à la dégradation des habitats et à la perte d'écosystèmes, à l'érosion côtière, aux inondations fluviales et à la pollution.

Cette première section est consacrée à l'étude de l'[érosion côtière](#) en Côte d'Ivoire.

L'érosion côtière (ou recul du trait de côte) est la perte de terrain le long du littoral causée par l'enlèvement de sédiments ou du substrat rocheux du littoral.

VisioTerra a collectionné plusieurs images optiques en provenance des deux missions [Landsat](#) et [Sentinel-2](#) et ce depuis 1986 jusqu'à 2022. Une méthode de « *pan-sharpening* » pour améliorer la résolution spatiale des données Landsat-7 a été utilisée. Cette méthode a permis de passer de 30m à 15m de résolution spatiale en exploitant la bande panchromatique quand cela était possible. Les images ont été traitées pour obtenir des séries chronologiques du trait de côte. Par la suite, une analyse statistique de la variation du trait de côte a permis de calculer le taux d'érosion/accrétion tout au long de la côte.

Côte d'Ivoire vue de l'espace

Erosion côtière

Fig.1 montre le taux d'érosion/accrétion en m/an. Les résultats montrent que plusieurs parties de la Côte ivoirienne sont sujettes à des taux d'érosion significatifs. Une accrétion est notée au niveau d'Abidjan. Fig.2a montre les lignes de côte interprétées sur des images optiques Sentinel-2 avec des zooms sur des villes stratégiques de la Côte ivoirienne : -Grand Béréby (Fig.2b), -San-Pédro (Fig.2c), -Fresco (Fig.2d) et -Abidjan (Fig.2e).

Fig.1: Erosion/accrétion côtière en Côte d'Ivoire.

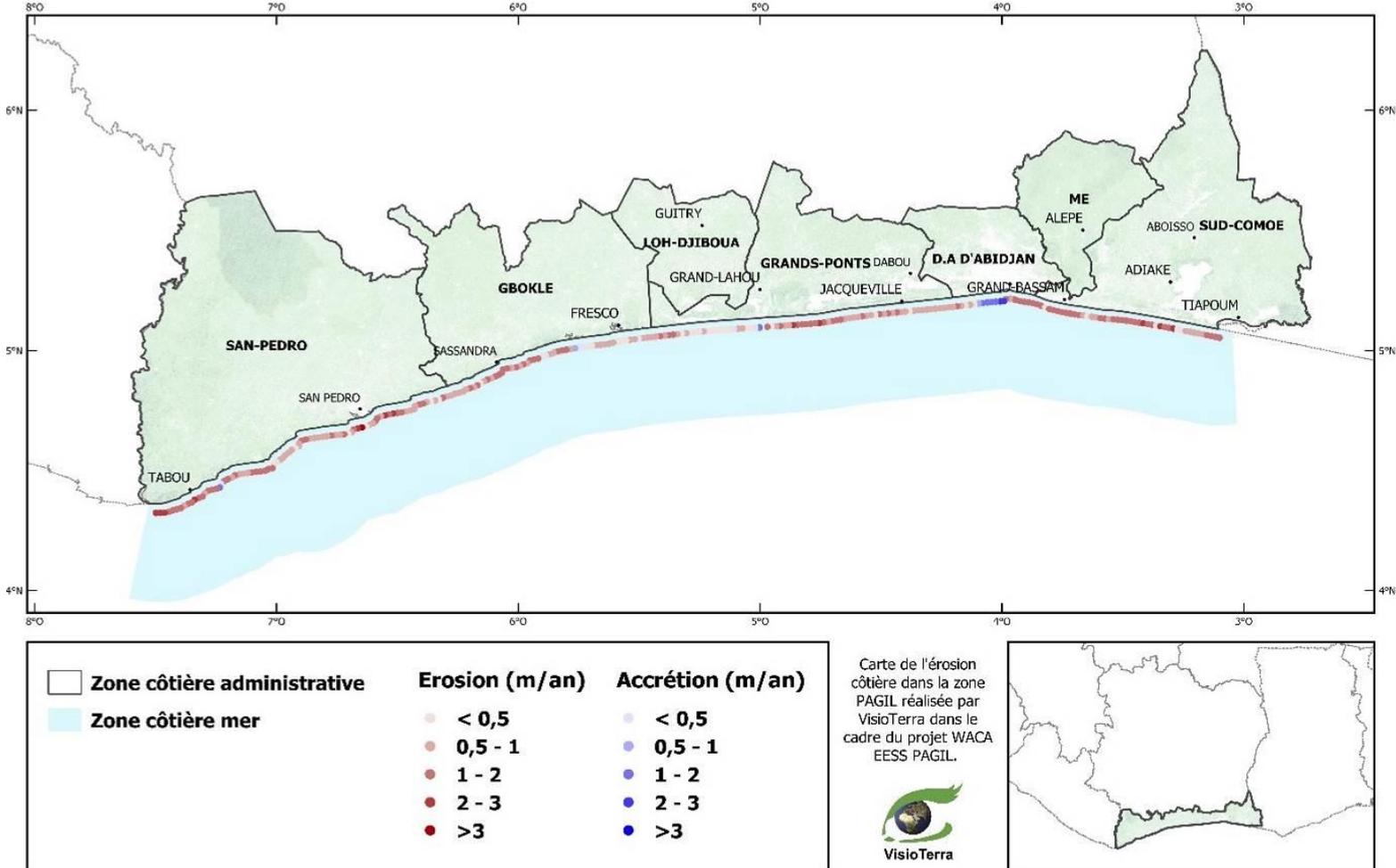
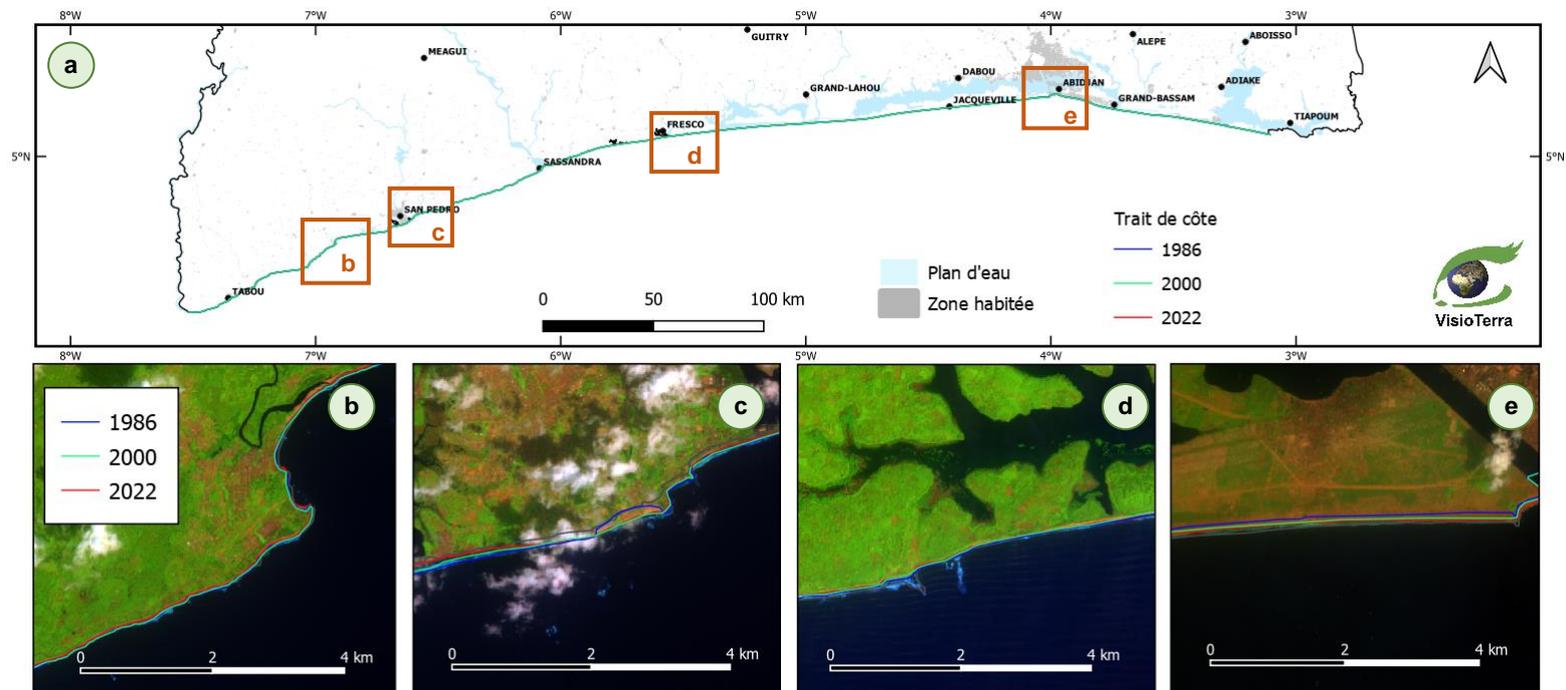


Fig.2: Erosion/accrétion côtière en Côte d'Ivoire dans des villes stratégiques.

[vue 2D](#)



Les inondations fluviales sont un des risques naturels qui menacent la Côte d'Ivoire. Chaque année, pendant la saison des pluies, la Côte d'Ivoire est touchée par des inondations. Leur fréquence et leur ampleur risquent d'augmenter dans un contexte de changement climatique et d'anthropisation des milieux naturels. La télédétection s'est avérée un moyen efficace de suivre des variables environnementales sur de grands espaces. Cette étude montre la détectabilité des zones à risque d'inondations fluviales en utilisant les images radar Sentinel-1 dans la zone administrative côtière de la Côte d'Ivoire.

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** très appréciée par les autorités du pays.

Inondations fluviales

[2D layer stack](#)

Fig.3 montre des acquisitions Sentinel-1 couvrant la zone d'étude. Fig.4a montre le risque d'inondation fluviale calculé entre 2015 et 2022 dans la zone d'étude avec un zoom sur 4 sous-préfectures : Grand-Béréby (Fig.4b), San-Pedro (Fig.4c), Fresco (Fig.4d) et Abidjan (Fig.4e). Ces figures montrent que les plus grandes villes de la Côte d'Ivoire sont sujettes à des inondations récurrentes.

Fig. 3: Zone côtière ivoirienne vue par Sentinel-1 en composition colorée VV,VH,VV.

[vue 2D](#)

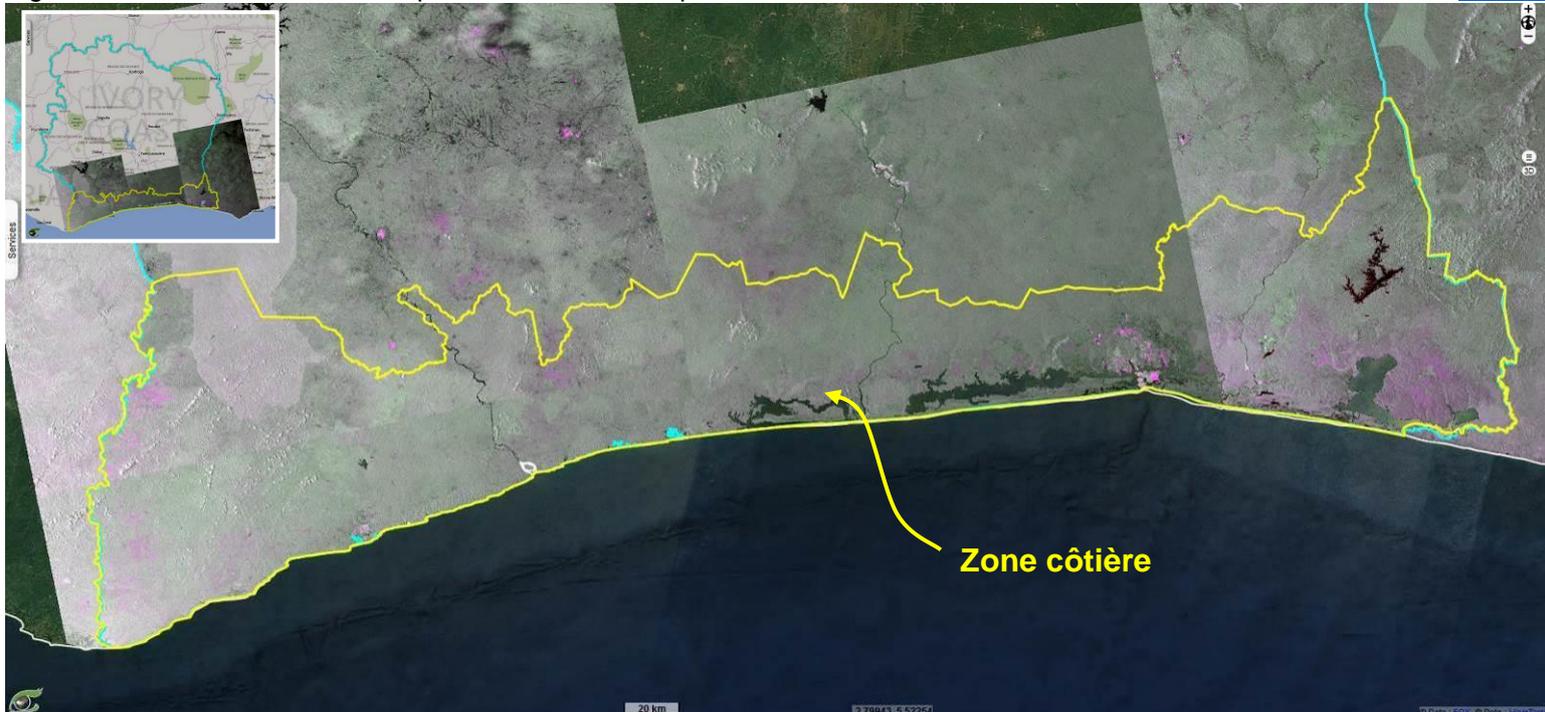
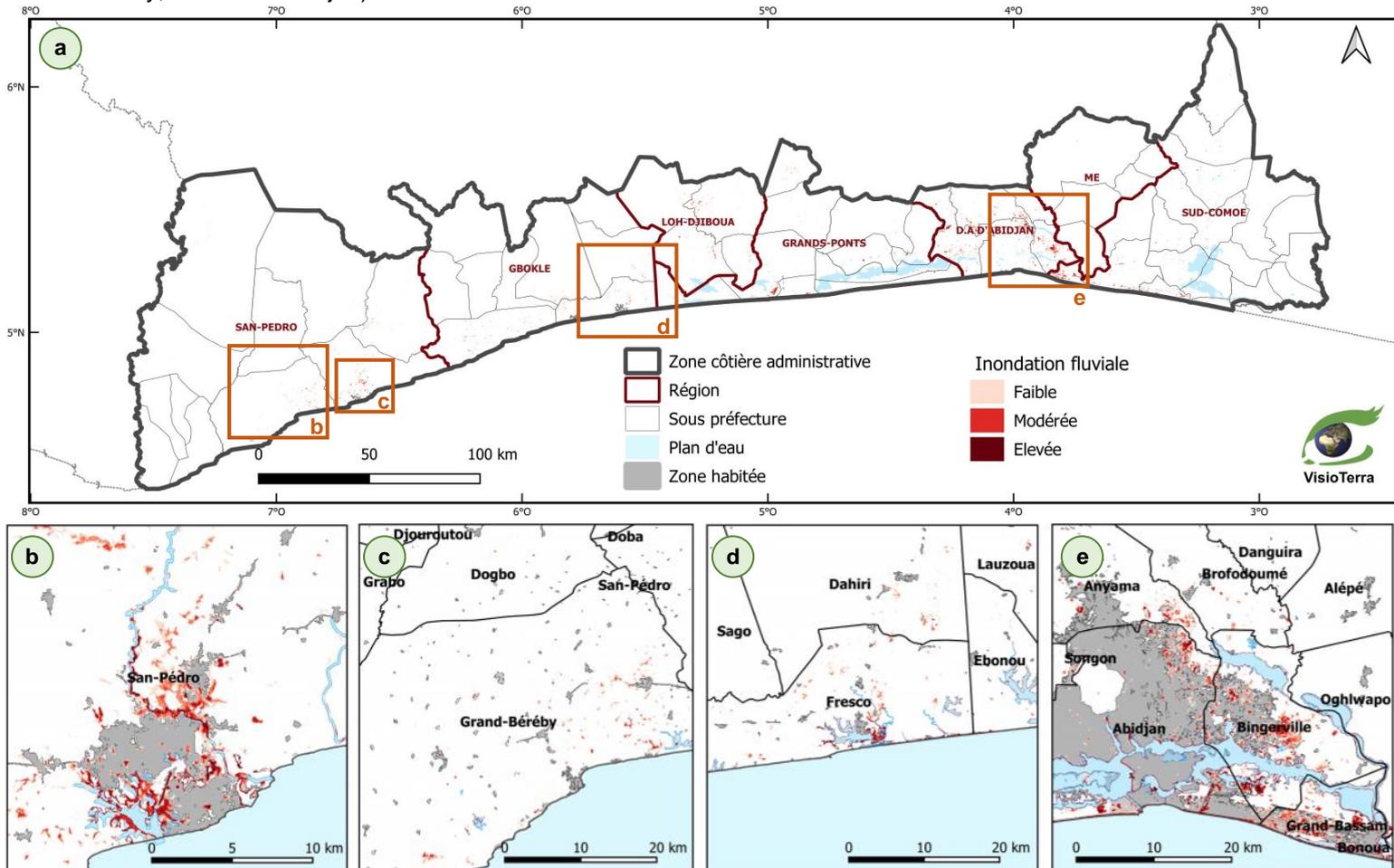
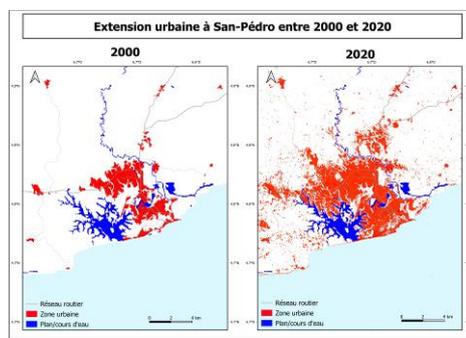


Fig.4: Risque des inondations fluviales dans la zone côtière ivoirienne avec un zoom sur 4 sous-préfectures (San-Pedro, Grand-Béréby, Fresco et Abidjan).



La méthodologie de détection des inondations est illustrée sur la ville de San-Pédro. 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.5b), on calcule la différence entre les pixels classés comme « eau » avec ceux de l'image précédente (Fig.5a). Cette différence produit une occurrence supplémentaire de la classe « inondation » (Fig.6a).

Les inondations de San-Pédro sont dues au réseau hydrographique dense, ponctué de lacs, de lagunes et d'une topographie basse (voir le Modèle Numérique d'Élévation Copernicus en Fig.6b). Située à l'exutoire d'un vaste bassin versant, la ville de San-Pédro est particulièrement vulnérable.



Inondations fluviales

Méthodologie

Le cas de San-Pédro

[animation](#)

Fig.5: Images Sentinel-1 acquises avant (a) et après (b) des inondations fluviales survenues à San-Pédro.

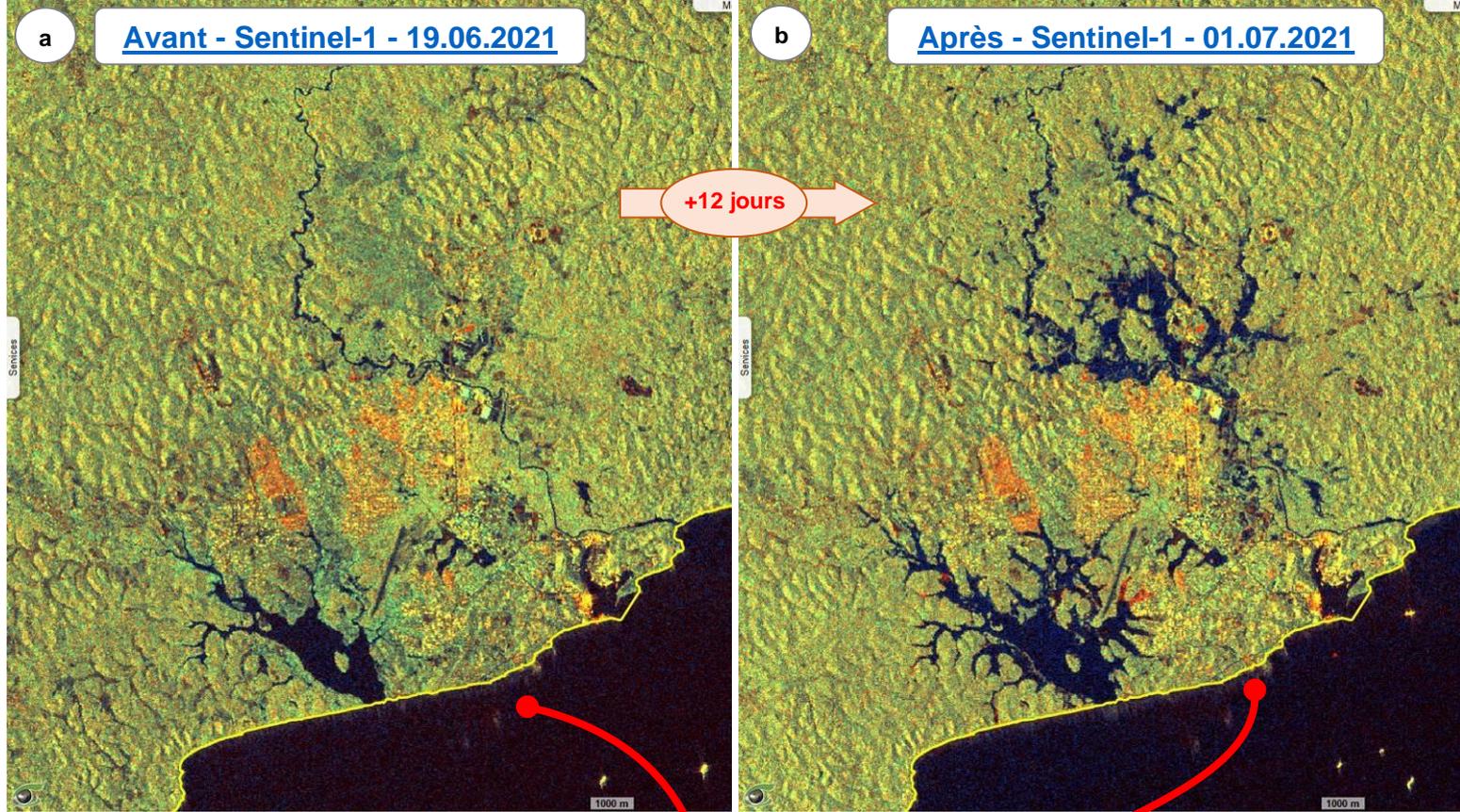
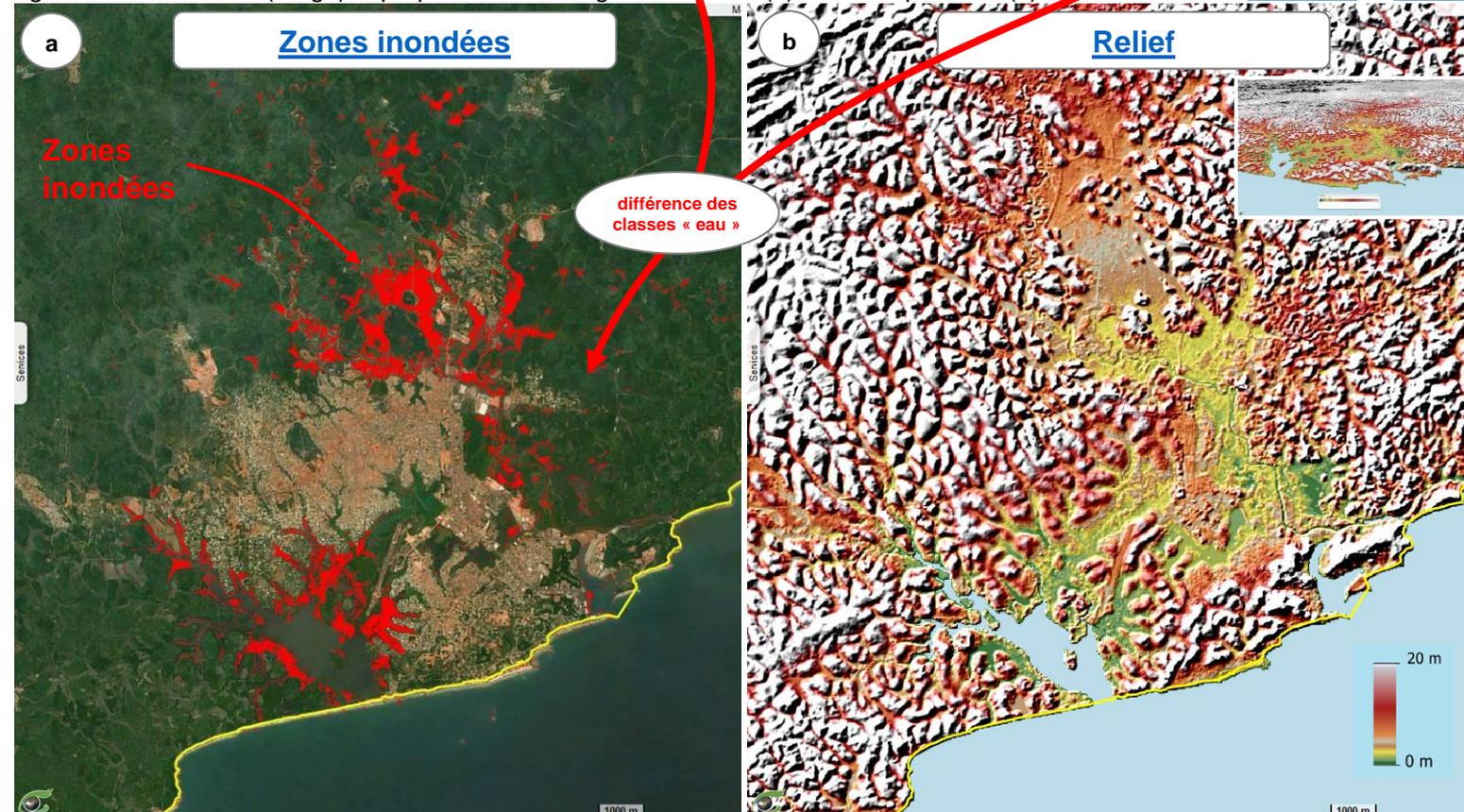


Fig.6: Zones inondées (rouge) superposées aux images Sentinel-2 (a). MNE Copernicus (b).

[animation](#) [vue 3D](#)



Cette section montre l'évolution de la déforestation en Côte d'Ivoire entre 2001 et 2020 (Fig.7) avec un zoom sur la forêt classée du M^t Sassandra. La déforestation est détectée à partir des images optiques Landsat ([Université du Maryland](#)) dans le cadre du projet GFW.

L'analyse de la déforestation de la forêt classée du M^t Sassandra montre que l'aire protégée avait quasiment disparue entre 2011 et 2015. Cette déforestation massive a eu lieu après le conflit de 2011. Une étude a été menée par VisioTerra pour les Nations Unies ([Najoui Z, Riazanoff S, Aburajab N. - UNEP \(2015\) : "Côte d'Ivoire Évaluation environnementale post-conflit" - Programme des Nations Unies pour l'environnement. ISBN: 978-92-807-3477-5](#)).

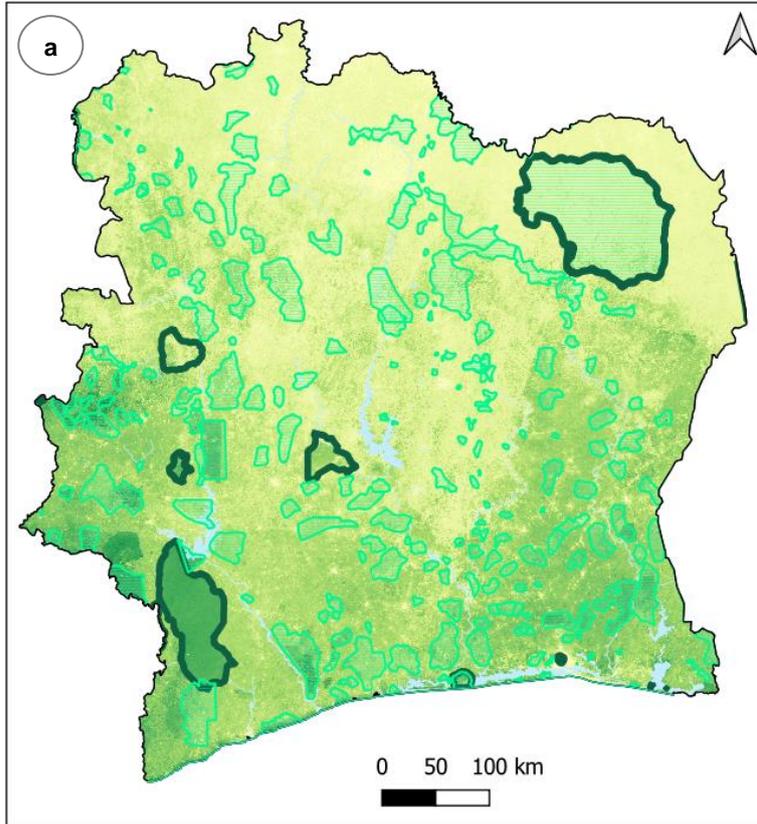


Perte du couvert forestier entre 2001 et 2020

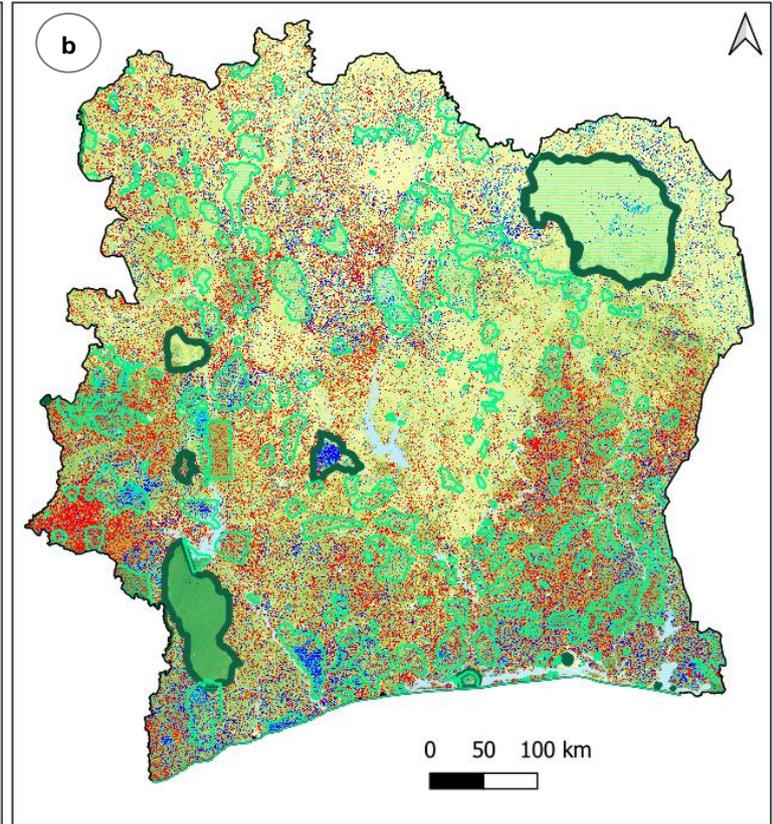
[Vidéo](#)

Fig.7: Déforestation entre 2001 et 2020 en Côte d'Ivoire.

Couvert forestier en 2000



Déforestation entre 2001 et 2020



Aires protégées

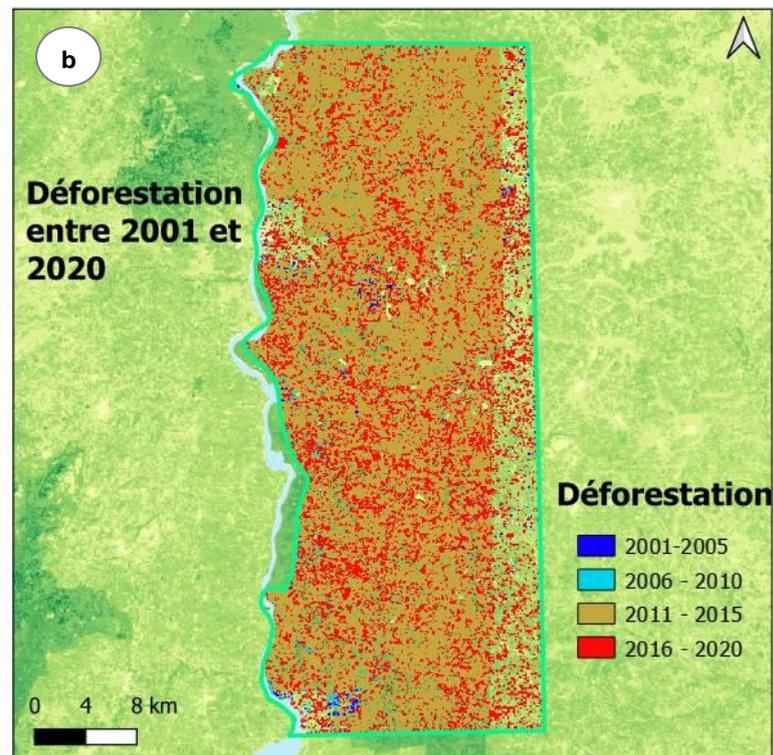
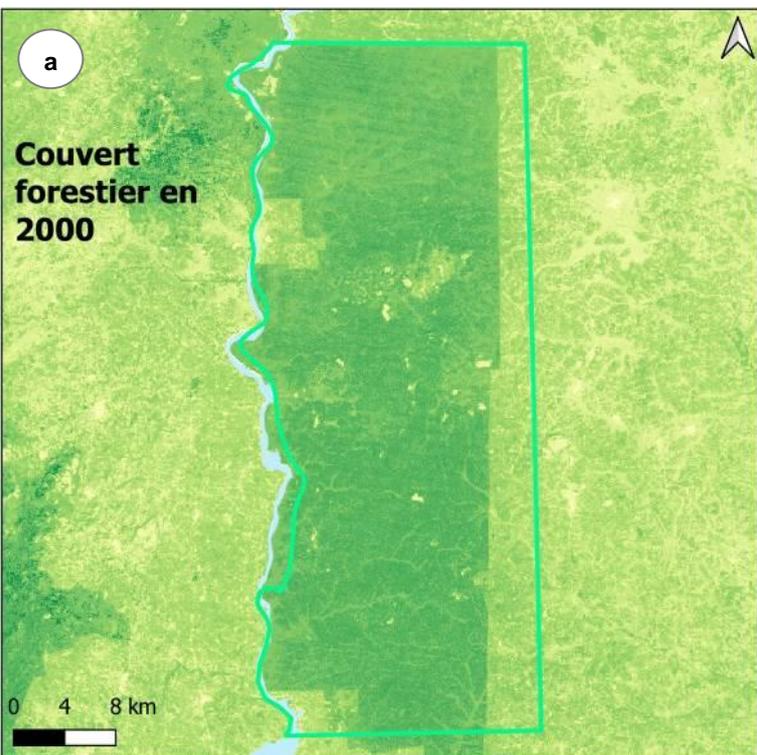
Park National/Réserve de Faune Autre aire protégée

Déforestation

2001-2005 2006 - 2010 2011 - 2015 2016 - 2020

[Vidéo](#)

Fig.8: Déforestation entre 2001 et 2020 dans la forêt classée du Mt Sassandra.



FLEGT Watch est un système de détection automatique de la déforestation développé par VisioTerra. Il opère dans la surveillance des forêts d'Afrique Centrale et d'Afrique de l'Ouest en utilisant des images satellitaires radar **Sentinel-1**. Cette section montre deux exemples de déforestation détectées par FLEGT Watch dans les forêts classées Mabi et Yaya qui sont des zones de conservation de la Côte d'Ivoire.

Dans chacun des deux exemples, on montrera les images radar Sentinel-1 (1^{ère} ligne) puis optique Sentinel-2 (2^{ème} ligne) avant (1^{ère} colonne a) et après (2^{ème} colonne b) l'événement de déforestation détecté automatiquement dans l'image radar (en haut et à droite).

Dans l'image radar (Fig.9), on constate une extension des zones déforestées dans la partie nord-est de la forêt classée Yaya. L'analyse de l'image optique **Sentinel-2** (Fig.10) confirme que la forêt (Fig.10-a) a été nettement coupée en octobre 2021 (Fig.10-b).



Déforestation détectée par FLEGT Watch

Forêt classée Yaya

Event #1618464 - CIV GNT-CI06

[2D layer stack](#)

Fig.9: Sentinel-1A moyenne 13-09-2021 → 19-10-2021 (a) et 31-10-2021 (b).

[vue_gauche](#) [vue_droite](#) [animation](#)

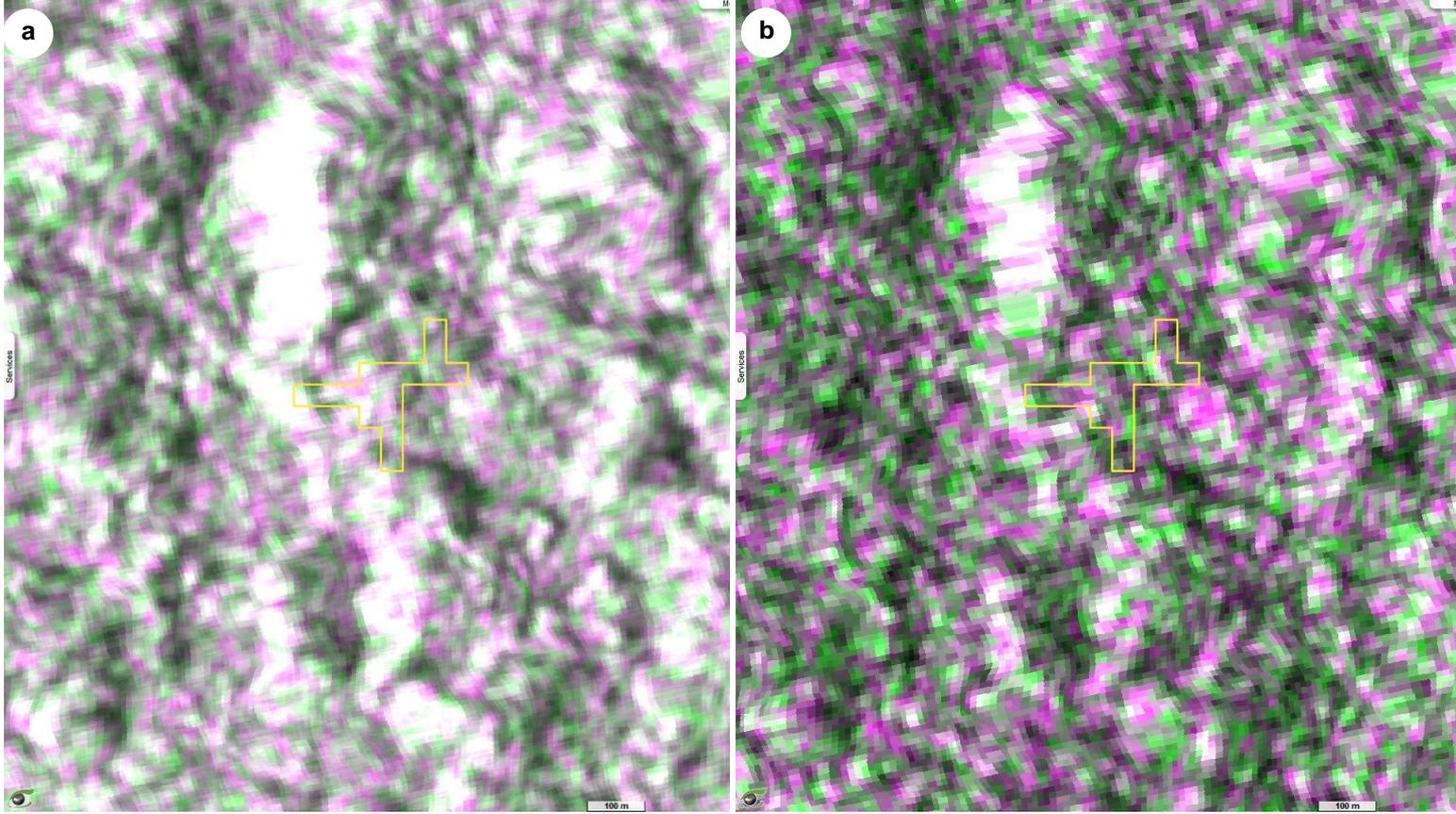
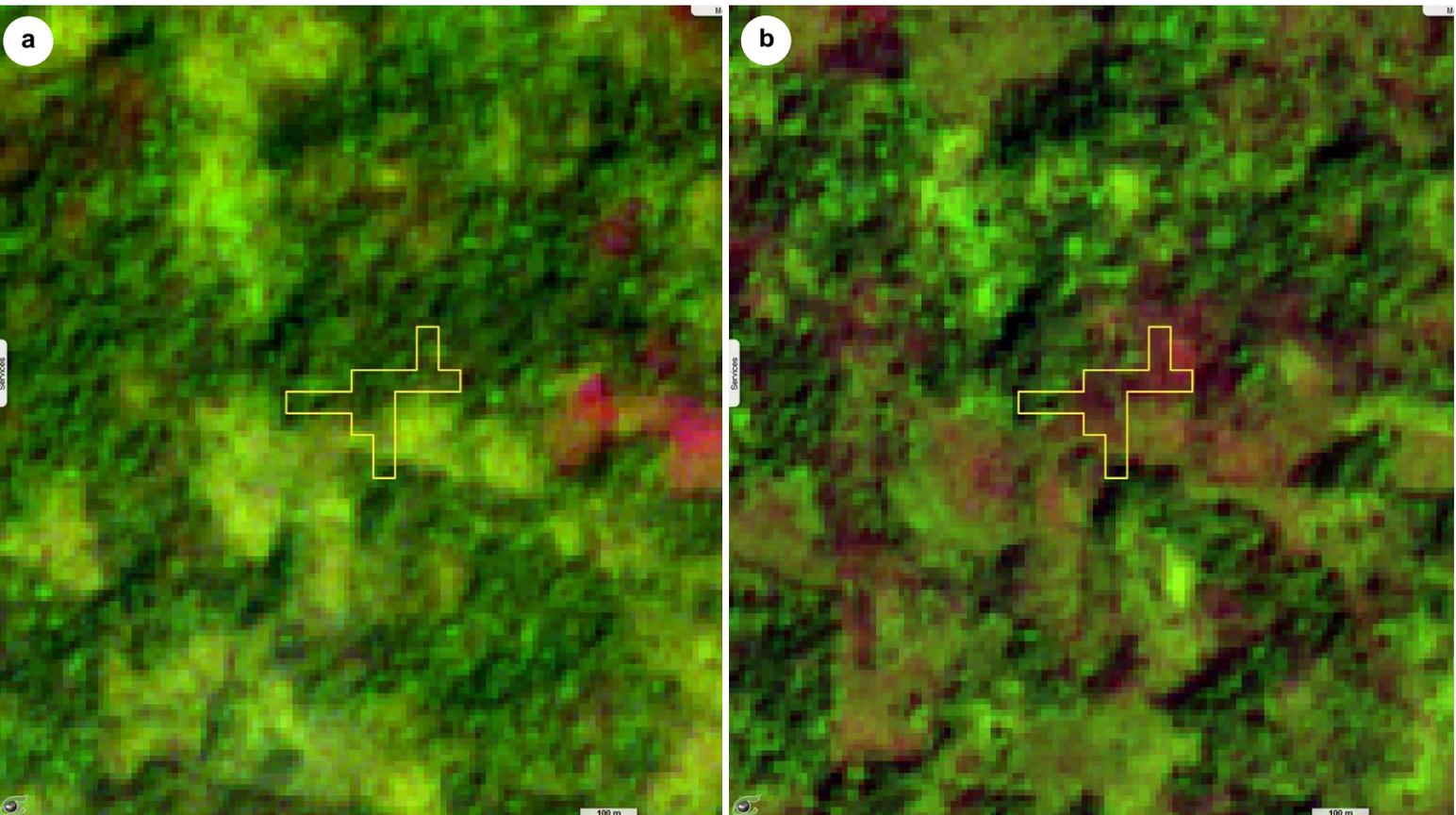


Fig.10: Sentinel-2A et Sentinel-2B observées le 05-01-2020 (a) et le 25-12-2022 (b).

[vue_gauche](#) [vue_droite](#) [animation](#)



La Fig.11 montre un exemple de déforestation survenue dans la forêt classée Mabi et détectée sur l'image radar Sentinel-1 acquise le 11 juin 2021. Cette détection a été confirmée par l'image optique Sentinel-2 (Fig.12).

On notera que la forêt est déjà dégradée et que les coupes concernent des arbres limitant des parcelles sans doute dédiées à l'agriculture ou au pâturages.



Déforestation détectée par FLEGT Watch

Forêt classée Mabi

Event # 1341104 - CIV GNT-CI04

[2D_layer_stack](#)

Fig.11: Sentinel-1A moyenne 22-04-2021 → 28-05-2021 (a) et 09-06-2021 (b).

[vue_gauche](#) [vue_droite](#) [animation](#)

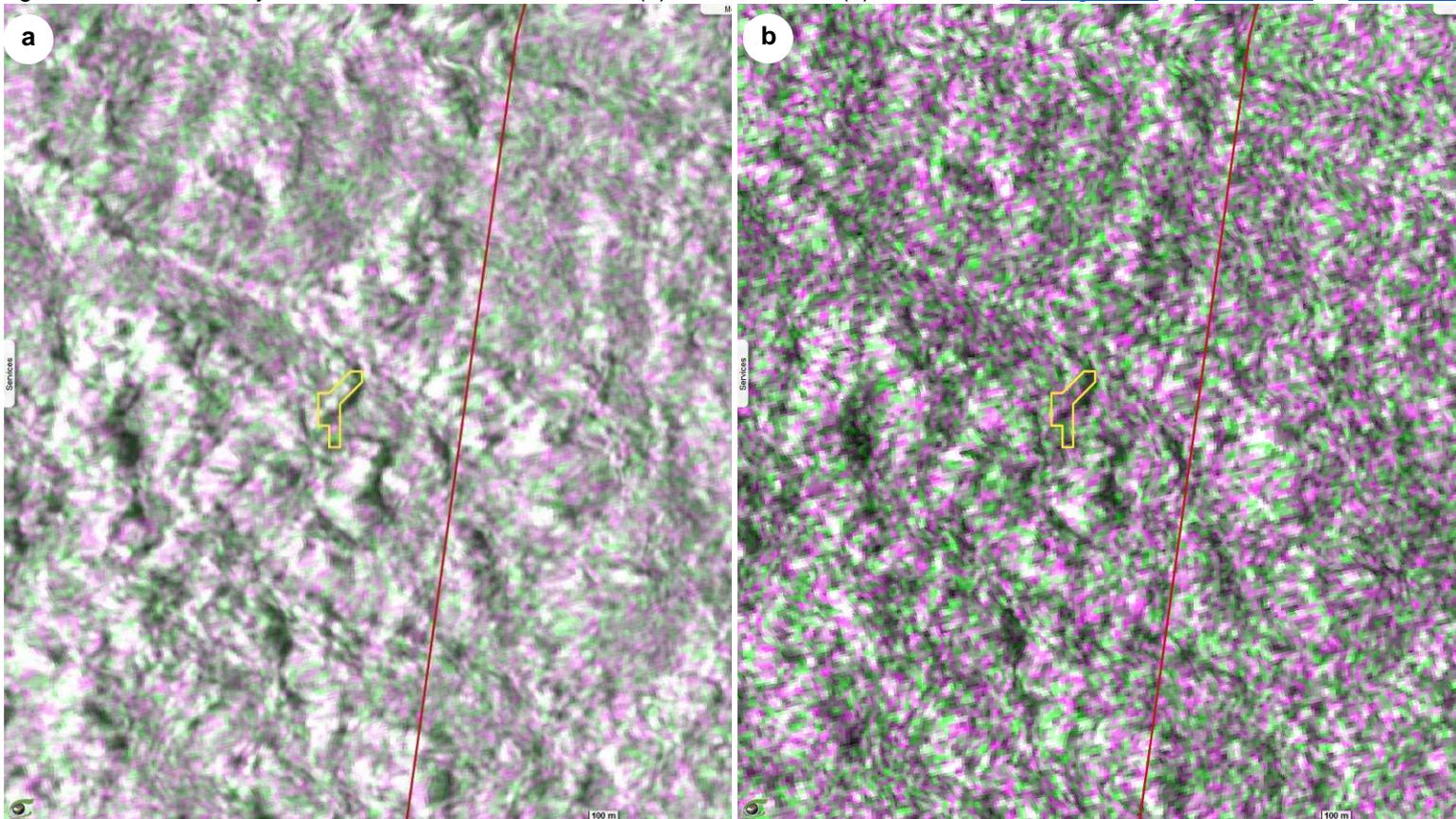
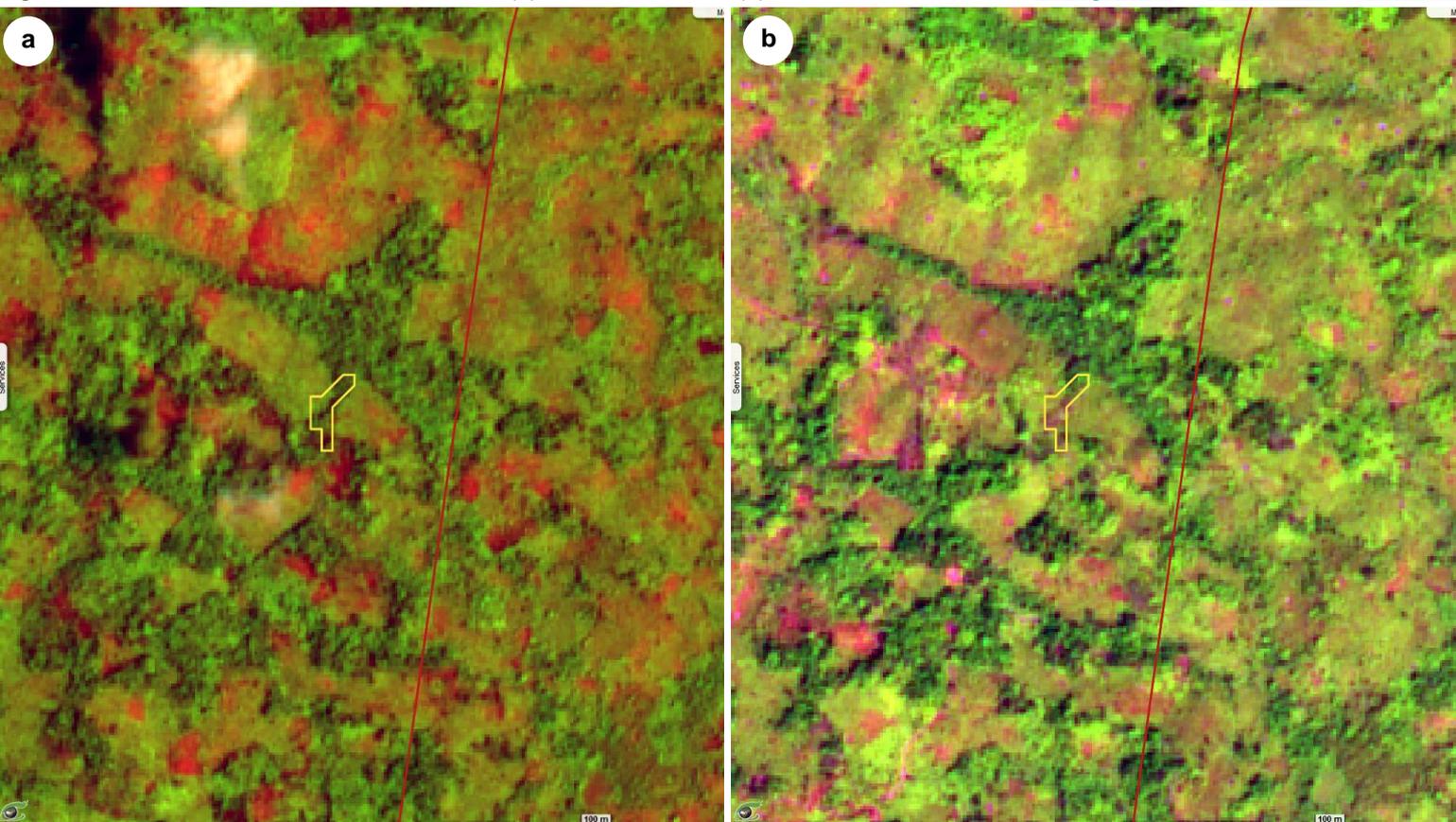


Fig.12: Sentinel-2B observées le 05-03-2021 (a) et le 25-12-2022 (b).

[vue_gauche](#) [vue_droite](#) [animation](#)

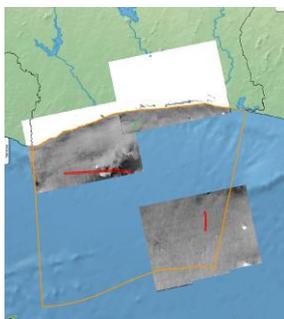


Les scènes radar Sentinel-1 sont utiles pour surveiller les nappes de pétrole dans les zones marines. La polarisation VV des images Sentinel-1 permet d'observer facilement les nappes de pétrole à la surface de la mer. Ces nappes peuvent être témoins de pollutions anthropiques (*Oil spills*) causées par le déballastage des navires ou les fuites des plateformes pétrolières. Les nappes de pétrole peuvent également avoir une origine naturelle à partir des réservoirs sous-marins (*oil seepages*).

Cette section montre une étude de la pollution détectée à partir des images radar Sentinel-1 dans la Zone Exclusive Economique (ZEE) de la Côte d'Ivoire.

Fig.13 montre des exemples de nappes d'huile provenant de plateformes pétrolières (Fig.13a, Fig.13b), de déballastages de bateau (Fig.13c) et de suintements naturels (Fig.13d). Fig.14 montre la pollution marine dans la ZEE de la Côte d'Ivoire entre 1994 et 2022 en provenance des bateaux et des plateformes d'exploitation pétrolière.

La méthodologie de détection est décrite dans l'article scientifique édité par Zhou & al (VisioTerra) : <https://essd.copernicus.org/articles/14/4569/2022/essd-14-4569-2022.pdf>.



Pollution marine détectée par Sentinel-1

[2D layer stack](#)

Fig.13: Exemples de pollution détectées dans la ZEE de la Côte d'Ivoire.

[vue a](#) [vue b](#) [vue c](#) [vue d](#)

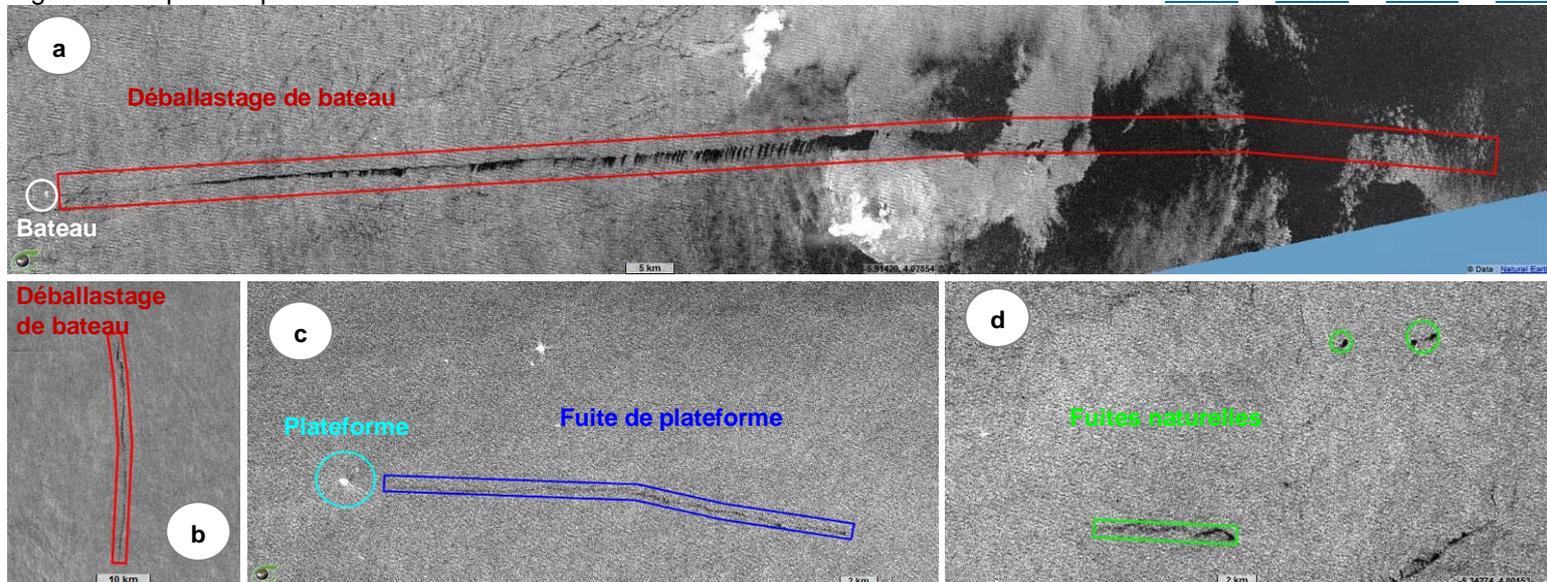
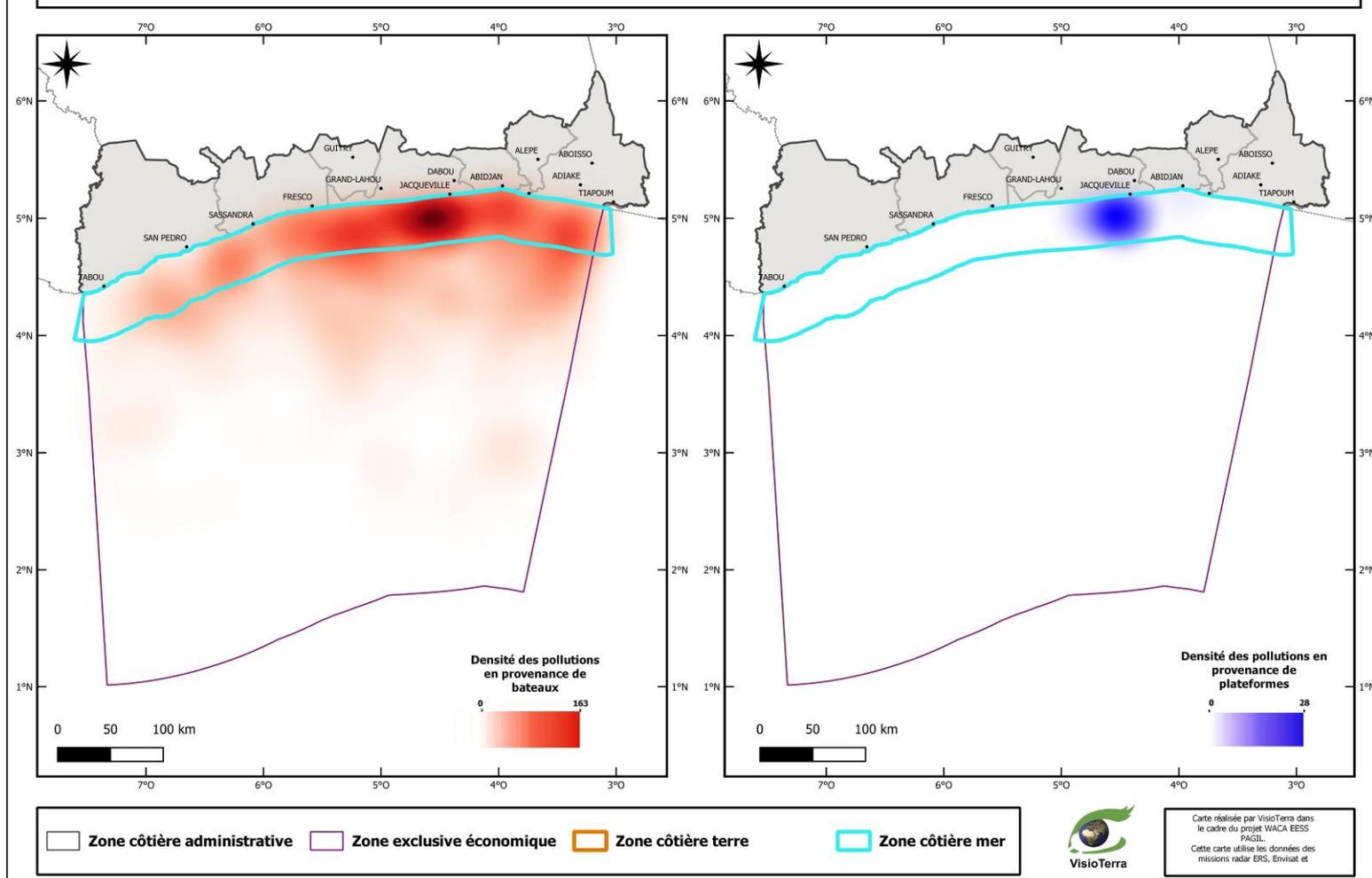


Fig.14: Pollution marine dans la zone économique exclusive (ZEE) de la Côte d'Ivoire entre 1994 et 2022 en provenance des bateaux (gauche) et des plateformes d'exploitation pétrolière (droite).

Pollution marine en hydrocarbures dans la ZEE de la Côte d'Ivoire entre 1994 et 2022



Les données de la 6^{ème} phase [CMIP6](#) de comparaison des modèles climatiques globaux ([CMIP6_2021](#)) décrivent l'évolution des variables climatiques essentielles parmi lesquelles figurent les valeurs de température MIN (nocturne), température MAX (Diurne) et précipitations selon les deux scénarios SSP245 et SSP585 des années 1950 à 2100. Par rapport au forçage radiatif d'origine humaine (RCP ou *Representative Concentration Pathway*) mis en œuvre dans la 5^{ème} phase [CMIP5](#) (*Coupled Model Intercomparison Project*), la 6^{ème} phase CMIP6 considère deux variables : les scénarios socioéconomiques de référence SP1, SP2, SP3, SP4 et SP5 (tenant compte du PIB par habitant, de la population, de la gouvernance, de l'éducation et de la technologie) et du forçage radiatif de 2.6, 4.5, 6.0 et 8.5 W/m² comme dans le projet CMIP5. Cette combinaison apparaît dans le nom du scénario SSP (*Shared Socioeconomic Pathways*). Par exemple, SSP245 correspond à SSP2 à 4.5 W/m² et SSP585 correspond à SSP5 à 8.5 W/m². Dans cette étude, les données utilisées proviennent du modèle [IPSL](#).

Les figures ci-dessous montrent l'évolution des trois variables : -température MIN (nocturne) et -température MAX (diurne) selon les deux scénarios SSP245 et SSP585 des années 2000, 2020, 2040, 2060, 2080 et 2095. L'analyse a été réalisée entre l'année 2000 (donnée de référence) et l'année 2095 en agrégant les données sur 11 années au tour de la date pivot. Par exemple, les mesures de l'année 2020 seront la moyenne du modèle entre 2015 et 2025 inclus. Par la suite une analyse différentielle a été réalisée par rapport à l'année de référence (2000).

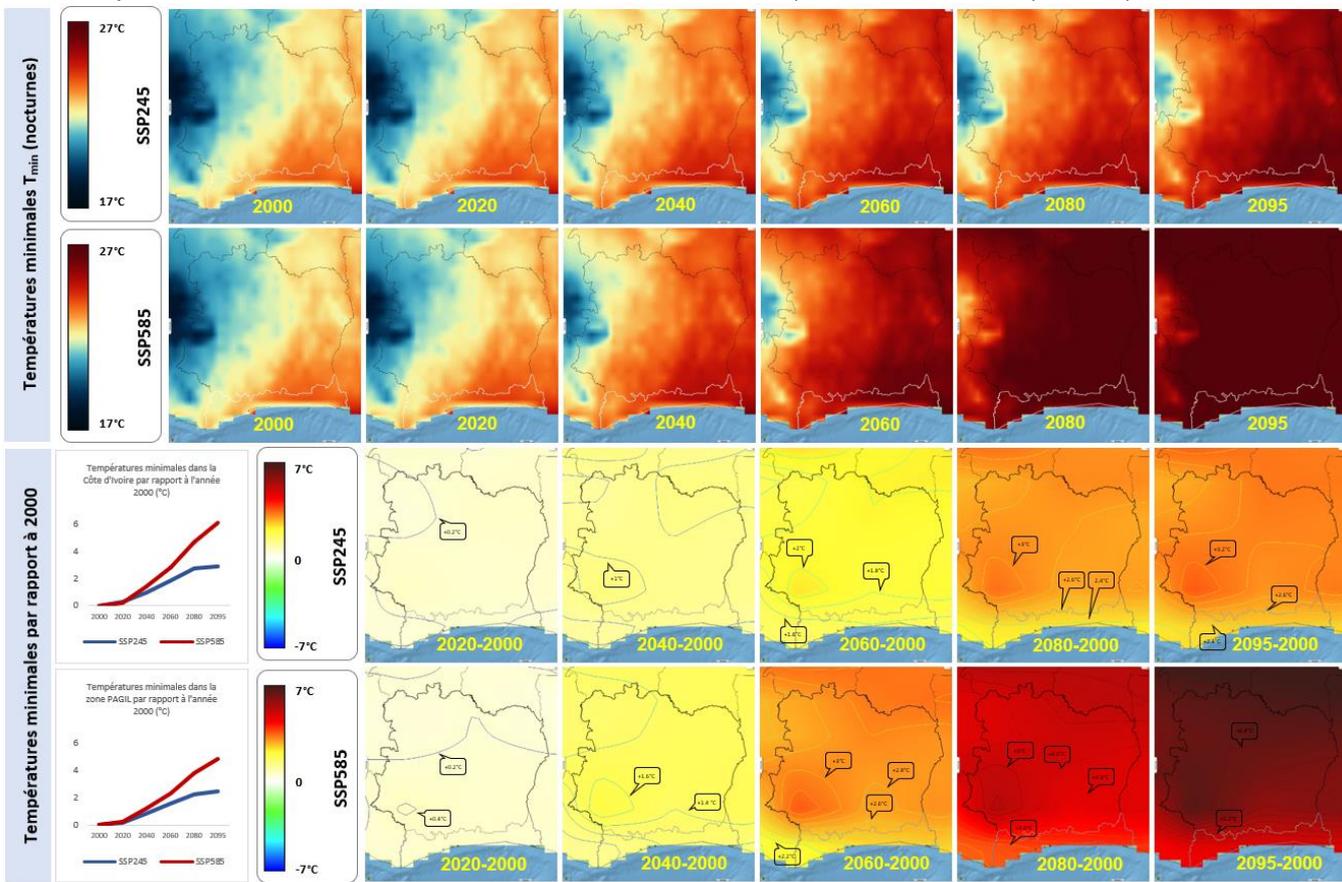
Changement climatique Températures

Les résultats de cette analyse montrent une augmentation des températures maximales et minimales pour les deux scénarios au niveau de toute la Côte d'Ivoire.

Fig.15: Evolution des température minimales et maximales en Côte d'Ivoire.

T_{min} (SSP245 et SSP585) + T_{max} (SSP245 et SSP585)

Températures minimales T_{min}



Températures maximales T_{max}

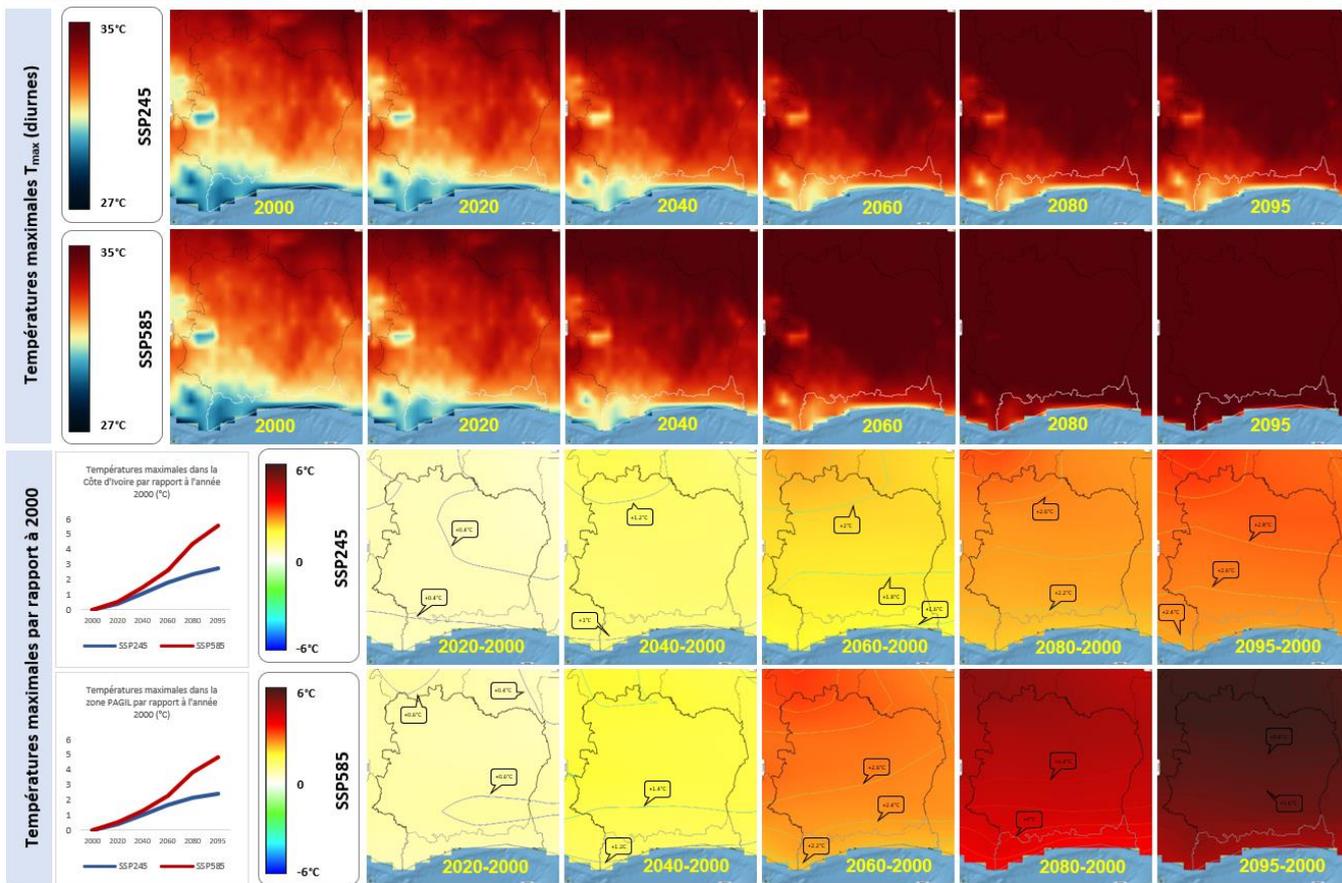


Fig.16 montre l'évolution des précipitations dans la Côte d'Ivoire selon les deux scénarios SSP245 et SSP585 des années 2000, 2020, 2040, 2060, 2080 et 2095. Comme pour les températures, l'analyse a été réalisée entre l'année 2000 (donnée de référence) et l'année 2095 en agrégant les données sur 11 années autour de la date pivot. Comme en témoigne la Fig.16, la diminution des précipitations, et en particulier selon le scénario SSP585, induira une diminution des inondations.

Fig.17 montre la prévision de montée des eaux en moyenne sur le globe selon les scénarii SSP (https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf).

Selon cette figure, il est assez probable dans ces conditions que l'élévation du niveau moyen des mers dépasse les 2 mètres avant la fin du siècle en 2100. L'impact d'une telle élévation est simulé en Figure 18 pour la ville d'Abidjan,

Changement climatique Précipitations

Fig.16: Evolution des précipitations en Côte d'Ivoire.

Vidéos Pr ([SSP245](#) et [SSP585](#))

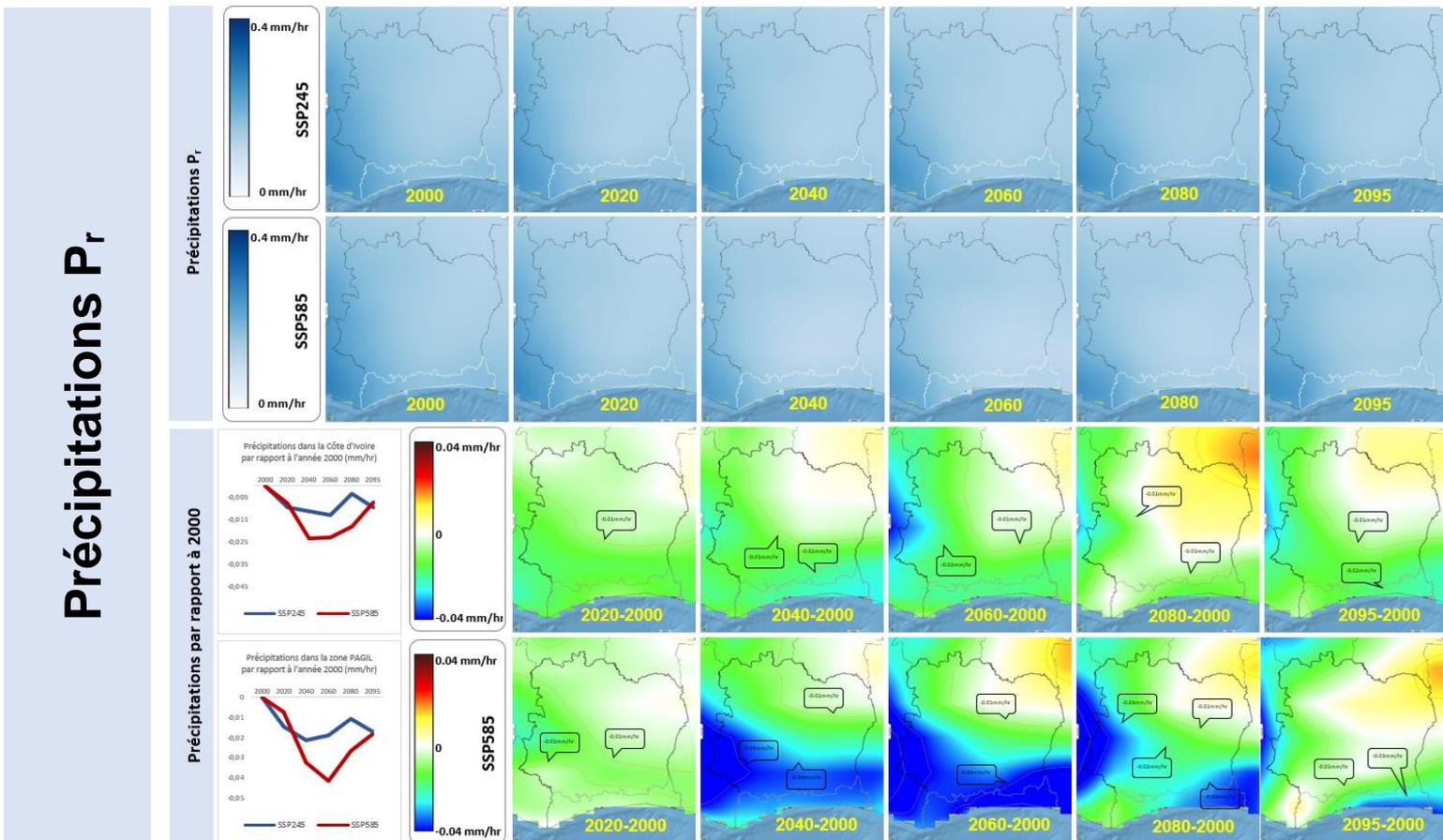


Fig.17: Prévision de montée des eaux en moyenne sur le globe selon les scénarii SSP.

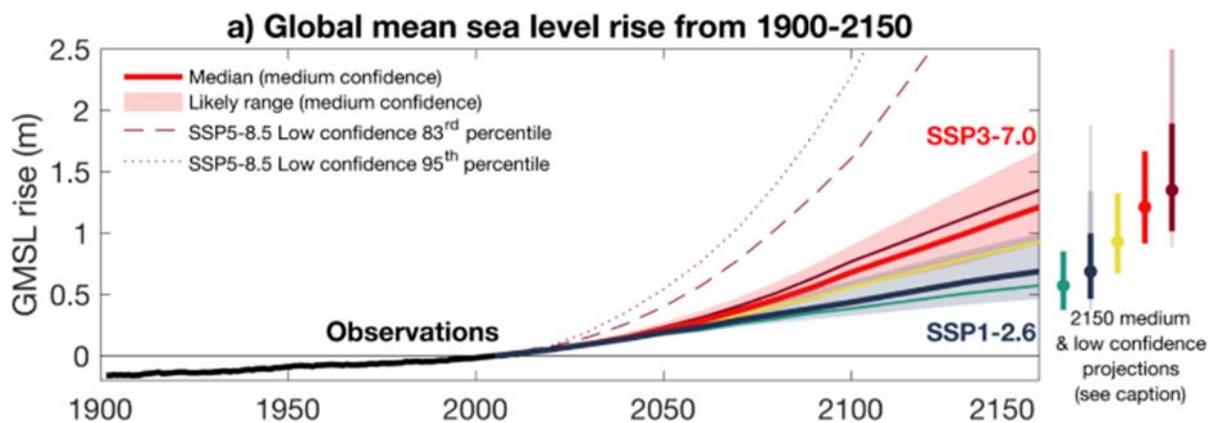


Fig.18: Niveau d'eau actuel (gauche) et simulation de l'élévation du niveau de la mer de 2 mètres (droite) à Abidjan.



On dénombre de nombreux sites d'orpaillage illégal sur le territoire de la République de Côte d'Ivoire. L'annonce ci-contre de la [SODEFOR](#) témoigne d'une opération de la Direction du Centre de Gestion de Korhogo, des unités de Gestion Forestières de Boundiali, Nougbo, Foubou, Tafiré et Badenou dans la Forêt Classée de Nyamboué le 10 novembre 2021 pour le démantèlement d'un site d'orpaillage clandestin. (source [KOACI](#)).

Comme on peut l'observer dans la figure Fig.19, on peut facilement détecter les feux actifs ainsi que les aires brûlées à partir des images optiques HR Sentinel-2.

Une surveillance continue d'année en année (Fig.20) montre que la dégradation observée en 2016 et 2017 s'est relâchée en 2018 et 2019. On observe un regain de dégradation depuis 2020 illustré par l'étendue des aires brûlées.



Orpaillage dans la Forêt Classée de Nyamboué

Vues de Sentinel-2



[vue 2D](#)

Fig.19 : Sentinel-2 observée le 21 février 2023 - Repérage des feux actifs.

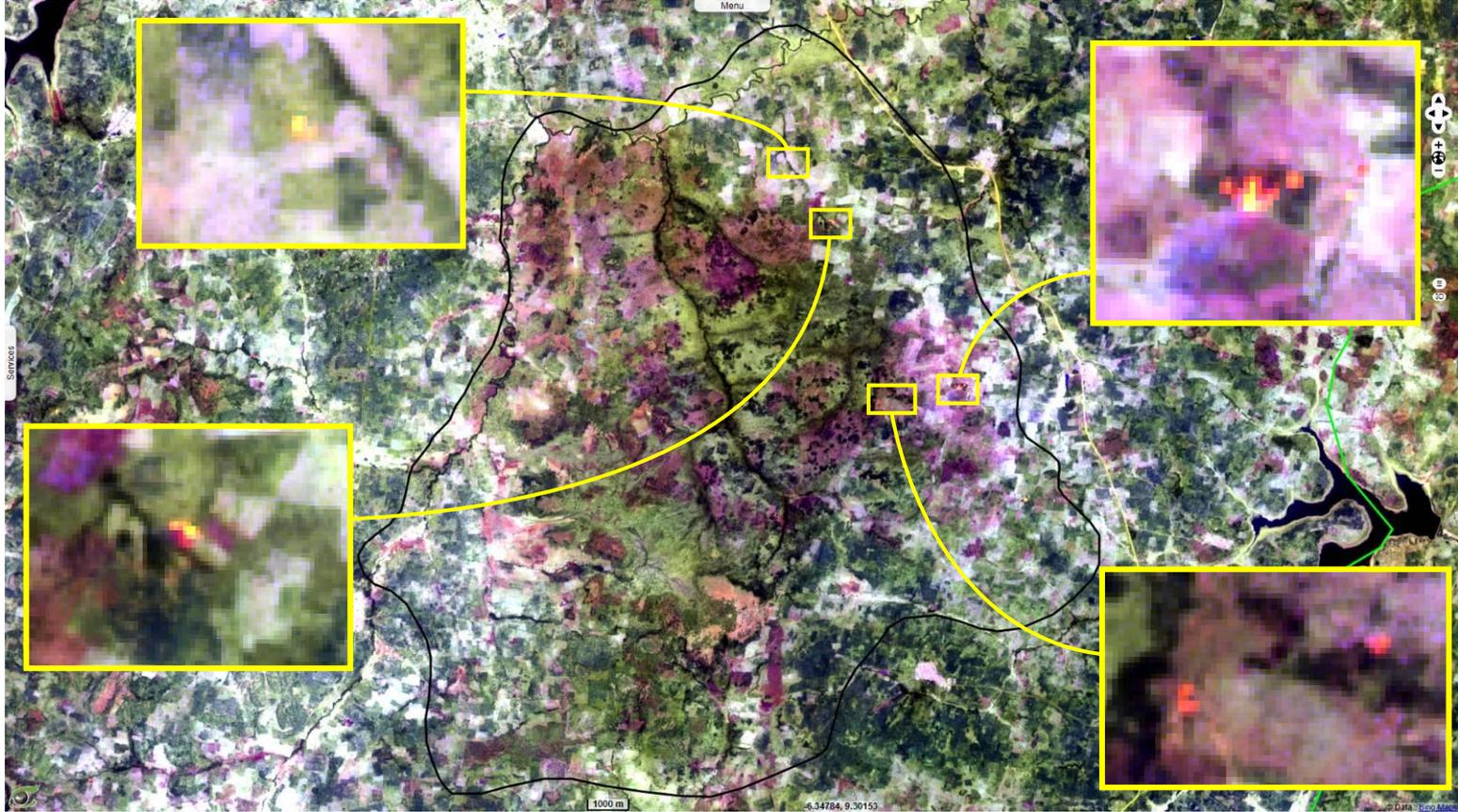
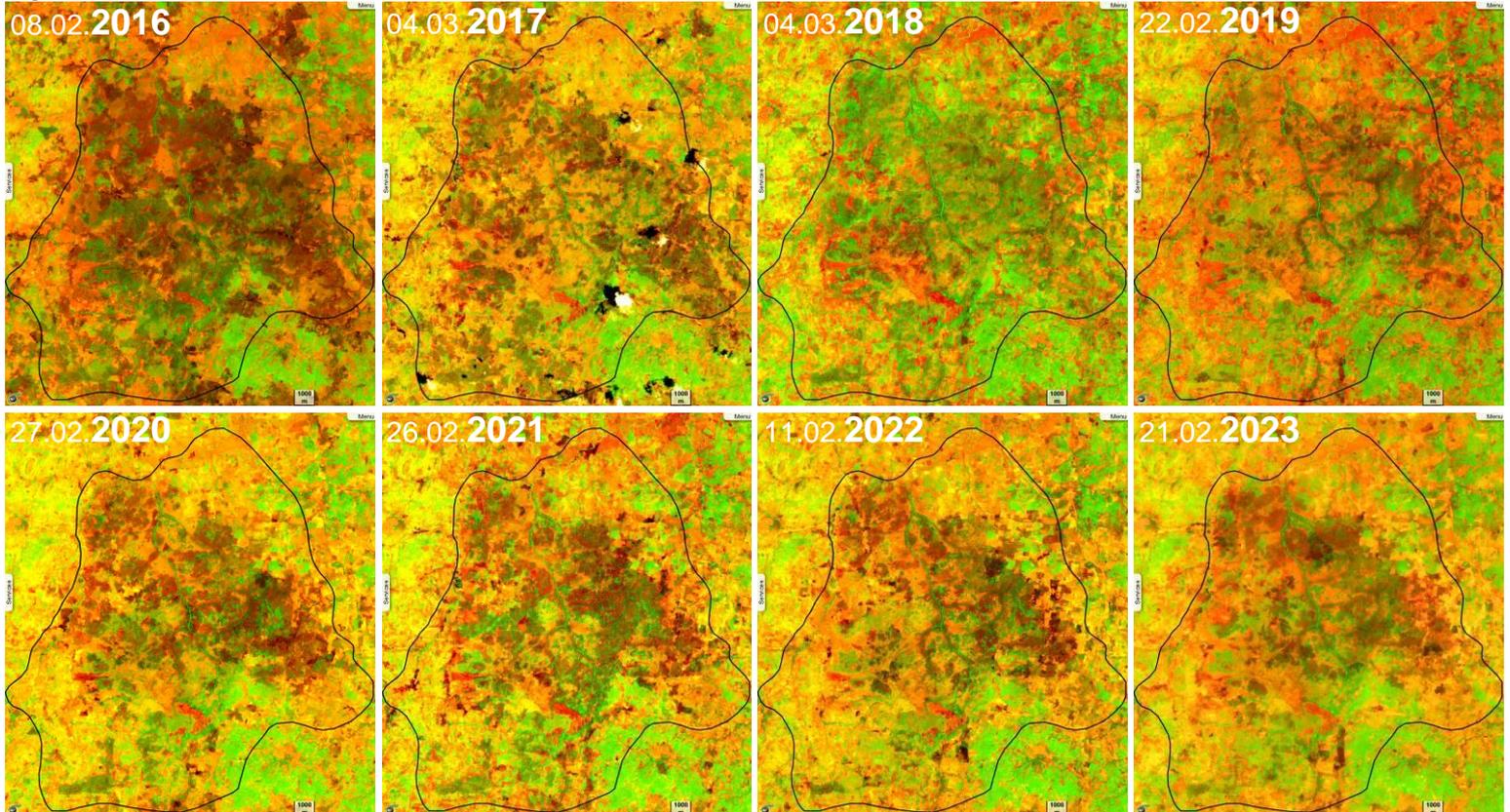


Fig.20: Scènes Sentinel-2 observées aux mois de février/mars de 2016 à 2023.

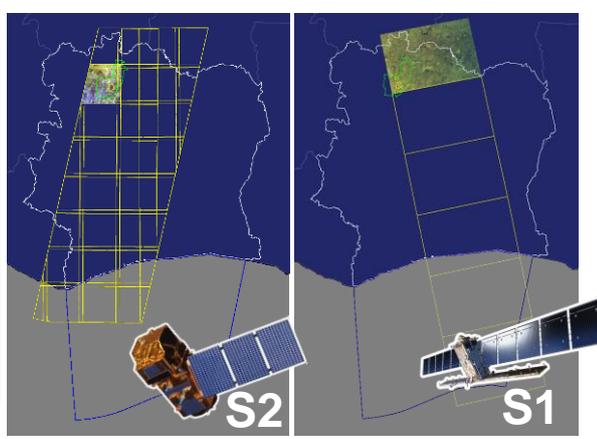
[animation 2D](#)



Les images de la page précédente (Fig.19 et Fig.20) sont observées par l'instrument MSI optique haute résolution (HR) à bord des satellites de la constellation Sentinel-2 qui comporte deux satellites S2A et S2B. La très large fauchée de 290 km de large est découpée en tuiles de 100 km x 100 km. Le temps de revisite de chaque satellite est de 10 jours (soit 5 jours si les deux sont actifs). L'imagerie optique est riche de plusieurs bandes spectrales allant du visible au proche infrarouge et moyen infrarouge. Cependant le couvert nuageux est un obstacle pour l'optique.

Le premier satellite Sentinel-1 a été lancé en 2014. Son instrument radar HR acquiert dans deux polarisations VV et VH. Contrairement à l'optique, l'instrument radar observe à travers les nuages. La largeur des fauchées est de 240 km. Le second satellite S1B est tombé en panne en décembre 2021 mais S1C sera lancé en 2023.

Les deux figures Fig.21 et Fig.22 correspondent à des agrégations temporelles (moyenne et écart-type respectivement) des 12 observations mensuelles. La variance de la polarisation VH (Fig.22) témoigne assez bien de l'anthropisation croissante de la Forêt Classée de Nyamboué.



Orpaillage dans la Forêt Classée de Nyamboué

Vues de Sentinel-1



[animation_2D](#)

Fig.21: Radar Sentinel-1 - Moyenne de scènes mensuelles de 2015 à 2022.

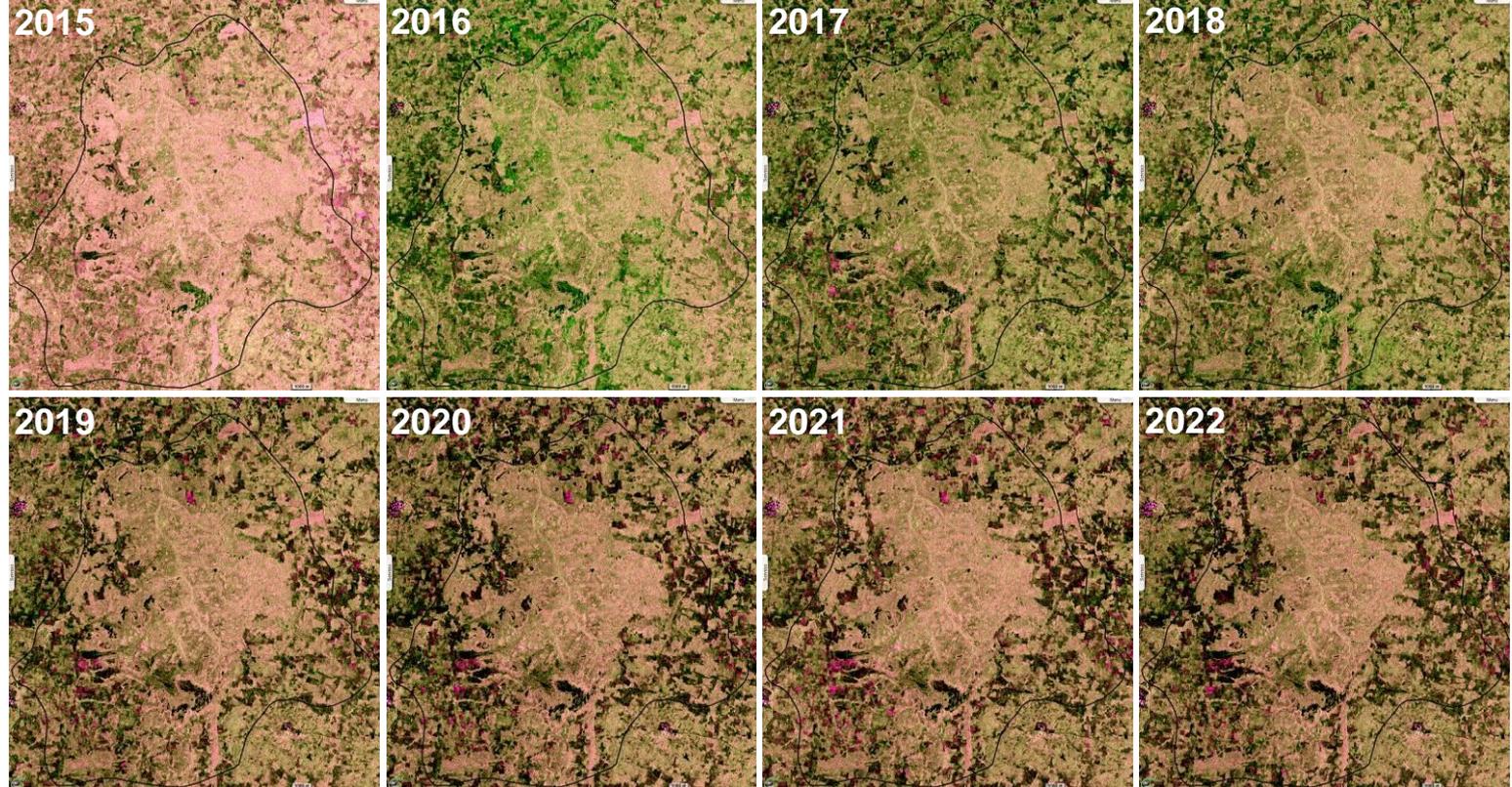
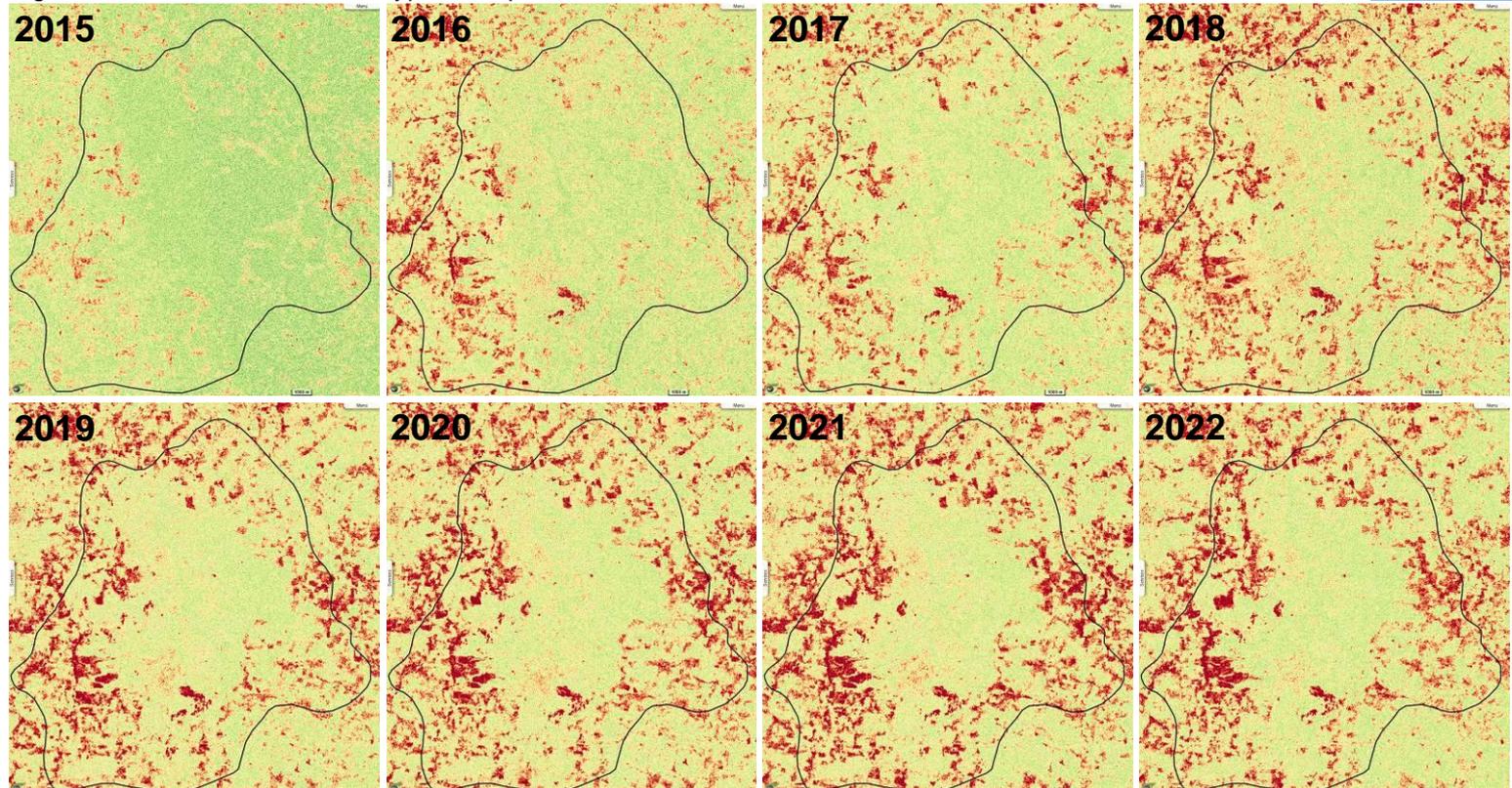


Fig.22: Radar Sentinel-1 - Ecart-type de la polarisation VH de scènes mensuelles de 2015 à 2022.

[animation_2D](#)



Les satellites Sentinel-3 embarquent trois instruments : -OLCI pour cartographier la « couleur de l'eau et en déduire sa qualité, -SLSTR pour mesurer la transparence de l'atmosphère et la température de surface à large champ, -SRAL qui est un altimètre radar en bandes Ku et C.

La Fig.23 montre par exemple deux profils altimétriques de l'instrument SRAL dans lesquels la hauteur du profil et sa couleur illustre la hauteur « ocog » mesurée à 20 Hz en bande Ku. Les deux acquisitions sont espacées de 12 jours et on note une baisse du niveau du Lac de quelques centimètres entre le 2 et le 14 février 2023.

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.

La Fig.24 montre les alentours du barrage de Kossou avec un traitement différencié de terre en composition colorée des polarisations VV,VH,VV et de l'énergie rétrodiffusée VV à la surface des eaux.

Altimétrie spatiale

Hauteur d'eau du Lac de Kossou

Profils altimétriques de Sentinel-3



Fig.23: Deux profils altimétriques acquis les 2 et 14 février 2023 sur le Lac de Kossou sur la scène S1 du 12 mars 2023. [vue 3D](#)

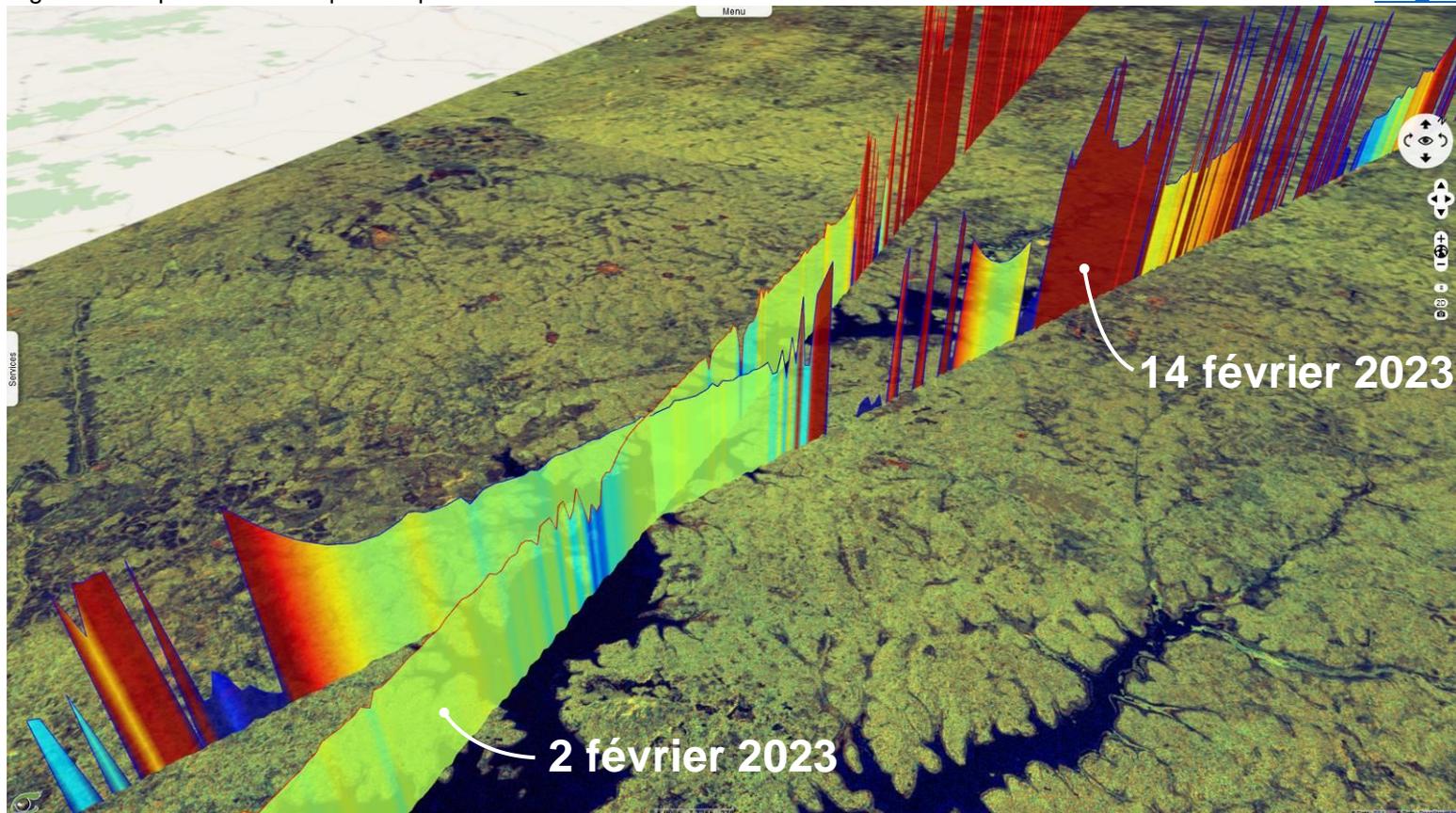


Fig.24: Scène radar Sentinel-1 du 12 mars 2023 - Composition du traitement VV,VH,VV sur terre et VV sur l'eau. [vue 3D](#)

