

La Libye, située géographiquement en Afrique du Nord, est caractérisée par de vastes étendues désertiques, le désert du Sahara dominant une grande partie de son paysage. Le pays possède d'importantes réserves d'hydrocarbures, qui contribuent de manière significative à son économie et à la production mondiale de pétrole. L'agriculture en Libye est confrontée à des défis en raison du climat aride, de la rareté des ressources en eau et de la faible superficie des terres arables. Le secteur dépend fortement de l'irrigation. Le changement climatique entraîne une hausse significative des températures et des changements dans les régimes de précipitations, ce qui a un impact croissant sur l'agriculture, les ressources en eau et l'environnement en général.

Cette première étude aborde toutes ces questions pour montrer le potentiel des données d'observation de la Terre, et en particulier des données gratuites des satellites Sentinel du programme européen Copernicus.

La figure 1a montre la division administrative de la Libye, délimitant ses différents gouvernorats (muhafazat) ainsi que sa zone d'exclusion économique (ZEE). La figure 1b montre le modèle numérique d'élévation (MNE) de Copernicus, qui illustre les plaines principalement désertiques et les régions montagneuses éparses de la Libye, mettant en évidence son paysage aride.

La Libye vue de l'espace

Sentinel-3 OLCI, LU/LC, MNT

[layer_stack_2D](#)

La figure 2a montre les observations réalisées le 12 août 2021 par les deux satellites Sentinel-3A (à gauche) et Sentinel-3B (à droite) équipés de l'instrument optique à moyenne résolution OLCI.

La figure 2b montre une des cartes d'occupation des sols (LU/LC) produites périodiquement par le service Copernicus [C3S](#). Les classes indiquées dans la légende ont été calculées principalement à partir des données OLCI de Sentinel-3.

Fig.1: Gouvernorat de Libye (a) et Modèle Numérique d'Élevation (b).

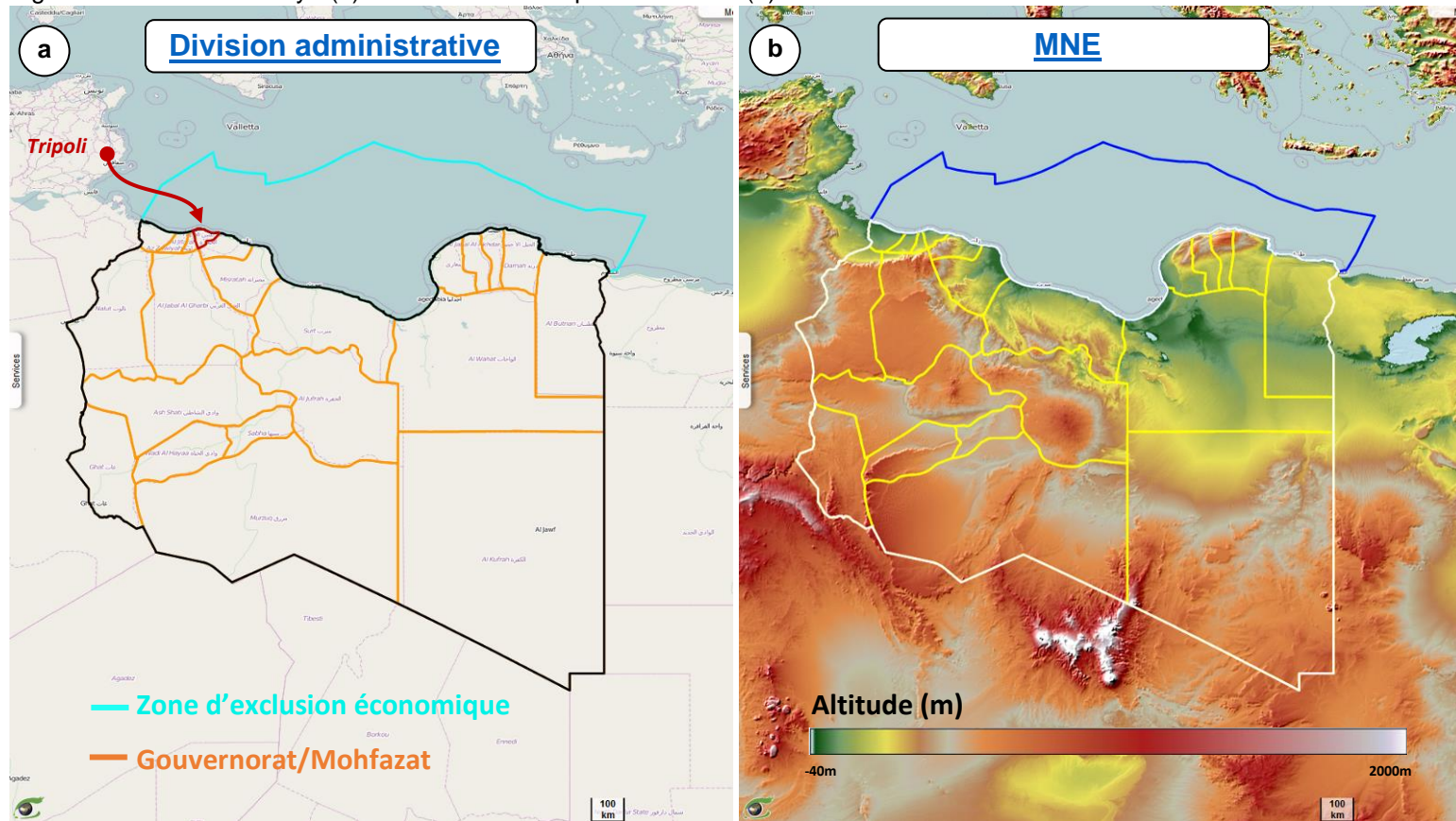
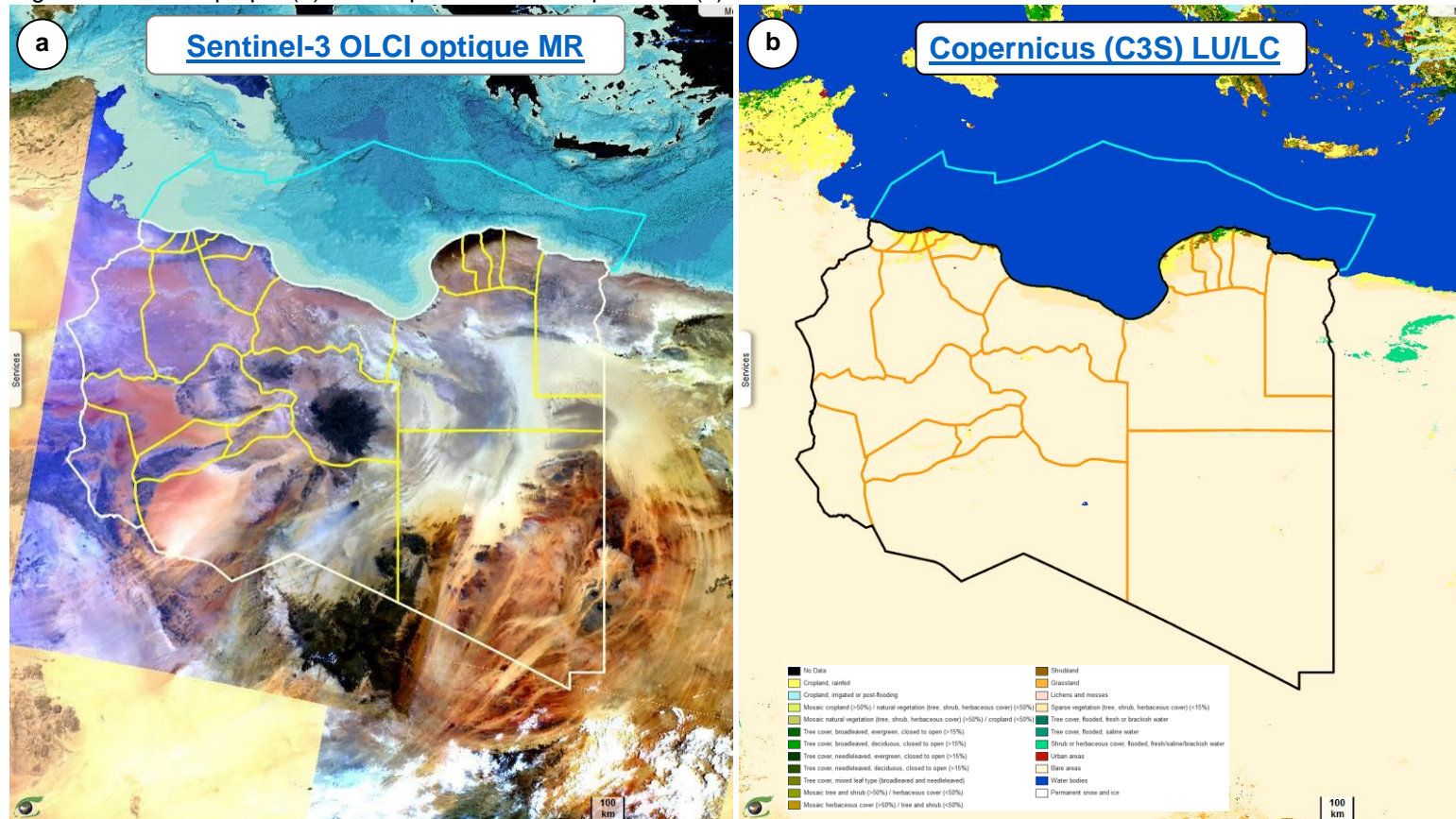


Fig.2: Sentinel-3 optique (a) et occupation du sol Copernicus (b).



Le projet Great Man-Made River (GMMR) en Libye, un vaste réseau de pipelines et d'infrastructures, vise à atténuer la pénurie d'eau en transportant l'eau du système aquifère du grès de Nubie à travers le désert. Il s'agit d'une solution cruciale pour fournir des ressources en eau douce pour les besoins agricoles, industriels et domestiques du pays. Malgré son ampleur et sa contribution au développement socio-économique, les défis liés à la maintenance, à la durabilité et à l'impact environnemental soulignent la nécessité d'une gestion continue pour garantir un approvisionnement en eau fiable et sa viabilité à long terme pour l'avenir de la Libye ([Wikipédia](#)).

Le réseau des grands fleuves artificiels joue un rôle essentiel dans le maintien de l'agriculture en fournissant un approvisionnement en eau vital aux régions arides et semi-arides, en favorisant la productivité agricole et en soutenant les cultures.

La figure 3 présente une vue schématique du projet et de ses différentes phases.

Les figures 4a et 4b montrent respectivement des cultures irriguées près du champ de captage de Jabal Hasouna à l'est et un zoom sur l'usine de production de tuyaux de Sarir.

Ressources en eau

Projet de grande rivière artificielle

Fig.3: Dessin schématique du projet "Great Man-Made River".

[vue 2D](#)

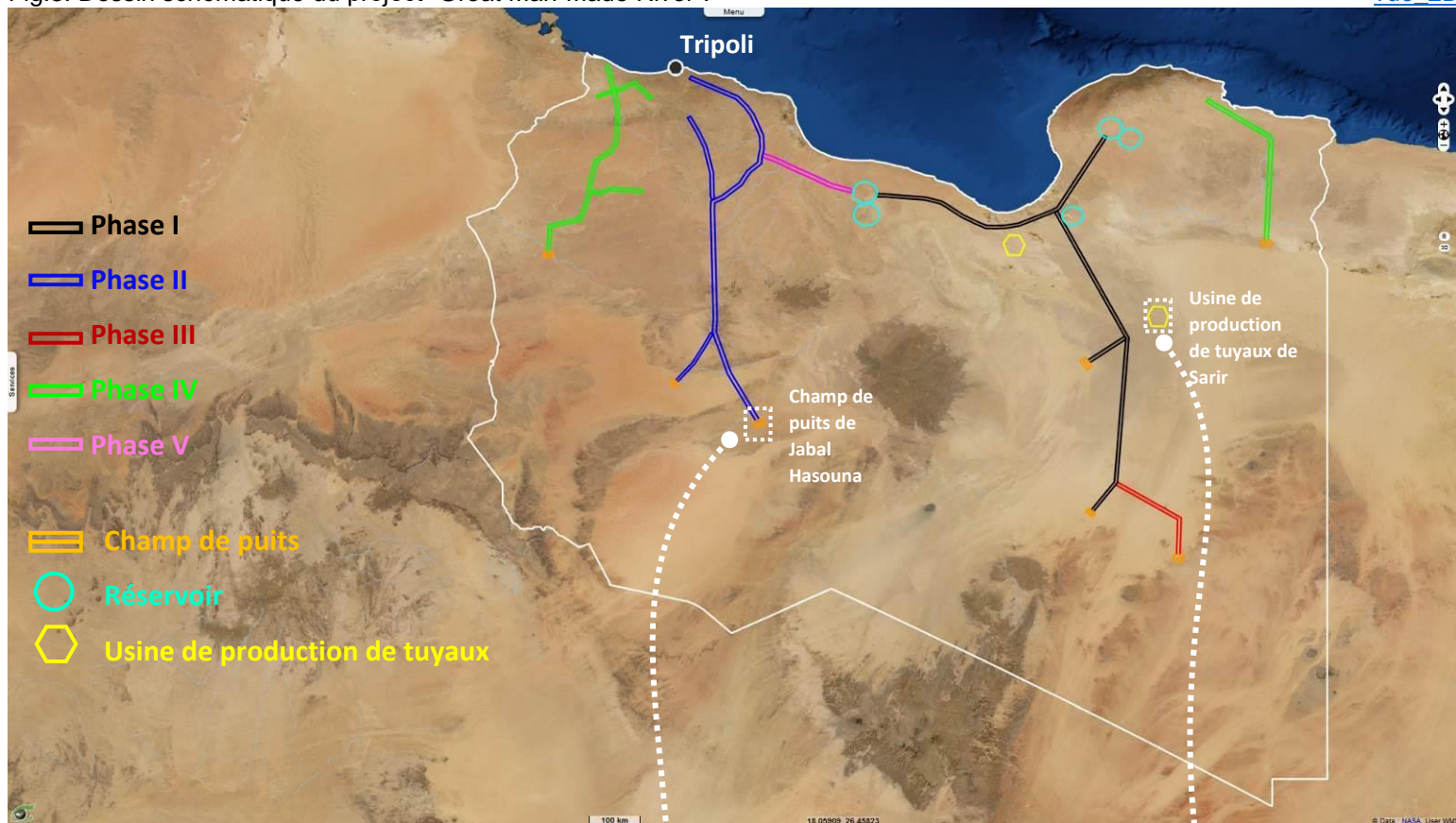
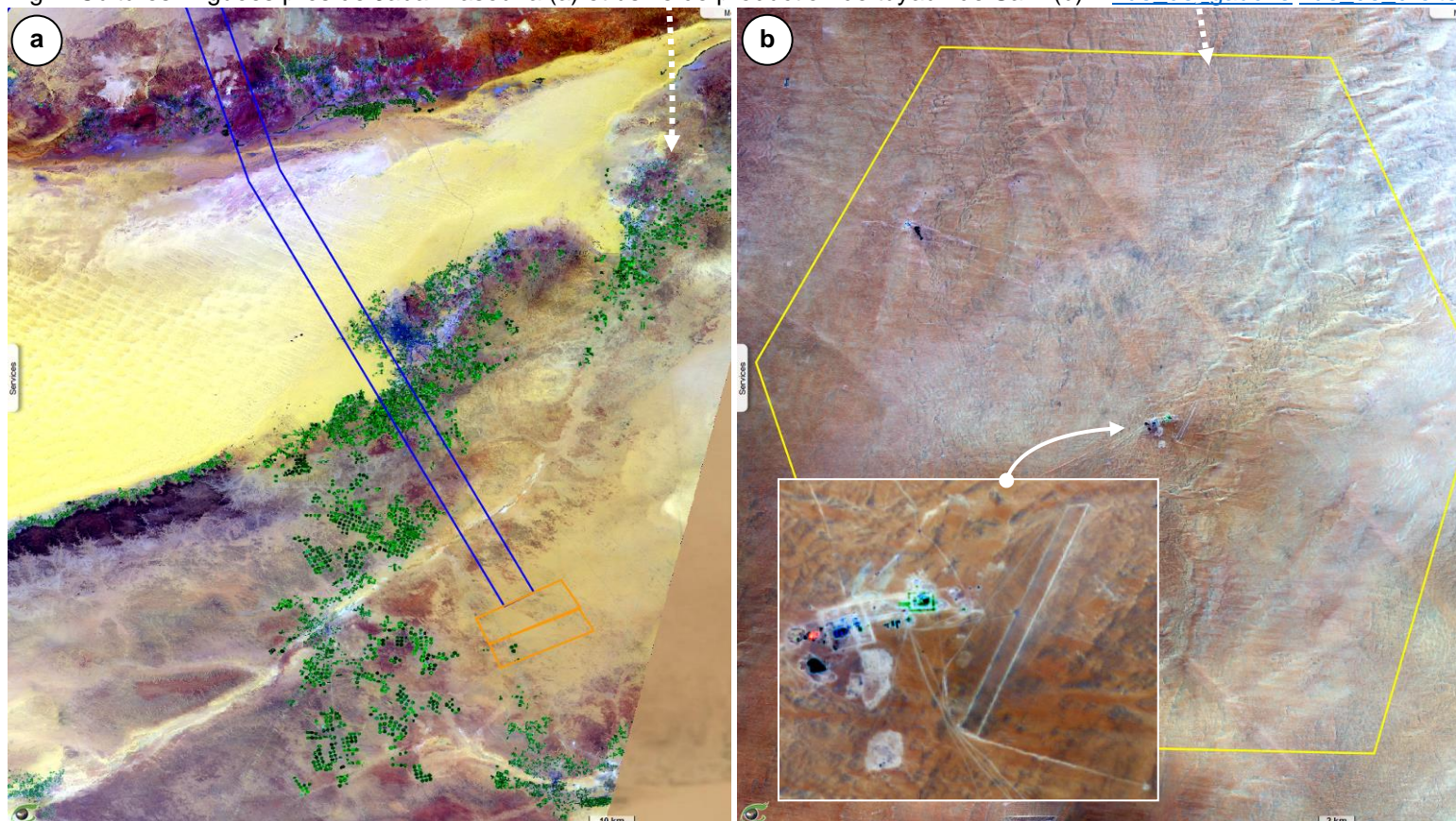


Fig.4: Cultures irriguées près de Jabal Hasouna (a) et usine de production de tuyaux de Sarir (b). [vue de gauche](#) [vue de droite](#)



Le projet de la grande rivière artificielle a considérablement modifié le paysage agricole des régions désertiques de la Libye. En canalisant l'eau des profondeurs du Sahara vers ces zones arides, il a ouvert la voie à une agriculture irriguée auparavant inconcevable. Cette irrigation régulière a transformé ces terres arides en champs fertiles, permettant la culture de céréales, de légumes et de fruits. Cette initiative a considérablement augmenté la production alimentaire dans des régions libyennes auparavant hostiles. Le projet de la grande rivière artificielle représente une ressource essentielle pour répondre aux défis du changement climatique, en particulier à la diminution des précipitations observée ces dernières années.

Les figures 5a et 5b montrent deux images optiques de Sentinel-2 acquises respectivement en 2018 et 2023 à la même période (mois d'avril). Les figures montrent différentes formes d'agriculture basées sur l'irrigation par pivot.

La figure 6a montre la différence de l'indice de végétation normalisé (NDVI) entre 2023 et 2018. Dans cette figure, nous observons une prolifération des parcelles agricoles tandis qu'une analyse indique une baisse drastique des précipitations entre 2018 et 2023 comme le montre la Fig.6b. La Fig.6c montre les précipitations moyennes sur la saison humide (septembre à février) confirmant cette baisse. Les résultats démontrent que la rivière artificielle assure un approvisionnement en eau essentiel pour l'agriculture dans les régions touchées par cette baisse des précipitations, offrant ainsi une résilience face aux variations climatiques.

Ressources en eau

Irrigation des cultures

Fig.5: Images optiques de Sentinel-2 acquises en 2018 et 2023 au cours de la même période.

[animation](#)

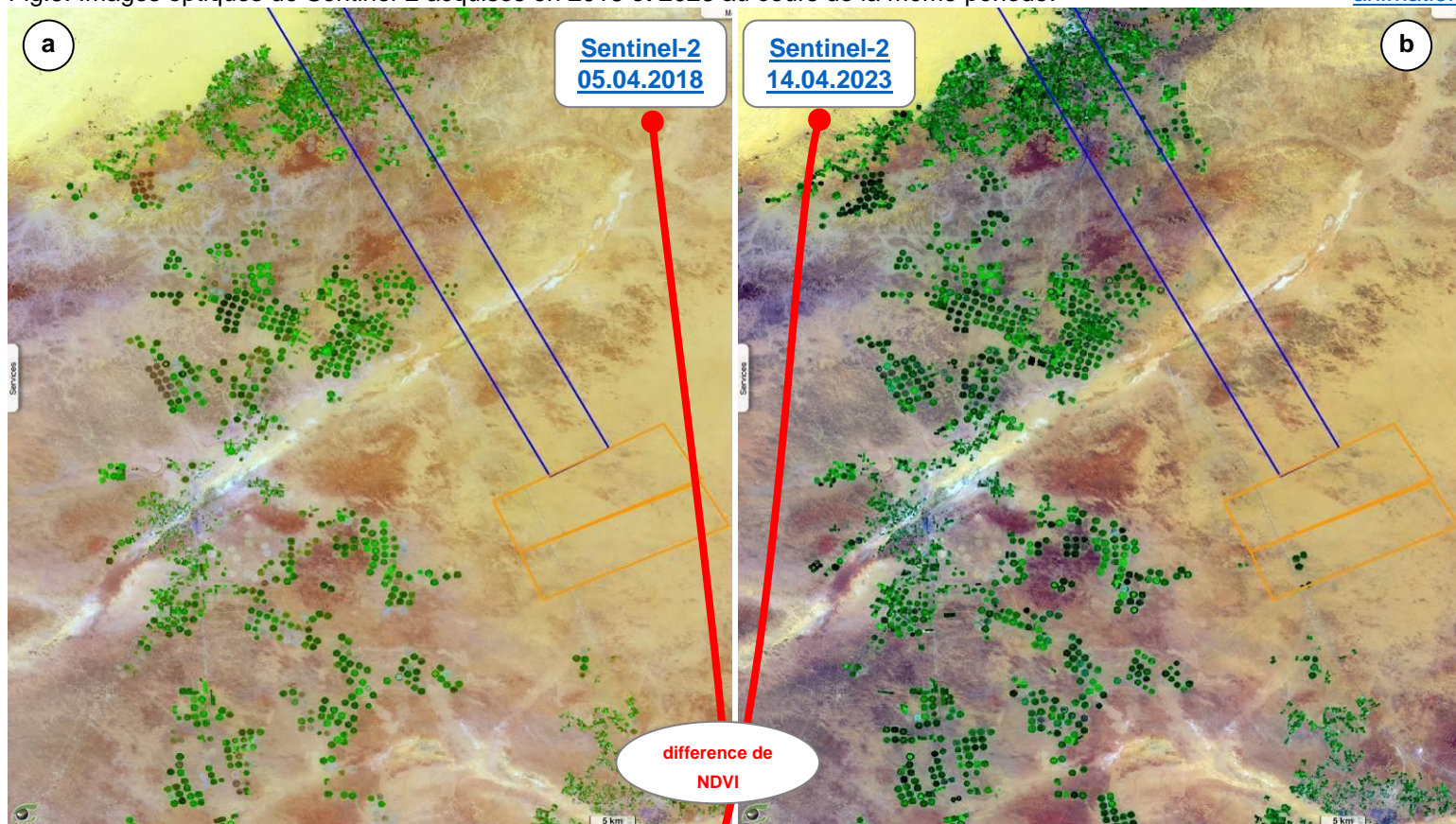
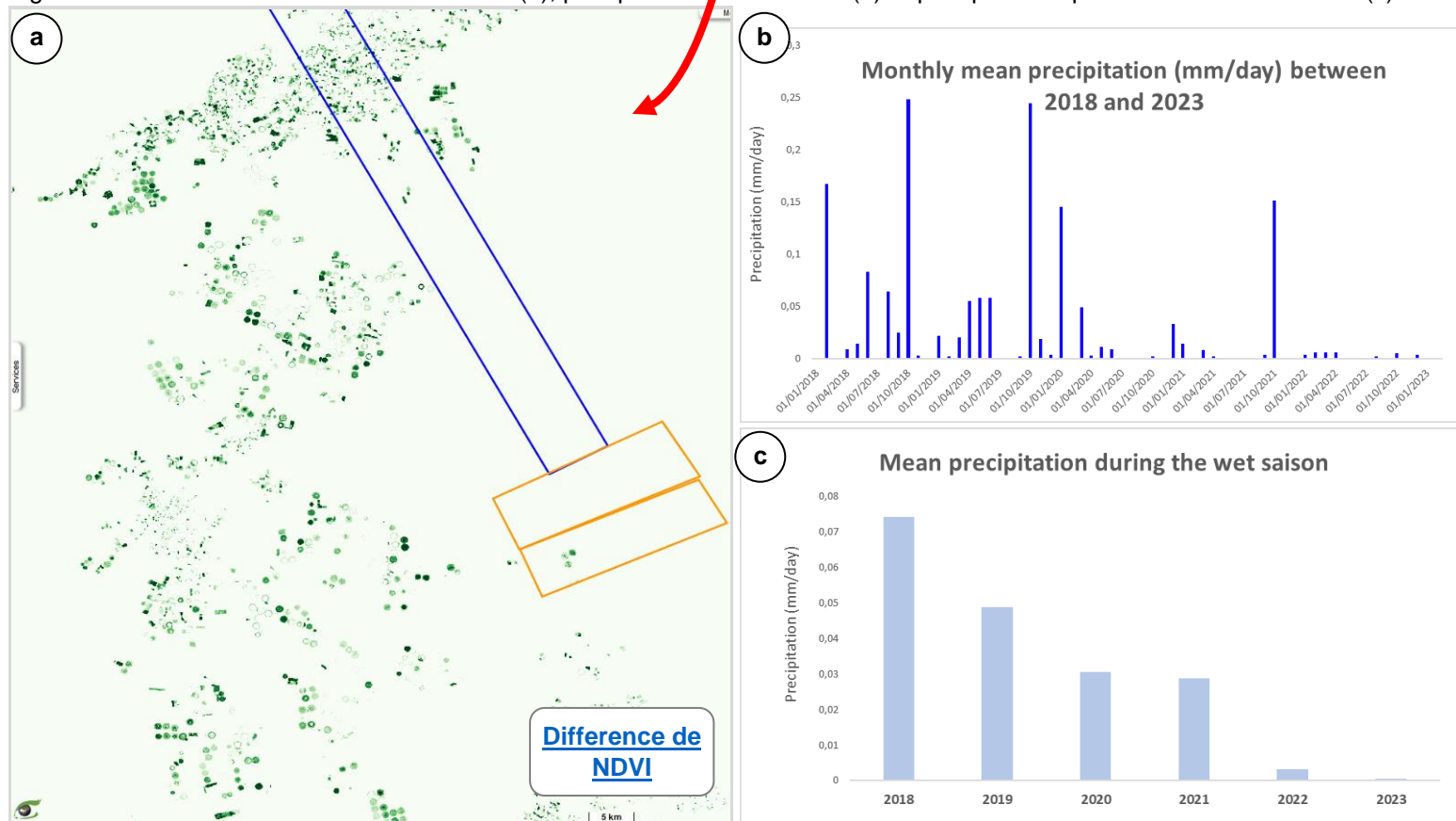


Fig.6: Différence de NDVI entre 2023 et 2018 (a), précipitations mensuelles (b) et précipitations pendant la saison humide (c).



Cette section montre une parcelle de céréales, capturée par l'image à très haute résolution (VHR) (Fig.7a) et l'image à haute résolution (HR) de Sentinel-2 (Fig.7b). Les figures montrent un modèle distinctif d'irrigation par pivot. L'efficacité de l'irrigation par pivot réside dans sa capacité à minimiser le gaspillage d'eau. La disposition circulaire des champs est caractéristique de ce système. Cette approche précise et ciblée contribue à une gestion rationnelle de l'eau, favorisant une croissance optimale des cultures tout en préservant les ressources en eau. Les figures 8a et 8b montrent respectivement l'indicateur de végétation (NDVI) et l'indicateur d'humidité du sol (NDWI-SM). Le NDVI est l'un des indicateurs les plus couramment utilisés pour surveiller le pourcentage de couverture végétale dans une zone. Le NDWI-SM (*Normalised Difference Water Index - Soil Moisture*) a été développé par Gao (1996) et mesure l'eau liquide contenue dans la couverture végétale.

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

Où NIR est la bande infrarouge proche (bande 8), SWIR est la bande infrarouge moyen (bande 11) et R est la bande rouge (bande 4). Les bandes sont celles du capteur optique de Sentinel-2.

Suivi de l'agriculture (1)

Parcelle de céréales irriguées (gouvernorat de Wadi al Hayat)

Fig.7: Vues VHR (a) et Sentinel-2 (b) d'une parcelle agricole.

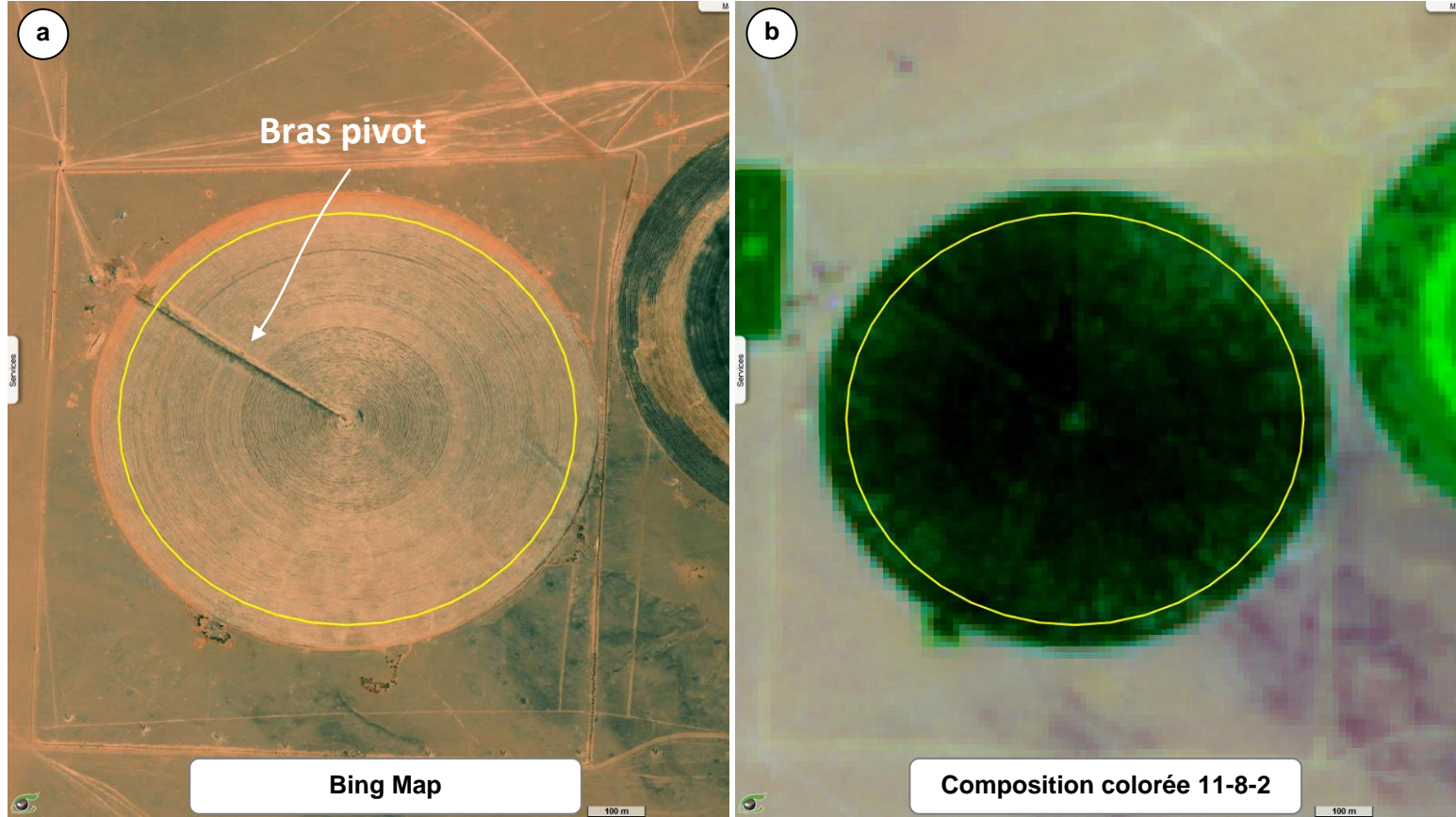
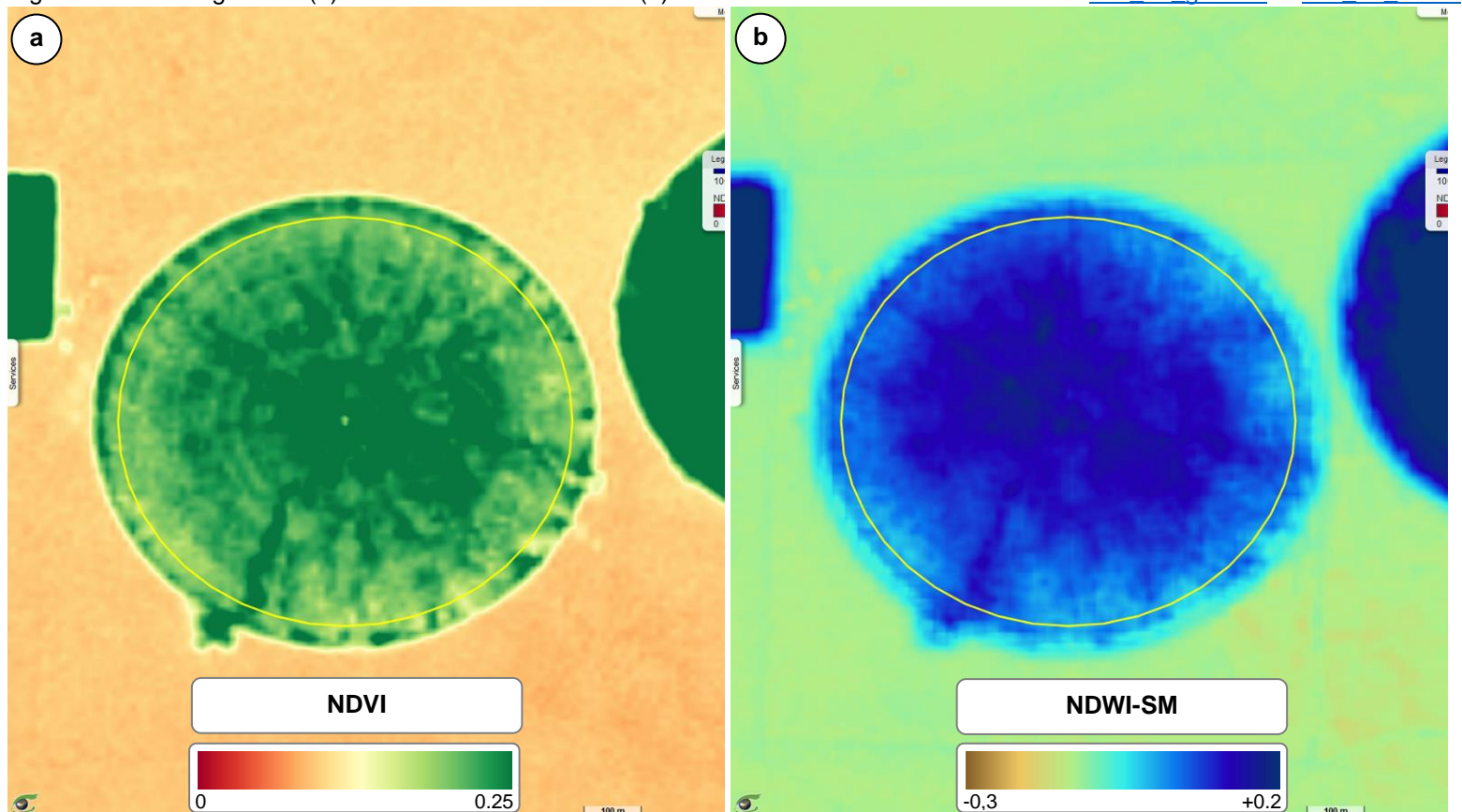


Fig.8: Indice de végétation (a) et indice d'humidité du sol (b).



La figure 9 montre les précipitations mensuelles de Copernicus ERA5-Land sur la parcelle de 2018 à 2023 dans des vues chronologiques (Fig.9a) et saisonnières (Fig.9b).

La figure 10 montre la moyenne de l'indice NDWI-SM de Sentinel-2 sur la zone d'intérêt de 2018 à 2023 en vue chronologique (figure 10a) et saisonnière (figure 10b).

La figure 11 montre la moyenne du NDVI de Sentinel-2 sur la zone d'intérêt de 2018 à 2023 en vue chronologique (figure 11a) et saisonnière (figure 11b).

Le NDVI est en bonne corrélation avec l'humidité du sol calculée au fil du temps par Sentinel-2 entre 2018 et 2023. L'humidité du sol et la croissance de la végétation sont maximales pendant la période février-mars.

L'indice NDWI-SM n'est pas en corrélation avec les précipitations, ce qui confirme que la parcelle n'est pas alimentée par la pluie.

Suivi de l'agriculture (2)

Céréales irriguées – Analyse des Séries temporelles

Fig.9: Série temporelle des précipitations de 2018 à 2023 sur la parcelle en vue chronologique (a) et saisonnière (b).

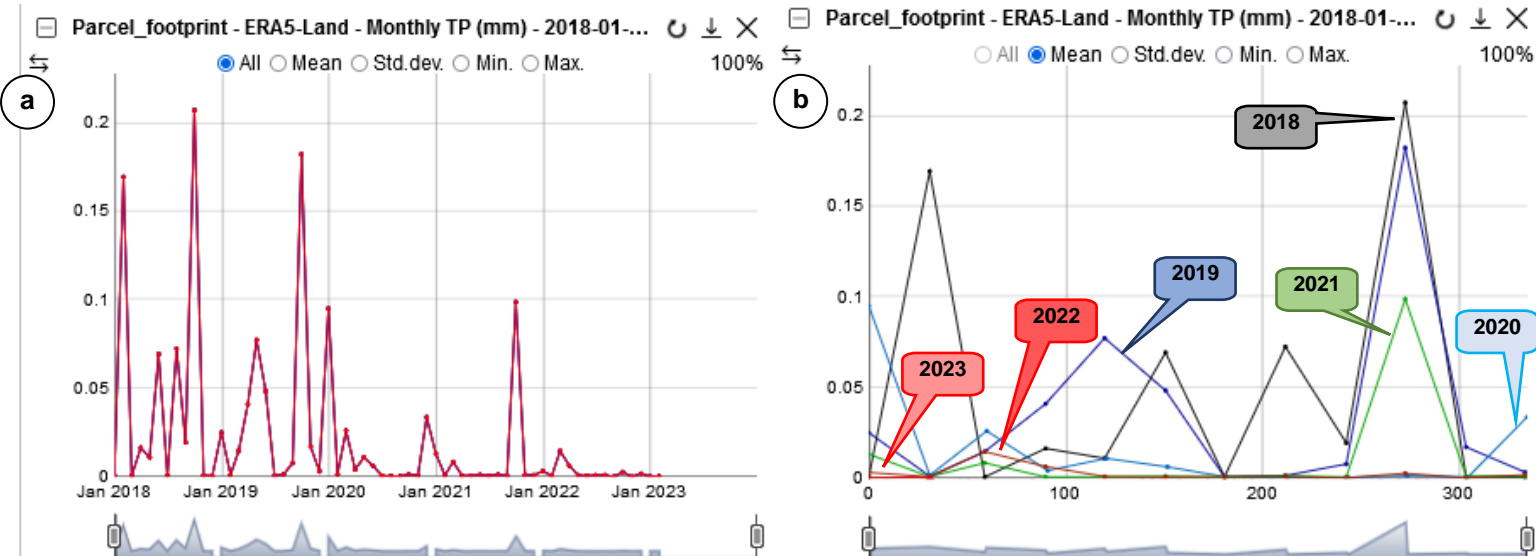


Fig.10: Séries temporelles de 2018 à 2023 de l'indice d'humidité des sols (NDWI-SM) en vues chronologique (a) et saisonnière (b).

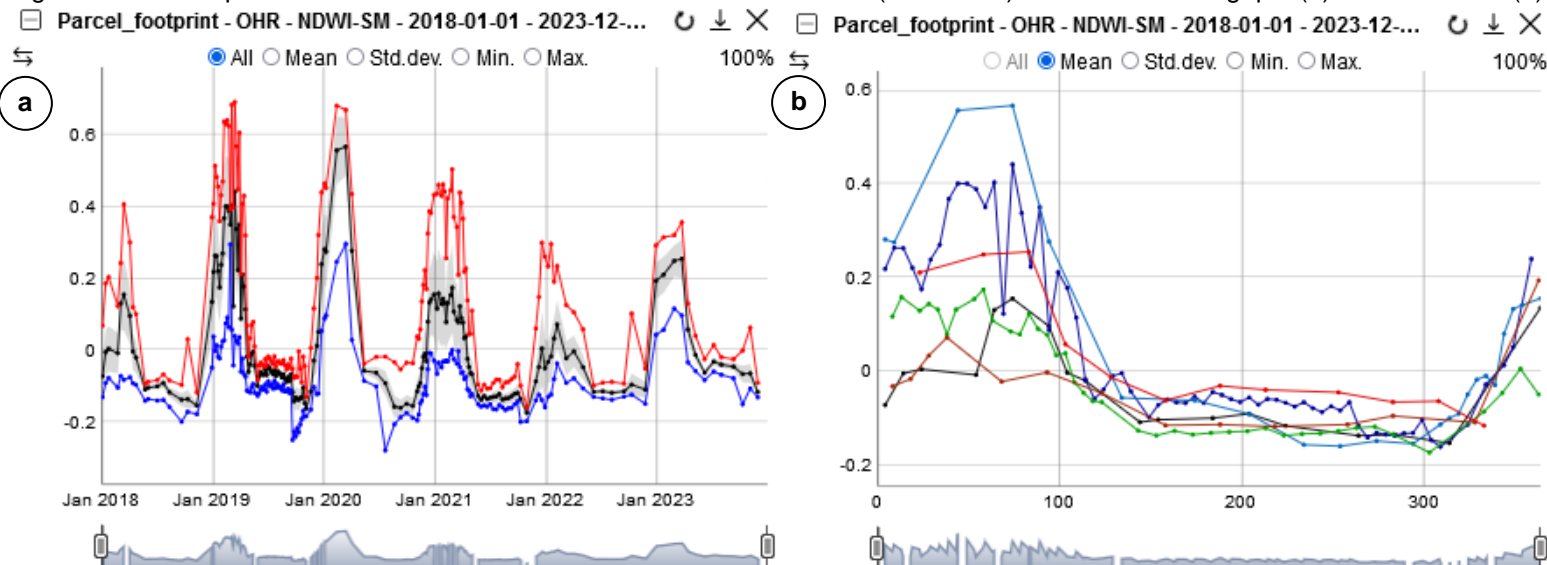
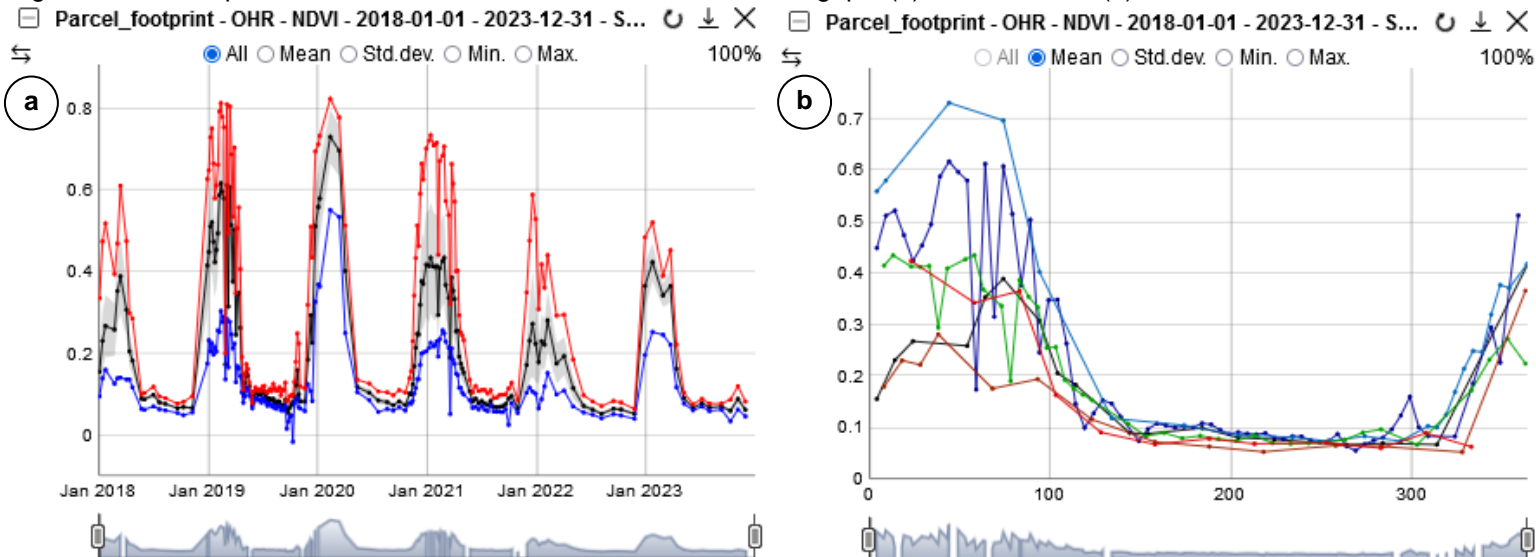


Fig.11: Séries temporelles de 2018 à 2023 du NDVI en vue chronologique (a) et saisonnière (b).



Cet exemple montre une parcelle de culture d'agrumes située dans le nord de la Libye (Tripoli). La figure 12a présente une image à très haute résolution et la figure 12b une image Sentinel-2, toutes deux centrées sur la parcelle. Les figures 13a et 13b présentent respectivement l'indice de végétation ajusté au sol (SAVI) et l'indice NDWI-SM.

Le SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) est un indicateur de végétation développé en tant que modification du NDVI pour corriger l'influence de la réponse du sol lorsque la couverture végétale est faible.

$$SAVI = \frac{NIR - R}{NIR + R + L} \times (1 + L)$$

"L" est un facteur de correction allant de 0 pour une couverture végétale très élevée à 1 pour une couverture végétale très faible. La valeur la plus couramment utilisée est 0,5, ce qui correspond à une couverture végétale intermédiaire.

Suivi de l'agriculture (1)

Parcelle d'agrumes (gouvernorat de Tripoli)

Fig.12: Parcelle d'agrumes (Tripoli) vue par Bing (a) et Sentinel-2 (28.01.2020, b).

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

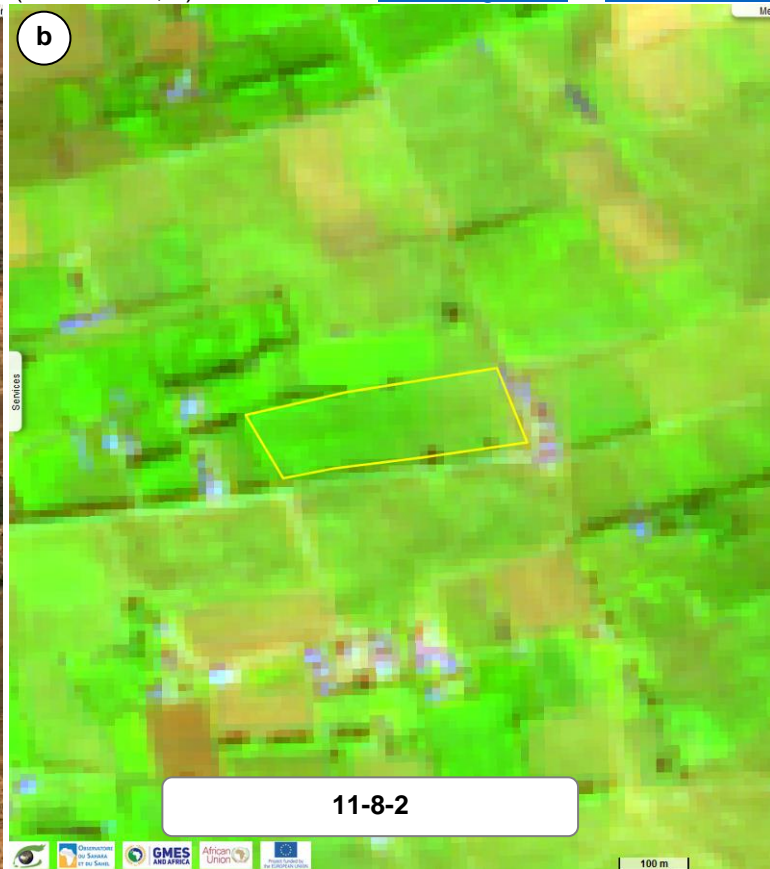
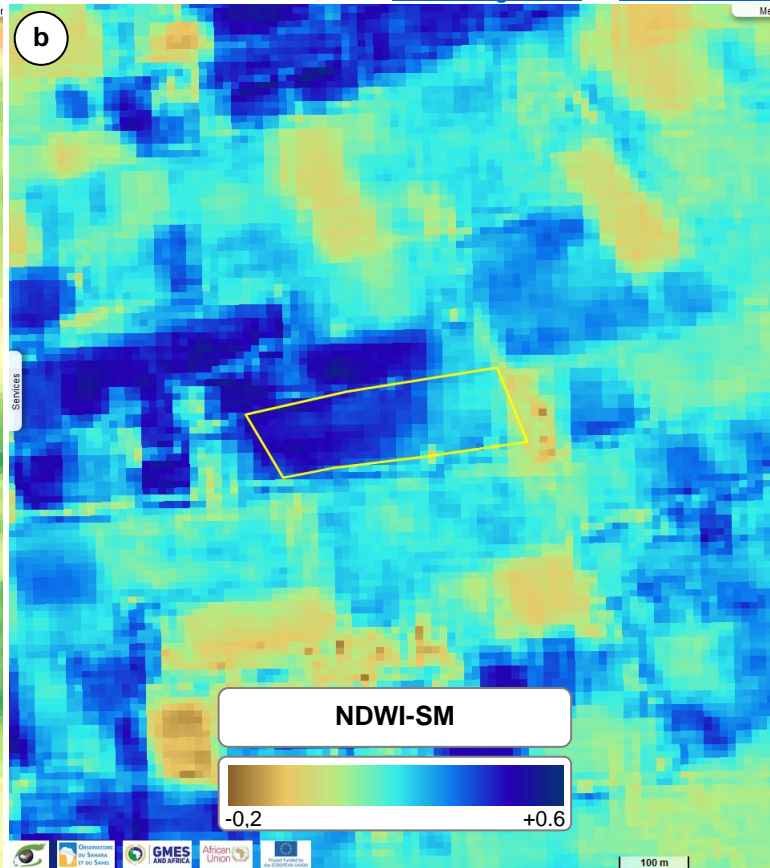
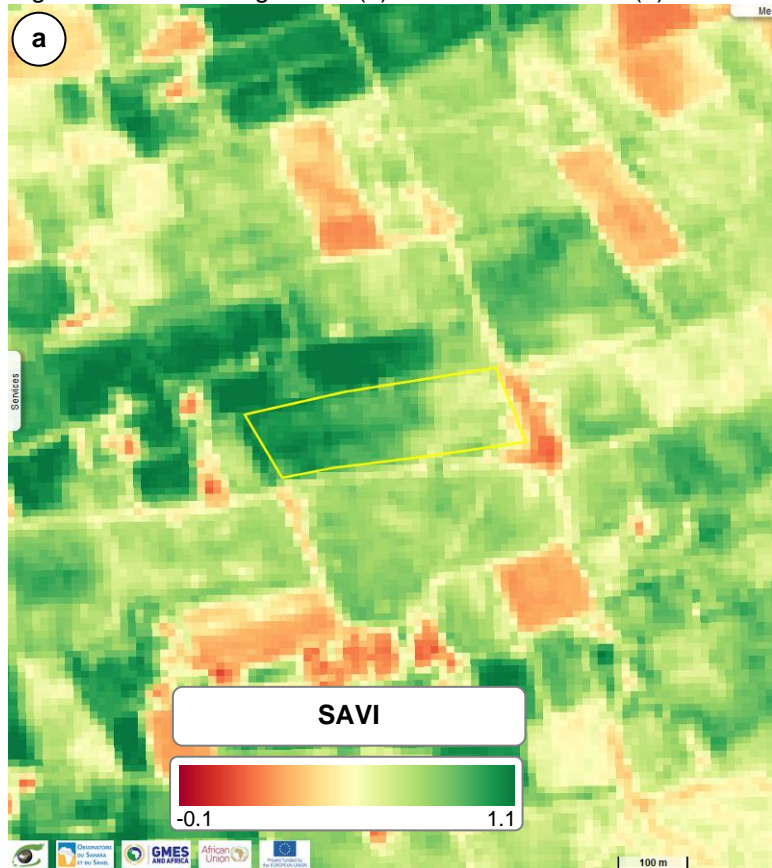


Fig.13: Indices de végétation (a) et d'humidité du sol (b).

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



Pour cet exemple de parcelle de culture d'agrumes, les précipitations (fig.14a et fig.14b), l'humidité du sol (fig.15a et fig.15b) et l'indice de végétation (fig.16a et fig.16b) présentent tous une forte cohérence entre 2018 et 2020. Cela suggère que cette parcelle reçoit des précipitations suffisantes. L'indice de végétation correspond au cycle phénologique des agrumes, avec une phase de croissance débutant en août et une période de récolte entre mars et avril. Le comportement constant de cet indicateur au cours des trois années indique un rendement comparable.

Suivi de l'agriculture (2)

Parcelles d'agrumes pluviales - Analyse des séries temporelles

Fig.14: Série temporelle de données de 2018 à 2020 illustrant les précipitations sur la parcelle, chronologique (a) et saisonnier (b).

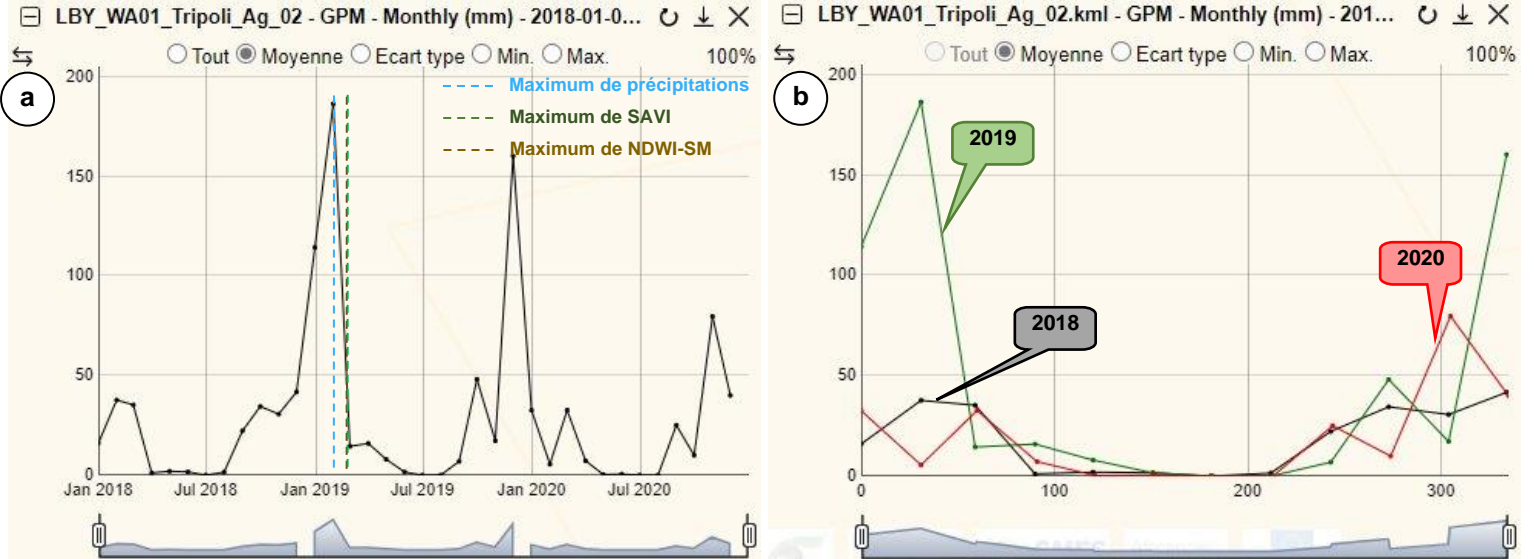


Fig.15: Série chronologique de 2018 à 2020 de l'indice d'humidité des sols (NDWI-SM) en vue chronologique (a) et saisonnière (b).

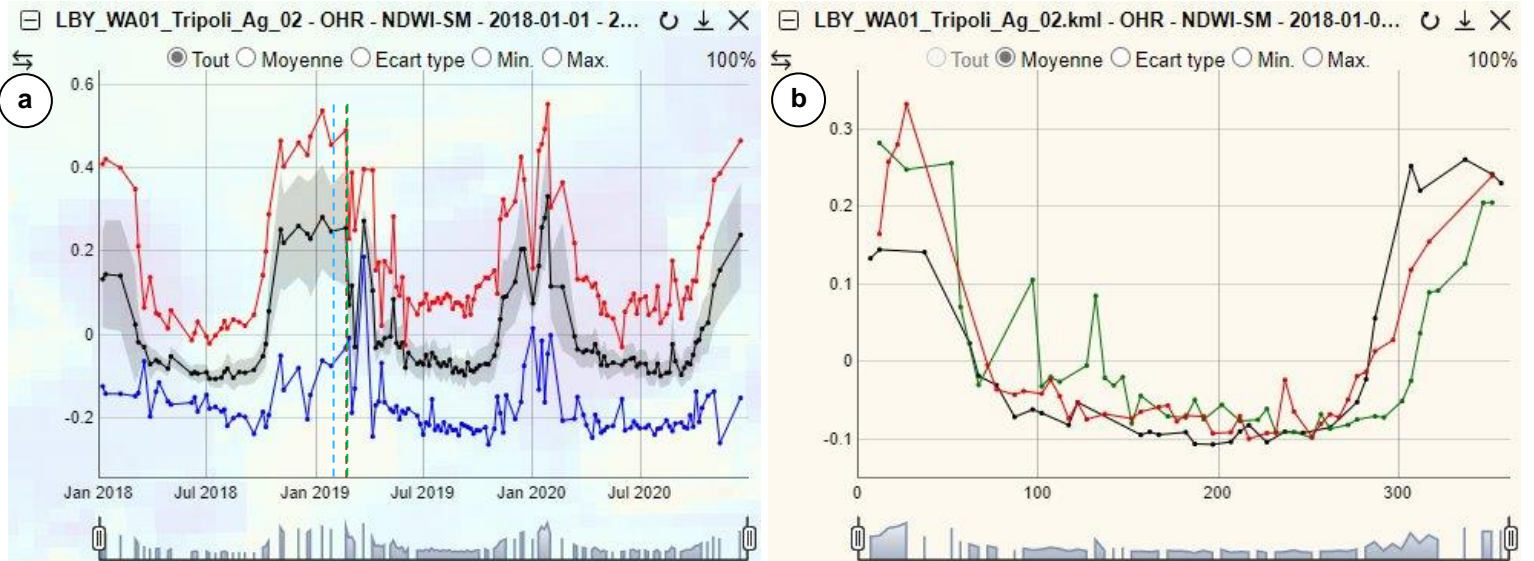
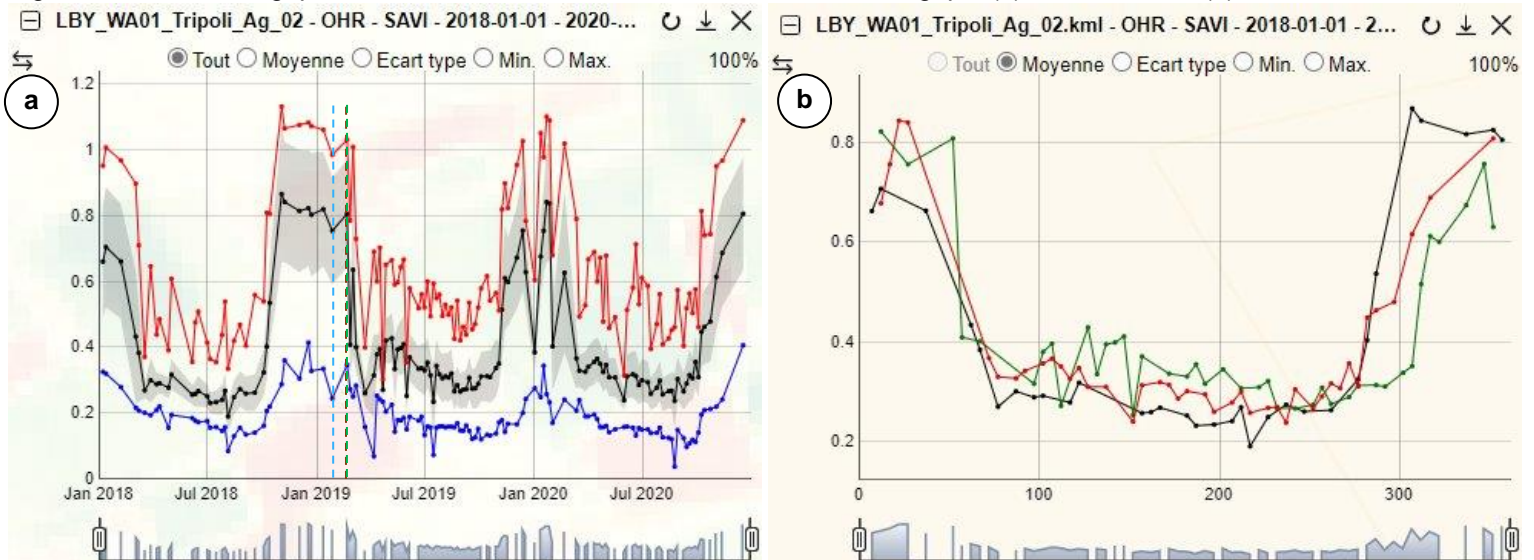
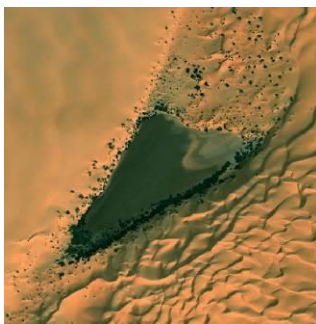


Fig.16: Série chronologique de 2018 à 2023 de l'indice SAVI en vue chronologique (a) et saisonnière (b).



En Libye, une sécheresse prolongée a entraîné une baisse significative du niveau des nappes phréatiques, provoquant l'assèchement progressif d'oasis autrefois florissantes. La demande accrue en eau, amplifiée par les besoins agricoles et l'ambitieux projet de la Grande rivière artificielle, a mis sous pression les aquifères de la région. À mesure que ces réservoirs souterrains vitaux s'amenuisent, certaines régions succombent aux graves conséquences de la diminution des ressources en eau souterraines.

La figure 17 montre la diminution de l'eau dans l'oasis d'Ibn Aati (gouvernorat de Wadi al Hayat) observée sur les images Sentinel-2 entre 2015 et 2022. Cette diminution est confirmée par l'indicateur d'eau libre (Fig.8).



Surveillance des sécheresses

Questions sur les eaux souterraines

Fig.17: Diminution de l'eau dans l'oasis d'Ibn Aati observée sur les images Sentinel-2 entre 2015 et 2022.

[animation](#)

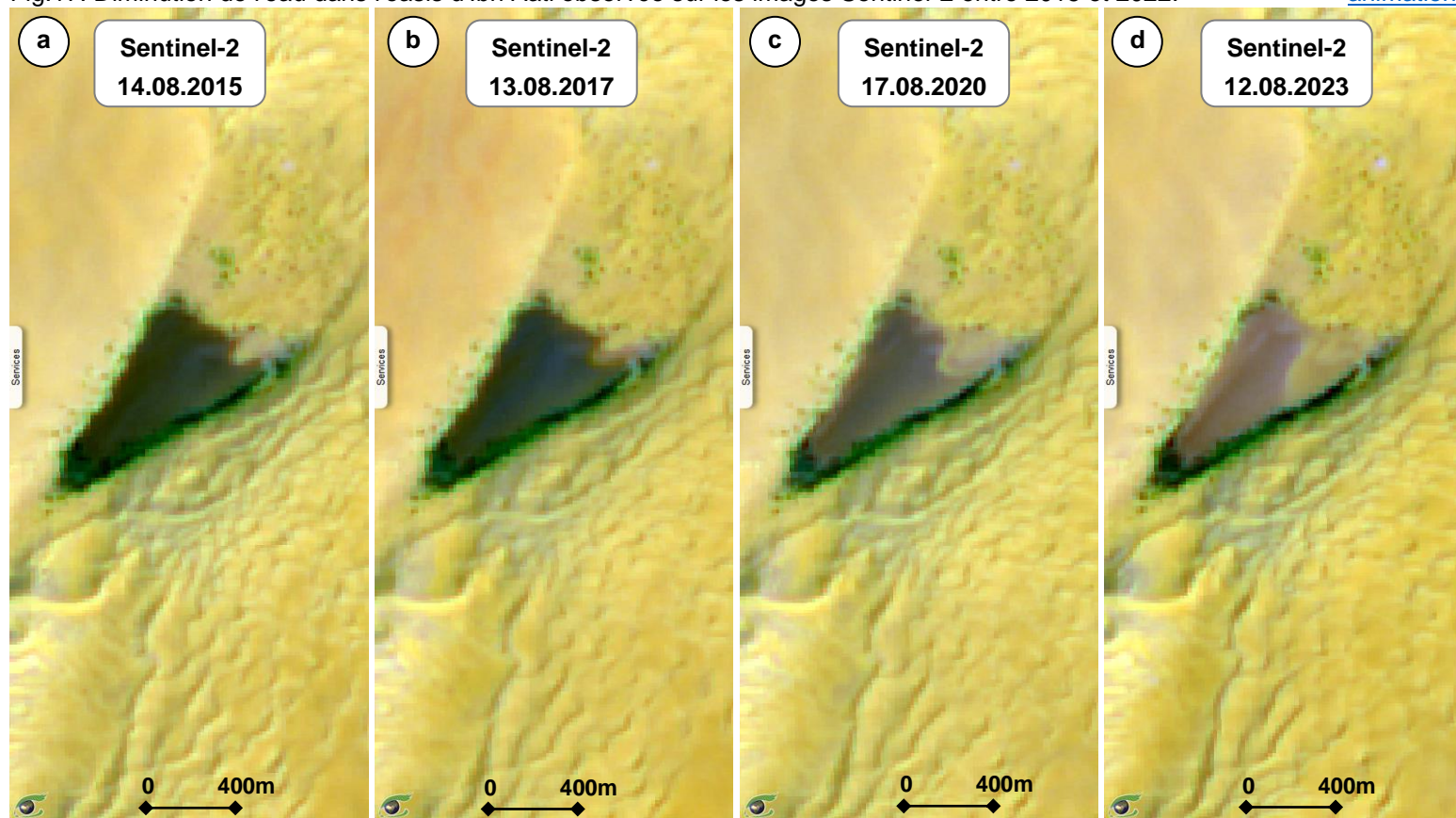
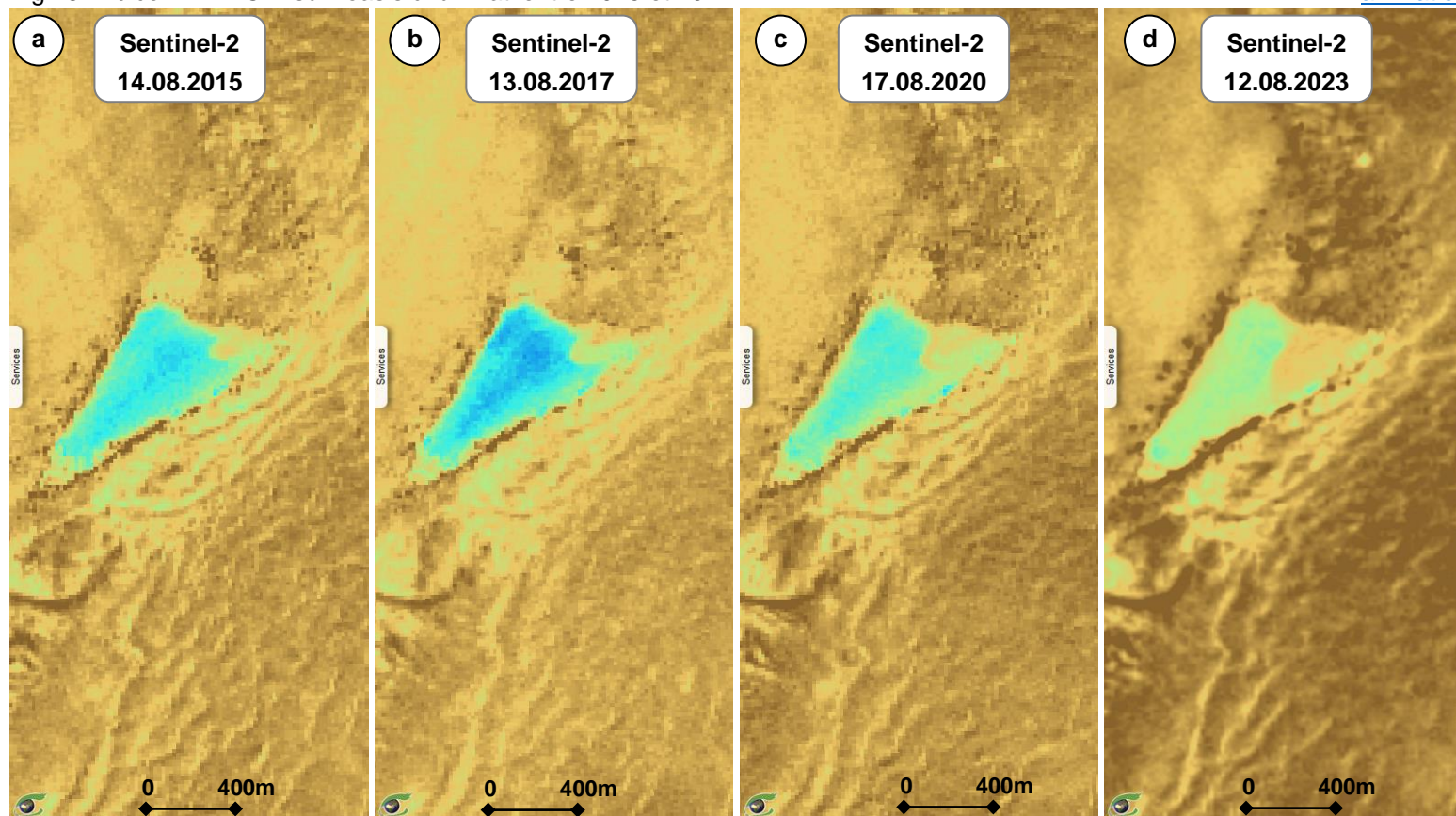


Fig.18: Indice NDWI-OW sur l'oasis d'Ibn Aati entre 2015 et 2022.

[animation](#)



Au-delà des défis posés par la sécheresse, la Libye est confrontée à d'autres problèmes tels que l'expansion urbaine et la croissance de la population.

La Fig.19 montre l'image optique de Sentinel-2 (Fig.19a) et l'image radar de Sentinel-1 (Fig.19b) de Tripoli.

Les Fig.20 et Fig.21 montrent respectivement l'occupation du sol et la densité de population en 2000, 2010 et 2020. Les figures donnent un aperçu clair de l'évolution urbaine au fil du temps. Les vues séquentielles de l'occupation du sol à plusieurs dates montrent une expansion urbaine significative.

Urbanisation et suivi de la population

Tripoli

Fig.19: Vues optiques de Sentinel-2 (25-08-2023, a) et radar de Sentinel-1 (moyenne 27.10.2023=>02.12.2023b) de Tripoli.

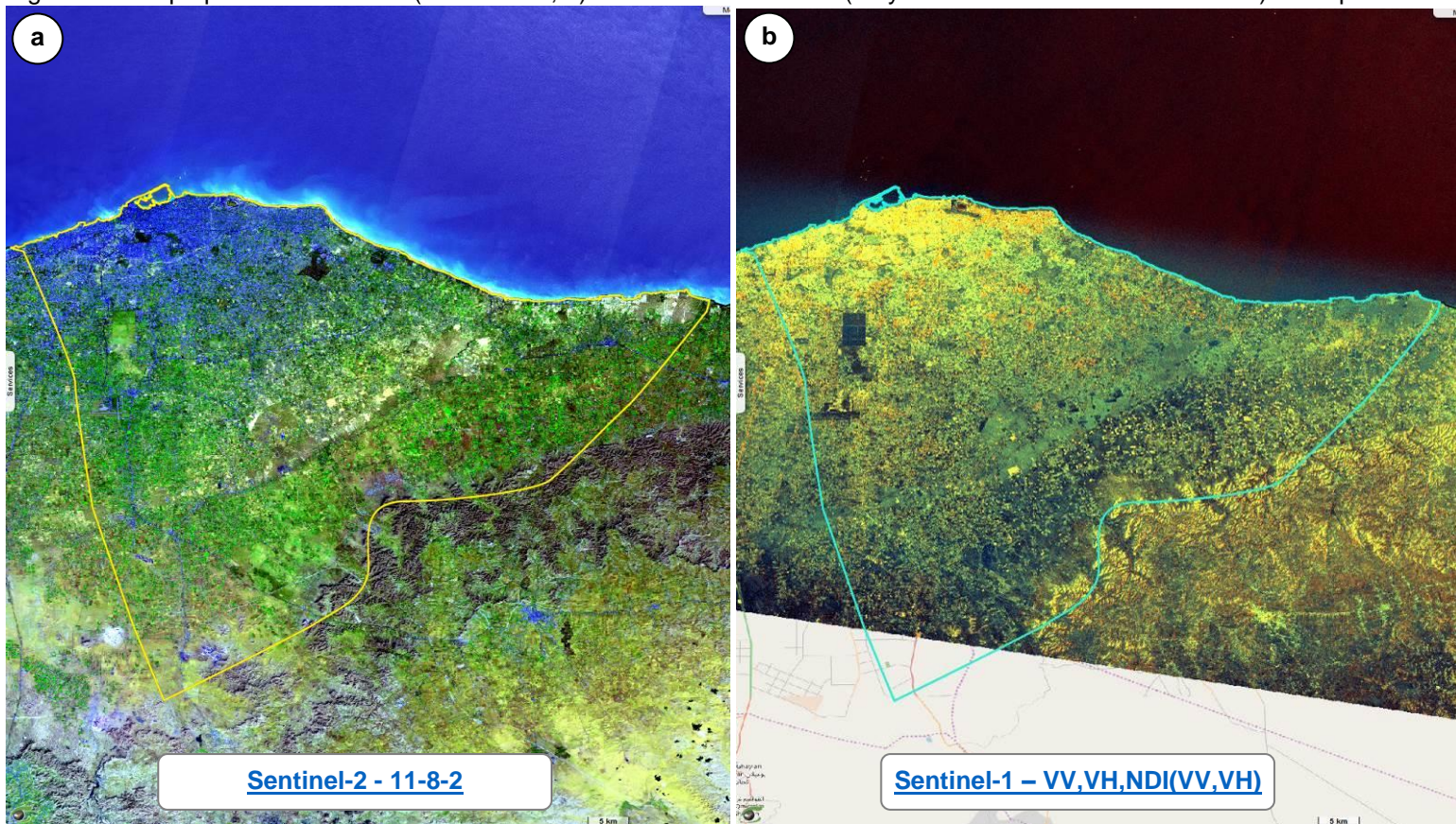


Fig.20: Utilisation et couverture des sols à Tripoli en 2000 (a), 2010 (b) et 2020 (c).

[animation](#)

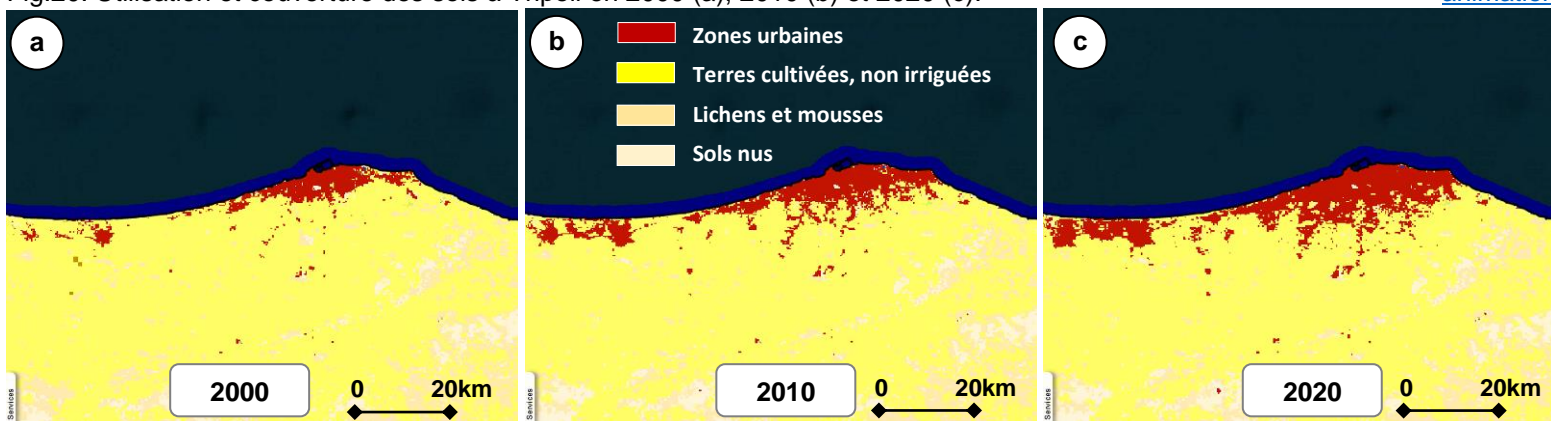
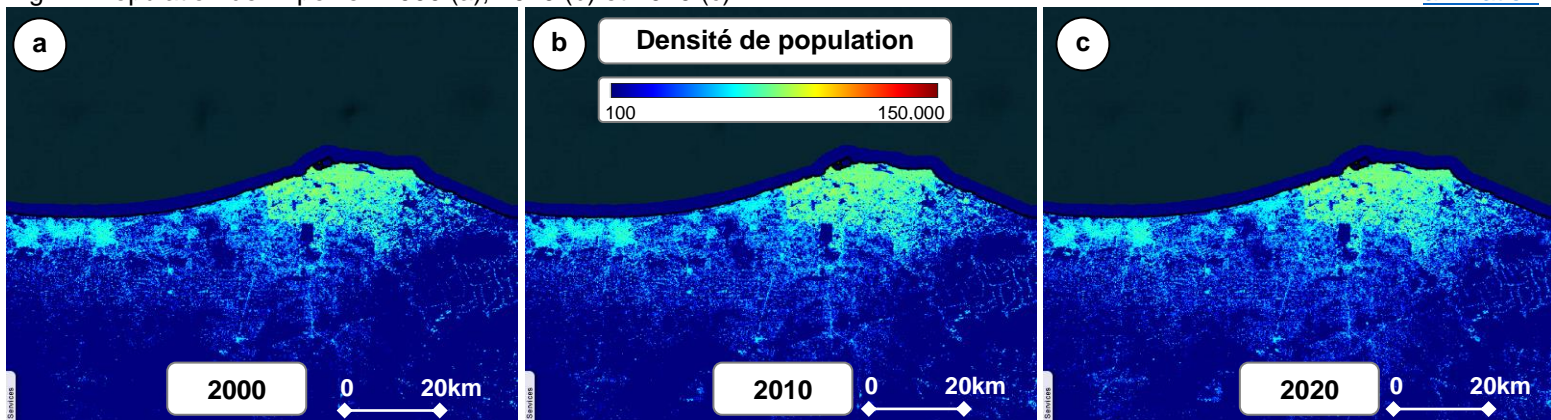


Fig.21: Population de Tripoli en 2000 (a), 2010 (b) et 2020 (c).

[animation](#)



L'urbanisation dans le nord de la Libye a entraîné une déforestation qui s'est traduite par une diminution de la couverture végétale et une transformation en espaces urbains.

La figure 22 montre des vues radar de Sentinel-1 et leurs équivalents optiques de Sentinel-2, illustrant un exemple de déforestation près de la ville d'El Baida, dans le nord-est de la Libye. Cette déforestation correspond à l'établissement d'un cimetière, qui s'est étendu au fil du temps, comme le montrent les images VHR (Fig.23).

Suivi de la déforestation

Al Beida

Fig.22: Vues Sentinel-1 et Sentinel-2 de l'évolution d'une déforestation observée près d'Albeida.

[animation S1](#) [animation S2](#)

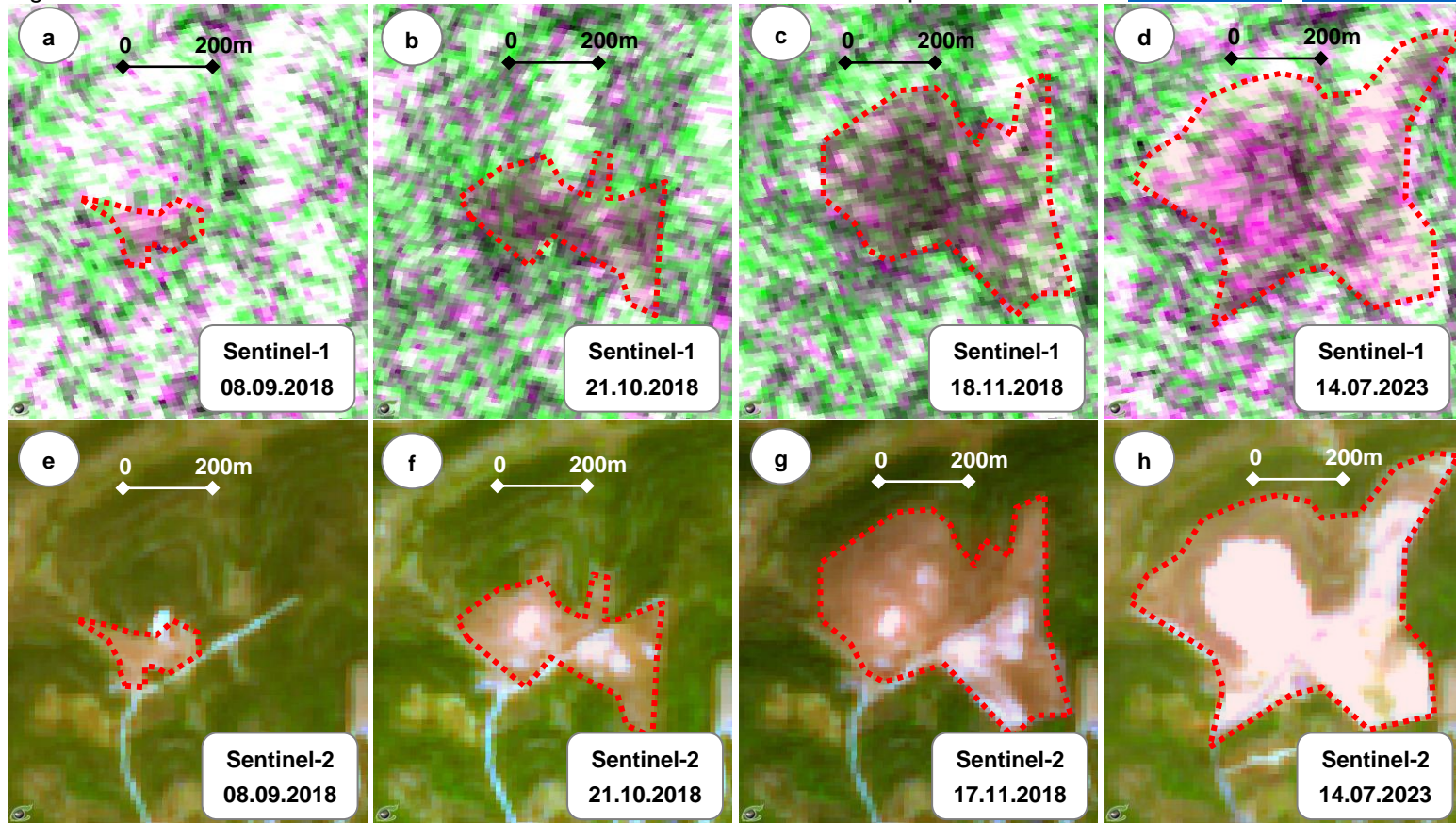
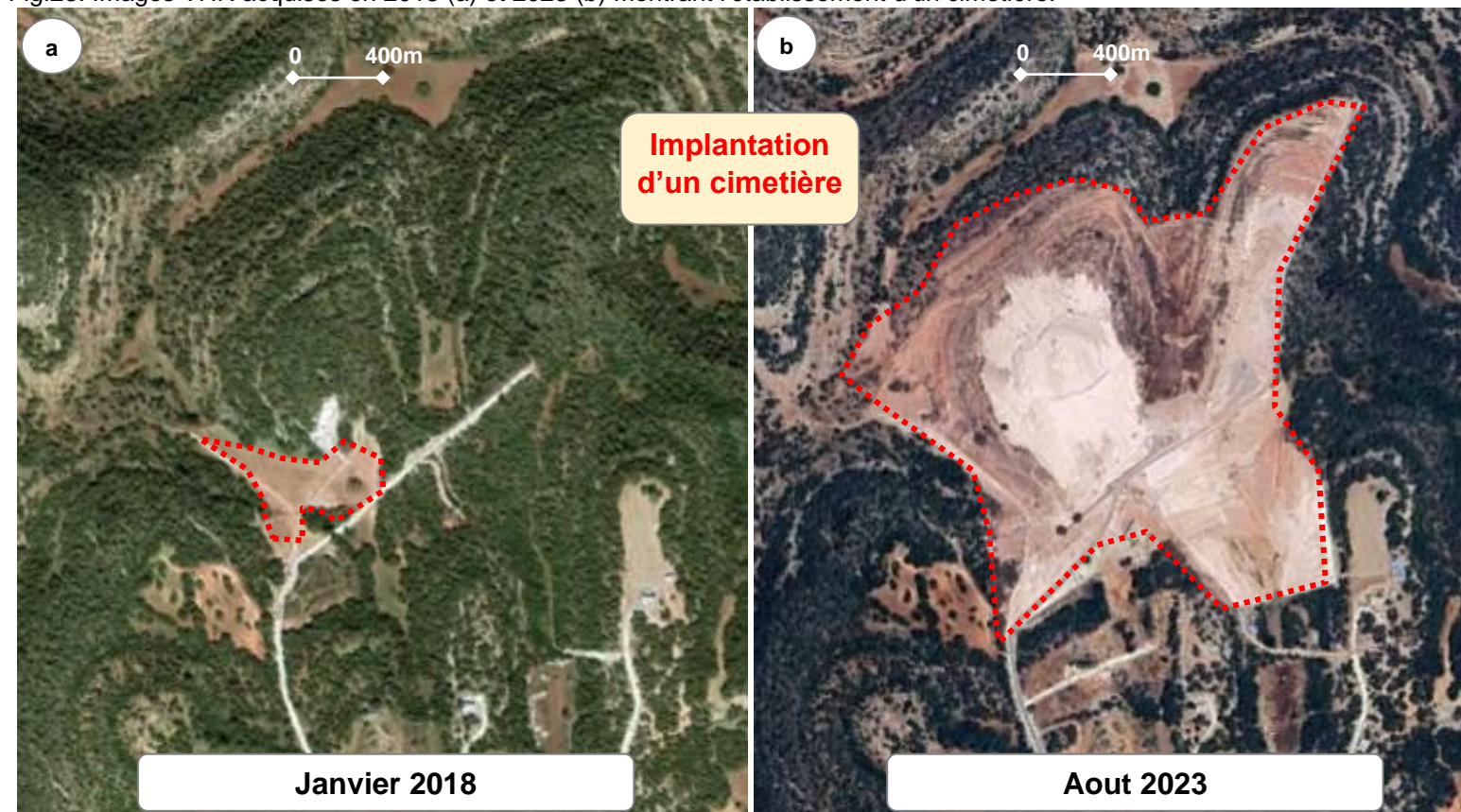


Fig.23: Images VHR acquises en 2018 (a) et 2023 (b) montrant l'établissement d'un cimetière.



En Libye, les inondations sont peu fréquentes mais peuvent être dévastatrices. Les inondations qui se sont produites à Derna en septembre 2023 après le passage de l'ouragan Daniel en sont un exemple. La destruction d'un barrage a entraîné de lourdes pertes en vies humaines et une dévastation généralisée. VisioTerra a mis en place des indicateurs d'inondation calculés à partir des données radar de Sentinel-1 en utilisant des méthodes d'apprentissage automatique basées sur un grand nombre de parcelles d'apprentissage. Cette méthodologie comprend deux étapes :

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

Le produit final est une **carte des risques d'inondation**. Les figures 24 et 25 ci-dessous montrent les images Sentinel-1 et Sentinel-2 avant et après les fortes pluies de Daniel dans la région. Les images radar Sentinel-1 sont acquises tous les 12 jours (pour un seul satellite) ou tous les 6 jours (pour la constellation de deux satellites Sentinel-1). Comme le signal radar traverse les nuages, la régularité de ces observations est garantie. Pour chaque nouvelle image (Fig.25b), la différence entre les pixels classés "eau" et ceux de l'image précédente (Fig.25a) est calculée. Cette différence produit une occurrence supplémentaire de la classe "inondation" (Fig.26).

Flooding risk monitoring

Derna

Derna, habituellement protégée par des barrages le long du Wadi Derna, a subi de graves dommages lors de fortes pluies. Nadeen Ebrahim, de CNN, a [rapporté](#) les destructions causées par une vague de 7 mètres, qui a anéanti les bâtiments et les infrastructures du centre-ville, affectant ainsi une population d'environ 100 000 habitants.

Fig.24: Vue Sentinel-2 du nord-est de la Libye avant et après la tempête Daniel.

[animation](#)

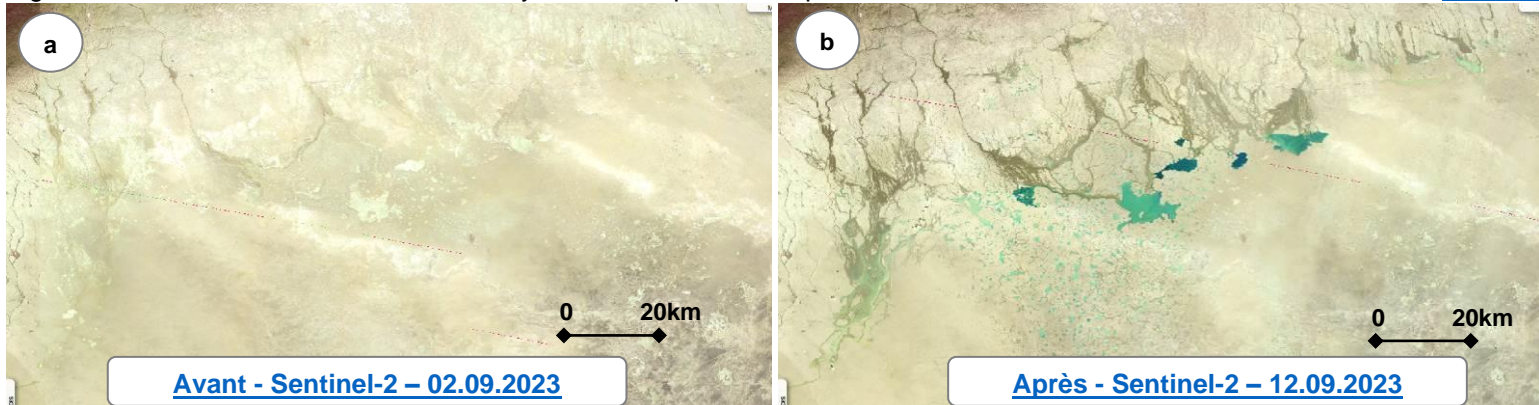


Fig.25: Vue Sentinel-1 du nord-est de la Libye avant et après l'inondation.

[animation](#)

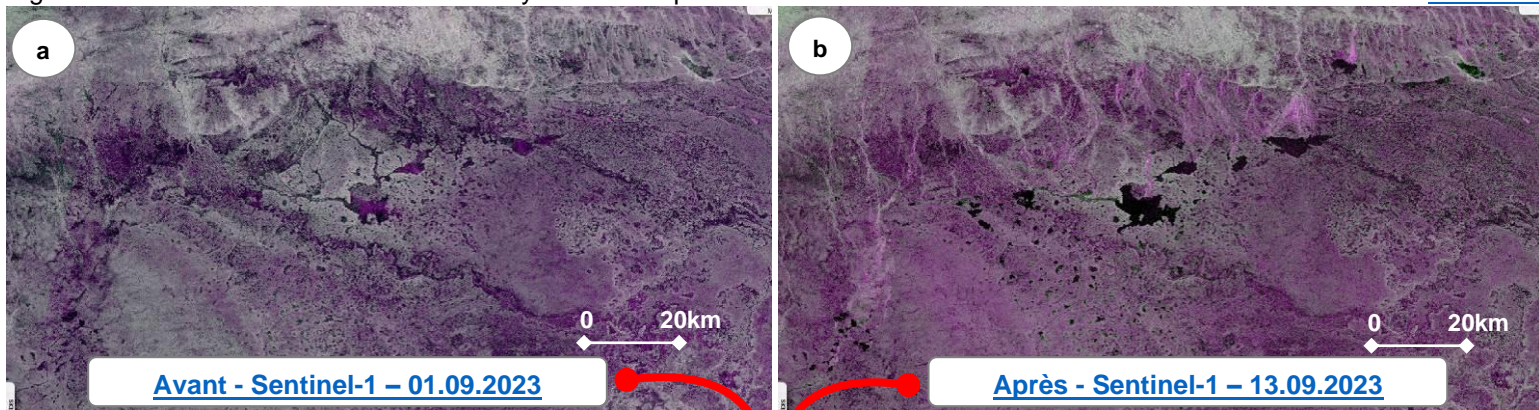
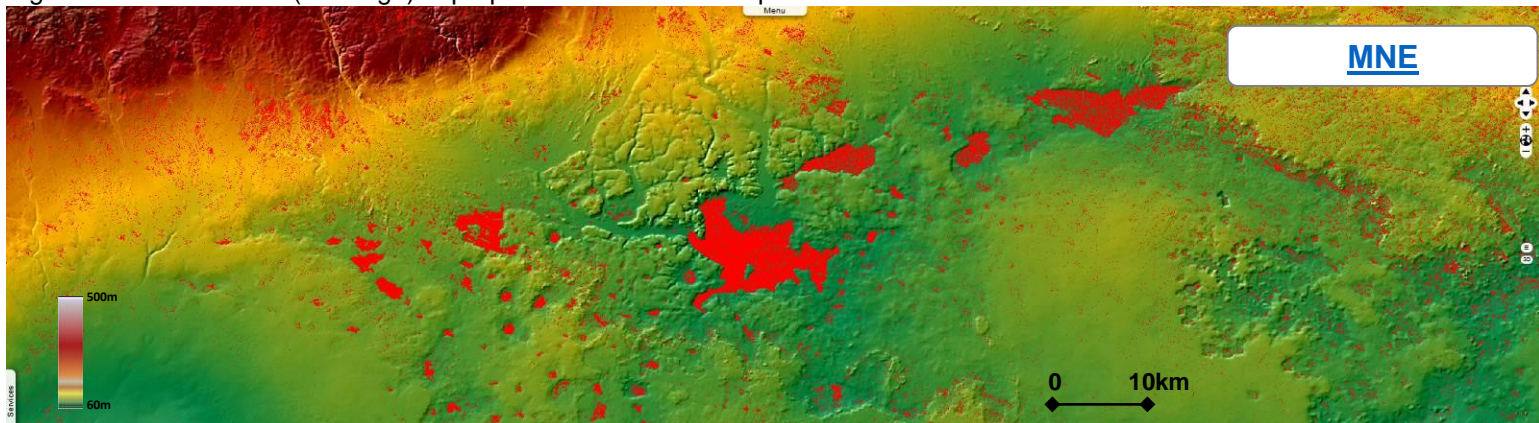


Fig.26: Zones inondées (rouge).



Fig.27: Zones inondées (en rouge) superposées au MNE de Copernicus.



Les images radar de 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 des témoins de pollutions anthropiques (suintements d'hydrocarbures) causées par le déballastage de navires ou des fuites de plateformes pétrolières. Les nappes d'hydrocarbures peuvent également avoir une origine naturelle provenant de réservoirs sous-marins (suintements d'hydrocarbures).

Cette section présente une étude des nappes de pétrole détectées à partir des images radar Sentinel 1 dans la zone économique exclusive (ZEE) de la Libye.

La figure 28 montre des exemples de déversements de pétrole supposés provenir du FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) de Farwa, observés sur l'image radar Sentinel-1 acquise le 11 octobre 2021 et sur l'image optique Sentinel-2 acquise le 9 octobre 2021 dans la ZEE de la Libye.

La plateforme FPSO Farwa est amarrée à 86 km au large de la frontière entre la Libye et la Tunisie. Elle est exploitée par la National Oil Corporation (NOC) libyenne. Les déversements de pétrole semblent mettre en danger la zone marine protégée de la lagune de Farwah. La figure 29 montre un exemple de suintement naturel probable (Fig.29a) et un exemple de déversement d'hydrocarbures provenant d'un navire.

Surveillance des nappes de pétrole en mer

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

Fig.28: Déversements d'hydrocarbures émanant du FPSO de Farwah.

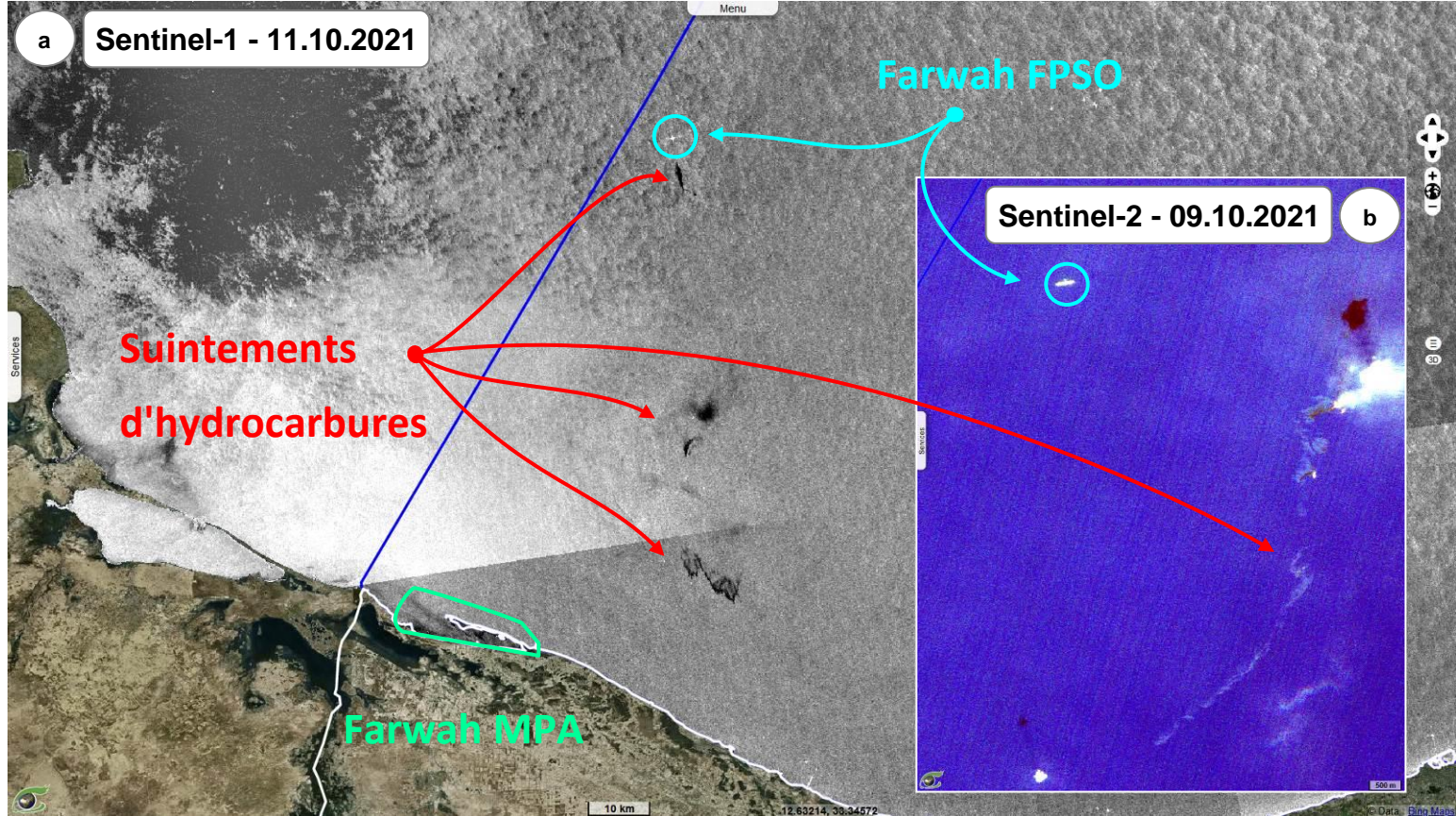
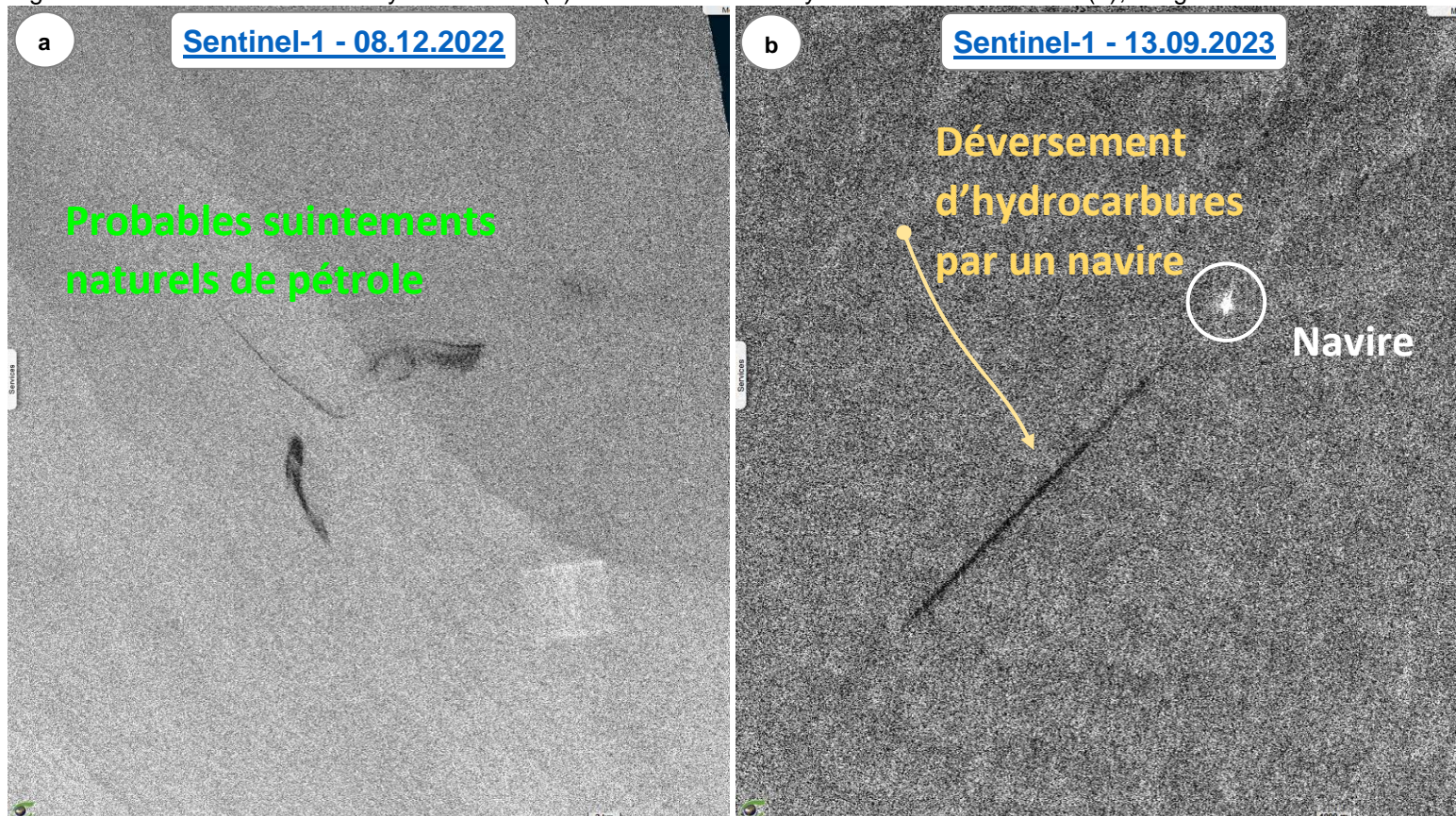


Fig.29: Probables suintements d'hydrocarbures (a) et déversements d'hydrocarbures d'un navire (b), images radar Sentinel-1.



Les données de la 6^{ème} phase [CMIP6](#) de comparaison des modèles climatiques globaux ([CMIP6_2021](#)) décrivent l'évolution des variables climatiques essentielles dont les valeurs de température MIN (nuit), température MAX (jour) et précipitations selon les deux scénarios SSP245 et SSP585 des années 1950 aux années 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 socio-économiques de référence SP1, SP2, SP3, SP4 et SP5 (considérant le PIB par habitant, la population, la gouvernance, l'éducation et la technologie) et un 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](#).

La Fig.30 montre l'évolution des trois variables : température MIN (nuit, T_{min}), température MAX (jour, T_{max}) et précipitations (Pr) selon les deux scénarios SSP245 et SSP585 pour les années 2000, 2020, 2040, 2060, 2080 et 2100. La figure 31 montre une analyse différentielle effectuée par rapport à l'année de référence (2000).

Changement climatique T_{min}, T_{max}, Pr

Les résultats de cette analyse montrent une augmentation des températures maximales et minimales pour les deux scénarios pour l'ensemble de la Libye. Parallèlement, les précipitations diminuent.

Fig.30: Evolution du T_{min}, T_{max} et Pr en Libye.

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

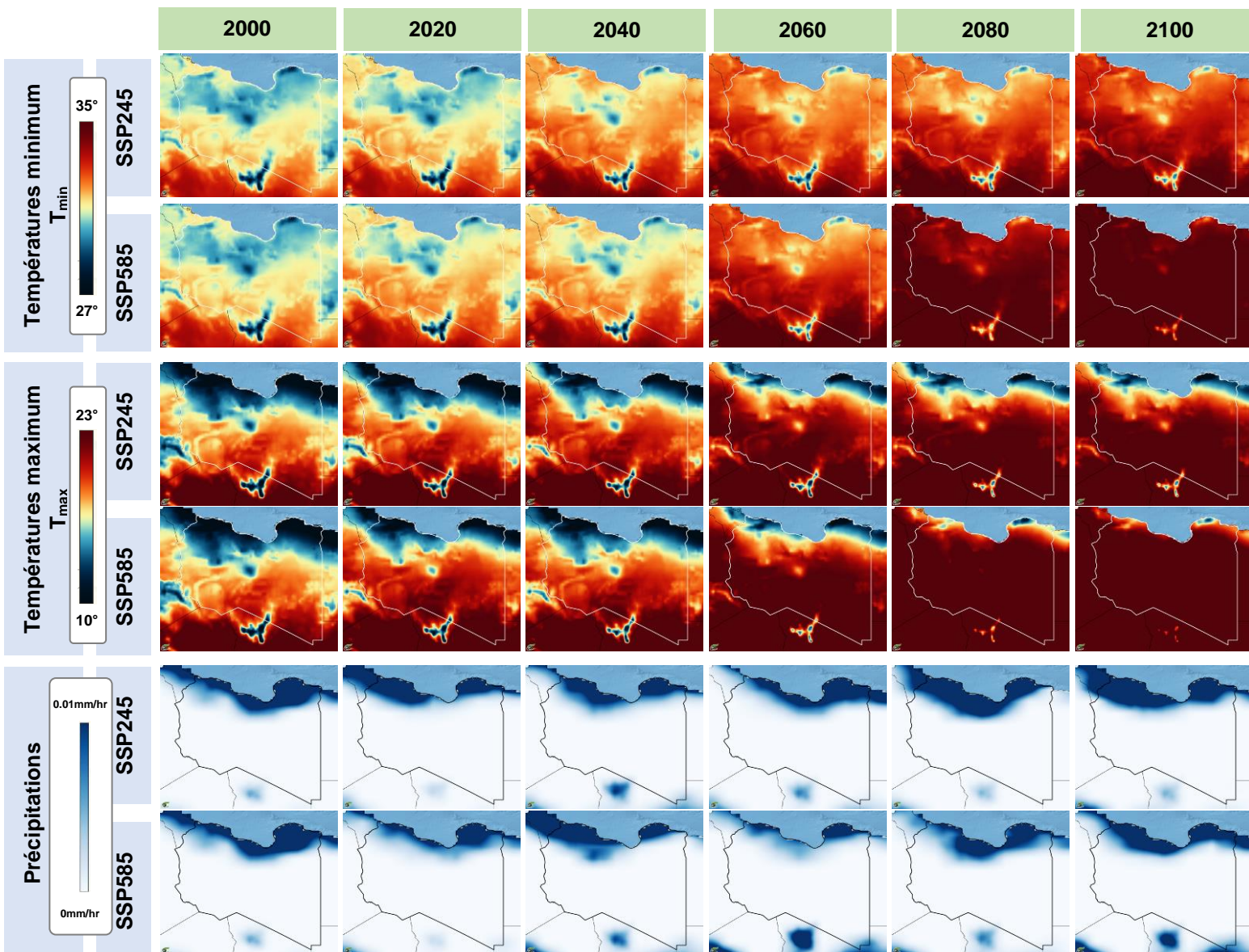


Fig.31: Analyse différentielle par rapport à l'année de référence (2000) pour T_{min}, T_{max} et précipitations pour les deux scénarios.

