

Dans le cadre d'un programme UE d'appui aux aires protégées du Tchad, on démontre que les données Sentinel produites par le programme Copernicus de l'Union Européenne permettent de calculer un indicateur de « **changement d'habitat** ». Cet indicateur anthropique est détecté à travers plusieurs indicateurs biogéophysiques tels que le changement de couvert végétal, les surfaces en eau, les labours, les feux de savane, les traces de transhumance...

La surveillance a été ici testée à partir de deux acquisitions successives des données Sentinel-2 (optique Haute Résolution ou HR) et Sentinel-1 (radar HR) dans la plus grande des réserves de Ouadi-Rimé Ouadi-Achim. Il peut aussi être nécessaire d'accéder aux données météorologiques et en particulier aux précipitations qui sont elles aussi disponibles gratuitement. Les produits Sentinel-1 et Sentinel-2 ont une taille des pixels de 10 mètres. On démontre que des changements de quelques pixels peuvent être détectés, soient des surfaces très inférieures aux 0,5 ha requis.

La photo-interprétation des images satellites de cette pré-étude a été réalisée sans connaissances du terrain. Une analyse plus fine devra être validée avec les observateurs et techniciens Tchadiens eux-mêmes.

# Surveillance des aires protégées

## Réserve Ouadi-Rimé Ouadi-Achim (Tchad)

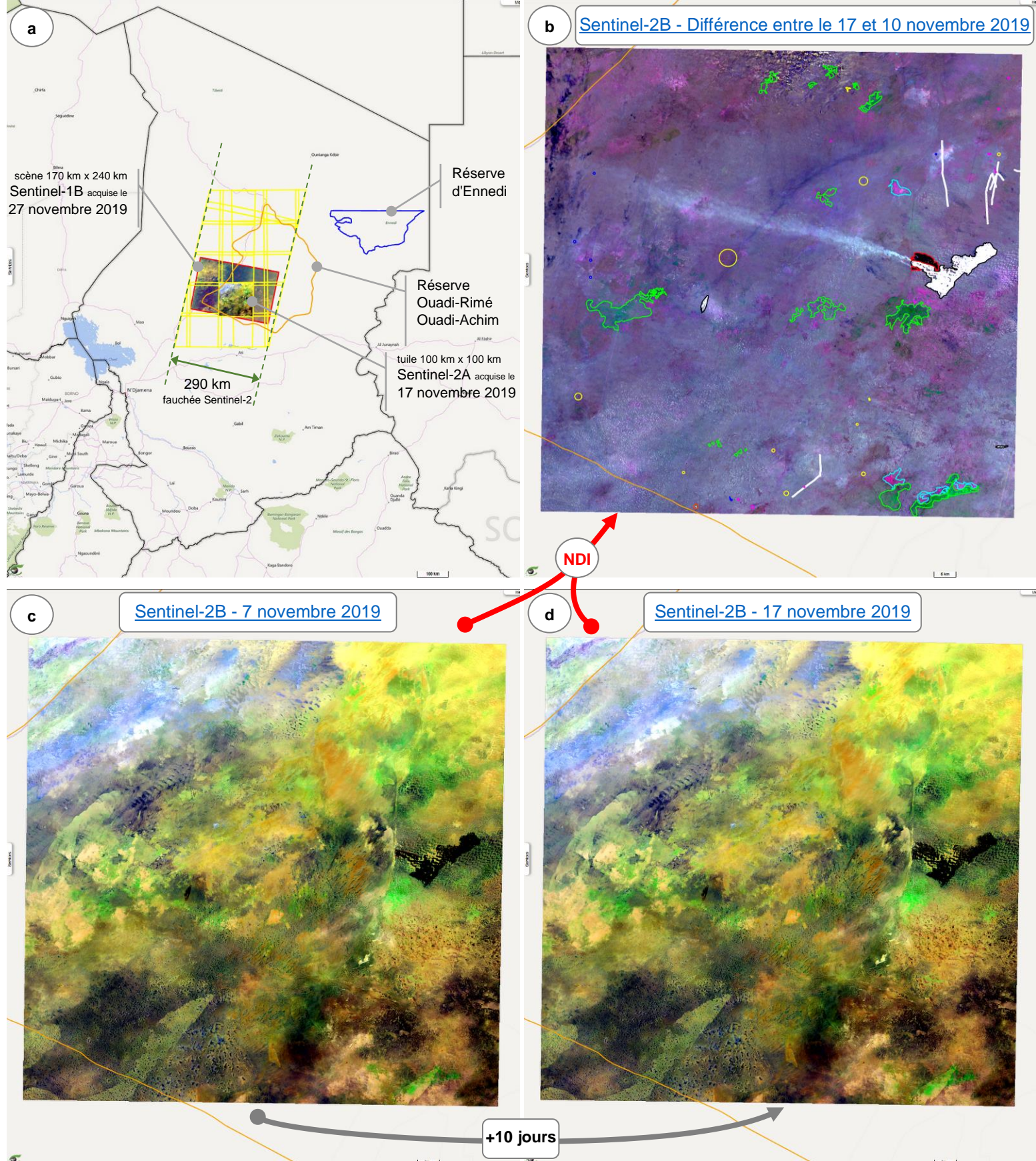
[pile 2D](#)

### Sentinel-2 (optique HR)

Pour chacun des 2 satellites S2A et S2B, le temps de cycle est de 10 jours. Si les 2 sont actifs, le temps de cycle est de 5 jours. Les prochains satellites S2C et S2D seront lancés au cours des 2 à 3 à venir. Si ils sont actifs, on pourra obtenir un temps de revisite de 2,5 jours.

La différence (fig.1b) entre la tuile du 17 novembre (fig.1d) et celle du 7 novembre (fig.1c) est calculée par un index de différence normalisée (NDI). Cette différence est photo interprétée dans ce qui suit.

Fig.1: Position des deux réserves (a) et différence avec Sentinel-2 (b) entre le 17 (d) et le 7 (c) novembre 2019. [animation 2D](#)



On observe plusieurs feux actifs (fig.2d) le 7 novembre 2019 qui sont éteints 10 jours après (fig.2b). Les flammes de ces feux actifs sont clairement visibles en utilisant les bandes moyen-infrarouge (bandes 11 et 12) de l'instrument [MSI](#) de [Sentinel-2](#).

Il est possible (à vérifier) que ces feux de brousse aient été initiés par les bergers pour permettre aux troupeaux de brouter les jeunes pousses.

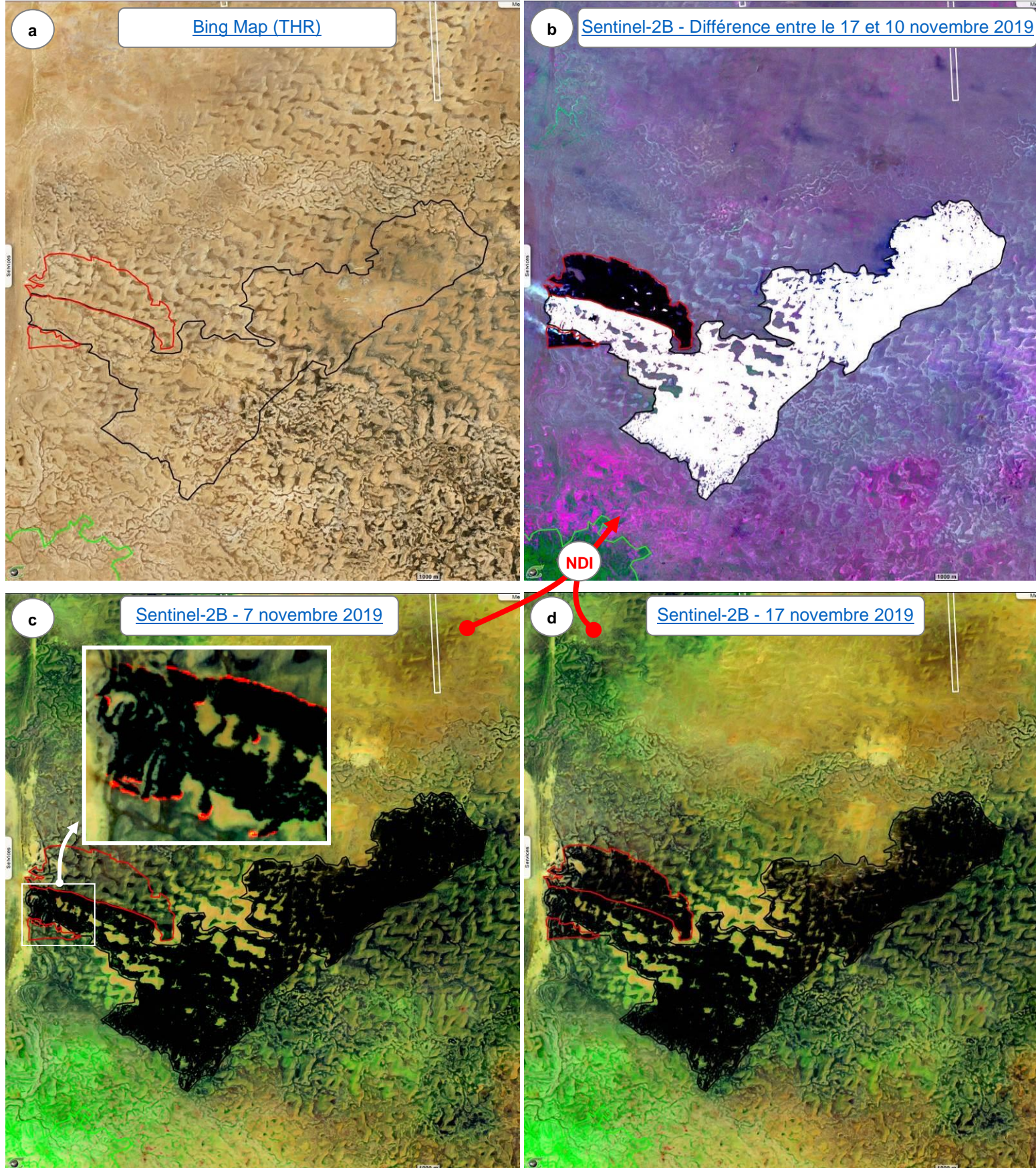
Photo-interprétation de l'image (fig.2b) de différence NDI (*Normalised Difference Index*) :

1. **Pas d'événement** - Lorsqu'aucun changement n'est détecté entre les 2 dates, la zone reste grise.
2. **feu actif** - les pixels de feu actif passé sont de couleur cyan (complémentaire du rouge).
3. **zone brûlée nouvelle** - les aires brûlée n'apparaissant que dans la nouvelle image sont en noir.
4. **zone brûlée ancienne** - les aires déjà brûlée voient les cendres disséminées ou assimilées par le sol et les jeunes pousses saturent la différence en blanc.

## Indicateur 1 - Feux et aires brûlées avec assimilation des cendres

[animation 2D](#)

Fig.2: Image THR (a) et différence (b) entre les Sentinel-2 observées le 17 (d) et le 7 (c) novembre 2019.



Un des avantages des différences normalisées (fig.3b) est de pouvoir détecter de faibles différences dans les zones de faible intensité (fig.3c et fig.3d).

On remarque ici le panache d'une aire brûlée passée (c.à.d. résultant d'un feu de brousse ayant eu lieu avant le 7 novembre 2019) et issu d'un « point de rencontre » (fig.3a). On appelle « point de rencontre » une zone de convergence de pistes (configuration radiale) sans habitat en dur identifiable dans l'image à Très Haute Résolution (fig.3a).

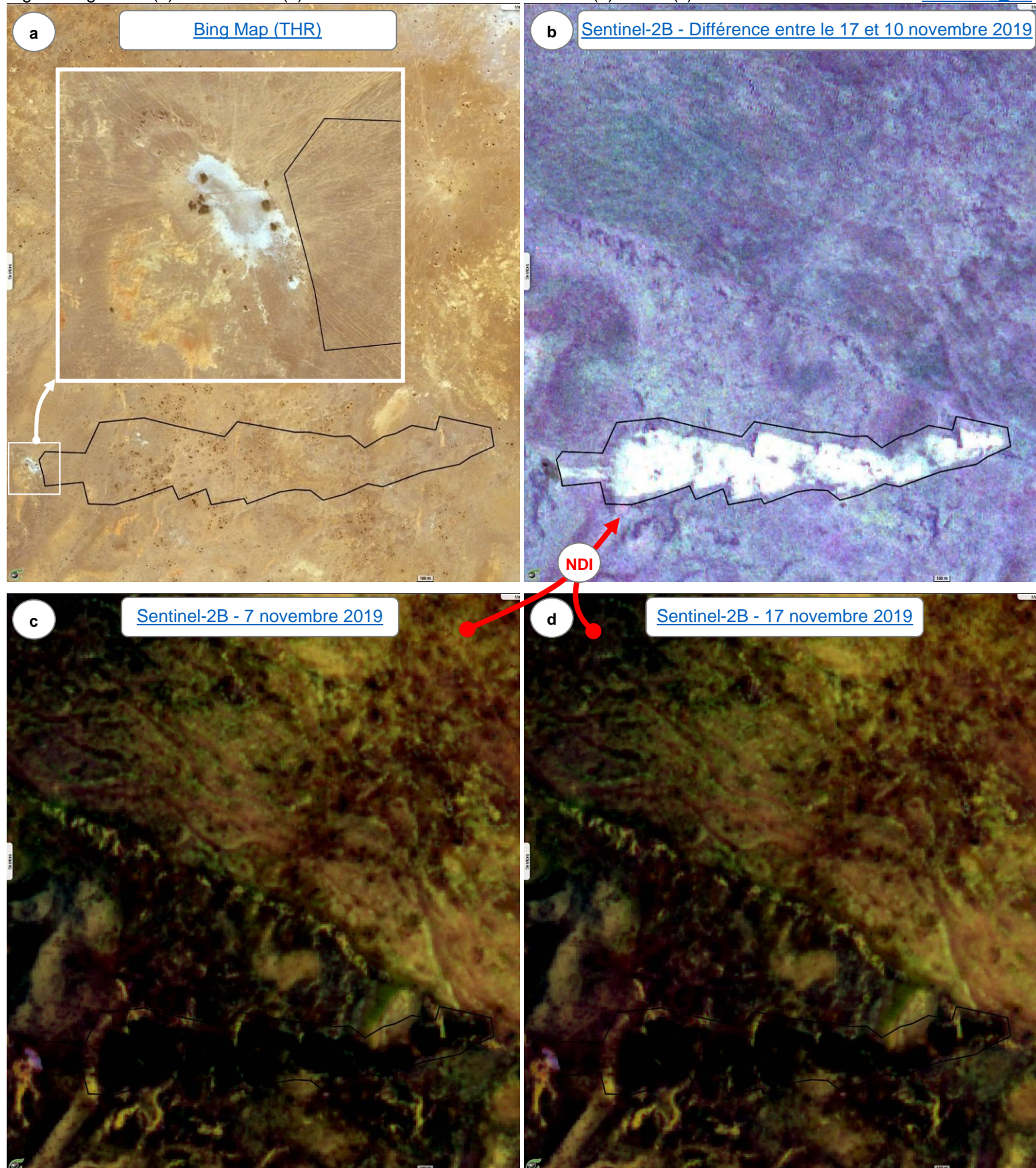
Sauf à prendre le risque de brûler la partie habitée du « point de rencontre », il est probable que ce feu de brousse était accidentel.

Comme en fig.2, cette zone blanche est le témoin de la dispersion des cendres ou de leur assimilation par le sol ainsi que de la reconquête des sols par une végétation ténue.

## Incendie involontaire partant d'un « point de rencontre » ?

Fig.3: Image THR (a) et différence (b) entre les Sentinel-2 observées le 17 (d) et le 7 (c) novembre 2019.

[animation\\_2D](#)



Même dans des zones désertiques (fig.4a), les quelques pluies survenues pendant les 10 jours et surtout l'humidité (voir fig.16 et fig.17) ont produit un regain d'activité chlorophyllienne à laquelle est sensible la bande 8 (proche-infrarouge) de l'instrument MSI de Sentinel-2. Cette bande est affectée au plan vert dans la composition colorée 11,8,2 (RVB). Cette (re)végétalisation est donc marquée d'un vert lumineux en fig.4b qu'on a délimité avec un polygone de couleur verte. A l'inverse, une perte de végétation apparaît dans la même image de couleur magenta (couleur complémentaire du vert). Ces zones de dévégétalisation ont été détournées avec des polygones de couleur cyan.

Cet indicateur est foncièrement lié aux précipitations et aux propriétés d'absorption des sols. La distribution des zones de revégétalisation / dévégétalisation sont des indices essentiels pour caractériser les zones de charge / décharge des nappes d'eau souterraines.

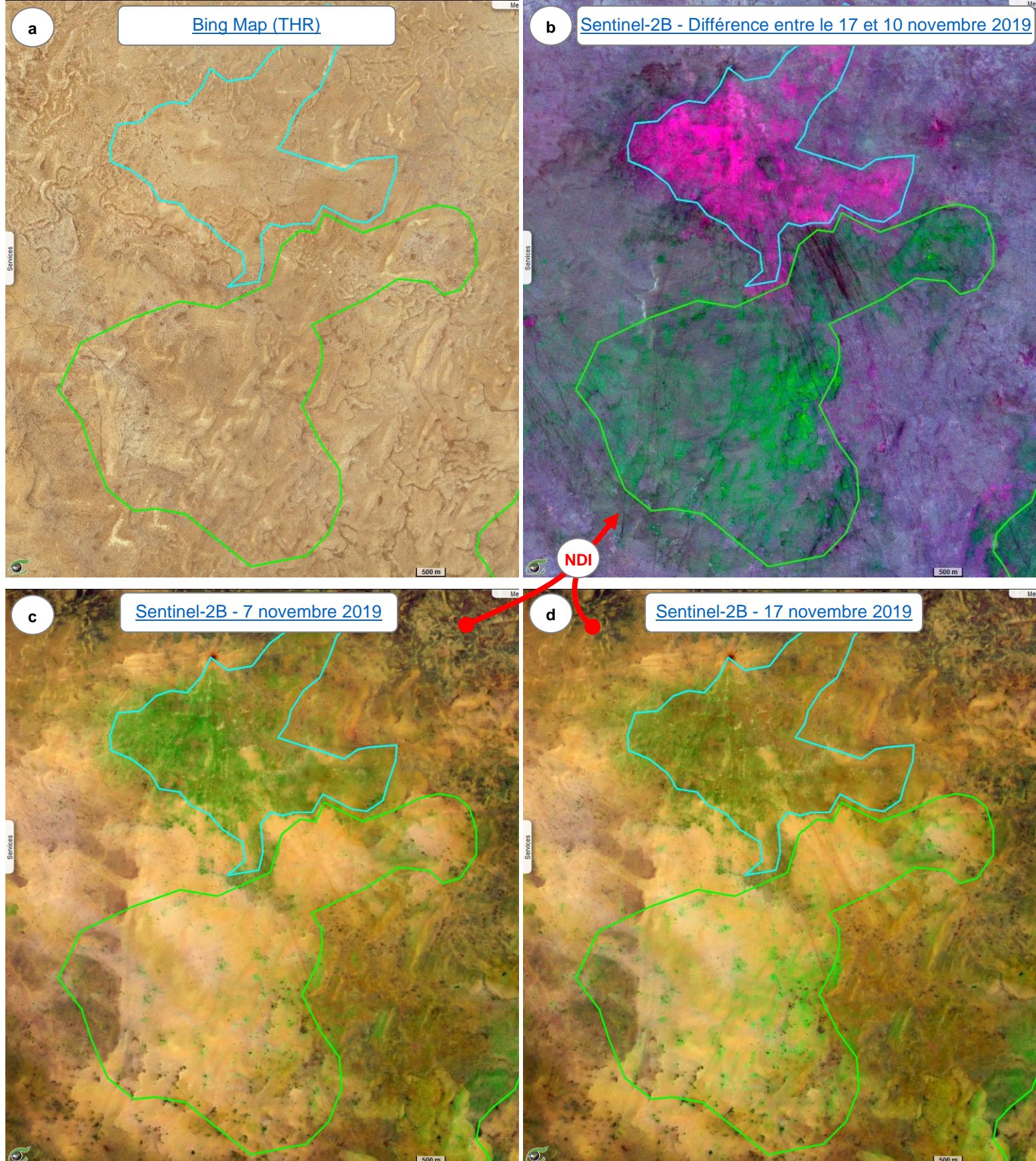
Les variations de cet indice peuvent aussi être corrélées à l'activité agricole : les cultures produisant une revégétalisation alors que les récoltes / labours produisant une dévégétalisation (voir fig.5).

Enfin, on note ici que les zones dévégétalisées sont systématiquement situées immédiatement au nord des zones revégétalisées. Ne serait-ce pas la marque de broutement des troupeaux dont on devine la trace du sud au nord ?

## Indicateur 2 - (Re)végétalisation / Dévégétalisation

[animation 2D](#)

Fig.4: Image THR (a) et différence (b) entre les Sentinel-2 observées le 17 (d) et le 7 (c) novembre 2019.



Des cultures sédentaires sont présentes dans les régions proches des rivières et points d'eau. L'analyse des différences normalisées (fig.5b) permet de distinguer les parties de croissance de végétation (en vert) et les parties de prélèvements / récoltes dans la couleur complémentaire (magenta).

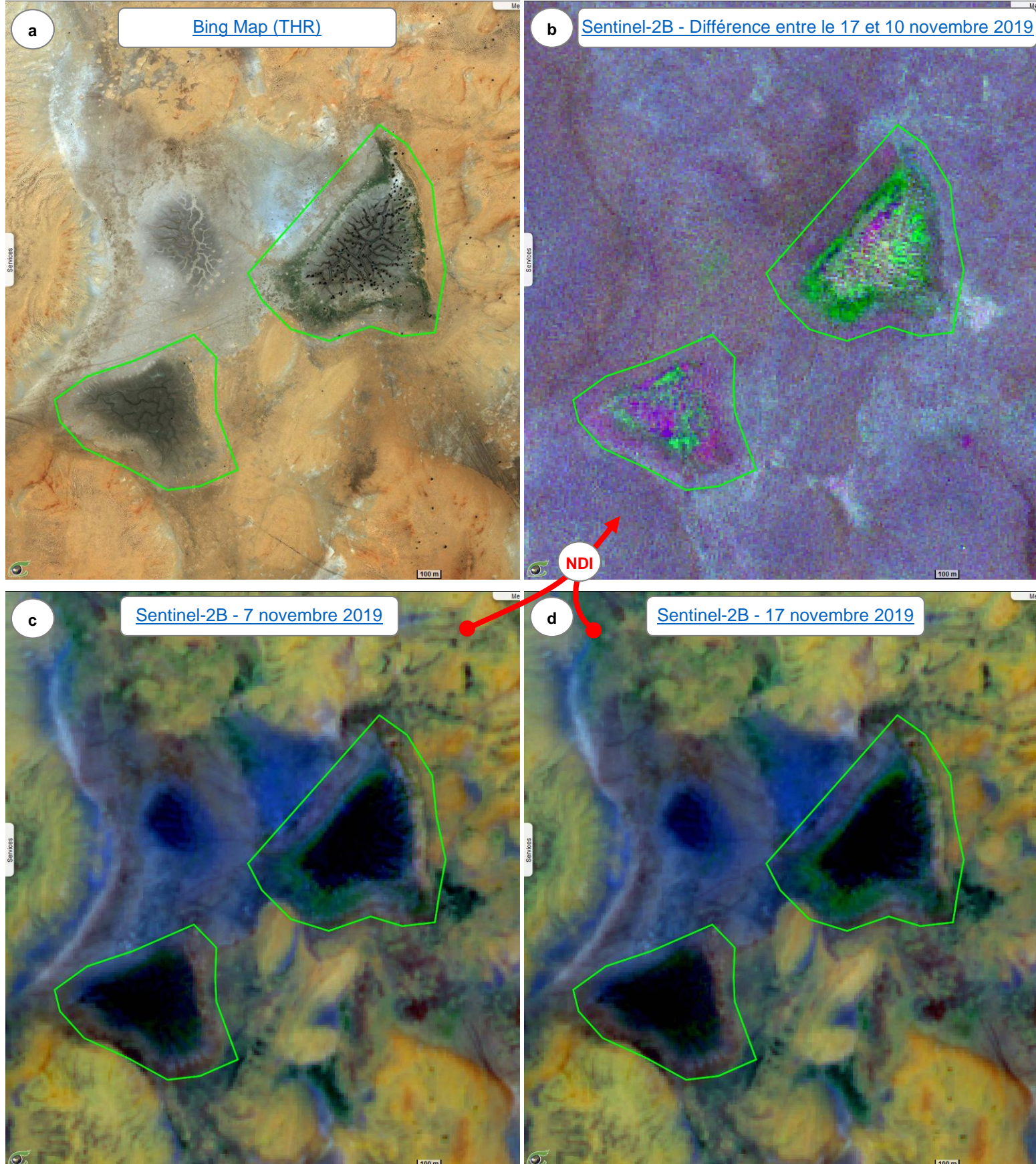
On peut aussi parfois distinguer des lignes d'irrigation.

Cet indicateur 2 basé sur la différence normalisée des bandes 11,8,2 donne des résultats très comparables à ceux fournis par l'indicateur 3 de NDVI (voir fig.6 ci-après).

## Indicateur 2 - Activités agricoles de végétalisation / prélèvements

[animation\\_2D](#)

Fig.5: Image THR (a) et différence (b) entre les Sentinel-2 observées le 17 (d) et le 7 (c) novembre 2019.



L'indice de végétation est sans doute le plus connu des indicateurs de différence normalisée. Sa version de base calcule le ratio  $(PIR - Rouge) / (PIR + Rouge)$  où PIR est le proche-infrarouge (bande 8 à 10 mètres ou 8A à 20 mètres dans l'instrument MSI de Sentinel-2). Des variantes existent qui permettent d'éviter des confusions parfois rencontrées sur les sols nus.

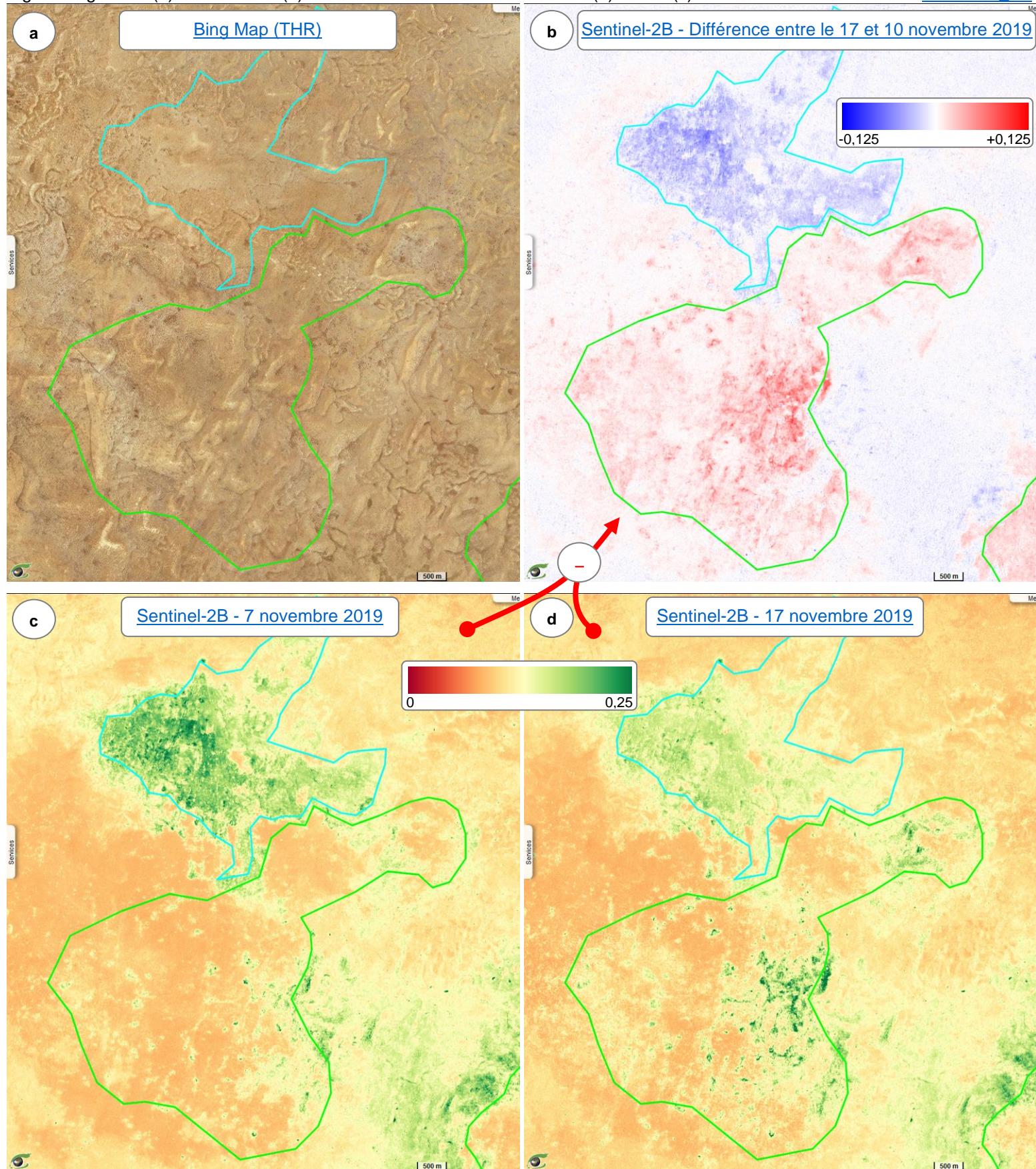
Dans cette région aride du Tchad, le NDVI est étiré à des valeurs extrêmes  $[0 ; 0,25]$  pour pouvoir distinguer les rares traces de végétation. Les fig.5c et fig.5d illustrent le calcul à la volée de ce NDVI en utilisant une table de lookup (« LUT NDVI ») soulignant les parties végétales de couleur verte et les parties plus minérales ou étendues d'eau en rouge.

Les variations de cet indice de végétation entre les deux dates sont calculées elles aussi à la volée par une différence des deux NDVI (fig.6b). Le gain de NDVI est restitué en rouge alors que la perte est restituée en bleu en utilisant une autre table de lookup (« LUT polaire »).

### Indicateur 3 - Gain / perte de l'indice de végétation

Fig.6: Image THR (a) et différence (b) entre les Sentinel-2 observées le 17 (d) et le 7 (c) novembre 2019.

[animation\\_2D](#)



Faisant suite aux pluies éparses, une étendue d'eau est apparue dans l'image du 17 novembre 2019 (fig.7d) alors qu'elle n'apparaissait pas 10 jours auparavant (fig.7c).

Il est tout autant surprenant de constater que l'image THR (fig.7a) ne montre pas une forme d'oued ni même tout stigmate ancien d'écoulement ou de stationnement d'eau.

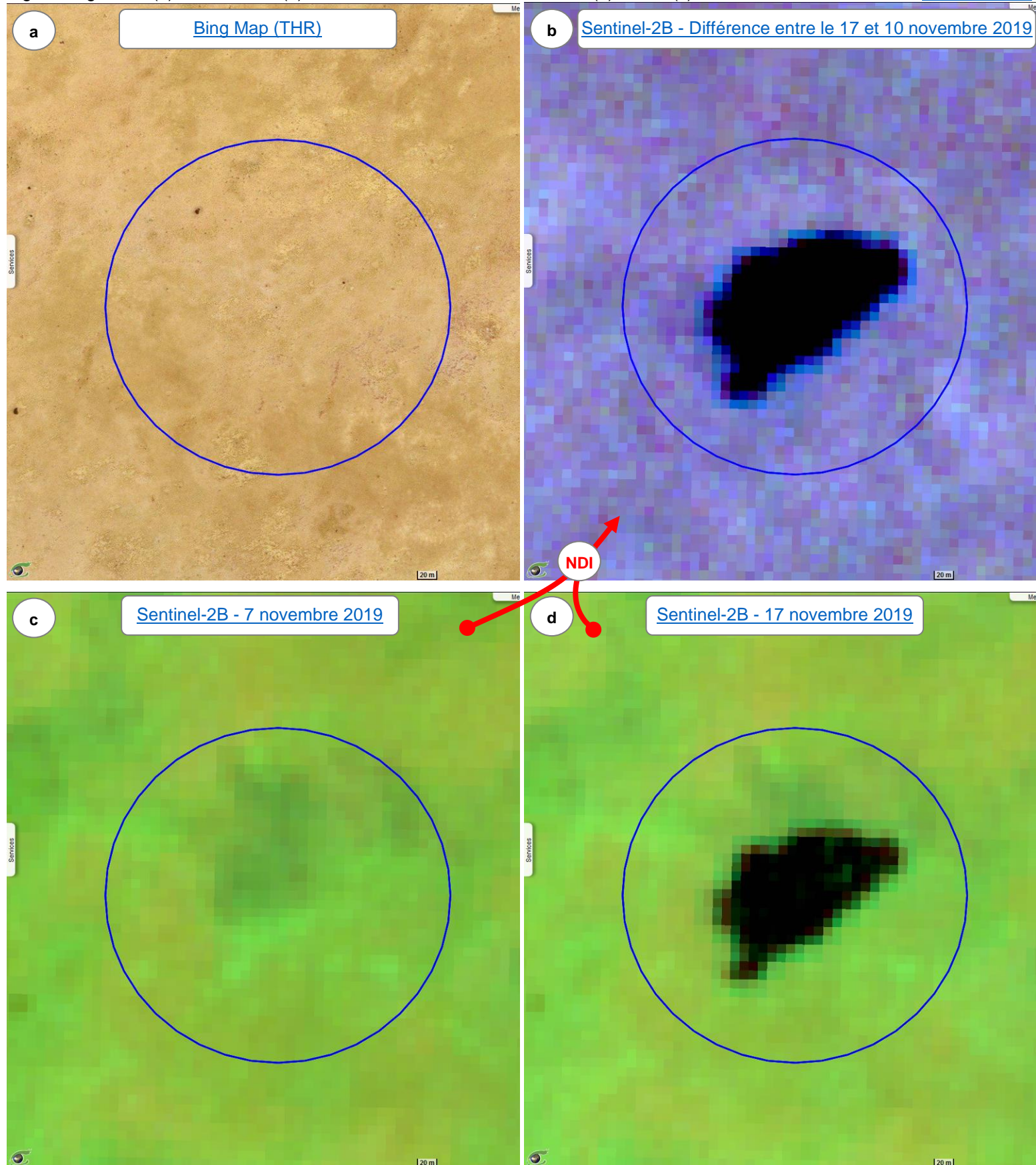
Il est probable que les populations nomades connaissent ces lieux de stagnation d'eau. On notera que l'une des routes supposées de transhumance (voir fig.14) passe à moins de 1500 mètres à l'est de ce nouveau point d'eau.

La signalisation en temps quasi-réel de ces nouveaux points d'eau doit pouvoir être adressée à des populations nomades.

## Indicateur 4 - Surfaces en eaux / Nouveau point d'eau

Fig.7: Image THR (a) et différence (b) entre les Sentinel-2 observées le 17 (d) et le 7 (c) novembre 2019.

[animation\\_2D](#)



Cette technique des différences normalisées permet aussi de détecter le retour de l'eau dans les oasis déjà connus. La fig.8a montre une zone de convergence des pistes, un habitat sédentaire et des traces de sols nus humides.

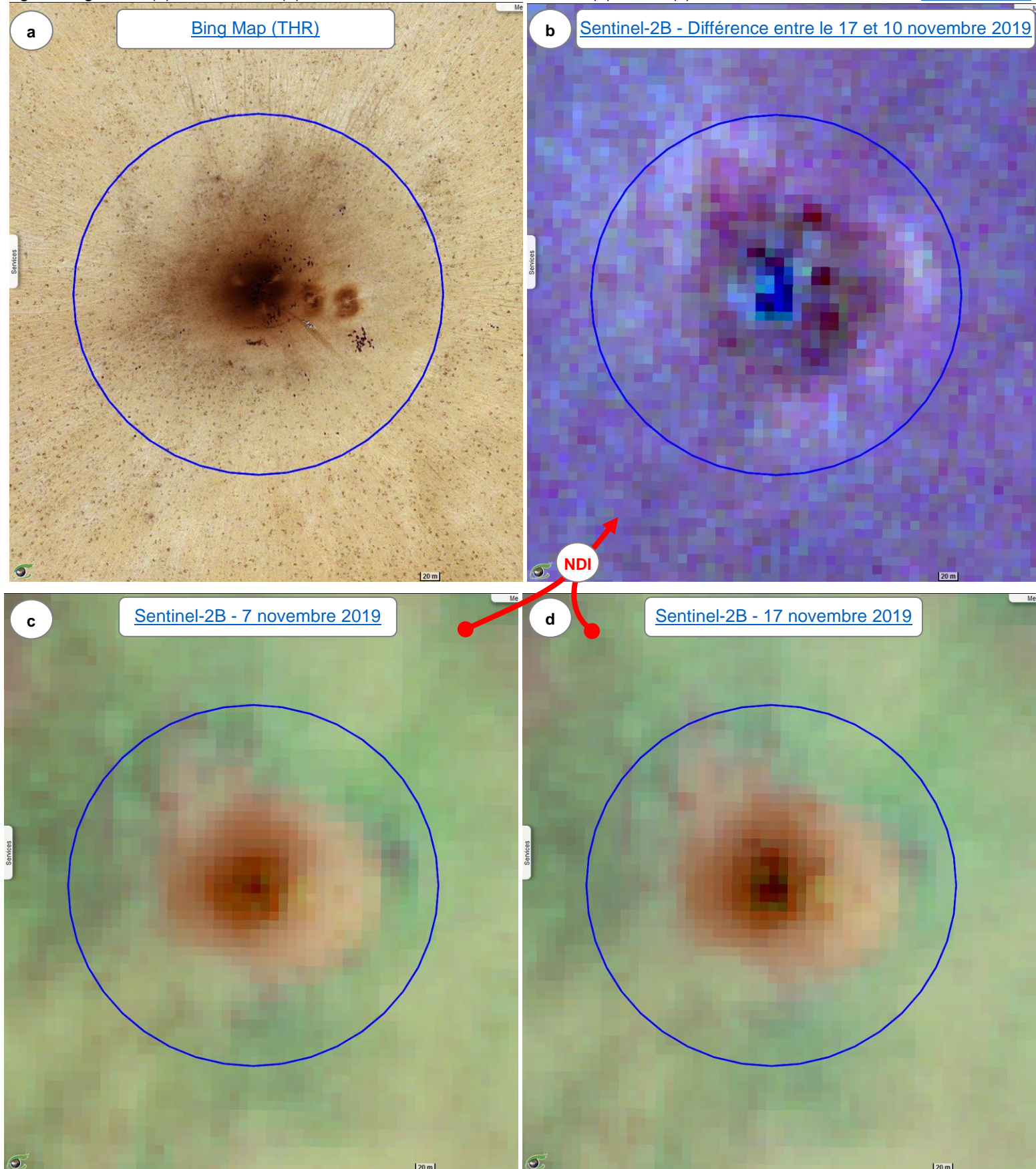
Le léger gain en eau retenue entre les deux dates des 7 novembre (fig.8c) et 17 novembre 2019 (fig.8d), soit à seulement 10 jours d'intervalle, est nettement révélé en fig.8b de différence normalisée.

La position des « pixels en eau » (ici en forme de croissant) permet de localiser avec précision (pixel de 10m x 10m) la position des retenues et sans doute d'en déduire la perméabilité en subsurface.

## Indicateur 4 - Surfaces en eaux / Oasis

[animation\\_2D](#)

Fig.8: Image THR (a) et différence (b) entre les Sentinel-2 observées le 17 (d) et le 7 (c) novembre 2019.





A l'inverse des fig.7 et fig.8, on peut observer une diminution de la composante bleue entre les deux dates. C'est donc le jaune (couleur complémentaire du bleu) qui apparaît dans les images de différence normalisée.

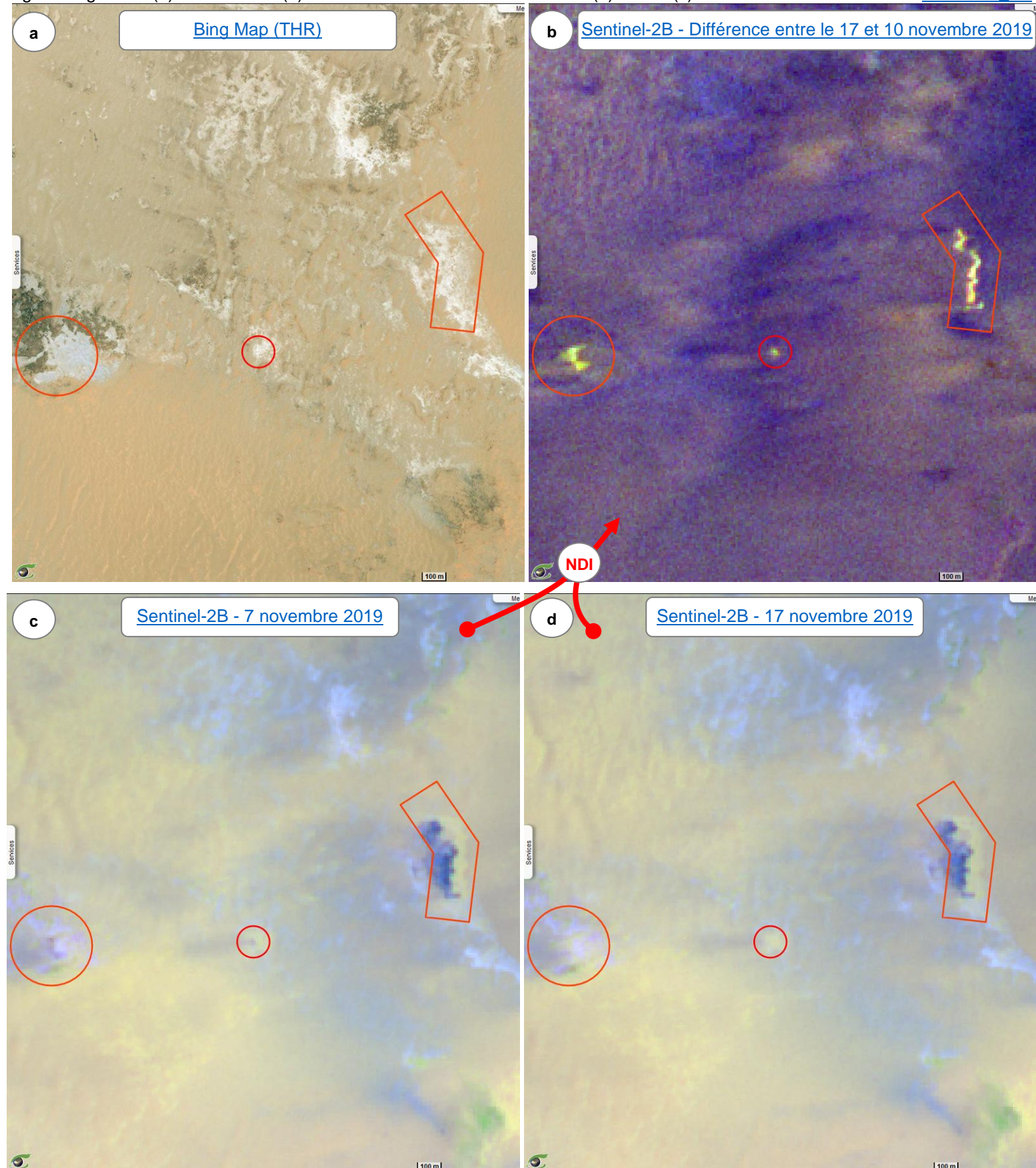
Ces points et surfaces de couleur jaune apparaissent sur les sols asséchés ou le long d'oued asséchés ou en contrefort des collines à l'interface entre les sables et les roches (fig.9b).

L'image THR (fig.9a) montre que les différences de teneur en eau sont très dépendantes de la nature des sols (lithologie de surface).

## Indicateur 4 - Surfaces en eaux / Assèchements

Fig.9: Image THR (a) et différence (b) entre les Sentinel-2 observées le 17 (d) et le 7 (c) novembre 2019.

[animation\\_2D](#)



Dans les images multispectrales telles que Sentinel-2 MSI, on peut évaluer un « indice d'humidité de surface » en calculant un indicateur de différence normalisée entre la bande proche-infrarouge (bandes 8 à 10m ou 8A à 20m pour Sentinel-2) et la première bande moyen-infrarouge (bande 11 pour Sentinel-2). La zone choisie est exactement celle de la fig.7 qui avait permis d'identifier un nouveau point d'eau en utilisant l'indicateur 4.

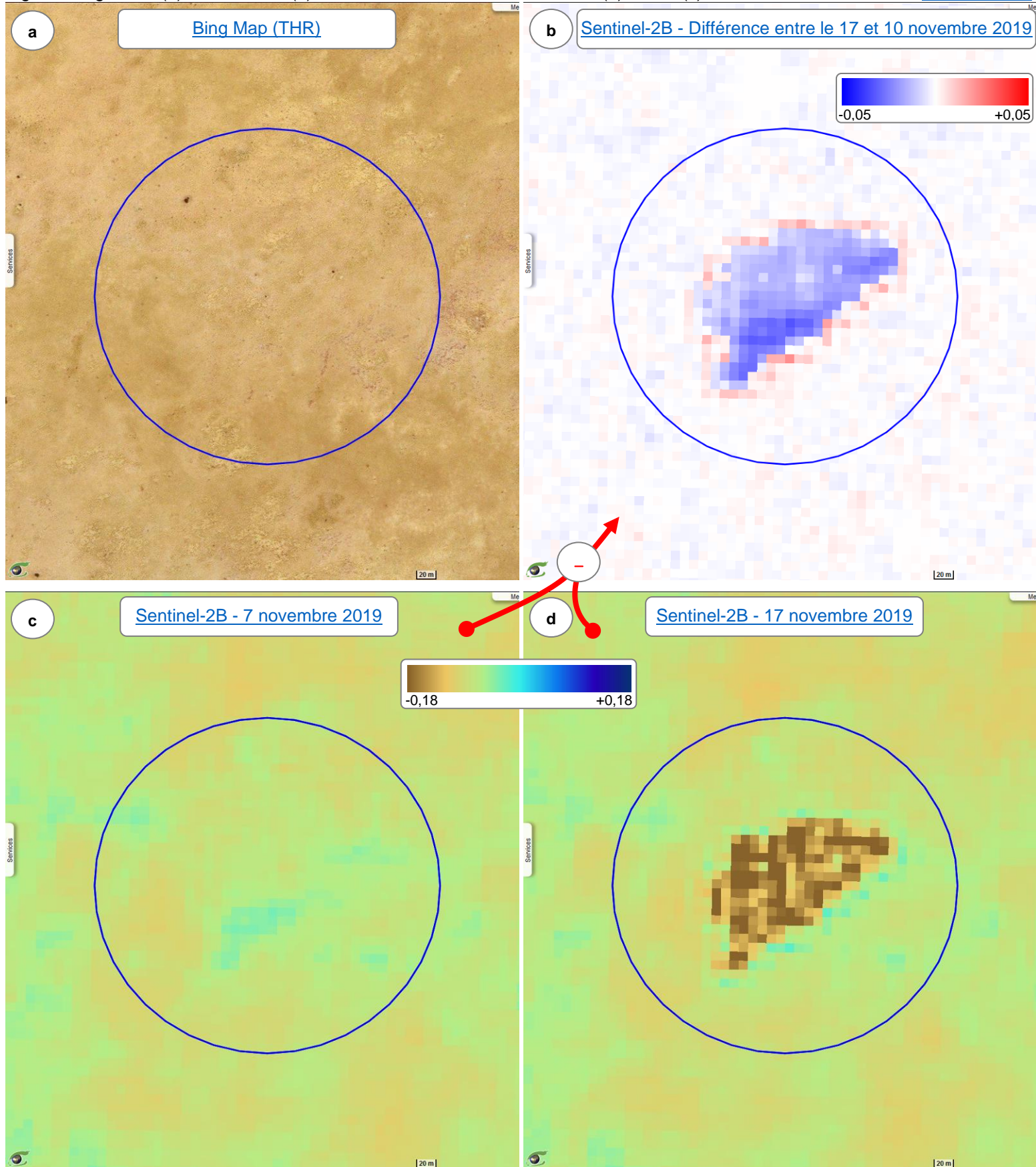
En fig.10c et fig.10d on utilise une table de rendu (« LUT sec/humide ») pour restituer les parties sèches en marron et les zones humides en bleu. Comme pour l'indicateur 4, on note une nette différence des valeurs entre les deux dates (fig.10c et fig.10d).

Cette différence est restituée en fig.10b en utilisant une autre table de rendu (« LUT polaire ») faisant apparaître en bleu les pertes d'humidité le 17 novembre et en rouge les gains d'humidité. Cette différence est plus complexe à interpréter : la hausse d'humidité au 17 novembre 2019 est située sur le pourtour de la zone (corolle rouge) alors que l'intérieur de la forme marque une baisse de l'indice d'humidité de surface (couleur bleue). Cette singularité est la marque d'eaux libres que révèle l'indice n°6 d'eaux libres (fig.11b).

## Indicateur 5 - Indice d'humidité de surface (PIR - MIR)

Fig.10: Image THR (a) et différence (b) entre les Sentinel-2 observées le 17 (d) et le 7 (c) novembre 2019.

[animation\\_2D](#)



Dans les images multispectrales telles que Sentinel-2 MSI, on peut évaluer un « indice d'eaux libres », c'est-à-dire de couvertes d'eau et non seulement humides, en calculant un indicateur de différence normalisée entre la bande verte (bande 3 à 10m pour Sentinel-2) et la bande proche-infrarouge (bande 8 à 10m ou bande 8A à 20m pour Sentinel-2).

Dans cette région aride, cet indice doit être particulièrement étiré pour identifier de très rares et petites zones d'eaux libres. Ici, on utilise la table de rendu « LUT sec/humide » dans laquelle les zones sèches apparaissent en marron et les zones humides en bleu.

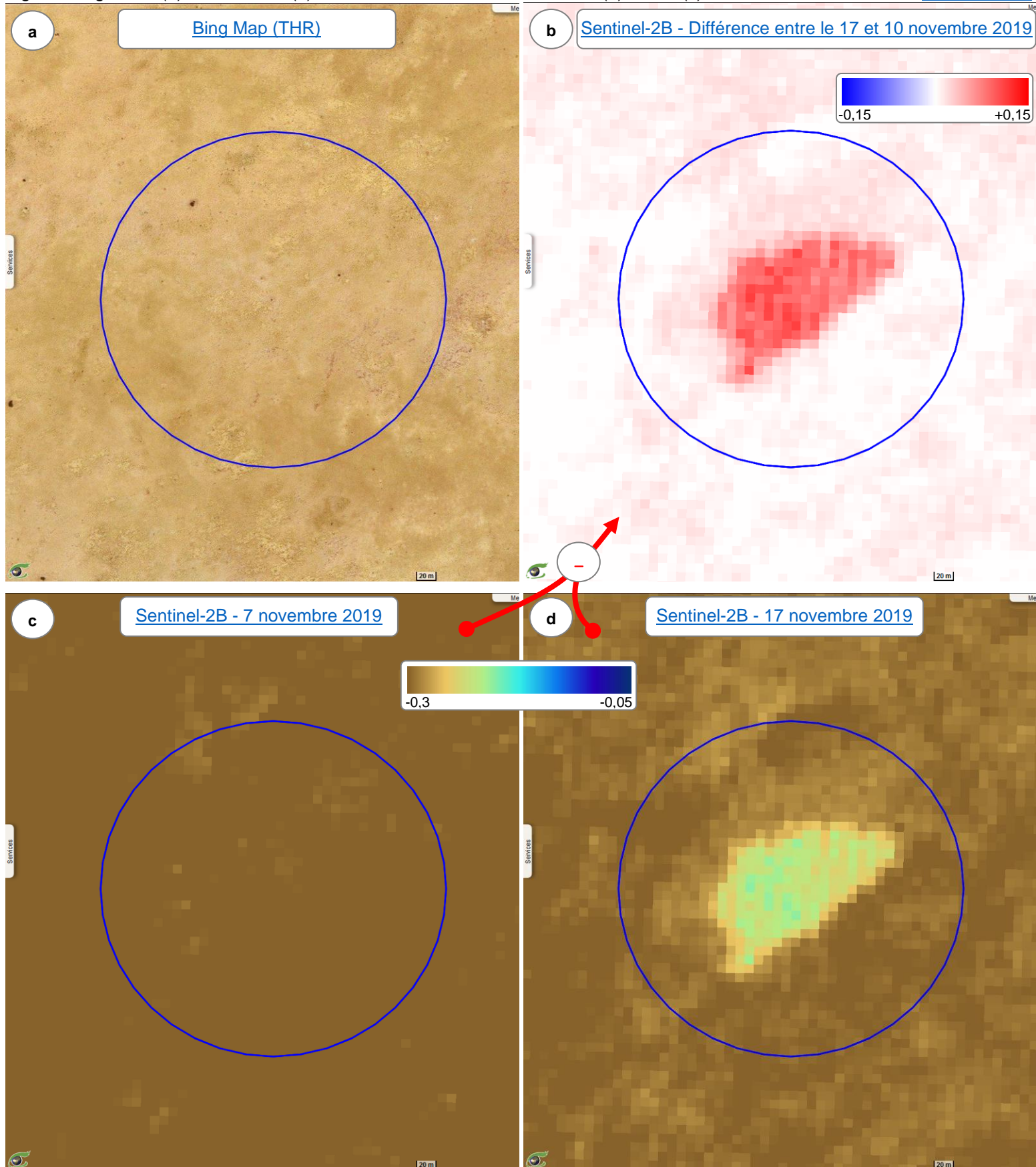
L'image fig.11b utilise la table de rendu « LUT polaire » pour illustrer les pertes d'humidité le 17 novembre 2019 par la couleur bleue et les gains d'eaux libres par la couleur rouge. La forme d'eaux libres apparait nettement en fig.11b.

Ainsi le nouveau point d'eau absent le 7 novembre 2019 et apparaissant le 17 novembre 2019 qui avait été repéré par l'indicateur n°4 (fig.7) ainsi que par l'indicateur n°5 (fig.10) est confirmé par l'utilisation de cet indicateur n°6 (fig.11).

## Indicateur 6 - Indice d'eaux libres (Vert - PIR)

Fig.11: Image THR (a) et différence (b) entre les Sentinel-2 observées le 17 (d) et le 7 (c) novembre 2019.

[animation\\_2D](#)

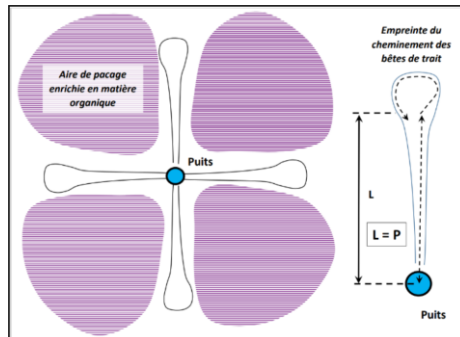


Cette fig.12 rassemble 4 cas de concentrations humaines sous la forme de villages (de très rares bâts en dur sont observés dans l'image THR), oasis (cas déjà observé avec l'indicateur n°4 des surfaces en eaux, voir fig.8) et plus généralement de points de rencontres à la confluence des pistes.

Fig.12.a1 et fig.12.a4 - « trèfles à 4 feuilles » visibles dans les images THR correspondant à des « puits pastoraux ». Les zones sombres sont dues aux déjections des troupeaux attendant de s'abreuver et les zones claires (limites des pétales du trèfle) correspondent au chemin d'exhaure de l'animale (d'après [B. Collignon, 2022](#)).

Fig.12.a2 - sans doute un puits de pétrole au nord et une zone de convergence humaine au sud. Des bâtiments en durs sont distinguables dans l'image THR. Ils sont situés exactement entre le puits et la zone de convergence humaine.

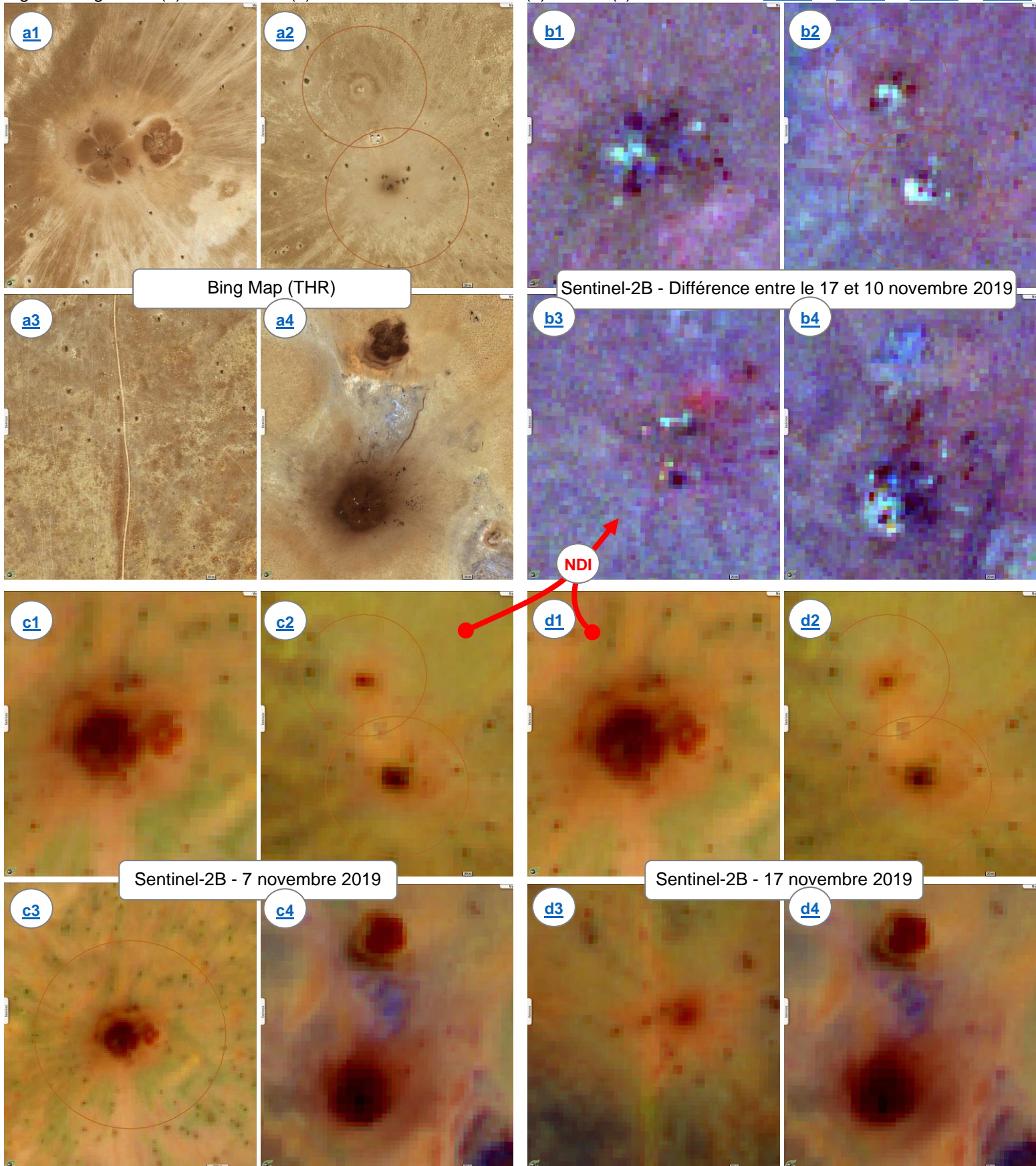
Fig.12.a3 - village / relais le long de la piste / route menant de la ville d'Ati au sud à Olanga au nord. Bien que ce relais n'apparaisse pas dans l'image THR, on observe beaucoup de changements entre l'image du 7 novembre 2019 (fig.c3) celle du 17 novembre 2019 dans laquelle les marques de terre nue sombre ont presque totalement disparue, témoignant d'une activité humaine plus intense avant le 7 novembre 2019.



## Indicateur 7 - Points de rencontre puits pastoraux, oasis, forage...

Fig.12: Image THR (a) et différence (b) entre les Sentinel-2 du 17 (d) et du 7 (c) nov. 2019.

[anim1](#) [anim2](#) [anim3](#) [anim4](#)



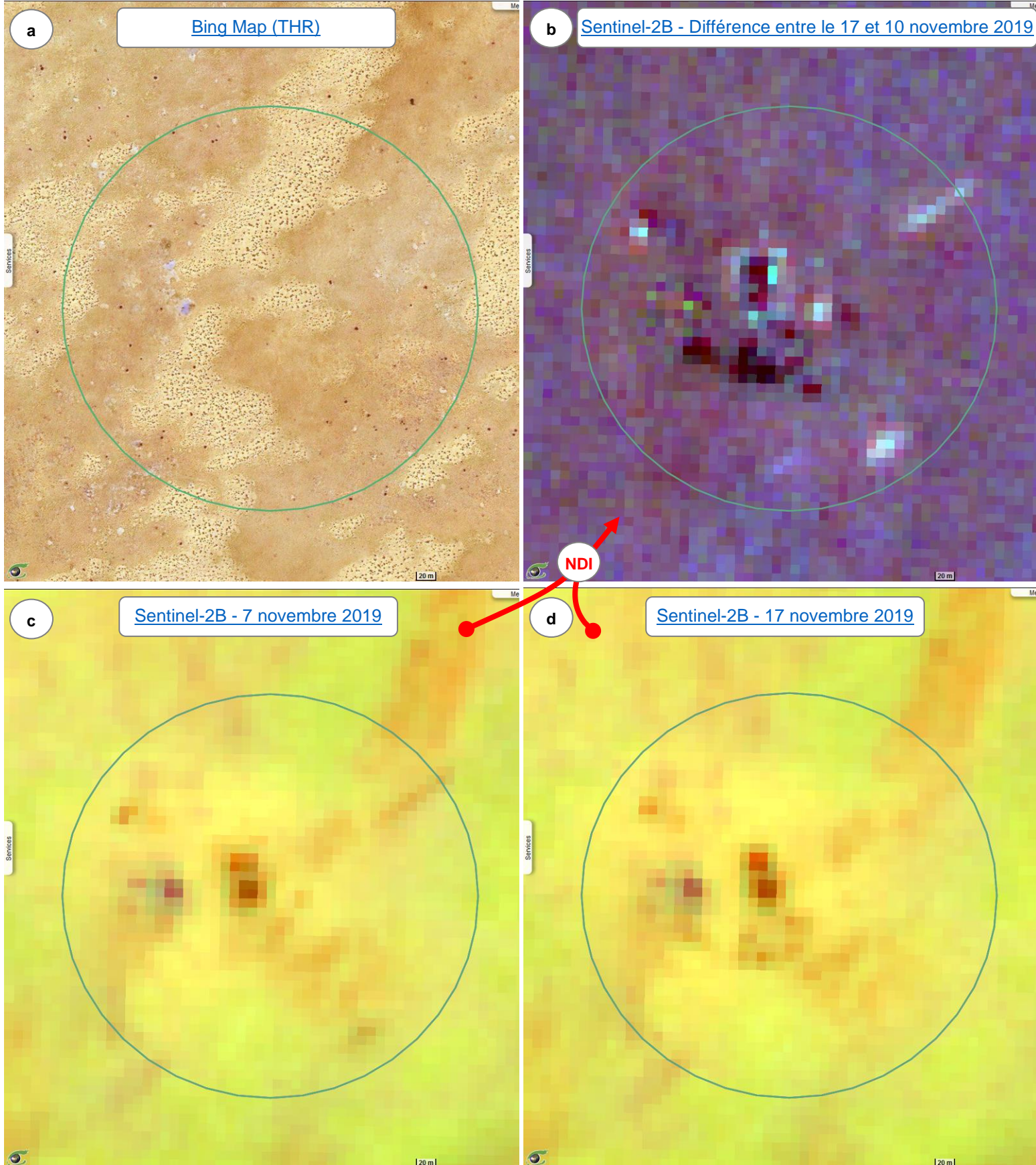
On constate de fortes variations dans une partie désertique éloignée des routes et pistes. Ces variations à haute fréquence sont d'origine humaine. Le segment brillant situé au nord-est de l'image fig.13b pourrait être un petit aéroport. Des parties semblent fixes (bâtiments ?). On suppose un mouvement des tâches sombres (signes d'activité humaine) d'environ 60m vers le sud-ouest.

Ces activités semblent trop importantes pour être de type nomade traditionnel et s'apparentent davantage à des activités en matériel plus lourd tels que dans le cadre des campagnes minières ou des activités militaires.

## Indicateur 8 - Activité nomade / minière / militaire ?

[animation\\_2D](#)

Fig.13: Image THR (a) et différence (b) entre les Sentinel-2 observées le 17 (d) et le 7 (c) novembre 2019.



L'indicateur utilisant les différences normalisées permet de détecter des variations entre les deux images des 7 et 17 novembre 2019 indétectables à l'œil. Cette détection opère aussi bien dans les zones très sombres que dans les zones lumineuses. La fig.14b montre par exemple un faisceau de pistes nord-sud restitué par un gain en bande bleue. Un traitement avec davantage de contraste est incrusté dans l'image pour mieux distinguer les pistes.

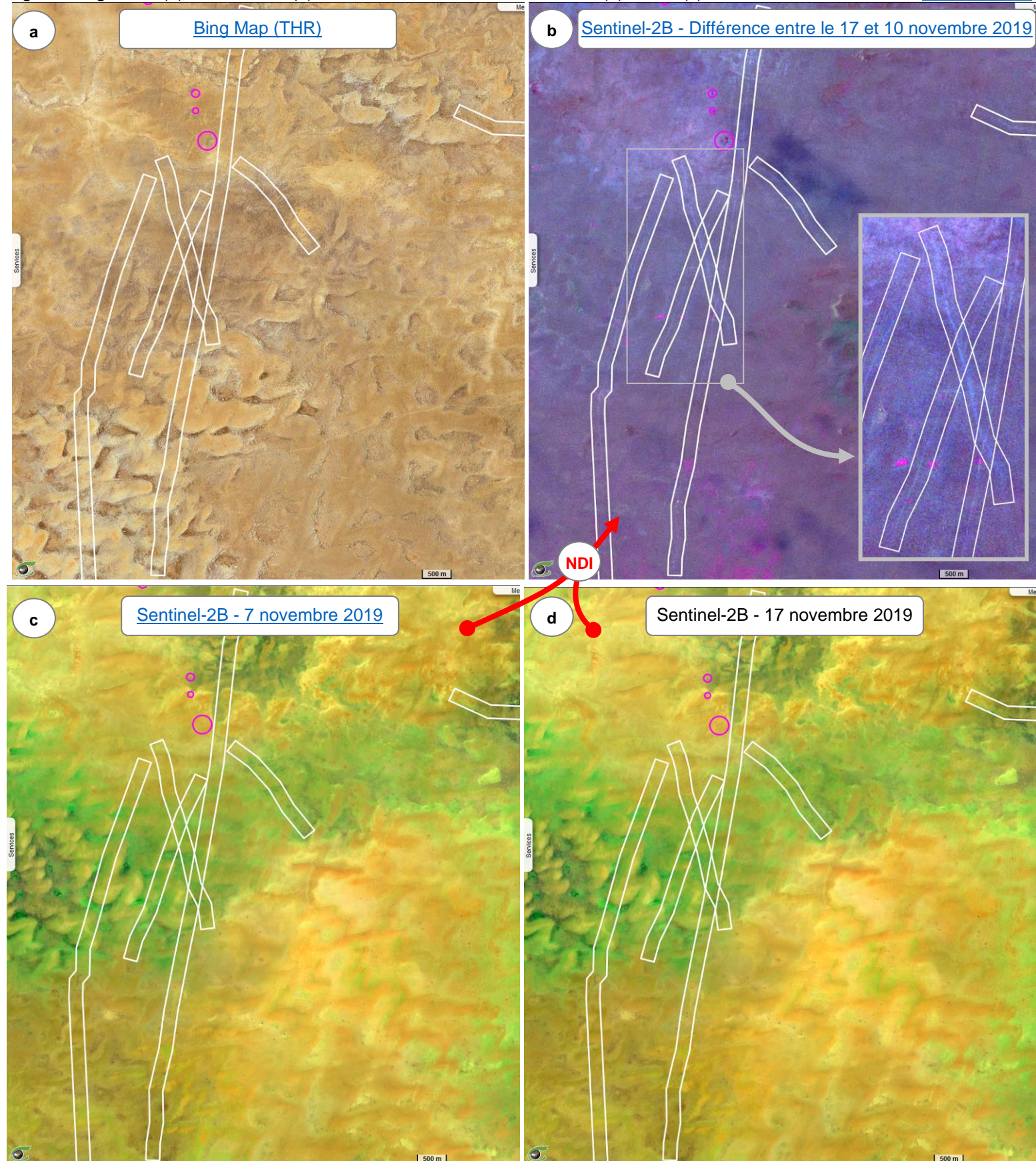
Cette hausse de la bande bleue révèle habituellement une hausse d'humidité et est peut-être due à la trace de sabots sur une piste humide ou due à la dispersion de poussières plus claires (hypothèses à confirmer).

Ces traces de pistes sont très certainement provoquées par des mouvements de troupeaux à l'occasion de transhumances ou ventes dans quelques marchés.

## Indicateur 9 - Déplacements par les routes et pistes - Transhumance

Fig.14: Image THR (a) et différence (b) entre les Sentinel-2 observées le 17 (d) et le 7 (c) novembre 2019.

[animation\\_2D](#)



De très nombreuses données sont disponibles gratuitement sur le Web. Les données Sentinel sont les entrées principales des [services Copernicus](#) (marine, terres, atmosphère, climat, urgences et sécurité). Les cinq premiers sont publics.

- [CMEMS](#) Service Copernicus de surveillance de l'environnement maritime
- [CLMS](#) Service Copernicus de surveillance des terres
- [CAMS](#) Service Copernicus de surveillance de l'atmosphère
- [C3S](#) Service Copernicus de changement climatique
- [CEMS](#) Service Copernicus de gestion des urgences
- [CSS](#) Service Copernicus de sécurité

Des données de précipitations sont aussi fournies par les agences spatiales des Etats-Unis (NASA) et du Japon (JAXA).

Les fig.15, fig.16 et fig.17 analysent la température, l'humidité de l'air et les précipitations sur l'ensemble du Tchad et dans la Réserve Ouadi-Rimé Ouadi-Achim en particulier (polygone orange). Les données de température et d'humidité de l'air sont produites par les modèles de l'ECMWF toutes les 6 heures. La date choisie (6:00 GMT) est celle la plus proche de l'acquisition des images Sentinel-2 objet de la présente étude. On observe de faibles précipitations aux alentours nord-ouest de la réserve. Celles-ci ont produit une baisse des températures avec environ 1 jour de décalage et une hausse significative de l'humidité de l'air trois jours après.

La fig.18 présente le cycle des précipitations fournies par le modèle NASA/GPM dans la zone rectangulaire délimitant la Réserve.

## Services Copernicus / NASA / JAXA

### Données météorologiques et précipitations

Fig.15 : Température de surface à 6h00 GMT

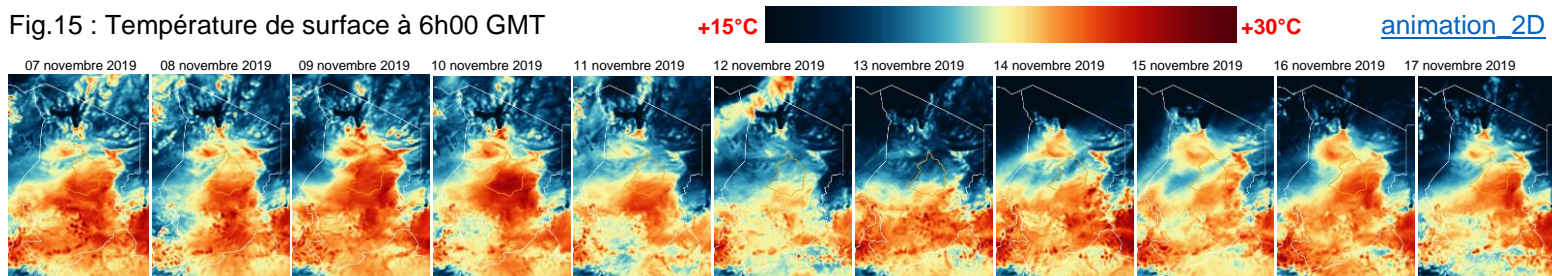


Fig.16 : Colonne totale de vapeur d'eau à 6h00 GMT

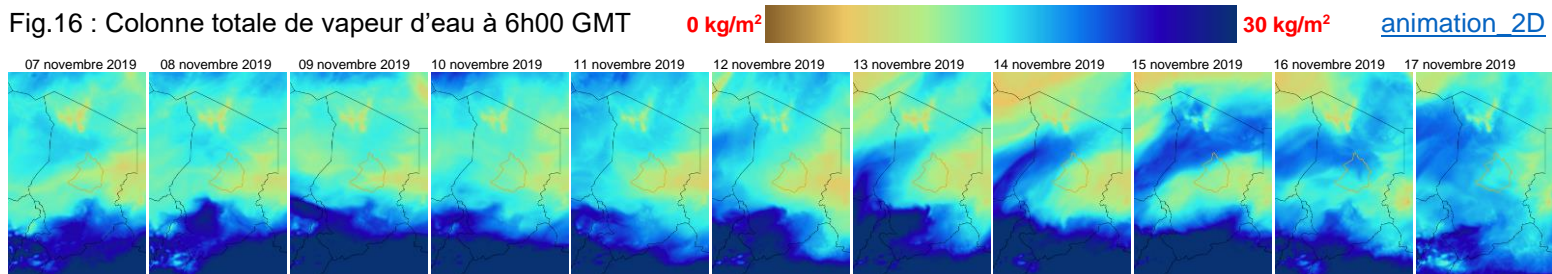


Fig.17 : Précipitations journalières (modèle NASA/GPM)

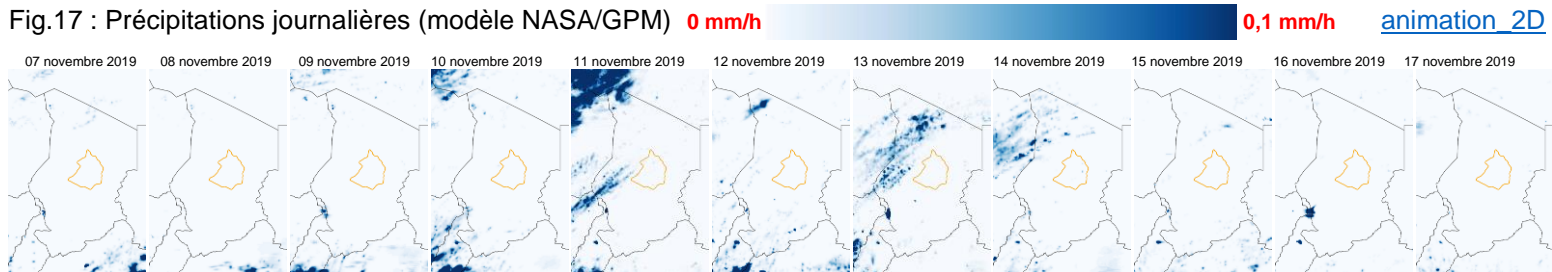


Fig.18 : Précipitations mensuelle depuis 2000 (modèle NASA/GPM).

