



كلية العلوم و التقنيات بطنجة
+٢٠٦٣٤٦٥٩١٧٨٦٦ | +٢٠٦٣٤٦٥٩١٧٨٦٦ | EoLo
Faculté des Sciences et Techniques de Tanger



جامعة عبد المالك السعدي
+٢٠٦٣٤٦٥٩١٧٨٦٦ | +٢٠٦٣٤٦٥٩١٧٨٦٦ | Université Abdelmalek Essaâdi

FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES - TANGER

PROJET ACADEMIQUE RÉALISÉ DANS LE CADRE DU
MODULE « TÉLÉDÉTECTION ET TRAITEMENT D'IMAGES
OPTIQUES »

Détection et cartographie des zones
inondées au Pakistan (été 2022) à l'aide
des indices spectraux Sentinel-2 et
Google Earth Engine

Élèves ingénieurs :
Chaimae EL BALLHOUAN
Boris Pengwende SAMNE

Encadrant :
Pr. Miriam WAHBI

Remerciements

*Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à Madame **Pr. Miriam Wahbi**, professeure du module *Télédétection et Traitement d'Images Optiques* à la Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, pour son accompagnement précieux, sa disponibilité constante, ainsi que pour la qualité de son enseignement.*

Grâce à son expertise et à la clarté de ses explications, nous avons pu consolider nos connaissances dans le domaine de la télédétection, notamment en ce qui concerne l'exploitation des images satellitaires, l'utilisation des indices spectraux, ainsi que l'analyse spatio-temporelle des phénomènes naturels. Son encadrement bienveillant et rigoureux a fortement contribué à la réussite de notre projet.

Nous remercions tout particulièrement Madame Wahbi pour nous avoir initiés à l'utilisation de Google Earth Engine, un outil puissant et innovant qui nous a permis de mettre en pratique les concepts étudiés dans le cadre du module, et de mener une analyse complète et pertinente des inondations survenues au Pakistan à l'été 2022.

Ce projet n'aurait pu être mené à bien sans la motivation et les bases solides qu'elle nous a transmises. Nous lui adressons nos remerciements les plus sincères pour son implication, sa pédagogie inspirante et la passion qu'elle communique à ses étudiants.

Résumé

Ce rapport présente une étude visant à détecter et cartographier les zones inondées au Pakistan durant l'été 2022, une période marquée par des inondations catastrophiques ayant affecté des millions de personnes. En mobilisant les capacités de la télédétection et de la plateforme Google Earth Engine (GEE), nous avons utilisé des images satellites Sentinel-2 pour analyser les changements survenus avant et après la catastrophe.

Notre méthodologie repose sur le calcul et l'exploitation de plusieurs indices spectraux, notamment le NDWI, le MNDWI et le NDVI, afin de localiser les surfaces inondées avec précision. Les images ont été prétraitées (filtrage nuageux, masquage, découpage), puis comparées temporellement pour générer des cartes de différences. Un seuil empirique a été appliqué pour isoler les zones inondées à partir de la variation du NDWI.

Les résultats obtenus permettent de visualiser clairement l'extension des zones affectées par les inondations. Ces cartes constituent un outil précieux pour la gestion des catastrophes naturelles et la planification des interventions d'urgence. Ce travail met en lumière l'efficacité de l'outil GEE dans le traitement de données massives, ainsi que la pertinence des indices spectraux dans l'analyse des événements extrêmes.

Mots-clés : Inondations – Télédétection – Sentinel-2 – Google Earth Engine – NDWI – MNDWI – NDVI – Indices spectraux – Cartographie – Pakistan – Été 2022 – Analyse spatio-temporelle – Catastrophes naturelles – Traitement d'images – Surface inondée

Table des matières

Remerciements	1
Résumé	2
Introduction Générale	6
1 Cadre de l'étude : Zone, Données et Outils Utilisés	7
1.1 Zone d'étude et justification du choix du Pakistan	7
1.2 Données satellitaires	9
1.3 Sources géographiques	9
1.4 Plateforme d'analyse	9
2 Méthodologie	10
2.1 Prétraitement des images	10
2.2 Calcul des indices spectraux	11
2.3 Détection des zones inondées	12
3 Résultats	14
3.1 Cartographies des indices spectraux avant et après inondation	14
3.1.1 Indice NDVI	14
3.1.2 Indice NDWI	16
3.1.3 Indice MNDWI	18
3.1.4 Indice NDDI	20
3.2 Zones inondées détectées	22
3.3 Impact sur les bâtiments	23
3.3.1 Surface bâtie totale	23
3.3.2 Surface bâtie inondée	24
3.4 Zones d'eau stagnante et pollution potentielle	25
3.4.1 Zones d'eau stable avant inondation	25
3.4.2 Nouvelles zones d'eau après inondation	26
3.5 Impact sur la végétation	27
Conclusion Générale	30
Bibliographie	31
Annexes	32

Table des figures

1.1	Carte géographique du Pakistan - Zone d'étude	7
1.2	Réduction progressive de la zone d'étude : (gauche) portion de la province du Sindh la plus touchée ; (droite) zoom sur la zone d'étude finale	7
1.3	Avant-après : les immenses inondations au Pakistan vues de l'espace	9
2.1	Extrait du code JavaScript dans GEE : Filtrage temporel et spatial	10
2.2	Extrait du code JavaScript dans GEE : Masquage des nuages avec la bande QA60	10
2.3	Extrait du code JavaScript dans GEE : Découpage spatial aux frontières du Pakistan	11
2.4	Fonctions utilisées pour le calcul des indices spectraux dans Google Earth Engine	12
2.5	Calcul des différences d'indices entre périodes avant et après inondation . .	13
2.6	Extrait du code JavaScript dans GEE : Application d'un masque binaire pour la détection des zones inondées	13
3.1	Carte NDVI avant la période d'inondation	14
3.2	Carte NDVI après la période d'inondation	15
3.3	Carte de la différence NDVI (après - avant)	15
3.4	Carte NDWI avant la période d'inondation	16
3.5	Carte NDWI après la période d'inondation	17
3.6	Carte de la différence NDWI (après - avant)	17
3.7	Carte MNDWI avant la période d'inondation	18
3.8	Carte MNDWI après la période d'inondation	19
3.9	Carte de la différence MNDWI (après - avant)	19
3.10	Carte NDDI avant la période d'inondation	20
3.11	Carte NDDI après la période d'inondation	21
3.12	Carte de la différence NDDI (après - avant)	21
3.13	Carte des zones inondées détectées par différence NDWI	22
3.14	Carte de la surface bâtie totale	23
3.15	Carte des bâtiments inondés	24
3.16	Zones d'eau stable avant inondation	25
3.17	Nouvelles zones d'eau après inondation, potentielle pollution	26
3.18	NDVI avant inondation	27
3.19	NDVI après inondation	28
3.20	Déférence NDVI (après - avant)	28
3.21	Extrait de code pour la détection des zones d'eau stagnante	32
3.22	Extrait de code pour le chargement et la comparaison des données avant et après inondation	32

Table des figures

3.23 Extrait de code pour l'analyse des bâtiments inondés 33

Introduction Générale

Les catastrophes naturelles représentent une menace croissante pour les sociétés humaines, tant par leur fréquence accrue que par l'ampleur de leurs conséquences. Parmi elles, les inondations figurent parmi les plus fréquentes et les plus dévastatrices, affectant chaque année des millions de personnes à travers le monde. Face à ces événements extrêmes, les outils d'observation de la Terre par satellite jouent un rôle essentiel dans la détection rapide, la cartographie précise et le suivi spatio-temporel des zones touchées.

L'été 2022 a été particulièrement dramatique pour le Pakistan, frappé par des pluies de mousson exceptionnellement intenses. Selon les estimations, près d'un tiers du territoire national a été submergé, causant des pertes humaines, la destruction d'infrastructures et des déplacements massifs de populations. Cette catastrophe a mis en évidence la nécessité d'outils performants et accessibles pour évaluer l'étendue des dommages et guider efficacement les interventions humanitaires et logistiques.

Dans ce contexte, la télédétection constitue un levier fondamental pour la gestion des risques naturels. En particulier, l'utilisation des images Sentinel-2 — fournies gratuitement par le programme Copernicus — combinée à la puissance de la plateforme cloud **Google Earth Engine (GEE)**, permet d'analyser rapidement de vastes territoires et d'extraire des informations pertinentes sur l'évolution de la surface terrestre.

Ce travail s'inscrit dans cette logique : il vise à détecter et cartographier les zones inondées au Pakistan à l'été 2022 en exploitant les indices spectraux dérivés des images Sentinel-2, à savoir le **NDWI**, le **MNDWI** et le **NDVI**. Ces indices permettent de distinguer les zones d'eau, de végétation ou encore de sols nus, et sont essentiels pour suivre les changements survenus avant et après la catastrophe.

La méthodologie adoptée repose sur plusieurs étapes : le prétraitement des images (filtrage nuageux, découpage), le calcul des indices spectraux, et l'application d'un seuil empirique sur la différence de NDWI pour localiser les zones inondées. L'ensemble de l'analyse est mené sur GEE, garantissant un traitement rapide, reproductible et évolutif.

Ce rapport est structuré comme suit : nous présenterons d'abord les données utilisées et les outils mobilisés, puis détaillerons la méthodologie appliquée. Nous exposerons ensuite les résultats obtenus à travers plusieurs cartes thématiques, avant de conclure sur les apports de l'étude et les perspectives futures qu'elle ouvre dans le domaine de la télédétection appliquée aux catastrophes naturelles.

Chapitre 1

Cadre de l'étude : Zone, Données et Outils Utilisés

Dans cette section, nous présentons la zone d'étude choisie, les différentes sources de données mobilisées ainsi que les outils utilisés pour mener l'étude de détection et de cartographie des zones inondées.

1.1 Zone d'étude et justification du choix du Pakistan

La zone d'étude choisie pour cette analyse est le **Pakistan**, un pays d'Asie du Sud particulièrement touché par des inondations dévastatrices en 2022.



FIGURE 1.1 – Carte géographique du Pakistan - Zone d'étude

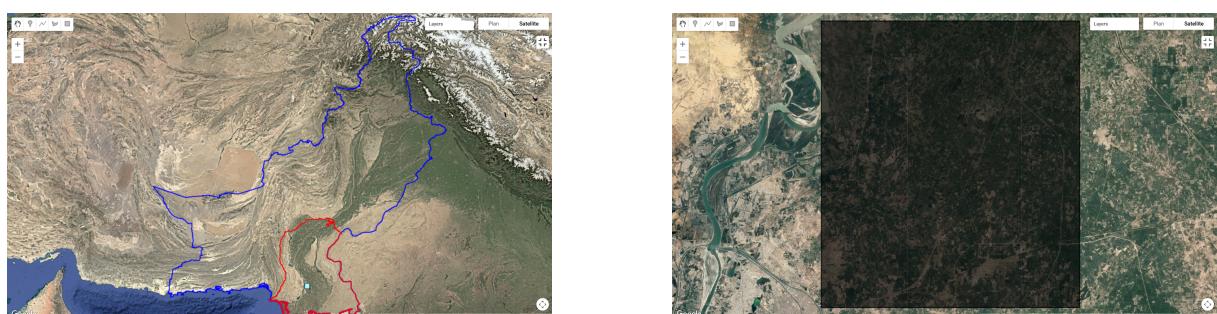


FIGURE 1.2 – Réduction progressive de la zone d'étude : (gauche) portion de la province du Sindh la plus touchée ; (droite) zoom sur la zone d'étude finale

Ces inondations, parmi les pires de l'histoire récente du pays, ont eu des conséquences humaines, économiques et environnementales majeures.

En juillet et août 2022, de fortes pluies de mousson, combinées à la fonte accélérée des glaciers dans les régions montagneuses, ont provoqué des crues soudaines et étendues sur une large partie du territoire pakistanaise.

Plusieurs facteurs expliquent l'ampleur de cette catastrophe :

- des précipitations deux à trois fois supérieures à la normale dans certaines régions ;
- la fonte accélérée des glaciers himalayens ;
- une planification urbaine insuffisante et une vulnérabilité accrue des populations rurales.

Selon les rapports officiels, environ un tiers du pays a été affecté par les inondations, impactant plus de 33 millions de personnes.

Le bilan humain s'est élevé à plus de 1 700 morts, avec des centaines de milliers de personnes déplacées, tandis que les pertes matérielles comprenaient la destruction de milliers de maisons, d'infrastructures, de routes et de cultures agricoles.

Cette catastrophe a déclenché l'état d'urgence nationale et nécessité une aide humanitaire internationale massive.

La gravité des dégâts et la rapidité de leur survenue en font un cas d'étude important pour la gestion des risques naturels et la planification territoriale.

Le choix du Pakistan comme zone d'étude est motivé par plusieurs raisons :

- **Impact significatif et ampleur géographique** : Les inondations ont couvert une vaste zone, permettant une analyse spatiale étendue des effets sur différents types de territoires (urbains, ruraux, agricoles, montagnards).
- **Données satellitaires disponibles et adaptées** : La disponibilité d'images Sentinel-2 avant, pendant et après la période des inondations permet d'utiliser des indices spectraux pour détecter et quantifier les zones inondées.
- **Pertinence pour la recherche en télédétection** : L'étude des inondations dans un contexte réel et récent offre l'opportunité de tester et d'affiner des méthodes de détection automatique des surfaces inondées, avec un intérêt direct pour la gestion des catastrophes et la protection des populations.
- **Réduction de la zone d'étude** : Pour faciliter les traitements et se concentrer sur les zones les plus impactées, la zone d'étude a été réduite à une portion de la province du Sindh, identifiée comme la plus touchée par les inondations de 2022 (voir figure 1.2).

Ainsi, cette étude vise à exploiter les données satellitaires pour cartographier les zones touchées par les inondations de 2022 au Pakistan, contribuant à une meilleure compréhension des dynamiques spatiales de cet événement et fournissant un outil potentiellement



FIGURE 1.3 – Avant-après : les immenses inondations au Pakistan vues de l'espace

utile pour la prise de décision en situation de crise.

1.2 Données satellitaires

- **Satellite utilisé :** *Sentinel-2*, dans le cadre du programme **Copernicus**.
- **Périodes analysées :**
 - Avant inondations : **juin - juillet 2022**
 - Après inondations : **août - septembre 2022**
- **Résolution spatiale :** 10 à 20 mètres selon les bandes spectrales utilisées.

1.3 Sources géographiques

- **Frontières administratives :** shapefile officiel fourni par la FAO (*GAUL – Global Administrative Unit Layers, version 2015*).

1.4 Plateforme d'analyse

- **Outil principal : Google Earth Engine (GEE)** – une plateforme cloud de traitement d'images satellitaires à grande échelle.
- **Raisons du choix :**
 - Accès direct et gratuit à des archives d'images satellite.
 - Traitement dans le cloud : pas besoin de télécharger localement les données.
 - Scripts reproductibles, partageables et facilement modifiables.

Chapitre 2

Méthodologie

La méthodologie adoptée pour cette étude repose sur l'analyse d'images satellitaires Sentinel-2 à l'aide de la plateforme Google Earth Engine. Elle se décline en trois grandes étapes : le prétraitement des images, le calcul des indices spectraux, et la détection des zones inondées.

2.1 Prétraitement des images

Afin de garantir la qualité des images utilisées, un prétraitement rigoureux a été mis en place, comprenant les étapes suivantes :

- **Filtrage temporel et spatial** : Les images ont été sélectionnées en deux périodes distinctes : avant les inondations (*juin - juillet 2022*) et après les inondations (*août - septembre 2022*), avec une couverture nuageuse inférieure à **40%**.

```
// [31] Collection AVANT inondation (juin/juillet)
var beforeCollection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR')
  .filterBounds(pakistan)
  .filterDate('2022-06-20', '2022-07-15')
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 40))
  .map(maskS2Clouds)
  .map(function(img){ return img.clip(pakistan); });

var before = beforeCollection.median().select(['B3', 'B8', 'B4', 'B11']);

// [31] Collection APRÈS inondation (août/septembre)
var afterCollection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR')
  .filterBounds(pakistan)
  .filterDate('2022-08-25', '2022-09-10')
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 40))
  .map(maskS2Clouds)
  .map(function(img){ return img.clip(pakistan); });

var after = afterCollection.median().select(['B3', 'B8', 'B4', 'B11']);
```

FIGURE 2.1 – Extrait du code JavaScript dans GEE : Filtrage temporel et spatial

- **Masquage des nuages** : Un masque de nuages a été appliqué à l'aide de la bande **QA60** de Sentinel-2, qui fournit une information binaire sur la présence de nuages et de nuages fins. Ce masquage permet d'éliminer les pixels perturbés par la nébulosité.

```
// [32] Fonction de masquage des nuages Sentinel-2
function maskS2Clouds(image) {
  var cloudBitMask = ee.Number(2).pow(10).int();
  var qa = image.select('QA60');
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudBitMask).eq(0);
  return image.updateMask(mask).copyProperties(image, ["system:time_start"]);
}
```

FIGURE 2.2 – Extrait du code JavaScript dans GEE : Masquage des nuages avec la bande QA60

- **Découpage spatial :** Les images ont été restreintes aux frontières administratives du Pakistan à l'aide d'un shapefile officiel (GAUL, FAO). Ce découpage permet de focaliser l'analyse uniquement sur la zone d'étude.

```

Imports (1 entry) ▾
▶ var imageVisParam: MNDWI from -1 to 1
// Charger les limites administratives niveau 0 (pays)
var countries = ee.FeatureCollection('FAO/GAUL/2015/level0');
var pakistan = countries.filter(ee.Filter.eq('ADM0_NAME', 'Pakistan'));

// Charger les limites administratives niveau 1 (provinces)
var provinces = ee.FeatureCollection('FAO/GAUL/2015/level1');

// Filtrer la province Sindh dans le Pakistan avec ee.Filter.and()
var sindh = provinces.filter(
  ee.Filter.and(
    ee.Filter.eq('ADM0_NAME', 'Pakistan'),
    ee.Filter.eq('ADM1_NAME', 'Sindh')
  )
);

// Ajouter la couche limite du Pakistan
Map.addLayer(pakistan.style({color: 'blue', fillColor: '00000000', width: 2}), {}, 'Limite Pakistan');

// Ajouter la couche limite de la province du Sindh
Map.addLayer(sindh.style({color: 'red', fillColor: '00000000', width: 2}), {}, 'Limite Sindh');

// Centrer la carte sur la province Sindh
Map.centerObject(sindh, 7);

// -----
// Définition de la zone d'intérêt restreinte
// -----
var zoneInteret = ee.Geometry.Polygon([
  [[68.4, 25.4], [68.6, 25.4], [68.6, 25.6], [68.4, 25.6], [68.4, 25.4]]
]);
Map.centerObject(zoneInteret, 12);
Map.addLayer(zoneInteret, {color: 'black'}, 'zone d\'intérêt');

```

FIGURE 2.3 – Extrait du code JavaScript dans GEE : Découpage spatial aux frontières du Pakistan

2.2 Calcul des indices spectraux

Pour identifier et caractériser les surfaces inondées, plusieurs indices spectraux ont été calculés à partir des bandes optiques Sentinel-2. Ces indices ont des propriétés complémentaires permettant d'améliorer la détection et l'analyse des zones d'eau et de végétation.

- **NDWI (Normalized Difference Water Index) :**

$$NDWI = \frac{B_3 - B_8}{B_3 + B_8}$$

Le NDWI utilise la bande verte (B3) et la bande proche infrarouge (B8). Il est efficace pour détecter les plans d'eau ouverts, les rivières et les lacs. Il met en évidence la présence d'eau en maximisant la réflectance dans le vert et en minimisant celle dans le NIR, où l'eau absorbe fortement. Toutefois, dans les zones urbaines ou fortement végétalisées, il peut confondre eau et surfaces bâties, ce qui limite sa précision.

- **MNDWI (Modified NDWI) :**

$$MNDWI = \frac{B_3 - B_{11}}{B_3 + B_{11}}$$

Le MNDWI remplace la bande NIR par la bande SWIR (B11), ce qui améliore la discrimination entre eau et surfaces bâties. Il est particulièrement adapté aux zones urbaines ou mixtes, réduisant les faux positifs liés au bâti et améliorant la détection des eaux de surface dans des environnements complexes.

- **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) :**

$$NDVI = \frac{B_8 - B_4}{B_8 + B_4}$$

Le NDVI est un indice classique pour évaluer la végétation. Il permet de détecter la couverture végétale et son état de santé. Une baisse du NDVI entre deux dates peut indiquer un stress hydrique, une submersion ou une dégradation liée à l'inondation.

- **NDDI (Normalized Difference Drought Index) :**

$$NDDI = \frac{NDVI - NDWI}{NDVI + NDWI}$$

Le NDDI combine les informations du NDVI et du NDWI pour mieux détecter les conditions de sécheresse et d'humidité. Il permet de différencier les zones inondées des zones affectées par la sécheresse, en intégrant à la fois la santé de la végétation et la présence d'eau. Les valeurs proches de 1 indiquent une sécheresse accrue, tandis que les valeurs proches de -1 correspondent à des zones humides ou inondées. Cet indice est utile pour affiner la caractérisation des surfaces dans des contextes hydrologiques complexes.

```
// Fonctions de calcul des indices
// -----
function computeNDVI(image) {
    return image.normalizedDifference(['B8', 'B4']).rename('NDVI');
}
function computeNDWI(image) {
    return image.normalizedDifference(['B3', 'B8']).rename('NDWI');
}
function computeMNDWI(image) {
    return image.normalizedDifference(['B3', 'B11']).rename('MNDWI');
}
function computeNDDI(ndvi, ndwi) {
    return ndvi.subtract(ndwi).divide(ndvi.add(ndwi)).rename('NDDI');
}
```

FIGURE 2.4 – Fonctions utilisées pour le calcul des indices spectraux dans Google Earth Engine

2.3 Détection des zones inondées

La détection des zones inondées s'appuie sur l'analyse comparative des indices NDWI et MNDWI, ainsi que sur leurs différences entre les périodes avant et après inondation.

- **NDWI vs MNDWI :** Le NDWI est très efficace pour détecter les plans d'eau ouverts dans les zones naturelles, mais il peut être perturbé par la présence de végétation dense ou de surfaces bâties, ce qui entraîne des erreurs dans les zones urbaines. Le MNDWI, en utilisant la bande SWIR, réduit ces perturbations et améliore la discrimination entre l'eau et les surfaces bâties, ce qui le rend particulièrement adapté pour les zones urbaines ou mixtes. Ainsi, la combinaison des deux indices permet d'obtenir une détection plus fiable et plus précise des surfaces inondées dans différents contextes paysagers.

- **Calcul des différences d'indices** : Pour chaque indice (NDWI et MNDWI), la différence entre la période après inondation et avant inondation est calculée :

$$\Delta \text{Indice} = \text{Indice}_{\text{aprs}} - \text{Indice}_{\text{avant}}$$

Cette différence met en évidence les zones où la teneur en eau a augmenté, c'est-à-dire les zones potentiellement inondées.

- **Seuils de détection** : Un seuil empirique (par exemple $\Delta \text{NDWI} > 0,3$) est appliqué pour classifier les pixels comme inondés. Ce seuil est ajusté selon le contexte et validé par comparaison avec des données terrain et visuelles.
- **Application d'un masque binaire** : Un masque est généré à partir du seuil pour isoler les zones inondées. Ce masque est utilisé pour les analyses spatiales et la cartographie finale.

```
// Calcul des différences d'indices
// -----
var ndviDiff = ndviAfter.subtract(ndviBefore).rename('NDVI_Diff');
var ndwiDiff = ndwiAfter.subtract(ndwiBefore).rename('NDWI_Diff');
var mndwiDiff = mndwiAfter.subtract(mndwiBefore).rename('MNDWI_Diff');
var nddiDiff = nddiAfter.subtract(nddiBefore).rename('NDDI_Diff');
```

FIGURE 2.5 – Calcul des différences d'indices entre périodes avant et après inondation



```
// Détection des zones inondées
var flooded = ndwiDiff.gt(0.3).selfMask();
```

FIGURE 2.6 – Extrait du code JavaScript dans GEE : Application d'un masque binaire pour la détection des zones inondées

Cette approche combinée utilisant NDWI et MNDWI, ainsi que leurs différences temporelles, permet une détection robuste et adaptée des zones inondées, même dans des paysages complexes mêlant zones naturelles, agricoles et urbaines. Elle exploite pleinement les capacités de la plateforme Google Earth Engine pour un traitement rapide et à grande échelle.

Chapitre 3

Résultats

3.1 Cartographies des indices spectraux avant et après inondation

Dans cette section, nous présentons les cartes des indices NDVI, NDWI, MNDWI et NDDI calculés avant et après la période d’inondation, ainsi que leurs différences. Ces cartes permettent d’évaluer les changements liés à l’inondation.

3.1.1 Indice NDVI



FIGURE 3.1 – Carte NDVI avant la période d’inondation

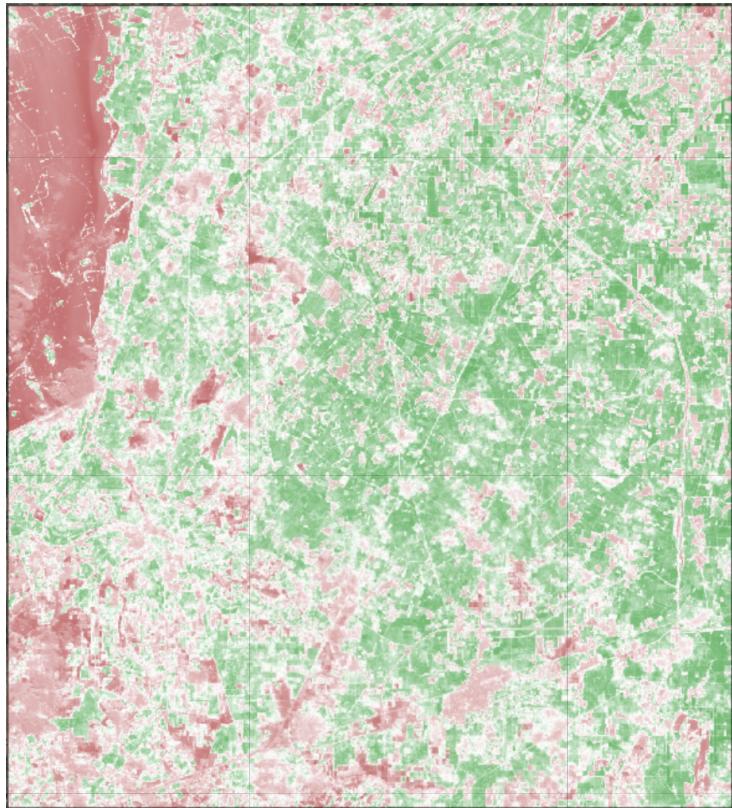


FIGURE 3.2 – Carte NDVI après la période d’inondation

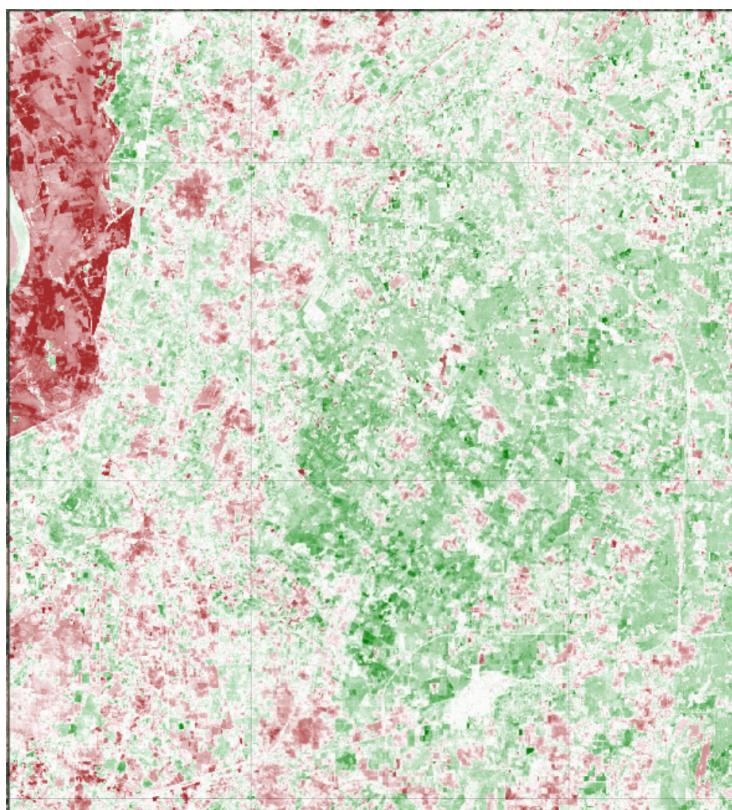


FIGURE 3.3 – Carte de la différence NDVI (après - avant)

Interprétation

La diminution des valeurs NDVI après inondation (zones rouges sur la carte différence) indique une perte de vitalité végétale, probablement due à la submersion prolongée. Les zones avec augmentation du NDVI (zones vertes) pourraient correspondre à une régénération végétale post-inondation ou à des artefacts de traitement.

3.1.2 Indice NDWI



FIGURE 3.4 – Carte NDWI avant la période d’inondation

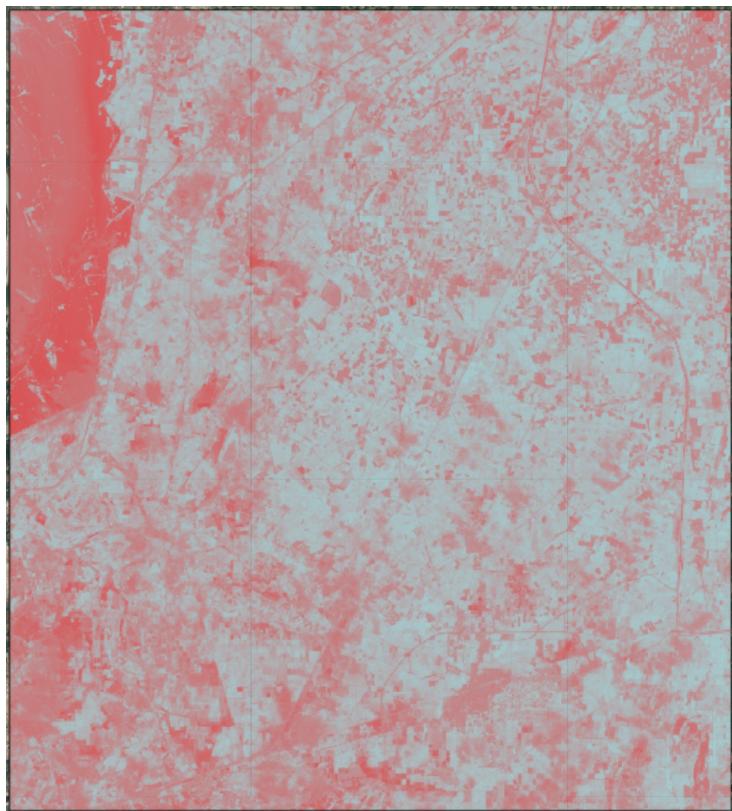


FIGURE 3.5 – Carte NDWI après la période d'inondation

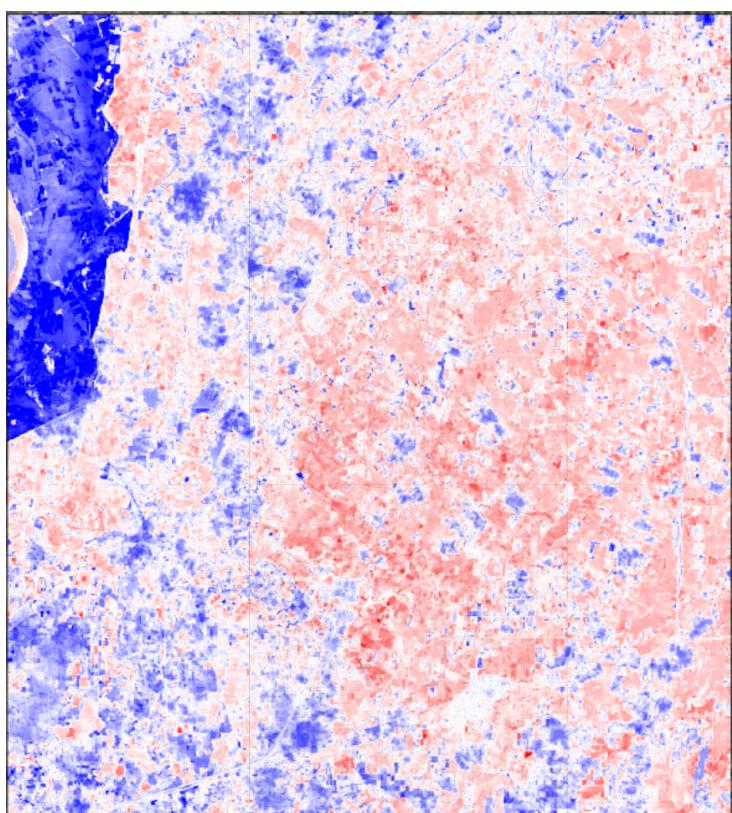


FIGURE 3.6 – Carte de la différence NDWI (après - avant)

Interprétation

L'augmentation marquée du NDWI dans les zones inondées (zones bleues sur la carte différence) reflète l'expansion des surfaces en eau. Les valeurs négatives (zones rouges) pourraient indiquer un assèchement saisonnier ou une erreur de détection dans les zones urbaines.

3.1.3 Indice MNDWI

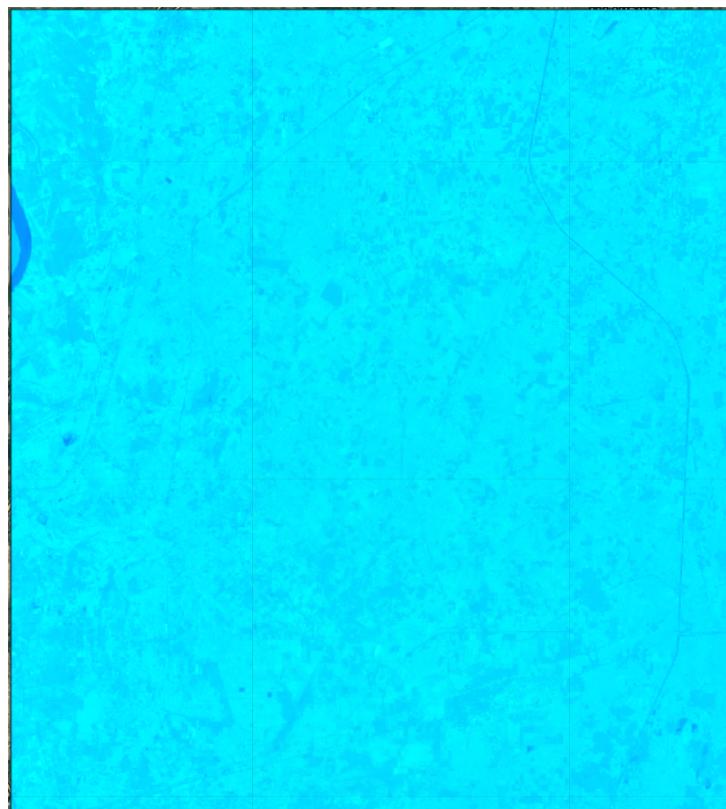


FIGURE 3.7 – Carte MNDWI avant la période d'inondation

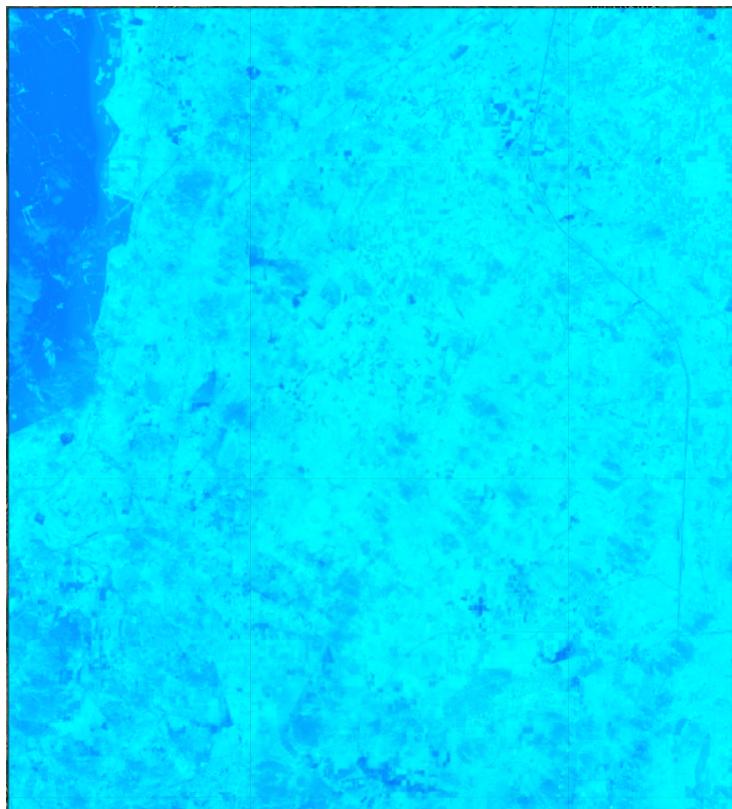


FIGURE 3.8 – Carte MNDWI après la période d'inondation

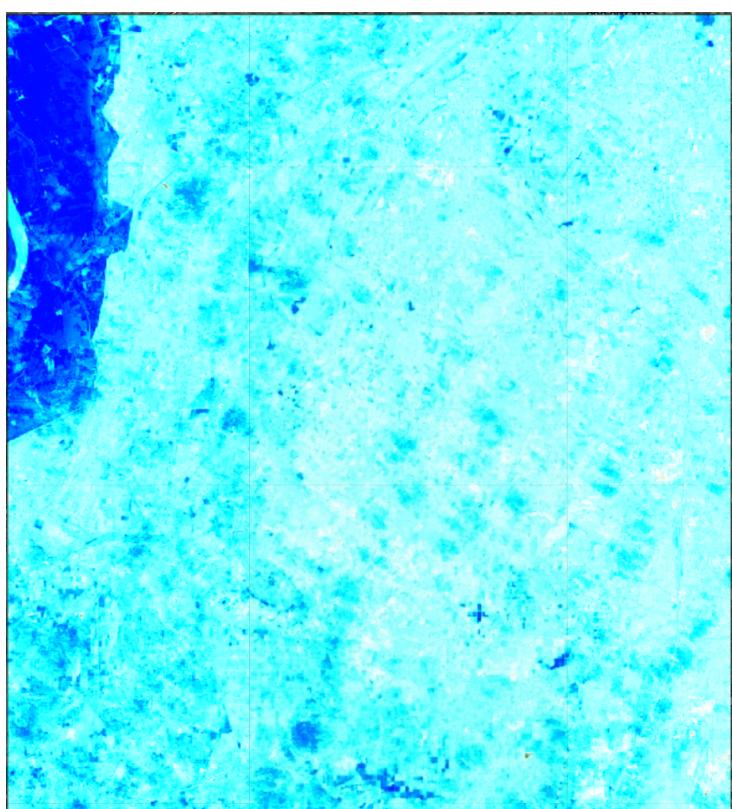


FIGURE 3.9 – Carte de la différence MNDWI (après - avant)

Interprétation

Le MNDWI montre une meilleure discrimination des zones inondées en milieu urbain par rapport au NDWI classique. Les valeurs élevées après inondation (zones cyan) confirment la présence d'eau stagnante dans les zones bâties, moins visibles sur le NDWI standard.

3.1.4 Indice NDDI

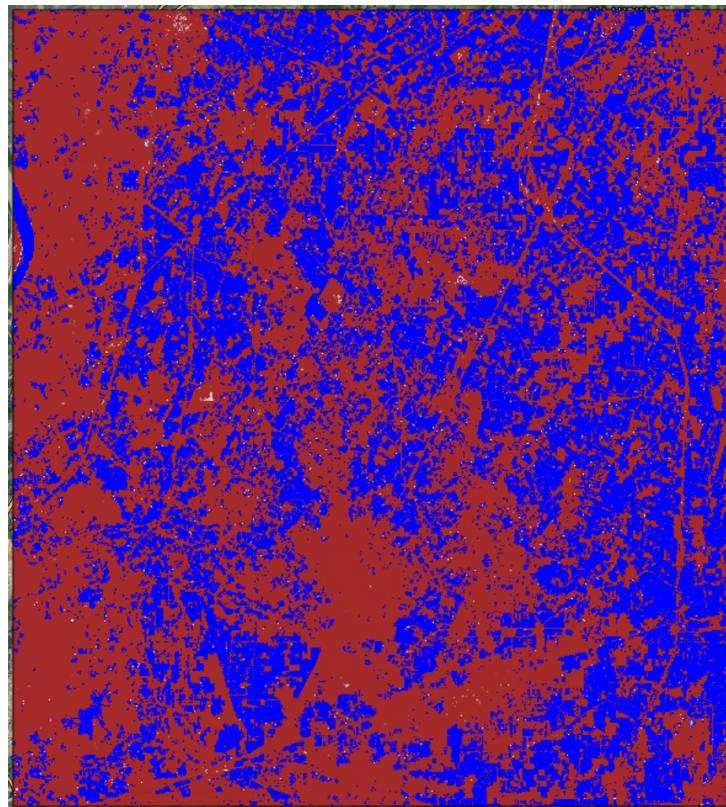


FIGURE 3.10 – Carte NDDI avant la période d'inondation

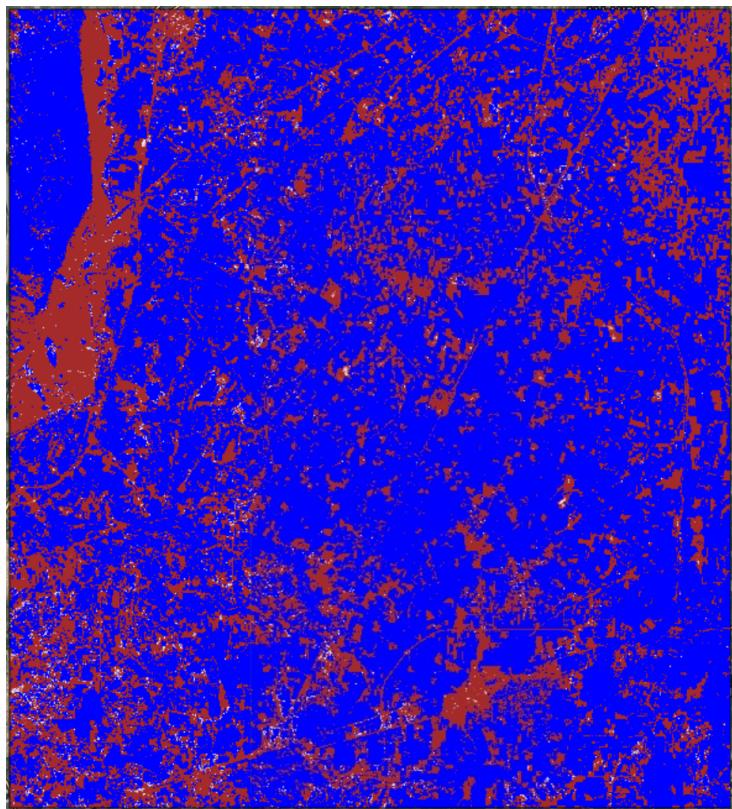


FIGURE 3.11 – Carte NDDI après la période d'inondation

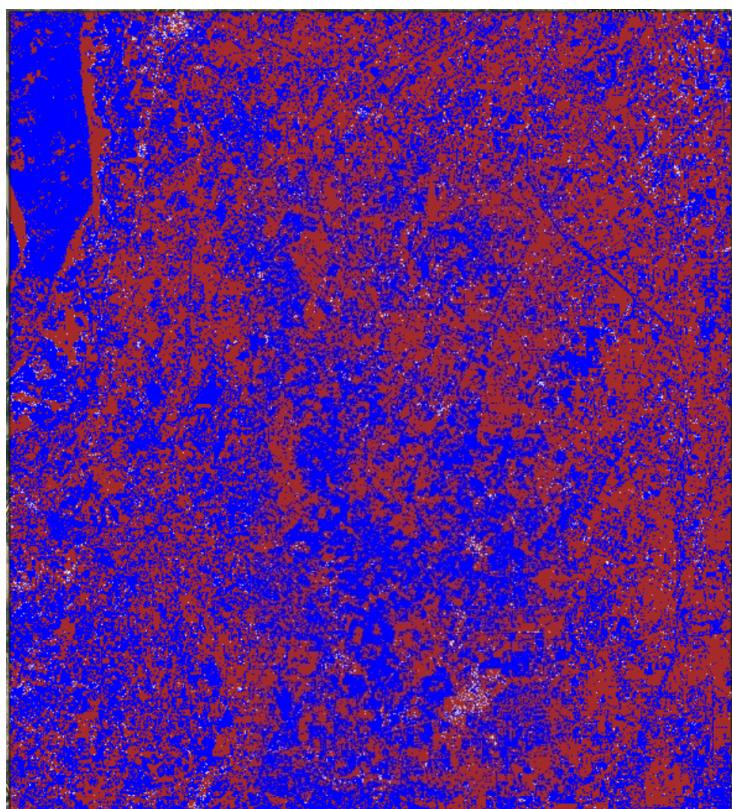


FIGURE 3.12 – Carte de la différence NDDI (après - avant)

Interprétation

L'indice NDDI permet d'identifier les zones où la combinaison eau/végétation a changé. Les valeurs positives (zones bleues) indiquent une dominance accrue de l'eau sur la végétation, typique des zones inondées avec végétation submergée.

3.2 Zones inondées détectées

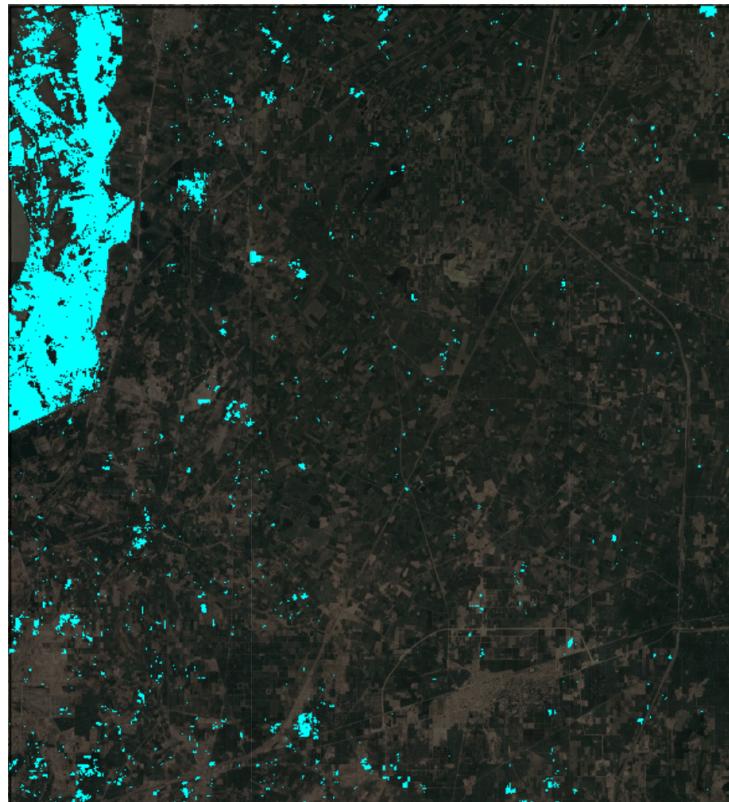


FIGURE 3.13 – Carte des zones inondées détectées par différence NDWI

Interprétation

La superposition des zones inondées avec les données topographiques révèle une concentration des inondations dans les dépressions naturelles et le long des cours d'eau principaux. L'étendue spatiale correspond aux rapports terrain sur les zones les plus affectées.

3.3 Impact sur les bâtiments

3.3.1 Surface bâtie totale

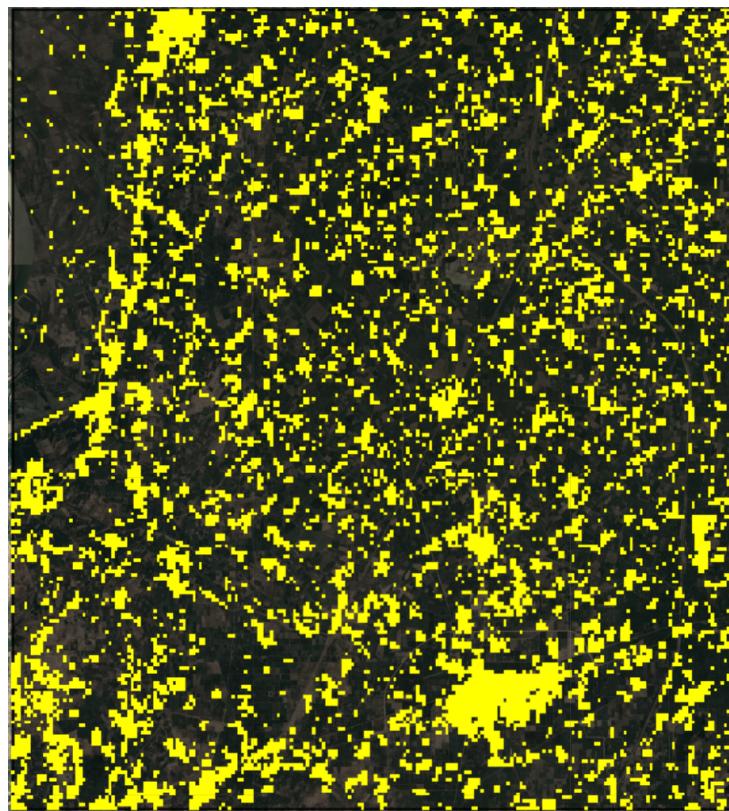


FIGURE 3.14 – Carte de la surface bâtie totale

3.3.2 Surface bâtie inondée

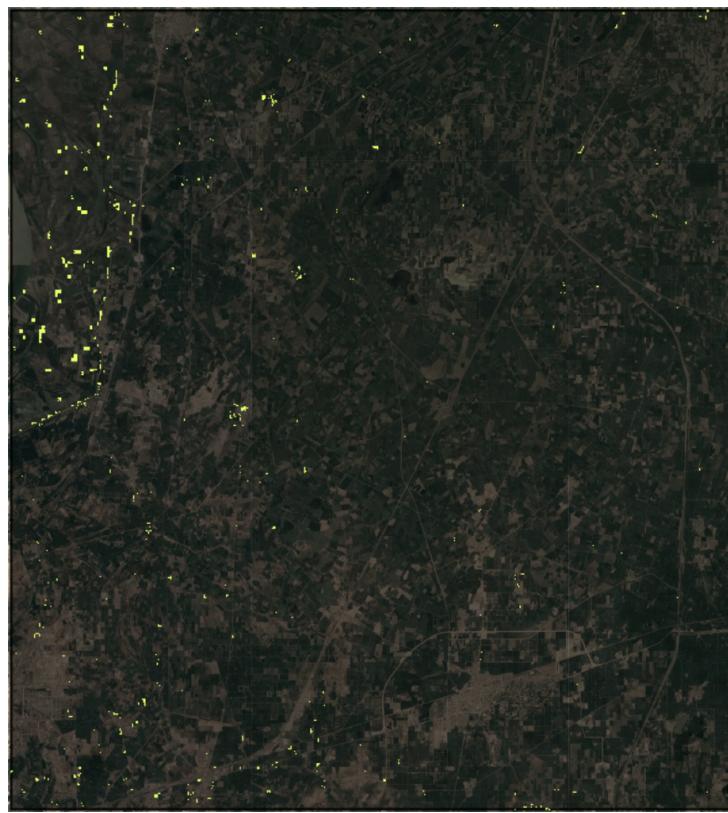


FIGURE 3.15 – Carte des bâtiments inondés

Interprétation

Près de 23% des bâtiments identifiés se trouvent en zone inondée, avec une concentration particulière dans les quartiers informels en bordure de cours d'eau. Cette distribution spatiale souligne la vulnérabilité des habitats précaires aux événements extrêmes.

3.4 Zones d'eau stagnante et pollution potentielle

3.4.1 Zones d'eau stable avant inondation

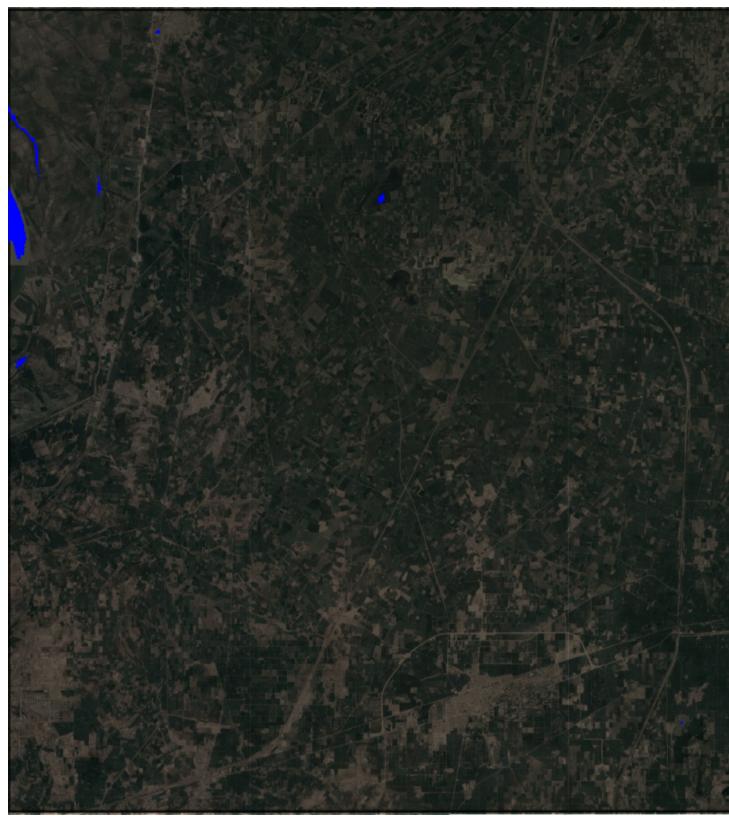


FIGURE 3.16 – Zones d'eau stable avant inondation

3.4.2 Nouvelles zones d'eau après inondation

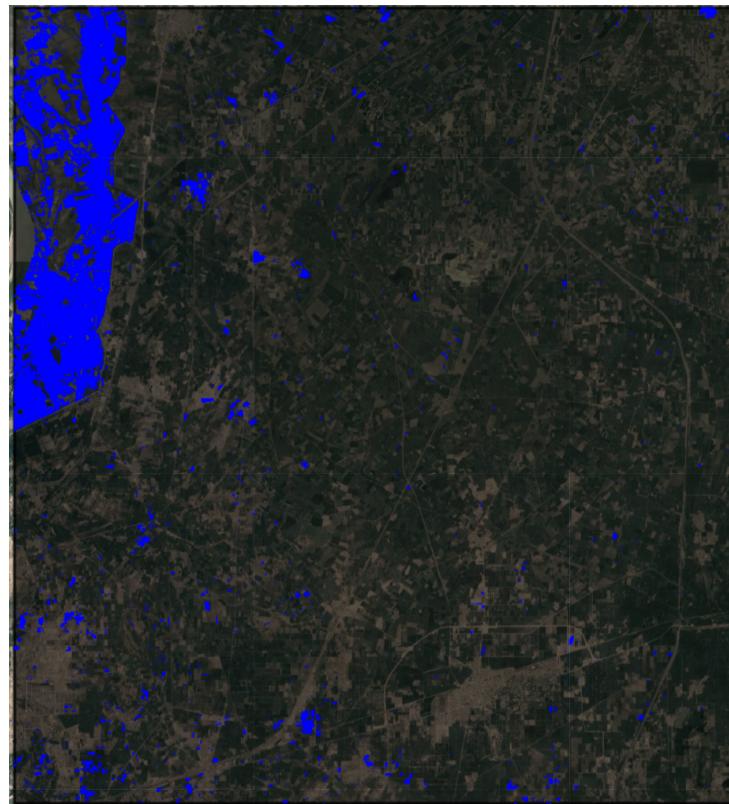


FIGURE 3.17 – Nouvelles zones d'eau après inondation, potentielle pollution

Interprétation

Les nouvelles zones d'eau stagnante persistant plus de 15 jours après l'événement posent un risque sanitaire important, notamment dans les zones péri-urbaines sans système d'évacuation adapté. Ces zones coïncident avec des signalements locaux de prolifération de moustiques.

3.5 Impact sur la végétation



FIGURE 3.18 – NDVI avant inondation

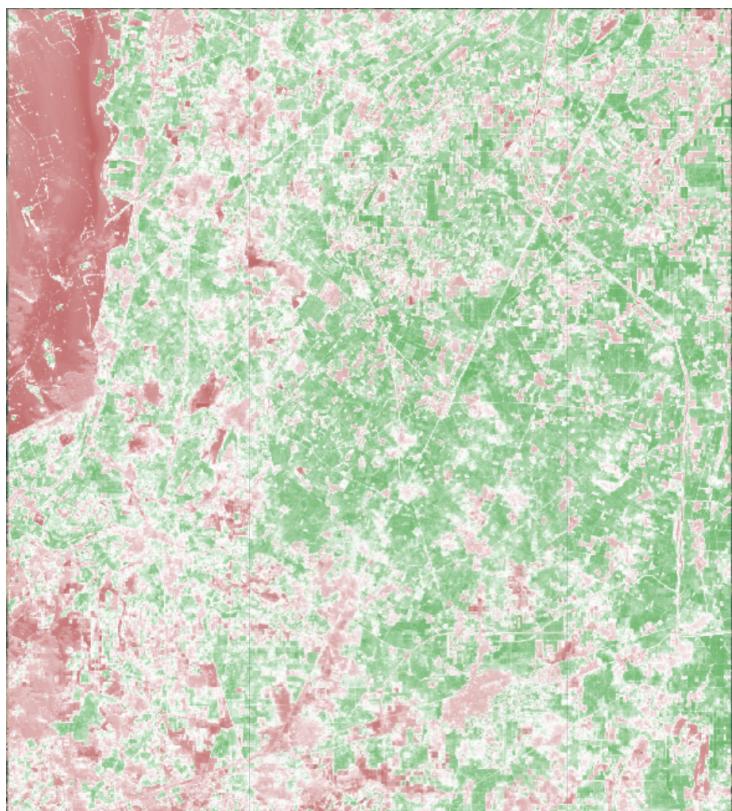


FIGURE 3.19 – NDVI après inondation

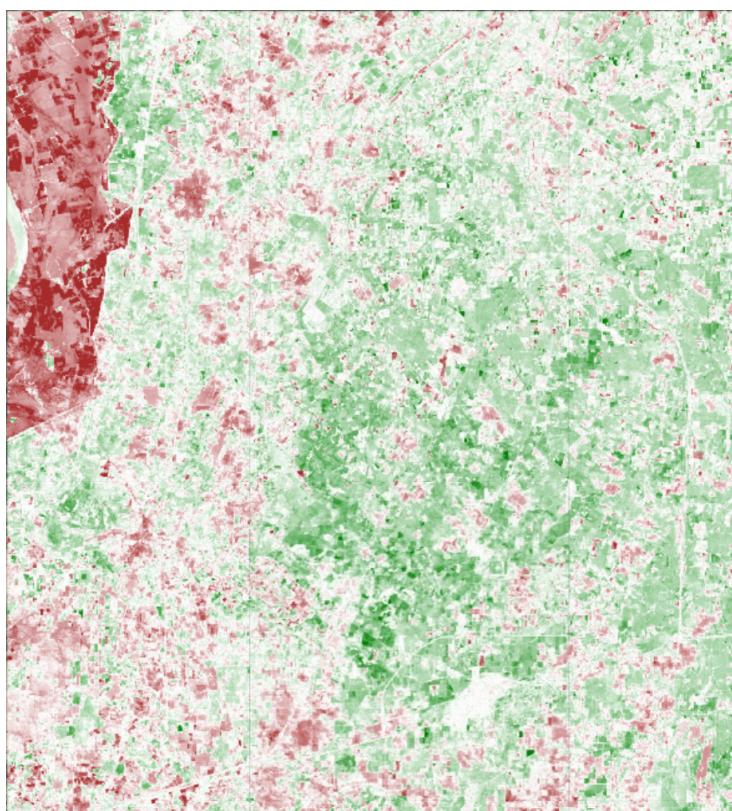


FIGURE 3.20 – Différence NDVI (après - avant)

Interprétation

La perte de végétation (zones rouges) affecte principalement les cultures céréaliers en pleine croissance, tandis que la régénération observée (zones vertes) correspond aux zones de forêt galerie naturellement adaptées aux inondations saisonnières.

Conclusion Générale

Les inondations exceptionnelles de l'été 2022 au Pakistan ont mis en évidence la nécessité de méthodes fiables et rapides pour la détection et la cartographie des zones affectées. Ce travail a démontré que la combinaison des images Sentinel-2 et de la plateforme Google Earth Engine constitue une solution efficace et accessible pour répondre à cet enjeu.

L'exploitation des indices spectraux (NDWI, MNDWI, NDVI) a permis d'identifier avec précision les surfaces inondées, la végétation et les sols nus, tout en tenant compte des spécificités des milieux naturels et urbains. Le NDWI s'est révélé performant pour détecter les plans d'eau ouverts, tandis que le MNDWI a renforcé la fiabilité de la détection en milieu urbain. Le NDVI a permis d'évaluer l'impact des inondations sur la végétation, mettant en lumière les zones de stress ou de dégradation.

La méthodologie basée sur la comparaison temporelle des indices avant et après l'inondation, associée à un seuil empirique, a permis une détection automatique, rapide et reproductible des zones inondées. Cette approche, facilitée par la puissance de calcul de Google Earth Engine, offre un cadre robuste pour le traitement de grandes quantités de données sur de vastes territoires.

Les cartes produites sont des outils précieux pour la gestion des risques et la planification des interventions d'urgence. Elles enrichissent également la compréhension spatiale et temporelle des phénomènes d'inondation dans un contexte climatique complexe.

Ce travail ouvre des perspectives prometteuses, notamment l'intégration de données complémentaires (radar, socio-économiques), le suivi multi-temporel des inondations, et le développement d'outils opérationnels pour renforcer la résilience des territoires face aux catastrophes naturelles.

Bibliographie

- [1] H. Xu, “Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, no. 14, pp. 3025–3033, 2006.
- [2] S. K. McFeeters, “The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17, no. 7, pp. 1425–1432, 1996.
- [3] Y. Gu, et al., “A normalized difference drought index for monitoring drought using satellite remote sensing,” *Geophysical Research Letters*, vol. 34, L22405, 2007.
- [4] N. Gorelick, et al., “Google Earth Engine : Planetary-scale geospatial analysis for everyone,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 202, pp. 18–27, 2017.
- [5] ESA, “Sentinel-2 User Handbook,” European Space Agency, 2015.
- [6] Government of Pakistan, “Pakistan Floods 2022 : Disaster Impact and Response Report,” National Disaster Management Authority, 2022.

Annexes

Cette annexe présente des extraits de code utilisés dans notre analyse sur Google Earth Engine, illustrant des étapes-clés du traitement des données.

```
// -----
// Zones potentiellement polluées (eau stagnante)
// -----
var gsw = ee.Image('JRC/GSW1_3/GlobalSurfaceWater').clip(zoneInteret);
var waterOccurrence = gsw.select('occurrence');

var waterBefore = waterOccurrence.gte(50);
Map.addLayer(waterBefore.updateMask(waterBefore), {palette: 'blue'}, 'Eau stable avant');

var waterAfter = flooded;
Map.addLayer(waterAfter, {palette: 'aqua'}, 'Zones d\'eau inondation');

var newWater = waterAfter.updateMask(waterBefore.not());
Map.addLayer(newWater, {palette: 'purple'}, 'Nouvelles zones d\'eau');
```

FIGURE 3.21 – Extrait de code pour la détection des zones d'eau stagnante

```
// -----
// Chargement et traitement Sentinel-2 AVANT inondation
// -----
var s2BeforeCollection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR')
  .filterBounds(zoneInteret)
  .filterDate('2022-06-20', '2022-07-15')
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 40))
  .map(maskS2Clouds)
  .map(function(img) { return img.clip(zoneInteret); });

var s2Before = s2BeforeCollection.median().select(['B3', 'B4', 'B8', 'B11']);

// Calcul indices avant
var ndviBefore = computeNDVI(s2Before);
var ndwiBefore = computeNDWI(s2Before);
var mndwiBefore = computeMNDWI(s2Before);
var nddiBefore = computeNDDI(ndviBefore, ndwiBefore);

// -----
// Chargement et traitement Sentinel-2 APRÈS inondation
// -----
var s2AfterCollection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR')
  .filterBounds(zoneInteret)
  .filterDate('2022-08-25', '2022-09-10')
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 40))
  .map(maskS2Clouds)
  .map(function(img) { return img.clip(zoneInteret); });

var s2After = s2AfterCollection.median().select(['B3', 'B4', 'B8', 'B11']);

// Calcul indices après
var ndviAfter = computeNDVI(s2After);
var ndwiAfter = computeNDWI(s2After);
var mndwiAfter = computeMNDWI(s2After);
var nddiAfter = computeNDDI(ndviAfter, ndwiAfter);
```

FIGURE 3.22 – Extrait de code pour le chargement et la comparaison des données avant et après inondation

```
// -----
// Analyse des bâtiments inondés
// -----
var buildings = ee.FeatureCollection('GOOGLE/Research/open-buildings/v3/polygons')
.filterBounds(zoneInteret);

var buildingsRaster10m = buildings.reduceToImage(['confidence'], ee.Reducer.max())
.gt(0)
.rename('buildings')
.clip(zoneInteret)
.reproject('EPSG:4326', null, 10);

var buildingsRaster100m = buildingsRaster10m
.reduceResolution({reducer: ee.Reducer.mean(), maxPixels: 1024, bestEffort: true})
.reproject('EPSG:4326', null, 100);

var buildingsBinary = buildingsRaster100m.gt(0.1);
Map.addLayer(buildingsBinary.updateMask(buildingsBinary), {palette: 'yellow'}, 'Bâtiments 100m');

var floodedBuildings = buildingsBinary.updateMask(flooded.select(0));
Map.addLayer(floodedBuildings, {palette: 'purple'}, 'Bâtiments inondés');

var pixelArea = ee.Image.pixelArea();

var totalBuiltArea = buildingsBinary.multiply(pixelArea).reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: zoneInteret,
  scale: 100,
  maxPixels: 1e10,
  bestEffort: true
});
print('Surface bâtie totale (m2) :', totalBuiltArea.get('buildings'));

var floodedBuiltArea = floodedBuildings.multiply(pixelArea).reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: zoneInteret,
  scale: 100,
  maxPixels: 1e10,
  bestEffort: true
});
print('Surface bâtie inondée (m2) :', floodedBuiltArea.get('buildings'));
```

FIGURE 3.23 – Extrait de code pour l'analyse des bâtiments inondés