



UNIVERSITE  
JEAN LOROUGNON GUEDE

**UFR ENVIRONNEMENT**

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

-----  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et  
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :  
2018-2019

N° D'ORDRE : 0231/2020

N° CARTE D'ETUDIANT :

CI0412000907

## MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

THEME :

Exploitation de données satellitaires pour la cartographie des zones à risque d'inondation dans la zone de Grand-Bassam (Sud-Est, Côte d'Ivoire)

LABORATOIRE :

SCIENCES ET  
TECHNOLOGIES DE  
L'ENVIRONNEMENT

Présenté par :

**AFFESSI Affessi Christian Serge Désiré**

JURY

Président : M. BARIMA Yao Sadaïou Sabas, Maître de conférences,  
Université Jean Lorougnon Guédé

Directeur : M. KOUADIO Zilé Alex, Maître de conférences,  
Université Jean Lorougnon Guédé

Encadreur : M. KOUASSI Kouakou Hervé, Maître-Assistant,  
Université Jean Lorougnon Guédé

Examineur : M. KPANGUI Kouassi Bruno, Maître-Assistant,  
Université Jean Lorougnon Guédé

Soutenu publiquement

le : 04 Juin 2020

## TABLE DES MATIERES

	<b>Page</b>
DEDICACES .....	iii
REMERCIEMENTS .....	iv
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES .....	v
LISTE DES TABLEAUX .....	vi
LISTE DES FIGURES .....	vii
INTRODUCTION.....	1
PARTIE 1 : GENERALITES.....	4
1.1. GENERALITES SUR LA ZONE D’ETUDE .....	5
1.1.1. Situation géographique.....	5
1.1.2. Climat .....	5
1.1.3. Sol et relief .....	6
1.1.4. Végétation .....	7
1.1.5. Géologie .....	7
1.1.6. Hydrographie.....	8
1.1.7. Population.....	8
1.1.8. Activités économiques .....	9
1.2. GENERALITES SUR LA THEMATIQUE ABORDEE .....	10
1.2.1. Généralités sur les inondations.....	10
1.2.1.1. Définition .....	10
1.2.1.2. Risque : Aléa et Vulnérabilité.....	10
1.2.1.3. Gestion du risque .....	11
1.2.1.4. Zones d’aléa inondation par ruissellement d’eaux accumulées.....	12
1.2.2. Typologie des inondations .....	12
1.2.3. Télédétection .....	16
1.2.3.1. Télédétection optique.....	16
1.2.3.2. Télédétection radar .....	17
PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES .....	19
2.1. MATERIEL D’ETUDE.....	20
2.1.1. Données utilisées .....	20
2.1.2. Dispositif informatique de traitement des données .....	21
2.2. METHODES.....	22

2.2.1. Evaluation de l'aléa inondation.....	22
2.2.1.1. Cartographie de l'extension des eaux et extraction des limites informatives...	22
2.2.1.2. Cartographie de l'aléa inondation lié au relief.....	24
2.2.1.3. Cartographie de la sensibilité à l'inondation .....	24
2.2.2. Evaluation de la vulnérabilité à l'inondation .....	24
2.2.2.1. Cartographie des classes d'occupation du sol.....	24
2.2.2.2. Evaluation de la classification supervisée .....	26
2.2.2.3. Correction et validation de la classification.....	26
2.2.2.4. Cartographie de la vulnérabilité à l'inondation .....	26
2.2.3. Répartition spatiale du risque d'inondation.....	27
2.2.3.1 Classification des critères .....	27
2.2.3.2 Évaluation et pondération des critères .....	28
<b>PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>29</b>
3.1. RESULTATS.....	30
3.1.1. Sensibilité à l'inondation.....	30
3.1.1.1. Cartographie des zones inondées .....	30
3.1.1.2. Cartographie de l'aléa lié au relief.....	31
3.1.1.3. Cartographie de la sensibilité.....	32
3.1.2. Vulnérabilité à l'inondation .....	34
3.1.2.1. Indices spectraux .....	34
3.1.2.2. Cartographie de l'occupation du sol .....	36
3.1.2.3. Cartographie de la vulnérabilité .....	39
3.1.3. Répartition spatiale du risque d'inondation.....	39
3.2. DISCUSSION.....	40
<b>CONCLUSION, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>43</b>
<b>REFERENCES.....</b>	<b>46</b>

## *Dédicaces*

*A mon père AFFESSI Brou Alfred ;*

*Et*

*A ma mère DANHO Chiécou Sylviane.*

*Ce travail est le fruit de votre affection, de votre solidarité*

*et de tous les sacrifices que vous avez consenti*

*pour moi depuis les études primaires jusqu'à ce jour.*

*Je vous dédie entièrement ce travail.*

## REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire de Master a été possible grâce au concours de plusieurs personnes, à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.

Je tiens à exprimer mes remerciements au Professeur TIDOU Abiba Sanogo épouse KONE, Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, pour son dévouement dans la formation des étudiants.

Ma reconnaissance va ensuite à l'endroit du Directeur de l'Unité de Formation et de Recherche Environnement, Docteur KOUASSI Kouakou Lazare. Merci Docteur de m'avoir inculqué la rigueur et l'efficacité dans le travail, dans les bonnes comme dans les conditions les plus défavorables. Comme vous le dites si bien « à l'UFR Environnement, on bosse sous pression !!! ».

J'exprime toute ma reconnaissance au Docteur DIBI Brou, Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) de Daloa, pour avoir permis la réalisation de ce travail au sein du laboratoire qu'il dirige.

J'adresse mes sincères remerciements au Docteur KOUADIO Zilé Alex, Directeur Scientifique de mon mémoire, responsable de la filière Génie de l'Eau et de l'Environnement (GEE). Merci Docteur de toujours prêter l'oreille à mes questions et de me garder dans votre viseur d'avancement.

J'exprime à mon encadreur Docteur KOUASSI Kouakou Hervé ma respectueuse gratitude. J'ai été très sensible à sa grande disponibilité en dépit de ses responsabilités multiples et à la totale confiance qu'il m'a toujours accordée. Ses précieux conseils et ses encouragements ont permis le bon déroulement et l'aboutissement de ce travail.

Je remercie les membres de jury pour le soutien et l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail : Docteur BARIMA Yao Sadaïou Sabas, Président de jury et Docteur KPANGUI Kouassi Bruno, examinateur.

Je suis extrêmement reconnaissant à mes amis KADJO Ettibou Damase, YEO Nonwa Seydou, KANDE Vamara, DIEBI Brice Aristide et GOE Bi Sehi Maxime qui ont contribué à l'amélioration du mémoire.

Je voudrais adresser mes chaleureux et profonds remerciements à Mme MAMBO Antoinette, pour son aide, ses encouragements et son soutien tout au long de cette étude.

## LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

GRDH	: Ground Range Detected High
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
NDVI	: Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	: Normalized Difference Water Index
OSM	: OpenStreetMap
PALMCI	: Palmiers de Côte d’Ivoire
RADAR	: Radio Detection And Ranging
RGPH	: Recensement Général de la Population et de l’Habitat
SIG	: Système d’Information Géographique
SIPRA	: Société Ivoirienne de Production Animale
SRTM	: Shuttle RADAR Topography Missions
UTM	: Universal Transverse Mercator
WGS 84	: World Geodetic System 1984

## LISTE DES TABLEAUX

	<b>Page</b>
Tableau I : Caractéristiques des données RADAR Sentinel-1 .....	20
Tableau II : Caractéristiques des données optiques Sentinel-2 .....	21
Tableau III : Classification des critères relatifs à la carte du risque d'inondation.....	27
Tableau IV : Matrice de confusion de la classification .....	37
Tableau V : Quantification des surfaces inondées selon l'occupation du sol .....	38

## LISTE DES FIGURES

	<b>Page</b>
Figure 1 : Localisation de Grand-Bassam et ses environs .....	5
Figure 2 : Diagramme ombrothermique de Grand-Bassam .....	6
Figure 3 : Relief de Grand-Bassam et ses environs .....	6
Figure 4 : Végétation de la zone d'étude .....	7
Figure 5 : Géologie de la zone d'étude .....	8
Figure 6 : Hydrographie de la zone d'étude.....	8
Figure 7 : Dynamique démographique de Grand-Bassam .....	9
Figure 8 : Définition du risque .....	11
Figure 9 : Inondation de plaine par remontée de nappe alluviale .....	13
Figure 10 : Inondation de plaine et inondation par crues torrentielles.....	13
Figure 11 : Inondation par ruissellement pluvial .....	14
Figure 12 : Inondation par rupture de barrage.....	15
Figure 13 : Inondation marine .....	15
Figure 14 : Acquisition et accès aux données par satellite de Télédétection .....	16
Figure 15 : Longueurs d'ondes RADAR.....	17
Figure 16 : Organigramme des étapes de cartographie des zones à risque d'inondation.....	28
Figure 17 : Cartes des zones inondées à Grand-Bassam et ses environs .....	30
Figure 18 : Estimation de la surface inondée lors des différents passages du satellite .....	31
Figure 19 : Carte de l'aléa lié au relief.....	31
Figure 20 : Carte des pentes .....	32
Figure 21 : Carte de densité du réseau de drainage.....	33
Figure 22 : Carte de sensibilité à l'inondation .....	34
Figure 23 : Produit NDWI dérivé d'image Sentinel-2.....	35
Figure 24 : Produit NDVI dérivé d'image Sentinel-2.....	35
Figure 25 : Carte d'occupation du sol de la zone d'étude de 2020 .....	36
Figure 26 : Répartition de l'occupation du sol dans la zone d'étude .....	37
Figure 27 : Carte des intérêts socio-économiques inondés .....	38
Figure 28 : Carte de vulnérabilité à l'inondation .....	39
Figure 29 : Carte des zones à risque d'inondation.....	40

# **INTRODUCTION**

## Introduction

Les inondations sont des catastrophes naturelles auxquelles l'humanité est confrontée de nos jours. Elles font partie des catastrophes naturelles les plus dévastatrices qui entraînent des conséquences économiques et sociales considérables et des dommages sociaux qu'aucun autre phénomène naturel dans le monde (Randriamparany *et al.*, 2019). Au cours de ces dernières années, plusieurs régions ont été gravement affectées avec des dommages considérables (Gbaguidi, 2010). C'est à cette situation qu'est soumis les pays africains qui en terme de fréquence, de typologie, de catastrophe naturelle, sont les plus frappés par les inondations (Kouakou, 2015).

En Afrique de l'Ouest, de nombreux pays (Benin, Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Niger, Ghana, Sénégal, Togo) sont confrontés à de graves problèmes d'inondation tant en milieu urbain que rural (Kouakou, 2015). Ces événements entraînent des pertes de vies et la destruction ou l'affaiblissement des moyens d'existence des populations (Kouakou, 2015).

En Côte d'Ivoire, les événements des vingt dernières années montrent que les inondations sont très destructrices (Kouakou, 2015). A titre d'illustration, lors des épisodes pluvieux du 30 au 31 mai 1996, les inondations ont occasionné trente morts et des dégâts matériels ; en juin 2014, les pluies diluviennes qui se sont abattues sur la ville d'Abidjan ont été sans pitié tant pour les hommes que pour les maisons entraînant ainsi plus de 27 morts (Kouakou, 2015). Cet inventaire, non exhaustif, montre les conséquences néfastes des inondations notamment en milieu urbain. Des inondations de cette ampleur peuvent se produire sans laisser de trace exploitable. Heureusement les sociétés humaines ont développé des technologies sophistiquées pour collecter, traiter, intégrer et analyser les données liées aux inondations (Randriamparany *et al.*, 2019). Parmi ces technologies, la Télédétection se révèle être particulièrement performante pour l'étude des risques naturels, notamment la surveillance des phénomènes d'inondations (N'Guessan Bi *et al.*, 2014). Ainsi plusieurs travaux dont ceux de N'Guessan Bi *et al.* (2014) et Kouassi *et al.* (2020), ont utilisé des images satellitaires Radar et optique pour respectivement évaluer le risque d'inondation dans le département de Sinfra (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire ) et cartographier le champ d'inondation dans le bassin versant de San-Pédro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire).

Grand-Bassam, pour sa part, est confrontée aux phénomènes de crues et d'inondations liées à la fermeture répétée de l'embouchure du fleuve Comoé et aux activités anthropiques (Konan *et al.*, 2018). Ces phénomènes provoquent des catastrophes et occasionnent d'importants dégâts humains et matériels. L'exemple des événements du mois d'Octobre 2019 est frappant. Depuis le lundi 14 Octobre, les pluies diluviennes qui se sont abattues sur le District

## Introduction

d'Abidjan et sa banlieue ont causé des inondations dans plusieurs quartiers de Grand-Bassam dont Azuretti, Quartier France, Petit paris, Quartier Phare, Moossou et Ebrah, faisant ainsi plus de 5000 sinistrés (Boko, 2019).

Ce constat suscite des interrogations d'une grande importance pour la recherche. L'étude, du fait qu'elle traitera des aspects physiques du risque d'inondation, formule ces questions de la manière suivante : En quoi les facteurs physiques de la zone peuvent-elles contribuer au risque d'inondation ? En quoi la manière d'occuper l'espace par les habitants favorise-t-elle le risque d'inondation ? Où sont localisées ces zones à risque d'inondation ?

C'est dans le but de trouver des réponses à ces préoccupations que l'étude initiée a pour thème : « Exploitation de données satellitaires pour la cartographie des zones à risque d'inondation dans la zone de Grand-Bassam (Sud-Est, Côte d'Ivoire) ».

Cette étude a pour objectif de mettre en place un outil de gestion du risque d'inondation basé sur la cartographie à Grand-Bassam.

De manière spécifique il s'agit :

- d'évaluer l'aléa inondation ;
- d'évaluer la vulnérabilité à l'inondation ;
- de déterminer la répartition spatiale du risque d'inondation.

Ce mémoire est structuré en trois parties. La première partie est consacrée aux généralités sur la zone d'étude ainsi que les notions liées à la thématique abordée. La deuxième partie, présente les données collectées, les outils de traitement et le cadre méthodologique adopté. La troisième partie, est consacrée à la présentation des résultats obtenus et de la discussion qui en découle. Une conclusion suggérant des recommandations et perspectives de recherches, achève ce mémoire.

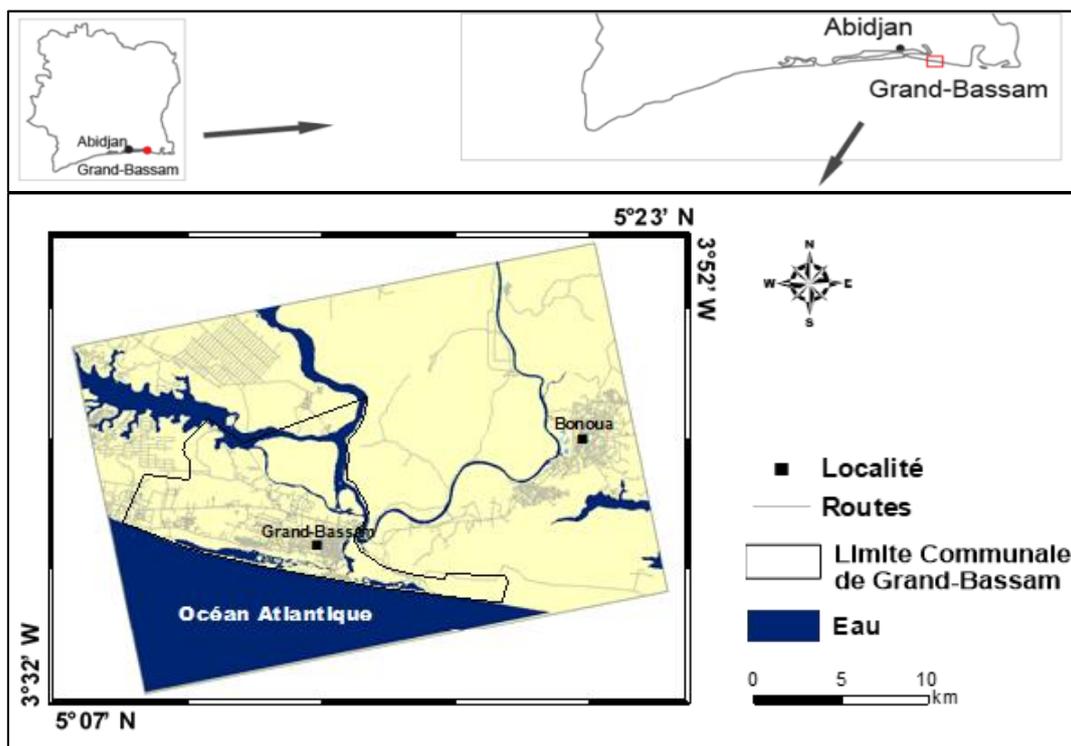
# **PARTIE 1 : GENERALITES**

## Généralités

### 1.1. GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE

#### 1.1.1. Situation géographique

La zone humide de Grand-Bassam (Figure 1) est située au Sud-Est de la Côte d'Ivoire, en bordure de l'Océan atlantique, entre les longitudes 3°32'W et 3°52'W et les latitudes 5°07'N et 5°23'N. Elle fait partie de la région administrative du Sud Comoé dont Aboisso est le chef-lieu.



**Figure 1** : Localisation de Grand-Bassam et ses environs

#### 1.1.2. Climat

La zone de Grand-Bassam est sous influence d'un climat équatorial de transition à quatre saisons dont deux pluvieuses et deux sèches (Figure 2) :

- une grande saison des pluies, d'Avril à Juillet ;
- une petite saison des pluies, d'Octobre à Novembre ;
- une grande saison sèche, de Décembre à Mars ;
- une petite saison sèche, d'Août à Septembre.

La pluviométrie moyenne annuelle enregistrée sur la période 1990-2019 est 1062,2 mm. La tendance des températures mensuelles varie entre 25°C et 29°C, avec une moyenne annuelle de 27,6°C.

## Généralités

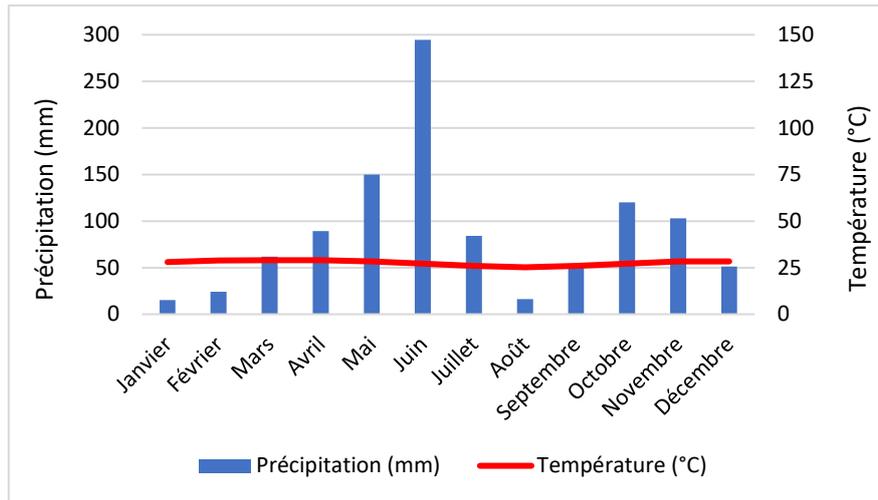


Figure 2 : Diagramme ombrothermique de Grand-Bassam (1990-2019)

### 1.1.3. Sol et relief

La zone de Grand-Bassam est caractérisée par des sols hydromorphes des bas-fonds, qui présentent une aptitude culturale relativement médiocre et une faible capacité d'infiltration voire imperméable à l'eau. Leur lessivage entraîne la présence de fer, d'aluminium et autres cations dans les eaux souterraines (Kolia, 2013).

Quant au relief, il est dans son ensemble monotone avec des singularités par endroits (Figure 3). Il se présente comme une pénéplaine dont les altitudes varient entre 0 m et 131 m. Dans l'ensemble, deux types de relief se partagent la zone de Grand-Bassam. Ce sont les plaines et les plateaux.

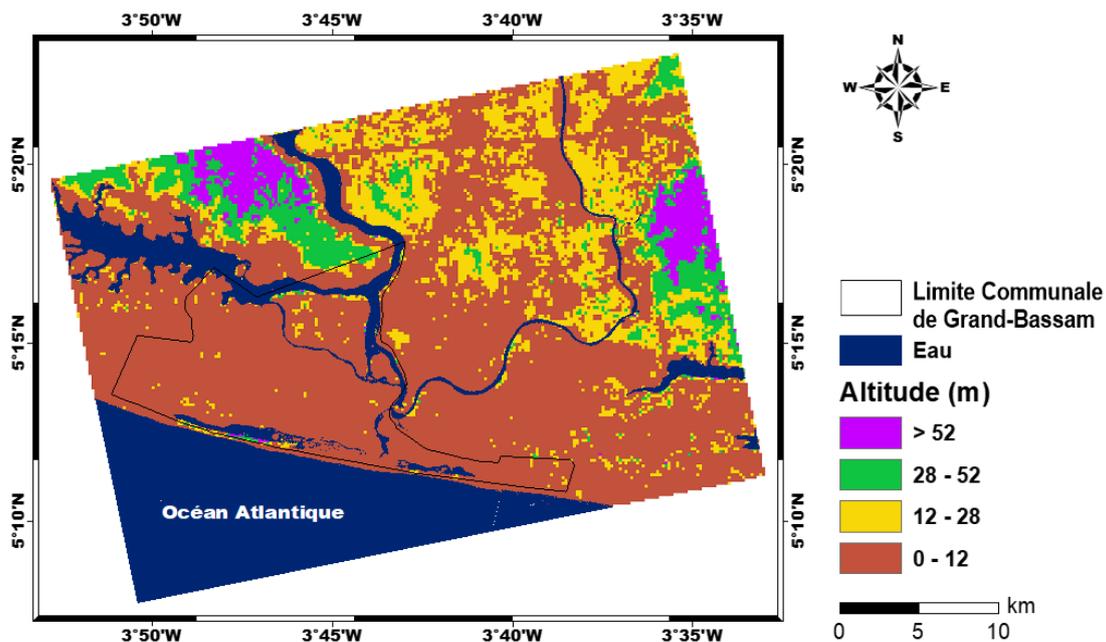


Figure 3 : Relief de Grand-Bassam et ses environs

## Généralités

### 1.1.4. Végétation

La zone de Grand-Bassam dispose d'une végétation qui varie du Nord au Sud (Figure 4). Ainsi, au Nord, on observe une forêt dense sempervirente traversée par la lagune Potou. Les eaux de la zone sont progressivement envahies par des macrophytes flottants de type *Eichornia crassipes* et *Salvinia molesta* (Yaokokoré & N'Douba, 2005). Ces végétaux réduisent les écoulements, l'aération, la pénétration de la lumière et amènent des conditions anoxiques dans lesquelles seules les espèces les plus tolérantes peuvent survivre. Au Centre, on observe un mélange de forêt claire et de cultures qui occupe la majeure partie de cette zone. Le Sud présente une végétation moins dense, caractérisé par une savane arborée.

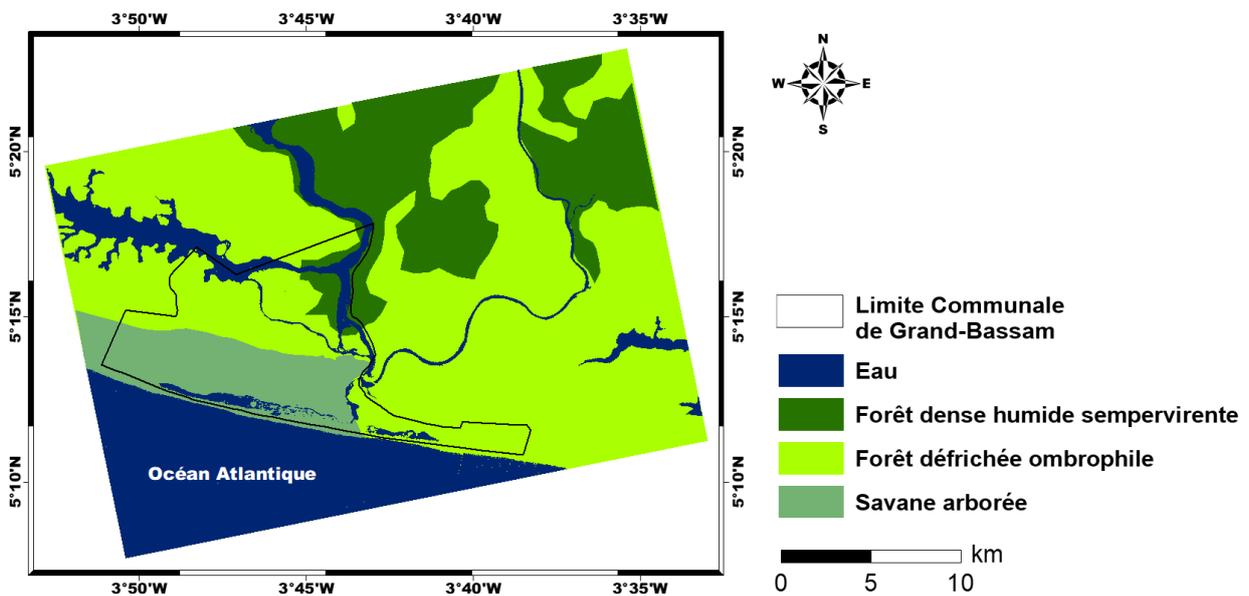
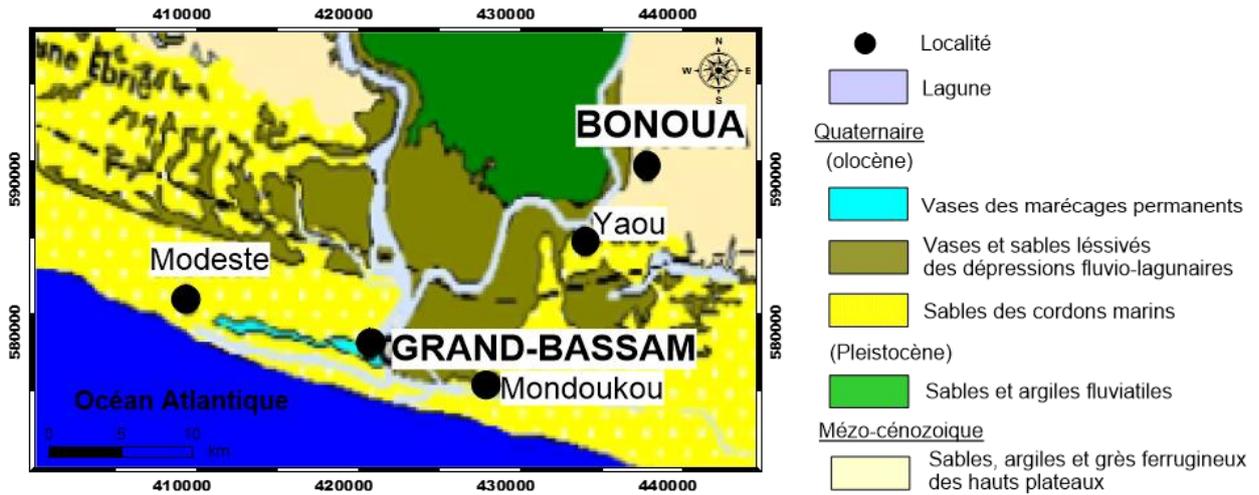


Figure 4 : Végétation de la zone d'étude

### 1.1.5. Géologie

Au plan géologique, la zone humide de Grand Bassam repose sur un sol qui s'est développée selon la topographie et la profondeur de la nappe phréatique. Cette zone humide se localise dans la zone centrale du bassin sédimentaire où on observe du Nord au Sud les formations Mézo-cénozoïque à quaternaire (Figure 5). Les plateaux sablo-argileux Mézo-cénozoïque du continental terminal au Nord, dominent les sables argileux des bas-plateaux pléistocène qui sont relayés au Sud par les vases et sables lessivés fluvio-lagunaires. Le cordon littoral quaternaire plus au Sud est formé de cordons marins sableux.

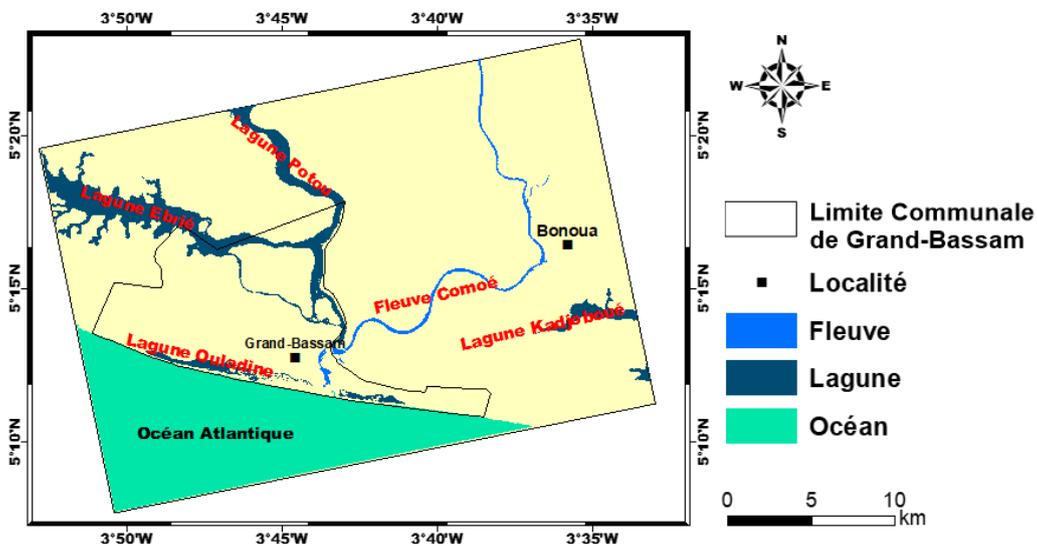
## Généralités



**Figure 5** : Géologie de la zone d'étude (Gautier *et al.*, 2016)  
Modifié par Affessi (2020)

### 1.1.6. Hydrographie

La zone de Grand-Bassam est drainée par cinq cours d'eau qui sont : le fleuve Comoé et les lagunes Ebrié, Kadjouboué, Ouladine et Potou (Figure 6). Ces eaux se sont insinuées dans toutes les dépressions, créant ainsi de multiples bras. Ces cours d'eau confluent pour former à Grand-Bassam le plus vaste estuaire du littoral Ivoirien (Yaokokoré & N'Douba, 2005).



**Figure 6** : Hydrographie de la zone d'étude

### 1.1.7. Population

La population de la commune de Grand-Bassam était estimée en 2014 à 84028 habitants (INS, 2015) vivant sur une superficie de 120 km<sup>2</sup>, soit une densité de 700 habitants par km<sup>2</sup>. La commune a connu un accroissement de 3 % entre les recensements de 1975 et 2014 (Figure 7). La population de Grand-Bassam est essentiellement autochtone et allochtone. La population autochtone du territoire Bassamois se compose d'Abourés et de N'zimas.

## Généralités

La population allochtone est composée majoritairement de malinkés. On note aussi la présence de colonie étrangère constituée de Béninois, de Togolais et de Ghanéens (Kouadio, 2012).

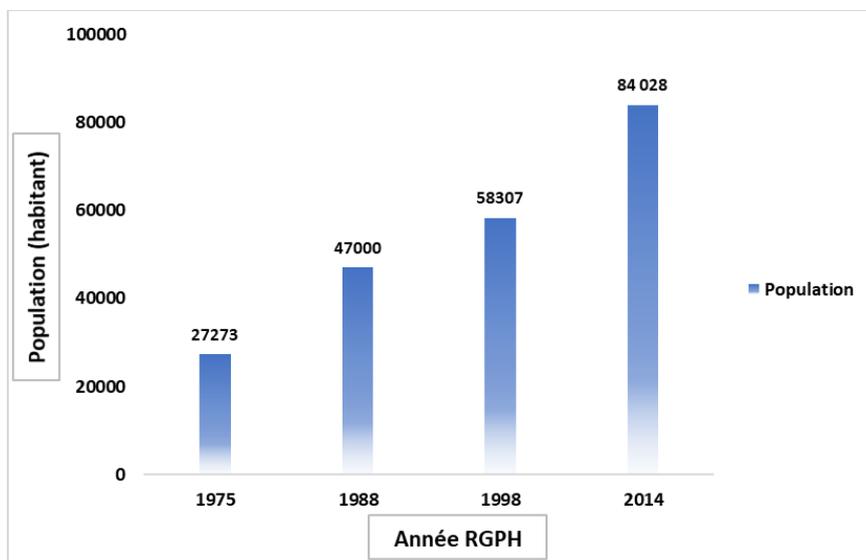


Figure 7 : Dynamique démographique de Grand-Bassam (Koutoua, 2019)

### 1.1.8. Activités économiques

L'ouverture sur l'Océan Atlantique et la proximité de la ville d'Abidjan font de l'artisanat, du tourisme et de la pêche les principales activités des populations de Grand-Bassam (Kouadio, 2012). En plus de celles-ci, on y rencontre les activités agricoles et l'élevage.

La pêche, principalement de type artisanal est l'activité dominante des populations locales de cette zone. Toutefois, le secteur est dominé par les pêcheurs d'origines Malienne, Ghanéenne et Togolaise.

L'artisanat est une particularité remarquable au sein de la zone. Un marché artisanal existe à cet effet à l'entrée Ouest de Grand-Bassam. Les objets d'art sont multiples et très diversifiés. On y trouve des objets façonnés en bois, en fer, en argile, en paille, etc.

Le tourisme est une activité bien développée dans la zone de Grand Bassam. Les vestiges du passé colonial y sont encore très présents. Les infrastructures et actifs touristiques sont assez remarquables. De fait, la zone est une destination privilégiée lors des week-ends et des vacances. Elle est beaucoup fréquentée par les touristes et les résidents européens.

Les activités agricoles concernent le palmier à huile, le cocotier, les maraîchers, les vivriers et l'ananas. De grands blocs agro-industriels existent dans le voisinage de la zone humide tel que les exploitations de Palmiers de Côte d'Ivoire (PALMCI) qui emploie une main d'œuvre d'origine étrangère.

## Généralités

L'élevage s'organise autour des productions de volailles, de porcs et d'escargots. Les producteurs sont encadrés par plusieurs structures tel que la SIPRA (Société Ivoirienne de Production Animale) (Yaokokoré & N'Douba, 2005).

### 1.2. GENERALITES SUR LA THEMATIQUE ABORDEE

Clarifier certains concepts clés s'avère être primordiale dans la compréhension et l'analyse du thème choisi. De fait, étudier les problèmes d'inondation nécessite une bonne connaissance du concept "Inondation" : généralités, genèse et typologie.

#### 1.2.1. Généralités sur les inondations

##### 1.2.1.1. Définition

L'inondation désigne la submersion plus ou moins rapide et temporaire par l'eau des terres habituellement hors d'eau, qu'elle qu'en soit l'origine. Elle est provoquée par des pluies importantes et durables.

##### 1.2.1.2. Risque : Aléa et Vulnérabilité

Le risque, l'aléa, la vulnérabilité sont les notions centrales de cette étude. Leurs définitions étant variables selon les domaines d'expertise (sécurité civile, ingénierie, assurances, etc.), les auteurs ou les études, il est nécessaire de leur donner une définition précise dans un contexte de sécurité civile (Schneiderbauer & Ehrlich, 2004).

La vulnérabilité représente une condition résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques ou environnementaux, qui prédispose les éléments exposés à la manifestation d'un aléa à subir des préjudices ou des dommages (Morin, 2008).

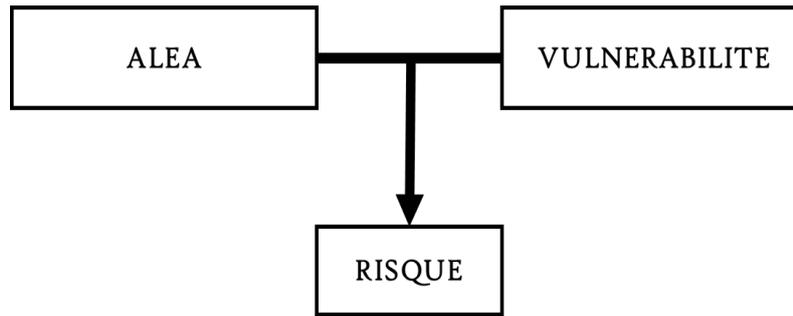
Elle transcrit la sensibilité de l'occupation du sol et de la société au phénomène d'inondation.

L'aléa constitue un phénomène, une manifestation physique ou une activité susceptible d'occasionner des pertes en vies humaines ou des blessures, des dommages aux biens, des perturbations sociales et économiques ou une dégradation de l'environnement (Morin, 2008).

Ainsi, une inondation ne constitue pas un risque dans une zone inhabitée, aucun élément vulnérable n'y étant en théorie présent en termes de sécurité civile. Si au contraire elle touche une zone densément peuplée, où des infrastructures importantes sont implantées, le risque sera présent et pourra être fort (Cutter *et al.*, 2003).

Le risque est donc le résultat de l'interaction entre un aléa et la vulnérabilité des éléments exposés à son égard (Figure 8). Il correspond ainsi à la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un aléa et des conséquences pouvant en résulter sur les éléments vulnérables d'un milieu donné (Morin, 2008).

## Généralités



**Figure 8** : Définition du risque

La capacité qu'a un aléa à causer des dommages résulte donc de ses caractéristiques propres, mais aussi des caractéristiques du milieu touché. Une analyse complète et fiable du risque lié aux inondations ne peut donc s'affranchir d'un de ces deux éléments, à savoir l'aléa et la vulnérabilité, et doit intégrer de manière précise l'ensemble de leurs caractéristiques (Morin, 2008; Peduzzi *et al.*, 2009). Dans le cas de l'aléa inondation, ces caractéristiques varient selon les études. La vitesse des flots, la hauteur de l'eau, la durée de l'inondation, la température de l'eau, l'étendue de l'inondation ou encore la concentration en sédiments peuvent être considérés (Tanguy, 2012). Les trois (3) caractéristiques les plus susceptibles d'influencer la vulnérabilité sont : l'étendue spatiale de l'inondation, la hauteur d'eau dans les zones submergées et la durée de l'inondation. La vulnérabilité, quant à elle peut être caractérisée à l'aide de trois dimensions principales : la vulnérabilité intrinsèque, la vulnérabilité du bâti et la vulnérabilité des infrastructures essentielles (Tanguy, 2012).

### 1.2.1.3. Gestion du risque

La gestion du risque lié aux inondations se décompose en trois volets : le volet de prévention et d'atténuation, le volet de gestion de crise et le volet de retour d'expérience.

Le volet de prévention et d'atténuation prend appui sur la connaissance et la localisation des zones à risque, et vise à réduire les vulnérabilités humaine et économique. Elle vise à protéger l'existant, en informant la population ou encore en limitant l'implantation des biens et des personnes dans les zones exposées à l'aléa inondation. Elle est basée, tout comme la phase de retour d'expérience, sur l'analyse des crues potentielles ou passées afin d'aider à la compréhension des phénomènes physiques et de limiter le risque à long terme (Hostache *et al.*, 2005).

La phase de gestion de crise correspond quant à elle à des actions en état d'urgence, et comporte donc une contrainte temporelle importante. Une des préoccupations majeures est alors de connaître dans les délais les plus brefs, l'ampleur précise de l'inondation mais aussi la localisation des populations les plus vulnérables.

## Généralités

L'objectif est de déployer rapidement les moyens d'actions et de secours les plus appropriés et ainsi de réduire les conséquences humaines et matérielles du sinistre (Henry, 2004).

Enfin, la phase de retour d'expérience cherche à tirer des conclusions sur les conséquences de l'inondation, à en mesurer les impacts humains et économiques mais aussi à analyser la pertinence des moyens déployés lors de la phase de gestion de crise. Cette phase permet de bâtir ou d'améliorer les politiques de prévention du risque et de protection des éléments vulnérables face à une inondation future (Tanguy, 2012).

### 1.2.1.4. Zones d'aléa inondation par ruissellement d'eaux accumulées

L'aléa inondation par ruissellement d'eau comprend les zones dans lesquelles des inondations sont susceptibles de se produire, de façon plus ou moins importante et fréquente, suite au ruissellement des eaux de pluies abondantes. La carte de l'aléa inondation représente donc des zones où il existe un risque d'inondation, même aux endroits où aucune inondation n'est historiquement connue. Inversement, l'absence d'une zone d'aléa sur la carte ne peut garantir qu'une inondation ne s'y produira jamais. Cette carte ne concerne pas les inondations trouvant leur origine dans du refoulement d'égouts, de la remontée de nappe phréatique ou de phénomènes apparentés. Il s'agit uniquement des problèmes d'inondations trouvant leur origine dans le ruissellement des eaux pluviales.

Cette cartographie de l'aléa exclut toute hypothèse d'inondation catastrophique, liée à un événement accidentel tel qu'une rupture de barrage ou de digue, une panne de système de pompage, et tout autre incident similaire (Gbaguidi, 2010).

### 1.2.2. Typologie des inondations

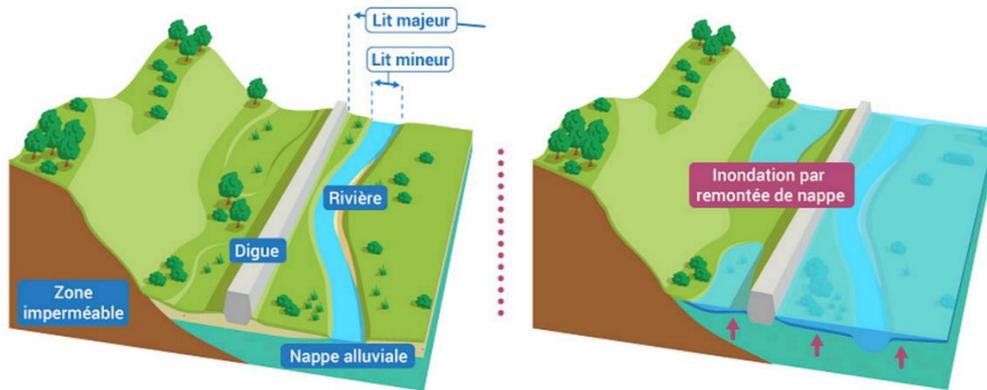
En fonction de l'événement créateur de la catastrophe, on peut distinguer plusieurs types d'inondation : inondations de plaine, par remontée de nappe alluviale, par crues torrentielles, par ruissellement en secteur urbain ou rural, par rupture d'une digue et inondations marines.

Dans les quatre premiers cas, le phénomène générateur est la pluie et l'inondation engagera à partir des fleuves et des rivières ; la classification consiste donc à distinguer les inondations provoquées par des crues à cinématique lente (inondations de plaine, remontée de nappe) de celles générées par des crues à cinématique rapide (crues torrentielles, ruissellement). Tandis que dans les deux derniers cas ; le premier c'est les circonstances locales qui jouent pour faire d'une inondation un événement particulier et le deuxième c'est l'action de la mer qui est le facteur principal déterminant la survenance des désordres (Khalifa, 2015).

## Généralités

- **Montée lente des eaux en région de plaine**

Après une ou plusieurs années pluvieuses, il arrive que la nappe affleure et qu'une inondation spontanée se produise : il s'agit d'inondation par remontée de nappe souterraine (Figure 9). Ce phénomène concerne particulièrement les terrains bas ou mal drainés. Sa dynamique lente perdure plusieurs semaines (Khalifa, 2015).

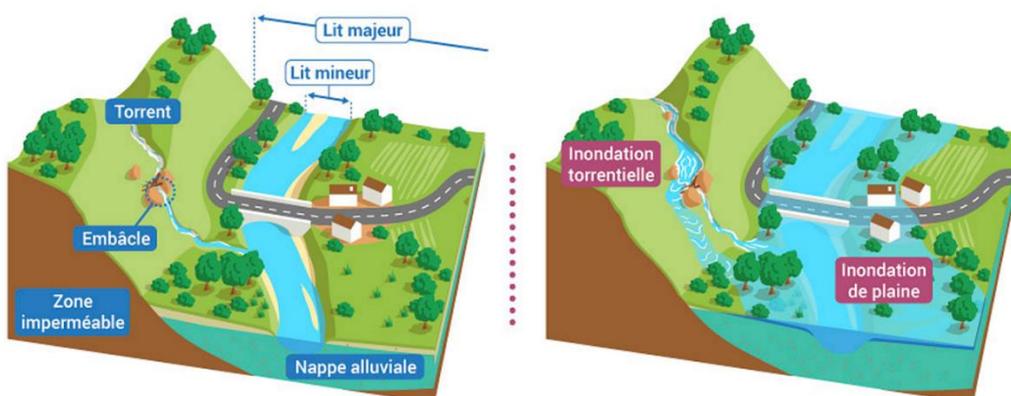


**Figure 9** : Inondation de plaine par remontée de nappe alluviale  
Source : <http://www.sirra.fr/outils-pi.php> (Consulté le 15-03-2020).

- **Inondation de plaine et formation rapide de crues torrentielles**

Les inondations de plaine se produisent lorsque la rivière sort lentement de son lit mineur et inonde la plaine pendant une période relativement longue. La rivière occupe son lit moyen et éventuellement son lit majeur.

Lorsque des précipitations intenses, telles des averses violentes, tombent sur tout un bassin versant, les eaux ruissellent et se concentrent rapidement dans le cours d'eau, engendrant des crues torrentielles brutales et violentes (Khalifa, 2015). La figure 10 ci-dessous illustre ces deux états d'inondations.



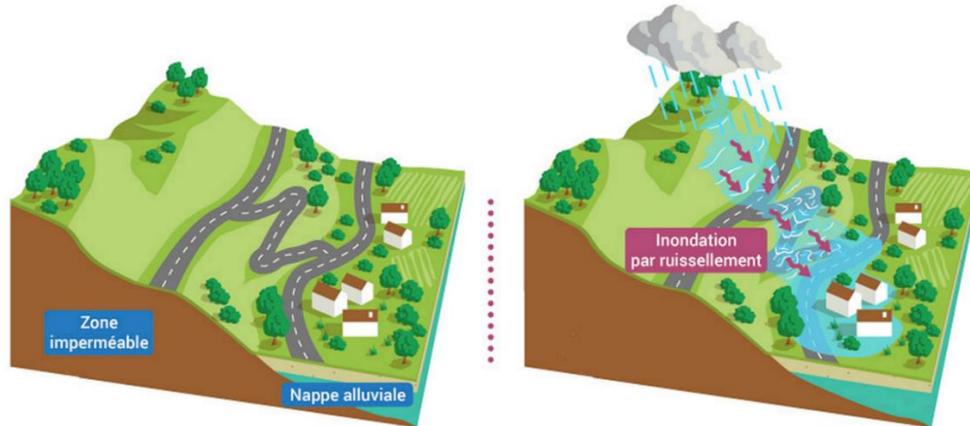
**Figure 10** : Inondation de plaine et inondation par crues torrentielles  
Source : <http://www.sirra.fr/outils-papi.php> (Consulté le 15-03-2020)

## Généralités

- **Ruissellement pluvial**

Le ruissellement (Figure 11) est la circulation de l'eau qui se produit sur les versants en dehors du réseau hydrographique lors d'un événement pluvieux.

Sa concentration provoque une montée rapide des débits des cours d'eau, pouvant être amplifiée par la contribution des nappes souterraines (Khalifa, 2015).



**Figure 11** : Inondation par ruissellement pluvial

Source : <http://www.sirra.fr/outils-papi.php> (Consulté le 15-03-2020)

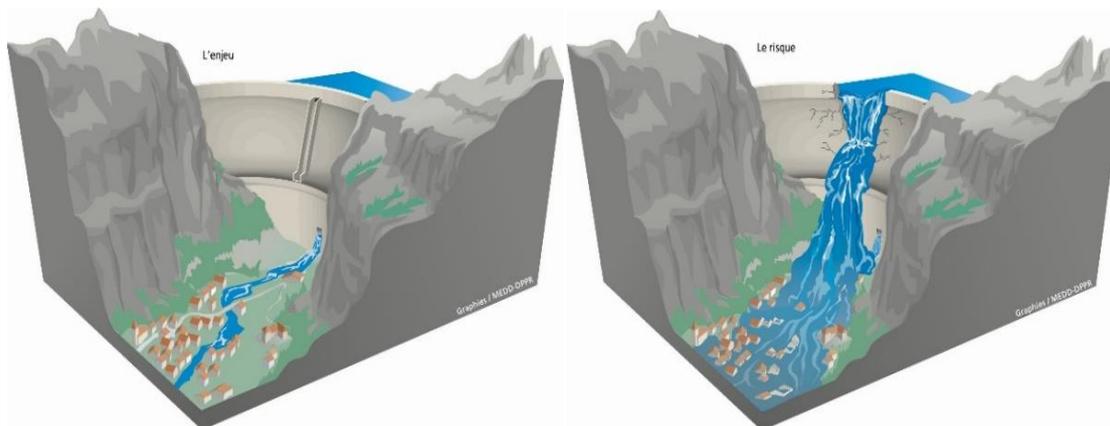
- **Inondation par rupture d'ouvrage ou d'embâcle**

Dans le cas de rivières endiguées, l'inondation survient brutalement soit par débordement au-dessus de la digue, soit par rupture de la digue (Figure 12). Le phénomène peut être très brutal et d'autant plus dommageable que le site est proche de la digue. Le fait d'être derrière un ouvrage de protection dimensionné pour un certain niveau de crue peut donc rehausser le seuil de risque en cas de rupture ou dépassement de ce dernier. Des secteurs habituellement hors d'eau peuvent se trouver brutalement inondés. Lorsque la crue est suffisamment importante, elle remplit puis fait déborder la retenue. L'ouvrage n'atténue donc plus les débits.

Le cours d'eau inonde alors sa plaine alluviale comme s'il n'y avait pas d'aménagement.

Les végétaux, arbres et arbustes, arrachés aux berges puis entraînés par le courant viennent parfois se coincer et boucher les ponts. Il en résulte une inondation aggravée en amont (Khalifa, 2015).

## Généralités



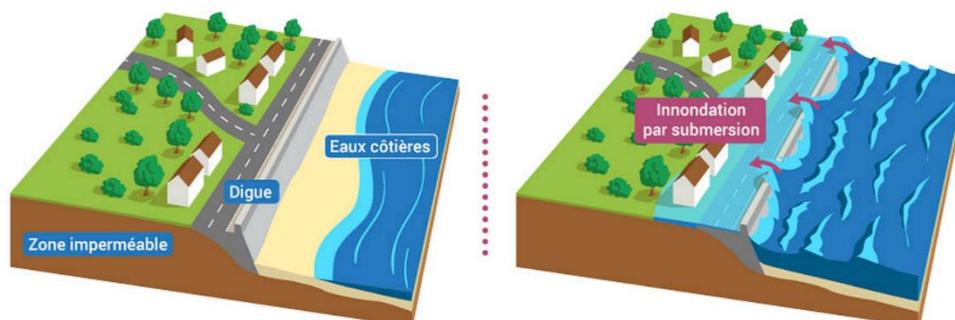
**Figure 12** : Inondation par rupture de barrage

Source : <http://www.mementodumaire.net/risques-technologiques/rt-4-rupture-de-barrage/>  
(Consulté le 15-03-2020)

La rupture de l'embâcle peut provoquer une vague qui augmente le risque d'inondation à l'aval. Les ouvrages munis de piles, trop petits pour laisser passer les embâcles (la hauteur libre ou tirant d'air sous le pont étant insuffisant) sont les plus vulnérables à ce phénomène. Le risque de contournement, voire de submersion de l'ouvrage est augmenté par la présence de ces bouchons, ce qui peut entraîner de gros dégâts voire la ruine complète du pont et/ou de ses remblais d'accès ; les remblais routiers n'étant pas conçus pour retenir l'eau ni protéger contre l'érosion du courant (Khalifa, 2015).

- **Inondation marine**

Les submersions marines (Figure 13) sont des inondations temporaires de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques (fortes dépressions et vents de mer) et forts coefficients de marée. Elles se traduisent par l'invasion des eaux salées particulièrement agressives. Elles se manifestent soit lors d'un raz de marée ou de tsunami, soit lors d'une tempête ou en cas de rupture des défenses contre la mer (Khalifa, 2015).

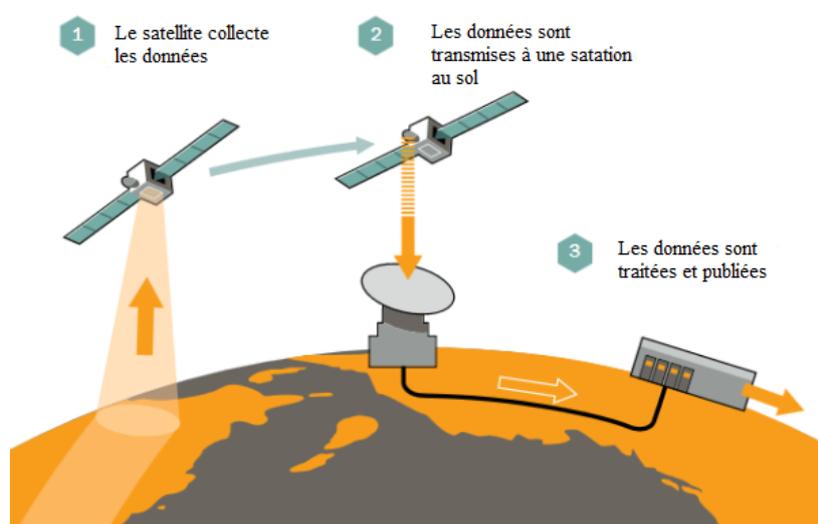


**Figure 13** : Inondation marine

Source : <http://www.sirra.fr/outils-papi.php> (Consulté le 15-03-2020).

### 1.2.3. Télédétection

La télédétection regroupe l'ensemble des techniques d'acquisition de données sur un territoire, sans qu'aucun contact direct avec celui-ci ne soit nécessaire (Denize, 2015). Il s'agit donc de données, la plupart du temps des images, acquises depuis un appareil aérospatial comme un avion, un drone, un satellite, etc. Placés en orbite autour de la terre, les satellites (Figure 14) sont capables de fournir des données sur l'ensemble de la surface terrestre de manière régulière, grâce à des revisites fréquentes et à moindre coût. Ces avantages ont fait de la télédétection un outil incontournable pour étudier l'occupation du sol à toutes les échelles (Denize, 2015).



**Figure 14** : Acquisition et accès aux données par satellite de Télédétection (Faivre, 2018)

#### 1.2.3.1. Télédétection optique

Les capteurs optiques sont capables d'enregistrer la réponse spectrale des surfaces observées dans le domaine du visible mais également dans d'autres parties du spectre électromagnétique riches en information (proche infrarouge, moyen infrarouge, etc.). Chaque grand type d'occupation du sol ayant une signature spectrale différente (zone bâtie, végétation, zones humides), l'information radiométrique est donc particulièrement intéressante pour l'étude de l'occupation du sol (Denize, 2015).

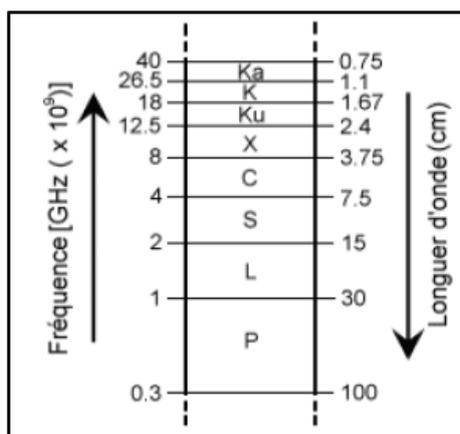
Néanmoins, ces capteurs optiques sont très sensibles aux effets météorologiques. En effet, de par leur longueur d'onde, il est impossible pour un capteur optique d'obtenir une image de la surface terrestre sous couvert nuageux (Denize, 2015).

## Généralités

### 1.2.3.2. Télédétection radar

Développé à partir des années 1970, la technologie RADAR (Radio Detection And Ranging) est une technologie permettant d'envoyer et de recevoir des signaux situés dans la longueur d'onde des micro-ondes (Denize, 2015).

Les scientifiques ont divisé cette longueur d'onde en 8 « bandes » (Figure 15), correspondant à des fréquences différentes, facilitant ainsi son utilisation (Denize, 2015).



**Figure 15** : Longueurs d'ondes RADAR (Denize, 2015)

Les micro-ondes, de longueur d'onde plus grande que les ondes visibles et infrarouges, ne sont pas sensibles à la diffusion atmosphérique qui affecte les ondes plus courtes. Elles peuvent ainsi, traverser la couche nuageuse, la bruine, la poussière et la pluie fine.

Cette propriété permet la détection dans presque toutes les conditions atmosphériques, et donc l'acquisition de donnée sur la surface terrestre en tout temps, de jour comme de nuit. Cette onde électromagnétique est caractérisée par une amplitude (taille de l'onde), une phase (position de l'onde à l'instant t) et une orientation verticale ou horizontale (Denize, 2015).

L'orientation des ondes émises et reçues permet de caractériser la polarisation qui est une propriété d'une onde électromagnétique plane (Denize, 2015). On distingue 3 types de polarisation utilisés par les satellites radar SAR : la polarisation simple, la polarisation double et la polarisation complète. La polarisation simple, est l'utilisation d'une seule combinaison (émission H/ réception H (HH), HV, VH ou VV). Permettant d'obtenir une zone d'étude plus vaste que les autres polarisations, elle permet de comparer les structures présentes au sein de cet espace, tout en caractérisant l'évolution de la végétation grâce à la grande répétitivité temporelle de ce mode. La polarisation double, correspond à l'emploi de deux combinaisons (VV/VH, HH/HV, etc.). La polarisation complète, correspond à l'utilisation des 4 combinaisons provenant des composantes verticale et horizontale (HH/HV/VH/VV).

## **Généralités**

Fournie par quelques satellites (RADARSAT-2, TERRASAR-X et ALOS-2), elle est l'objet d'un grand nombre de travaux récents. Elle fournit une information plus complète que les polarisations simple et double permettant une classification et une caractérisation des cultures plus fines (Denize, 2015).

## **PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES**

---

## Matériel et méthodes

### 2.1. MATERIEL D'ETUDE

Pour la réalisation de ce travail, des recherches bibliographiques (supports de cours, internet), des collectes de données et le traitement de ces données ont été effectués dans le but d'atteindre les objectifs fixés.

#### 2.1.1. Données utilisées

##### ❖ Données vectorielles

Nous avons extrait différents types de couches d'information pour la réalisation des cartes. Il s'agit de limite administrative et de routes, téléchargées gratuitement à partir des URL : <http://www.diva-gis.org/gdata> et <http://www.openstreetmap.org/>.

##### ❖ Donnée topographique

La donnée utilisée dans cette étude est une image Modèle Numérique de Terrain (MNT) de 90 m de résolution, fournie par la plateforme de distribution de données Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Cette image nous a servi pour la réalisation de la carte du relief de la zone d'étude.

##### ❖ Données de télédétection

Pour ce qui est des données satellitaires, nous avons utilisé trois images RADAR Sentinel-1 et une image optique Sentinel-2. En ce qui concerne les données RADAR Sentinel-1, nous avons, une image acquise hors inondations et deux images acquises pendant la période d'inondations. Les caractéristiques de ces images sont présentées dans le tableau I ci-dessous.

**Tableau I** : Caractéristiques des données RADAR Sentinel-1

<b>Polarisation</b>	VV/VH
<b>Bande</b>	C ( $\lambda=5,6\text{cm}$ )
<b>Resolution Spatiale</b>	20 x 22 m <sup>2</sup> (az. x gr. range)
<b>Pixel</b>	10 x 10 m <sup>2</sup> (az. x gr. range)
<b>Fauchée</b>	250 km
<b>Angle d'incidence</b>	36°- 42°
<b>Format</b>	GRDH
<b>Date d'acquisition</b>	2019 : 05,17,29 Octobre

## Matériel et méthodes

Quant aux données optiques, nous avons eu recours à une (1) hors inondations. Les caractéristiques de cette image sont consignées dans le tableaux II ci-dessous.

**Tableau II** : Caractéristiques des données optiques Sentinel-2

<b>Resolution spatiale</b>	MS : 10m, 20m, 60m
<b>Temps de revisite</b>	5 jours
<b>Bande spectrale</b>	B,V, R, PIR (10 m) ; VRE, MIR (20 m)
<b>Fauchée</b>	290 km
<b>Format</b>	GRDH
<b>Date d'acquisition</b>	2020 : 05 Janvier

**MS** : Multispectral ; **B** : Bleu ; **V** : Vert ; **PIR** : Proche Infra Rouge ; **MIR** : Moyen Infra Rouge ; **VRE** : Vegetation Red Edge

Les données Sentinel-1 et Sentinel-2 ont été fournies par la plate-forme de distribution des données Sentinel du programme Copernicus avec une politique d'accès aux données libre et ouvert à tout le monde avec une garantie de continuité à long terme (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

### 2.1.2. Dispositif informatique de traitement des données

**Ordinateur portable** : DELL LATITUDE E5440, Core i5, RAM 8,00 Go, processeur 2,60 GHz et Système d'exploitation 64 bits.

#### Logiciels utilisés :

- **SNAP 7.0** pour le traitement des données Sentinel-1 ;
- **ENVI 5.3** pour l'exportation des données Sentinel-1 au format GRDH en format Shapefile (SHP) compatible au logiciel **ArcGIS 10.6** et la classification supervisée de l'image Sentinel-2 ;
- **Google Earth** pour la photo-interprétation des images satellitaires ;
- **ArcGIS 10.6** pour l'élaboration des cartes.

### 2.2. METHODES

#### 2.2.1. Evaluation de l'aléa inondation

##### 2.2.1.1. Cartographie de l'extension des eaux et extraction des limites informatives

###### ❖ Pré-traitements des « données RADAR Sentinel-1»

###### - Extraction de la zone d'étude

Les images RADAR couvrent une grande étendue (250 x 250 km) et donc nécessitent une grande ressource informatique (performance de l'ordinateur). Pour réduire le volume des données à traiter et ainsi accélérer les traitements, nous avons découpé une partie des images. Le découpage de notre zone d'étude a été réalisée à partir de la fenêtre de visualisation d'image sous le logiciel SNAP 7 grâce à son outil Subset.

###### - Calibration

Pour faciliter la comparaison des images et les analyses multi-temporelles, il nous a été indispensable de transformer les comptes numériques (CN) des images en valeurs de réflectance (normalisation). Cette normalisation a été réalisée grâce à l'outil Calibrate du logiciel SNAP 7.

###### - Filtrage

Les images RADAR sont bruitées, ce qui perturbe leur analyse. Pour réduire l'effet du bruit et ainsi obtenir des images sur lesquelles apparaissent plus nettement le champ d'inondation, nous avons utilisé le filtre Gamma-cartographique de fenêtre 5 x 5. Ce filtre a la particularité en plus de réduire efficacement le bruit de conserver les forts gradients radiométriques au sein des images, ce qui est intéressant pour la cartographie de champ d'inondation (Hostache *et al.*, 2007).

###### - Correction de terrain

L'utilisation des images RADAR nécessite qu'elles soient rectifiées afin de pouvoir les superposer avec d'autres données (données vectorielles, données raster). Afin de remettre les images à l'endroit, nous les avons géoréférencé dans le système de projection cartographique WGS 84\_UTM zone 30 Nord.

###### ❖ Histogramme de seuillage

Le seuillage d'histogramme est une technique simple et efficace pour obtenir une classification binaire automatique des zones inondées. Cette méthode d'Otsu est effectuée par un seuillage automatique depuis l'histogramme radiométrique de l'image filtrée. Le seuil est ensuite appliqué à l'image pour diviser les différents niveaux de gris en deux classes

## Matériel et méthodes

distinctes représentées par 0 (pixel inondé) ou 1 (pixel non inondé). Cette technique est simple et rapide, mais elle ne permet pas une grande flexibilité dans le choix des paramètres.

Il arrive aussi que la valeur de seuil optimal ne soit pas appropriée (Hostache *et al.*, 2007).

A l'issue de cette classification, nous obtenons une tache d'eau RADAR, dont les limites sont affectées d'une zone d'incertitude.

Ce nouveau produit est par la suite exporté au format GeoTIFF puis importé sous Envi 5.3 où les pixels non inondés sont éliminés. Les pixels inondés sont exportés au format Shapefile (SHP) pour l'étape d'élimination des zones non pertinentes sous ArcGIS 10.6.

### ❖ **Elimination des zones non pertinentes de la tache d'eau RADAR**

La détection par seuillage sur les images RADAR fait apparaître des « sur-détections » et des « oublis ». Ces perturbations sont préjudiciables pour notre problématique car elles rendent non pertinentes les informations issues du RADAR concernant les limites géographiques de l'inondation.

Les sur-détections se rencontrent essentiellement hors champ d'inondation. Elles proviennent principalement d'effets dus au chatoiement (groupes de pixels isolés supprimés de la tache par seuillage surfacique) et au relief (versants qui ne sont pas atteints par l'onde RADAR incidente, identifiés grâce aux plans des pentes et azimuth du terrain naturel sur un modèle numérique de terrain) (Hostache *et al.*, 2007).

Les « oublis » sont des zones inondées non détectées car elles ont des valeurs radiométriques trop fortes sur les images. Ceci provient d'effets de rugosités locales (présence de vent) ou d'éléments qui masquent l'eau (végétation ou bâtiments émergés). Les oublis dus aux arbres et bâtiments peuvent être identifiés à l'aide de photographies aériennes (Hostache *et al.*, 2007). D'autre part, le cas des eaux « permanentes » (gravières et lit mineur de la rivière) doit être considéré en particulier.

La considération des taches pixels pertinents repose sur les observations des différentes images, photographies aériennes et témoignages sur les crues.

La prise en compte des zones perturbées et des eaux permanentes permet alors de classer les pixels de la tache d'eau RADAR en deux catégories :

- les pixels peu ou pas pertinents situés en zone perturbée (urbaine ou arborée) ;
- les pixels pertinents.

Cette étape permet d'extraire les contours pertinents de la tache d'eau RADAR. Ne prenant en compte que les pixels classés pertinents, nous avons éliminé ceux non pertinents sous le logiciel ArcGIS 10.6.

## Matériel et méthodes

### 2.2.1.2. Cartographie de l'aléa inondation lié au relief

Le relief constitue un facteur incontournable conditionnant les processus de cheminement de l'eau à la surface du sol. Il nécessite donc un intérêt particulier dans l'analyse du risque d'inondation. La carte de l'aléa inondation liée au relief résulte du couplage de la carte de relief et de la carte d'inondation. Elle a été réalisée sous le logiciel ArcGIS 10.6.

### 2.2.1.3. Cartographie de la sensibilité à l'inondation

La pente du terrain et le réseau de drainage sont les différents facteurs pris en compte dans la cartographie de la sensibilité (aléa). Le traitement de l'image MNT nous a permis d'établir la carte des pentes et la carte de densité de drainage dont la combinaison a abouti à la carte de sensibilité aux inondations. Elles ont été réalisées grâce aux fonctions *Slope* pour la carte des pentes et *line density* pour la carte de densité de drainage sous ArcGIS 10.6.

### 2.2.2. Evaluation de la vulnérabilité à l'inondation

Dans cette étude, la vulnérabilité est caractérisée à partir de deux critères : l'occupation du sol (OCS) et les surfaces inondées (RSI). La scène de l'image Sentinel-2 couvre une vaste superficie. Il a été nécessaire d'en extraire la portion couvrant notre zone d'étude. Il s'agit de l'extraction d'une fenêtre d'image couvrant le périmètre à partir des limites définies précédemment pour les données Sentinel-1. L'extraction a été réalisée sous ArcGIS 10.6 grâce à sa fonction Extract by Rectangle où nous avons renseigné les coordonnées en UTM ( $X_{\min} = 402380$  ;  $X_{\max} = 439100$ ) et ( $Y_{\min} = 566860$  ;  $Y_{\max} = 595360$ ).

#### 2.2.2.1. Cartographie des classes d'occupation du sol

Pour caractériser l'occupation du sol, des indices spectraux ont été calculés. En plus des indices spectraux, nous avons procédé à des compositions colorées à partir des bandes de l'image optique sentinel-2.

Les trois canaux B12 (MIR), B11 (MIR) et 8A (Végétation Red Edge) ont donné la meilleure composition qui a été utilisée pour la classification en vue de l'extraction d'informations sur l'occupation du sol.

#### ❖ Indices spectraux

Les indices spectraux sont des opérations entre bandes spectrales qui sont utiles pour extraire de l'information. Nous avons choisi de n'utiliser que les indices de végétation (Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)) et d'humidité (Normalized Difference Water Index (NDWI)). Dérivés de l'image Sentinel-2, ils ont été réalisés dans le but d'aider à l'interprétation des résultats.

## Matériel et méthodes

### - Indice de végétation (NDVI)

Le NDVI est un indice de végétation qui se définit comme la différence normalisée des mesures de réflectance spectrale acquises dans les zones de longueurs d'onde « Proche Infrarouge » et « Rouge » (Nadjette, 2017). Il utilise les bandes Rouge et Proche infrarouge d'une image optique dans le but de faire ressortir l'intensité de la verdure d'une région. L'indice donne une valeur entre 1 et -1 où 1 est une végétation très intense et -1 aucune trace de végétation (DronesImaging, 2013). il a été calculé grâce à la boîte à outil Sentinel Index contenant la fonction de calcul du NDVI, sous ArcGIS 10.6.

Selon Nadjette (2017), sa formule est donnée par l'expression suivante :

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{Proche infrarouge} - \text{Rouge})}{(\text{Proche infrarouge} + \text{Rouge})} \quad (\text{éq. 1})$$

### - Indice d'humidité (NDWI)

L'indice d'humidité a pour but de mettre en évidence l'humidité du sol et de la végétation. La plage de valeurs du NDWI est de -1 à 1 (Trudel, 2018). Sa réalisation s'est faite par combinaison des canaux du proche infrarouge et du moyen infrarouge, sous ArcGIS 10.6, grâce à sa boîte à outils Sentinel Index. Sa formule de calcul est la suivante :

$$\text{NDWI} = \frac{(\text{Proche infrarouge} - \text{Moyen infrarouge})}{(\text{Proche infrarouge} + \text{Moyen infrarouge})} \quad (\text{éq. 2})$$

### ❖ Compositions colorées

La composition colorée a consisté à afficher simultanément à l'écran trois bandes d'images dans les canaux de base (Rouge, Vert et Bleu). Cette étape permet de faciliter l'interprétation des données. Elle nécessite une bonne connaissance du comportement spectral des objets au sol. Par exemple, la végétation se distingue facilement dans le proche infrarouge. Concernant l'image Sentinel-2, une composition en RVB a été retenue. Elle a été réalisée sous ArcGIS 10.6 grâce à sa boîte à outils *Sentinel Index*. Il s'agit de : R : B12, V : B11, B : B8A. Sur cette composition l'eau apparaît en noire, la végétation dans une teinte de bleu (forêt), à bleu légèrement plus foncé (mangrove), les sol nus en bleu ciel et les bâtis en jaune orangé. Cette combinaison permet une distinction nette entre l'eau et les autres types de surface, une bonne séparation de la végétation et des sols nus (cultures, bâtis). Toutefois, il ya confusion possible entre certains sols nus et bâtis.

Dans le cadre de cette étude, la composition colorée a servi à mettre en évidence les différentes zones d'intérêts socio-économiques.

## Matériel et méthodes

### ❖ Classification supervisée

La classification supervisée au niveau de la zone d'étude s'est faite par photographie aérienne via Google Earth, par bibliographie et par recueil d'informations dans la base de données d'OSM. Dans cette partie, l'information sur l'occupation du sol est obtenue à partir de classification supervisée par la méthode du maximum de vraisemblance. Cette méthode repose sur la méthode de probabilité (Kouassi, 2013). Elle calcule la probabilité d'appartenance d'un pixel à une classe donnée. Le pixel sera affecté à la classe pour laquelle la probabilité est la plus forte (Kouakou, 2015).

Pour une bonne appréciation des unités de paysage, une (1) classification a été réalisée à partir de la composition colorée fausse couleur (pénétration atmosphérique).

#### 2.2.2.2. Evaluation de la classification supervisée

La matrice de confusion de la classification a été calculée pour valider la classification réalisée. La précision globale (P) et le coefficient de Kappa (K) des zones d'entraînement permettent de vérifier la qualité de l'apprentissage et donnent une estimation de la validité de la classification.

Selon Kouakou (2015), le coefficient de Kappa (K) est excellent quand il est compris entre 0,81-1 ; bon lorsqu'il est compris entre 0,61-0,80 ; et modéré entre 0,21-0,60. Les résultats de la précision globale et du coefficient de kappa sont donnés par le logiciel ENVI 5.3.

#### 2.2.2.3. Correction et validation de la classification

Compte tenu des confusions pendant la classification supervisée, nous avons converti les classes d'occupation du sol Raster en Polygones, afin de faire correspondre les unités de paysages obtenues par classification, au paysage réel. Cette étape a été réalisée sous le logiciel ArcGIS 10.6 grâce à son outil Raster to Polygon.

#### 2.2.2.4. Cartographie de la vulnérabilité à l'inondation

L'étude du phénomène d'inondation est délicate. Il est donc utile de préciser les paramètres pris en compte dans la zone d'étude. Ces paramètres sont constitués de variables environnementales et naturelles dont la susceptibilité à produire une inondation est effective. Ainsi, pour l'élaboration de la carte de vulnérabilité à l'inondation, les différents thèmes d'occupation du sol ont été utilisés.

Les forêts, les cultures, l'eau et les sols nus représentent les variables naturelles. Les habitats définissent les variables environnementales (Kouakou, 2015). En plus de l'établissement de la carte de vulnérabilité, nous avons calculé les statistiques des intérêts socio-économiques sous

## Matériel et méthodes

les eaux dans la zone de Grand-Bassam. Cette étape consiste à superposer les surfaces inondées sur la carte d'occupation du sol vectorisée, et par suite calculer les aires inondées pour chaque unité de paysage inondé.

### 2.2.3. Répartition spatiale du risque d'inondation

Le risque d'inondation prend en compte l'aléa inondation et la vulnérabilité aux inondations. Son estimation s'est faite à partir du croisement entre les cartes de vulnérabilité et d'aléa. Cette carte donne des informations sur l'étendue du risque d'inondation à Grand-Bassam et ses environs.

La définition mathématique du risque est donnée par l'expression suivante (Kouakou, 2015) :

$$\text{Risque} = \text{Aléa (Sensibilité)} \times \text{Vulnérabilité} \quad (\text{éq. 3})$$

#### 2.2.3.1 Classification des critères

La classification des critères est une phase très importante et doit être judicieusement bien menée. L'analyse du risque d'inondation a été fonction des pentes, de l'occupation du sol et des surfaces inondées. L'élaboration de chaque classe doit tenir compte de la variance des données et s'appuyer sur la classification adoptée lors des travaux antérieurs (Kouakou, 2015). Pour concevoir la carte du risque, quatre (4) classes ont été retenues pour les critères « pentes » et « occupation du sol ». Ce sont : faible, moyenne, forte et très forte. Les critères choisis sont les aspects représentatifs pour expliquer au mieux la recrudescence des inondations dans la zone d'étude (Tableau III). Pour des questions de sécurité civile, l'aléa obtenu par télédétection est affecté à la classe « très forte ».

**Tableau III** : Classification des critères relatifs à la carte du risque d'inondation

Classes	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
<b>Facteurs</b>				
<b>Densité de drainage (km/km<sup>2</sup>)</b>	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4
<b>Pente (%)</b>	0 - 5	5 - 10	10 - 15	> 15
<b>Occupation du sol</b>	Forêts dense, secondaire, marécageuse	Cultures industrielles, Cultures vivrières	Lagunes, fleuve	Habitats, sols nus

## Matériel et méthodes

### 2.2.3.2 Évaluation et pondération des critères

Pour déterminer les poids des critères et par suite élaborer des formules pour les cartes de sensibilité, de vulnérabilité et des zones à risque d'inondation, nous avons utilisé la méthode multicritère (Analytic Hierarchy Process (AHP)) de Saaty développée par Kouakou (2015).

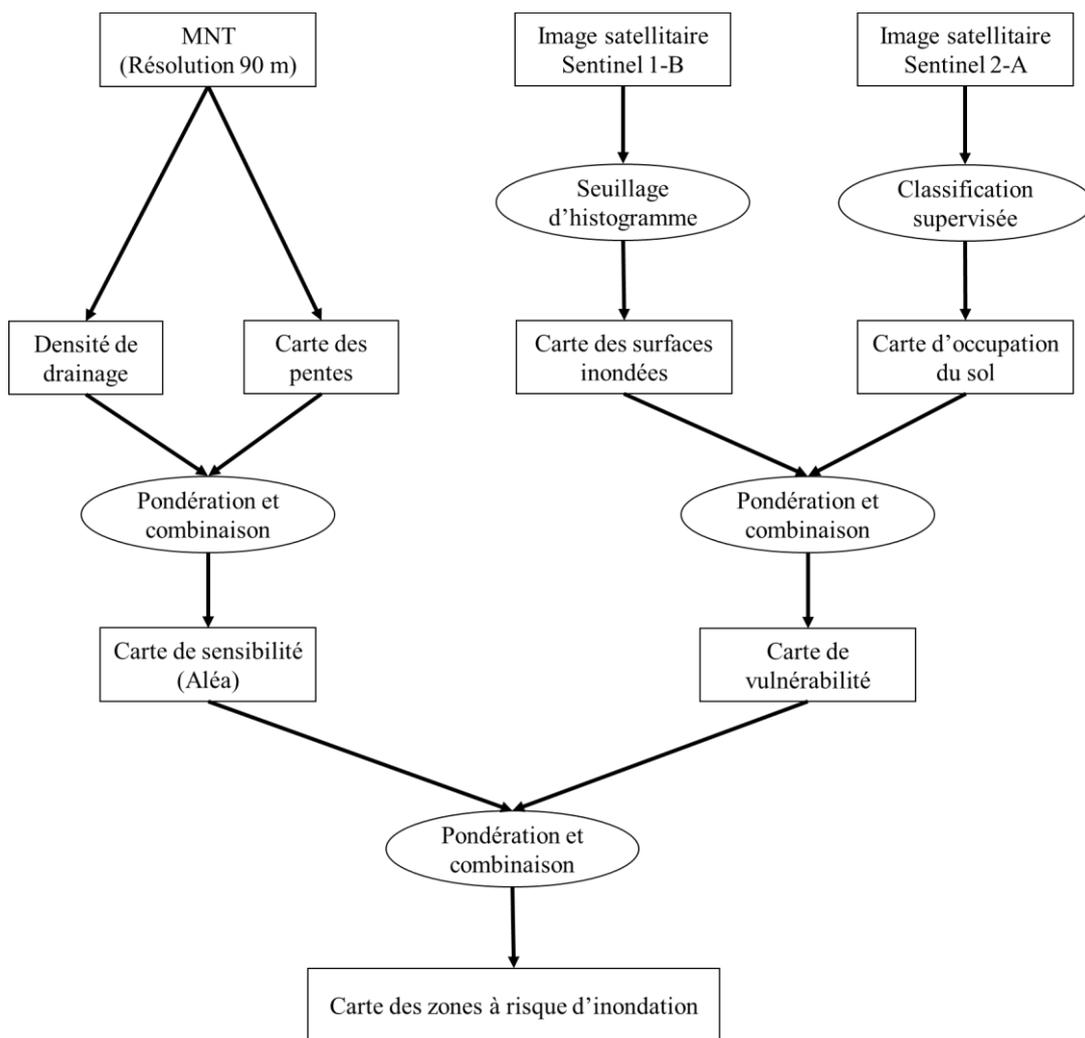
Ainsi, Les cartes de sensibilité, de vulnérabilité et du risque d'inondation sont obtenues à partir des formules suivantes (adaptée de Kouakou (2015)) :

$$\text{Carte de sensibilité} = (0,33 \times \text{carte « drainage »}) + (0,67 \times \text{carte « pente »}) \quad (\text{éq.4})$$

$$\text{Carte de vulnérabilité} = 0,84 \times \text{OCS} + 0,16 \times \text{RSI} \quad (\text{éq.5})$$

$$\text{Zone à risque} = 0,75 \times \text{Carte de vulnérabilité} + 0,25 \times \text{Carte de sensibilité} \quad (\text{éq.6})$$

Le schéma global de la mise en place de la carte du risque d'inondation dans la zone de Grand-Bassam est présenté à la figure 16 ci-après.



**Figure 16** : Organigramme des étapes de cartographie des zones à risque d'inondation

# **PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION**

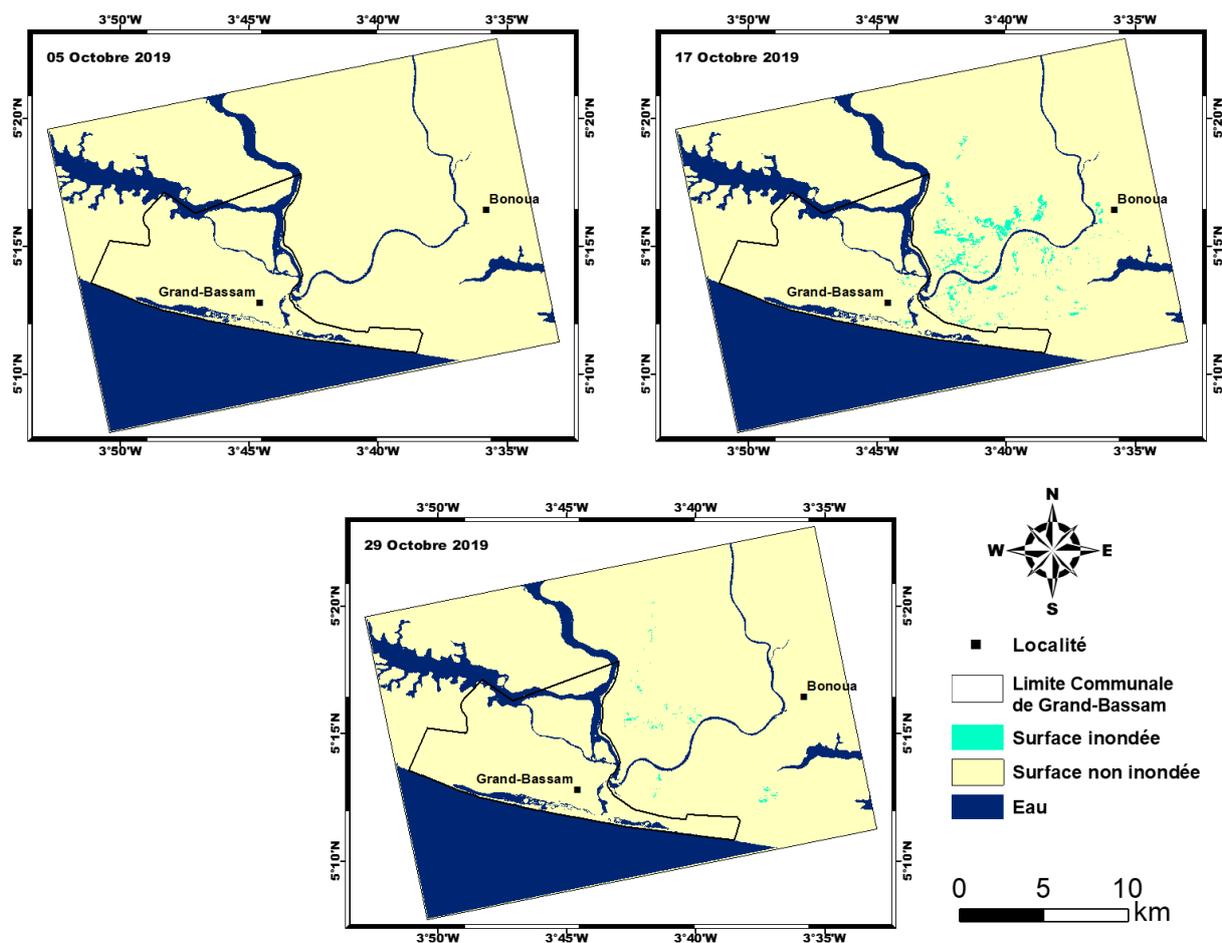
## Résultats et discussion

### 3.1. RESULTATS

#### 3.1.1. Sensibilité à l'inondation

##### 3.1.1.1. Cartographie des zones inondées

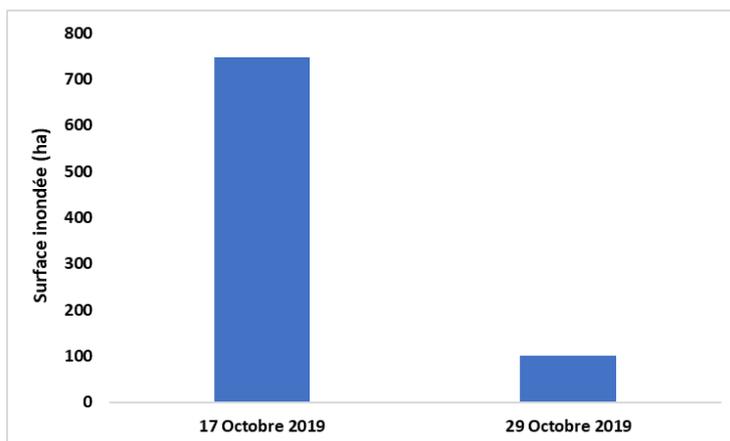
Les cartes des zones inondées sont obtenues à partir de la méthode de seuillage d'histogramme. Ces cartes (figure 17) indiquent les zones touchées par les inondations lors des différents passages du satellite. On constate que les inondations se sont produites dans la partie Est de Grand-Bassam où confluent les cours d'eau et dans son environnement Est.



**Figure 17** : Cartes des zones inondées à Grand-Bassam et ses environs

La figure 18 montre la dynamique des surfaces inondées dans la zone de Grand-Bassam. Les surfaces inondées représentent 747,7 ha au 17 Octobre 2020 et 101,8 ha au 29 Octobre 2020. La figure présente un gradient décroissant des zones inondées avec un réduction de 645,9 ha sur une période de 12 jours.

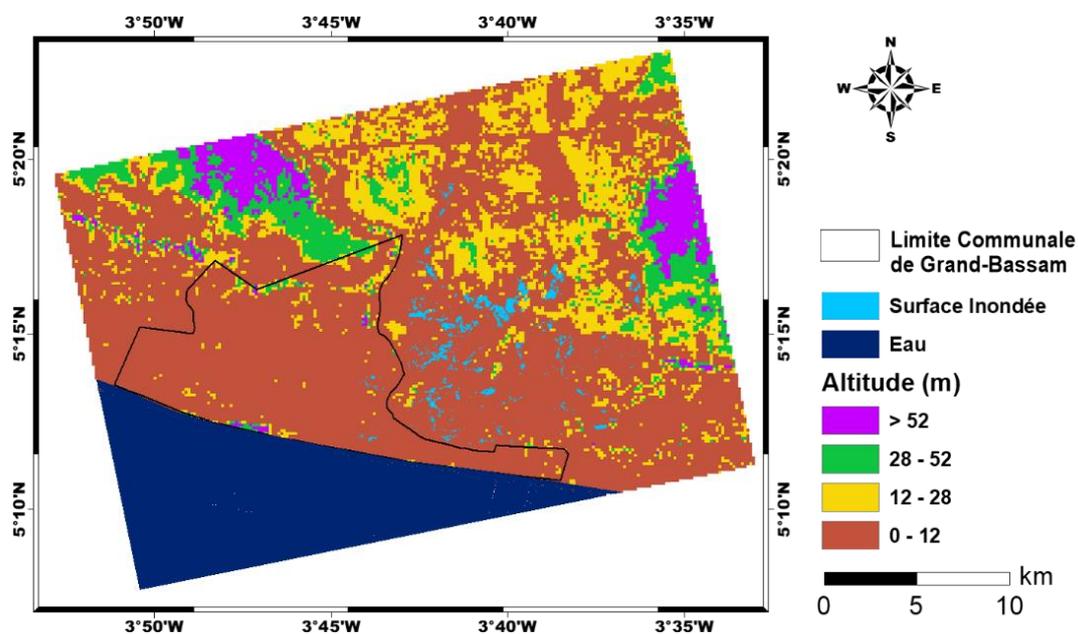
## Résultats et discussion



**Figure 18** : Estimation de la surface inondée lors des différents passages du satellite

### 3.1.1.2. Cartographie de l'aléa lié au relief

La carte de l'aléa lié au relief de la zone d'étude montre que les inondations se sont produites dans les zones de plus basses altitudes. Ces zones sont caractérisées par des altitudes qui oscillent entre 0 et 12 m (Figure 19). Les surfaces non inondées présentent des variations d'altitudes supérieures à celles des surfacents inondées avec un maximum de 131 m. En effet, selon la théorie de Newton, l'eau coule toujours vers le bas. Et, dans les plaines, du fait de la presque absence de relief accidenté, l'eau qui ruisselle s'évacue moins naturellement. En conséquence, les sols sont plus vite saturés d'eau et favorisent des inondations par accumulation d'eau ruisselée.



**Figure 19** : Carte de l'aléa lié au relief

## Résultats et discussion

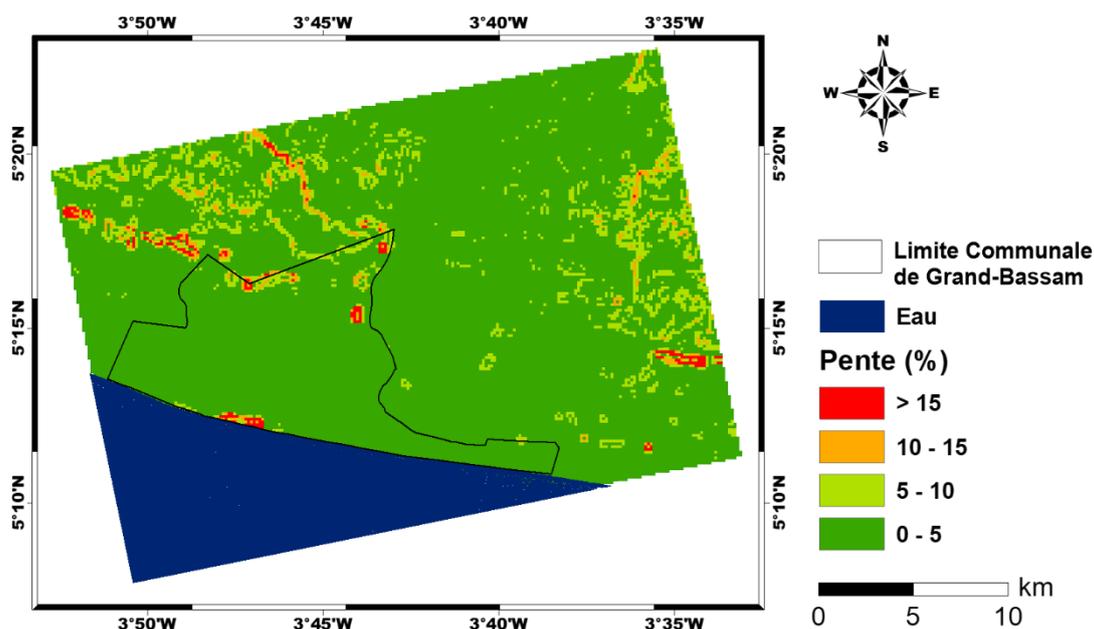
### 3.1.1.3. Cartographie de la sensibilité

Dans cette étude, plusieurs cartes thématiques (carte des pentes, carte de densité de drainage) ont été obtenues après divers traitements.

- **Cartographie des pentes**

La carte des pentes (Figure 20) a permis d'identifier 4 classes réparties comme suit :

- zone à pente faible : elle couvre la quasi-totalité de la zone d'étude avec un pourcentage de 73 %. Les pentes oscillent entre 0 % et 5 %, sur une superficie de 53 621 ha ;
- zone à pente moyenne : elle est dispersée sur les parties Nord-Ouest et Nord-Est de la zone d'étude et représente 5 046 ha, ce qui équivaut à 7 % de la superficie totale. Les pentes sont comprises entre 5 % et 10 % ;
- zone à pente forte : elle correspond à 1,3 %, soit 923 ha de la zone d'étude. Dans cette zone les pentes varient de 10 % à 15 % ;
- zone à pente très forte : ces pentes sont comprises entre 15 % et 38 %. Elle est rencontrée par endroit, généralement au niveau des traversées des cours d'eau. Elle occupe 514 ha de la zone d'étude, soit 0,7 %.



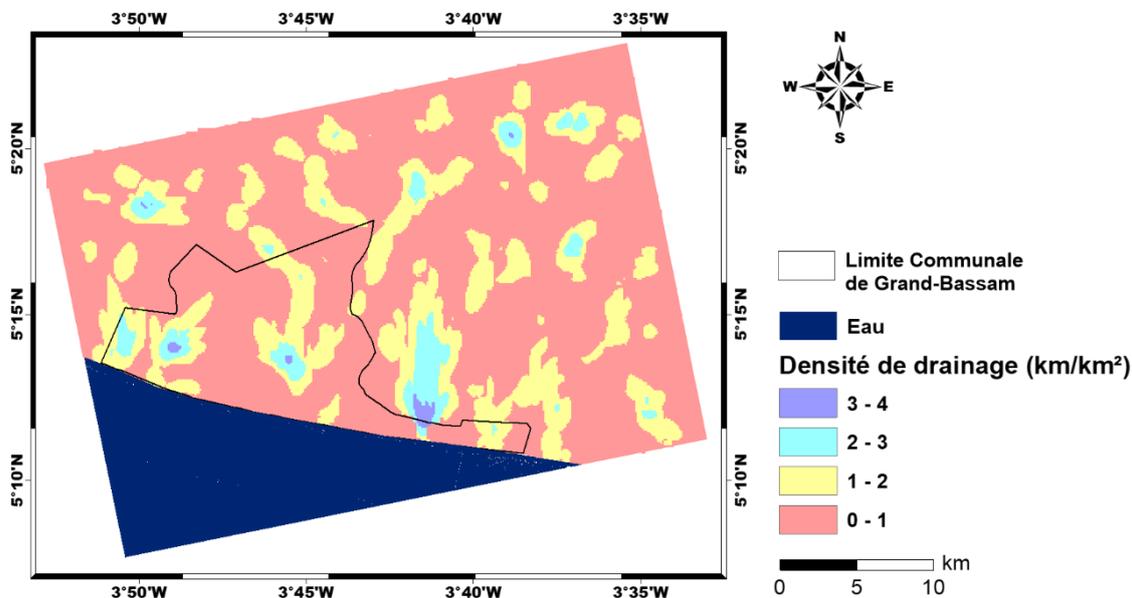
- **Cartographie de la densité de drainage**

La carte de densité de drainage (Figure 21) renseigne sur la densité du réseau hydrographique dans la zone d'étude. Les différentes classes identifiées sont :

- faible densité : cette plage couvre 60% de la zone d'étude. Elle s'étend sur la quasi-totalité de la zone d'étude. Ce sont des zones où le drainage est relativement faible ;

## Résultats et discussion

- densité moyenne : cette classe couvre 19 % de la superficie totale ;
- forte densité : cette plage représente 3 % du secteur d'étude. Elle couvre certaines parties de la zone d'étude ;
- très forte densité : elle représente une infime partie de la zone d'étude avec un pourcentage de 0,3 %.



### • Cartographie de la sensibilité (aléa) à l'inondation

La carte de sensibilité à l'inondation est élaborée à partir de la matrice de sensibilité obtenue avec les pentes et la densité de drainage. Elle met en évidence quatre (4) zones comme l'indique la figure 22 :

- la zone de faible sensibilité (1 %) : elle se trouve en grande partie au Centre et au Sud de la zone d'étude. elle est caractérisée par une pente très forte ;
- la zone de sensibilité moyenne (7 %) : elle est éparpillée sur les parties Nord-Ouest et Nord-Est de la zone d'étude. Cette zone est caractérisée par une forte pente et un drainage moyen ;
- la zone de forte sensibilité (24 %) : elle est marquée par une pente moyenne et un moyen drainage des eaux ;
- la zone de très forte sensibilité (51 %) : elle se trouve en grande partie au Centre et au Sud de la zone d'étude. Elle est caractérisée par une faible pente et un faible drainage des eaux.

## Résultats et discussion

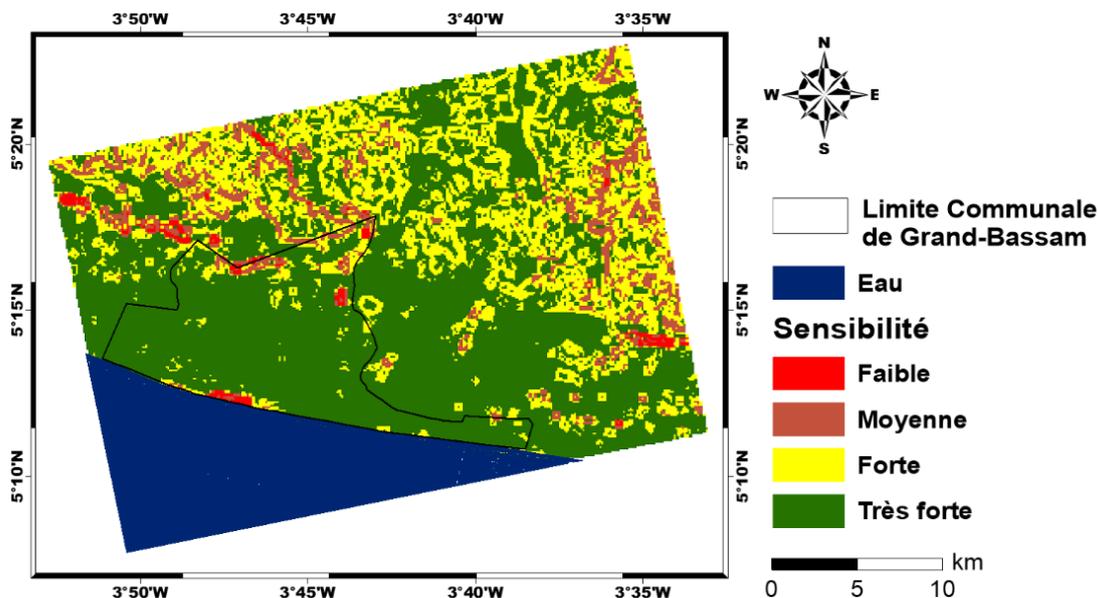


Figure 22 : Carte de sensibilité à l'inondation

### 3.1.2. Vulnérabilité à l'inondation

Les indices spectraux et les compositions colorées ont aidé à identifier les enjeux au sol de la zone d'étude.

#### 3.1.2.1. Indices spectraux

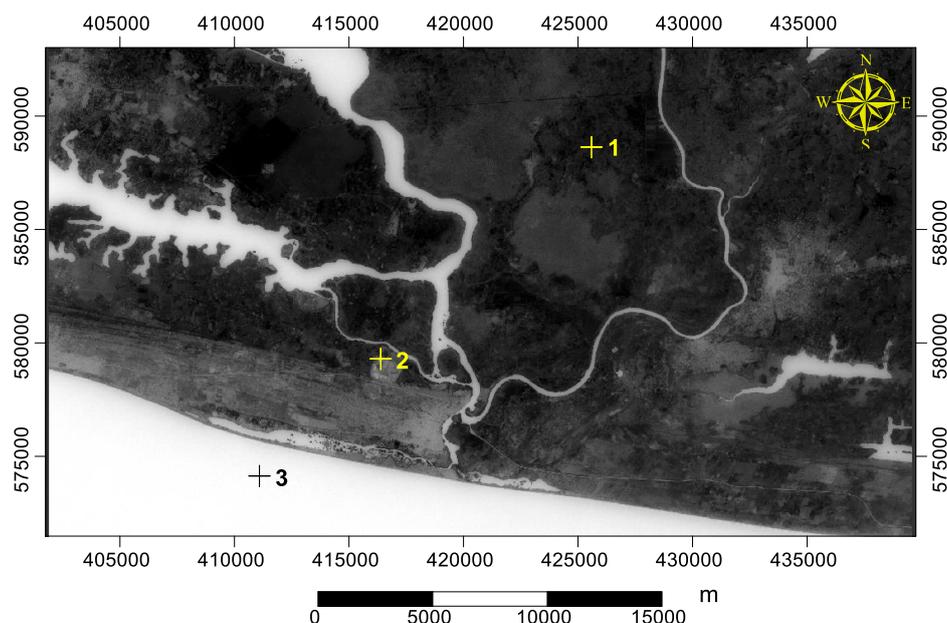
Les résultats obtenus pour l'indice de végétation NDVI et l'indice d'humidité NDWI sont comme suit :

##### - Indice d'humidité (NDWI)

Le calcul d'indice d'humidité sous SNAP nous a donné des informations sur l'état d'humidité du sol. Il a permis d'identifier 3 types d'occupation du sol selon les valeurs de NDWI (Figure 23). Les fortes valeurs de NDWI correspondent aux plans d'eau et aux zones humides comme c'est le cas de l'Océan Atlantique qui présente une valeur de NDWI égale à 0,17.

Cependant, les faibles valeurs de NDWI correspondent aux surfaces ne présentant aucun ou presque pas d'état d'humidité. Ces surfaces répondent aux sols nus et à la végétation qui présentent dans l'ordre des valeurs de NDWI égales à -0,07 et -0,32.

## Résultats et discussion



ID : Identifiant	Surface	Valeur (NDWI)
1	Eau	0,17
2	Sols nus	- 0,07
3	Végétation	- 0,32

Figure 23 : Produit NDWI dérivé d'image Sentinel-2

### - Indice de végétation (NDVI)

D'après la figure 24, l'indice de végétation varie entre -0,14 et 0,54. La végétation dense et active présente de fortes valeurs de NDVI (0,29- 0,54), alors que les zones non végétalisées présentent des valeurs basses (-0,14 – 0,29). Les valeurs basses de NDVI correspondent aux sols nus et aux plans d'eau.

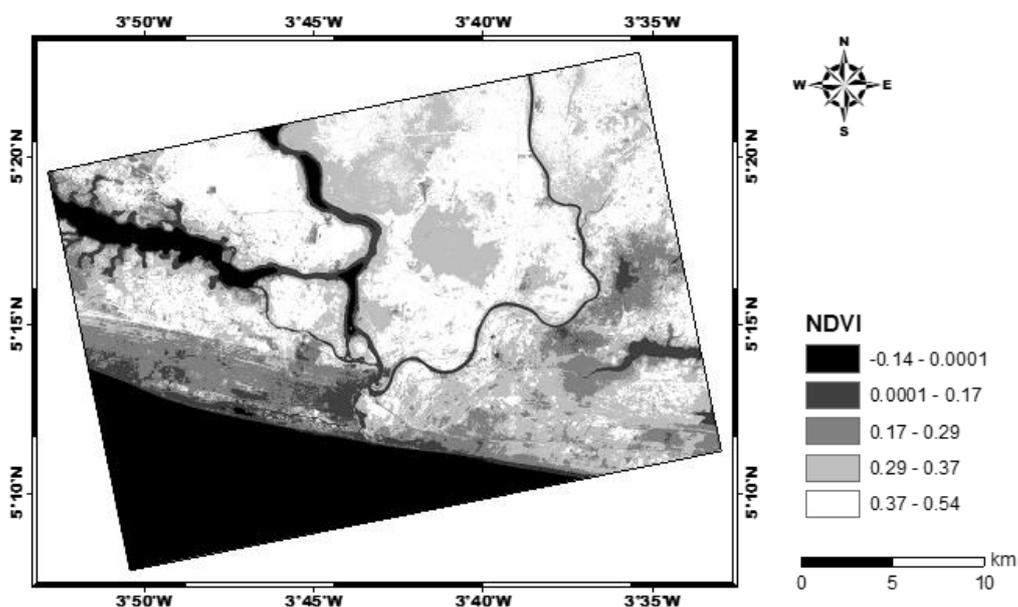
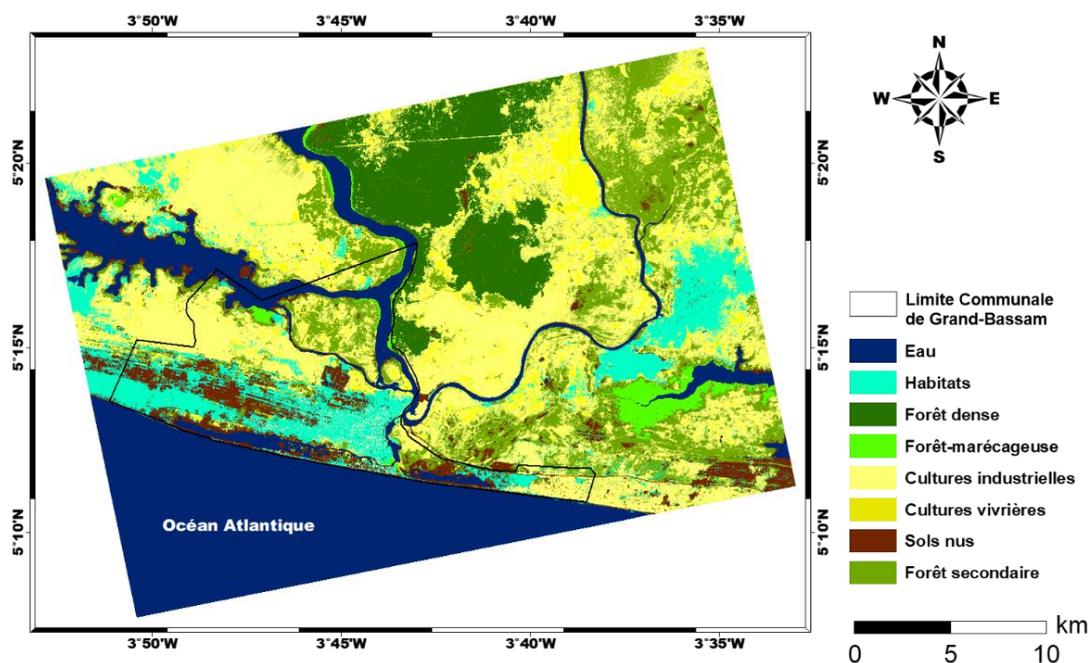


Figure 24 : Produit NDVI dérivé d'image Sentinel-2

## Résultats et discussion

### 3.1.2.2. Cartographie de l'occupation du sol

Nous avons au moyen de la classification supervisée identifié huit (8) classes. La carte d'occupation du sol en 2020 montre que la majeure partie de la zone d'étude est constituée de Cultures industrielles (Figure 25). Elles sont disséminées sur toute la zone d'étude, principalement à l'Ouest, au Centre et à l'Est. La classe Cultures vivrières occupe une infime partie de la zone d'étude avec une superficie de 871 ha, soit 1 %. La classe Eau concerne 17 305 ha de superficie, ce qui fait 24 % de la superficie totale. Ce thème, qui marque la zone d'étude prend en compte l'étendue du réseau hydrographique constitué de lagunes, de fleuve et d'océan atlantique. La classe Forêt dense, rencontrée plus au Nord, représente 8 % de la zone d'étude, soit 6 211 ha. La classe Forêt secondaire caractérisée par une végétation de savane arborée est dispersée dans la partie Est de la zone d'étude. On rencontre aussi une infime partie dans le Nord de la commune de Grand-Bassam. Cette classe compte 11 678 ha, soit 16 % de la surface totale. La classe Forêt marécageuse est rencontrée par endroit au contact des eaux. Elle représente 1 157 ha, ce qui équivaut à 2 % de l'aire totale. La classe Habitats regroupant les habitats urbanisés, les habitats précaires et les habitats ruraux, constitue 7 486 ha, soit 10 % de la superficie totale. En ce qui concerne les sols nus, ils sont tous les espaces dénudés qui n'ont aucun bâti. Ils peuvent également comprendre les terrains en cours de lotissement ou en construction. Cette classe représente 3 510 ha soit 5 % de la zone d'étude.



## Résultats et discussion

Les résultats de l'évaluation de la classification (Tableau IV) montrent une bonne précision avec un Kappa égale à 0,73. Toutefois, quelques confusions se sont produites entre les unités de paysage. Les plus importantes de ces confusions sont :

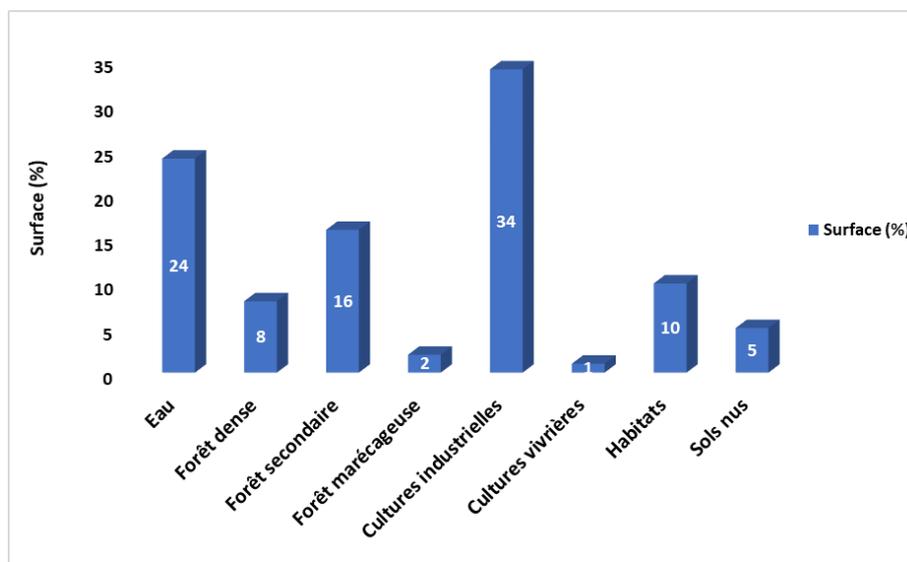
- 8,7 % des habitats confondus aux sols nus ;
- 7,32 % de forêt secondaire confondus aux cultures vivrières.

**Tableau IV** : Matrice de confusion de la classification

Classes	Eau	Habitats	Forêt dense	Forêt marécageuse	Forêt secondaire	Cultures vivrières	Cultures industrielles	Sols nus
<b>Eau</b>	<b>94,76</b>	1,28	1,08	0,8	2,01	0	0	0
<b>Habitats</b>	0	<b>83,34</b>	1,21	0	0,96	0,2	1,12	0,8
<b>Forêt dense</b>	0,08	0	<b>95,61</b>	0	3,03	0	0,98	0
<b>Forêt marécageuse</b>	3,1	1,4	0	<b>97,31</b>	2,1	0	1,01	0
<b>Forêt secondaire</b>	0	1,9	2,01	1,8	<b>81,72</b>	0	1,06	1,03
<b>Cultures vivrières</b>	1,05	2,6	0,09	0	7,32	<b>97,76</b>	3,7	0
<b>Cultures industrielles</b>	0,81	0,78	0	0,09	1,02	2,04	<b>90,68</b>	0
<b>Sols nus</b>	0,2	8,7	0	0	1,84	0	1,45	<b>98,17</b>
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Précision globale : 92,41 % ; Coefficient Kappa : 0,73

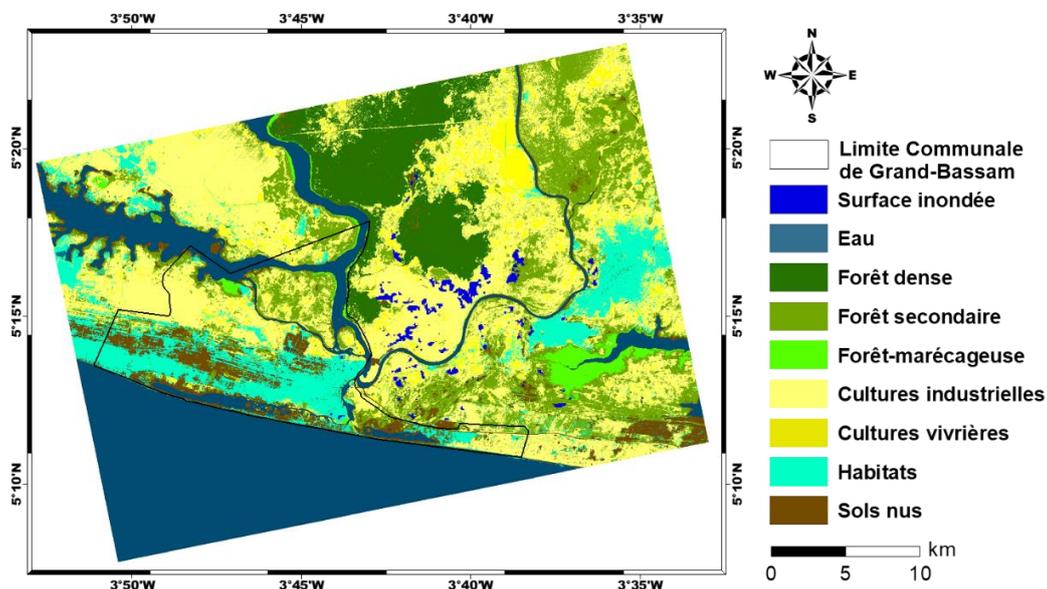
La figure 26 ci-après présente les proportions des unités de paysage de l'espace d'étude. L'unité la plus représentée est « cultures industrielles » avec un pourcentage de 34 %.



**Figure 26** : Répartition de l'occupation du sol dans la zone d'étude

## Résultats et discussion

La superposition des surfaces inondées sur la carte d'occupation du sol (Figure 27) a permis d'identifier les zones à intérêts socio-économiques affectées par les inondations. Il s'agit des zones habitées et des zones de cultures industrielles et vivrières.



**Figure 27** : Carte des intérêts socio-économiques inondés

L'analyse de la carte montre que 560 ha de cultures industrielles et 80 ha de cultures vivrières sont inondées au 17 Octobre 2019. Concernant les habitats, 19 ha ont été inondés. Les autres types d'occupation du sol tels que les sols nus, les forêts dense et secondaire ont été aussi inondés mais ne présentent pas de risque. Ces données constituent un bon indicateur pour apprécier les niveaux d'enjeux. Le tableau IV ci-dessous résume les types d'occupation du sol inondés.

**Tableau V** : Quantification des surfaces inondées selon l'occupation du sol

Classe	Surface (ha)	Surface inondée/classe (ha)	Surface inondée/classe (%)
<b>Forêt dense</b>	6 211	5,67	0,09%
<b>Forêt secondaire</b>	11 678	75,19	0,64%
<b>Cultures industrielles</b>	25 177	560,21	2,23%
<b>Cultures vivrières</b>	871	80,07	9,19%
<b>Habitats</b>	7 486	19,35	0,26%
<b>Sols nus</b>	3 510	7,21	0,21%
<b>TOTAL</b>	54 933	747,7	

## Résultats et discussion

### 3.1.2.3. Cartographie de la vulnérabilité

La carte de vulnérabilité à l'inondation (Figure 28) est obtenue à partir de la carte d'occupation du sol et de la carte des zones inondées (RSI) au 17 Octobre 2019. Cette carte comporte quatre classes réparties en deux (2) types de zones vulnérables aux inondations : les zones les plus exposées et les zones les moins exposées. Les zones les plus exposées correspondent aux enjeux au sol à forte et très forte vulnérabilité avec un pourcentage de 22 %. Elles sont marquées par une présence d'eau (fleuve et lagunes), d'habitats et une activité anthropique importante. Les zones les moins exposées sont les enjeux au sol à moyenne et faible vulnérabilité. Elles concernent les forêts et les cultures avec un pourcentage de 60 %. Dans ces zones, le ruissellement pluvial est moins important, ce qui réduit la vulnérabilité aux inondations.

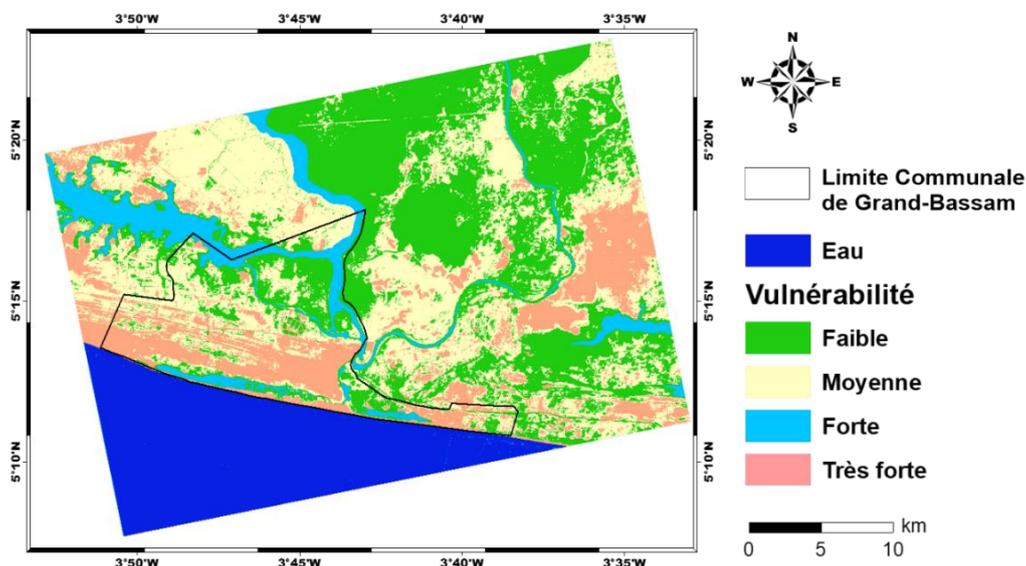


Figure 28 : Carte de vulnérabilité à l'inondation

### 3.1.3. Répartition spatiale du risque d'inondation

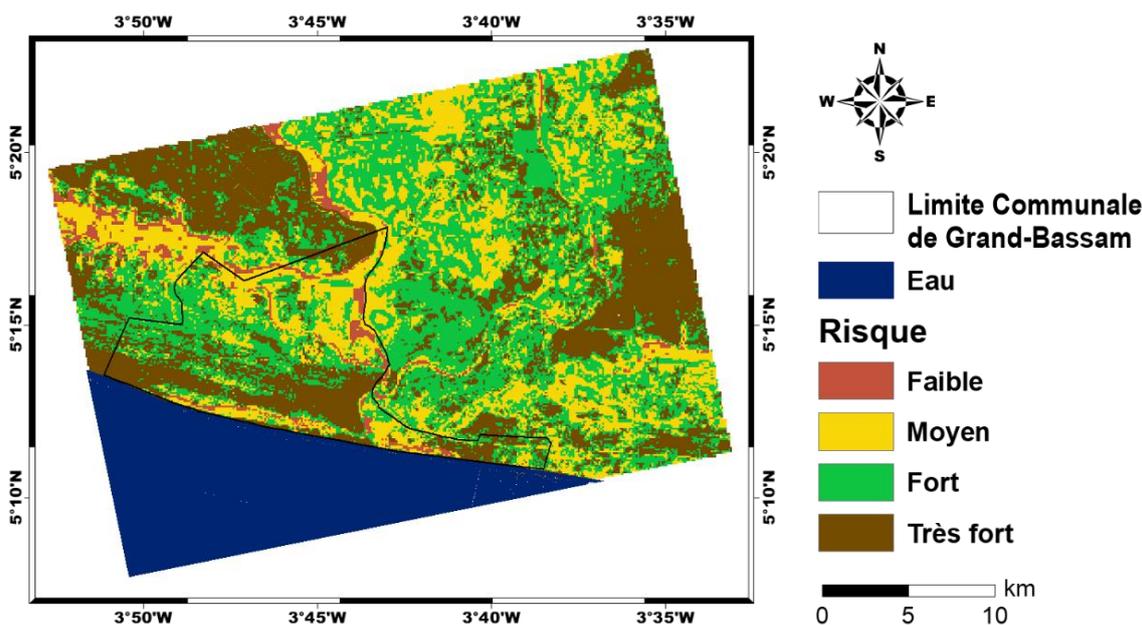
La carte du risque d'inondation a été déterminée à partir du croisement entre les cartes d'aléa et de vulnérabilité. Elle permet d'apprécier quatre niveaux de risque repartit dans l'ordre suivant (Figure 29) :

- Risque faible : il occupe une superficie de 2 490 ha, soit un pourcentage de 3 % et se trouve en grande partie au Nord-Ouest de la zone d'étude ;
- Risque moyen : il couvre une superficie de 16 560 ha, ce qui représente 23 % de la superficie totale ;
- Risque fort : il représente 24 568 ha de la superficie avec un pourcentage de 33 %. les zones à fort risque d'inondation se situent sur la quasi-totalité de la zone. Ces zones sont caractérisées par des valeurs de pente et de densité de drainage sensiblement faibles ;

## Résultats et discussion

- Risque très fort : cette plage occupe 16 886 ha, ce qui fait 23 % du secteur d'étude. Ces zones se situent dans le Nord-Ouest, Sud et Est. Elles sont marquées par de faibles valeurs de pente et de densité de drainage.

La carte du risque d'inondation a permis de reconnaître les zones à potentielle risque d'inondation. Les zones de fort et de très fort risque d'inondation couvrent une superficie de 56%. L'analyse de cette carte montre que la zone de Grand-Bassam est exposé aux phénomènes d'inondation.



### 3.2. DISCUSSION

L'étude de l'aléa inondation a permis de discriminer les surfaces inondées à Grand-Bassam et ses environs. Les résultats montrent que 747,7 ha de terre, ont été inondées au 17 Octobre 2019 et 101,8 ha au 29 Octobre 2019. Ce qui correspond respectivement à 1,02 % et 0,14 % de la surface étudiée. Ces valeurs observées sont le produit des pluies abondantes (311,1 mm) tombées durant le mois d'Octobre 2019 dans la zone d'étude. Des études similaires réalisées par Kouassi *et al.* (2020) à San-Pédro ont également montré que 6 007 ha de terre ont été inondées au 16 Juin 2017. Ces auteurs soulignent que cette région est caractérisée par des pluies abondantes qui atteignent 2000 mm par an. D'ailleurs, Kouakou (2015), à travers son analyse de l'aléa pluviométrique sur le bassin versant du Gourou (District d'Abidjan) fait remarquer que les fortes pluies sont souvent à l'origine des catastrophes, notamment les inondations. Cependant, les fortes pluies ne sont pas les seuls facteurs responsables des inondations. Il faut compter avec celles-ci le relief qui constitue un facteur incontournable

## Résultats et discussion

dans les processus de ruissellement de l'eau. Ainsi, dans la présente étude, la superposition des surfaces inondées sur la carte du relief a révélé que les inondations se produisent dans les zones de basses altitudes (0 - 12) m. En effet, le relief plat ou faiblement ondulé de la zone de Grand-Bassam est peu propice à une bonne évacuation des eaux pluviales. Il favorise le ruissellement diffus dans cette zone, ce qui conduit à une saturation rapide des sols. On assiste donc à des inondations par ruissellement des eaux de pluies accumulées. Cela est en accord avec l'étude réalisée par Saley *et al.* (2005) qui stipule que les zones à pente faible sont par endroits submersibles pendant les mois les plus arrosés (juin à septembre) de la saison des pluies dans la région de Man. De plus, Savané *et al.* (2003) soulignent que les zones de faibles pentes augmentent le risque d'inondation. Dans la ville de Ouagadougou, Samari (2011) a montré que la bassesse du relief favorise la survenue des inondations.

Par ailleurs, la carte de sensibilité à l'inondation montre que la zone d'étude est très sensible aux inondations. Cette situation est liée à la faible pente et au faible drainage des eaux du site d'étude. Selon Kouamé (2003), les zones très sensibles aux inondations sont caractérisées par une faible pente, un drainage moyen et une faible évacuation des eaux usées et de pluie.

Pour ce qui est de la vulnérabilité à l'inondation, la carte des intérêts socio-économiques inondés a permis de reconnaître les enjeux au sol affectés par les inondations. Il s'agit des zones marquées par la présence d'habitats et de cultures industrielles et vivrières. Ainsi, 560 ha de cultures industrielles et 80 ha de cultures vivrières ont été inondées au 17 Octobre 2019 ; et, concernant les habitats, 19 ha ont été inondés. Les enjeux ayant subi des impacts considérables sont les cultures industrielles représentant 2,23% de surface inondée. Quant aux habitats, les résultats obtenus sont d'ordre significatifs (0,26% de surface inondée) dans la mesure où ces inondations occasionnent une dégradation de l'environnement, des dégâts matériels et des perturbations sociales. Cela est corroboré par les travaux de Kouassi *et al.* (2020) dans la ville de San-Pédro ; ceux-ci indiquent que de nombreux intérêts socio-économiques à savoir : les zones portuaires, industrielles, résidentielles et agricoles sont mis à mal par les inondations dans cette ville.

D'ailleurs, l'analyse de la carte de vulnérabilité montre que les zones les plus exposées aux inondations correspondent aux zones marquées par la présence d'habitats où l'activité anthropique est importante. En effet, les innombrables opérations immobilières plus ou moins régulières créent des conditions écologiques où les eaux de pluie ne peuvent plus pénétrer dans le sol. Elles ruissellent donc vers le point le plus bas, l'embouchure du fleuve Comoé. Et, l'embouchure étant fermée, l'eau trouve sa place où elle peut, fait son lit comme elle veut.

## Résultats et discussion

Cela est en accord avec l'étude réalisée par Kouadio *et al.* (2018) à Agboville qui indique que la façon d'occuper le sol constitue un facteur incontournable conditionnant le processus de submersion. Les populations d'Agboville préfèrent occuper les bas-fonds qu'elles jugent favorables pour le petit commerce et la riziculture. Cependant, en s'installant sur ces sites, elles obstruent régulièrement les voies de drainage des eaux de ruissellement et s'exposent donc aux inondations. En outre, Hauhouot (2008) a montré que l'urbanisation rapide, incontrôlée et anarchique à Attécoubé, qui fragilise le milieu aggrave les risques d'érosion et d'inondation.

A l'analyse du risque d'inondation, la zone de Grand-Bassam se révèle comme une zone à risque d'inondation élevée. Ce risque élevé est caractérisé par des pentes faibles, un drainage faible et une activité anthropique considérable. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Kouamé (2003), Boubchir (2007), Hauhouot (2008) et Kouakou (2015). En effet, ces auteurs, effectuant des études relatives aux inondations sur des sites différents, ont montré qu'une zone à risque d'inondation se traduit par une forte croissance et non contrôlée de l'occupation du sol, une pente faible et une faible évacuation des eaux.

**CONCLUSION, RECOMMANDATIONS  
ET PERSPECTIVES**

En conclusion, cette étude, basée sur la phase de traitement d'images satellitaires RADAR et optique a permis de cartographier les zones à risque d'inondation dans la zone de Grand-Bassam. Dans le cadre de la caractérisation de l'aléa inondation, la spatialisation des eaux réalisée par seuillage d'histogramme appliqué aux images RADAR Sentinel-1 a permis de discriminer les zones inondées. Elles sont estimées à 747,7 ha, soit 1,02 % par rapport à la surface totale. Encore, la carte de l'aléa liée au relief a montré que les zones propices à la manifestation de l'aléa inondation sont les zones basses (0 – 12) m d'altitude. A l'issue de l'analyse des implications des facteurs physiques dans le risque d'inondation, il a été démontré que la zone de Grand-Bassam est très sensible à la manifestation d'un aléa avec un pourcentage de 75 %. En effet les faibles pente et drainage de l'espace d'étude sont favorables à la manifestation de l'aléa inondation.

L'étude de la vulnérabilité a permis d'évaluer le niveau de vulnérabilité des différents enjeux au sol. Ainsi les zones les plus exposées, caractérisées par un ruissellement important, répondent à un 22 % de la zone d'étude. Quant aux zones les moins exposées, elles correspondent à 60 %. Elle a aussi permis de mettre en évidence les enjeux au sol affectés par les inondations. Il s'agit des habitats, des cultures industrielles et des cultures vivrières. Effectivement, 560 ha de cultures industrielles, 80 ha de cultures vivrières et 19 ha d'habitats ont été inondés au 17 Octobre 2019.

La carte du risque d'inondation obtenue indique les niveaux du risque d'inondation dans l'espace d'étude. Il varie de faible à très fort selon la pertinence des facteurs étudiés. Ainsi, les zones à faible risque sont caractérisées par de fortes pentes qui favorisent un important ruissellement de l'eau. Elles constituent 3 % de la zone d'étude. Les zones à risque moyen représentent 23 % de l'espace d'étude. Elles se distinguent des autres par un ruissellement d'eau relativement important. Les zones à fort risque composent avec les zones à très fort risque la plus grande partie de la zone cartographiée avec un pourcentage de 56 %. Elles couvrent presque toute la zone d'étude. Dans ces endroits la pente et la densité de drainage sont assez faibles, ce qui favorise les inondations.

Les résultats obtenus montrent que la contribution des données RADAR Sentinel-1 et optique Sentinel-2 pour la cartographie des inondations est significative.

A l'issue de cette étude, plusieurs recommandations peuvent s'adresser aux structures et aux populations.

### **Recommandations aux structures**

1. Redimensionner les ouvrages d'assainissement des eaux pluviales existants et en créer de nouveaux, dans la perspective d'une gestion préventive des inondations ;
2. procéder à la réouverture de l'embouchure du fleuve Comoé et construire un canal de drainage artificiel de Moossou à l'embouchure, capable de drainer les eaux pluviales ;
3. Insérer le risque d'inondation dans la planification urbaine.

### **Recommandations aux populations**

1. Assurer un curage manuel régulier de tous les collecteurs pour faciliter la circulation des eaux de ruissellement ;
2. déverser les ordures dans les bacs à ordures et non dans les caniveaux ;
3. respecter les dispositions du Code de la construction et de l'habitation, ainsi que les prescriptions d'urbanisme imposées et en application du document local d'urbanisme, du règlement national d'urbanisme ou du plan de prévention des risques naturels ;

Ce travail dans l'objet d'améliorer la lutte contre les inondations à Grand-Bassam, propose des perspectives de recherche :

1. estimer les niveaux d'eau de submersion pour le calage hydraulique afin d'améliorer le système de drainage des eaux pluviales dans la zone de Grand-Bassam ;
2. étudier le risque d'érosion hydrique des sols à Grand-Bassam et environs pour protéger l'embouchure contre d'éventuelles fermetures.

# **REFERENCES**

---

## Références

- Boko C. (2019). Grand-Bassam/Inondations : Le patrimoine mondial en danger.
- Boubchir M.A. (2007). Risques d'inondation et occupation des sols dans le Thore (région de Labruguiere et de Mazamet). Toulouse, France, 75 p.
- Cutter S.L., Boruff B.J. & Shirley W.L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, 84(2) : 242–261.
- Denize J. (2015). Développement d'un modèle de classification d'images SAR pour la cartographie des cultures tropicales : Exemple de l'île de la Réunion. Mémoire de fin d'étude Master 2 IMAGE, Département de Géographie, Mention : Géographie, Spécialité : Géomatique, Université Rennes 2 (Rennes, France), 49 p.
- DronesImaging (2013). Indice de végétation NDVI, 1 p.
- Faivre R. (2018). Introduction à la réalisation de spatio-cartes. Strasbourg (France), 126 p.
- Gautier K.O.J., Marie-Solange O.Y., Theodore Y.K., Fabrice Y.A., Derving B., Theophile L. & Jean B. (2016). Impact of climate variability on water resources and population health in the South Eastern coastal area of Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal, ESJ*, 12(35) : 319–341.
- Gbaguidi T.B. (2010). Système d'informations et représentations cartographiques pour la gestion des inondations à Cotonou. Mémoire de Master en Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Institut International d'Ingénierie (2iE) (Ouagadougou, Burkina Faso), 108 p.
- Hauhouot C. (2008). Analyse du risque pluvial dans les quartiers précaires d'Abidjan. Etude de cas à Attécoubé. *Geo-Ecoè-Trop*, 32 : 75–82.
- Henry J.B. (2004). Systèmes d'information spatiaux pour la gestion du risque d'inondation de plaine. Thèse de Doctorat, Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université Louis Pasteur-Strasbourg I (Strasbourg, France), 268 p.
- Hostache R., Puech C. & Raclot D. (2005). Caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellites RADAR. *Cybergeog : European Journal of Geography, Sélection des meilleurs articles de SAGEO 2005*, (article 381) : 1–14.
- Hostache R., Puech C. & Raclot D. (2007). Caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellites RADAR. *Geoprodigportail d'information géographique*, (381) : 1–13.
- Institut Nationale de la Statistique (INS) (2015). Répertoire des localités Région du SUD-COMOE. (Côte d'Ivoire), 40 p.

## Références

- Khalifa D. (2015). Contribution à l'étude de l'aléa inondations : Genèse et prédiction Cas de la vallée d'El-Abadia (w.Ain Defla). Mémoire de Master, Option : Aménagement et Ouvrages Hydrotechniques, Institut International d'Ingénierie (2iE) (Ouagadougou, Burkina Faso), 112 p.
- Kolia M. (2013). Etude des propriétés hydriques de la zone non saturée de la nappe du quaternaire au Sud de la Côte d'Ivoire : zone de Grand- Bassam. Maitrise en Sciences et Gestion de l'Environnement, Option : Sciences et Techniques de l'Eau, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 41 p.
- Konan E.K., N'Guessan Y.A., Toure M., Affian K. & M'Moa E.D. (2018). Suivi de la morphologie du littoral, de l'estuaire et du processus de fermeture de l'exutoire du fleuve Comoé à Grand-Bassam (Côte d'Ivoire). *Science de la vie, de la terre et agronomie*, 6(2) : 1–8.
- Kouadio L. (2012). Aspects parasito-cliniques de l'épidémiologie du paludisme dans les districts sanitaires d'Adzopé et de Grand- Bassam en Côte d'Ivoire avant et après distribution de moustiquaires imprégnées. Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA ) d'Entomologie Médicale et Vétérinaire, Université Alassane Ouattara (Bouaké, Côte d'Ivoire), 42 p.
- Kouadio Z.A., Soro G.E., Kouakou K.E., Goula Bi T.A. & Savané I. (2018). Inondations fréquentes à Agboville (Côte d'Ivoire) : quelles origines ? *Larhyss Journal*, (33) : 189–207.
- Kouakou K.S. (2015). Cartographie du risque d'inondation sur le bassin versant du Gourou (District d'Abidjan). Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Sciences et Gestion de l'Environnement, Option : Géosciences et Environnement, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 68p.
- Kouamé K.J. (2003). Apport d'un SIG à la réalisation de la carte de vulnérabilité de la nappe souterraine du continental terminal au niveau de l'agglomération d'Abidjan. Mémoire de DEA, Université de Cocody-Abidjan (Abidjan, Côte d'Ivoire), 63p.
- Kouassi K.H. (2013). Caractérisation et cartographie des zones humides littorales par l'apport de données radar polarimétriques et optiques : application aux zones de Sassandra, de Grand-Lahou et d'Abidjan (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, UFR des Sciences et Gestion de l'Environnement, Option : Géosciences et Environnement, Spécialité : Hydrologie et Télédétection, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 179 p.

## Références

- Kouassi K.H., N'go Y.A., Armand A.K., Koua T.J. & Stoleriu C.C. (2020). Contribution of Sentinel 1 Radar data to flood mapping in the San-Pédro river basin (South-West Côte d'Ivoire). *Asian Journal of Geographical Research*, 3(2) : 1–8.
- Koutoua A.J. (2019). Planification urbaine et développement du grand Abidjan : cas des villes d'Anyama, de Bingerville et de Grand-Bassam. Thèse de Doctorat, UFR des Sciences de l'Homme et de la Société (UFR-SHS), Institut de Géographie tropicale (IGT), Discipline : Géographie, Mention : Géographie Humaine et Economique, Spécialité : Urbanisation et Population, Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan-Cocody, Côte d'Ivoire), 347 p.
- Morin M. (2008). Concepts de base en sécurité civile. Québec (Canada), 60 p.
- Nadjette S. (2017). Etude de la biodiversité du couvert végétale et cartographie de l'occupation du sol autour du barrage de Fontaines des gazelles (Biskra). Mémoire de Magistère en Sciences Agronomiques, Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie, Département des Sciences Agronomiques, Option : Agriculture et Environnement en Régions Arides, Université Mohamed Khider Biskra (Biskra, Algérie), 104 p.
- N'Guessan Bi V.H., Saley B., Wade S., Valere D.E., Kouame F. & Affian K. (2014). Cartographie du risque d'inondation par une approche couplée de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques (SIG) dans le département de Sinfra (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 10(2) : 170–191.
- Peduzzi P., Dao H., Herold C. & Mouton F. (2009). Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards : The disaster risk index. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(4) : 1149–1159.
- Randriamparany M., Ratsaramody J., Randriamparany M.A. & Ramanan'haja H.T. (2019). Cartographie et évaluation rapides des dégâts d'une inondation avec des données gratuites et logiciels libres : cas de la zone inondable du Sambirano, Madagascar. *Afrique SCIENCE*, 15(2) : 24–31.
- Saley M.B., Kouamé F.K., Penven M.J. & Biémi J. (2005). Cartographie des zones à risque d'inondation dans la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire : apports des MNA et de l'imagerie satellitaire. *Télédétection*, 5(1-2-3) : 53–57.
- Samari B.S. (2011). Analyse des implications des facteurs physiques dans les risques d'inondation à Ouagadougou : cartographie des zones à risques et mesures de préventions. Mémoire pour l'obtention du Master 2 en Ingénierie de l'Eau et de

## Références

- l'Environnement, Option : Environnement, Institut International d'Ingénierie (2iE) (Ouagadougou, Burkina Faso), 74 p.
- Savané I., Coulibaly N. & Soro N. (2003). Analyse multicritère spatiale pour l'identification de la vulnérabilité aux risques naturels d' Abobo (banlieue de la ville d'Abidjan, Côte d'Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 4 : 94–107.
- Schneiderbauer S. & Ehrlich D. (2004). Risk, hazard and people's vulnerability to natural hazards. A review of definitions, concepts and data. *European Commission, J.R.C. (Ed.)* : 43 p.
- Tanguy M. (2012). Cartographie du risque d'inondation en milieu urbain adaptée à la gestion de crise, Direction de la sécurité civile, Ministère de la Sécurité Publique du Québec. Rapport de Recherche R1395. Version Finale, 103 p.
- Trudel M. (2018). Etude du potentiel de l'imagerie historique Landsat pour la délimitation des cotes des crues de référence : cas de la rivière Petite Nation. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître Ès Sciences (M.Sc.), Université du Québec (Québec, Canada), 77 p.
- Yaokokoré H.B. & N'Douba V. (2005). Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar (FDR), 17 p.

## **Résumé**

Pour mieux identifier spatialement les zones à risque d'inondation pour les populations de la zone de Grand-Bassam lors de fortes pluies, une étude visant l'élaboration des cartes d'aléa et de vulnérabilité à partir d'images RADAR Sentinel-1 et optique Sentinel-2 a été mise en place. L'étude de l'aléa inondation réalisée par pondération et combinaison des facteurs "pente" et "drainage" a montré que la zone de Grand-Bassam est fortement sensible à la manifestation de l'aléa inondation avec 75 % de zones à "forte" et "très forte" sensibilité. Ces zones marquées par de faibles pente et drainage évoluent du Nord au sud dans un gradient croissant de "forte" à "très forte" sensibilité. L'étude de la vulnérabilité a mis en évidence les enjeux au sol, des plus exposées au moins exposées à l'inondation. Les plus exposés, marqués par la présence d'eau, d'habitas et d'une importante activité anthropique correspondent à 22 % de la surface totale. Les zones les moins exposées répondent à 60 % de l'espace d'étude. Elles concernent les forêts et les cultures. La combinaison des cartes d'aléa et de vulnérabilité a permis d'établir la carte des zones à risque d'inondation. Cette carte comporte quatre classes allant du faible risque au très fort risque d'inondation. Les zones à "fort" et "très fort" risque couvrent 56 % du territoire. Elles sont situées sur la quasi-totalité de la zone d'étude. La carte obtenue peut être utilisée non seulement pour la prévention des risques d'inondation, mais aussi pour la gestion des territoires dans cette zone. Toutefois, l'évaluation du risque d'érosion hydrique du terrain permettrait une meilleure appréciation du risque lié à l'inondation.

**Mots clés :** Télédétection, Aléa, Vulnérabilité, Risque d'inondation, Grand-Bassam.

## **Abstract**

In order to better spatially identify the areas at risk of flooding for the populations of the Grand-Bassam area during heavy rains, a study aimed at developing hazard and vulnerability maps based on RADAR Sentinel-1 and optical Sentinel-2 images has been set up. The study of the flood hazard carried out by weighting and combination of slope and drainage factors showed that the Grand-Bassam area is highly sensitive to the manifestation of the flood hazard with 75% of areas with "high" and "very high" sensitivity. These areas marked by low slope and drainage evolve from North to South in an increasing gradient from "strong" to "very strong" sensitivity. The study of the vulnerability highlighted the issues on the ground, from the most exposed to the least exposed to flooding. The most exposed, marked by the presence of water, habitats and significant anthropic activity correspond to 22% of the total

---

surface area. The least exposed areas correspond to 60% of the study area. They concern forests and crops. The combination of the hazard and vulnerability maps has allowed the mapping of flood risk areas. This map has four classes ranging from low risk to very high risk of flooding. The "high" and "very high" risk areas cover 56% of the territory. They are located over almost the entire study area. The resulting map can be used not only for flood risk prevention but also for land management in this area. However, the assessment of the risk of water erosion of the land would allow a better appreciation of the risk related to flooding.

**Keywords :** Remote sensing, Hazard, Vulnerability, Flood risk, Grand-Bassam.

---