

2024-05

Cartographie des zones a risque d'inondation dans des aires des zones Gatumba et Rukaramu en commune Mutimbuzi de la province de Bujumbura (Burundi)

MANIRAKIZA, Patrick

UB, FACULTE DES SCIENCES

<https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/984>

Téléchargé depuis le dépôt institutionnel officiel de l'Université du Burundi

**FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE BIOLOGIE**



**CARTOGRAPHIE DES ZONES A RISQUE D'INONDATION DANS DES AIRES DES
ZONES GATUMBA ET RUKARAMU EN COMMUNE MUTIMBUZI DE LA
PROVINCE DE BUJUMBURA (BURUNDI).**

Par

Patrick MANIRAKIZA

MEMOIRE

**Présenté en vue de l'obtention du
Diplôme de master en
Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement.
Spécialité : Génie de l'Environnement**

Sous la direction de:

Pr Louis NAHIMANA

MEMBRES DU JURY

Dr Anicet SINDAYIHEBURA : Président

Dr Désiré KUBWIMANA : Secrétaire

Pr Gaston HAKIZA : Membre

Pr Louis NAHIMANA : Directeur

DEDICACES

A mes chers parents

A mes frères et sœurs

A mes camarades de classe

A tous ceux qui me sont chers;

A tous qui ont contribué de près ou de loin pendant les recherches de ce travail ;

Je dédie ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Au terme du présent travail, il me tient d'exprimer ma gratitude à l'endroit de toutes personnes tant physiques que morales qui ont contribué à sa réalisation.

En effet, mes remerciements sont premièrement adressés à l'Université du Burundi pour m'avoir octroyé cette opportunité et tous les professeurs qui interviennent dans le cycle de Master, plus spécialement dans le département de biologie pour m'avoir servi un support intellectuel très avancé afin de suivre ce programme en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement.

Mes vifs remerciements sont ensuite très particulièrement adressés au Professeur Louis NAHIMANA, promoteur et directeur de ce travail. Sa rigueur scientifique, ses conseils et remarques ainsi que sa disponibilité malgré ses multiples obligations nous ont été d'une importance très précieuse dans la réalisation effective du présent travail.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Mes expressions de vive reconnaissance sont aussi adressées à tous les éducateurs depuis l'école primaire jusqu'à l'Université du Burundi, pour la formation et le guide qu'ils m'ont réservé durant toute la période d'étude.

Mes remerciements s'adressent de même à tout le personnel de l'IGEBU et du BCG qui m'ont facilité l'accès aux différentes données dont j'avais besoin pour une meilleure qualité de ce travail.

On ne peut pas mettre fin à ce point sans remercier mes chers parents, frères et sœurs pour leur sacrifice, encouragement et leur soutien qu'ils m'ont assuré grâce à leur assistance tant matérielle que morale durant toute la période de la présente formation.

Qu'ils trouvent ici le couronnement de tous les efforts et peines consentis au cours de cette dernière. Cette page ne prendrait pas fin sans exprimer mes reconnaissances à tous mes camarades de classe.

Et enfin, tous ceux qui, à différents degrés, m'ont donné un coup de main, de près ou de loin dans ma formation et à l'aboutissement du présent travail, qu'ils rencontrent eux aussi l'expression de ma profonde gratitude.

RESUME

Face aux changements climatiques en cours et à la croissance démographique alarmante, les populations burundaises dont celles des zones de Gatumba et Rukaramu sont fortement vulnérables aux évènements climatiques extrêmes surtout les inondations. Ces dernières sont enregistrées de part et d'autres de ces zones au cours des treize dernières années en raison de leur situation géographique caractérisée par des conditions climatiques, géomorphologiques, pédologiques, topographiques et hydrographiques favorables aux inondations. C'est dans ce cadre que la présente étude a pour objectif de cartographier les aires exposées aux risques d'inondations dans les zones de Gatumba et Rukaramu afin de développer et contribuer à fournir des outils efficaces de gestion à travers la géolocalisation des zones inondables en fonction du temps. Pour y arriver, une méthodologie basée sur une approche de terrain et de télédétection procédée par digitalisation et extraction des zones inondées, des zones bâties et la montée latérale des eaux du lac Tanganyika est adoptée. Les traitements SIG ont été réalisés avec QGIS. Cette méthodologie applique une évaluation de cinq paramètres dont le relief, la pédologie, la pente topographique, l'hydrographie ainsi que l'intensité des précipitations en fonction du temps. Les résultats de cette étude ont montré que de nombreux aménagements réalisés dans cette zone d'étude subissent une dégradation évolutive au cours du temps causée par différents types d'inondations. Depuis l'année 2009 jusqu'au début de l'année 2022, les inondations connaissent en général une évolution grandissante en termes de superficie et aucun être vivant ni les infrastructures ne sont éloignées de la vulnérabilité de ce risque. D'où, les conséquences socio-économiques et environnementales (pertes des vies humaines, destruction des infrastructures aussi bien publiques que privées, dégradation du sol, perte de la biodiversité animale et végétale) deviennent de plus en plus énormes. Il faut également souligner que la vulnérabilité des zones Gatumba et Rukaramu est développée suite aux activités anthropiques tels que la faiblesse ou l'absence des ouvrages de protection, l'inadéquation ou l'absence de plan d'aménagement urbain et l'inadéquation des matériaux de construction. Pour ce, le présent travail a pour finalité de mettre en exergue un outil opérationnel et évolutif permettant aux décideurs de mieux appréhender les risques et de les aider à la prise de décisions dans les options d'aménagement en matière de prévention et de gestion de risques d'inondations dans les années à venir.

Mots clés : Cartographie, risques d'inondations, zone Gatumba et Rukaramu, vulnérabilité, paramètres genèses d'inondation.

ABSTRACT

Faced with ongoing climate change and alarming population growth, Burundian populations, including those in the Gatumba and Rukaramu zones, are strongly vulnerable to extreme climatic events, especially floods. These latter are recorded on both sides of these zones over the last thirteen years due to their geographical location characterized by climatic, geomorphological, soil, topographical and hydrographic conditions favorable to flooding. It is in this context that the present study aims to map the exposed areas to the flooding zones in the areas of Gatumba and Rukaramu in order to develop and contribute to provide effective management tools through the geolocation of flooding areas over time. For get there, a methodology based on a field approach and remote sensing carried out by digitalization and extraction of flooded areas, built-up areas and lateral rise of water of Lake Tanganyika is adopted. GIS processing was carried out with QGIS. This methodology applies an evaluation of five parameters including relief, pedology, slope topography, hydrography as well as the intensity of precipitation as a function of time.

The results of this study showed that numerous developments carried out in this study area undergoes progressive degradation over time caused by different types of flooding. From 2009 until the beginning of 2022, floods generally experience an increasing evolution in terms of surface area and no living being nor the infrastructures are far from the vulnerability of this risk. Hence, the consequences socio-economic and environmental (loss of human life, destruction of both public and private infrastructure, land degradation, loss of biodiversity animal and plant) are becoming more and more enormous. It should also be emphasized that the vulnerability of the Gatumba and Rukaramu zones is developed following the activities anthropogenic factors such as the weakness or absence of protective structures, the inadequacy or the absence of an urban development plan and the unsuitability of construction materials. For this, the present work aims to highlight an operational and scalable tool enabling decision-makers to better understand the risks and help them take decisions in planning options in terms of prevention and risk management flooding in the years to come.

Key words: Mapping, flood risks, Gatumba and Rukaramu zone, vulnerability, flood Genesis parameters.

TABLE DES MATIERES

MEMBRES DU JURY	i
DEDICACES	ii
REMERCIEMENTS	iii
RESUME	iv
ABSTRACT	v
TABLE DES MATIERES	vi
LISTE DES ACRONYMES/ABREVIATIONS	ix
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES ILLUSTRATIONS	xii
AVANT- PROPOS	xiii
CHAPITRE 0 : INTRODUCTION GENERALE	1
0.1. Adoption et intérêt de cette étude	4
0.1.1. Choix du sujet et de la zone d'étude	4
0.1.2. Intérêt de cette étude.....	4
0.1.2.1. Intérêt académique	5
0.1.2.2 Intérêts socio-économiques	5
0.1.2.3. Intérêts politiques et institutionnels.....	5
0.1.3. Articulation du mémoire.....	6
CHAPITRE I: CADRE THEORIQUE ET SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR RISQUES D'INONDATION	7
I.1. Synthèse bibliographique sur le risque d'inondation	7
I.1.1. Les inondations à l'échelle mondiale	7
I.1.2. Inondation dans les zones Gatumba et Rukaramu.	8
I.1.3. Notions fondamentales pour promouvoir une gestion du risque d'inondation	8
I.1.3.1. Inondation	9
I.1.3.2. Crues	9
I.1.3.3. Risque	9
I.1.3.4. Aléa	10
I.1.3.5. Enjeu	10
I.1.3.6. Vulnérabilité.....	11
I.1.3.7. Changements climatiques.....	11
I.1.3.8. Carte et cartographie	11
I.2. Caractérisation, évaluation et gestion du risque d'inondation	12
I.2.1. Caractérisation du risque d'inondation	12
I.2.2. Les conséquences des inondations	13

I.2.2.1. Conséquences économiques.....	14
I.2.2.2. Conséquences environnementales.....	14
I.2.3. Evaluation du risque d'inondation	15
I.2.4. La gestion intégrée du risque d'inondation (GIRI)	15
CHAPITRE II. MATERIELS ET METHODES	18
II.1. Matériels utilisés.....	18
II.2. Délimitation de la zone d'étude.....	18
II.3. Description de la zone d'étude par rapport au bassin versant de la rivière Rusizi et du lac Kivu.....	20
II.4. Outils d'extraction de données et de traitement des résultats.....	22
II.5. Approche méthodologique.....	23
II.6.1. Visite de terrain et revue bibliographique	25
II.6.2. Extraction des données	25
II.6.2.1. Choix de la période d'étude et des images	25
II.6.2.2. Digitalisation des zones inondables et de la montée des eaux du lac Tanganyika ainsi que prétraitement de couches vecteurs.	26
II.6.3. Traitement SIG	30
II.6.3.1. Traitement de données avec le logiciel QGIS 3.28, 2-1	30
II.6.3.2. Traitement de données avec de logiciel approprié.....	30
II.6.3.3. Représentation des informations sur les cartes	31
CHAPITRE III. PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS.....	32
III.1. Etude géodynamique de l'évolution spatio-temporelle de l'aléa d'inondation.	32
III.1.2. Etude des zones inondées (Année 2012).....	34
III.1.3 : Etude des zones inondées (Année 2013).....	35
III.1.4. Etude des zones inondées (Année 2014).....	36
III.1.5. Etude des zones inondées (Année 2015).....	37
III.1.6. Etude des zones inondées (Année 2016).....	38
III.1.7. Etude des zones inondées (Année 2017).....	39
III.1.8. Etude des zones inondées (Année 2018).....	40
III.1.9. Etude des zones inondées (Année 2019).....	42
III.1.10. Etude des zones inondées (Année 2021).....	43
III.1.11. Etude des zones inondées (Année 2022).....	45
III.1.12. Calcul et représentation d'évolution interannuelle de l'aléa d'inondation.....	46
III.1.13. Caractérisation et évaluation de la vulnérabilité des bâtis à l'aléa d'inondation	47
III.2. Identification des différents types d'inondations menaçant les zones Gatumba et Rukaramu	48
III.2.1. Inondation fluviale de la Rusizi.....	48

III.2.2. Inondation lacustre.....	50
III.2.3. Inondation fluvio-lacustre.....	51
III.2.4. Inondation par eaux souterraines.....	52
III.3. Etude des facteurs naturels de la genèse des inondations dans les zones Gatumba et Rukaramu	52
III.3.1. Facteurs environnementaux.....	52
III.3.1. 1. Relief	52
III.3.1.2. Pente	54
III.3.1.3. Pédologie.....	55
III.3.2. Facteurs hydrologiques	57
III. 3.2.1. Hauteur et débit des eaux de la rivière Rusizi.....	58
III. 3.2.2. Altitude et hauteur des eaux du lac Tanganyika.....	59
III. 3.2.3. Etude de l'évolution latérale des eaux du lac Tanganyika	60
III.3.3. Facteurs climatiques	61
III.4. Géolocalisation des inondations en fonction du degré de sévérité.....	64
III.5. Classification des quartiers/collines en fonction du degré de la vulnérabilité.....	65
III.6. Identification des facteurs de la vulnérabilité des zones inondées	66
CHAPITRE IV. DISCUSSION DES RESULTATS.....	70
IV.1. Types d'inondations dans les zones de Gatumba et Rukaramu	71
IV. 2. Dépendance inondation-facteurs genèses d'inondation	72
IV. 3. Vulnérabilité du site d'étude.	74
IV. 3.1. Vulnérabilité de la zone d'étude en fonction du temps.....	74
IV. 3.2. Vulnérabilité de la zone d'étude en fonction de l'espace	75
IV. 3.3. Facteurs amplificateurs de la vulnérabilité	75
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	77
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	80

LISTE DES ACRONYMES/ABREVIATIONS

BCG	: Bureau de Centralisation Géomatique
CEDEAO	: Communauté Economique Des États de l'Afrique de l'Ouest
CRED	: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters
DFO	: Dartmouth Flood Observatory
GIEC	: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GIRI	: Gestion Intégrée du Risque d'Inondations
IFM	: Indice de Fournier modifié
IGEBU	: Institut Géographique du Burundi
IRI	: Indice de Risque d'Inondations
MATE	: Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement
MEDD	: Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
OCHA	: Office for the Coordination of Humanitarian Affairs
O.S	: Objectifs spécifiques
OIM	: Organisation Internationale pour les Migrations
R.D.C	: République Démocratique du Congo
SIG	: Système d'Information Géographique
UNISDR	: Stratégie Internationale de Prévention des Catastrophes des Nations Unies.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classification des quartiers/collines en fonction de la sévérité des inondations 65

Tableau 2: Variations interannuelles du niveau et du débit des eaux en aval de la Rusizi 87

Tableau 3: Evolution du niveau et de l'altitude des eaux du lac Tanganyika 87

LISTE DES ILLUSTRATIONS

<i>Figure 1: Type de catastrophes naturelles survenues dans le monde de 1990 à 2007.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 2: Illustration du risque majeur</i>	<i>10</i>
<i>Figure 3: Illustration de l'aléa.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 4: Illustration de l'enjeu.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 5: Représentation simplifiée des liens entre le risque d'inondation et ses composantes,</i>	<i>13</i>
<i>Figure 6: Formule et indicateurs utilisés pour déterminer l'IRI.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 7: Trois grandes composantes de la phase de gestion du risque d'inondation</i>	<i>16</i>
<i>Figure 8: Localisation géographique de la zone de travail par rapport au pays.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 9. Bassin versant de la rivière Rusizi et du lac Kivu (ABAKIR, 2020).....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 10: Profil en long de la rivière Rusizi</i>	<i>22</i>
<i>Figure 11: Représentation schématique de l'approche méthodologique</i>	<i>24</i>
<i>Figure 12: Illustration de la détection des zones inondées à base des imageries satellitaires</i>	<i>27</i>
<i>Figure 13: Extraction des superficies bâties inondées,</i>	<i>27</i>
<i>Figure 14 : Evaluation et extraction de la montée des eaux du lac Tanganyika entre 2009 et 2022 à partir des images gratuites disponibles sur Google Earth</i>	<i>28</i>
<i>Figure 15: Evolution latérale sans retour du lac Tanganyika (2009 - 2022).....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 16: Mesures latérales de la montée des eaux du lac Tanganyika 2022 avec QGIS....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 17: Carte des zones inondées comptant pour les années 2009, 2010 et 2011.</i>	<i>33</i>
<i>Figure 18: Carte des zones inondées (Année 2012).</i>	<i>34</i>
<i>Figure 19: Carte des zones inondées (année 2013).....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 20: Carte des zones à risque d'inondation en 2014.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 21: Carte des zones inondées en 2015.</i>	<i>37</i>
<i>Figure 22: Carte des zones inondées (Année 2016).</i>	<i>38</i>
<i>Figure 23: Carte des zones inondables en 2017.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure 24: Carte des zones inondées en 2018</i>	<i>40</i>
<i>Figure 25: Carte des zones aux risques d'inondation en 2019.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 26: Carte des zones inondées en 2021</i>	<i>43</i>
<i>Figure 27: Carte des zones inondées en 2022</i>	<i>45</i>
<i>Figure 28: Evolution spatiale interannuelle de l'aléa d'inondation par rapport à la zone d'étude.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure 29: Impacts des inondations sur les bâtis.</i>	<i>47</i>

<i>Figure 30: Inondation lacustre à Gatumba,</i>	<i>49</i>
<i>Figure 31: Inondation fluviale du 4 mars 2021 à Gatumba</i>	<i>49</i>
<i>Figure 32: Montée des eaux du lac Tanganyika du 11 au 18 mai 2021 dans les quartiers situant au Sud de la zone de Gatumba jusqu'à la route goudronnée, reliant le Burundi à la RDC.</i>	<i>50</i>
<i>Figure 33: La cour de l'école primaire Kinyinya II submergée par des eaux provenant du lac Tanganyika, avril 2023.</i>	<i>50</i>
<i>Figure 34: Les eaux du lac Tanganyika et de la rivière Rusizi ont envahi avec une hauteur élevée l'ensemble des quartiers de Gatumba</i>	<i>51</i>
<i>Figure 35: Les habitats de Gatumba tentent de sauver leurs biens matériels, avril 2023.</i>	<i>51</i>
<i>Figure 36: Montée des eaux souterraines,</i>	<i>52</i>
<i>Figure 37: Carte du relief des zones Gatumba et Rukaramu</i>	<i>53</i>
<i>Figure 38: Carte des pentes des zones Gatumba et Rukaramu</i>	<i>54</i>
<i>Figure 39: Nature des sols des zones Gatumba et Rukaramu</i>	<i>56</i>
<i>Figure 40: Carte hydrographique des zones Gatumba et Rukaramu.</i>	<i>57</i>
<i>Figure 41: Evolution interannuelle du niveau des eaux de la rivière Rusizi</i>	<i>58</i>
<i>Figure 42: Evolution interannuelle du débit des eaux en de la Rusizi</i>	<i>58</i>
<i>Figure 43: Evolution interannuelle du lac en hauteur.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure 44: Evolution interannuelle du lac en altitude,</i>	<i>59</i>
<i>Figure 45: Evolution du niveau des eaux du lac Tanganyika.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 46 : Variations interannuelles des précipitations et leur rôle dans la genèse des inondations.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure 47: Carte des différents types et degré d'inondation</i>	<i>64</i>
<i>Figure 48: L'inadéquation des matériaux de Construction et mesures de protection inefficaces à Muyange II</i>	<i>67</i>
<i>Figure 49: Faiblesse et ou absence des ouvrages de protection de l'école de Kinyinya II et des maisons à l'interieur du Quartier, mars 2021</i>	<i>67</i>
<i>Figure 50 (A et B): Absence de plan d'aménagement urbain et manque d'entretien des habitations.....</i>	<i>68</i>

AVANT- PROPOS

Ce mémoire rentre dans le cadre de gestion des risques naturels dans la vie professionnelle afin d'obtenir un diplôme de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement, spécialité de Génie de l'environnement. Il identifiera et mettra en évidence les zones à risque d'inondation dans deux zones de la commune Mutimbuzi (Gatumba et Rukaramu) qui font la zone d'étude. L'idée de faire cette étude est venue du constat que, parmi les risques naturels les plus courants et dévastateurs dans le monde, en Afrique, et au Burundi en particulier, les risques d'inondations constituent un problème probable encore mal évalué et par conséquent la dégradation de l'environnement, la perturbation voire la perte de vies humaines et des biens matériels sont énormes au cours des dernières années. C'est pour cette raison qu'il n'aura échappé à aucun responsable politique, aucune institution publique ou privée, aucun citoyen, que les inondations ont régulièrement fait une des menaces les plus meurtrières de la planète ainsi que dans notre zone d'étude au cours des dernières années et actuellement.

A notre connaissance, le Burundi et plus particulièrement notre zone d'étude a rarement connu des études similaires à celle-ci se rapportant à la caractérisation des risques d'inondation alors que les recherches permettent une gestion efficace et efficiente de ces risques naturels dans les zones urbaines et périurbaines dont Gatumba et Rukaramu qui sont aussi les plus affectées du pays. En effet, les inondations sont particulièrement menaçantes et dangereuses pour la santé humaine, l'économie nationale et l'environnement en général car elles causent beaucoup de morts, des maladies, des pertes matérielles et contribuent à la dégradation de l'environnement. Ces conséquences sont généralement plus fréquentes depuis 2009.

C'est dans ce cadre que ce travail de recherche a pour objectif global de déterminer et d'évaluer l'occurrence, l'intensité et l'évolution spatiale des risques d'inondations liés à la montée des eaux souterraines, la montée des eaux du lac Tanganyika et de la rivière Rusizi, aux précipitations ainsi qu'au paramètres hydro-géomorphologiques des zones Gatumba et Rukaramu de la commune Mutimbuzi par la cartographie à base des données géographiques et des imageries satellitaires enregistrées pendant toute la période d'étude.

Cependant, pour gérer efficacement les risques d'inondations, nous devons nous attaquer à la source des divers types et causes d'inondation.

CHAPITRE 0 : INTRODUCTION GENERALE

Au cours du 21^{ème} siècle, il est clair que le risque des catastrophes naturelles est intimement connecté aux processus de développement humain. Les risques non seulement s'accroissent, mais aussi se diversifient et se combinent avec la pauvreté et la fragilité des infrastructures. Cette problématique accentue la vulnérabilité du territoire suite à une pression accrue sur l'environnement (Ologunorisa, 2004 et Banque mondiale, 2021).

Dans un contexte plus actuel de changement climatique plus alarmant, les inondations sont devenues une problématique majeure au niveau mondial (Banque mondiale, 2017; Faye, 2021, Fiorillo *et al.* 2015). Elles constituent le risque naturel affectant le plus de monde sur toute la planète (Mamadou *et al.* 2019). Parmi tant d'autres catastrophes naturelles, les inondations sont les plus récurrentes, les plus répandues et engendrent des pertes de vies humaines, des moyens de subsistance et la destruction des infrastructures tant dans les pays développés qu'en pays en développement (Ahern *et al.*, 2005, Ali *et al.*, 2016).

En 1996, à peu près 196 millions de personnes sont affectées par des inondations désastreuses et 170 000 décès ont été associés à des inondations dans plus 90 pays (Cutter, 1996). De plus, environ 170 millions de personnes par an sont menacées par cette catastrophe dans le monde (Faye, 2021) et plus de 2,8 milliards de personnes sont aussi affectées par des inondations depuis 1990 (UNISDR.C, 2015, EM-DAT, 2016 in Kovacs *et al.* 2017). Et par conséquent, ces dernières constituent la source de près de 1/2 des décès occasionnés par tous les catastrophes naturelles et sont aussi responsables de près de 1/3 des pertes économiques évaluées à l'échelle planétaire (Tanguy, 2012).

L'Afrique n'est pas à l'abri du risque d'inondation. La plupart des pays de ce continent connaissent cette catastrophe naturelle qui les a fait subir des conséquences graves sur la sécurité alimentaire et hydrique depuis des années. En janvier 2007, les inondations ont causé plus de 2 millions de victimes au Centre et à l'Est de l'Afrique dont le Burundi fait partie (Wade *et al.*, 2009).

Quant au Burundi, des catastrophes provoquées par des risques hydrométéorologiques (inondations, sécheresse) ne cessent de perturber les vies humaines et les biens matériels publics et privés jusqu'à l'ère actuelle (Ruzima *et al.*, 2017, OCHA-Burundi, 2022). Cela est beaucoup plus important au cours de la saison pluvieuse en 2022. Des désastres naturels, en particulier les pluies torrentielles et les inondations survenus au Burundi ont touché 331 924 personnes dont 113 475 personnes déplacées, ce qui a également affecté les communautés

d'accueil alors qu'elles sont également vulnérables (OIM-Burundi, 2022).

Dans toutes les provinces du pays, la province de Bujumbura Rural qui héberge notre site de travail est la plus touchée. Les zones Gatumba et Rukaramu sont les plus menacées par les désastres naturels au cours des dernières années avec 111 370 des personnes affectées (OIM-Burundi, 2022). Cependant, des évènements catastrophiques répétitifs des inondations sans précédent ne cessent de se manifester depuis plusieurs années dans ces zones. Les inondations constituent l'une des catastrophes les plus ravageuses pour les populations de la zone d'étudiée qui restent toujours très vulnérables face à ces risques (Ndayegamiye, 2007). Cette zone subit des problèmes d'assainissement et économiques inédits causés par des différents épisodes d'inondations suite à une occupation continuelle et évolutive de l'homme dans les zones inondables sans se soucier de son exposition aux risques d'inondations et au changement climatique en cours (Mendonça et al, 2015).

Etant donné que la plupart des actifs sociétaux sont souvent concentrés dans des zones urbaines et périurbaines alors que notre zone d'étude est aussi périphérique à la ville de Bujumbura, les dégâts humains et matériels sont énormes chaque année. Des infrastructures non résistantes augmentent la sévérité des conséquences à la fois humanitaire et économique (OCHA, 2020).

Les zones Gatumba et Rukaramu sont menacées de façon chronique par des inondations depuis des années à nos jours. Ces inondations sont dues à la remontée des eaux du lac Tanganyika et des eaux souterraines, au débordement de la rivière Rusizi et aux précipitations. Ces zones sont vulnérables suite à ses facteurs environnementaux (la pente topographique, le relief, l'altitude, la pédologie et l'hydrographie) et les facteurs climatiques (précipitations) associés à un aménagement du territoire inadéquat et l'urbanisation incontrôlé ainsi qu'à la forte croissance démographique. cette zone d'étude souffre d'une vulnérabilité qui augmente d'une année à une autre suite à la croissance démographique et à l'augmentation des infrastructures construites dans des zones inondables qui amplifient l'impact potentiel du risque d'inondation. Ces zones périurbaines sont par conséquent les plus affectées du pays suite à ses différentes caractéristiques et facteurs environnementaux.

Toutefois, pour contribuer à répondre à cette situation inquiétante, l'étude des facteurs environnementaux et climatiques ainsi que la cartographie des zones inondables jouent un rôle d'une composante essentielle pour prévenir les risques d'inondations par la réduction de la vulnérabilité d'un territoire, en améliorant l'atténuation de l'aléa et en aidant à la

planification globale pour prendre des meilleures décisions après l'évaluation de la vulnérabilité des actifs sociétaux se trouvant dans des zones inondables (Aven, 2012 ; Vatséva et *al.*, 2015).

C'est dans ce cadre que notre travail est consacré à faire des analyses détaillées de l'expansion et la fréquence des risques d'inondation à travers la cartographie destinée à maîtriser les paramètres influenceurs des inondations afin de réduire la vulnérabilité des espaces sensibles de cette zone de travail. Une meilleure compréhension des phénomènes d'inondation et de leurs caractéristiques est un préalable fondamental pour identifier et adopter les meilleures mesures de réduction de la vulnérabilité pertinente pour le territoire, et de dimensionner correctement les ouvrages de protection.

C'est dans cette optique qu'à base de la problématique ci-haut dégagée, on s'est fixé l'objectif global de cartographier les zones à risque d'inondations dans les aires des zones Gatumba et Rukaramu en commune Mutimbuzi de la province Bujumbura afin de développer et contribuer à fournir des outils efficaces de gestion à travers la géolocalisation de zones inondables dans le temps et dans l'espace. Pour essayer de répondre à cet objectif global, des objectifs spécifiques suivants ont été fixés:

OS₁. Mesurer, étudier et comparer la progression de l'aléa d'inondation dans le temps et dans l'espace

OS₂. Détecter les différents types d'inondations qui menacent la zone d'étude;

OS₃. Montrer et Classer les quartiers/collines en fonction du degré de la vulnérabilité aux risques encourus dans le temps;

OS₄. Déterminer les facteurs naturels directs de genèse de l'aléa d'inondation;

OS₅. Identifier les facteurs amplificateurs de la vulnérabilité des zones GATUMBA et RUKARAMU face aux changements climatiques.

Ces objectifs spécifiques vont nous permettre de confirmer ou d'infirmer les hypothèses suivantes :

H₁. Des superficies de zones inondables varient d'une année à une autre et deviennent plus importantes pour les dernières que pour les premières années de la période d'étude.

Elles sont plus vastes dans les zones hébergeant les rives du lac TANGANYIKA et de la rivière Rusizi;

H₂. En raison des différents événements pluviométriques, du réseau hydrographique et des facteurs environnementaux, notre site d'étude subit une inondation fluviale, une inondation pluviale, une inondation due à la montée des eaux (eaux souterraines et eaux

du lac Tanganyika);

H3. Les quartiers/collines les plus proches des rives du lac Tanganyika et de la rivière

Rusizi sont beaucoup plus vulnérables aux risques d'inondations que les quartiers se trouvant au nord de la zone d'étude;

H4. Les facteurs directs intervenant dans la genèse de l'aléa d'inondation sont les facteurs climatiques et des paramètres naturels du milieu;

H5. Les zones Gatumba et Rukaramu sont vulnérables aux risques d'inondations suite à une pression démographique qui se manifeste à travers l'installation des bâties dans les zones inondables.

0.1. Adoption et intérêt de cette étude

0.1.1. Choix du sujet et de la zone d'étude

L'idée qui nous a guidés à choisir le sujet de cartographie des zones exposées aux risques d'inondations est que les zones de Gatumba et Rukaramu subissent fréquemment des inondations aux corollaires souvent dramatiques depuis des années. En outre, à notre connaissance peu d'études similaires sont déjà réalisées et aucune étude approfondie et détaillée portant sur l'étude géodynamique et temporelle de l'aléa d'inondation n'est encore réalisée dans ce site d'étude. Au surplus, savoir les limites des zones inondables, les zones bâties exposées aux risques et leur évolution ainsi que la compréhension des risques d'inondation constitue une base de données indispensable pour plusieurs acteurs publics et/ou privés agissant à l'échelle académique, politique, sociale et économique.

0.1.2. Intérêt de cette étude

Le faible niveau de compréhension des risques d'inondations est un obstacle majeur au développement durable. Dans les zones périurbaines de Gatumba et Rukaramu, les établissements humains ne sont pas souvent planifiés, les bâtiments sont construits avec des matériaux peu durables sans oublier aussi de la densité de populations qui ne cesse d'augmenter. Ces facteurs exposent les populations aux aléas, aux effets et impacts socio-économiques dues aux inondations sans oublier aussi que le gouvernement et les institutions ne sont pas éloignés des pertes économiques inattendues pour aider les sinistrés à survivre avec les catastrophes. C'est dans ce cadre que cette étude a été initiée en vue de se doter prioritairement d'instruments de gestion territoriale et de prévention moderne pour contribuer à obtenir des informations stratégiques afin de mettre en évidence, d'anticiper ou

atténuer les risques et catastrophes. Cette étude présente des intérêts dans les domaines académique, économique, sociale et politique.

0.1.2.1. Intérêt académique

A partir des résultats de cette étude, des futurs chercheurs auront des données scientifiques de base pour mieux cadrer et mener leurs études dans le domaine de gestion des risques naturels.

0.1.2.2 Intérêts socio-économiques

Dans la mesure où, les sinistrés se multiplient et sont obligés de vivre dans des conditions précaires ou de coloniser des zones les moins vulnérables, ce travail va avoir part dans l'exposition et la délimitation de la vulnérabilité des zones de Gatumba et Rukaramu.

Ce travail a aussi le but d'informer les communautés locales afin qu'ils deviennent acteurs principaux en prenant des solutions alternatives possibles relatifs à leurs moyens pour parvenir à une résilience significative et à minimiser les impacts des inondations.

En effet, le gouvernement du Burundi et les organisations humanitaires investissent chaque fois dans la réponse que dans la prévention ; ce qui les coûte extrêmement cher. C'est dans ce cadre que cette étude va contribuer de façon significative de la part de tous les acteurs socio-économiques intervenant dans la gestion des risques en les aidant à maîtriser les caractéristiques des risques d'inondation, à identifier les actions prioritaires et à prendre des décisions adéquates en matière de réponse.

0.1.2.3. Intérêts politiques et institutionnels

Cette étude des phénomènes catastrophiques naturels (risques d'inondation) est particulièrement importante pour les décideurs politiques et dans le cadre institutionnel. Elle leur permet d'avoir des connaissances approfondies des risques et des informations stratégiques afin de mettre en place des outils et des politiques pour prévenir ou atténuer les risques et catastrophes consécutives à la manifestation de ce phénomène.

Cependant, des cartes d'inondation représentent un outil de grand intérêt pour les décideurs en matière d'aménagement du territoire en vue de prévenir et de réduire la vulnérabilité des zones inondables grâce à la mise en œuvre des plans de gestion adéquats. Elles aident également les personnes morales d'assurance à évaluer les risques et à l'optimisation des procédures de planification et d'implantation des mesures d'urgence pour permettre une gestion intégrée de crise sur le terrain.

Pour ce, des cartes bien conçues sont nécessaires pour différents événements naturels.

0.1.3. Articulation du mémoire

Outre le chapitre introductif et la conclusion générale, ce travail comporte quatre grandes parties. Le premier chapitre concerne un cadre théorique et une synthèse bibliographique sur le risque d'inondation.

Le deuxième chapitre relate les matériels et la méthodologie utilisés pour caractériser spatialement et temporellement l'aléa d'inondation et décrire la zone d'étude sur laquelle les approches méthodologiques seront évaluées.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats et le quatrième chapitre compare les résultats notre étude avec ceux des autres auteurs qui ont travaillé sur les sujets semblables à le nôtre.

CHAPITRE I: CADRE THEORIQUE ET SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR RISQUES D'INONDATION

A base de l'orientation d'une revue de la littérature accompagnée par des travaux d'observations et d'exploitation des imageries satellitaires à haute résolution, ce chapitre aborde le cadre général d'inondation à l'échelle mondiale et dans la zone d'étude, les définitions des concepts relatifs au sujet, la description des facteurs naturels de la genèse des inondations dans la zone d'étude et les notions de base de la gestion du risque d'inondation.

I.1. Synthèse bibliographique sur le risque d'inondation

I.1.1. Les inondations à l'échelle mondiale

Selon l'étude annuelle du Centre de Recherche sur l'Epidémiologie des Désastres, les inondations se classent en premier par rapport aux autres catastrophes naturelles avec 34% en termes des impacts de toutes les catastrophes naturelles enregistrées entre 1990 et 2007 à l'échelle mondiale.

Par cette figure 1, ce centre indique que le nombre de personnes touchées par ces catastrophes s'est considérablement accru en atteignant 135 millions en 2006 et près de 200 millions dont 164 millions ont été victimes d'inondations en 2007(CRED, 2007).

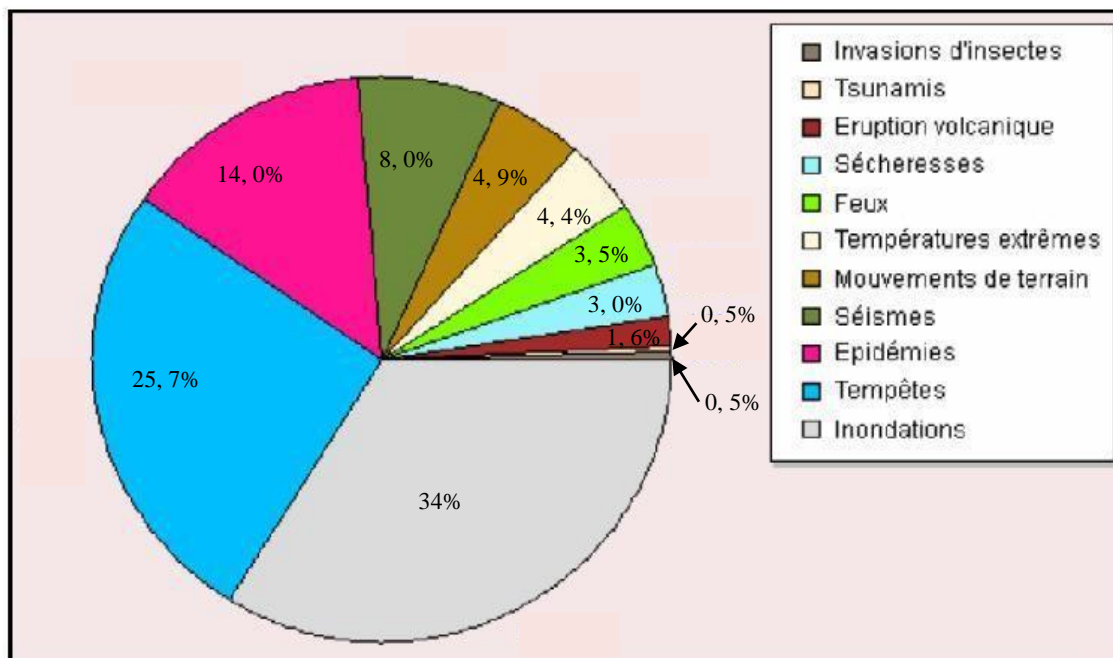


Figure 1: Type de catastrophes naturelles survenues dans le monde de 1990 à 2007 (CRED, 2007).

Selon cette même institution, le bilan de l'année 2007 est beaucoup plus lourd : 12429 décès, 35,6 millions de personnes déplacées et 22 milliards de dollars de dommages économiques. Ces chiffres montrent bien que les dommages occasionnés par les catastrophes naturelles, les inondations en particulier, deviennent de plus en plus importants aussi bien sur le plan humain que matériel. Bien plus, les pays en voie de développement dont le Burundi sont touchés de façon disproportionnée, leurs pertes par unité du Produit Intérieur Brut (PIB) étant environ cinq fois plus importantes que celles des pays riches et 13 fois plus de victimes (Yevjevich, 1994, Khalifa, 2015).

I.1.2. Inondation dans les zones Gatumba et Rukaramu.

Depuis plusieurs années, les zones Gatumba et Rukaramu sont très vulnérables face aux risques naturels et catastrophes associés aux changements climatiques. Parmi ces catastrophes, les inondations constituent l'une des plus récurrentes et dévastatrices pour les populations habitant ces zones. Cette catastrophe se traduit par une augmentation spectaculaire des pertes en vies humaines, la destruction des infrastructures, la malnutrition, l'augmentation de risque des maladies, la perte de la biodiversité suite aux graves perturbations climatiques dont les inondations. Depuis des dizaines d'années, ces zones qui constituent notre zone d'étude, restent très vulnérables face aux risques d'inondations (PNUD et OCHA, 2020).

A titre d'exemple, l'OCHA a signalé dans son rapport portant l'évaluation multisectorielle initiale et rapide de Gatumba du 18 mai 2021 que les inondations d'avril et mai 2020 ont affecté environ 45 000 personnes et 24 037 d'autres ont dû quitter leurs maisons.

Des infrastructures publiques et privées ont été détruites et des champs de cultures ont été inondés. Selon, cette même ONG, la montée des eaux du lac Tanganyika et le débordement des rivières Rusizi qui ont eu lieu entre le 11 et le 13 mai 2021 ont occasionné la destruction de maisons, l'inondation de champs et le déplacement de plus de 5 152 ménages, soit 27 760 personnes.

I.1.3. Notions fondamentales pour promouvoir une gestion du risque d'inondation

Pour comprendre le risque naturel d'inondation afin de faire face à ses conséquences et y intervenir de façon efficace et efficiente en instaurant des politiques de prévention et de gestion de catastrophes, il est plus primordial de définir certains concepts clés suivants : l'inondation, le risque, l'aléa, l'enjeu, la vulnérabilité, les changements climatiques, la carte, et la cartographie sont les notions de base de cette étude.

Leurs explications diffèrent d'un auteur à l'autre selon les domaines d'expertise ou d'études.

I.1.3.1. Inondation

Le terme "inondation" est un concept binominal comprenant l'aléa et la vulnérabilité qui combine les conséquences dommageables de cet aléa sur les enjeux.

D'après Djellouli, (2003) et Ologunorisa, (2004), l'inondation est une catastrophe hydrométéorologique la plus meurtrière à la surface terrestre. D'une façon globale, l'inondation est une submersion, rapide ou lente, d'une zone habituellement hors d'eau. Yahiaoui, (2012) ajoute également que c'est l'acceptation plutôt topographique ou géomorphologique qui désigne le débordement d'un cours d'eau de son lit mineur mais aussi le remplissage d'une cuvette topographique par les eaux de ruissellement local.

I.1.3.2. Crues

En se référant sur leurs genèses, la différence entre les crues et les inondations devient plus complexe. Selon Lang et Claudet, (2005); Yahiaoui, (2012), le terme "crue" désigne le dépassement d'un certain débit ou d'une certaine hauteur par un cours d'eau.

I.1.3.3. Risque

Le concept de risque relatif aux inondations est en soi relativement complexe parce qu'il doit être défini en considérant simultanément des phénomènes physiques (comme la présence d'eau), et une occupation du sol qui devient vulnérable de cette présence d'eau (Reynard et *al.*, 2006; Arthur C et *al.*, 2001). Le risque désigne également les conséquences dommageables ou le degré attendu de perte résultant d'un danger pour un élément donné en péril, pendant une période de temps spécifiée (Reynard et *al.*, 2006; Ali et *al.*, 2016). Il est à obtenir à partir d'une combinaison de deux facteurs réputés indépendants que sont: « aléa » et « vulnérabilité » , (IPCC, 2012). Cette figure 2 nous montre que risque majeur est la conséquence d'un aléa d'origine naturelle ou humaine, dont les effets peuvent mettre en jeu un grand nombre de personnes, occasionnent des dégâts importants et dépassent les capacités de réaction des instances directement concernées.

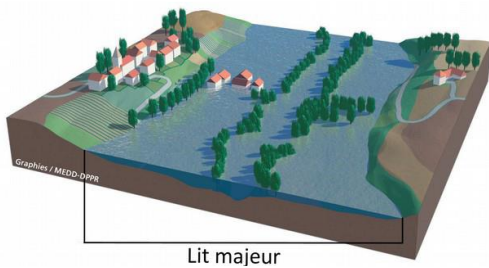


Figure 2: Illustration du risque majeur (MEDD, 2004).

I.1.3.4. Aléa

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 (Detrembleur et al, 2009 ; Schneiderbauer et al, 2004). Elle est la manifestation d'un phénomène naturel d'occurrence et d'intensité donnée (MEDD, 2004) (figure 3).



Figure 3: Illustration de l'aléa (MEDD, 2004).

Les aléas naturels qui peuvent être aggravés par les activités anthropiques sont classés comme suit :

- a) Aléas géophysiques : tremblement de terre, glissements de terrain, activité volcanique,
- b) Aléas hydrométéorologiques : inondations, tempêtes tropicales, sécheresse
- c) Aléas biologiques : épidémie de maladie, etc. (UNISDR, 2009). Dans ce travail, nous étudions un des aléas hydrométéorologiques qui est l'inondation.

I.1.3.5. Enjeu

Comme l'illustre cette figure 4, l'enjeu est l'ensemble des personnes et des biens socio-économiques se trouvant dans un milieu naturel donné, susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel.

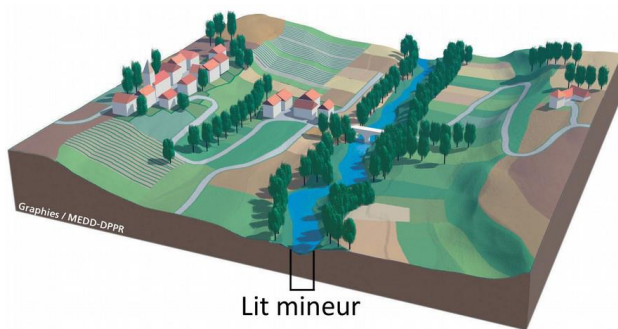


Figure 4: Illustration de l'enjeu (MEDD, 2004).

I.1.3.6. Vulnérabilité

La vulnérabilité est le niveau d'exposition des communautés ou des populations aux aléas. Elle justifie une condition résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques ou environnementaux, qui prédispose des éléments exposés à un aléa à subir des dommages (Reghezza, M, 2006).

La vulnérabilité exprime et mesure le niveau de conséquences prévisibles de l'aléa sur les enjeux. Différentes actions peuvent la réduire en atténuant l'intensité de certains aléas ou en limitant les dommages sur les enjeux.

I.1.3.7. Changements climatiques

L'inondation est l'une des conséquences provoquées par des changements climatiques. Ces derniers se génèrent suite à une modification des paramètres du climat qui s'effectue à long terme dans une région du globe ou sur la terre dans son intégralité. La notion de changement climatique est aujourd'hui associée au réchauffement climatique qui a débuté dans le monde il y a quelques décennies (Duvat, 2015). Ces changements peuvent être dus à des processus intrinsèques à la Terre, à des influences extérieures ou, plus récemment, aux activités humaines.

Le changement climatique anthropique est le fait que des émissions de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, et N₂O), engendrées par les activités humaines, modifiant la composition de l'atmosphère de la planète (GIEC, 2007; Mapatano, 2015).

I.1.3.8. Carte et cartographie

Une carte est une représentation géométrique plane, simplifiée et conventionnelle, de tout ou partie de la surface terrestre, dans un rapport de similitude convenable qu'on appelle l'échelle.

Cette dernière s'exprime normalement par une fraction telle que 1: 50 000, qui signifie que 1 millimètre sur la carte représente 50 000 millimètres (soit 50 m) sur le terrain¹. Pour cette étude, l'échelle graphique numérique est de 1/750000.

La carte des risques d'inondation fournit un soutien pour les activités de planification et les plans d'atténuation qui sont essentiels pour protéger à la fois les activités agricoles et les infrastructures existantes contre les inondations futures (Faye, 2021; Alex et al., 2022).

La cartographie est l'ensemble des études et des opérations scientifiques et techniques intervenant dans l'établissement des cartes ou plans, à partir des résultats d'observations directes ou de l'exploitation d'une documentation préexistante (Brachet et al., 1997).

Elle constitue un outil opérationnel en temps quasi-réel du risque d'inondation en milieu urbain et périurbain pour pouvoir soutenir la gestion des mesures d'urgence afin de réduire les impacts humains des inondations (Mini et al., 2005; Liniger et al., 2008; Ntumba, 2015; Sahar et al., 2019).

Après avoir défini certaines notions essentielles pour comprendre le risque d'inondation, des théories relatives à la caractérisation, à l'évaluation et à la gestion du risque d'inondation revêtissent d'une importante place dans cette étude.

I.2. Caractérisation, évaluation et gestion du risque d'inondation

I.2.1. Caractérisation du risque d'inondation

Le risque d'inondation est la conséquence de deux composantes : l'eau qui peut sortir de son lit habituel d'écoulement et l'homme qui s'installe dans l'espace alluvial pour y implanter toutes sortes de constructions, d'équipements et d'activités.

Le risque est le rapport entre la vulnérabilité et la capacité face à un aléa en détermine son degré d'exposition selon la formule suivante :

$$\text{Risque} = \frac{\text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité}}{\text{Capacité}}$$

¹ <https://www.universalis.fr/encyclopedie/cartographie/>

Les influences du risque d'inondation sont expliquées comme suit :

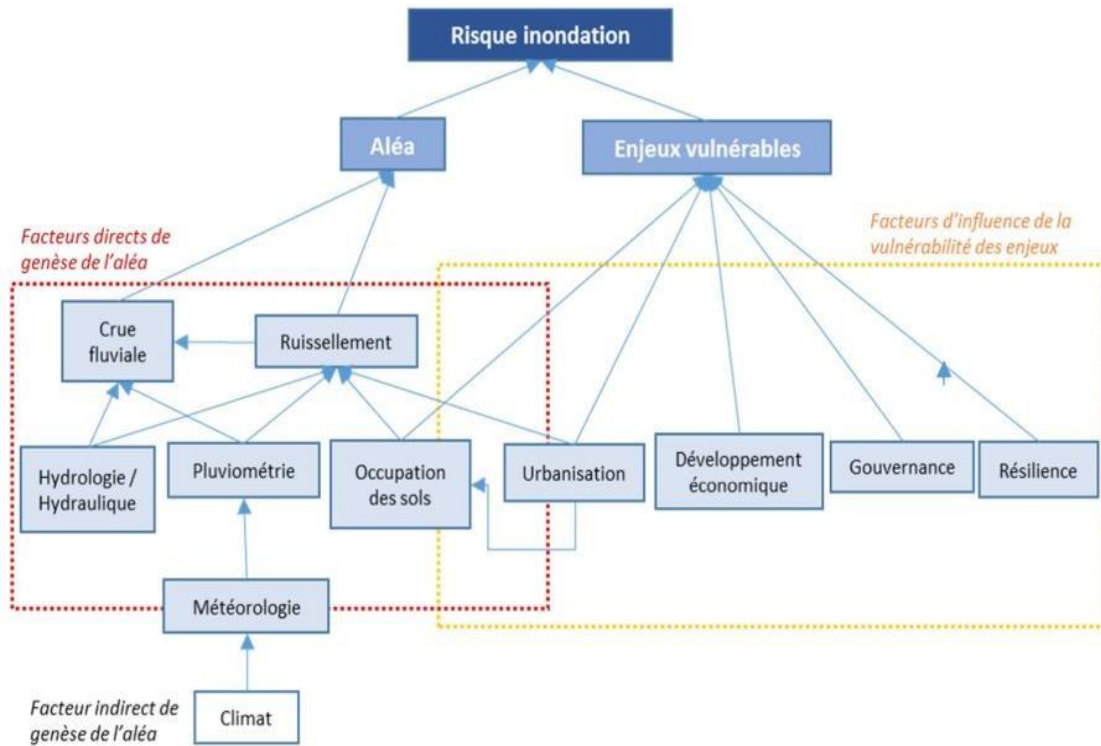


Figure 5: Représentation simplifiée des liens entre le risque d'inondation et ses composantes, (Kovacs et al, 2017)

Le risque d'inondation est également le résultat de multiples facteurs. Selon cette approche simplificatrice (figure 5) utilisée par Kovacs et al (2017), le risque d'inondation, comme tout autre risque de catastrophe, peut se caractériser par l'exposition des enjeux vulnérables à un aléa, en l'occurrence un territoire en présence temporaire d'eau. Ces deux facteurs principaux (enjeux et aléa) sont eux-mêmes influencés par de multiples facteurs interconnectés, tels que l'occupation des sols, l'urbanisation et la météorologie (Renard et al, 2015).

I.2.2. Les conséquences des inondations

Au fil du temps, les inondations restent une préoccupation la plus importante dans le monde entier car les conséquences restent toujours énormes dans tous les domaines de la vie. En France par exemple, leur impact économique direct en fait le risque naturel le plus préjudiciable avec 66 %, soit 18,31 milliards d'euros sur 27,8 milliards, des indemnités ont été versées au titre des inondations pour la période 1982-1995 (Gendreau et al, 2010).

Cependant, lorsque la durée de submersion est importante (supérieure à 24 h voire 48 h), l'eau devient sale et contaminée par les égouts (Fischhoff, 1978).

L'ampleur des impacts humains, économiques et environnementaux peuvent survenir et diffère selon caractéristiques du milieu qui influencent le déroulement des crises.

I.2.2.1. Conséquences économiques

Les inondations détruisent les infrastructures ou les rendent longtemps inexploitablement lorsqu'elles sont en dur, en particulier pour la très lente sortie des eaux (Schmitt & Nobelis, 2007). Cette catastrophe naturelle entraîne la perte de grandes quantités de biens matériels, à laquelle il faut ajouter le coût de la reconstruction des infrastructures démolies à chaque événement. Les zones de RUKARAMU et GATUMBA ne sont pas éloignées de cette préoccupation. Elles connaissent des événements les plus réguliers chaque année, ce qui justifie que les pertes économiques sont énormes. Elles affectent toutes les populations mais les plus pauvres sont souvent sévèrement beaucoup plus menacées à cause de manque de moyens pour prévenir et ou s'adapter aux risques d'inondations (Landmann, 2016)

I.2.2.2. Conséquences sanitaires

Pour l'homme, les inondations occasionnent des centaines voire des milliers de morts et/ou des blessés dans le monde (MEDD, 2004).

Une submersion dont la hauteur d'eau supérieure à 50 cm a été généralement considérée dangereuse (Arthur, 2001).

Les inondations augmentent le risque de maladies féco-orales et transmettent des agents pathogènes tels que le paludisme, la dengue, la leptospirose, la fièvre jaune ou le choléra. Les personnes peuvent également être blessés par la destruction des maisons et des routes, la chute d'arbres, des lignes électriques ou d'autres débris³.

I.2.2.2. Conséquences environnementales

A côté de pertes humaines et matérielles engendrées par les inondations, s'ajoutent les ravages occasionnés aux sols. Bien que les pertes soient beaucoup plus difficiles à chiffrer, ils sont, à l'évidence, très élevés (Mahutin, 2014).

Les conséquences environnementales des inondations sont généralement des dommages aux terres agricoles, dommages aux cultures et à la production alimentaire.

³ <https://www.projetecolo.com/inondations-causes-et-consequences-433.html>

De plus, les inondations répandent également la pollution qui engendre des nuisances aux animaux et aux humains (Godschalk, 2003).

I.2.3. Evaluation du risque d'inondation

L'évaluation de la vulnérabilité humaine et matérielle à un aléa d'inondation, est réalisée à l'échelle spatiale. Le niveau de risque est exprimé par l'indice de risque d'inondation (IRI) obtenu en utilisant la formule :

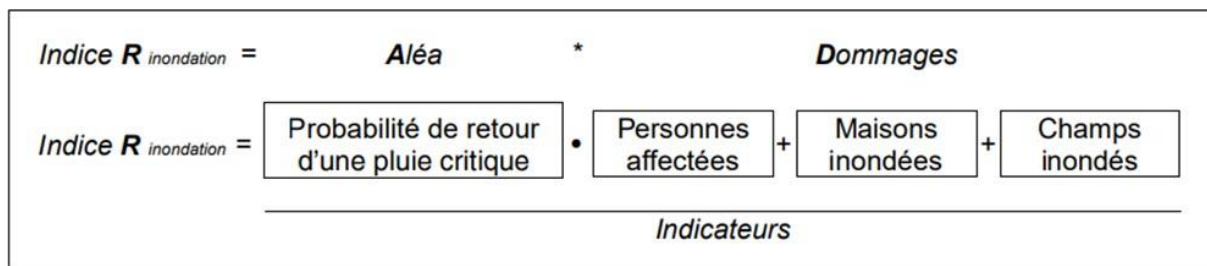


Figure 6: Formule et indicateurs utilisés pour déterminer l'IRI (Quenault, 2015).

Selon (Serre, 2011 ; Veyret, et *al.*, 2013), pour analyser l'aléa d'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. De plus, d'après (Tanguy, 2012), le choix d'utiliser trois caractéristiques les plus susceptibles d'influencer la vulnérabilité a été adopté. Il s'agit de l'étendue spatiale de l'inondation, la hauteur d'eau dans les zones submergées et la durée de l'inondation. Pour cette étude, il s'agit entre autres de l'étendue spatiale de l'inondation, de la hauteur et du débit des eaux pour la rivière Rusizi ainsi que la hauteur et l'altitude des eaux du lac Tanganyika.

I.2.4. La gestion intégrée du risque d'inondation (GIRI)

La GIRI est une approche opérationnelle qui consiste à considérer trois volets complémentaires et interconnectés : le volet de prévention et d'atténuation, le volet de gestion de crise et le volet de retour d'expérience (Hellmuth, 2007 et Kovacs et *al.*, 2017).

Le volet de prévention et d'atténuation prend appui sur la connaissance et la géolocalisation des zones à risque pour réduire les vulnérabilités humaine, économique et environnemental, en conscientisant du risque à la population ou encore en limitant l'installation des biens et des personnes dans les zones inondables.

Elle est basée, tout comme la phase de retour d'expérience, sur l'analyse des crues potentielles ou passées afin d'aider la compréhension des phénomènes physiques et de

limiter le risque à long terme (Germain, 1995 ; Hostache et *al.*, 2005).

Le volet de gestion de crise quant à elle correspond à des actions à mener en état d'urgence. Une des visions majeures est ainsi d'avoir l'idée dans les meilleurs délais sur l'ampleur précis de l'inondation mais aussi la géolocalisation des populations les plus vulnérables. L'objectif est de déployer le plus vite possible les moyens d'actions et de secours les plus appropriés pour atténuer les conséquences humaines et matérielles des vulnérables (Henry, 2004, Reghezza-Zitt, 2019). En matière de politique de réponse aux catastrophes naturelles et aux catastrophes d'inondation en particulier, ce volet est le plus important. Les actions possibles peuvent être classées en trois grandes composantes complémentaires mais de nature différente, à savoir : la prévention, la gestion de crise, la culture du risque.

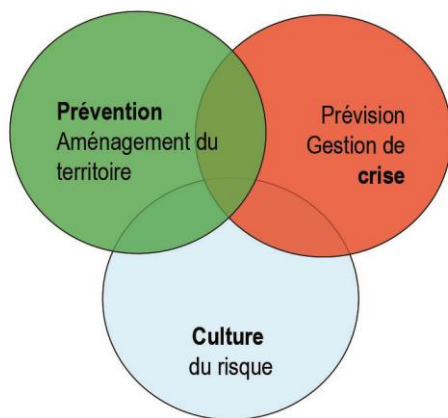


Figure 7: Trois grandes composantes de la phase de gestion du risque d'inondation (Gilard, 1998)

La prévention vise à prendre des mesures pour s'assurer que le niveau de risque que l'on a pris est acceptable pour garantir une bonne connaissance de ce niveau de risque.

La gestion de crise est l'ensemble des mécanismes assurantiels qui, permettent, en reconnaissance du niveau de risque (résiduel) accepté, de mettre en place les mesures *ad hoc* pour réduire l'impact des inévitables catastrophes et d'aider à la résilience des individus et des territoires. À l'inverse de la prévention, c'est bien une approche événementielle qui prédomine.

La culture du risque permet de partager des connaissances entre les personnes et les institutions concernées pour maintenir la conscience du risque accepté et la possibilité de survenue des crises afin de favoriser ainsi des réactions individuelles et collectives adaptées aux situations de crise, tant en termes de prévention que de comportement (Gilard, 1998; Armand, 2013).

La **phase de retour d'expérience** vise à conclure sur les conséquences de l'inondation, à en quantifier les impacts humains et économiques mais aussi à évaluer l'efficacité des moyens déployés lors de la phase de gestion de crise.

Cette phase permet de mettre en place ou d'améliorer les politiques de prévention du risque et de protection des éléments vulnérables face à une inondation future (Smith, 1997 ; Hostache et al, 2009).

La compréhension de ces différents concepts portant sur le risque d'inondation, la description des facteurs de la genèse des inondations ainsi que le cadre théorique pour leurs gestions ci-haut pris isolément ne suffisent pas pour comprendre l'aléa global de la zone d'étude. Une délimitation des zones inondables à travers une cartographie annuelle s'avère donc nécessaire. C'est dans ce cadre que des matériels et la méthodologie à utiliser doivent être tout d'abords relevés avant l'étude proprement dite.

CHAPITRE II. MATERIELS ET METHODES

Cette deuxième partie présente les matériels utilisés dans cette étude et la géolocalisation du site d'étude sur lequel les approches méthodologiques seront évaluées.

II.1. Matériels utilisés

- GPS
- Appareil photo
- Carnet de terrain
- Bottes et autres équipements de protection Individuelle

II.2. Délimitation de la zone d'étude

Les zones de Gatumba et Rukaramu sont les unes des zones de la commune Mutimbuzi de la province de Bujumbura se trouvant à l'Ouest du Burundi. Elles sont en effet situées entre les méridiens 29°15' et 29°18' de longitude Est d'une part et les parallèles 3°15' et 3°21' de latitude Sud d'autre part. Ces zones couvrent spatialement une superficie totale de 9015,635 ha et sont délimitées par la République Démocratique du Congo (RDC) à l'Ouest, le lac Tanganyika au Sud et la commune Gihanga au Nord ainsi que la commune Ntahangwa au Sud-Est.

Cette zone d'étude comprend au total 14 quartiers/collines plus ou moins habités et exposés aux inondations. Son espace géographique contient le système d'eau associé aux rivières Rusizi, Mpanda et Mutimbuzi. On y trouve des cours d'eau permanents et saisonniers, ainsi que le lac Tanganyika (figure 8). Cependant, notre travail porte sur une période combinant les années de 2009 à 2022 hormis l'an 2020 suite à l'indisponibilité des images satellitaires.

Cartographie des zones à risque d'inondation dans des aires des zones GATUMBA et RUKARAMU en commune Mutimbuzi de la province de Bujumbura (Burundi).

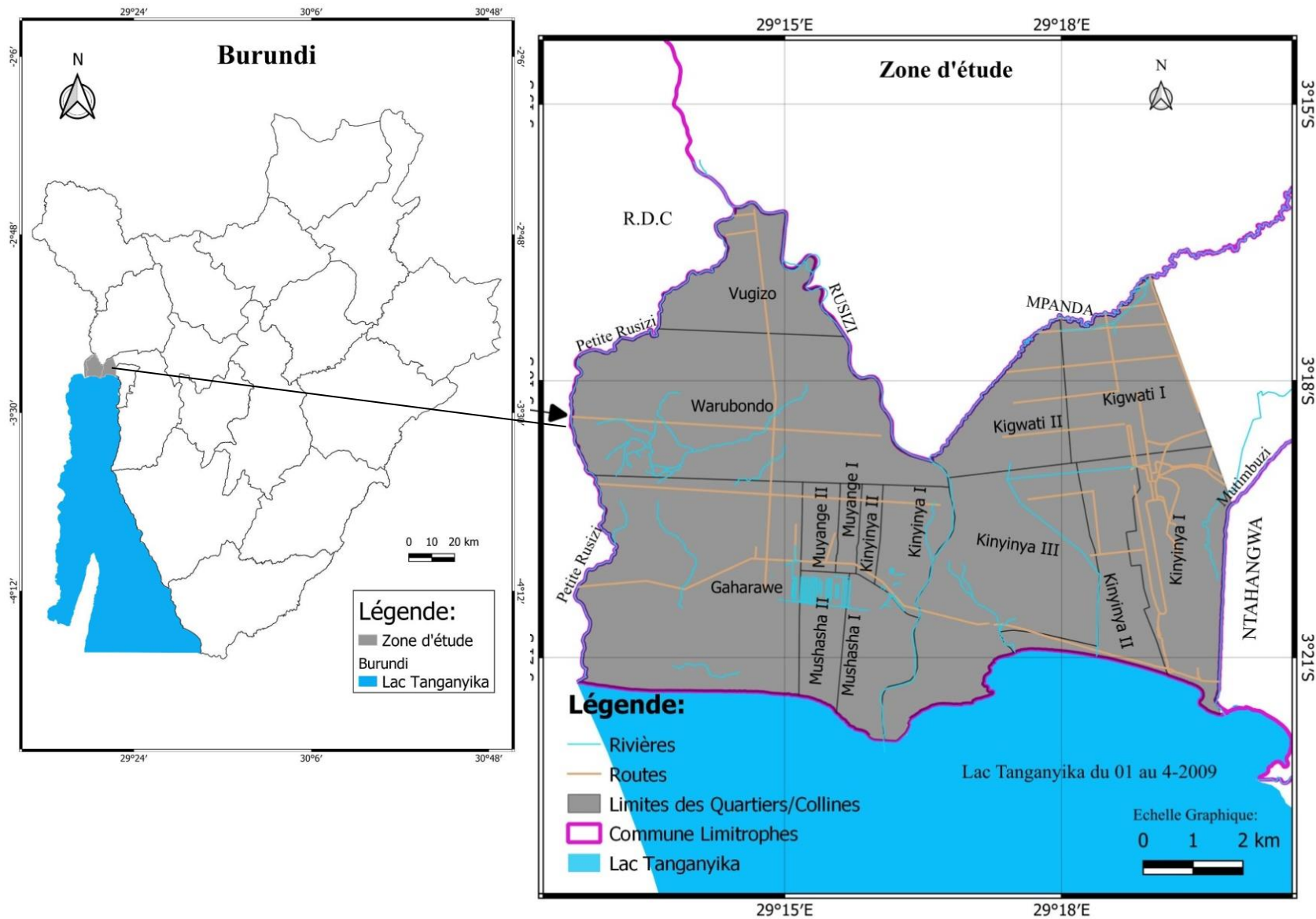


Figure 8: Localisation géographique de la zone de travail par rapport au pays.

II.3. Description de la zone d'étude par rapport au bassin versant de la rivière Rusizi et du lac Kivu

La plaine de la Rusizi est drainée par beaucoup de rivières permanentes et saisonnières dont la plus importante est la Rusizi. Le réseau hydrologique de la plaine fait partie du bassin du lac Tanganyika, lui aussi faisant partie du grand bassin du Congo. La Rusizi, cours d'eau central et le plus important de la plaine, draine l'excédent des eaux du lac Kivu depuis 1463 m d'altitude (Figure 10). Le bassin versant de la Rusizi est partagé par trois pays à savoir le Burundi, le Rwanda et la R.D.C (Figure 9). Il comprend beaucoup de rivières et deux grands lacs (lac Kivu au Nord et lac Tanganyika au Sud) dans lesquels la rivière Rusizi prend sa source dans le Kivu et se déverse dans le Tanganyika. Ce bassin versant connaît une altitude plus élevée au Nord de la zone d'étude (plus de 3300m) et une faible altitude inférieure à 775m dans la zone d'étude. Notre étude ne couvre que la terminaison Sud de la Rusizi.

Cartographie des zones à risque d'inondation dans des aires des zones GATUMBA et RUKARAMU en commune Mutimbuzi de la province de Bujumbura (Burundi).

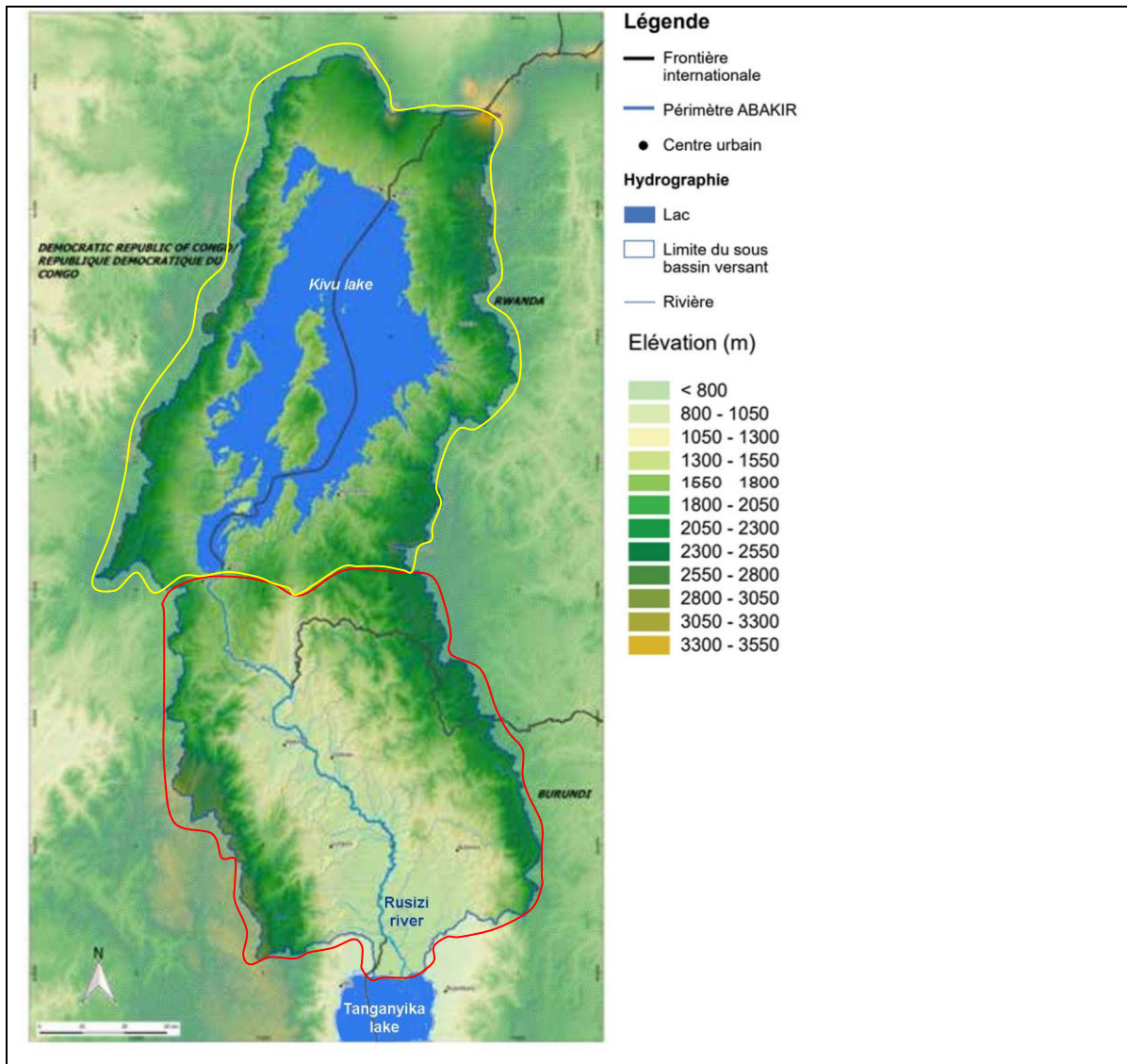


Figure 9. Bassin versant de la rivière Rusizi et du lac Kivu (ABAKIR, 2020)

Outre ces affluents du lac Tanganyika, les zones Gatumba et Rukaramu se logent dans un déversoir de nombreux affluents de la rivière Rusizi qui font que cette rivière soit grande en son aval. Il s'agit entre autres de la Ruhwa, Nyakagunda, Nyamagana, Muhira, Kaburantwa, Kagunuzi, Kajeke, Luvungi, Shange, Nyarundari. C'est après un parcours d'environ 150 km du lac Kivu que la rivière Rusizi reçoit ces affluents qui descendent des massifs d'Itombwe du côté de la République Démocratique du Congo et de la Kibira du côté burundais.

Dans la plaine de la basse Rusizi, il s'agit notamment des rivières Kajeke et Mpanda. La Kajeke prend ses origines dans les contreforts du Mumirwa. Elle entre dans la Réserve où elle est canalisée jusqu'au niveau de l'étang Kimirabasore. Elle n'a pas de sortie directe dans la Rusizi mais est connectée à travers les marais.

La rivière Mpanda quant à elle, prend son origine dans la forêt de la Kibira. Au Nord de notre site d'étude, la Rusizi se subdivise en deux branches : « Grande Rusizi » à l'Est et « Petite Rusizi » à l'Ouest. C'est là où cette rivière commence à couler avec une petite vitesse d'écoulement suite cette subdivision et à sa faible altitude (764m à 774m) par rapport à celui qu'elle a à son amont (1461m). Elle continue avec une altitude (775m à 767m) tendant vers l'inclinaison en son aval (lac Tanganyika) (figure 10). Comme le démontre la figure 9, la rivière de la Rusizi reçoit l'eau provenant de plusieurs affluents qui prennent leurs sources dans les hautes altitudes. Ces altitudes varient entre 1100 et 3100 m d'altitude alors que l'altitude de notre zone d'étude varie de 760 à 775 m (plaines) (figure 36). De plus, l'eau de la rivière Rusizi connaît une élévation maximale de 1461m au lac Kivu (sa source au point A) et une élévation minimale de 767m au Lac Tanganyika (son exutoire au point B) (figure 10). Or, le lac Tanganyika est caractérisé par une altitude variante de 773,86 à 776,98m d'altitude (figure 44 et annexe 2). Ces valeurs sont très proportionnelles, égales voire supérieures à celles des zones Gatumba et Rukaramu et de la rivière Rusizi, ce qui causent des inondations suite à la montée des eaux du lac Tanganyika, au débordement du lit mineur de la Rusizi ou en cas des événements climatiques. Ce qui augmente le risque des inondations suite à cette orientation concave de la rivière Rusizi depuis l'amont à son aval (figure 10).

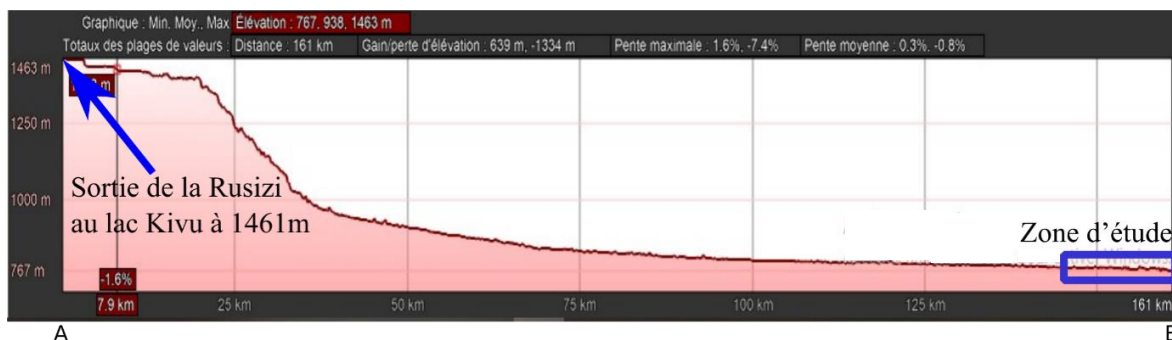


Figure 10: Profil en long de la rivière Rusizi

II.4. Outils d'extraction de données et de traitement des résultats

Les travaux d'exploitation des imageries satellitaires, d'extraction et de traitement des informations spatio-temporelles des inondations ont pu être concrètement réalisés suite à l'usage de certains matériels à savoir :

- Images satellitaires de Maxar Technologies, CNES/Airbus, Landsat/Copernicus disponibles sur Google Earth.
- Les outils SIG et de la télédétection pour une exploration méthodique des imageries satellitaires

- Outils de traitement de données et résultats

II.5. Approche méthodologique

Pour cette étude, les risques d'inondations sont évalués dans le temps et dans l'espace. Pour identifier et définir les zones inondables du site d'étude ainsi que la typologie des inondations qui les menacent, une méthode de digitalisation des imageries satellitaires à très haute résolution spatiale disponibles dans Google Earth a été adoptée.

Cette méthode est accompagnée par une analyse de trois facteurs (environnementaux, hydrologiques et climatiques) à partir desquels des données de l'IGEBU concernant la période de 2009 à 2022 ont été traitées et utilisées. En marge des facteurs environnementaux, les autres facteurs sont étudiés en fonction du temps. Cette méthodologie est aussi appliquée par Kovacs (2017) dans son étude sur les inondations dans les pays en développement en développant quelques paramètres communs à ceux que nous avons développés dans cette étude. De ce fait, les différents niveaux de vulnérabilité humaine sont exprimés en fonction de l'augmentation et/ou de la réduction des superficies bâties inondées chaque année, ce qui permet une mise en relation directe avec les caractéristiques de l'inondation en cours.

Les images satellitaires de la zone d'étude comptant pour les mois de novembre et décembre 2022 ne sont pas disponibles pendant la période de récolte de données et par conséquent cette période a été ignorée. De plus, pour calculer les superficies inondées, des opérations ont été généralement considérées jusqu' à un centième près.

Cependant, le présent travail consiste à utiliser les technologies de télédétection et les SIG pour caractériser l'évolution spatio-temporelle des inondations de notre zone d'étude.

Les logiciels utilisés sont essentiellement pour l'extraction des informations portant sur les inondations et leurs conséquences à partir des imageries satellitaires, calcul et représentation graphique des précipitations, des superficies inondées ainsi que l'évolution en hauteur de la Rusizi et l'évolution latérale du lac Tanganyika.

Avec la méthodologie appliquée dans cette étude, le traitement des données de l'IGEBU nous permet cependant de comprendre si et comment la dépendance entre l'augmentation et ou la diminution de la hauteur et du débit des eaux de la Rusizi ainsi qu'une interaction entre la hauteur et l'altitude des eaux du lac Tanganyika sont liées à la naissance des inondations dans notre site d'étude.

L'approche méthodologique (figure 11) comprend cinq composantes en fonction des objectifs à atteindre :

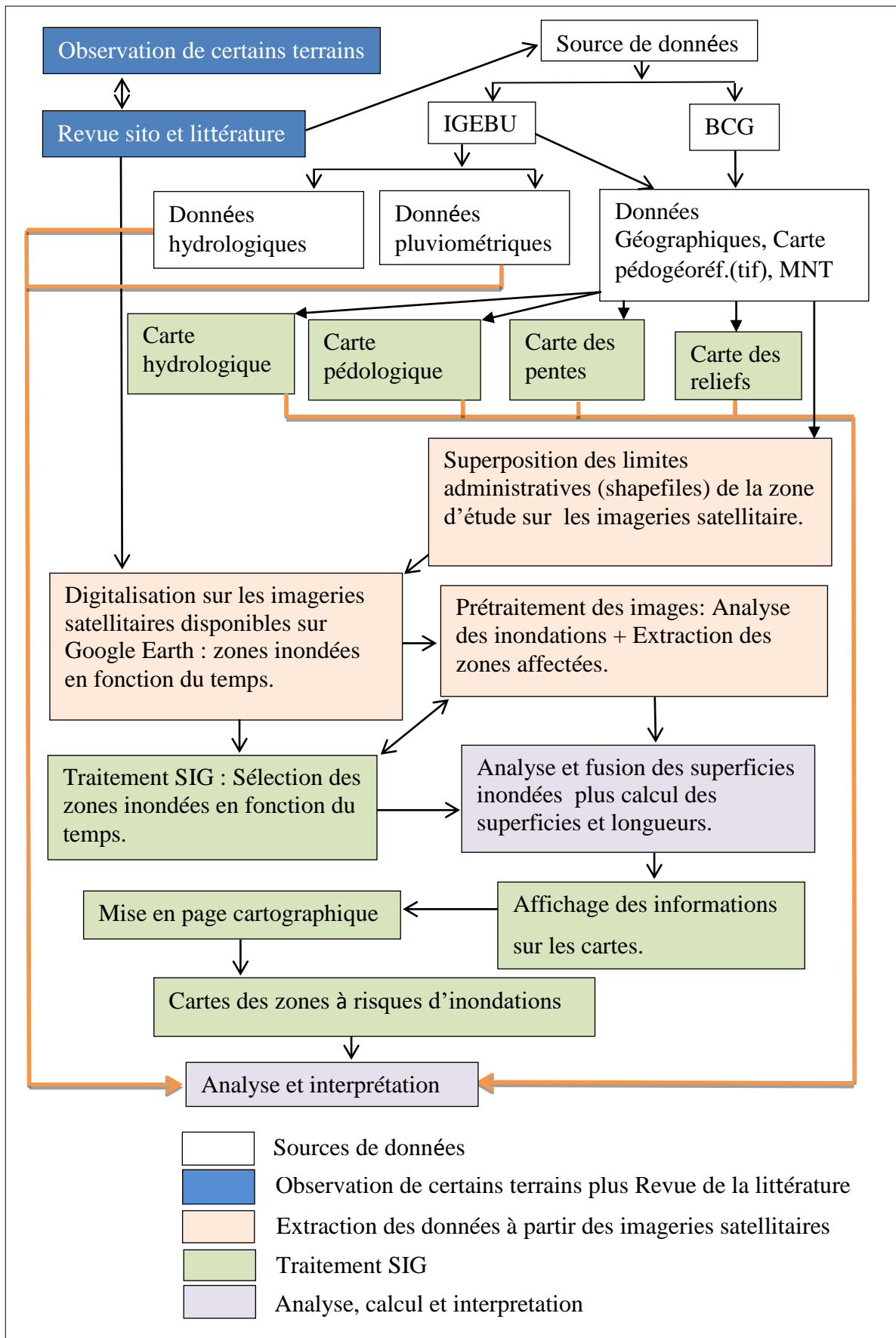


Figure 11: Représentation schématique de l'approche méthodologique

II.6.1. Visite de terrain et revue bibliographique

Des différents ouvrages scientifiques et visites de certains accessibles nous ont permis de bien cadrer notre étude et d'améliorer la connaissance de notre zone d'intérêt. Outre les connaissances acquises lors de notre cursus, des études présentant des similarités avec notre sujet de travail ont été consultées. De cette documentation, une compréhension des avancées dans les études des risques et catastrophes, de la dynamique spatio-temporelle de l'environnement en est ressortie, ce qui nous a guidés dans l'élaboration de notre approche méthodologique et a orienté notre discussion.

II.6.2. Extraction des données

Afin de réussir l'extraction des informations fiables sur l'origine des inondations lors de la digitalisation, nous avons besoin de définir des conditions hydrographiques de la zone d'étude. Pour extraire les zones inondables, trois phases ont été suivies. Il s'agit entre autres du choix de la période d'étude et des images satellitaires correspondant à la période d'étude, digitalisation des zones inondables et prétraitement de couches vecteurs.

II.6.2.1. Choix de la période d'étude et des images

En se référant sur une corrélation importante entre les inondations et les précipitations, la période d'étude comprend six mois (de novembre à avril) qui selon les données pluviométriques collectées par l'IGEBU, constituent une grande saison pluvieuse et présentent généralement d'un taux élevé au cours de l'année. Les images exploitées sont celles qui correspondent aux mois de novembre, décembre, janvier, février, mars et avril de chaque année depuis 2009 jusqu'à 2022 excepté l'année 2020 suite à la non-disponibilité des imageries satellitaires. Cependant, seule la zone inondée la plus étendue est prise en compte chaque année.

Dans cette même optique, les images satellitaires constituent la matière brute pour notre étude. Le choix de ces images a été dicté par leur disponibilité en fonction du temps et de l'espace ainsi que leur visibilité. Ainsi, des images des satellites de Maxar Technologies, CNES/Airbus, Landsat/Copernicus disponibles sur Google Earth ont été utilisées pour extraire les zones inondables au cours des années 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2021 et 2022.

II.6.2.2. Digitalisation des zones inondables et de la montée des eaux du lac Tanganyika ainsi que prétraitement de couches vecteurs.

Après les analyses préliminaires des imageries satellitaires disponibles sur Google earth pour identifier les zones inondables et les différents types d'inondation, ces dernières sont digitalisées et enregistrées en format KML/ KMZ selon le choix. De plus, ces images subissent un certain nombre d'opérations de prétraitement à partir du logiciel approprié.

Ces analyses ont pour but de faciliter leur caractérisation et leur différenciation ainsi que leur interprétation.

Lorsqu'ils sont concrètement réalisés, ils contribuent à une meilleure extraction de l'information utile (Ndikubwayo, 2018). La méthodologie adoptée pour l'extraction et le prétraitement de données est libérée comme suit :

- 1) Superposition des limites administratives (couches shapefiles) de la zone d'étude sur les imageries satellitaires dans Google Earth pour éviter de dépasser ces limites en identifiant les zones bâties et les superficies inondables de la zone.
- 2) Digitalisation de zones inondées et du niveau des eaux du lac Tanganyika :
 - a) Pour les superficies inondées et bâties, chaque vectorisation est mensuelle pendant une période 10 ans 4 mois qui font la période d'étude. En outre, seules les KML/KMZ qui représentent des zones inondées les plus vastes sont considérés.
 - b) Concernant le lac Tanganyika, les mesures de la montée en longueur des eaux sont aussi évaluées à l'échelle mensuelle en respectant un angle droit par rapport au lac afin d'aboutir à un meilleur résultat. Cette montée a été étudiée pour les années de 2012, 2018, 2021 et 2022. L'an 2009 est exclu de cette étude car elle est prise au référentiel. Quant aux années de 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 et 2019, elles sont aussi marginalisées de cette étude car elles présentent annuellement un seul niveau (évolution) des eaux du lac et par conséquent ils ont été considérés stables et négligés. Seule une montée considérable a été prise en compte chaque année. Le critère fondamental de la sélection se réfère sur les résultats d'une année qui représentent au minimum deux couches shapefiles (lignes) d'évolution différente.

En effet, pour éviter des fausses mesures, des opérations ont été réalisées sur les mêmes shapefiles (lignes) correspondant aux différents mois de chaque année de la période d'étude. Les couches (lignes) ont le même point de digitalisation étant superposées.

- 3) Identification de différents types d'inondation selon leurs définitions bien détaillées,

Cartographie des zones à risque d'inondation dans des aires des zones GATUMBA et RUKARAMU en commune Mutimbuzi de la province de Bujumbura (Burundi).

4) Enregistrement de vecteurs dans des fichiers créés et spécifiés pour les lieux vectorisés sous format KML /KMZ avec la date des images.

En effet, la détection des superficies inondées est fondée sur l'analyse des imageries satellitaires qui ont prouvé que les forêts, la végétation et les habitations inondées apparaissent ainsi dans des tons clairs sur l'image, ce qui permet généralement de les distinguer de ceux qui sont non inondés. C'est dans ce cadre qu'il est important de tenir compte de ce phénomène pour ne pas fausser la délimitation des zones inondées. Les images suivantes illustrent cette méthodologie :



Figure 12: Illustration de la détection des zones inondées à base des imageries satellitaires Google earth, 05/11/2020



Figure 13: Extraction des superficies bâties, Google Earth ; 11 novembre 2021.

Cartographie des zones à risque d'inondation dans des aires des zones GATUMBA et RUKARAMU en commune Mutimbuzi de la province de Bujumbura (Burundi).



Figure 14 : Evaluation et extraction de la montée des eaux du lac Tanganyika entre 2009 et 2022 à partir des images gratuites disponibles sur Google Earth



Figure 15: Evolution latérale sans retour du lac Tanganyika (2009 - 2022)

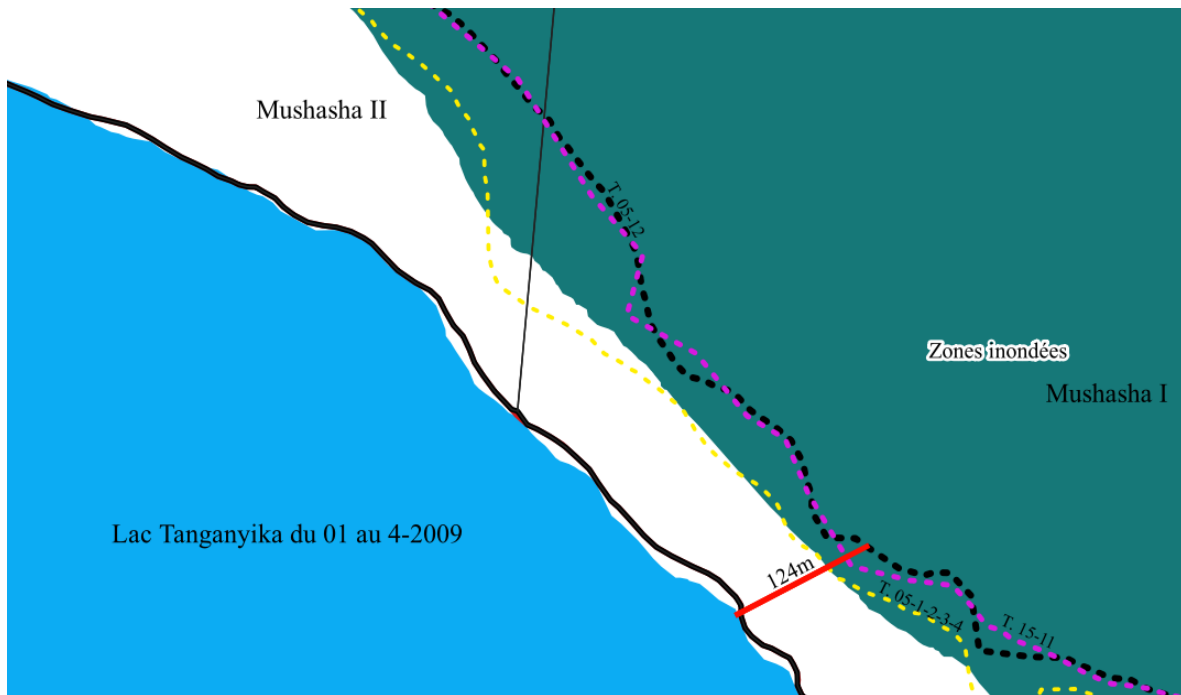


Figure 16: Mesures latérales de la montée des eaux du lac Tanganyika 2022 avec QGIS

De ces illustrations, l'évaluation de la montée en longueur des eaux du lac Tanganyika a été opérée à une dixième reprise équidistante tout au long des rives du lac Tanganyika entre les niveaux des eaux de ce dernier pris à la référence et celui de l'année à étudier.

Cette dernière a été évaluée à un rythme mensuel et seule la plus dominante est plus considérable annuellement.

Pour caractériser et découvrir les zones inondables et les différents types d'inondation, la technologie de télédétection ainsi que les SIG sont devenus des outils clés pour cette évaluation. De plus, des différentes méthodes et techniques ont été appliquées au cours de cette recherche. Il s'agit de l'analyse des imageries satellitaires et les méthodes hybrides dans un environnement de système d'information géographique (SIG). Dans le cadre de ce travail, l'occupation du sol et la couleur du paysage sont devenues des contribuables dans la détection des zones inondées que ce soient des bâties ou des zones occupées par des végétaux. Elles sont jugées grise-noirâtres pour les différencier de ceux qui ne sont pas inondées avant de les extraire.

Cependant la méthode de calcul des précipitations moyennes annuelles des stations de Mabayi, Aéroport et Mparambo est appliquée pour convertir les enregistrements recueillis quotidiennement dans ces jauges pour toute la période d'étude. Les différentes données géographiques ont fait objet de notre étude pour pouvoir digitaliser les périmètres

vulnérables aux inondations en utilisant l'application de Google earth pour extraire les zones inondables de la zone d'étude.

Les principaux éléments considérés sont le temps et les milieux inondés. Signalons que les données sont extraites à base des imageries satellitaires correspondant à la période d'étude.

II.6.3. Traitement SIG

II.6.3.1. Traitement de données avec le logiciel QGIS 3.28, 2-1

Parmi les différentes phases méthodologiques de cette étude, celle-ci est importante dans le processus de traitement des images satellitaires qui oriente l'ensemble du cheminement méthodologique. Il s'agit principalement de :

- (1) Charger de données géographiques (les rivières, limites administratives de zones et quartiers) dans le logiciel,
- (2) Charger des vecteurs KML/KMZ et les exporter en Shapefile afin de procéder à leurs traitements,
- (3) Vérifier le système de Coordonnées géographiques,
- (4) Convertir ces fichiers de format KML/KMZ en format communément appelé shapefiles;
- (5) Fusionner les vecteurs.

Avant de faire des traitements proprement dit, il est indispensable de créer un fichier qui combine les différentes couches de même période en une seule shapefile composée de plusieurs couches vecteurs. Cette démarche a été suivie pour faciliter la lecture des informations de la carte et la manipulation avec des calculs de superficies (polygone) et longueurs (lignes) afin que les traitements se fassent simultanément sur l'ensemble des couches vecteurs fusionnées. Cette opération a été réalisée avec le logiciel QGIS 3.28, 2-1.

La superficie est exprimée en hectare (ha) et la longueur en mètre (m).

II.6.3.2. Traitement de données avec de logiciel approprié

Les opérations suivantes ont été réalisées:

- a) Calcul des superficies totales des zones inondées au cours de chaque année,
- b) Représentation graphique et comparaison des superficies des zones inondées à ceux qui sont bâties pendant toute la période d'étude.
- c) Calcul des précipitations moyennes annuelles, de la turbidité et de la hauteur

moyenne annuelle des eaux de la Rusizi ainsi que de la montée des eaux du lac Tanganyika.

II.6.3.3. Représentation des informations sur les cartes

Pour faciliter la lecture des informations sur les différentes cartes de zones aux risques d'inondations de notre zone d'étude, des couches shapefiles (zones inondées) de même date ont été fusionnées en vue de les afficher et de calculer une superficie totale représentative annuelle. En outre, pour ne pas surcharger les cartes en affichant les informations, seuls les shapefiles représentant les zones bâties, les zones inondées et les zones bâties inondées les plus étendues ont été considérées.

CHAPTRE III. PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Pour réaliser cette étude, une méthodologie d'exploitation des imageries satellitaires a été mise en évidence. Cette dernière nous a permis d'étudier et de montrer la vulnérabilité de la zone de travail pour les périodes bien définies. Etant donné que notre étude est définie par l'analyse et l'évaluation de l'évolution spatio-temporelle des inondations dans les zones de Gatumba et Rukaramu, il nous est indispensable de mettre en exergue la vulnérabilité de ces zones ainsi que quelques facteurs intervenant dans la genèse des risques d'inondations à partir desquels des informations de base permettent une compréhension approfondie de ces derniers. En effet, pour avoir des résultats les plus fiables sur les zones inondables ainsi que les différents types d'inondations que subissent la zone de travail, des données de l'IGEBU relatives aux précipitations, au lac Tanganyika ainsi qu'à la rivière Rusizi ont été utilisées et traitées au préalable dans l'optique d'avoir une idée sur les causes probables de ce risque afin d'étudier la dynamique spatio-temporelle des inondations dans la zone d'étude.

III.1. Etude géodynamique de l'évolution spatio-temporelle de l'aléa d'inondation.

Depuis 2009 jusqu'en 2022, les zones périurbaines de Gatumba et Rukaramu sont régulièrement confrontées aux inondations d'ampleur qui diffère d'une année à une autre. Cette ampleur a été analysé quantitativement à l'échelle des périmètres vulnérables et nous a permis d'avoir des informations chiffrées sur les superficies des différentes zones inondées et d'en dégager leur dynamique ainsi que leur conséquence sur le bâti au fur du temps.

Au cours de chaque année, des superficies distinctes exposées aux différents types d'inondations et l'évolution ou la régression des superficies bâties ont été régulièrement observées et générées à travers une cartographie détaillée. A l'échelle annuelle, seule la superficie la plus étendue est considérée pour que les informations de la carte soient visibles et facilement compréhensibles. De plus, l'évolution du lac Tanganyika (montée latérale des eaux) a été mensuellement évaluée chaque année durant toute la période d'étude hormis celle de 2009 qui a été considérée comme référence et celle de 2020 au cours de laquelle, les images satellitaires ne sont pas disponibles au cours de la réalisation de cette étude. Il faut souligner également que seule l'évolution qui représente des résultats les plus chiffrés est considérée à l'échelle annuelle. Le niveau latéral des eaux du lac Tanganyika de chaque année est mesuré puis comparé par rapport à celui de janvier à avril 2009.

III.1.1 Etude des zones inondées (Année 2009)

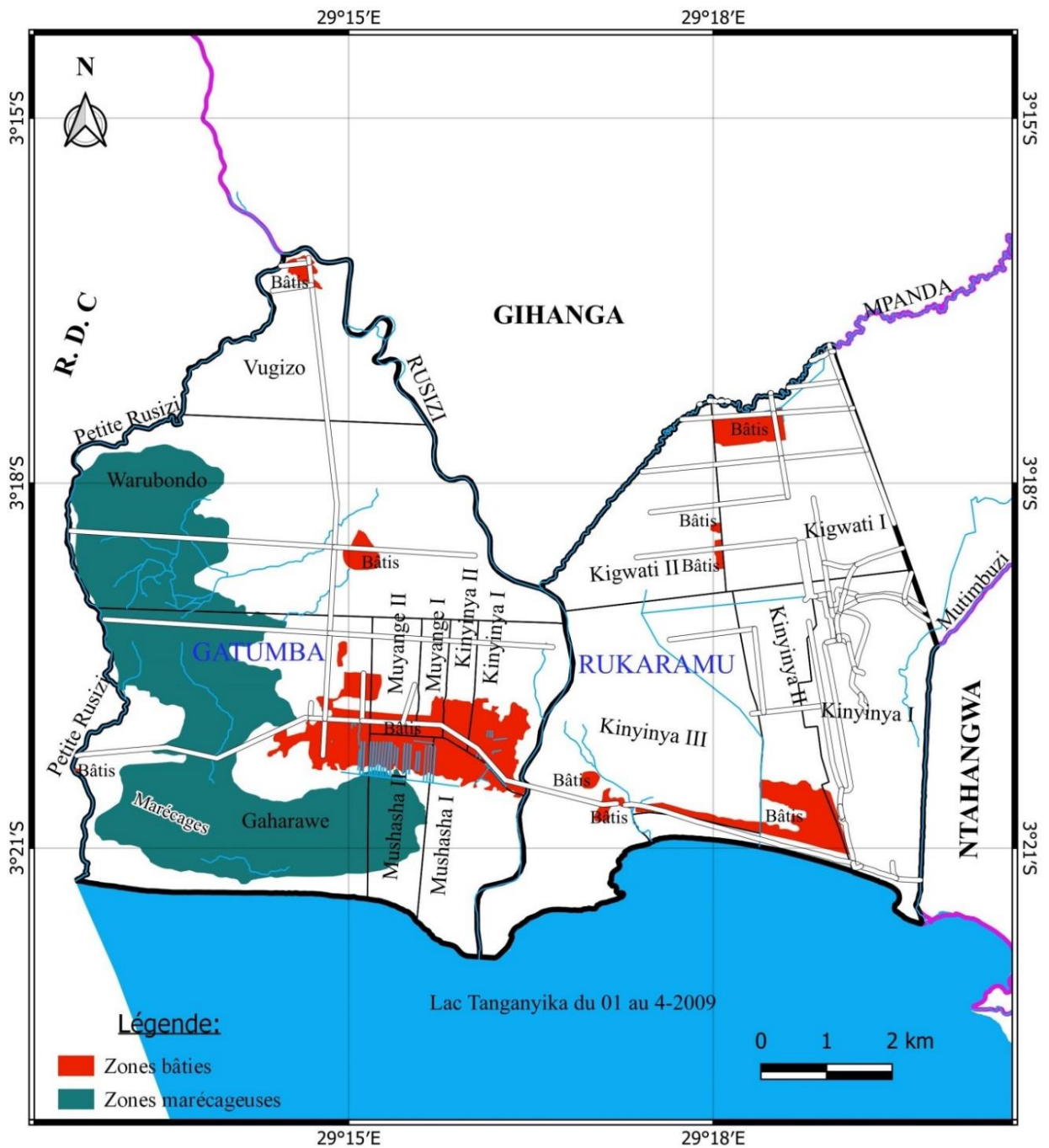


Figure 17: Carte des zones inondées comptant pour les années 2009, 2010 et 2011.

Depuis 2009 jusqu'en 2011, aucun changement d'occupation des eaux de différentes sources n'est observé dans la zone prise en considération pour étude. C'est dans ce cadre qu'une seule carte annuelle est représentative pour cette période. Durant cette dernière, seule la zone de Gatumba a connu des superficies marécageuses s'étendant essentiellement au mois de janvier sur 17,66% de la superficie totale de la zone d'étude (9015,635 ha).

Ces zones marécageuses se trouvent plus précisément dans les quartiers/collines Warubondo, Gaharawe et Mushasha II. La zone de Rukaramu quant à elle, ne connaît aucun type d'inondation. Pas de rivières saisonnières dans toute la zone d'étude. Pendant cette période, toute la zone d'étude est éloignée du risque d'inondation car aucun bâti n'est affecté par des inondations et par conséquent, aucun dégât humain ni matériel n'est enregistré.

Quant à la montée des eaux du lac Tanganyika, elle n'est pas prise en compte durant cette période car le niveau des eaux du lac Tanganyika de ces trois années est pris à la référence.

III.1.2. Etude des zones inondées (Année 2012)

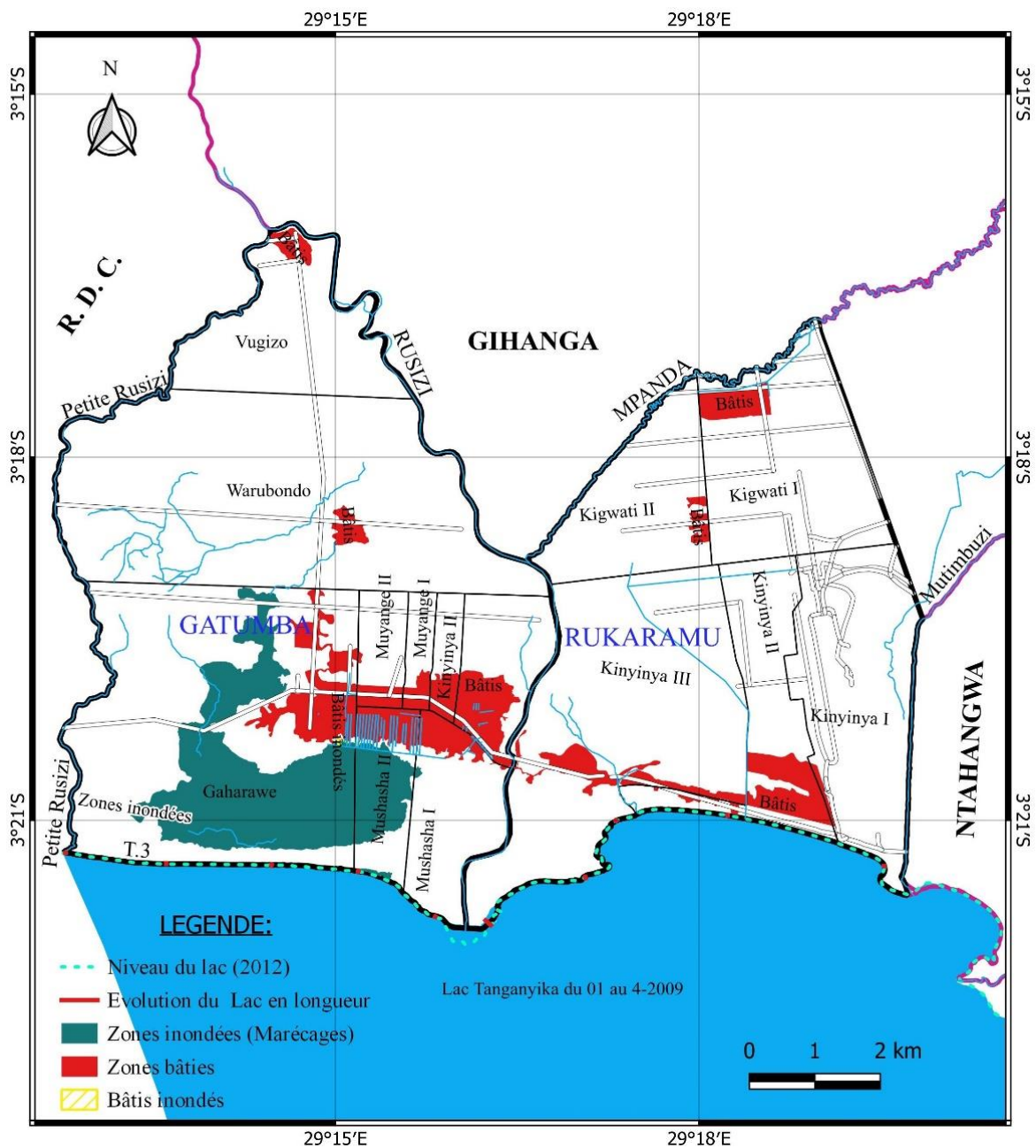


Figure 18: Carte des zones inondées (Année 2012).

Pour cette année de 2012, seule la zone de Gatumba connaît des inondations dues à la montée des eaux souterraines qui couvrent 7,43% de la superficie totale des zones Gatumba et Rukaramu. Cette montée date du mois de janvier. Elle monte affecte les quartiers/collines Gaharawe, Mushasha I et II. Généralement, ce type d'inondation dure et cause moins de dégâts par rapport aux autres types d'inondation.

Les rivières saisonnières n'ont pas existé cette année car elles sont provoquées par la sortie de la rivière Rusizi de son lit mineur. Ce qui n'a pas eu lieu. Concernant les bâtis, environ 660,25 ha des zones bâties semblent moins menacés avec seulement 0,67 ha de superficies bâties inondées. Quant à la montée des eaux du lac Tanganyika, elle varie en moyenne de - 0,5 à 8,6 m de longueur tout au long de l'année.

III.1.3 : Etude des zones inondées (Année 2013)

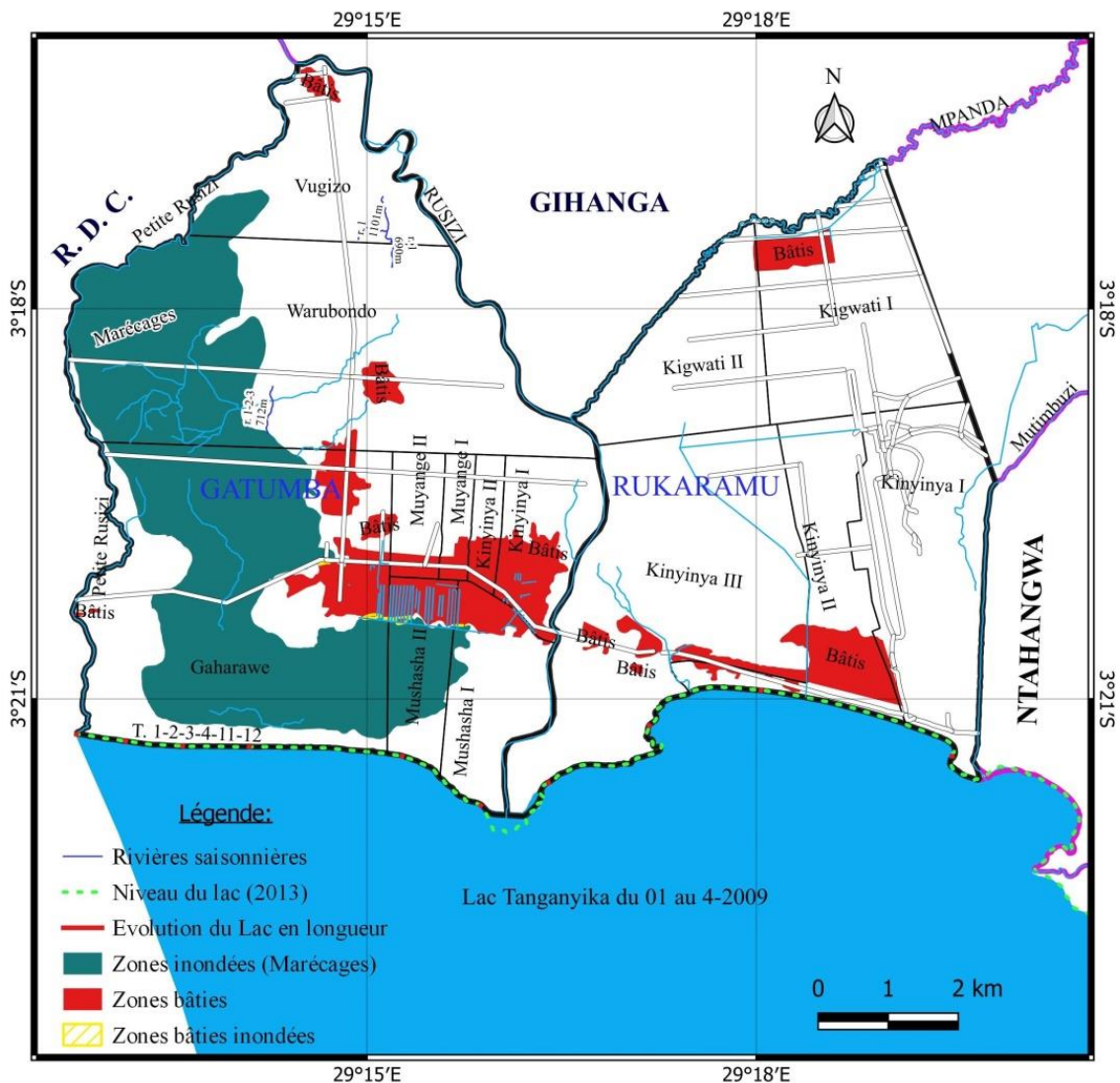


Figure 19: Carte des zones inondées (année 2013).

Selon les résultats obtenus à partir de cette figure 19, l'année 2013 est marquée par des inondations au mois de janvier qui sont principalement dues à la montée des eaux souterraines avec une part probable de la petite Rusizi. Elles couvrent une superficie de 1858,51ha, soit 20,61% de superficie totale de la zone d'étude à l'exception de la zone Rukaramu.

Cette étendue marécageuse se localise dans les quartiers/collines Vugizo, Warubondo, Gaharawe, Mushasha I et II. Néanmoins, 2,94 sur 721,06ha de superficie bâtie ont été touchées par des inondations. Des rivières saisonnières variant de 690 m à 1km 101m de long ont été observées dans les collines Vugizo et Warubondo.

Concernant la montée des eaux du lac Tanganyika, la moyenne mensuelle semble constante tout au long de l'année avec 1,4m d'où elle est négligée pendant cette période.

III.1.4. Etude des zones inondées (Année 2014)

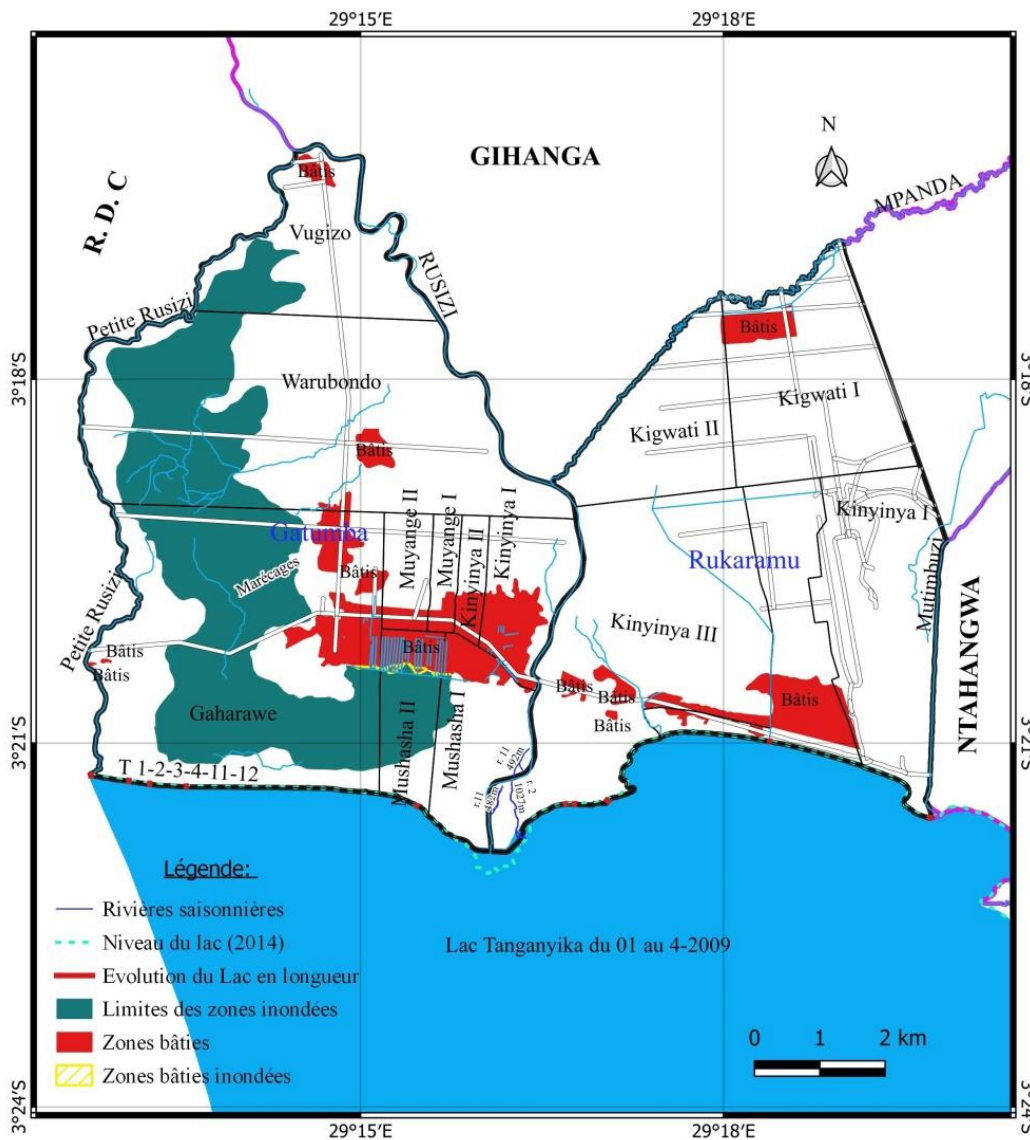


Figure 20: Carte des zones à risque d'inondation en 2014

Au cours de cette année, les zones marécageuses ne manquent pas aussi de présence au mois de février. Elles occupent étendue se trouvant dans les quartiers/collines Vugizo, Warubondo, Gaharawe, Mushasha I et II. Cette étendue couvre une superficie de 1631,97ha, soit 18,10% de la superficie totale de la zone d'étude. Par conséquent, ce type d'inondation affecte les bâtis repartis sur 4,35ha alors que la superficie totale bâtie couvre au total 723,47ha. Des rivières saisonnières d'une longueur variant entre 492m à 1km 27m ont été mesurées en aval de la Rusizi.

III.1.5. Etude des zones inondées (Année 2015)

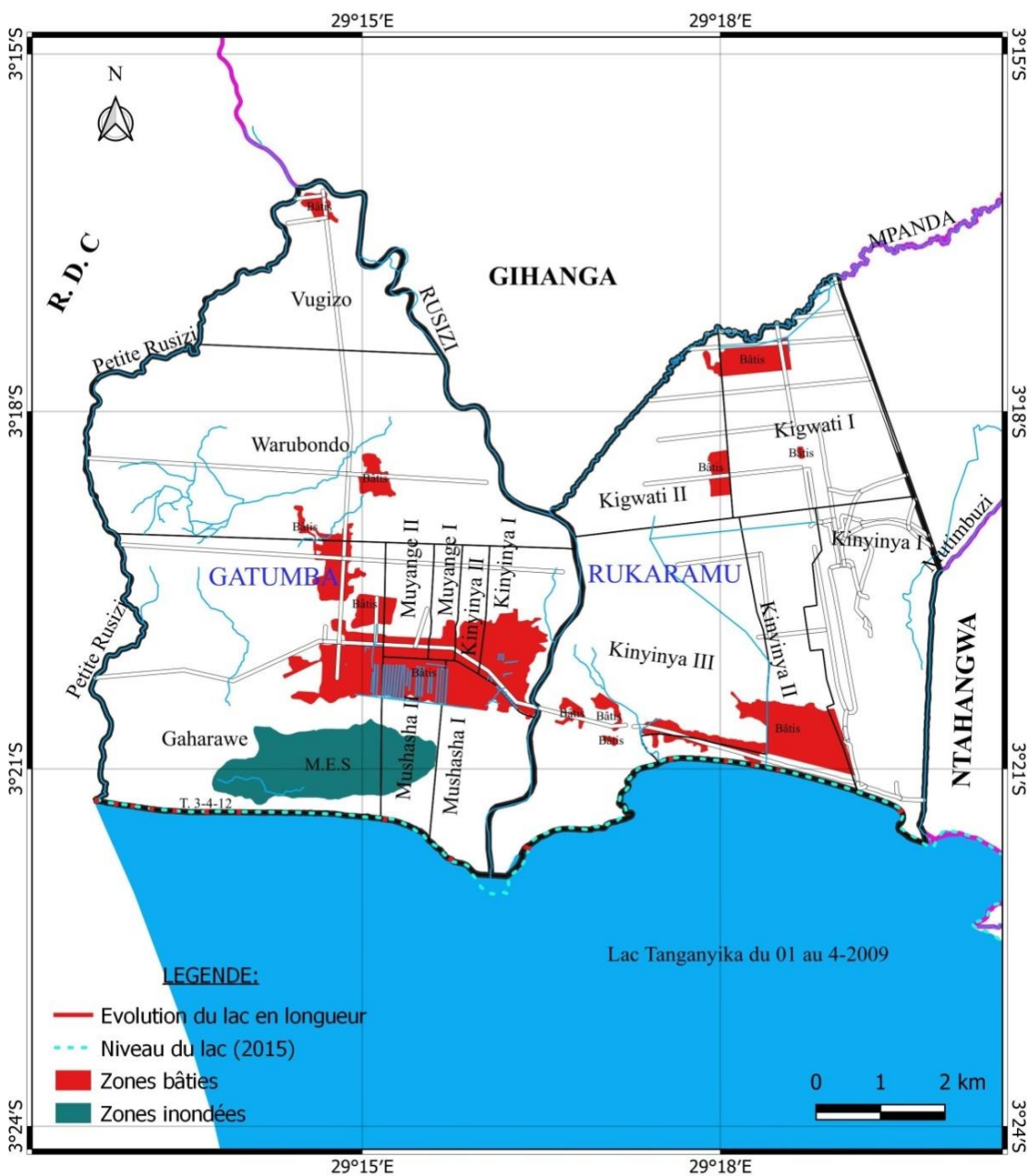


Figure 21: Carte des zones inondées en 2015.

D'après cette figure 21, les bâtis sont repartis sur une superficie de 751,22ha. En effet, même si les zones bâties inondées étaient absentes au cours de cette année, cela ne justifie pas que les inondations n'ont pas eu lieu en totalité. Une étendue de 307,96 ha soit 3,41% des zones de Gatumba et Rukaramu a été menacée par la montée des eaux souterraines en février et une absence de rivières saisonnières est aussi constatée. Des quartiers/collines Gaharawe et Mushasha II ont connu ce type d'inondation.

III.1.6. Etude des zones inondées (Année 2016)

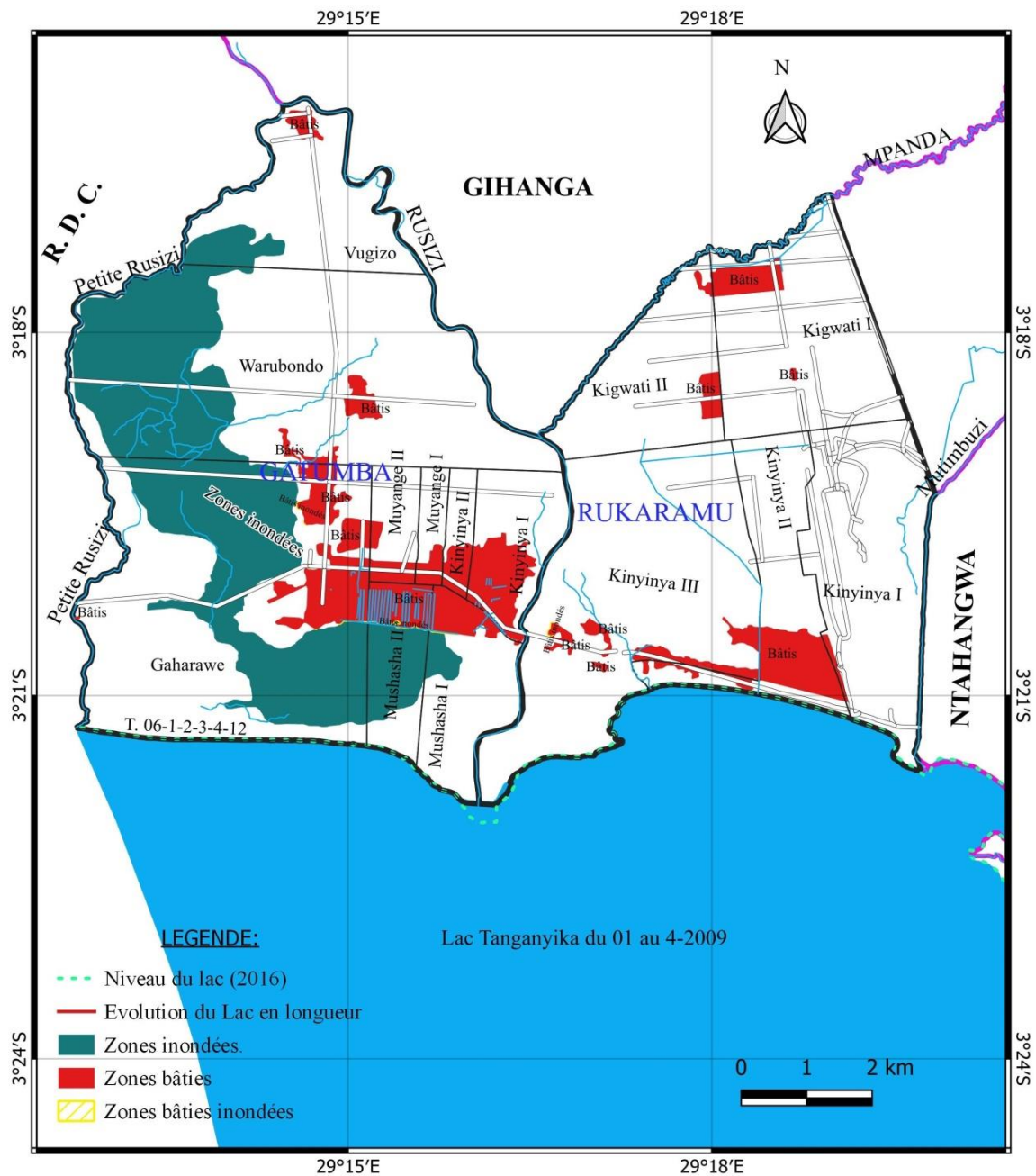


Figure 22: Carte des zones inondées (Année 2016).

Durant cette année, la zone de Gatumba connaît des inondations au mois d'avril. Ces dernières sont dues au débordement du lit mineur de la petite Rusizi et à la montée des eaux souterraines. Ces inondations affectent les quartiers/collines Vugizo, Warubondo, Gaharawe, Mushasha I et II avec une superficie de 1476,9 ha soit 16,38% de superficie totale de la zone d'étude. Quant à la superficie bâtie inondée, elle s'élève à 22,69 ha. Les rivières saisonnières n'ont pas été enregistrées.

III.1.7. Etude des zones inondées (Année 2017)

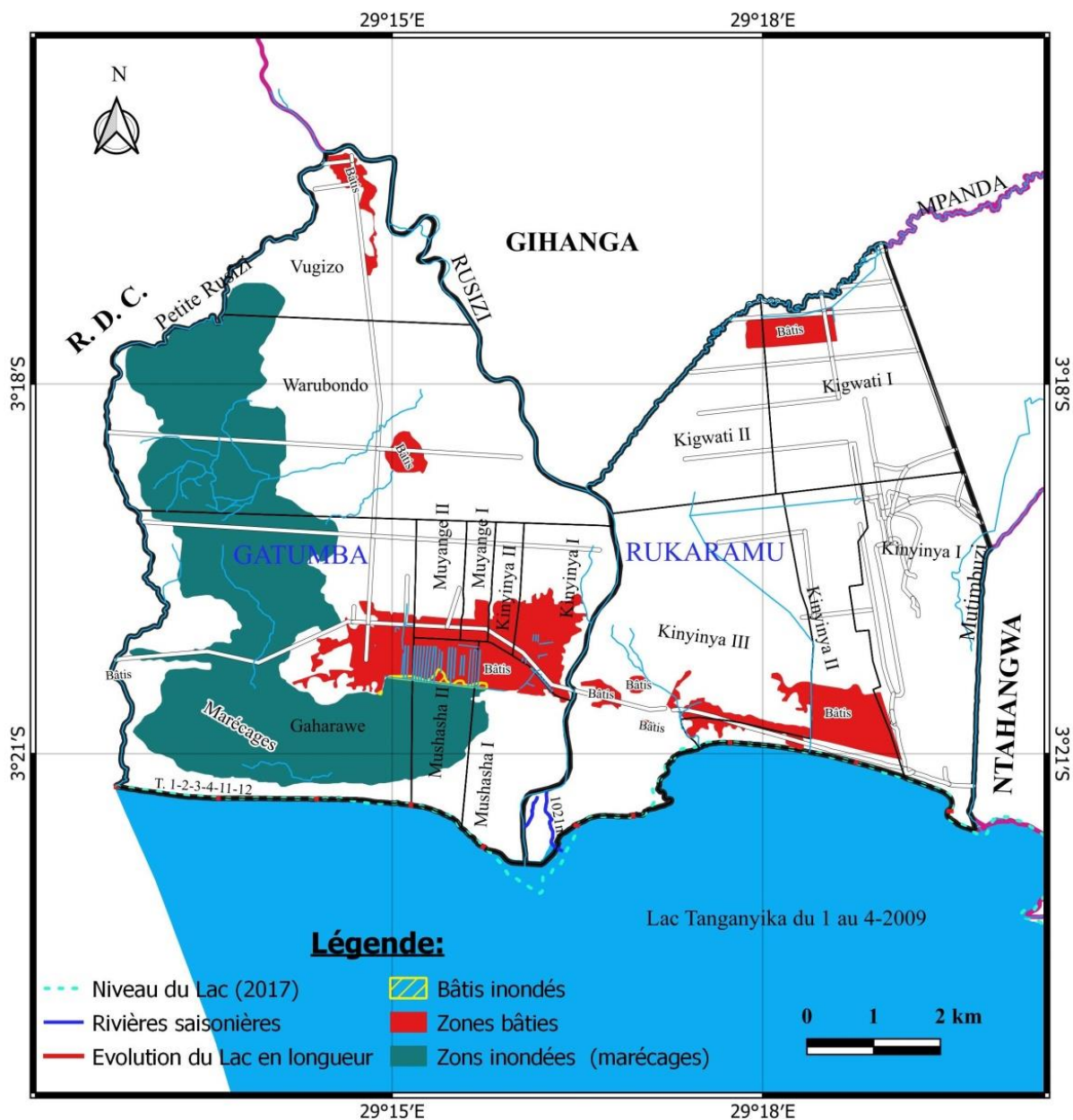


Figure 23: Carte des zones inondables en 2017

Cartographie des zones à risque d'inondation dans des aires des zones GATUMBA et RUKARAMU en commune Mutimbuzi de la province de Bujumbura (Burundi).

Les zones marécageuses semblent plus vastes essentiellement en avril au de cette année. Elles couvrent une superficie de 1735,01ha, soit 19,24% de superficie de la zone d'étude.

Elles se logent toujours dans la zone Gatumba plus précisément les quartiers/collines Vugizo, Warubondo, Gaharawe, Mushasha I et II. Quant aux bâtis, ils sont repartis sur une étendue de 732 ha et parmi ceux-ci, 8,12 ha ont été menacés par la montée des eaux souterraines. Les rivières saisonnières ont connu une longueur variant entre 482m à 1km 21m dans les berges de l'exutoire de la Rusizi.

III.1.8. Etude des zones inondées (Année 2018)

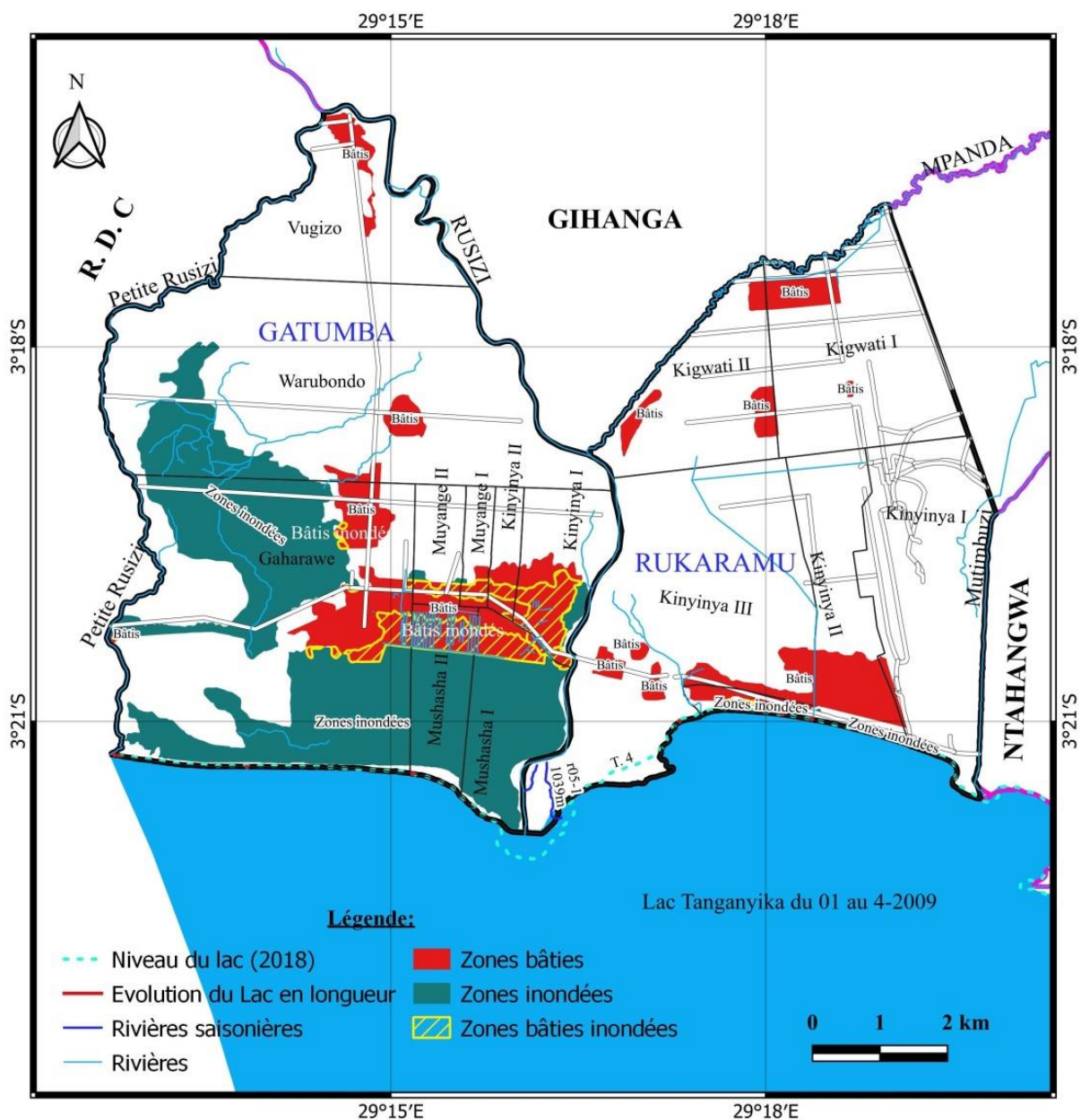


Figure 24: Carte des zones inondées en 2018

Depuis le début de la période d'étude, les menaces les plus graves des inondations commencent à se manifester depuis le mois de février 2018. Dans cette étude, ces menaces se font remarquer à travers des étendues affectées par des différents types d'inondation.

Sur une étendue de plus de 9000ha, 1774,69 ha soit 19,68% de la zone d'étude ont été menacées par des inondations. Sous cette menace, une étendue plus vaste de 223, 93ha sur 916,25ha de superficies bâties ont été inondées.

De plus, tous les types d'inondations identifiés dans la zone de travail ont contribué à la vulnérabilité des quartiers/collines Warubondo, Gaharawe, Mushasha I et II, Kinyinya I et II, Muyange I et II de la zone de Gatumba. La zone de Rukaramu quant à elle, elle est toujours à l'abri du risque d'inondation.

Ce risque est caractérisé par quatre types à savoir les inondations dues à la montée des eaux du lac Tanganyika, à la montée des eaux souterraines, inondations pluviales ainsi que les inondations causées par le débordement du lit mineur de la rivière Rusizi d'où les catastrophes sont devenues importants. Les rivières saisonnières causées par cet événement occupent une longueur variant de 451m à 1km 39m dans le quartier Kinyinya III.

Quant à la montée latérale des eaux du lac Tanganyika, elle connaît une variation moyenne importante qui se situe entre 3 et 12,25 m de longueur.

III.1.9. Etude des zones inondées (Année 2019)

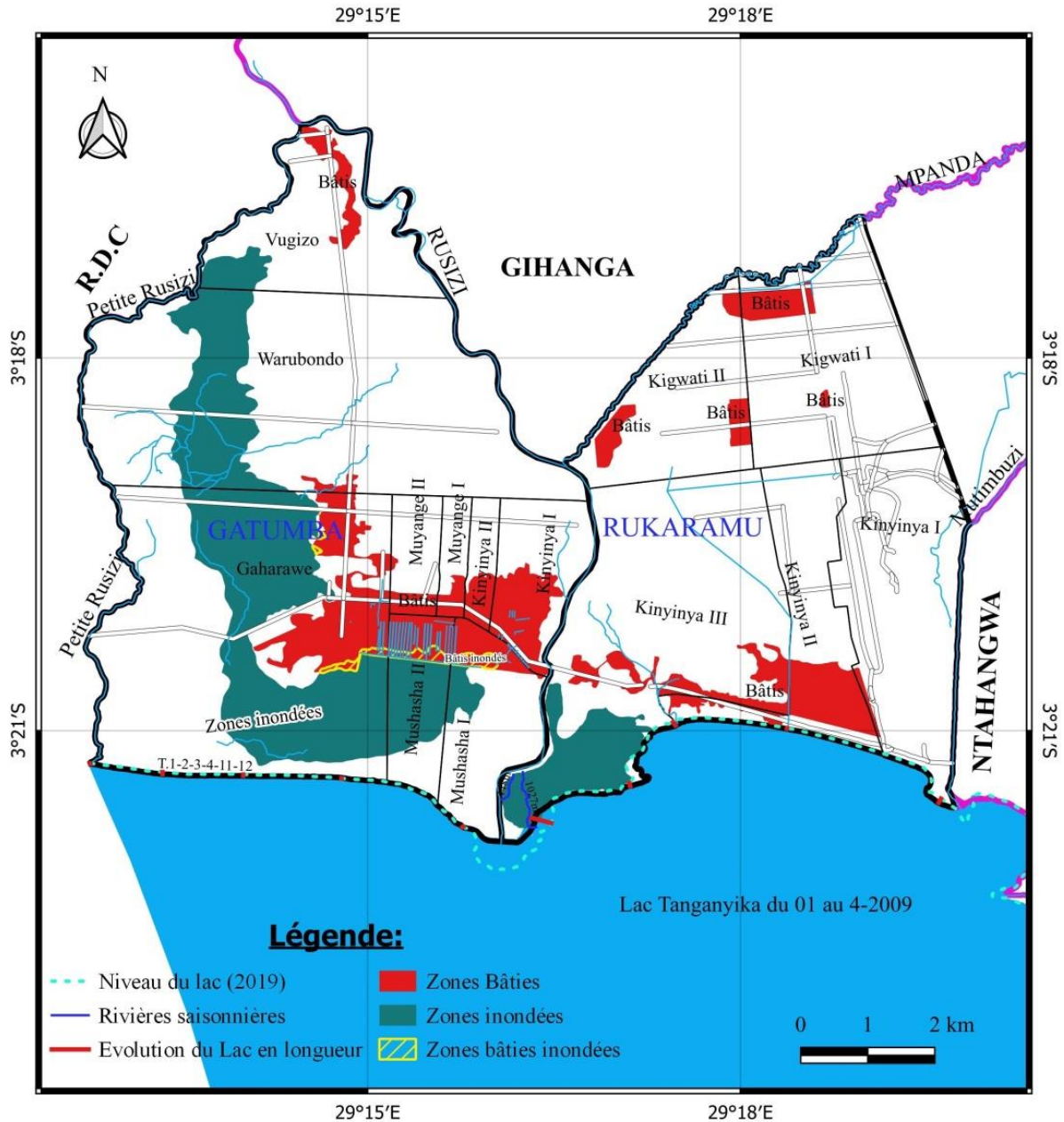


Figure 25: Carte des zones aux risques d'inondation en 2019.

Cette année est marquée par des inondations causées par la montée des eaux souterraines et le débordement du lit mineur de la petite et la grande Rusizi durant le mois de décembre. Toutes les deux zones (Gatumba et Rukaramu) sont affectées. Les quartiers/collines Kinyinya III, Vugizo, Warubondo, Gaharawe, Kinyinya I et II sont affectés. Les superficies inondées équivalent à 1378,11 ha soient 15,28 % de la zone d'étude. Toutefois, les deux zones de travail sont concernées. De plus, cette année de 2019 connaît une régression de 21,47ha des superficies bâties par rapport à l'année précédente.

Ce qui prouve une ampleur des inondations en 2021 qui se traduit en dommages humains et matériels sans précédent. De plus, des rivières saisonnières n'ont pas marquée leur absence cette année. Une longueur allant de 448 à 1027 m a été calculée.

III.1.10. Etude des zones inondées (Année 2021)

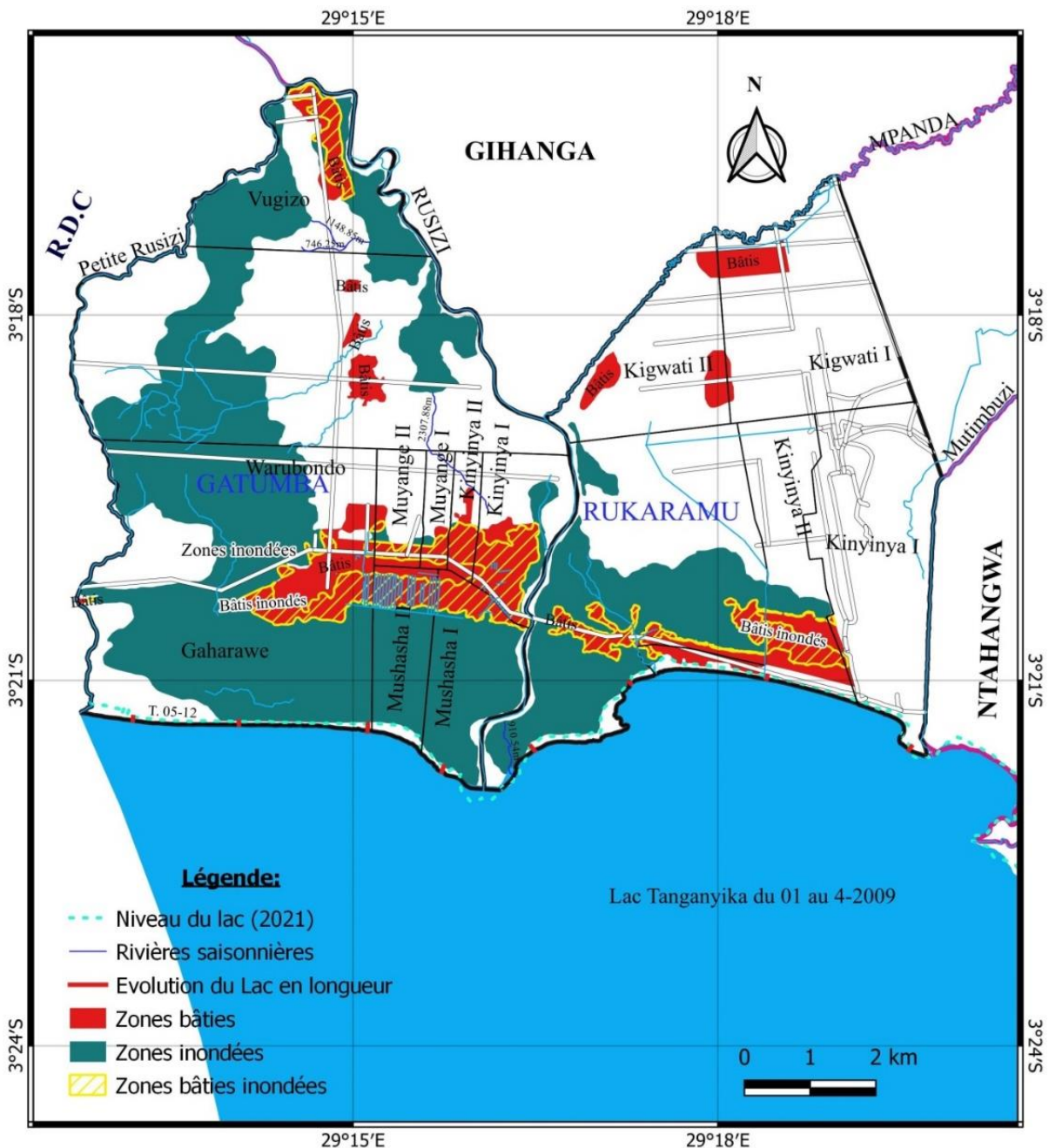


Figure 26: Carte des zones inondées en 2021

Les inondations de 2021 ont exercé une influence sur une étendue plus vaste par rapport aux années précédentes. Cette extension s'est considérablement manifestée en avril.

Elles totalisent une superficie de 3630,44 ha soit 40,26% de la zone de travail. Toutes les deux zones administratives ont été perturbées cette année. Mais la zone Gatumba est toujours sous une menace de croissance exponentielle des inondations par rapport à zone Rukaramu. Tous les types d'inondation que connaît cette zone d'étude ont eu lieu cette année. Suite à cette combinaison, les quartiers/collines affectés par des inondations sont nombreux.

Il s'agit de Vugizo, Warubondo, Gaharawe, Kigwati II, Kinyinya I, II et III, Kiyange I et II, Muyange I et II. Le risque occupe une large superficie de 492,5 ha de bâtis inondés sur 955,77 ha de zones bâties de la zone étudiée. Au surplus, des rivières saisonnières n'ont pas marquée leur absence cette année. Une longueur allant de 746, 25 à 2307, 88 m a été calculée. Ces rivières saisonnières exercent leurs impacts sur les quartiers/collines Vugizo, Muyange I et II, Kinyinya I, II et III. Quant au lac Tanganyika, son évolution latérale moyenne annuelle en longueur varie entre 5,6 et 19,2 m.

III.1.11. Etude des zones inondées (Année 2022)

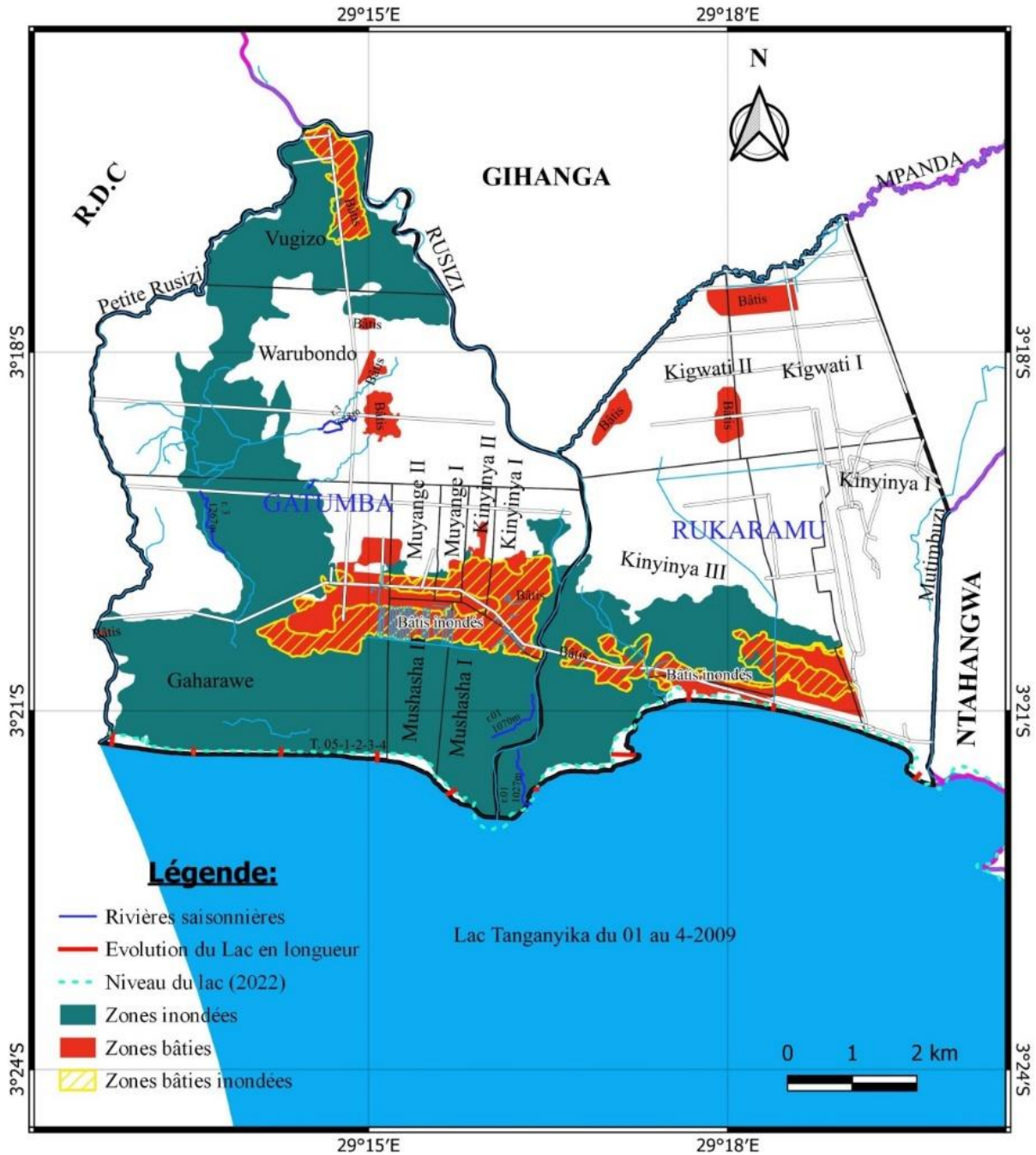


Figure 27: Carte des zones inondées en 2022

Au cours de cette dernière année d'étude, les inondations évoluent toujours sans précédent dans le temps et dans l'espace. En janvier, elles affectent tous les quartiers/collines de la zone d'étude à l'exception des quartiers/collines Kinyinya III, Kigwati I et II. En d'autres termes, plus de la moitié de la superficie totale de la zone étudiée a été inondée. Des rivières saisonnières n'ont pas marquée leur absence cette année.

Une longueur allant de 159 à 1070 m a été calculée. Quant au lac Tanganyika, son évolution latérale moyenne annuelle s'élève à 13,5m.

III.1.12. Calcul et représentation d'évolution interannuelle de l'aléa d'inondation

Au cours de toute la période d'étude, une étendue s'élevant à 5319,34 ha soit 59% de la superficie totale de la zone étudiée est vulnérable aux inondations. Par conséquent, une étendue atteignant 887,88 ha sur 998,59ha des zones bâties est exposée à cette catastrophe.

En se référant sur les résultats issus de cette cartographie, les inondations et leurs impacts deviennent de plus en plus importants durant les dernières que les premières années de la période d'étude. Les figures 28 et 29 produites à partir des résultats cartographiques nous permettent de voir clairement l'évolution des inondations dans le temps et dans l'espace, la dynamique des zones bâties ainsi que les conséquences des inondations sur les infrastructures.

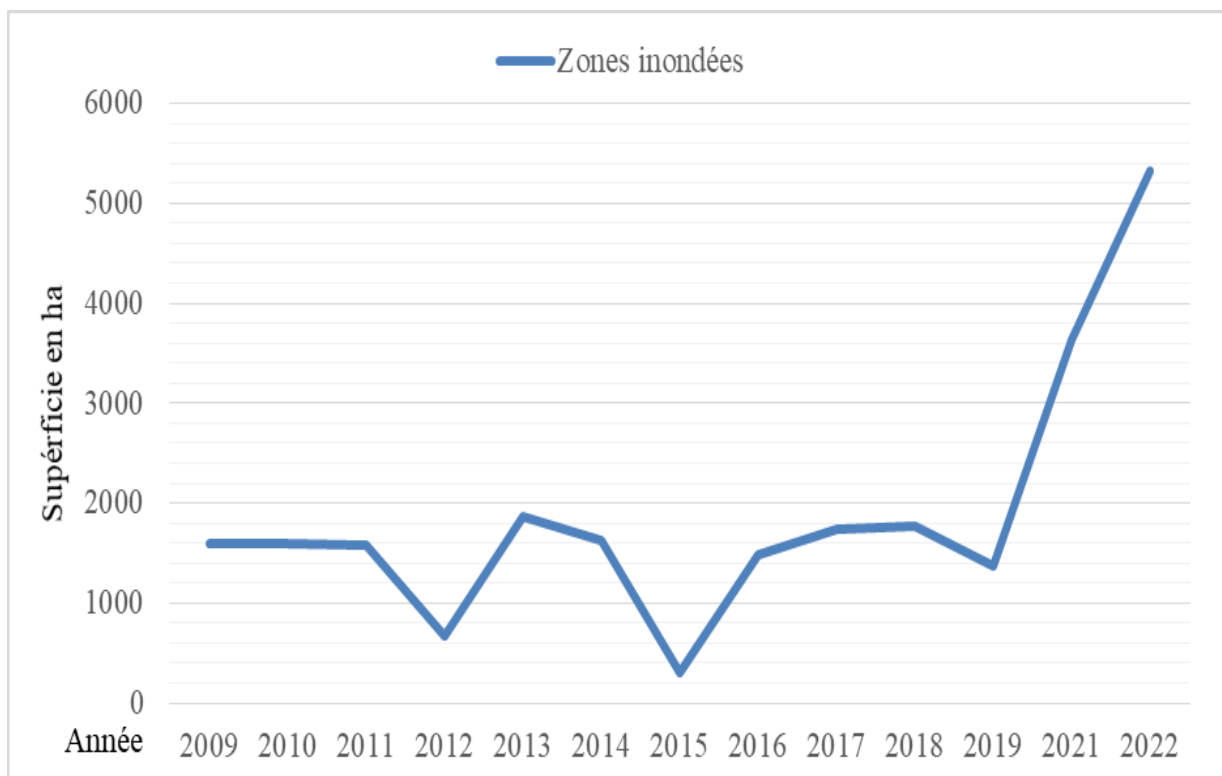


Figure 28: Evolution spatiale interannuelle de l'aléa d'inondation par rapport à la zone d'étude.

III.1.13. Caractérisation et évaluation de la vulnérabilité des bâtis à l'aléa d'inondation

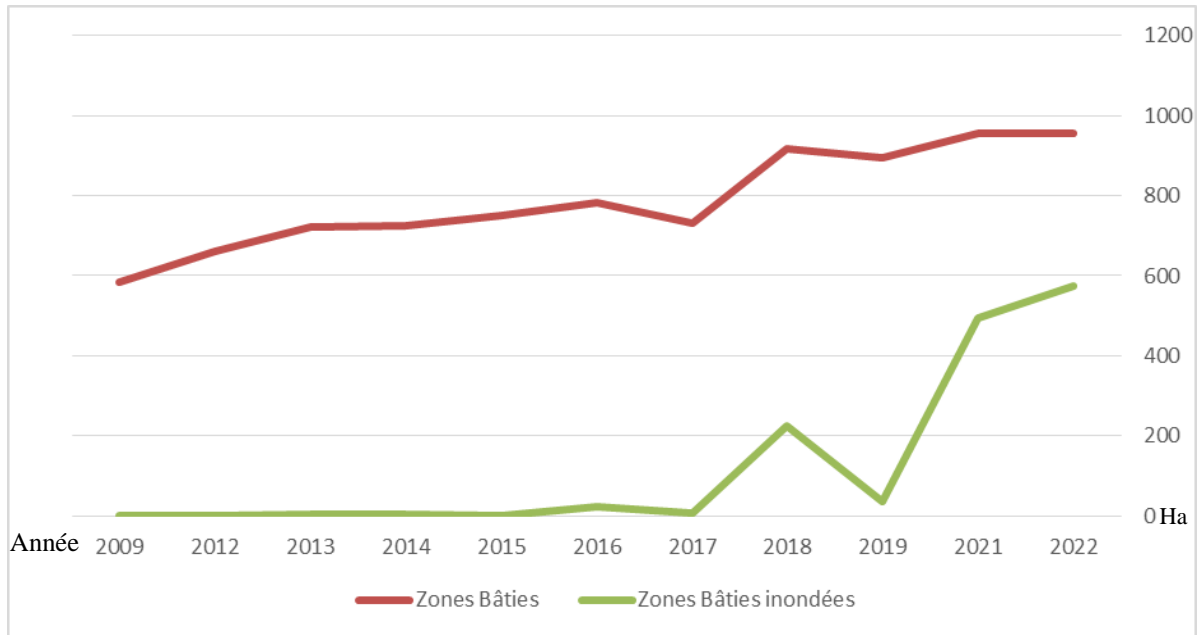


Figure 29: Impacts des inondations sur les bâtis.

Il est à remarquer que depuis janvier 2009 à avril 2022, les zones Gatumba et Rukaramu sont généralement confrontées à une évolution variable mais aussi exponentiellement grandissante des inondations variantes occupant entre 3,41% (soit 307,96ha) à 59% (5619,43ha) de superficie totale de la zone d'étude (figure 28).

Les zones bâties peuvent durer étant submergées mais non fonctionnelles. C'est dans ce cadre que l'impact des inondations sur les bâtis est trouvé quantifiable au cours de l'année suivante de celle qui est marquée par des inondations catastrophiques (figure 29). Car, ces dernières ne détruisent pas totalement et immédiatement les infrastructures et les conséquences se manifestent évidemment après la catastrophe.

Quant aux bâtis, une évolution normale allant de 583,24ha à 956,49ha est constatée pendant toute la période d'étude. Malgré cette évolution raisonnable par rapport à la croissance démographique manifestée à travers l'agrandissement des zones bâties et à l'étendue de la zone étudiée, les zones Gatumba et Rukaramu ont subi une régression des superficies bâties qui passe de 783,93ha en 2016 à 732ha en 2017 et 916,45 ha en 2018 à 894,38 en 2019 d'où une destruction des bâtis occupant une superficie de 51,93 ha entre 2016 et 2017 ; 22,07 ha entre 2018 et 2019 a été enregistrée. Cette régression de zones bâties se traduit fréquemment en conséquence hybride (perte matérielle et humaine).

Cette réduction de superficies bâties est liée aux inondations qui ont évolué de 1476,9ha en 2016 à 1735,01ha en 2017. Elle est aussi projetée en 2016 car la superficie bâtie inondée s'élève à 22,69 ha alors qu'elle recule jusqu'à 8,12ha en 2017.

Selon nos résultats, des événements catastrophiques sans précédent ont été enregistrés en 2018 avec 223,93ha de zones bâties inondés.

III.2. Identification des différents types d'inondations menaçant les zones Gatumba et Rukaramu

Actuellement, notre site de travail (milieu périurbain) est devenu vulnérable aux risques évolutifs d'inondation au cours du temps. Dans le cadre de cette étude, quatre types d'inondation ont été distingués. Les zones de Gatumba et Rukaramu connaissent des crues qui résultent principalement du débordement la rivière Rusizi et de la montée des eaux du lac Tanganyika.

III.2.1. Inondation fluviale de la Rusizi

Elle se produit lorsque l'eau de cette rivière déborde et atteint les terres situées près de leur lit. Ce type d'inondation se caractérise par une montée des eaux et une décrue plutôt lente. La submersion peut durer plusieurs jours à plusieurs semaines, voire plusieurs mois. Tout dépend quantitativement de la manière où le lit est alimenté. Les dommages sont principalement en fonction de la hauteur et de la durée de submersion ainsi que la force du courant qui génèrent une destruction des infrastructures fragiles (principalement les ménages) et un transport de matériaux solides augmentant le risque de dommages humains et matériels pouvant également perturber les écoulements.

Cartographie des zones à risque d'inondation dans des aires des zones GATUMBA et RUKARAMU en commune Mutimbuzi de la province de Bujumbura (Burundi).



Figure 30: Inondation lacustre à Gatumba, Google earth, décembre 2021.



Figure 31: Inondation fluviale du 4 mars 2021 à Gatumba , OCHA- Burundi, 2022

En se référant sur nos résultats obtenus à base de l'exploitation des imageries satellitaires, les quartiers/collines vulnérables à ce type d'inondation sont Vugizo, Warubondo, Muyange I et II, Kinyinya I et II de la zone Gatumba ainsi que Kinyinya II et Kinyinya III de la zone Rukaramu.

III.2.2. Inondation lacustre

L'inondation due à la montée des eaux se produit lorsque cette inondation est provoquée par la montée du niveau de la nappe phréatique jusqu'à la surface du sol (figure 36) ou lorsque le niveau normal de l'eau du lac Tanganyika augmente au-delà du niveau des terres riveraines. Cette inondation se manifeste généralement lorsque les autres trois types d'inondations n'ont pas spatialement eu lieu. Elle est causée par la montée des eaux souterraines et à la montée des eaux du lac Tanganyika.

Dans toute la zone étudiée, la zone Rukaramu ne connaît généralement pas d'inondation lacustre et du risque due à la montée des eaux du lac. Quant à la zone Gatumba, Ce type d'inondation affecte la végétation et le bâti se trouvant dans les quartiers/collines Vugizo, Warunondo, Gaharawe, Mushasha I et Maushasha II.



Figure 32: Montée des eaux du lac Tanganyika du 11 au 18 mai 2021 dans les quartiers situant au Sud de la zone de Gatumba jusqu'à la route goudronnée, reliant le Burundi à la RDC.



Figure 33: La cour de l'école primaire Kinyinya II submergée par des eaux provenant du lac Tanganyika, avril 2023.

III.2.3. Inondation fluvio-lacustre

L'inondation fluviaux-lacustre résulte de la sortie des eaux de la rivière Rusizi de son lit mineur et de l'envahissement des eaux du lac Tanganyika dans sa zone littorale. Ce lac et cette rivière inondent les zones les plus vastes pendant les périodes de fortes précipitations dans leurs bassins versants. La forte concentration de précipitations provoque la saturation du sol et l'excès d'eau commence à s'accumuler (jusqu' à peu près un mètre de hauteur), ce qui peut durer des heures ou des jours, jusqu'à ce qu'elle commence à s'évaporer et que le sol se rétablisse. Ce type d'inondation est spatialement généralisé pour toute la zone étudiée à l'exception des quartiers/collines de Kigwati I, Kigwati II et Kinyinya I mais son risque dépend fortement de plusieurs facteurs du milieu détaillés dans la description de la zone d'étude. Les figures 34 et 35 illustrent les catastrophes causées par le lac Tanganyika et la rivière Rusizi en 2020 et 2023 suite aux pluies torrentielles.



Figure 34: Les eaux du lac Tanganyika et de la rivière Rusizi ont envahi avec une hauteur élevée l'ensemble des quartiers de Gatumba¹ (OCHA, 2020).



Figure 35: Les habitats de Gatumba tentent de sauver leurs biens matériels, avril 2023.

III.2.4. Inondation par eaux souterraines

Ce type d'inondation par remontée de nappes se produit lorsque l'inondation est provoquée par la montée du niveau de la nappe phréatique jusqu'à la surface du sol. Les quartiers Gaharawe, warubondo, Vugizo, Mushasha I et II, Kinyinya II et III sont sous cette menace.



Figure 36: Montée des eaux souterraines, (Google earth, 5 janvier, 2012).

III.3. Etude des facteurs naturels de la genèse des inondations dans les zones Gatumba et Rukaramu

Tous les milieux environnementaux ne sont pas vulnérables au même degré face à l'aléa d'inondation. Le développement des inondations dans notre site de travail dépend de multiples facteurs naturels. Il s'agit entre autres des facteurs environnementaux, les facteurs hydrologiques et les facteurs climatiques qui conditionnent le processus de stagnation, d'infiltration et ou de ruissellement tout en modifiant la morphologie du milieu et les propriétés physico-chimiques de la surface du sol.

III.3.1. Facteurs environnementaux

III.3.1. 1. Relief

Les zones de Gatumba et Rukaramu se trouvent dans un corridor en dépression et morphologiquement creux. Elles sont caractérisées par des reliefs de faibles altitudes variant entre 760 à 775m (figure 37).

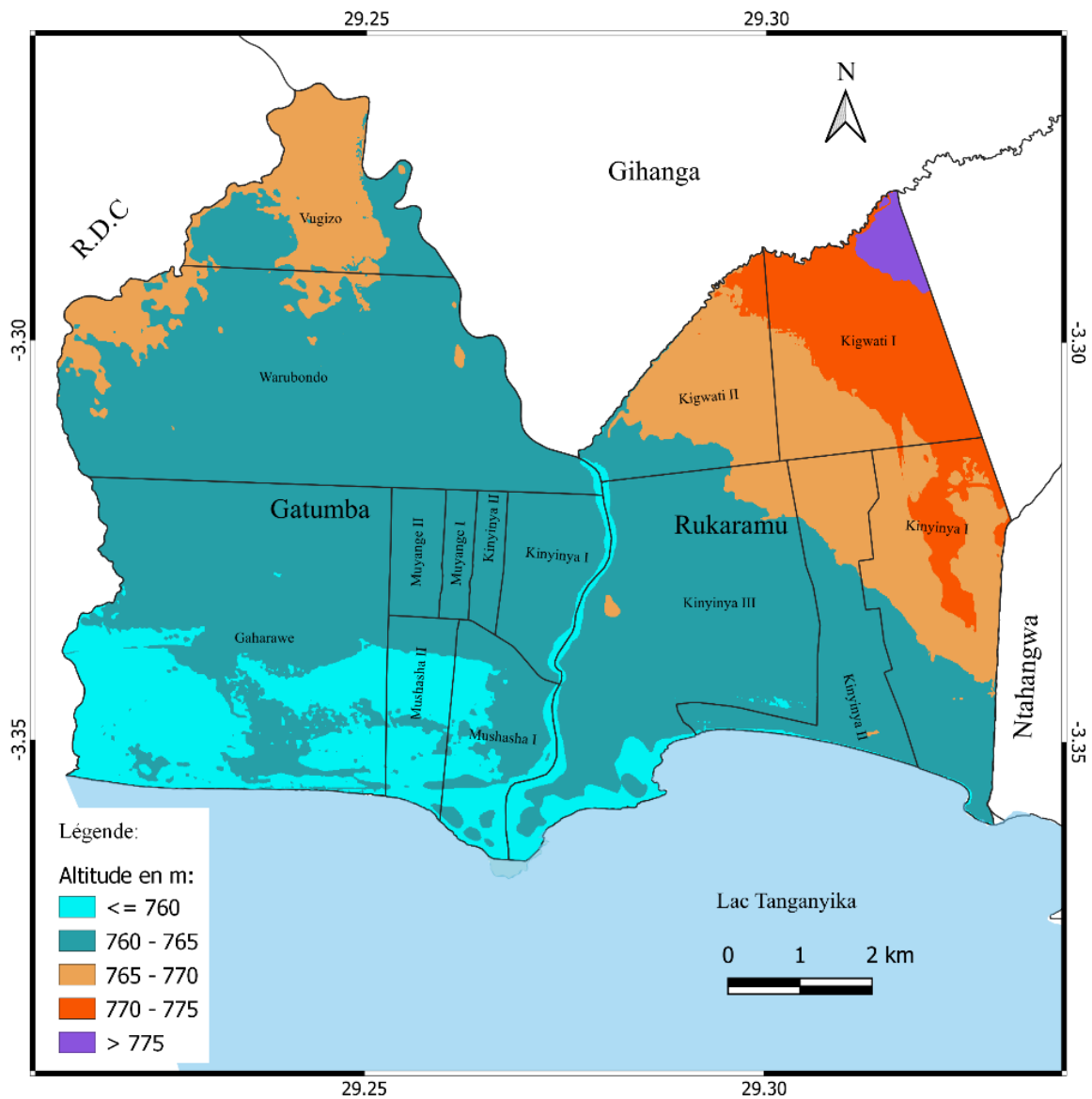


Figure 37: Carte du relief des zones Gatumba et Rukaramu, les données proviennent des images SRTM 1 Arc-Seconde (Farr et al., 2007)

Cette faible altitude accentue le risque d'inondation en cas de fortes précipitations par le débordement des eaux de la rivière Rusizi et du lac Tanganyika. Comme nous l'avons déjà constaté dans nos résultats, ce sont les quartiers localisés dans les aires marquées par une échelle d'altitude variant entre 760 à 775m qui sont vulnérables aux inondations tandis que les quartiers se trouvant dans les zones d'une altitude inférieure ou égale à 760m sont très vulnérables. Cette faible altitude justifie également l'inclinaison du terrain (figure 38) et favorise la submersion et la recharge de la nappe phréatique en cas de fortes précipitations. Il faut également mentionner qu'il existe des quartiers/collines qui n'ont jamais connu des inondations depuis 2009 jusqu'en avril 2022. Ces quartiers se trouvent dans des zones

d'altitude variant entre 770 à 775m et supérieure à 775m.

III.3.1.2. Pente

Les zones Gatumba et Rukaramu sont généralement caractérisées par une pente comprise entre des valeurs inférieures ou égales à 0,3 degré à 5,75 degrés dont la plus dominante varie de 0,3 à 1,15 ° (figure 38).

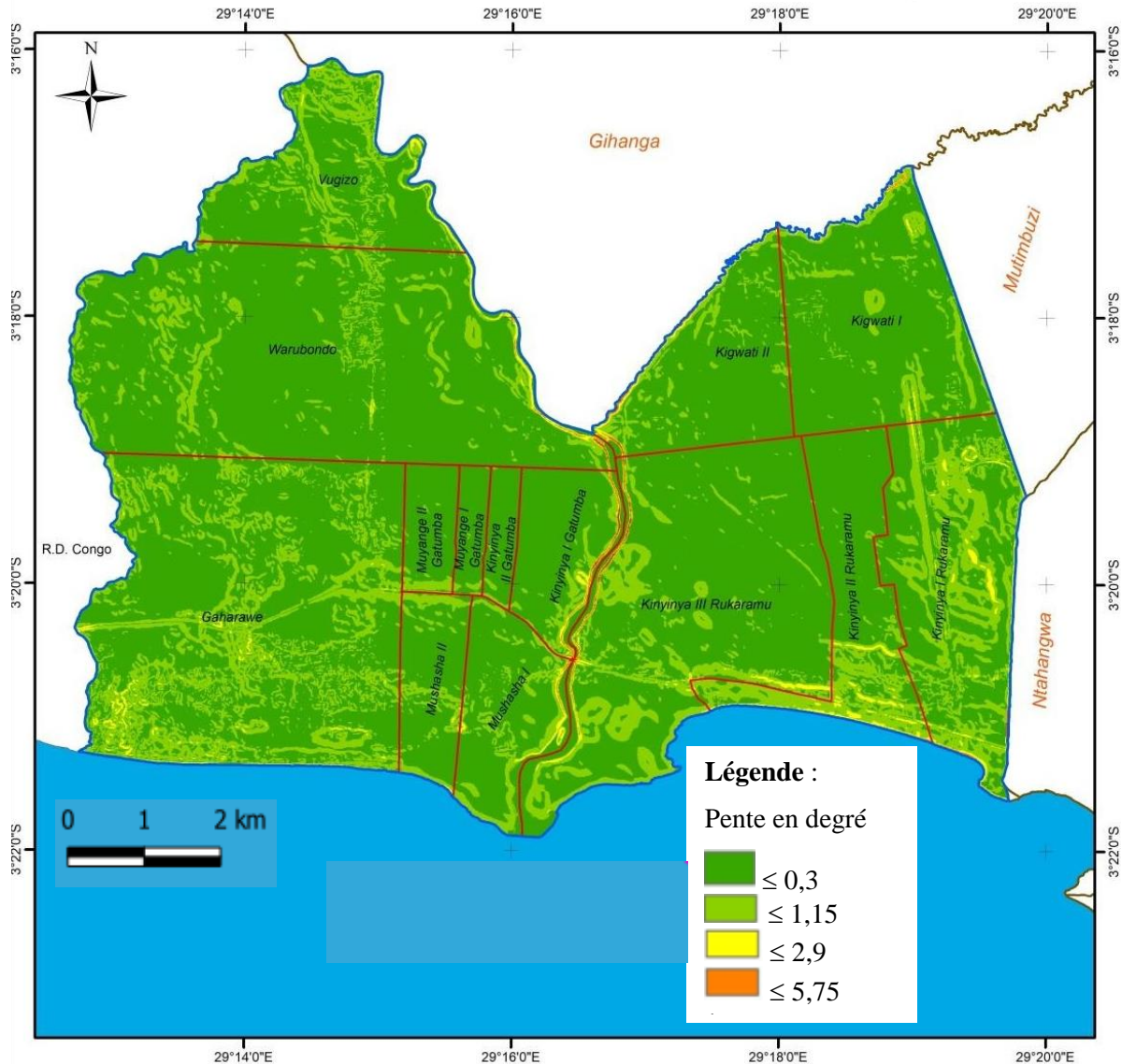


Figure 38: Carte des pentes des zones Gatumba et Rukaramu

Cette faible inclinaison de terrain conditionne négativement la vitesse d'écoulement des eaux de la rivière Rusizi et de ruissellement en cas de précipitation pour devenir un facteur passif des inondations en favorisant la concentration des eaux dans la surface ainsi qu'à l'infiltration dans les nappes souterraines. Cette faible pente amplifie la susceptibilité des sols aux inondations en favorisant la stagnation des eaux.

III.3.1.3. Pédologie

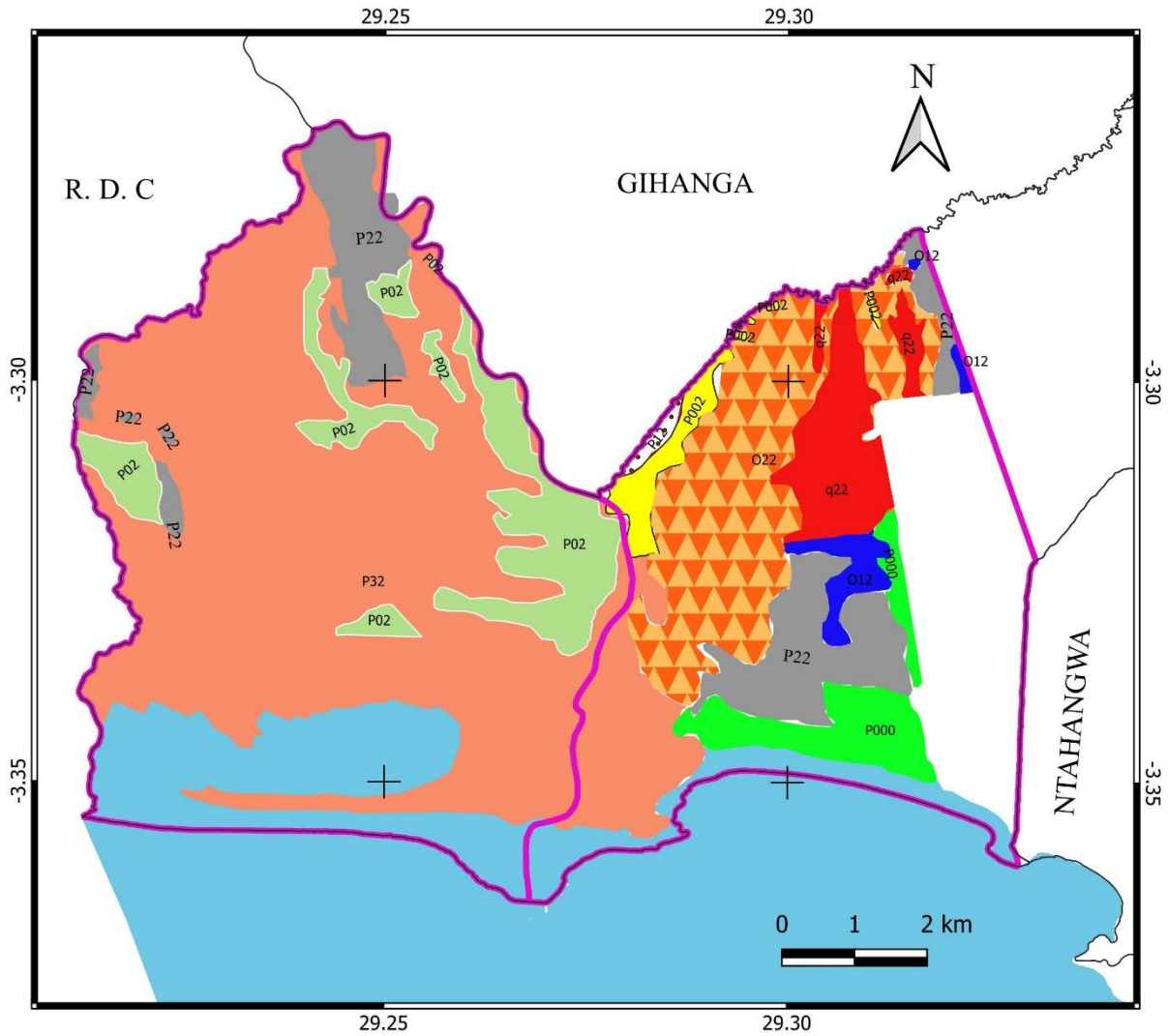
Le système pédologique des zones Gatumba et Rukaramu, comme dans l'ensemble de la plaine de la Rusizi, est une mosaïque des sols différents d'origine à la fois lacustre et fluviale (fig.39). Sa capacité de stockage dépend de la texture, structure et de leur nature minéralogique.

On y trouve généralement des vertisols dits « argiles noires tropicales », très pauvrement argileux et drainés avec une texture variée, de couleur liée à la nature du complexe argilo-humique. Ces vertisols sont imperméables, gorgés d'eau pendant la saison pluvieuse et très durs et striés de fentes de retrait pendant la saison sèche. Les vertisols offrent un drainage interne médiocre ou lent avec une perméabilité faible ou nulle.

On y trouve également des sols très pauvrement drainés, limono – argilo – sableux qui occupent les parties hautes des replats morphologiques. Ils ont un horizon A peu profond, sableux, très pauvre et nettement acide, dominant un horizon B argileux et imperméable et un horizon C très chargé en sels minéraux. Arides pendant la saison sèche, les solonchets sont chargés d'eau pendant toute la saison des pluies.

Ces zones sont aussi caractérisées par des sols très pauvrement drainés avec une texture stratifiée, sont très susceptibles aux inondations. Ces sols sont sous l'influence directe (engorgement, submersion) ou indirecte (nappe phréatique battant à faible profondeur) des eaux à haute salinité de la Rusizi. Ils présentent une texture très meuble et un pouvoir filtrant élevé (fig 38).

Cartographie des zones à risque d'inondation dans des aires des zones GATUMBA et RUKARAMU en commune Mutimbuzi de la province de Bujumbura (Burundi).



Légende:

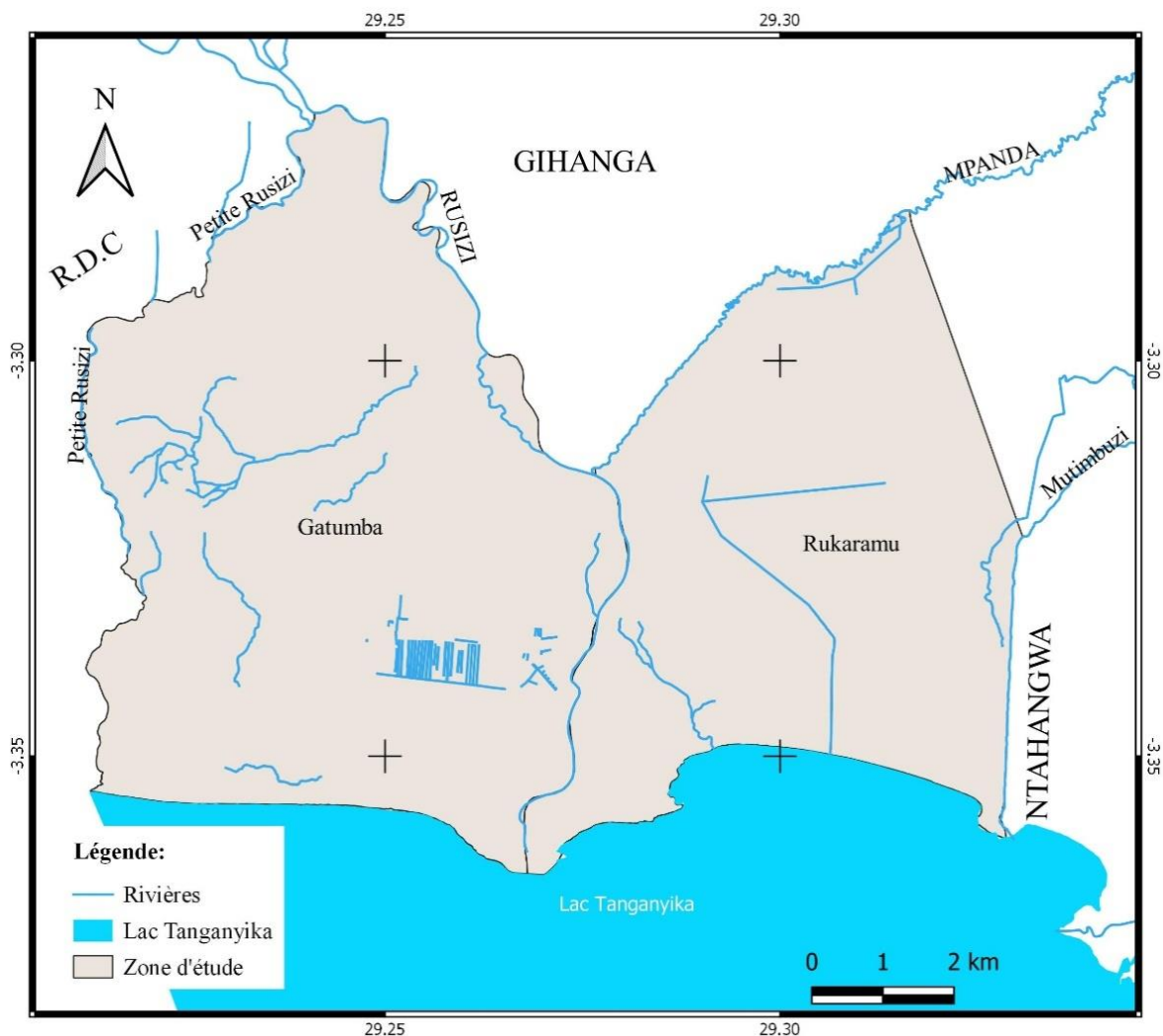
- Sols très pauvrement à pauvrement drainés, argileux lourds à argilo – limoneux, non limités avant 100cm par une charge graveleuse (q 22)
- Sols très pauvrement à pauvrement drainés, argileux, non limités avant 100cm par une charge graveleuse (O 22)
- Sols bien drainés, sableux à sablo – limoneux, non limités avant par une charge graveleuse (P 00)
- Sols très pauvrement à pauvrement drainés, limono – argilo – sableux ou limono – sableux, non limités avant 100cm par une charge graveleuse (p 02)
- Sols très pauvrement à pauvrement drainés, argileux, non limités avant 100cm par une charge graveleuse (O 12)
- Sols très pauvrement argileux à pauvrement drainés, à une texture variée, non limités avant 100cm par une charge graveleuse (P 32)
- Sols très pauvrement à pauvrement drainés, sableux à sablo – limoneux, non limités avant 100 cm par une charge graveleuse (P 002)
- Sols très pauvrement à pauvrement drainés, argileux ou limono – argileux, non limités avant 100 cm par charge graveleuse (P 12)
- Sols très pauvrement à pauvrement drainés, à une texture stratifiée, non limités avant 100 cm par une charge graveleuse (P 32)

Figure 39: Nature des sols des zones Gatumba et Rukaramu (Geert B. et al, 2014 modifiée par digitalisation)

Ainsi, la pédologie de ce site de travail explique la susceptibilité de ses sols face aux événements climatiques qui exercent leur influence à travers le réseau hydrographique.

III.3.2. Facteurs hydrologiques

Les zones de Gatumba et Rukaramu se trouvent en aval de la Rusizi et enserrées par trois grande rivières dont la Rusizi (petite et Grande), Mpanda et Mutimbuzi ainsi que le lac Tanganyika. Ces rivières sont aussi des affluents du lac Tanganyika qui drainent une partie de la zone Gatumba.



Cependant, on ne pourra pas parfaitement comprendre l'importance du réseau hydrologique dans la genèse des inondations pour la zone d'étudiée sans avoir une idée sur les facteurs naturels locaux des inondations fluviaux-lacustres. La présence ou l'absence du rôle de ce réseau dans la genèse des inondations est défini à base de données issues de la surveillance

régulière et de l'évaluation des enregistrements historiques réalisés par l'IGEBU. Ces dernières sont généralement la hauteur et le débit des eaux de la rivière Rusizi (figure 41, 42 et Annexe 1) en son aval et l'évolution en altitude et hauteur des eaux du lac Tanganyika (figure 43, 44 et Annexe 2²). Elles sont traitées et utilisées dans l'analyse des différents scénarios d'inondation.

III. 3.2.1. Hauteur et débit des eaux de la rivière Rusizi.

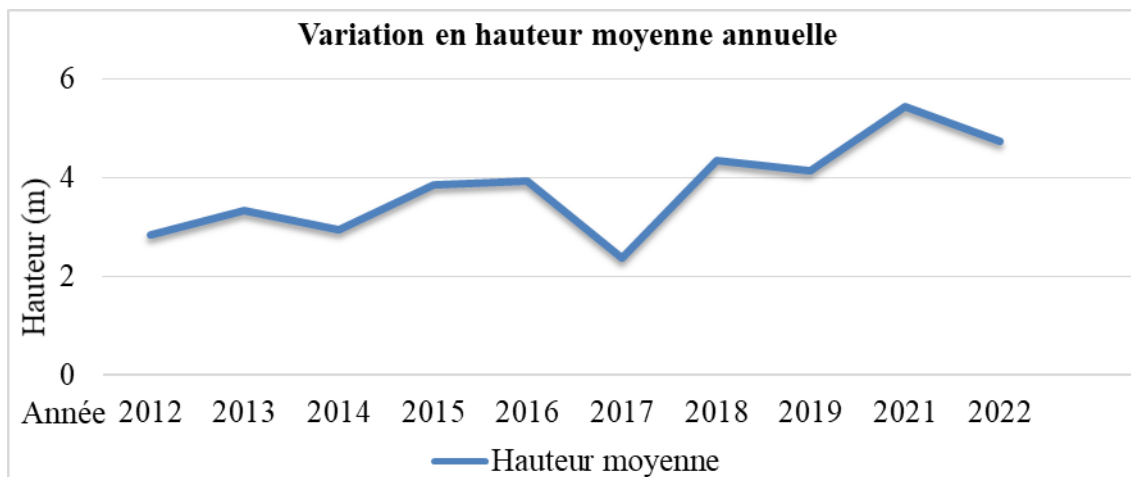


Figure 41: Evolution interannuelle du niveau des eaux de la rivière Rusizi

Source de données : IGEBU.

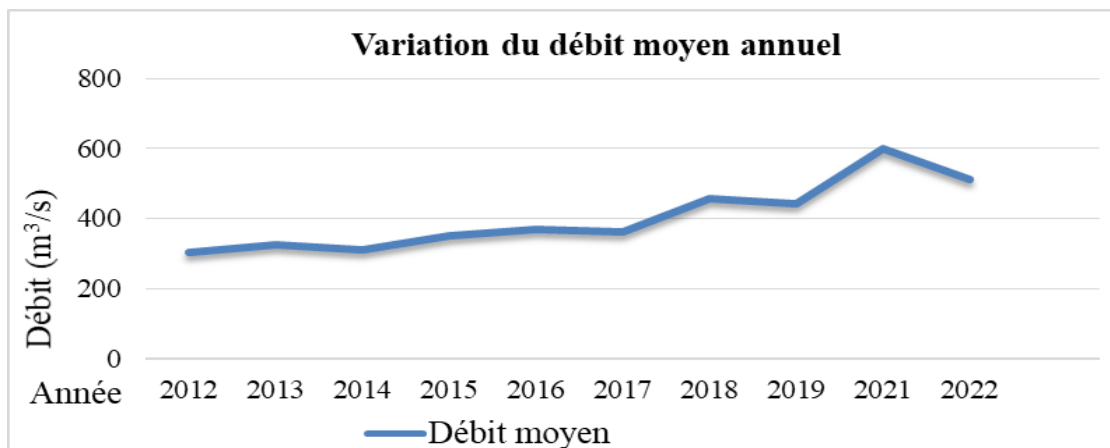


Figure 42: Evolution interannuelle du débit des eaux en de la Rusizi

Cette évolution est décrite à base des données journalières relatives au débit et à la hauteur de la rivière Rusizi. Pendant toute la période d'étude, la rivière Rusizi est caractérisée d'une hauteur variant entre de 1,20m à 4,18m alors que son débit évolue de 139,02 à 483,86 m³/s

² Evolution interannuelle du niveau et de l'altitude des eaux du lac Tanganyika

(IGEUBU)³. Cette rivière a connu une diminution considérable de hauteur arrivant à 2,365m en moyenne en 2017 et une augmentation importante en 2021 avec une hauteur de 5,44m en moyenne (figure 42).

Au cours de toute la période d'étude, une évolution galopante en parallèle de ces deux facteurs est constatée (figure 43 et 44). Plus la hauteur des eaux de la Rusizi augmente, plus le débit de cette rivière augmente aussi. Ce même scénario est aussi constaté pour le lac Tanganyika. Depuis 2012 jusqu'en 2021, le niveau du lac Tanganyika et son altitude connaissent une évolution importante.

III. 3.2.2. Altitude et hauteur des eaux du lac Tanganyika

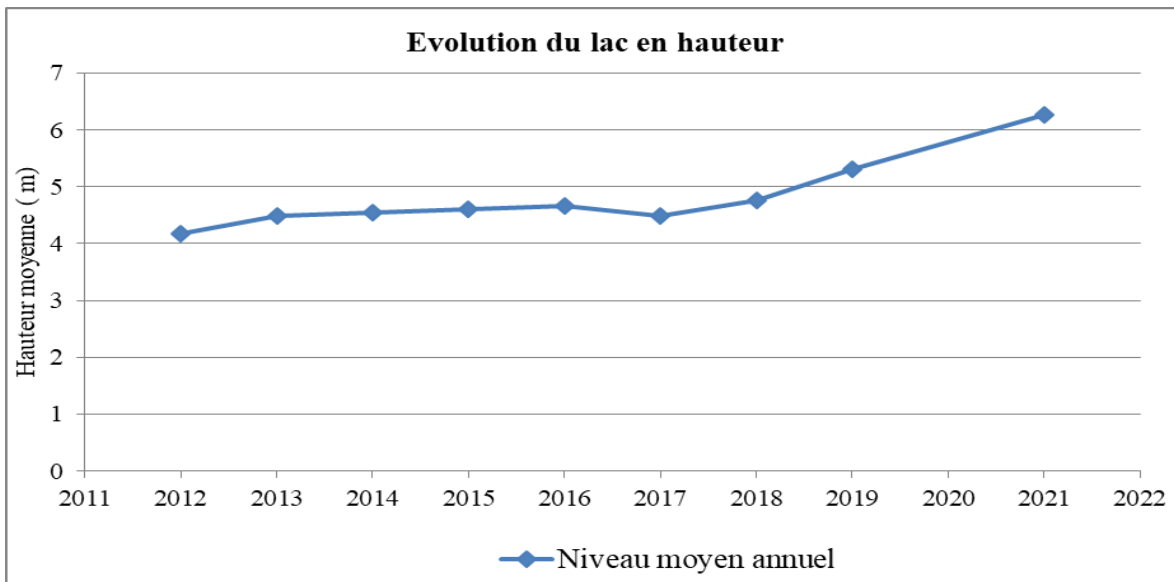


Figure 43: Evolution interannuelle du lac en hauteur, Source de données : IGEUBU

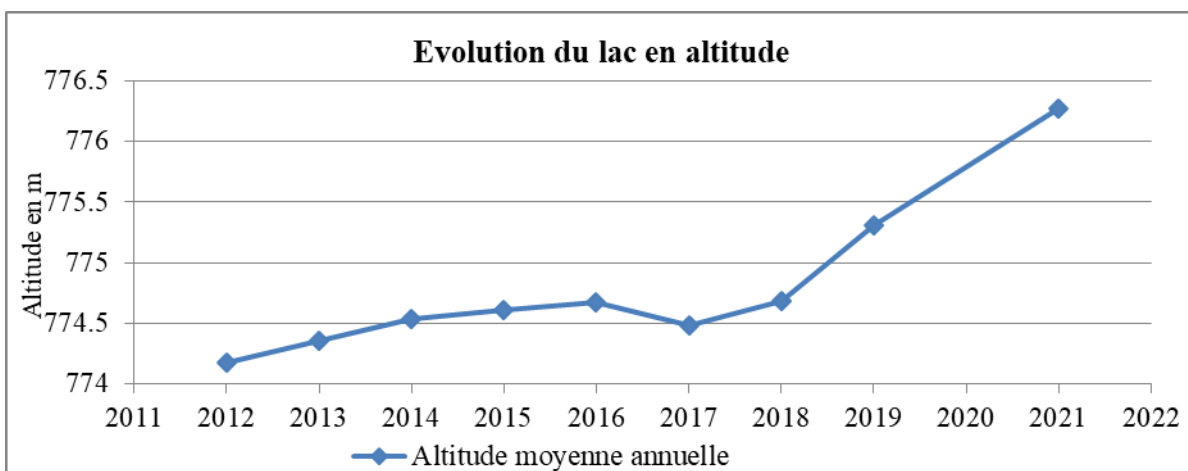


Figure 44: Evolution interannuelle du lac en altitude, Source de données : IGEUBU.

³ Données brutes collectées par l'IGEUBU

Concernant le lac Tanganyika, des données relatives aux années de 2009, 2010, 2011 et 2022, nous sont incomplètes voire même absentes. De cette figure 44, le niveau des eaux du lac Tanganyika connaît une évolution de tendance exponentielle au cours du temps. Cette évolution varie en fonction de l'altitude.

Depuis toute la période d'étude, la hauteur des eaux du lac Tanganyika varie entre 3,86 m et 6,98 m sur l'échelle (figure 43 et annexe 1⁴) et son altitude quant à elle, varie entre 773,86 m et 776,98 m (figure 44 et annexe 2). En comparant les résultats issus de la cartographie et du traitement des données brutes de l'IGEBU, nous avons remarqué que les inondations importantes qui ont eu lieu depuis 2018 jusqu'à nos jours, sont probablement liées à la montée des eaux fluviales et lacustres. Cette montée se traduit par l'augmentation du débit, de la hauteur des eaux de la Rusizi, l'augmentation en hauteur et en altitude du lac Tanganyika ainsi que son évolution latérale.

III. 3.2.3. Etude de l'évolution latérale des eaux du lac Tanganyika

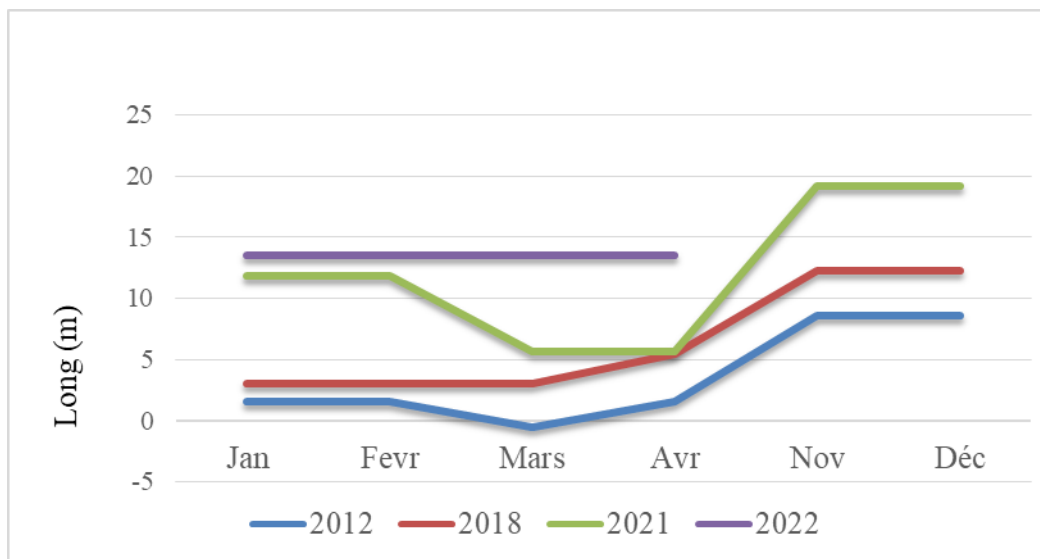


Figure 45: Evolution du niveau des eaux du lac Tanganyika

Depuis 2012, la montée du lac Tanganyika ne cesse d'amplifier la vulnérabilité des bâtis se trouvant tout près de ses littorales. C'est dans ce cadre que cette étude n'a pas ignoré d'analyser son évolution. Cette dernière est estimée par rapport au niveau latéral des eaux du lac Tanganyika de 2009. De surcroît, cette montée est évaluée à base d'un paramètre combiné (spatio-temporel) à partir duquel quatre années sur onze ont été prises en

⁴ Variations interannuelles du niveau et du débit des eaux de la Rusizi en son aval

considération. Une dynamique évolutive du niveau des eaux du lac Tanganyika est observée au cours de quatre années (figure 45).

Comme le montre la figure 45, le niveau latéral des eaux du lac Tanganyika n'est pas du tout stable. En 2018 par exemple, une évolution galopante allant de 3 à 12,3m de longueur à l'échelle annuelle lui est constatée.

Même si le bassin versant du lac Tanganyika est régional, sa montée s'observe généralement pendant la saison pluvieuse. Les mois de novembre et décembre présentent toujours une montée proportionnelle entre eux et plus importantes que celle des autres mois. Ce qui fait que pendant ces mois, cette montée des eaux du lac joue un rôle crucial dans la genèse des inondations avec une variation aussi importante qui se situe généralement entre 10,6 et 13,5 m de longueur. De plus, une contribution importante et évolutive dans la vulnérabilité de la zone étudiée lui est attribuée car la montée du lac a simultanément augmenté avec une étendue affectée par des inondations chaque année. En se référant sur les résultats présentés à la figure 45, une évolution latérale statistique du lac Tanganyika qui ne connaît aucun retour à ses niveaux antérieurs à l'échelle annuelle est observée :

- ✓ En 2012, le niveau des eaux du lac passe de 1,6m à 8,6m de longueur
- ✓ En 2018, la montée des eaux du lac varie entre 3m à 12, 25m de longueur
- ✓ En 2021, le niveau des eaux évolue de 11,8 à 19,2 m de longueur
- ✓ En 2022, l'évolution en longueur des eaux du lac Tanganyika s'élève à 13,5m au cours des mois de janvier à avril.

Néanmoins, le réseau hydrographique exerce généralement son rôle dans la genèse des inondations pendant la saison pluvieuse. C'est dans ce contexte que la pluviométrie a été étudiée à une échelle annuelle en traitant les données brutes de l'IGEBU pour détecter son rôle exact dans la vulnérabilité de notre site de travail.

III.3.3. Facteurs climatiques

Les inondations se génèrent souvent à la suite des précipitations intenses qui engendrent des crues et un excès de ruissellement supérieur à la capacité d'infiltration du sol. Selon les données de l'IGEBU recueillies en 2022 dans le but de cette étude, le Burundi et plus particulièrement notre site de travail connaît une grande saison pluvieuse qui débute généralement du mois d'Octobre à Mai.

Toutefois, pour évaluer le rôle que joue cette dernière dans la genèse des inondations et éviter le mauvais choix de sa période exacte, la période d'étude a débuté du mois de

novembre à avril chaque année. L'intensité des précipitations moyennes annuelles est devenue le paramètre le plus important dans cette étude pour identifier les différents types d'inondations et les zones les plus vulnérables. Ce paramètre a été exprimé à l'aide de l'indice de Fournier modifié (IFM), qui est la somme des intensités moyennes mensuelles des précipitations enregistrées par les stations pluviométriques. La figure 46 nous permet d'analyser le comportement de l'évolution interannuelle combinée des précipitations pour les stations pluviométriques de l'Aéroport, Mparambo et Mabayi durant la période 2009-2022.

Malheureusement suite aux données pluviométriques incomplètes pour quelques mois des années de 2010, 2011 et l'indisponibilité des images pour l'année 2020, ces trois années ont été négligées dans cette analyse. En combinant les résultats de ces trois stations, voici le classement de ces onze années en fonction de la pluviométrie :

- 1) L'an 2013 : 3805,4 mm
- 2) L'an 2021 : 3483 mm
- 3) L'an 2018 : 3401,1mm
- 4) L'an 2015 : 3384,5 mm
- 5) L'an 2012 : 3314,9 mm
- 6) L'an 2022 : 3309, mm
- 7) L'an 2014 : 3277,7 mm
- 8) L'an 2009 : 3259,1 mm
- 9) L'an 2019 : 3175,4 mm
- 10) L'an 2016 : 2964,3 mm
- 11) L'an 2017 : 2728,7 mm,

Ces enregistrements pluviométriques de ces trois stations ont prouvé qu'au cours de la période d'étude, la pluviométrie est extrêmement variable dans toutes les stations (fig. 46). Après le classement de toutes les années qui font la période d'étude en fonction de la pluviométrie, les résultats comptant pour les années 2013, 2015 et 2021 nous ont servi dans la compréhension de l'importance des précipitations dans la genèse des inondations de la zone étudiée. Selon ces résultats pluviométriques comparés à ceux des inondations (fig. 46), une incompréhension naît si on considère cette évolution des précipitations à l'échelle annuelle. A cette même échelle, l'an 2013 se classe au premier rang avec 3805,4 mm au niveau de toutes les trois stations. Durant cette même année, les précipitations sont plus

importantes à Mabayi (1558,4mm) et à Mparambo (1564,3mm) par rapport à la station aéroport (682,7mm). Mais en exploitant les résultats journaliers des précipitations de toutes les stations, une variabilité journalière aussi faible (1,97 à 2,74 mm) est observée à la station aéroport. De ces résultats, on trouve une répartition presque égale des précipitations au niveau des stations Mabayi et Mparambo en 2015 et en 2021. Au niveau de la station aéroport par contre, l'an 2015 est marqué par une pluviométrie journalière faible (variant de 2,16 à 2,81mm) par rapport à celle 2021 (de 3,41 à 4,06mm). Cette variabilité journalière conditionne le risque d'inondation (figure 46).

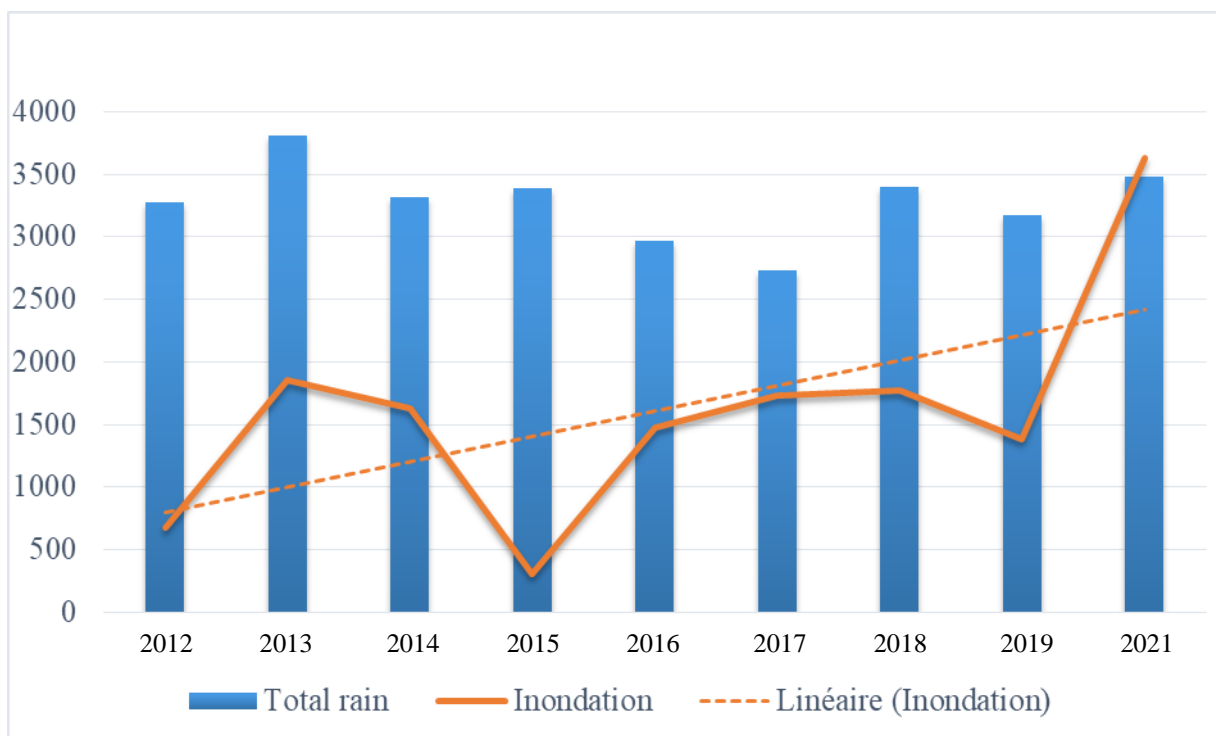


Figure 46 : Variations interannuelles des précipitations et leur rôle dans la genèse des inondations, sources de données pluviométriques: IGEBU.

Comme le montre cette figure 46, les inondations ont connu une évolution de tendance exponentielle depuis 2012 jusqu'à 2021. Quant à la pluviométrie, elle est généralement variable. Mais ce qu'il faut retenir est que les précipitations de Mparambo et Mabayi peuvent exercer une influence significative des inondations dans les zones Gatumba et Rukaramu sans que la pluviométrie soit importante à la station aéroport qui est très proche à ces zones. De plus, ce sont des précipitations journalières qui jouent un rôle crucial dans la genèse des inondations.

III.4. Géolocalisation des inondations en fonction du degré de sévérité

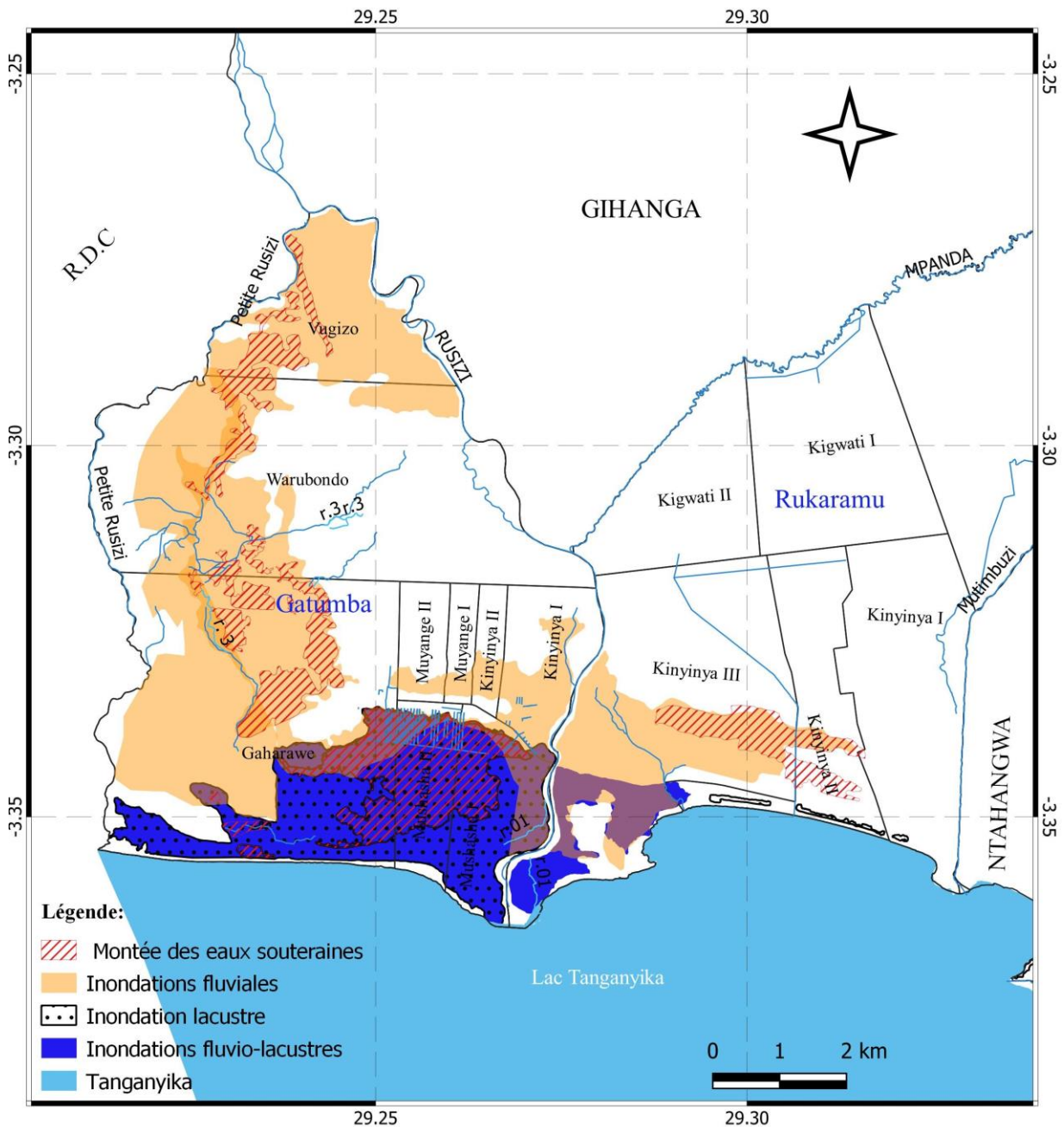


Figure 47: Carte des différents types et degré d'inondation

Pendant toute la période étude, quatre types d'inondation liés éventuellement aux événements pluviométriques à travers les rivières saisonnières et aux différents facteurs environnementaux ont été mise en évidence selon leur ampleur (figure 47).

Il s'agit des :

- ✓ Les Inondations causées par la montée des eaux souterraines se localisent essentiellement dans la zone Gatumba. Elles sont moins menaçantes que les autres

types d'inondations mais durent longtemps.

Elles menacent les quartiers/collines Vugizo, Warubondo, Gahawe, Mushasha I et II Kinyinya II et III

- ✓ Inondations dues à la montée des eaux du lac Tanganyika. Ces inondations sont régulières et affectent principalement les quartiers qui hébergent les zones tampons de ce lac. Ses conséquences sont énormes.
- ✓ Inondations fluviaux lacustres sont dévastatrices et durent moins. Ces types d'inondation sont liées et alertant dans toute la zone étudiée car ils causent beaucoup de dégâts humains et matériels depuis des années.
- ✓ Inondations fluviales sont catastrophiques. Elles menacent tous les quartiers de la zone d'étude autre que Kinyinya I, Kigwati I et II.

En effet, ces différents types d'inondations sont géolocalisés en fonction de leurs sources afin de classer les quartiers/collines selon leurs vulnérabilités.

III.5. Classification des quartiers/collines en fonction du degré de la vulnérabilité

Au cours de quatorze années précédentes, tous les quartiers des zones Gatumba et Rukaramu ne sont pas vulnérables aux risques d'inondations à la même échelle. Ceux de Gatumba sont plus concernés que ceux de Rukaramu (toutes les figures portant sur le sous chapitre III.2).

Les quartiers/collines les plus proches des rives du lac Tanganyika et de la rivière Rusizi sont fréquemment les plus touchées de la zone d'étude.

En effet, à base des informations recueillies lors de l'exploitation des imageries satellitaires correspondant à la période d'étude, les quartiers/collines sont groupés en fonction du degré de vulnérabilité (Tableau 1).

Tableau 1: Classification des quartiers/collines en fonction de la sévérité des inondations

Quartier/colline	Degré de vulnérabilité	Superficie en ha
Gaharawe, Mushasha I, Mushasha II	Elevé	365,304
Muyange I, Muyange II, Kinyinya I Kinyinya II, Kinyinya III	Modéré	951,50
Vugizo, Warubondo	Faible	1963,83

A partir de ces résultats issus de la cartographie, trois classes principales ont été identifiées en fonction du niveau du risque.

Les quartiers qui subissent du degré de vulnérabilité élevé sont ceux qui sont fréquemment et simultanément confrontés à tous les quatre types d'inondation. Quant à ceux qui sont soumis à une vulnérabilité modérée, ils sont exposés aux inondations fluviales et souterraines. Tandis que ceux qui sont attribuables d'une faible vulnérabilité, ne sont en aucun cas menacés par plus d'un type d'inondation.

III.6. Identification des facteurs de la vulnérabilité des zones inondées

A part des paramètres naturels du milieu qui jouent un rôle indispensable dans la genèse des inondations, les facteurs qui amplifient le risque d'inondation dans le site d'étude sont à 100% anthropiques.

Les zones bâties augmentent d'une année à une autre en passant de 583,24 ha à 956,49 ha malgré une réduction observée en 2017 (783,93 ha en 2016 à 732 ha en 2017), en 2019 (916,45 ha en 2018 à 894,38 ha en 2019) et en 2022 (955,77 ha en 2021 à 956,49ha en 2022).

La zone de travail connaît un autre risque qui détruit les habitations car de 2009 à 2011, les zones bâties passent de 583,24ha à 579ha alors qu'au cours de ces années, aucun bâti affecté par des inondations n'est trouvé. Suite à la croissance démographique qui se prononce au cours des années, l'impact des inondations sur les bâtis suit ce même rythme (figure 28).

Depuis 2009 jusqu'en 2022, des événements catastrophiques se prononcent à plusieurs reprises dans la zone d'étude pendant la saison pluvieuse et les conséquences deviennent de plus en plus grandioses suite à des constructions grandissantes et anarchiques des habitations dans les zones inondables. A titre d'exemple, l'an 2018 se caractérise par des bâtis qui occupent une étendue de 894,38ha. Parmi ces derniers, 223,93ha ont été inondées et en 2022, 575,65 sur 946,59ha de zones bâties ont été inondées.

En cas de réduction de superficie bâtie dans les zones inondables suite aux inondations ou autres événements destructeurs ou encore en cas de déménagement volontaire des populations, les impacts des inondations se réduisent aussi. Par exemple, les superficies bâties passent de 916,45ha en 2018 à 894,38ha en 2019 et par conséquent l'ampleur des inondations sur les bâtis se réduit également en passant de 223,93ha (en 2018) à 34,79ha de bâtis touchés (en 2019). Outre cela s'ajoute de la faiblesse ou de l'absence des ouvrages de

protection, l'inadéquation ou l'absence de plan d'aménagement urbain et l'inadéquation des matériaux de Construction (figure 49).⁵



Figure 48: L'inadéquation des matériaux de Construction et mesures de protection inefficaces à Muyange II

Des différentes maisonnettes trouvées dans la zone étudiée plus particulièrement à Muyange II ont prouvé leur incapacité dans la résistance contre les inondations, qui par conséquent constitue l'un des facteurs anthropiques amplificateurs de la vulnérabilité des zones Gatumba et Rukaramu. La plupart de ces maisons vulnérables sont construites dans des matériaux non durables qui ne peuvent pas supporter des événements climatiques purement éventuels.



Figure 49: Faiblesse et ou absence des ouvrages de protection de l'école de Kinyinya II et des maisons à l'intérieur du Quartier, mars 2021 . Source: Iwacu, 2021

L'absence et l'inefficacité des ouvrages de protection des infrastructures est l'un des défis relevés au cours de cette étude (figure 48 et 49).

⁵ <https://www.humanitarianresponse.info/en/operations/Burundi/document/burundi>.

Cartographie des zones à risque d'inondation dans des aires des zones GATUMBA et RUKARAMU en commune Mutimbuzi de la province de Bujumbura (Burundi).

Des habitations, des maisonnettes (C) et des écoles (D) se trouvant dans le site d'étude, plus particulièrement et plus précisément dans le quartier Kinyinya II subissent de lourdes conséquences causées par des inondations en cas des pluies torrentielles.



E



F

Figure 50 (A et B): Absence de plan d'aménagement urbain et manque d'entretien des habitations, Source: RFI et Yaga, 2021

Dans toute la zone étudiée, des plans d'aménagement urbain semblent absents et inadéquats. A Gaharawe (E) et Kinyinya I (F), des mesures de prévention aux inondations sont inexistantes. Ce facteur augmente le risque d'inondation dans ces quartiers car la submersion y dure longtemps. Et par conséquent, les impacts comme la perturbation des activités économiques et le développement des maladies contagieuses et chroniques augmentent aussi.

CHAPITRE IV. DISCUSSION DES RESULTATS

L'analyse des différents paramètres pour caractériser la zone de travail et l'emploi des outils de SIG et de la télédétection dans la réalisation du présent travail nous ont permis de mettre en évidence le dynamisme spatio-temporel des inondations et leurs conséquences dans notre zone d'étude pour la période considérée (de 2009 à 2022). Les analyses qualitatives et quantitatives effectuées font état de la vulnérabilité des bâtis et de la zone d'étude d'une façon globale depuis des années.

Nos résultats prouvent qu'il y a des années qui ont connu une réduction des zones bâties sans qu'il y soit des inondations, ce qui prouve l'existence d'une autre menace. Cette menace est à cent pourcent anthropique. De plus, les inondations peuvent seulement avoir lieu dans des zones inhabitées, ce qui fait qu'il y a des années connues par les habitats "*sans catastrophe d'inondation*" alors que l'environnement ne cesse d'en subir les conséquences (figure 27 et 28).

A titre d'exemple :

- ✓ Suite à ce que les eaux de la rivière Rusizi ont seulement colonisé les zones marécageuses en 2009, les inondations ont affecté une superficie de 1592,37 ha mais aucun bâti n'est menacé même si ce dernier couvre une étendue de 583,24ha.
- ✓ En 2022, les inondations ont envahi plus de la moitié de la zone d'étude et 575,65ha contre 956,49 ha de zones bâties ont été inondées.

Durant toute la période d'étude, toutes les zones étudiées ne sont pas affectées par des inondations au même degré. Les années au cours desquelles, les zones de Gatumba et Rukaramu connaissent tous des inondations sont des années de 2019, 2021 et 2022 mais aussi leur degré de vulnérabilité diffère d'une année à une autre.

Par contre, au cours des années de 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 et 2018, la vulnérabilité s'observe dans une seule zone de Gatumba et reste régulièrement grandissante dans les quartiers périphériques du lac Tanganyika. Sous l'action de vastes superficies régulièrement marécageuses, les zones Gatumba et Rukaramu ont connu des inondations dès leur origine. Outre cela, ces zones connaissent des rivières saisonnières qui dépendent fortement des précipitations ainsi qu'à la montée des eaux de la Rusizi. La survenue de ces rivières n'est pas envisageable. Selon les mesures effectuées dès le début de la période d'étude, la longueur des rivières saisonnières varie entre 159 et 1995m.

IV.1. Types d'inondations dans les zones de Gatumba et Rukaramu

Outre les conditions climatiques, divers facteurs géographiques rendent la zone d'étude propice aux différents types d'inondations. La présente étude visait à analyser l'occurrence des différents types d'inondations dans les zones de Gatumba et Rukaramu. En effet, des inondations fluviales, inondations lacustres, inondations fluviaux-lacustres et les inondations dues à la montée des eaux souterraines ont été trouvés dans ces zones. Mais, ces dernières ne subissent pas en totalité de ces quatre types d'inondations au même degré de vulnérabilité. De plus, toute la zone de Rukaramu est éloignée des risques corrélés à la montée des eaux souterraines tandis que cette dernière est très régulière à Gatumba.

Selon le Conseil Général de l'Essonne (2017), les inondations de plaine ou les inondations fluviales se produisent lorsque la rivière sort lentement de son lit mineur et inonde la plaine pendant une période relativement longue. Nous constatons dans notre étude que ce type d'inondation se produit surtout lorsque la petite Rusizi et la grande Rusizi sortent de leurs lits moyens et éventuellement leur lit majeur pour principalement déborder dans son île (zone Gatumba) et quelques superficies de la zone Rukaramu qui logent les lits majeurs de cette rivière. Ses conséquences sont importantes suite au temps de submersion.

En ce qui concerne les inondations pluviales, elles touchent jusqu'à peu près plus de 60% de la superficie de la zone de travail. Elles sont brutales et ses conséquences sont beaucoup plus importantes que ceux qui sont engendrées par des autres types d'inondations mais le temps de submersion est minime.

Quant aux inondations dues à la montée des eaux de la nappe phréatique et les inondations dues à la montée des eaux du lac Tanganyika, la zone de Gatumba les a connu depuis des années suite à sa nappe phréatique qui affleure et se gonfle en période des précipitations. De plus, nos résultats issus de la digitalisation ont prouvé que durant toute la période d'étude, les inondations dues à la montée de la nappe phréatique deviennent généralement les plus régulières avec des superficies affectées très réduites tandis que les trois autres impactent les zones les plus étendues et engendrent des dégâts énormes pendant une courte durée.

Ce constat corrobore avec celui du Conseil Général de l'Essonne, (2017) qui montre que l'inondation par remontée de nappe phréatique concerne particulièrement les terrains bas ou mal drainés. Sa dynamique lente perdure plusieurs semaines.

Ces inondations sont possibles dans certaines zones marécageuses. Au surplus, en période de fortes précipitations, le sol s'engorge par excès d'eau : l'eau stagne en surface⁶.

En période de crue du lac Tanganyika, les eaux envahissent tout le lit majeur, en partie occupé. Ces éléments en font un site particulièrement exposé aux aléas. L'inondation due à la montée des eaux du lac Tanganyika affecte des quartiers/collines de toutes les deux zones hébergent ses rives. Les conséquences sont énormes et l'aléa dure moins.

IV. 2. Dépendance inondation-facteurs genèses d'inondation

Dans cette étude des zones inondables, l'analyse des cinq paramètres dont la pente topographique, le relief, la pédologie, l'hydrologie et la pluviométrie ont constitué une phase pilote qui, démontre que des zones plus étendues de Gatumba et Rukaramu sont plus ou moins exposés aux risques d'inondation. Cette analyse de ces paramètres est semblable à celle de (Guelbeogo, 2022) dans son ouvrage intitulé "*Cartographie des risques d'inondation dans le bassin versant du Kou au Burkina Faso*" qui à partir de laquelle, une analyse multicritère combinant huit facteurs (la pluviométrie, la pente, l'altitude, l'indice topographique d'humidité, hydrologie, les sols, l'occupation des terres et la distance par rapport au drainage) dont cinq critères prises en considération sont communes, approuve que le bassin versant du Kou dans sa grande partie est plus ou moins exposé aux risques d'inondation.

Les zones de Gatumba et Rukaramu sont vulnérables aux inondations suite à ces caractéristiques environnementales et climatiques. La faible pente de ces zones joue son rôle de facteur passif des inondations qui est fortement corrélée à la fois au volume et à la vitesse du ruissellement des eaux de surface, ainsi qu'à l'infiltration dans les nappes souterraines. Elle accélère le ruissellement quand l'inclinaison est accentuée et favorise la concentration des eaux lorsqu'elle est faible (Guelbeogo, 2022). De plus, l'altitude de ces zones a toujours justifié sa probabilité d'être toujours sous le risque. Elles se trouvent dans une basse plaine de la Rusizi qui est caractérisée par des reliefs de faibles altitudes variant entre 760 à 775m. Ces résultats sont semblables à ceux de (Nsabimana, 2022) qui dans son ouvrage "*Perception de la population des causes de la vulnérabilité face à l'inondation dans une ville africaine : le cas de Bujumbura*", a trouvé lui aussi que ces zones se démontrent des reliefs

⁶ <https://www.humanitarianresponse.info/en/operations/Burundi/document/burundi>

de faibles altitudes car elles se logent dans une étroite bande de terre d'une altitude variant de 774 à 1000 m d'altitude a trouvé aussi (Nzigidahera, 2006) dans une étude nommée

"Etude de vulnérabilité et d'adaptation aux changements climatiques au Burundi".

Cette affirmation corrobore également à celle de Guelbeogo (2022), qui dans son ouvrage intitulé *"Cartographie des risques d'inondation dans le bassin versant du Kou au Burkina Faso"* a démontré que la vitesse de circulation de l'eau dépend aussi de l'altitude.

Il a précisé aussi que pour un même débit, la hauteur d'eau sur les surfaces ruisselantes sera d'autant plus faible en basse altitude. Le risque de mise en charge des ouvrages ou de submersion significative est aussi donc lié à l'altitude. Cette faible altitude favorise la submersion et la recharge de la nappe phréatique en cas de fortes précipitations. Bien plus, elle ne résiste pas à la montée des eaux du lac Tanganyika suite à une altitude du lac Tanganyika qui parvient la plupart des fois à une élévation supérieure à celle des zones Gatumba et Rukaramu car elle varie entre 773,86 à 776,98m d'altitude. Cette faible élévation de la zone d'étude par rapport à celle du lac Tanganyika fait que les régimes fluviaux et lacustres de cette même zone réagissent négativement face à cette zone. Pour cet effet, les eaux du lac Tanganyika et de la rivière Rusizi inondent les zones étudiées depuis le début de la période d'étude jusqu'à la fin. Plus le débit des eaux augmente, plus la hauteur augmente aussi d'où le débordement dans le lit majeur et dans les milieux construits.

Ces résultats corroborent à ceux de Williams et al., 1995 dans ouvrage intitulé *"Guidelines and principles for social impact assessment. Environmental Impact Assessment Review"* et Campolo, 1999 dans *"River flood forecasting with a neural network mode"* qui ont précisé que c'est en cas de fortes crues et du débit élevé causées la plupart des fois par des précipitations intenses que la capacité du lit mineur n'est alors pas suffisante pour canaliser les flux d'eau.

Pendant la saison pluvieuse, le réseau hydrographique inonde le site d'étude sous l'action des sols qui ne sont pas aussi résistants aux débordements naturels des eaux. Les caractéristiques pédologiques augmentent aussi la susceptibilité des zones qui font notre site de travail aux inondations suite à une faculté limitée d'infiltration des eaux de pluie. L'eau non infiltrée s'écoule en profondeur (verticalement ou latéralement) pour alimenter les nappes souterraines, les lacs et les rivières. Les différents types de sol de notre zone d'étude présentent une faible capacité de rétention des eaux de différentes sources. Or, comme il a aussi précisé (Ratsivalaka et al. 2005) dans *"Erosion et gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols"*, tout ralentissement de l'infiltration entraîne une stagnation et (Armand,

2013) dans *"Etude de l'impact des activités anthropiques et de la variabilité climatique sur la végétation et les usages des sols, par utilisation de la télédétection et des statistiques agricoles, sur le bassin versant du Bouregreg"* a également trouvé que ça entraîne une accumulation de l'eau dans la porosité des sols et par conséquent, cette faible infiltration et une grande accumulation constituent des principales causes de la genèse des inondations. Ces actions contribuent également à la morphologie du sol sous l'action des événements climatiques en augmentant ou en réduisant la pente qui intervient aussi dans la formation des inondations. Ces zones sont généralement caractérisées par des différentes catégories des sols variant la pente, l'altitude, les types d'occupation, le facteur hydrologique (Godschalk, 2003, Nzigidahera, 2006). Dans ce même cadre, nos résultats corroborent avec certains travaux déjà réalisés. Ainsi, les précipitations constituent généralement le principal facteur déclencheur des inondations. Très spécifiquement, ce sont les précipitations journalières qui sont surtout les plus concernées dans la survenue d'une inondation. Il n'y a pas d'inondation lorsque les pluies connaissent une bonne répartition sur toute l'année. Par contre, lorsqu'elles tombent en une seule journée l'équivalent d'un mois ou même parfois d'une année, il est inévitable qu'une inondation survienne.

IV. 3. Vulnérabilité du site d'étude.

IV. 3.1. Vulnérabilité de la zone d'étude en fonction du temps

Durant toute la période d'étude, les zones de Gatumba et Rukaramu connaissent une vulnérabilité aux risques d'inondation sans précédent. Selon nos résultats, on ne constate que les superficies concernées par des inondations les plus importantes sont projetées en 2022, 2021 et en 2013 par rapport aux autres années suite à la combinaison de tous les types d'inondations identifiés dans la zone étudiée ainsi que la montée importante et évolutive du lac Tanganyika au cours des années. L'ampleur des inondations en termes de dégâts humains et matériels dépend de l'évolution de l'occupation du sol.

En fonction du temps, les résultats issus de la digitalisation ont en outre quantifié et classé la vulnérabilité des bâtis et de la zone de travail en général et fini par montrer que :

- (1) La vulnérabilité faible a eu lieu en 2015 et est répartie sur une superficie de 307,96ha soit 3,41 % de la zone d'étude, 751,22 de zone bâtie et pas de superficie bâties inondées.

- (2) La vulnérabilité moyenne a eu lieu en 2013 où la superficie susceptible d'être inondé est de l'ordre de 1858,51 ha soit 20,61 % de la zone d'étude. Les zones bâties occupent 721,06ha parmi lesquelles 2,94ha de bâties ont été inondées.
- (3) La vulnérabilité la plus sévère est enregistrée en 2022, la superficie inondée qui équivaut à 5319,43 ha soit 59 % de la zone d'étude. Les zones bâties couvrent une étendue de 998,59ha à partir desquelles 787,88ha ont été inondées.

IV. 3.2. Vulnérabilité de la zone d'étude en fonction de l'espace

En fonction de la vulnérabilité aux risques encourus dans l'espace, les quartiers/collines les plus potentiellement sujettes à des inondations (tableau 1) se situent en grande partie à côté des rives du lac Tanganyika et dans les zones berges du bassin versant de la rivière Rusizi.

Ces résultats rentrent dans le même cadre avec ceux qui sont obtenus par Faye (2021) qui, dans son article basé sur la "*Cartographie des risques d'inondation à l'échelle du bassin fluvial à l'aide de l'indice de potentiel d'inondation: Cas du sous-bassin du Niéri-Ko (Bassin de la Gambie)*" a souligné que les zones inondables se produisent principalement dans les basses terres avec un risque d'inondation très élevé à proximité du réseau de drainage.

En effet, nos résultats ne sont pas éloignés de ceux de cet auteur car ces derniers ont montré que les inondations se produisent essentiellement dans les zones traversées par le réseau fluvial et très particulièrement dans le littoral du lac Tanganyika. Nos résultats sont aussi semblables à ceux de (Karrouchi et al., 2020) qui ont trouvé que les zones vulnérables aux inondations sont celles qui se situent en grande partie dans la plaine à côté de la rive gauche de l'oued Laou et dans l'exutoire du bassin versant de Oued Laou.

IV. 3.3. Facteurs amplificateurs de la vulnérabilité

Les inondations sont toujours aggravées par les activités anthropiques. Cette affirmation est approuvée par (Faye, 2021) qui, dans son œuvre intitulé "*Sciences et techniques de l'eau et de l'environnement eau-agriculture-climat face aux enjeux climatiques*" a souligné que bien que les inondations fassent partie des risques naturels, elles sont fréquemment aggravées par les activités humaines. Parmi ceux-ci, on peut citer : la pauvreté des ménages, l'inadéquation des matériaux de construction, la construction d'habitations dans des zones inondables, la faiblesse des ouvrages de protection (digues), l'ensablement des points d'eau, l'inadéquation ou l'absence de plan d'aménagement urbain, la faiblesse ou l'absence des mécanismes

d'information et d'alerte, la faiblesse des structures de gestion des catastrophes, etc. Ces facteurs de vulnérabilité sont aussi approuvés par (Serre, 2011) dans son thèse doctorale "*La ville résiliente aux inondations Méthodes et outils d'évaluation*" et (Aven, 2012) dans "*The risk concept-historical and recent development trends. Reliability Engineering and System Safety*".

Au cours des années, les inondations constituent un risque évolutif dans l'espace suite à la croissance démographique importante qui se manifeste dans les zones de Gatumba et Rukaramu. Ces zones font parties des plus peuplées au niveau national. (Sabushimike, 2017) les a classées dans "*Les circonstances Nationales*" au 2^{ème} rang avec 700 hab/km²

Pour combler ces résultats, une évolution démographique a été étudiée aussi à l'aide de l'analyse du développement des bâtis dans les espaces inondables. Ces zones bâties inondables occupent une étendue variant de 00 ha en 2009 à 787,88 ha en 2022 où la vulnérabilité des populations reste forte. Durant toute la période d'étude, l'installation des bâtis dans les zones inondables constitue un impact de grande ampleur. Ainsi, ces résultats partagent la même logique avec ceux de Cutter et *al.*, (2003) dans son ouvrage basé sur "*Cartographie du risque d'inondation en milieu urbain adaptée à la gestion de crise*" a précisé *qu'une inondation ne constitue pas un risque dans une zone inhabitée car aucun vulnérable sera enregistré. Mais si c'est au contraire le risque sera présent et pourra être fort.* Ce qui rend la question de la gestion du risque d'inondation plus ardue pour les gouvernements et pour les municipalités.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les inondations sont des catastrophes naturelles qui font assidument de nombreuses victimes d'une année à une autre et affectent négativement les humains et les enjeux. Les zones Gatumba et Rukaramu de la plaine de l'Imbo (à l'Ouest du Burundi) qui sont menacées par des inondations catastrophiques régulières, constituaient notre zone d'étude. La cartographie des zones à risques d'inondations était l'objectif de notre étude. Cette dernière vise à mettre en exergue des zones potentiellement inondables ou à risques d'inondations dans un contexte hydrographique, géomorphologique et climatique en vue d'une gestion intégrée et durable de ces risques. Ce but est atteint à partir de l'intégration d'une relation précipitation-niveau-débit-montée des eaux fluviales et lacustres à la méthodologie de détection et de l'extraction des zones inondables par la digitalisation des imageries satellitaires. Cette méthodologie proposée, tire également profit de diverses approches développées dans des travaux antérieurs mais qui n'ont jamais été utilisées pour l'étude de notre zone d'étude et sous la même forme présentation. Alors que la plupart des études n'intègrent que les dimensions sociales ou économiques de la vulnérabilité, nous intégrons également les notions de vulnérabilité du bâti à l'analyse de la vulnérabilité humaine.

Cependant, cette étude vient de remarquer que les risques d'inondations connaissent une évolution spatio-temporelle croissante et importante depuis 2009 à nos jours qui, provoque des conséquences néfastes du point de vue humanitaire, économique et environnemental suite à leur agrandissement dans les zones inondables bâties ou non bâties. Ces dernières englobent essentiellement les zones littorales du lac Tanganyika et ceux qui hébergent les rives de la rivière Rusizi. Ce réseau hydrographique perturbe les vies humaines pendant la saison pluvieuse.

Les résultats de cette étude entreprise dévoilent également que les tendances d'urbanisation de ces zones apportent une contribution importante à l'augmentation du risque et de la vulnérabilité. Car, sans enjeux et êtres humains, les inondations ne sont plus une problématique. Cela est démontré à travers une liste des cartes annuellement conçues après l'évaluation de la vulnérabilité des actifs sociétaux se trouvant dans des zones inondables. A partir de cela, une augmentation de plus de 50% (par rapport à la superficie totale de la zone d'étude) de l'étendue affectée par des inondations a été établie en comparant l'année qui a connu moins les inondations et celle la plus menacée. Outre cela, une superficie bâtie variant de 0,67 à 575,65ha a été menacée par cet aléa durant la période d'étude.

Du surcroît, les risques d'inondations sont plus importants pour les dernières que pour les premières années de la période d'étude. Cette étude avait aussi davantage trouvé que l'expansion des zones inondables n'est pas fondée sur un seul paramètre et/ou une seule caractéristique du milieu mais plutôt sur une combinaison de tous les facteurs naturels du milieu ainsi que les facteurs climatiques. Ces derniers nous ont éclairés dans les estimations de la période de retour du risque d'inondation. Les zones Gatumba et Rukaramu connaissent un retour de ce risque pendant les mois de janvier, mars, avril et décembre. A l'échelle annuelle, les risques d'inondations se multiplient à peu près de 2 à 10 fois par rapport aux risques encourus au cours de l'année précédente.

Ainsi, il nous est extrêmement fier que notre étude venait d'exposer la provenance et les types d'inondations ainsi que le degré de vulnérabilité du site d'étude à la vue de tous les acteurs publics et privés qui devraient prendre part dans la prévention des risques et dans la gestion de catastrophes. Après avoir mieux connu le risque, des solutions pour intervenir dans la gestion des risques d'inondations ont été proposées. Les meilleures stratégies seraient d'agir sur les montagnes surplombant la plaine de la Rusizi en général en mettant en place des solutions basées sur le bon fonctionnement des milieux naturels (ex : végétalisation) et sur une solidarité territoriale entre l'amont et l'aval de la rivière Rusizi. Car les événements les plus courants des inondations catastrophiques affectant de vastes étendues, sont souvent provoqués par les crues de la Rusizi sous l'action de dépôts issus des pertes en terres énormes. La limitation des ruissellements sur les versants agricoles, ne pas augmenter les enjeux en zone inondable, la création de bassins de rétention, de puits d'infiltration, l'amélioration des collectes des eaux pluviales, la préservation d'espaces perméables ou d'expansion des eaux de crues, réduire le transport solide en provenance du lit de la rivière Rusizi et du bassin versant (la restauration des terrains en montagne, la reforestation, etc). La canalisation et le reméandrage de cette rivière sont également suggérés. Quant aux zones inondables par le lac Tanganyika, une immigration est conseillée en fonction des réalités du terrain mais tout en ayant un consensus entre le gouvernement et les habitants des zones affectées.

Néanmoins, accusons-nous dans cette étude d'avoir uniquement traité des informations satellitaires de longue période pour analyser et étudier les causes naturelles et le développement des risques d'inondations dans les zones Gatumba et Rukaramu. Il serait beaucoup préférable dans notre étude au cas où les facteurs limitant à savoir l'inaccessibilité

de certaines zones, la disponibilité limitée des images satellitaires, la présence des nuages, le temps limité et manque des moyens seraient enlevés dans la réalisation de ce travail.

Mais, nous ayons continuellement l'espoir que cette étude va constituer une base de données très importante pour assurer le départ pour plusieurs acteurs et chercheurs en vue de répondre positivement au problème d'inondation pour l'environnement et les populations locales.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adetunji M., Oyeleye O. , 2013 : Evaluation des causes et des effets des inondations à Apete, zone de gouvernement local d'Ido, Etat d'Oyo, Nigeria. *Civ. Environ. Rés.*, 3, p.19-26
- ABAKIR, 2020, Etude de base du bassin du Lac Kivu et de la rivière Rusizi, p 39
- Ahern, M., Kovats, R. S., Wilkinson, P., Few, R., & Matthies, F, 2005. Global health impacts of floods: epidemiologic evidence. *Epidemiologic reviews*, 27, 1. p. 36-46.
- Alex, O. N., Olivier, L., Willy, L., Sandjong, J. K., & Paul, G. K. (2022). *Contribution à la cartographie de l' aléa inondation dans le bassin versant du Mfoundi à Yaoundé (Cameroun) par l' Analyse Multi Critère (AMC) basée sur le Processus d' Analyse Hiérarchique (AHP) Contribution to flood hazard mapping in the Mfoundi*. 13–27 p.
- Ali, K., Bajracharya, R. M., & Koirala, H. L. (2016). A Review of Flood Risk Assessment. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 1(4), 1065–1077 p.
- Armand, T. B. Z. (2013). *Etude de l' impact des activités anthropiques et de la variabilité climatique sur la végétation et les usages des sols , par utilisation de la télédétection et des statistiques agricoles , sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc)* p. 190.
- Arthur C. Benke, 2001. Importance of flood regime to invertebrate habitat in an unregulated river–floodplain ecosystem. *Journal of the North American Benthological Society*, 20, 2. 225-240 p.
- Aven, T, 2012. The risk concept-historical and recent development trends. *Reliability Engineering and System Safety*, 99, 0951.33-44 p.
- Banque mondiale, 2017. Dispositifs de protection contre les inondations fondés sur la nature : principes et recommandations pour la mise en oeuvre. Washington : Banque mondiale. 32 P
- Banque mondiale 2021. Vers la résilience face aux catastrophes en Afrique subsaharienne : Renforcer les capacités régionales de coordination, de planification et de conseil en matière de gestion des risques de catastrophe Washington, DC : Banque mondiale. 82 p.
- Brachet, C., & Bolo, P. (1997). Système d'information géographique et de visualisation de l'aléa inondation application aux crues de la Marne. *Houille Blanche*, 52(8), 61–63 p.
- Bronfort Sacha, 2017. Les stratégies d'adaptation face au risque d'inondation dans les zones d'habitat spontanés de Ouagadougou, Burkina Faso (mémoire de master).
- Cahen, (1954) - Géologie du Congo Belge : XV 577 p., Liège Vaillant Carmanne, 98p

- Campolo, M., Andreussi, P., & Soldati, A. (1999). River flood forecasting with a neural network model. *Water resources research*, 35,4. 1191-1197 p
- Conseil Général de l'Essonne. (2017). Le risque inondation. Dossier d'information. *Alp'Géorisques et Graphies*, 26 p.
- CRED. (2007), Bilan des catastrophes naturelles dans le monde de 1975 à 2004, The OFDA/CRED International Disaster Database", Université Catholique de Louvain, Bruxelles, Belgique.
- Cutter, S. L. (1996). Vulnerability to environmental hazards. *Progress in Human Geography*, 20(4), 529–539 p.
- Cutter et al., (2003). Cartographie du risque d'inondation en milieu urbain adaptée à la gestion de crise, 87p.
- Detrembleur, S., Dewals, B., Archambeau, P., Erpicum, S., & Piroton, M. (2009). Modélisation numérique et gestion du risque inondation - Retour d'expérience sur les modèles topographiques à haute résolution. *Techniques - Sciences - Methodes*, 7/8(2009), 23–29 p.
- Djellouli, Y., & Saci, A. (2003). Catastrophe «naturelle»: les inondations dévastatrices du 9 et 10 novembre 2001 à Bab El Oued (Alger, Algérie). *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 23, 236–242 p.
- Duvat, V. (2015). Changement climatique et risques côtiers dans les îles tropicales. In *Annales de géographie*. Armand Colin. 705, 5. 27 p.
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., ... & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of geophysics*, 45, RG2004.
- Faye, C. (2021). *Sciences et Techniques de l' Eau et de l' Environnement Eau-Agriculture-Climat ' 2021 Face aux enjeux climatiques et. March.*
- Fiorillo E. Issa H. Rocchi L et Tarchiani V, 2015. Manuel de la base de données des inondations. Rapport N° 5. Projet Adaptation Au changement climatique, prévention des catastrophes et Développement agricole pour la sécurité Alimentaire ANADIA Niger
Projet Adaptation au changement climatique, prévention des catastrophes et Développement agricole pour la sécurité Alimentaire. 37p.
- Fischhoff, B., Slovic, P., Lichtenstein, S., Read, S., & Combs, B. (1978). How safe is safe enough? A psychometric study of attitudes towards technological risks and benefits. *Policy sciences*, 9, 127-152 p.
- Geert Baert, Patient Habimana, François Kervyn, Mohammed Loghmouch, Marcien

- Sendegeya, Eric Van Ranst, Ann Verdoodt, 2014 d'après le tracé original d'Eddy Tessens, Etienne Mvuyekure, Jean Paul Muganza et Célestin Bigura, Carte pédologique. Ministère de l'agriculture et de l'élevage, Institut des sciences agronomiques du Burundi.
- Gendreau, N., Longhini, M., & Combe, P. M. (2010). *une perspective socio-économique*.
- GIEC, 2007. Bilan des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. GIEC, Genève, Suisse... 103 p.
- Gilard, O., & Gendreau, N. (1998). Inondabilité: a method for prevention of flood risk for a better integrated management of the river catchments. *Revue Des Sciences de l'Eau*, 11(3), 429–444 p.
- Godschalk, D. R, 2003. Urban hazard mitigation: Creating resilient cities. *Natural hazards review*, 4, 3, 136-143 p.
- Guelbeogo, S. (2022). *Cartographie des risques d' inondation dans le bassin versant du Kou au Burkina Faso Résumé*. 21(3), 60–75 p.
- Hellmuth, M., Moorhead, A., Thomson, M. et Williams, J. (eds) 2007. Gestion du risque climatique en Afrique : ce que la pratique nous enseigne. Institut international de recherche pour le climat et la société (IRI), Columbia University, New York, USA. 117p.
46. ISO 31000 : Management du risque. Lignes directrices
- Henry et al., 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. 238 pages, 238 pp.
- Hostache et al., 2005. Caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellites
- Hostache, R. et al., 2009. Water level estimation and reduction of hydraulic model calibration uncertainties using satellite SAR images of floods. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 47(2): 431-441 p.
- IPCC, 2012. Managing The Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, Cambridge University Press, 582 pp.
- Ilunga, L. (2007). Environnements sédimentaires et mineéralogie des formations superficielles de la Plaine de la Ruzizi (Nord du Lac Tanganyika). *Geo-Eco-Trop*, 31(1), 71–104 p.
- Karrouchi, M., Touhami, M. O., Oujidi, M., & Bengamra, S. (2020). *Cartographie des zones*

- à risque d' inondation dans la région de Tétouan : Cas du bassin versant de Oued Laou (Nord-Ouest du Maroc) [Mapping of flooding risk areas in the Tetouan region : Case of Oued Laou Watershed. 29(2), 206–220 p.*
- Khalifa, D. (2015). *Contribution à l'étude de l'aléa " inondations": Genèse et prédiction Cas de la vallée d'El-Abadia (w.Ain Defla). 112 p.*
- Kovacs Y. Doussin, N., Gaussens, M., & Pacoud, C. L, 2017. Risque d'inondation et ville des pays en développement. AFD. Notes techniques. 111 p.
- Landmann, 2016. Etat des lieux des démarches de réduction de la vulnérabilité sur le bâti face à l'inondation. Office International de l'eau. Synthèse documentaire. 23 p.
- Lang, M., & Claudet, R. (2005). Les échelles de gravité sur les inondations: réflexion nationale et exemple dans l'Hérault. *La Houille Blanche*, 91(1), 52–59 p.
- Liniger, H., van Lynden, G., Nachtergaele, F., & Schwilch, G. (2008). Cartographie de la dégradation et de la gestion durable des terres (QM). *Un Questionnaire Pour La Cartographie de La Dégradation et de La Gestion Durable Des Terres.*
- Mamadou Ibrahim, Alassane Oumarou Salifou, Malam Abdou Moussa, Garba Zibo, 2019. Risques D'inondation Et Proposition D'un Plan D'évacuation Des Eaux De Pluie Dans La Ville De Kantché, Région De Zinder Au Niger. *European Scientific Journal*.15, 35. 1857-7881
- Mapatano, B. (2015). *La vingt unieme conference des nations unies sur le climat tenu a paris du 30 novembre -11 decembre 2015.*
- Mahutin Bernice D. AHOUCANGAN., Djaby, B., Ozer, P., Hountondji, Y. C., Thiry, A., & De Longueville, F, 2014. Adaptation et résilience des populations rurales face aux catastrophes naturelles en Afrique subsaharienne. Cas des inondations de 2010 dans la commune de Zagnanado, Bénin. Université de Liège. 265-278 p.
- MEDD. (2004). Les inondations - Dossier d'information risques naturels majeurs. [Rapport] Ministère de l'Écologie et du Développement Durable. *Document d'information*, 24 p.
- Mendonça, F., Buffon, E. A. M., & Goudard, G, 2015. L'adaptation urbaine au changement climatique global: les inondations à Curitiba et Pinhais (Brésil). XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège, 200-205 p.
- Mini, R., Henri, R., Moal, L., & Cedex, R. (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 mapping of the flooding risk areas of western semi-*

mountainous region of côte d ' ivoire : cont. 5.

- Montoroi, J. (2015). *Rôle des sols sur la génèse des inondations Introduction direct d ' un cours d ' eau qui sort de son lit mineur pour occuper son lit majeur . Il peut être lent - la submersion quotidienne (marées), accidentelle (ruptures de digue ou écluse , tempêtes ,. January 2012.*
- Mugalu, J., Nakakeeto, M. K., Kiguli, S., & Mulindwa, D. H. K. (2006). *Aetiology , risk factors and immediate outcome of bacteriologically confirmed neonatal septicaemia in Mulago hospital , Uganda . 120–126p.*
- Ndayegamiye, A. (2007). *Élargir le champ de conception des indicateurs sociaux Proposition d'une approche relationnelle à partir du contexte socioéconomique des années 90. Cas du Burundi.* 180 p.
- Ngenzebuhoro, 2020. *Géométrie et caractérisation hydrodynamique d'un système aquifère plio-quaternaire; Cas de la plaine de la basse Rusizi (Burundi), 18 p.*
- Nsabimana, J., Henry, S., Ndayisenga, A., & Michellier, C. (2022). *Perception de la population des causes de la vulnérabilité face à l'inondation dans une ville africaine : le cas de Bujumbura. I(April), 1–8 p.*
- Ntumba, W. (2015). *Cartographie des activités de conservation des sols et représentation des risques naturels au sein du bassin. 58.*
- Nzigidahera. (2006). *Etude de vulnérabilité et d'adaptation aux changements climatiques au Burundi. 1–66 p.*
- OCHA et PNUD, 2020: *Inondations des zones riveraines du lac Tanganyika, 5p.*
- OCHA. (2021). *Burundi : inondations et glissements de terrain, Flash Update No. 4. 2, 2.*
- OCHA, 2022. *Aperçu des besoins humanitaires. Burundi. 142 p.*
- Ologunorisa, T. E. (2004). *An assessment of flood vulnerability zones in the Niger Delta, Nigeria. International Journal of Environmental Studies, 61(1), 31–38 p.*
- OIM, 2021: *Hotspot river Flood Hazard Assesment, 25 pages.*
- Quenault, B, 2015. *De Hyōgo à Sendai, la résilience comme impératif d'adaptation aux risques de catastrophe: nouvelle valeur universelle ou gouvernement par la catastrophe? Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie, 6,3.18 p.*
- Ratsivalaka, S., Serpantié, G., Noni, G. De, & Roose, E. (2005). *Érosion Et Gestion Conservatoire De L' Eau Et De La Fertilité Des Sols. Actualité Scientifique, 313 p.*
- Reghezza, M, 2006. *La vulnérabilité: un concept problématique. F. Léone et F. Vinet, La*

- vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques, Montpellier, PULM, coll. Géorisque, 1. 35-40 p.
- Reghezza-Zitt, M., & Jon, I. (2019). Gestion des risques et des crises, entre gouvernance de la sécurité et gouvernance territoriale. Ce que la résilience change (ou pas) en Île-de-France. *L'Espace Politique. Revue en ligne de géographie politique et de géopolitique*, 36 p.
- Renard, F., & Soto, D., 2015. Une représentation du risque à l'intersection de l'aléa et de la vulnérabilité: cartographies des inondations lyonnaises. *Geographica Helvetica*, 70, 4. 333-348 p.
- Reynard, E., Thomi, L., November, V., Barbisch, C., & Penelas, M. (2006). Apprendre par les catastrophes naturelles: le cas des inondations récentes en Suisse. *Actes Du Deuxième Congrès International " L'eau En Montagne, 20(23.9), 2006.*
- Ruzima S., GITEC, Dr. Karen Hetz, Adelphi, 2017. Prévention des risques et gestion des catastrophes au niveau communal au Burundi (Guide de formation pour la prévention des risques et la gestion des catastrophes) Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit (GIZ), 18 p
- Sabushimike, J. M(OBPE), 2017. Les circonstances Nationales : République du Burundi, Ministère de l'eau, de l'environnement, de l'aménagement du Territoire et de l'urbanisme. 46 p.
- Sahar, A., Hajji, O., Ezzine, A., & Hermassi, T. (2019). *Cartographie du risque d'inondation de la Haute Vallée de Medjerda avec Hec- Ras. January 2020.*
- Serre, D., 2011. La ville résiliente aux inondations Méthodes et outils d'évaluation. Thèse de doctorat. Université Paris-Est. 173 p.
- Schmitt, L., & Nobelis, P. (2007). Complémentarité entre typologies hydro-géomorphologique et biologique de rivières dans l'hydrosystème fluvial ello-rhénan français. *Recherche, January.*
- Schneiderbauer, S., & Ehrlich, D. (2004). *Risk, Hazard and People's Vulnerability to Natural Hazards: a Review of Definitions, Concepts and Data Megacities View project Global Human Settlement Layer View project. September 2015.*
- Smith, L. C. (1997). Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: A review. *Hydrological Processes*, 11(10), 1427–1439 p.
- Tanguy, A. (2012). *Cartographie Du Risque D ' Inondation En Milieu (Issue November 2012).*

- UNISDR, C, 2015. The human cost of natural disasters 2015: A global perspective
- Vatseva, R., Kopecka, M., Otahel, J., Rosina, K., Kitev, A., & Genchev, S. (2015). 5th International Conference on Cartography and GIS. *Cartography and Geoinformation*, 13(22), 569–578p.
- Veyret, Y. & Laganier, R, 2013. Atlas des risques en France. Prévenir les catastrophes naturelles et technologiques, Autrement, 96 p.
- Wade, S., Faye, S., Dieng, M., Kaba, M., & Kane, N. R, 2009. Télédétection des catastrophes d'inondation urbaine: le cas de la région de Dakar (Sénégal). Journées d'Animation Scientifique (JAS09) de l'AUF Alger. 7p
- Wallez, L. (2010). Inondations dans les villes d' Afrique de l'Ouest: Diagnostic et éléments de renforcement des capacités d'adaptation dans le grand Cotonou. *Ingénierie et Management de l'Environnement et Du Développement Durable*, MSc, 90 p.
- Williams, G., Thompson, J., & Fricke, P. (1995). Guidelines and principles for social impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 15(1), 11–43 p.
- Yahiaoui. (2012), Inondations Torrentielles Cartographie des Zones Vulnérables en Algérie du Nord (Cas de l'oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbès) Thèse de doctorat, Ecole.Nationale Polytechnique.
- Yevjevich, V, 1994. Floods and society. Coping with floods, PP 3-9.

ANNEXE:

Tableau 2: Variations interannuelles du niveau et du débit des eaux en aval de la Rusizi

Année	Variation en H	H. Moyenne	Variation en Q	Moyenne en Q
2009	1,20 - 2,24	1,72	139,02 - 166,75	152,885
2012	1,54 - 2,63	2,085	170,45 - 267,49	218,97
2013	1,96- 2,74	2,295	183,54 - 281,91	232,725
2014	1,61 - 2,66	2,135	179,95 - 258,41	219,18
2015	2,16 - 3,41	2,785	210,33 - 297, 82	254,07
2016	2,25 - 3,35	2,8	207,87 - 322,04	264,955
2017	1,00 - 2,73	1,865	77,51 - 283,23	180,37
2018	2,38 - 3,96	3,17	235,37 - 444,56	339,965
2019	2,45 - 3,57	3,01	244,27 - 394,66	319,465
2021	3,41 - 4,06	3,735	373,58 - 452,65	413,115
2022	2,65 - 4,18	3,415	270,10 - 483,86	376,98

Tableau 3: Evolution du niveau et de l'altitude des eaux du lac Tanganyika

Année	Variation du niveau du lac en Altitude	Niveau moyen annuel	Variation du niveau du lac en m
2012	773,86 - 774,51	4,18	3,86 - 4,51
2013	773,86 - 774,86	4,49	4,12 - 4,86
2014	774,10 - 774,98	4,54	4,10 - 4,98
2015	774,37 - 774,86	4,61	4,37 - 4,86
2016	774,22 - 775,12	4,67	4,22 - 5,12
2017	774,06 - 774,90	4,48	4,06-4,90
2018	774,18 - 775,18	4,76	4,18 - 5,34
2019	774,45 - 776,18	5,31	4,45 - 6,18
2021	775,56 - 776,98	6,27	5,56 - 6, 98