



**HAL**  
open science

# CRUES ET RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN-VERSANT AMÉNAGÉ DU FLEUVE SASSANDRA À L'EXUTOIRE DE SOUBRÉ (SUD-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE)

Constant Kouame Kouakou

► **To cite this version:**

Constant Kouame Kouakou. CRUES ET RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN-VERSANT AMÉNAGÉ DU FLEUVE SASSANDRA À L'EXUTOIRE DE SOUBRÉ (SUD-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE). Géographie. Université Felix Houphouet-Boigny de Cocody-Abidjan, 2024. Français. NNT: . tel-04731557

**HAL Id: tel-04731557**

**<https://hal.science/tel-04731557v1>**

Submitted on 14 Oct 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

RÉPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE  
Union-Discipline-Travail

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

**Université Félix Houphouët-Boigny**



**UFR : Sciences de l'Homme et de la Société**

Année académique : 2023-2024

Côte attribuée par la bibliothèque

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--



**Institut de Géographie Tropicale**

**THÈSE DE DOCTORAT UNIQUE**

**Spécialité : GÉOGRAPHIE**

**Option : Environnement**

**Présentée par :**

**KOUAMÉ Kouakou Fidèle Constant**

**CRUES ET RISQUE D'INONDATION DANS LE  
BASSIN-VERSANT AMÉNAGÉ DU FLEUVE  
SASSANDRA À L'EXUTOIRE DE SOUBRÉ  
(SUD-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE)**

**Soutenue publiquement le 24 septembre 2024 devant le jury composé de :**

**NASSA Dabié Axel Désiré** : Professeur Titulaire-Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY, Président  
**ALLA Della André** : Professeur Titulaire-Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY, Directeur de thèse  
**AMOUSSOU Ernest** : Professeur Titulaire-Université de Parakou (Bénin), Rapporteur  
**SORO Gneneyougo Émile** : Maître de Conférences-Université NANGUI ABROGOUA, Rapporteur  
**ZAHIRI Éric-Pascal Gboagblé** : Maître de Conférences-Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY, Examineur

**CRUES ET RISQUE D'INONDATION DANS LE  
BASSIN-VERSANT AMÉNAGÉ DU FLEUVE  
SASSANDRA À L'EXUTOIRE DE SOUBRÉ  
(SUD-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE)**

## SOMMAIRE

SOMMAIRE .....	2
DÉDICACE.....	3
REMERCIEMENTS .....	4
RÉSUMÉ.....	6
ABSTRACT .....	7
LISTE DES FIGURES.....	8
LISTES DES TABLEAUX.....	12
LISTES DES PHOTOS.....	14
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES .....	15
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	17
<b>PREMIÈRE PARTIE : CADRE THÉORIQUE ET CARACTÉRISTIQUES DU BASSIN- VERSANT AMÉNAGÉ DU FLEUVE SASSANDRA À L'EXUTOIRE DE SOUBRÉ.....</b>	<b>20</b>
CHAPITRE 1 : CADRE THÉORIQUE DE L'ÉTUDE.....	22
CHAPITRE 2 : CONTEXTES PHYSIQUE ET HUMAIN DU BASSIN-VERSANT AMÉNAGÉ DU SASSANDRA À L'EXUTOIRE DE SOUBRÉ.....	66
<b>DEUXIÈME PARTIE : DONNÉES ET APPROCHES MÉTHODOLOGIQUES DE L'ÉTUDE .....</b>	<b>104</b>
CHAPITRE 3 : DONNÉES ET MÉTHODES D'ACQUISITION DE L'INFORMATION DE L'ÉTUDE.....	106
CHAPITRE 4 : MÉTHODES DE TRAITEMENT DES DONNÉES.....	116
<b>TROISIÈME PARTIE : ANALYSE DES RÉSULTATS, INTERPRÉTATIONS ET DISCUSSIONS.....</b>	<b>167</b>
CHAPITRE 5 : DYNAMIQUE DES CONDITIONS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE CRUES DANS LE BASSIN-VERSANT AMÉNAGÉ DU FLEUVE SASSANDRA À SOUBRÉ.....	169
CHAPITRE 6 : FRÉQUENCE DES FACTEURS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE GÉNÉRATION DES CRUES DANS LE BASSIN-VERSANT AMÉNAGÉ DU FLEUVE SASSANDRA À L'EXUTOIRE DE SOUBRÉ.....	194
CHAPITRE 7 : RISQUE D'INONDATION FLUVIALE DANS LE BASSIN-VERSANT AMÉNAGÉ DU FLEUVE SASSANDRA À SOUBRÉ.....	208
CHAPITRE 8 : CONSÉQUENCES ET MESURES STRATEGIQUES DE GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES D'INONDATION À L'ÉCHELLE DU BASSIN- VERSANT AMÉNAGÉ DE SOUBRÉ.....	228
CONCLUSION GÉNÉRALE .....	247
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES.....	252
ANNEXES .....	273
TABLE DES MATIÈRES.....	284

## DÉDICACE

### *À nos parents ;*

- *Monsieur KOUAMÉ Paulin, notre père qui nous a permis, avec une confiance indéfectible, d’embrasser les études scolaires et universitaires. Sans lui, ce niveau académique n’aurait pas été atteint ;*
- *Madame BROU Cathérine, notre maman adoptive qui, depuis notre enfance, n’a ménagé aucun effort pour nous apporter l’éducation nécessaire jusqu’à ce jour ;*
- *Madame ATCHADÉ Anne-Marie (notre mère biologique) et sa sœur jumelle ATCHADÉ Anne-Claire, pour leurs prières quotidiennes ainsi que leur soutien financier sans réserve.*

### *À notre compagne ;*

*BROU Affoué Békanty Michel-Pascale, pour tout le soutien.*

### *À notre fille ;*

*KOUAMÉ Mouraille Marie Kerèn, pour que ce travail soit pour elle une source de recherche perpétuelle de la connaissance, du savoir et du meilleur à travers des efforts sans cesse continus.*

Nous dédions cette thèse.

## REMERCIEMENTS

La recherche scientifique est une œuvre de longue haleine. Son aboutissement requiert la plupart du temps le recours à plusieurs personnes et structures, non seulement pour des conseils, mais aussi pour les encouragements, les données, les échanges sur l'étude et leur amitié. C'est l'ensemble de ces contacts enrichissants qui nous a permis de faire aboutir ce travail. Le moment est venu d'exprimer notre profonde gratitude à toutes ces personnes et structures.

Nous exprimons, tout d'abord, notre reconnaissance aux instructeurs et membres du jury. Une mention spéciale est faite à Monsieur AMOUSSOU Ernest, Professeur Titulaire de Géographie à l'Université de PARAKOU (Bénin), pour sa contribution à la définition de la problématique et à l'orientation méthodologique de cette recherche, et à Monsieur SORO Gneneyougo Émile, Maître de Conférences d'Hydrologie à l'Université NANGUI ABROGOUA (Côte d'Ivoire) pour ses conseils qui ont aidé à la rédaction et au montage de ce manuscrit.

À tous les enseignants de l'Institut de Géographie Tropicale (IGT), aux premiers responsables de cet institut, Professeurs KOFFIE-BIKPO (Directrice) et TOURÉ Mamoutou (Chef de département), sans oublier tout le personnel administratif et technique, pour la formation et l'encadrement, depuis nos premiers pas à l'Université Félix Houphouët-Boigny, nous témoignons notre infinie gratitude.

À notre encadreur et directeur de thèse, Monsieur ALLA Della André, Professeur Titulaire de géographie à l'Institut de Géographie Tropicale de l'Université Félix Houphouët-Boigny, nous disons du plus profond de nous-mêmes merci. Son dynamisme et ses compétences scientifiques avérées, sa disponibilité et ses conseils avisés empreints de sagesse ont été une boussole tout au long de notre aventure universitaire qui dure depuis une dizaine d'années.

Nos sincères remerciements s'adressent aux Dr N'CHO Lionel, Dr DJADJI Odilon du Laboratoire de Géographie de l'Environnement et des Risques (LAGERIS) pour leurs conseils d'aînés et à des jeunes frères qui ont apporté leur savoir-faire dans la réalisation de certaines étapes de ce travail. Ce sont SANGARÉ Youssouf et KIEMA Arsène, respectivement spécialiste des SIG au Ministère de la Construction et du Logement et de l'Urbanisme de Côte d'Ivoire, et spécialiste en Data Science, Machine Learning et Hydrologie au Centre Régional AGRHYMET (Burkina Faso). Ils ont été d'un appui considérable dans l'achèvement de ce travail.

Que Monsieur KOUADIO Armel, Directeur Régional de la SODECI, région du Gbêkê, messieurs SOW Massiré à la Direction de l'Hydrologie et TAPÉ Fernand de la SODEXAM trouvent ici l'expression de notre reconnaissance. Toujours dans le même sens, nous adressons des remerciements particuliers aux responsables de la Compagnie Ivoirienne d'Électricité (CIE) et du Service technique du barrage hydroélectrique de Buyo, par l'entremise de messieurs POODA Serge et SORO Meh pour s'être prêtés à nos préoccupations en matière de collecte de données.

Nous associons à ces remerciements les responsables suivants :

- Monsieur DIALLO Sékou, Géomètre Expert et Directeur Général du Cabinet CGEDS, pour les conditions d'une évolution professionnelle et des responsabilités (Coordinateur Régional de projets) qu'il nous a offertes en marge de notre parcours de doctorant ;
- Monsieur BAMBA Drissa, Président du Conseil d'Administration du Mouvement Ivoirien des Droits Humains (MIDH), notre Responsable de service, qui nous a toujours soutenu. À travers eux, un grand merci à tout le personnel du Cabinet CGEDS/GTEC de Grand-Bassam ;
- M. KONÉ Lacina de la Direction Générale des Marchés Publics et son épouse KEITA Kady du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique pour les conseils et soutiens dont nous avons bénéficié de leur part, depuis le début de notre aventure universitaire.
- Certains collaborateurs, collègues, amis, et autres responsables connus durant notre passage dans les entreprises CETIF (Cabinet d'Expert pour l'assistance-conseil en Topographie et Foncier), MERIDIA LAND BV et l'Agence Foncière Rurale (AFOR).

Ce moment de gratitude ne saurait s'achever sans un mot à l'attention de notre tante (KOUAKOU Aminata) et de son époux FILY Sissoko (paix à son âme) qui nous ont offert un accueil sans conditions dans leur modeste demeure pour les premiers pas à Abidjan. Il en va de même pour KONAN Franck, notre cousin pour son soutien sans faille à tous les niveaux, et pour tous nos frères et sœurs. Nous n'oublions pas nos voisins à Bonoua à savoir le couple AKAKI.

Nous tenons aussi à dire un grand merci à toutes ces bonnes volontés qui ont apporté de diverses manières une aide à l'élaboration et à la finalisation de ce travail. Ce sont entre autres, les amis de promotion ABISSA Séraphin, KOUASSI Daniel, notre cousin Dr CASSIEN Roméo, Mlle KOUADIO Rachel, M. AOUTI Jean-Pierre, sans oublier KOUAMÉ Célestine, la mère de notre merveilleuse fille KOUAMÉ Mouraille Marie Kéren.

**Pour finir, un hommage est rendu, à travers ce travail, à toutes les victimes des inondations qui sont survenues ces trois dernières décennies en Côte d'Ivoire !!!**

## RÉSUMÉ

Le fonctionnement hydrologique du bassin fluvial aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré combiné aux extrêmes pluviométriques induits par les effets des changements climatiques occasionnent des crues et inondations saisonnières chaque année. Ce bassin aménagé se situe dans le Sud-ouest de la Côte d'Ivoire entre les barrages de Buyo et Soubré sur le cours du fleuve Sassandra. Ces inondations causent de nombreuses situations désastreuses tant sur les populations que sur leurs biens. L'objectif de cette étude est de caractériser les crues et les facteurs de risque afin de proposer des outils de gestion durable et préventive du risque d'inondation fluviale dans le bassin aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré.

Cette étude s'est appuyée sur plusieurs données dont les données textuelles, les données hydrométriques (débits journaliers sur la période 1980-2019), les données pluviométriques (pluies mensuelles sur la période 1989-2019), des données de réanalyses climatiques, des sources géospatiales telles que les images satellitaires et enfin des données d'observations de terrain.

Ainsi, l'application d'indices statistiques descriptives et la méthode fréquentielle hydrologique ont permis d'analyser la dynamique et le caractère des précipitations et débits des crues dans le bassin-versant de Soubré. Ensuite, la modélisation hiérarchique multicritère de T. Saaty intégrée à un système d'information géographique (SIG) a facilité la cartographie et l'évaluation du risque d'inondation fluviale à travers 8 facteurs d'aléa et d'enjeux identifiés. Enfin, la tentative de reproduction des crues à risque d'inondation s'est réalisée à travers l'application du modèle hydrologique de prévision des crues à 4 paramètres journaliers (GR4J).

Les résultats des indices normalisés des précipitations (SPI) calculés aux différents pas de temps (SPI-1 mois, SPI-3 mois, SPI-12 mois) montrent que le bassin aménagé de Soubré est caractérisé par des périodes humides respectivement à 58,06 %, 61,3 % et 84 %. Cela est conforté ensuite par un indice pluviométrique moyen de 1,04 à la station de Soubré, traduisant ainsi des précipitations supérieures à la médiane toute l'année. L'analyse fréquentielle des données hydrométriques (1980-2019) révèle que les quantiles de débits de crues exceptionnelles ayant une probabilité de survenir sont compris entre 1140 m<sup>3</sup>/s et 3590 m<sup>3</sup>/s sur des périodes de retour de 10 à 100 ans. Quant aux maxima pluviométriques, les quantiles de précipitations associés aux mêmes périodes de retour sont compris entre 379 et 796 mm. Aussi, la cartographie et l'évaluation du risque d'inondation fluviale montrent que les secteurs à risque fort à très fort occupent 11 % du bassin aménagé, les zones à risque moyen 22 % et 67 % pour les zones à risque faible à très faible. Le niveau de risque fort est lié aux zones de pentes de 0 à 4 % s'étalant sur les abords des cours d'eau et affluents du Sassandra. Enfin, le modèle hydrologique GR4J a montré une capacité moyenne à reproduire les débits de crue du fleuve Sassandra à Soubré avec un Nash de 62 % en calibration et de 55 % en validation.

**Mot clés :** *Soubré, Côte d'Ivoire, bassin aménagé, crues, risque d'inondation fluviale.*

## ABSTRACT

The hydrological functioning of the Sassandra river basin at the Soubré outlet, combined with extreme rainfall induced by the effects of climate change, results in seasonal flooding every year. This developed basin is located in south-west Côte d'Ivoire between the Buyo and Soubré dams on the Sassandra River. These floods cause numerous disastrous situations for both the population and their property. The aim of this study is to characterize floods and risk factors in order to propose sustainable and preventive river flood risk management tools for the Sassandra River basin at the Soubré outlet.

This study was based on several data sources, including documentary data, hydrometric data (daily flows over the period 1980-2019), rainfall data (monthly rainfall over the period 1989-2019), climatic reanalysis data, geospatial sources such as satellite images and field observation data.

The application of descriptive statistical indices and the hydrological frequency method enabled us to analyze the dynamics and character of precipitation and flood flows in the Soubré watershed. Next, T. Saaty's hierarchical multi-criteria modeling integrated with a geographic information system (GIS) facilitated the mapping and assessment of fluvial flood risk through 8 identified hazard and bet factors. Finally, an attempt was made to reproduce floods at risk by applying the four-parameter daily hydrological flood forecasting model (GR4J).

The results of the normalized rainfall indices (SPI) calculated at different time steps (SPI-1 month, SPI-3 months, SPI-12 months) show that the Soubré basin is characterized by wet periods of 58,06 %, 61,3 % and 84 % respectively. This is further supported by an average rainfall index of 1.04 at the Soubré station, reflecting above-median rainfall throughout the year. Frequential analysis of hydrometric data (1980-2019) reveals that the quantiles of exceptional flood flows with a probability of occurrence range from 1140 m<sup>3</sup>/s to 3590 m<sup>3</sup>/s over return periods of 10 to 100 years. As for the rainfall maxima (1989-2019) studied, the rainfall quantiles associated with the same return periods range from 379 mm to 796 mm. The mapping and assessment of fluvial flood risk show that areas at high to very high-risk areas occupy 11 % of the developed basin, medium-risk areas 22 % and 67 % for areas at low to very low risk. The high-risk level is linked to areas with slopes ranging from 0 to 4 %, along the banks of the rivers and tributaries of the Sassandra. Lastly, the GR4J hydrological model has shown an average capacity to reproduce flood flows on the Sassandra River at Soubré with a Nash of 62 % in calibration and 55 % in validation.

**Key words:** *Soubré, Ivory Coast, managed watershed, floods, risk of river flooding.*

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Méthode d'analyse de la vulnérabilité d'un système (adelphi/EURAC).....	28
<b>Figure 2</b> : Schéma illustratif d'un débordement de cours d'eau à travers les différents lits d'un fleuve.....	30
<b>Figure 3</b> : Schéma d'un hydrogramme de crues.....	31
<b>Figure 4</b> : Processus d'écoulement de type Hortenien .....	32
<b>Figure 5</b> : Processus d'écoulement souterrain.....	32
<b>Figure 6</b> : Schéma illustrant un bassin-versant.....	33
<b>Figure 7</b> : Illustration schématique d'un risque d'inondation fluviale (crue par débordement d'eau).....	35
<b>Figure 8</b> : Repère de crues sur un mur .....	44
<b>Figure 9</b> : Courbe de l'application de la méthode du GRADEX .....	48
<b>Figure 10</b> : Classification des modèles proposées par Singh .....	50
<b>Figure 11</b> : Principe de fonctionnement du modèle GR en temps réel .....	51
<b>Figure 12</b> : Unités hydrogéomorphologiques.....	54
<b>Figure 13</b> : Principe des SIG appliqués à l'étude des risques naturels.....	56
<b>Figure 14</b> : Situation géographique du bassin versant du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré.....	67
<b>Figure 15</b> : Relief de la zone aménagée du bassin versant du Sassandra à l'exutoire de Soubré .....	69
<b>Figure 16</b> : Réseau hydrographique de la zone aménagée du bassin versant du Sassandra à Soubré.....	70
<b>Figure 17</b> : Courbes de tarissement calculées et observées (naturelle) du fleuve Sassandra à Piebly.....	72
<b>Figure 18</b> : Courbe des débits mensuels (en $m^3.s^{-1}$ ) du fleuve Sassandra à la station de Soubré sur la période 1980-2019 .....	73
<b>Figure 19</b> : Pluviométrie annuelle sur la chronique 1989-2019 aux stations de Soubré et Buyo dans le bassin aménagé de Soubré. ....	74
<b>Figure 20</b> : Répartition des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant aménagé à Soubré sur la période 1989-2019 .....	75
<b>Figure 21</b> : Variations en moyenne interannuelle (1989-2019) de la pluviométrie, de l'évapotranspiration et de la température mensuelles du bassin du Sassandra à la station de Soubré.....	77

<b>Figure 22</b> : Géologie de la zone aménagée du bassin versant du Sassandra à l'exutoire de Soubré.....	79
<b>Figure 23</b> : Représentation schématique de la structure hydrogéologique des aquifères du socle.....	80
<b>Figure 24</b> : Pédologie du bassin-versant aménagé du Sassandra à Soubré.....	81
<b>Figure 25</b> : Végétation du bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré en 1969.....	82
<b>Figure 26</b> : Répartition des localités dans le bassin aménagé du fleuve Sassandra de Soubré	86
<b>Figure 27</b> : Populations estimées des chefs-lieux de sous-préfectures dans le bassin aménagé à Soubré.....	87
<b>Figure 28</b> : Situation géographique des barrages de Buyo et de Soubré.....	93
<b>Figure 29</b> : (a) schéma de fonctionnement type d'un barrage hydroélectrique et (b) principe de transformation de l'énergie hydraulique en énergie électrique .....	96
<b>Figure 30</b> : Schéma de process d'une centrale de basse chute ou fil de l'eau .....	101
<b>Figure 31</b> : Répartition géographique des stations météorologiques dans le bassin-versant	108
<b>Figure 32</b> : Mosaïquage des deux (2) scènes couvrant le bassin aménagé du Sassandra .....	112
<b>Figure 33</b> : Les différentes étapes de l'analyse fréquentielle .....	137
<b>Figure 34</b> : Étapes méthodologiques adoptées pour l'étude de l'occupation du sol .....	146
<b>Figure 35</b> : Schéma méthodologique d'évaluation du risque d'inondation fluviale .....	160
<b>Figure 36</b> : Structure schématique de fonctionnement du modèle GR4J.....	161
<b>Figure 37</b> : Évolution des précipitations moyennes à Soubré et Buyo (1989-2019) .....	170
<b>Figure 38</b> :Variation des précipitations moyennes interannuelles sur la période 1989-2019...	171
<b>Figure 39</b> : Cumul pluviométrique à la station de Soubré (1989-2019).....	172
<b>Figure 40</b> : Cumul pluviométrique à la station de Buyo (1989-2019) .....	172
<b>Figure 41</b> : Évolution de l'indice de pluviosité (IP) dans le bassin aménagé. ....	173
<b>Figure 42</b> : Indice pluviométrique (IPm) dans le bassin aménagé. ....	174
<b>Figure 43</b> : Évolution temporelle de l'indice normalisé des précipitations à l'échelle de temps de 1 mois (juin) à l'exutoire du bassin versant de Soubré (1989-2019) .....	175
<b>Figure 44</b> : Évolution temporelle de l'indice normalisé des précipitations à l'échelle de temps de 3 mois (septembre à novembre) à l'exutoire du bassin versant de Soubré (1989-2019)..	175
<b>Figure 45</b> : Évolution temporelle de l'indice normalisé de précipitation à l'échelle de temps de 12 mois (janvier à décembre) à l'exutoire du bassin versant de Soubré (1989-2019).....	176
<b>Figure 46</b> : Variation interannuelle des moyennes pluviométriques des mois pluvieux dans le bassin aménagé de Soubré sur la chronique 1989-2019 (Soubré et Buyo) .....	178

<b>Figure 47</b> : Évolution temporelle et décennale des hauteurs pluviométriques sur la période 1989-2019.....	179
<b>Figure 48</b> : Évolution spatio-temporelle des précipitations dans le bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré au cours des décennies [a (1990-1999) ; b (2000-2009) et c (2010-2019)].....	181
<b>Figure 49</b> : Rupture de stationnarité par le test de Pettitt et Buishand au sein de la série pluviométrique de Buyo dans le bassin aménagé de Soubré.....	182
<b>Figure 50</b> : Rupture de stationnarité par le test de Pettitt et Buishand au sein de la série pluviométrique de Soubré.....	182
<b>Figure 51</b> : Évolution des débits moyens annuels à l'exutoire de Soubré.....	184
<b>Figure 52</b> : Évolution des débits moyens annuels à l'exutoire de Piebly dans le bassin aménagé du Sassandra à Soubré.....	185
<b>Figure 53</b> : Évolution comparée des débits moyens dans le bassin aménagé de Soubré (Soubré et Piebly).....	185
<b>Figure 54</b> : Rupture de stationnarité sur la chronique des débits du Sassandra à la station de Soubré.....	186
<b>Figure 55</b> : Régime hydrologique du bassin aménagé du Sassandra à Soubré .....	187
<b>Figure 56</b> : Fluctuation des débits maxima journaliers du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré sur la période 1980-2019.....	189
<b>Figure 57</b> : Évolution des débits moyens mensuels dans le bassin aménagé du Sassandra aux exutoires de Soubré et Piebly .....	190
<b>Figure 58</b> : Fréquence d'apparition des pluies extrêmes mensuelles dans le bassin aménagé du Sassandra à Soubré (1989 - 2019) et Buyo (1989 – 2019).....	194
<b>Figure 59</b> : Comparaison graphique des maximales pluviométriques avec les lois de Gumbel, Pearson Type 3 et Log-normale (Soubré) .....	197
<b>Figure 60</b> : Ajustement graphique des maximales pluviométriques avec la loi Log-normale (Soubré).....	197
<b>Figure 61</b> : Comparaison graphique des maximales pluviométriques avec les lois de Gumbel, Pearson Type 3 et Log-normale (Buyo) .....	198
<b>Figure 62</b> : Ajustement graphique des maximales pluviométriques avec la loi Lognormale (Buyo).....	199
<b>Figure 63</b> : Fréquences des valeurs de débits journaliers maximums à Soubré.....	200
<b>Figure 64</b> : Courbe chronologique des débits journaliers maximums.....	201
<b>Figure 65</b> : Comparaison de l'ajustement graphique des débits avec les lois de Gumbel ....	202

<b>Figure 66</b> : Ajustement graphique des débits maximums journaliers .....	203
<b>Figure 67</b> : Relation pluie-débit dans le bassin aménagé de Soubré .....	204
<b>Figure 68</b> : Niveau d'accumulation des débits dans le bassin versant aménagé du Sassandra à Soubré.....	209
<b>Figure 69</b> : Différents niveaux d'altitude du relief dans le bassin aménagé .....	210
<b>Figure 70</b> : Niveaux de pente dans le bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré	211
<b>Figure 71</b> : Indice d'humidité topographique du bassin aménagé du Sassandra à.....	212
<b>Figure 72</b> : Densité du réseau de drainage dans le bassin aménagé du Sassandra de Soubré	214
<b>Figure 73</b> : Unités d'occupation du sol du bassin versant aménagé de Soubré .....	215
<b>Figure 74</b> :Proportion des unités d'occupation du sol du bassin-versant aménagé de Soubré..	216
<b>Figure 75</b> : Densité de la population dans le bassin versant aménagé à Soubré .....	217
<b>Figure 76</b> : Zone d'influence du réseau hydrographique dans le bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré.....	218
<b>Figure 77</b> : Carte de l'aléa inondation fluviale dans le bassin aménagé du fleuve Sassandra à Soubré.....	220
<b>Figure 78</b> : Carte des enjeux face à l'inondation fluviale dans le bassin aménagé à Soubré.	222
<b>Figure 79</b> : Carte du risque d'inondation fluviale dans le bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré.....	223
<b>Figure 80</b> : Bulletin et image satellite d'alerte météo sur les inondations.....	233
<b>Figure 81</b> : Mise en évidence des lacunes sur les séries chronologiques des débits.....	236
<b>Figure 82</b> : Vérification de la cohérence des données de débits par décennie sur la période 1981-2019.....	237
<b>Figure 83</b> : Évolution du critère de Nash en fonction des paramètres du modèle (1980-1999)	238
<b>Figure 84</b> :Évolution du critère de Nash en fonction des paramètres du modèle (1990-2009).	238
<b>Figure 85</b> : Variation du critère de Nash au cours des différentes itérations (1980-1999) ...	239
<b>Figure 86</b> : Variation du critère de Nash au cours des différentes itérations (1990-2009) ...	239
<b>Figure 87</b> : Comparaison des hydrogrammes moyens journaliers .....	240
<b>Figure 88</b> : Évolution du critère de Nash (calibration).....	241
<b>Figure 89</b> : Comparaison des hydrogrammes simulés et observés (calibration).....	241
<b>Figure 90</b> : Comparaison des hydrogrammes simulés et observés (validation).....	241

## LISTES DES TABLEAUX

<b>Tableau 1</b> : Quelques caractéristiques des principaux affluents du Sassandra à son exutoire à Soubré .....	71
<b>Tableau 2</b> : Superficies et productions des spéculations de la région du Nawa – Soubré .....	89
<b>Tableau 3</b> : Potentiels hydroélectriques des sites de barrages sur le fleuve Sassandra.....	94
<b>Tableau 4</b> : Proportion d'électricité exportée en fonction des destinations en 2017. ....	94
<b>Tableau 5</b> : Quelques caractéristiques générales du barrage hydroélectrique de Buyo .....	98
<b>Tableau 6</b> : Bilan en eau du réservoir de Buyo calculé sur la période 1981-2014.....	99
<b>Tableau 7</b> : Quelques caractéristiques principales du barrage hydroélectrique de Soubré..	100
<b>Tableau 8</b> : Caractéristiques des logements construits dans le cadre du recasement des ménages impactés par le barrage hydroélectrique de Soubré.....	102
<b>Tableau 9</b> : Caractéristiques des images spectrales utilisées .....	111
<b>Tableau 10</b> : Critères des entretiens de terrain .....	113
<b>Tableau 11</b> : Localités riveraines du fleuve Sassandra dans sa section aménagée de l'exutoire de Soubré jusqu'à Buyo .....	114
<b>Tableau 12</b> : Différentes valeurs de l'indice SPI et signification .....	121
<b>Tableau 13</b> : Variables hydropluviométriques et lois d'ajustement.....	130
<b>Tableau 14</b> : Quelques formules empiriques les plus utilisées .....	132
<b>Tableau 15</b> : Fonctions de distributions des probabilités courantes. ....	134
<b>Tableau 16</b> : Différents paramètres de la loi de Gumbel.....	135
<b>Tableau 17</b> : Typologie des classes d'occupations du sol.....	145
<b>Tableau 18</b> : Notes attribuées aux indices de facteurs de risque d'inondation fluviale (aléa et enjeux) .....	147
<b>Tableau 19</b> : Notation des classes de densité de drainage.....	148
<b>Tableau 20</b> : Notation des classes d'accumulation des flux de débits .....	149
<b>Tableau 21</b> : Notation des niveaux d'altitude à l'aléa inondation .....	149
<b>Tableau 22</b> : Notation des niveaux de pente à l'aléa inondation .....	149
<b>Tableau 23</b> : Notation des indices d'humidité topographique (TWI) .....	150
<b>Tableau 24</b> : Notation du facteur d'enjeux « densité de population » .....	151
<b>Tableau 25</b> : Notation du facteur d'enjeux « occupation du sol » .....	151
<b>Tableau 26</b> : Notation du facteur « distance au réseau hydrographique » .....	152
<b>Tableau 27</b> : Échelle des valeurs et expression qualitative associée.....	152
<b>Tableau 28</b> : Matrice de comparaison par paire des différents facteurs d'aléa d'inondation	153

<b>Tableau 29</b> : Matrice de comparaison par paire des différents facteurs d'enjeux.....	153
<b>Tableau 30</b> : Normalisation de la matrice des facteurs d'aléa inondation .....	154
<b>Tableau 31</b> : Normalisation de la matrice des facteurs des enjeux .....	154
<b>Tableau 32</b> : Détermination des ratios de cohérence (facteurs d'aléa) .....	155
<b>Tableau 33</b> : Détermination des ratios de cohérence (facteur d'enjeux).....	156
<b>Tableau 34</b> : Indices aléatoires selon le nombre de critères à comparer.....	157
<b>Tableau 35</b> : Classes des notes pondérées des facteurs d'aléa à l'inondation fluviale.....	159
<b>Tableau 36</b> : Classes des notes pondérées des facteurs d'enjeu face à l'inondation fluviale	159
<b>Tableau 37</b> : Caractéristiques statistiques des séries pluviométriques de Soubré et Buyo (1989-2019).....	169
<b>Tableau 38</b> : Nombre de périodes humides sur les différents SPI à la station de Soubré sur la période 1989-2019 .....	177
<b>Tableau 39</b> : Caractéristiques pluviométriques des différentes décennies (1990-1999, 2000- 2009, 2010-2019) dans le bassin aménagé de Soubré.....	179
<b>Tableau 40</b> : Caractéristiques des séries hydrométriques de Soubré (1980-2019) et Piebly (1981-2001).....	183
<b>Tableau 41</b> : Tests statistiques appliqués aux hauteurs maximales pluviométriques annuelles à Soubré.....	196
<b>Tableau 42</b> : Tests statistiques appliqués aux hauteurs maximales pluviométriques annuelles à Buyo .....	196
<b>Tableau 43</b> : Comparaison des lois d'ajustement à l'aide des critères d'information (Soubré).....	197
<b>Tableau 44</b> : Comparaison des lois d'ajustement à l'aide des critères d'information (Buyo).	198
<b>Tableau 45</b> : Période de récurrence des hauteurs pluviométriques maximales aux stations de Soubré et Buyo.....	199
<b>Tableau 46</b> : Résultats des tests d'hypothèses appliqués .....	201
<b>Tableau 47</b> : Comparaison des lois d'ajustement à l'aide des critères d'information (Soubré) .....	202
<b>Tableau 48</b> : Période de récurrence des débits caractéristiques annuels à Soubré.....	203
<b>Tableau 49</b> : Données utilisées pour la modélisation.....	236
<b>Tableau 50</b> : Meilleurs résultats des différentes itérations.....	239
<b>Tableau 51</b> : Paramètres optimaux de la modélisation .....	241
<b>Tableau 52</b> : Critères de performances obtenus .....	242

## LISTES DES PHOTOS

<b>Photo 1 :</b> Chutes pittoresques du Nawa dans la zone de Soubré .....	71
<b>Photo 2 :</b> Végétation de <i>Raphia farinifera</i> le long du Sassandra à Soubré .....	83
<b>Photo 3 :</b> Plantation de cacaoyers dans la forêt classée du Mont Kourabahi à Obrouayo .....	83
<b>Photo 4 :</b> Plaine inondable en amont du barrage de Soubré occasionnée par le bassin de retenue du barrage.....	84
<b>Photo 5 :</b> Quelques espèces de poissons vendues sur le marché à Soubré au bord du fleuve Sassandra.....	90
<b>Photo 6 : a, b, c, d :</b> Aménagement du barrage hydroélectrique de Buyo .....	97
<b>Photo 7 :</b> Aménagement hydroélectrique de Soubré .....	99
<b>Photo 8 :</b> Séance d’entretien avec un usager (pêcheur) du fleuve Sassandra à l’exutoire de Soubré.....	114
<b>Photo 9 :</b> a) Image satellite du fleuve Sassandra à l’exutoire de Soubré ; b) Le Sassandra à Soubré dans le mois de mars (saison sèche) ; c) Le fleuve Sassandra en octobre à Soubré (saison des pluies).....	188
<b>Photo 10 :</b> Complexe détente PAM’S KALLY en bordure (moins de 5 mètres) du fleuve Sassandra à l’exutoire Soubré.....	219
<b>Photo 11 :</b> a) Des maisons inondées à Soubré dans la zone de l’exutoire en 2017 ; b) une crue subite de la rivière Zozolo près de Soubré en 2017 .....	228
<b>Photo 12 :</b> Linnimètres à l’exutoire du bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré datant de 1958 (a) et 2018 (b).....	233
<b>Photo 13 :</b> Pompiers civils après la maîtrise d’un incendie de turbine au barrage hydroélectrique de Soubré.....	235
<b>Photo 14 :</b> Pompiers civils extrayant un corps à l’exutoire du fleuve Sassandra à Soubré...	235

## **LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES**

ABN	Autorité du Bassin du Niger
AHP	Analytic Hierarchic Process (Procédé Analytique Hiérarchique)
ARSO	Aménagement de la Région du Sud-Ouest
BNETD	Bureau National d'Études Techniques et de Développement
CADRI	Capacity for Disaster Reduction Initiative (Cadre et Initiative pour la Réduction des Risques de Catastrophes)
CEB	Communauté Électrique du Bénin
CEDEAO	Communauté Économique des États de l'Afrique de l'Ouest
CEMAGREF	Centre d'Études du Machinisme Agricole, du génie Rural des Eaux et Forêts
CIE	Compagnie Ivoirienne d'Électricité
CI-ENERGIES	Côte d'Ivoire Énergies
CIEH	Comité Interafricain d'Études Hydrauliques
CIGN	Centre d'Information Géographique et du Numérique
CIGB	Commission Internationale des Grands Barrages
CFBR	Comité français des barrages et réservoirs
CMB	Commission Mondiale des Barrages
CCNUCC	Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
DHH	Direction de l'Hydraulique Humaine
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus (Mappeur thématique Plus amélioré)
ETP	Évapotranspiration Potentielle
EM-DAT	Emergency Events - Database International Disaster Database
FAO	Food and Agriculture Organization (Organisation pour l'alimentation et l'agriculture)
FISCRRCR	Fédération internationale des Sociétés de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge
FIT	Front Intertropical
GEV	Loi d'extremum généralisée
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat
GIZ GR	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit – GmbH (Coopération Allemande)
GFDRR	Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (Dispositif mondial pour la réduction des risques de catastrophes)

GRTS	Gestion des Risques naturels dans les Territoires et les Sociétés
GRP	Génie Rural de Prévision des crues
GR4J	Modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier
GR2M	model de Génie Rural à 2 paramètres au pas de temps Mensuel
HEC-HMS	Hydrologic Modeling System du Hydrologic Engineering Center (Système de Modélisation Hydrologique)
IGT	Institut de Géographie Tropicale
INRS	Institut National de Recherche et de Sécurité
INS	Institut National de la Statistique
LAGERIS	Laboratoire de Géographie de l'Environnement et des Risques
MINAGRI	Ministère de l'Agriculture
MEDD	Ministre de l'Écologie et du Développement Durable
MNT	Modèle Numérique de Terrain
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
ONPC	Office National de la Protection Civile
OFDA-CRED	Centre for Research on the Epidemiology of Disasters
ORSEC	Organisation des Secours devenue Organisation de la réponse de sécurité civile
ORSTOM	Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
PND	Plan National de Développement
REDD+	Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (Réduction des émissions issues de la déforestation et de la dégradation forestière)
RGPH	Recensement Général de la Population et de l'Habitat
RRC	Réduction des Risques de Catastrophes
SIG	Système d'Information Géographique
SODEXAM	Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique de Côte d'Ivoire
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TIRS	Landsat Thermal Infrared Sensor (Capteur Thermal InfraRed Sensor)
UNISDR	United Nations International Strategy for Disaster Reduction (Stratégie internationale de prévention des catastrophes des Nations Unies)
UTM	Universal Transverse Mercator (projection Transverse universelle de Mercator)
WAPP	West African Power Pool (Système d'échanges d'énergie électrique ouest africain)

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## 1. Contexte scientifique de l'étude

Dans le contexte actuel de la variabilité climatique et de l'exploitation tous azimuts des bassins-versants pour leurs potentialités, la multiplication et l'intensification des crues et inondations sont devenues une problématique majeure planétaire (A. Faye, 2019, p. 8). A l'échelle du globe, les inondations sont considérées comme l'un des phénomènes naturels qui affectent le plus l'équilibre socio-environnemental. Elles touchent environ 171 millions de personnes en Afrique subsaharienne (J. Rentschler et M. Salhab, 2020, p. 1). Ces risques météorologiques impactent négativement les moyens de subsistance des populations, mais surtout les populations elles-mêmes dont la vulnérabilité s'accroît de plus en plus dans les villes et dans les zones rurales. On estime qu'en 2050, quelque 2,5 milliards de personnes seraient vulnérables à des crues catastrophiques à cause de la croissance démographique dans les territoires inondables, des changements climatiques, de la montée du niveau des mers et de la déforestation (F. Ramade, 2006, p. 94).

En effet, lors des crues, les cours d'eau débordent de leur lit mineur et envahissent leur lit majeur. Ces phénomènes de crues se produisent essentiellement dans les zones tropicales comme dans les zones tempérées lors d'épisodes pluvieux très intenses. L'importance du ruissellement superficiel, générateur de la crue, est d'autant plus marquée que l'épisode pluvieux est intense et long dans les zones aménagées. Dans ce contexte, 29 % de la population mondiale est exposée à une crue centennale à risque, soit une probabilité de survenance de 1 % sur 10 ans ou de 50 % sur une vie de 68 ans (J. Rentschler et M. Salhab, 2020, p. 4). Dès-lors, il apparaît nécessaire d'apporter des solutions préventives à ces préoccupations alarmantes devenues presque une fatalité.

En Côte d'Ivoire, les événements météorologiques de ces dernières années et leurs impacts montrent une fréquence et un accroissement des inondations dont celles dues aux crues de nombreux cours d'eau (CIMA Research Foundation, 2021, p. 17). Ces inondations causent de nombreuses perturbations, notamment des pertes en vies humaines, des dégâts de cultures, des coupures de routes, des destructions d'habitations, etc. C'est dans le but de faire la lumière sur les crues dans le bassin fluvial aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré, afin de proposer des mesures de protection des populations et de leurs patrimoines, que cette étude est entreprise.

En effet, le bassin-versant du Sassandra présente d'énormes enjeux agricoles, économiques et surtout énergétiques, avec la présence des barrages de Buyo, de Soubré et de celui de Grigbo-Popoli en construction (lorsque nous rédigeons cette thèse). La réalité du terrain montre qu'il n'existe aucune stratégie efficace pour gérer les situations de crises liées aux crues fluviales. Par conséquent, les inondations qui se produisent sont le résultat de la combinaison de plusieurs facteurs dont les précipitations extrêmes, les écoulements de cours d'eau, la nature des sols, les pentes, etc. Les recherches scientifiques effectuées sur ce bassin se sont principalement focalisées sur l'analyse des potentialités hydro-souterraines, la variabilité du climat local et ses incidences. Il n'existe pas de travaux de recherche sur les risques de crues et inondations dans cet espace fluvial aménagé.

. Cette étude se veut une contribution dans le vaste champ de la recherche scientifique sur les risques naturels en Côte d'Ivoire, spécifiquement dans le domaine de la prévention des crues et risques d'inondation ; répondant à l'un des objectifs du Plan National de Réduction des Risques et Catastrophes (Plan RRC 2016-2020) actualisé dans la Stratégie Nationale de Réduction des Risques et Catastrophes (SN-RRC 2020-2030) en Côte d'Ivoire.

Les difficultés n'ont pas manqué à cette noble et palpitante aventure académique. Elles concernent particulièrement la disponibilité de données fiables et actualisées. Elles concernent également l'indisponibilité des gestionnaires des barrages pour la réalisation des interviews plus poussées. Cette dernière situation a conduit à des entretiens informels avec quelques personnes.

Nous espérons que ce document contribuera à la prise de conscience de la nécessité d'intégrer le risque d'inondation lié aux crues dans les politiques et programmes d'aménagement des bassins-versants de Côte d'Ivoire. Cela constitue l'un des sept piliers importants de la prévention des risques naturels (A. Ferretti, 2015, p. 30), mais aussi d'éradication de l'extrême pauvreté générée par cette problématique dans les pays en développement (UIP et UNISDR, 2010, p. 14).

## **2. Structure du document**

La présente thèse est organisée en trois grandes parties :

- La première partie aborde respectivement le cadre théorique de référence, le point des connaissances et les caractéristiques physiques et humaines du bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré ;

- La deuxième partie est consacrée aux données et à l'approche méthodologique utilisées pour leur exploitation ;
- La troisième et dernière partie présente les résultats de l'étude, leurs interprétations et discussions à la lumière des études antérieures.

Ces différentes parties du manuscrit sont précédées d'une introduction générale et s'achèvent par une conclusion générale résumant l'essentiel des résultats et ouvrant des perspectives d'investigations futures faisant suite à ce travail.

# **PREMIÈRE PARTIE**

## **CADRE THÉORIQUE ET CARACTÉRISTIQUES DU BASSIN-VERSANT AMÉNAGÉ DU FLEUVE SASSANDRA À L'EXUTOIRE DE SOUBRÉ**

### **Chapitre 1 : Cadre théorique de l'étude**

### **Chapitre 2 : Contextes physique et humain du bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré**

## **Introduction de la première partie**

Cette première partie concerne les chapitres 1 et 2. Le chapitre premier aborde les concepts de référence liés aux risques de catastrophes naturelles, spécifiquement les risques d'inondation. Il présente également le point des connaissances des travaux effectués sur les différents aspects du sujet dans le bassin du Sassandra à travers une revue de la littérature. Cela a permis de dégager la problématique et les objectifs de recherche de l'étude.

Dans le chapitre deuxième, les caractéristiques physiques et humaines du bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré sont présentées. Enfin, le contexte historique et le processus de réalisation des ouvrages des barrages hydroélectriques de Buyo et Soubré sont décrits.

## **CHAPITRE 1 : CADRE THÉORIQUE DE L'ÉTUDE**

Ce premier chapitre aborde la justification du choix du sujet, la définition des concepts clés liés aux risques de catastrophes naturelles, spécifiquement les risques d'inondation. Il présente également le point des connaissances, c'est-à-dire les travaux effectués sur les différents aspects du sujet.

### **1.1. Justification du choix du sujet**

La Côte d'Ivoire dispose d'un important réseau de fleuves et rivières drainant d'importants bassins-versants. Ces bassins fluviaux offrent d'énormes potentialités pour le développement de projets agricoles, piscicoles, touristiques, hydrauliques ou hydroélectriques. Cependant les conditions hydropluviométriques actuelles corrélées aux actions anthropiques entraînent des extrêmes climatiques tels que les inondations à l'échelle de ces bassins fluviaux. Ces nombreux événements hydroclimatiques (inondations dues aux crues des cours d'eau) endeuillent les populations et détruisent leurs patrimoines chaque année pendant les périodes de saisons de pluie dans certaines zones du territoire national.

La question des inondations fluviales est ancienne et complexe, mais, elle paraît insaisissable pour les gouvernements successifs de la Côte d'Ivoire au vu de la gouvernance territoriale en matière de risques de catastrophes naturelles. Ainsi, toutes ces manifestations événements accroissent sa vulnérabilité face aux extrêmes hydroclimatiques. En Côte d'Ivoire, de récentes études estimatives prévoient que les inondations auraient un impact considérable sur la population ivoirienne et affecteraient environ 60 000 personnes par an, soit environ 0,3 % de la population totale du pays (UNISDR, 2018, p. 12). Ce qui dénote de l'urgence de se pencher sur cette problématique d'ordre sécuritaire, humaine et environnementale.

Au sein de l'Institut de Géographie Tropicale (IGT) de l'Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan), le Laboratoire de Géographie de l'Environnement et des Risques (LAGERIS) avec le groupe de recherche « Gestion des risques naturels dans les territoires et les sociétés » (GRTS) entreprend des études dans le vaste domaine de la gestion des risques de catastrophes naturelles. Parmi les axes de recherches du laboratoire figure celui des risques d'inondation en milieux aménagés (urbanisés) et ruraux.

C'est dans ce contexte que se situe ce travail de recherche. Il se veut une étude contributive pour l'intégration active et participative du risque d'inondation fluviale dans les

programmes et plans de développement structurels de nos territoires. Cela permettra aux aménageurs de barrages hydroélectriques, aux autorités administratives et aux populations de réagir efficacement aux événements inattendus comme les inondations fluviales. C'est le cas dans le bassin-versant aménagé du fleuve Sassandra dans la région de Soubré-Buyo, au Sud-ouest de la Côte d'Ivoire.

Le choix de cette zone se justifie du fait de son importance dans le développement énergétique de la Côte d'Ivoire depuis les années 1980. Avec un bassin-versant d'une superficie d'environ 62 000 km<sup>2</sup> (la partie en Côte d'Ivoire), le fleuve Sassandra est au cœur de nombreux aménagements d'infrastructures hydroélectrique et hydraulique. Cela participe certes au développement de la région, mais occasionne des modifications de l'espace et du cours du fleuve ; constituant ainsi des facteurs de prédisposition au risque d'inondation fluviale.

Dès lors, à travers cette étude, il est aussi question de prendre des dispositions au niveau de tous les bassins fluviaux sur le territoire ivoirien face à la fréquence des événements extrêmes (inondations dues aux débordements de cours d'eau) qui s'accroissent avec les effets du changement climatique. De plus, l'intégration ces phénomènes dans l'aménagement du territoire vise l'atteinte des priorités des Objectifs de Développement Durable en matière de réduction des risques et des catastrophes naturelles.

## **1.2. Motivations de l'étude**

La question du risque, plus spécifiquement de ces deux composantes à savoir l'aléa et la vulnérabilité des enjeux, sont au cœur de nombreux débats d'ordre scientifique. Ces débats tournent au tour du fondement conceptuel, théorique et méthodologique de ce concept. Ainsi, la littérature occidentale abonde d'ouvrages de géographes et même de sociologues qui se sont appropriés ce concept polysémique du risque et de ces composantes. En Côte d'Ivoire, seuls le littoral et la zone d'Abidjan ont fait l'objet d'étude de cette thématique. Ce qui justifie l'existence de peu de données et informations sur les risques de catastrophes dans le pays, bien que la Côte d'Ivoire soit signataire de plusieurs conventions, cadres et plateformes internationaux visant la lutte et la réduction des risques de catastrophes naturelles.

Il s'agit alors, pour nous, de participer à l'élargissement du champ de connaissance des risques, précisément des crues et inondations dans cette société sans cesse vulnérable avec le changement climatique. Cette contribution est d'autant plus originale qu'elle a pour champs

d'étude un bassin-versant très au cœur de la politique énergétique ivoirienne dans le Sud-Ouest du pays.

Enfin, cette étude contributive vise à servir de recommandation aux autorités administratives de la protection civile, aux exploitants des ressources fluviales et des autorités administratives pour la prévision des risques d'inondation fluviale dues aux extrêmes hydro-pluviométriques en Côte d'Ivoire.

### **1.3. Définition des concepts**

Pour une meilleure compréhension des idées et arguments développés dans cette étude, il apparaît important de faire usage de certains concepts dont les acceptions ont fait l'objet de plusieurs points de vue de chercheurs en lien avec la thématique évoquée dans cette recherche.

#### **1.3.1. Risque, une notion composite**

Il est délicat de vouloir fournir une définition du risque qui soit précise et partagée par la communauté scientifique. En effet, le risque est une notion qui s'est développée et complexifiée au cours du temps et de son utilisation. Par conséquent, la notion de risque se caractérise par plusieurs définitions et selon la discipline enseignée.

En géographie, selon A. Bailly (1996, p. 1-6), le risque est défini comme « un danger éventuel, plus ou moins prévisible, dans une aire non précisément définie et d'une durée indéterminée ». Pour l'Institut National français de Recherche et de Sécurité (INRS), le risque est l'éventualité d'une rencontre entre l'homme et un danger auquel il peut être exposé. Cette définition prend en compte la probabilité de la réalisation du dommage et de sa gravité. Abondant dans le même sens, un rapport du Conseil de l'Europe (2004, p. 172) intitulé « *les institutions internationales et la gestion des risques majeurs* » définit le risque comme la probabilité d'apparition de conséquences dommageables. C'est-à-dire l'éventualité de situations avec préjudices ou dégâts. Selon ce même rapport, le risque est également l'espérance mathématique de perte (pertes en vies humaines, blessés, perte de moyens de subsistance, atteinte aux activités économiques ou dégradation de l'environnement) à la suite d'interactions entre des phénomènes naturels ou anthropiques et des conditions de vulnérabilité. De toutes ces approches disciplinaires multiples, le concept de risque retient l'acception de tous à travers ses deux principales composantes majeures à savoir :

$$\text{Risque} = \text{Aléa} * \text{Enjeux.} \quad (1)$$

De cette définition, apparaît le caractère imprévisible du risque de par l'aléa responsable de sa survenue et des enjeux par leur caractère intrinsèque vulnérable. Ainsi, selon un discours d'Haroun Tazieff (vulcanologue français) en 1984, le risque est « *la survenue soudaine et inopinée, parfois imprévisible, d'une agression d'origine naturelle ou technologique dont les conséquences pour les populations sont dans tous les cas tragiques en raison du déséquilibre brutal entre les besoins et les moyens de secours disponibles...* ».

Les risques naturels constituent également les dangers survenant en raison de circonstances naturelles menaçant le bien être des Hommes et / ou de l'environnement. C'est pourquoi, leur manifestation suscite un intérêt majeur dans le monde. Cela permet d'aborder dans cette approche définitionnelle, la notion de risque majeur. Cette dernière est liée à la fréquence d'apparition et à la gravité du phénomène. Un risque naturel majeur est alors un risque découlant d'un aléa naturel (inondations, glissement de terrains, séismes, tsunamis, volcans, tremblements de terre...)

En définitive, cette étude retient le concept de risque, en l'occurrence le risque d'inondation comme étant la résultante entre un aléa d'origines hydrométéorologique désignant la probabilité d'occurrence de l'inondation et la vulnérabilité physique du milieu.

### **1.3.2. Aléa**

L'aléa représente un phénomène d'origine géologique, hydrométéorologique, biologique, ou technologique. Abondant dans le même registre, le Cadre d'action de Hyōgo (succédé par le Cadre d'action de Sendai) le définit comme la manifestation physique, de phénomène ou activité humaine susceptible d'occasionner des pertes en vie humaine ou des préjudices corporels, des dommages aux biens, des perturbations sociales et économiques ou une dégradation de l'environnement (2015, p. 9). Ainsi sont qualifiés d'aléas, l'ensemble des conditions latentes qui peuvent à terme constituer une menace d'origine naturelle ou anthropique.

De plus, par son caractère aléatoire, son amplitude ou sa fréquence et sa période de retour, l'aléa est aussi défini selon F. Arki (2008, p. 18) comme la probabilité qu'un ou plusieurs phénomènes dangereux produisent, en un point donné du territoire, des effets d'une intensité physique définie ; d'où son expression mathématique  $Aléa = P (Probabilité) \times I (Intensité)$ .

Dans le cadre de cette étude, l'aléa inondation est caractérisé par le débordement du fleuve Sassandra dans le bassin aménagé de Soubré. Il est dû à des pluviométries et débits extrêmes

répétés et à l'augmentation du niveau d'eau dans les cuvettes de retenue des barrages nécessitant une ouverture forcée des vannes.

### **1.3.3. Enjeu et vulnérabilité**

Les enjeux peuvent être définis comme des récepteurs ou des cibles d'aléas. Ils représentent les biens, les personnes, les activités de tout genre, l'environnement, les groupes sociaux susceptibles d'être affectés par un phénomène d'origine naturelle ou anthropique et de subir des dommages tels qu'une inondation. Il se dégage alors la notion de vulnérabilité due à cette exposition au danger.

En effet, la vulnérabilité semble un concept polysémique ambiguë dans la mesure où il n'existe pas une définition standard qu'on peut lui attribuer. Depuis la prise en compte collective et internationale des effets du changement climatique sur la planète entière, ce concept a suscité beaucoup de débats scientifiques et politiques. Du fait de son ambiguïté conceptuelle, il a donné naissance à un large éventail d'interprétations de ce qui pourrait être considéré comme « vulnérable » aux effets du changement climatique d'une part, et d'autre part, a généré une gamme d'approches et de méthodes difficilement acceptées par tous en termes d'évaluation ou d'approche analytique de la vulnérabilité d'un enjeu ou système donné. Ainsi, selon D. Koumassi (2014, p. 52), la revue littéraire des différentes définitions de la vulnérabilité donne la conclusion qu'il n'y a pas de conceptualisation unique de la vulnérabilité qui pourrait s'adapter à tous les contextes et à des fins d'évaluation. Pour certains auteurs comme R. Moss *et al.* (2001), il serait impossible d'évaluer ou même de mesurer la vulnérabilité. Ce qui traduit que cette définition est relative à l'action et au contexte d'étude scientifique ou à l'objectif politique fixé.

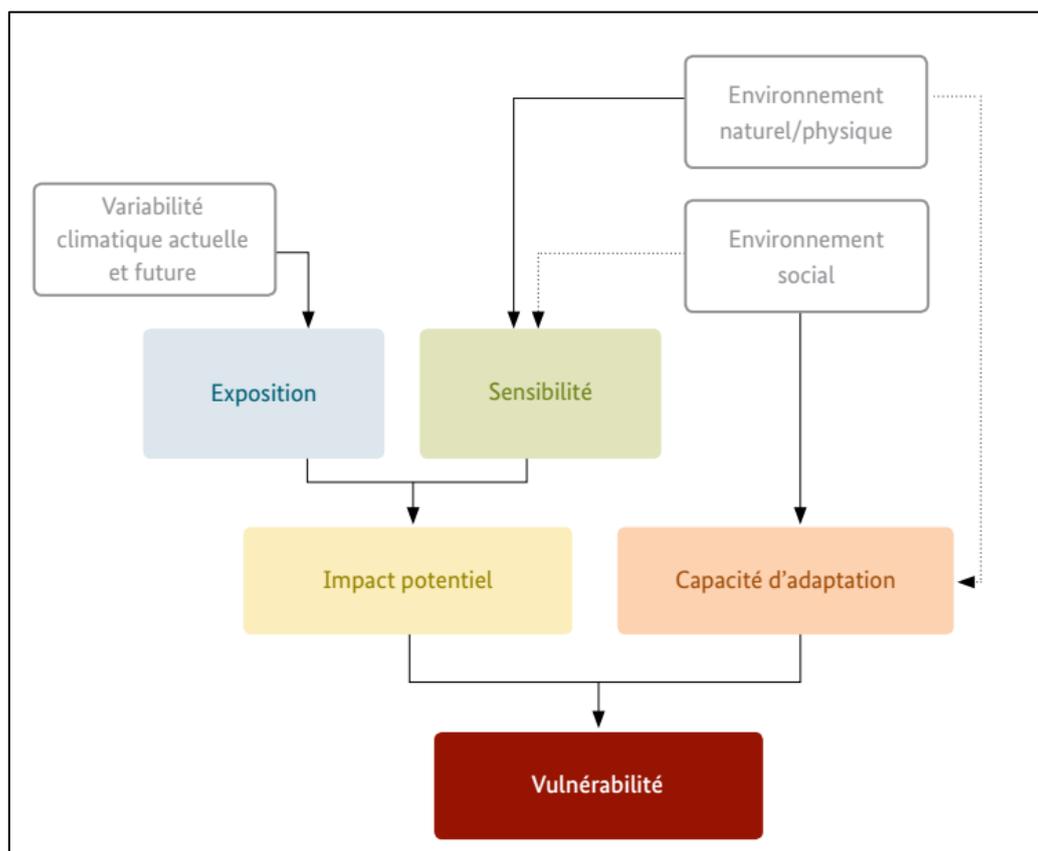
Dans le Cadre d'action de Sendai (2015, p. 10), la vulnérabilité se définit comme les conditions déterminées par des facteurs ou processus physiques, sociaux, économiques ou environnementaux qui accentuent la sensibilité d'une collectivité aux conséquences des aléas. Autrement dit, l'accentuation de la vulnérabilité intrinsèque des enjeux face à la manifestation d'un aléa. Même si la prise en compte de la vulnérabilité des territoires et des sociétés aux menaces naturelles a été tardive, elle constitue aujourd'hui une composante fondamentale de l'appréciation du risque selon F. Leone et F. Vinet (2006, p. 10). Dès lors, pour agir sur les risques et réduire les effets prévisibles des aléas, il est nécessaire d'aborder les facteurs de vulnérabilité des enjeux exposés. Percevoir la vulnérabilité, implique d'accepter le fait que les risques sont aussi le résultat de facteurs internes aux sociétés, et pas seulement le fruit du hasard

(aléa). Cette faible perception génère (autant que l'absence de perception d'un aléa) une sous-estimation du risque selon la FAO. C'est pourquoi, les tentatives d'évaluation de la vulnérabilité socio-économique par exemple, sont souvent incomplètes, car elles se fondent sur de nombreux critères plus ou moins pertinents qui varient d'un espace à l'autre (P. Fattal et *al.*, 2007, p. 58).

En 2007, selon la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), la vulnérabilité dépend de plusieurs facteurs clés, notamment le degré d'exposition au risque climatique et le degré de sensibilité au risque.

Par contre, pour le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC, 2007, p. 48), le degré par lequel un enjeu ou système exposé risque d'être affecté négativement par les effets du changement climatique sans pouvoir y faire face définit amplement la vulnérabilité au changement climatique. Ce groupe d'experts donne une dimension climatique de la vulnérabilité des enjeux et la caractérise par trois éléments : l'exposition et la sensibilité d'un système (enjeu) à des conditions dangereuses et la capacité du système à faire face, s'adapter ou se remettre des effets de ces conditions.

En effet, selon les échelles spatiales, plusieurs outils existent pour entreprendre des approches de la vulnérabilité des enjeux et de l'adaptation aux phénomènes climatiques. Il est donc important de bien connaître la nature de la vulnérabilité et les concepts liés à l'adaptation, à la variabilité et aux changements climatiques pour mieux choisir les outils appropriés qui permettront de mieux l'appréhender. La vulnérabilité est donc un concept qui traduit l'interaction complexe de plusieurs facteurs ou composantes clés qui vont déterminer la sensibilité d'un système aux effets du risque climatique (**figure 1**).



**Figure 1 :** Méthode d'analyse de la vulnérabilité d'un système (adelphi/EURAC)

Dans la mesure où il n'existe pas de règle établie définissant les facteurs qui doivent être considérés, ni de méthode pour les quantifier, il est préférable « d'évaluer » ou « d'analyser » plutôt que de « mesurer » la vulnérabilité en termes d'approche. Ainsi, en vue de faciliter l'élaboration des analyses de vulnérabilité et l'utilisation de cette analyse de vulnérabilité standardisée pour le suivi et l'évaluation des impacts d'un processus d'adaptation dans les pays en développement, le GIZ a développé une méthodologie basée sur l'approche conceptuelle du GIEC de la vulnérabilité (adelphi et EURAC, 2017, p. 58).

Selon F. Leone et F. Vinet (2006, p. 3), il semble clair que la vulnérabilité est un système dynamique, articulé autour d'une multitude de facteurs directs et indirects, en interaction souvent complexe. Par conséquent, dans cette étude, la notion de vulnérabilité sera abordée dans un sens analytique simple et global mettant en exergue les enjeux exposés dans le bassin-versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré, car la vulnérabilité varie en fonction de l'exposition à l'aléa, et de la fragilité intrinsèque des enjeux exposés. Cette approche permet d'analyser la sensibilité des différents enjeux exposés au risque d'inondation fluviale dans le secteur d'étude.

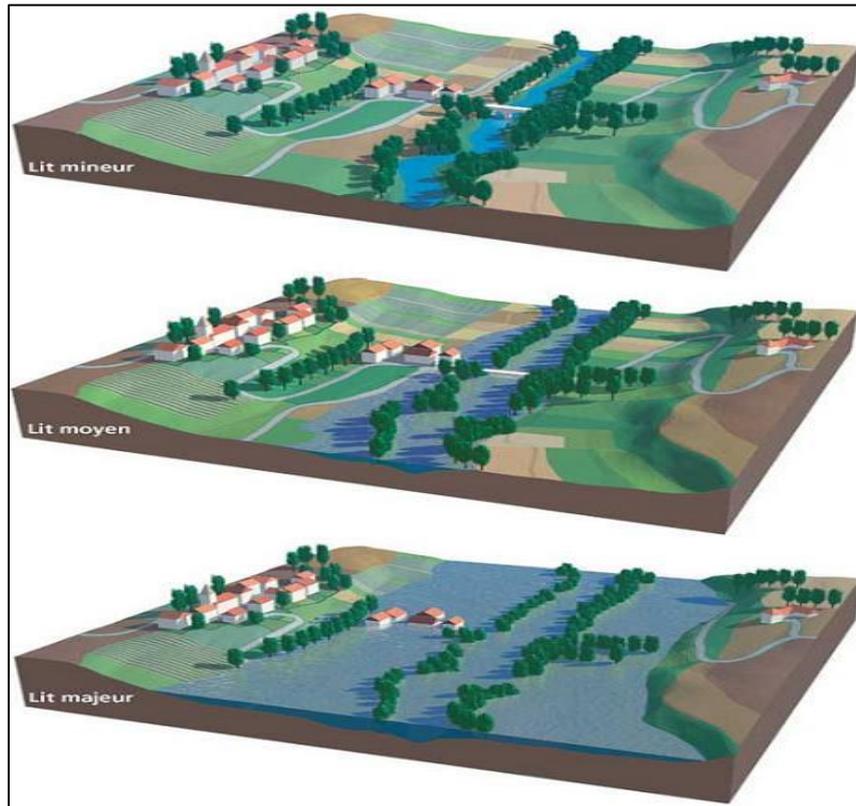
#### **1.3.4. Inondations : typologie et manifestation**

Les inondations sont considérées comme des catastrophes majeures du fait de la gravité de leur manifestation chaque année à tous les points du globe. Leur nombre a considérablement augmenté, surtout au cours des 20 dernières années avec le nombre de victimes, de dégâts économiques et environnementaux en zones urbaines comme rurales (Banque Mondiale et GFDRR, 2012, p. 16). Les inondations résultent d'apports hydriques en excès, qui ne peuvent pas être évacués normalement par gravité, avec des extensions territoriales et des durées variables (J. P. Montoroi, 2012, p. 2). En d'autres termes, la submersion plus ou moins rapide d'une zone donnée avec des hauteurs variables d'eau, provoquée par des pluies intenses et continues.

Les inondations sont souvent dues aux formes de relief rencontrées dans une zone donnée (D. A. Alla, 2013, p. 13). Elles sont ainsi liées à la concentration des eaux dans les cuvettes ou bassins (dépressions fermées) en zones urbanisées, dans les vallées, aux crues et surcôtes des cours d'eaux, à la stagnation des eaux de ruissellement pluvial en surface et à la remontée de la nappe souterraine. Lorsque d'intenses précipitations tombent sur tout un bassin-versant, les eaux ruissellent et se concentrent rapidement dans le cours d'eau principal, engendrant des crues.

##### ***1.3.4.1. Crue***

La crue correspond à l'augmentation de la quantité d'eau qui s'écoule dans une rivière ou un fleuve (MEDD, 2004, p. 6). Cette augmentation de la quantité d'eau ou du débit part du lit mineur à l'ensemble du lit majeur du fleuve (**figure 2**). On distingue de façon pratique deux types de crues : les crues fluviales et les crues torrentielles.



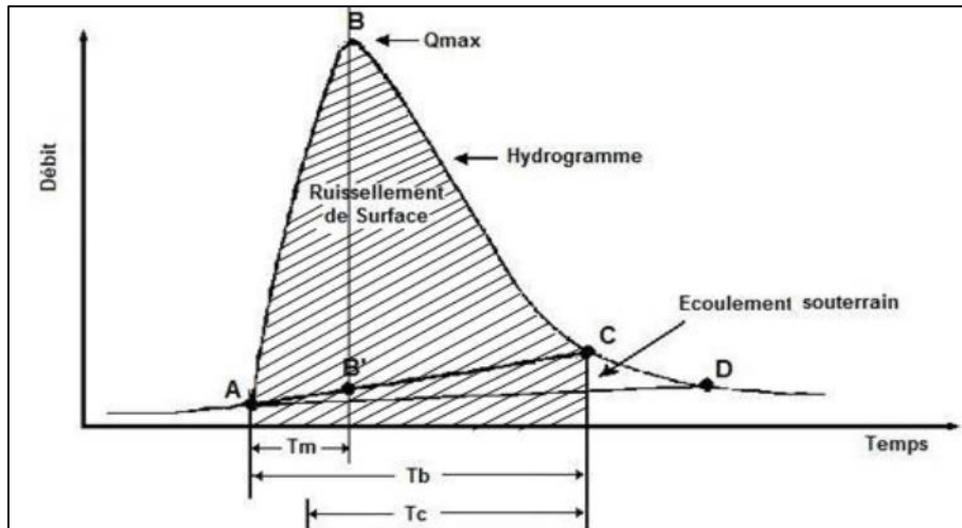
**Figure 2** : Schéma illustratif d'un débordement de cours d'eau à travers les différents lits d'un fleuve (MEDD, 2004, p. 7).

Dans leur manifestation souvent soudaines et brutales, les crues torrentielles, encore qualifiées d'éclairs affectent n'importe quelle partie du réseau hydrographique. Elles sont en général le résultat des pluies de caractère convectif très violentes et localisées, mais surtout caractérisées par une évolution très rapide avec une montée des eaux très brutale. (<http://www.ecosociosystemes.fr/crue.html> du 07/01/2020)

En ce qui concerne les crues fluviales, elles sont d'une périodicité saisonnière et affectent les cours d'eau importants aux vastes bassins-versants. La montée des eaux se fait de façon lente et progressive. Ce type de crues résulte de l'augmentation du débit du cours d'eau engendrée souvent par diverses causes, notamment les précipitations atmosphériques et la vidange de réservoir ou vannes de rétention notamment les barrages. Elle résulte enfin de la réponse de tout un bassin-versant.

Aussi, une crue se définit-elle par différents paramètres à savoir, sa genèse, sa durée, sa fréquence, son débit de pointe, son volume mais également par son hydrogramme. L'hydrogramme est un graphique qui représente les variations de débit en un point en fonction du temps (**figure 3**). C'est la partie montante de cet hydrogramme qui est appelée crue, la partie descendante étant la décrue. En plus des variables temps et débits, l'hydrogramme est

également caractérisé par des courbes de décroissance et tarissements comme le montre la figure 3 ci-dessous.



**Figure 3 :** Schéma d'un hydrogramme de crues (N. Souanef, 2015, p. 24)

De même, pendant une crue, l'importance de l'inondation dépend de trois paramètres : la hauteur d'eau, la vitesse du courant et la durée de la crue. Ces paramètres sont conditionnés par les précipitations, l'état du bassin versant, les caractéristiques du cours d'eau (profondeur, largeur de la vallée, etc.) et l'état de saturation du sol.

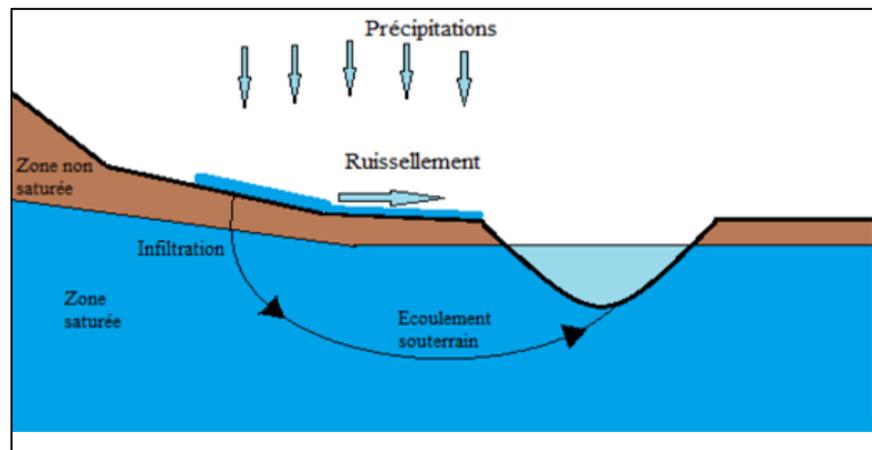
En outre, à la notion de crue est souvent associée la notion de période de retour (crue décennale, crue centennale, crue millénaire, etc.). Plus cette période est grande, plus les débits et l'intensité sont importants (MEDD, 2004, p. 15). On distingue alors :

- les crues fréquentes, dont la période de retour est comprise entre un et deux ans ;
- les crues moyennes, dont la période de retour est comprise entre dix et vingt ans ;
- les crues exceptionnelles, dont la période de retour est de l'ordre de cent ans ;
- la crue maximale vraisemblable, qui occupe l'intégralité du lit majeur.

Les événements les plus souvent considérés comme référence dans l'élaboration des documents de base dans ce type d'aléa sont la crue décennale ou le plus fort événement est connu.

Par ailleurs, outre les précipitations directes, divers phénomènes ou processus sont à l'origine des crues. Ces aspects sont abordés brièvement dans cette étude. Ce sont entre autres les processus superficiels, subsuperficiels ou hypodermiques et d'écoulement souterrain. Les processus d'écoulement superficiel ou de surface se produisent lorsque la capacité d'infiltration du sol est dépassée par l'intensité des précipitations. De sorte que la saturation du sol se fait par le haut après que les dépressions superficielles se soient remplies (N. Souanef, 2015, p. 26).

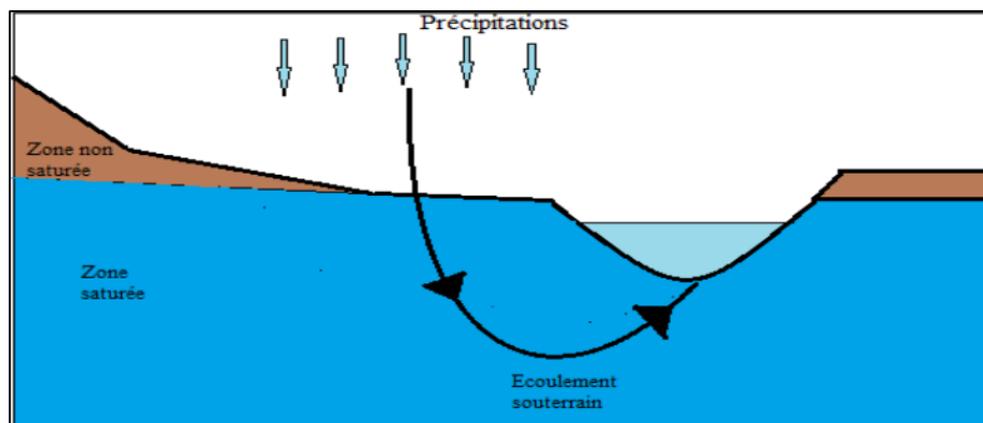
Dès lors, l'eau infiltrée contribue à la recharge des nappes souterraines et au maintien du débit de base en surface (**figure 4**).



**Figure 4 :** *Processus d'écoulement de type Hortonien (N. Souanef, 2015, p. 26)*

Quant au processus d'écoulements subsuperficiels, la crue est plus liée à l'eau infiltrée qu'au processus de ruissellement. Il apparaît dans les zones où les apports d'eau liés aux écoulements latéraux dépassent la capacité de transfert d'eau (N. Souanef, 2015, p. 29).

Pour finir, concernant le processus souterrain, il est lié à l'écoulement souterrain quand l'aération du sol est chargée d'une humidité suffisante pour permettre la percolation verticale profonde de l'eau. Une importante fraction des précipitations atteint la nappe phréatique (N. Souanef, 2015, p. 29). Dans ces conditions, l'eau infiltrée va transiter à travers l'aquifère à faible vitesse pour espérer rejoindre un cours d'eau (**figure 5**). Le débit dans les cours d'eau est maintenu pendant l'été.

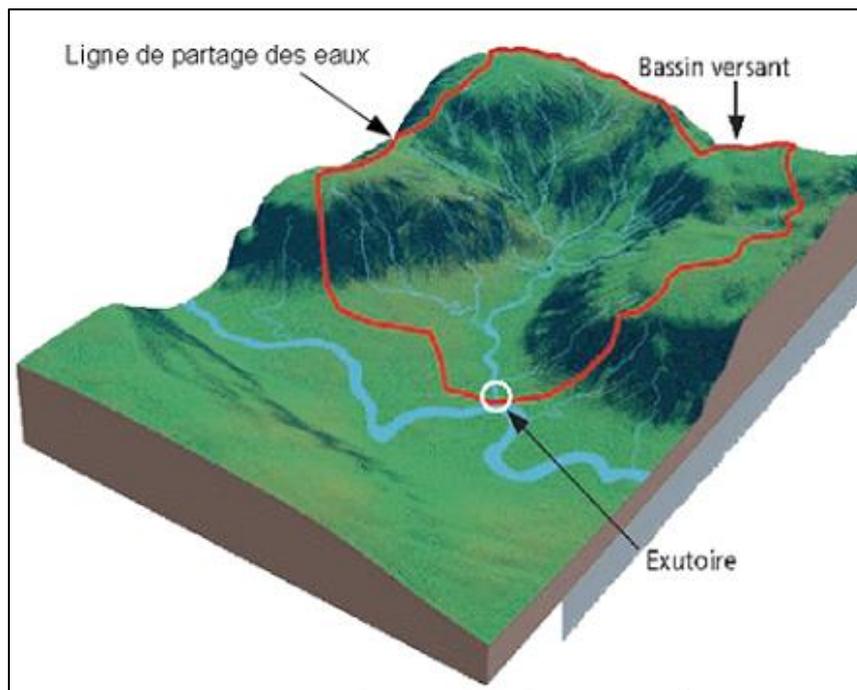


**Figure 5 :** *Processus d'écoulement souterrain (N. Souanef, 2015, p. 29)*

Dans le cadre de notre étude, les crues du fleuve Sassandra pouvant provoquer des inondations dans la partie aménagée de son bassin à l'exutoire de Soubré attire notre attention. De nombreuses crues y ont lieu pendant certaines saisons de pluie et passent comme des phénomènes anodins pour certains, pendant qu'elles constituent l'une des causes de destructions d'exploitations agricoles et culturelles de nombreux paysans dans cette basse vallée. Cette partie du bassin-versant connaît d'importants aménagements d'infrastructures hydroélectriques dont deux barrages déjà fonctionnels avec un autre en construction. Cela a pour conséquence d'engendrer une forte pression anthropique dans le bassin-versant.

#### ***1.3.4.2. Bassin-versant***

Le bassin-versant en une section d'un cours d'eau est défini comme une surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents de telle sorte que tout écoulement prenant naissance à l'intérieur de cette surface doit traverser la section considérée pour poursuivre son trajet vers l'aval. Le bassin-versant fonctionne comme un collecteur qui recueille les pluies et les transforme en écoulement à l'exutoire (**figure 6**).



**Figure 6 :** Schéma illustrant un bassin-versant (MEDD, 2004, p.6)

En d'autres termes, le bassin-versant d'une rivière ou d'un cours d'eau considéré en un point donné est l'aire limitée par le contour à l'intérieur duquel l'eau précipitée se dirige vers ce point de la rivière (ou fleuve) appelé exutoire (A. Laabidi et *al.*, 2016, p. 259). L'exutoire

d'un bassin-versant est quant à lui, le point le plus à l'aval du réseau hydrographique par lequel passe toutes les eaux de ruissellement drainée par le bassin.

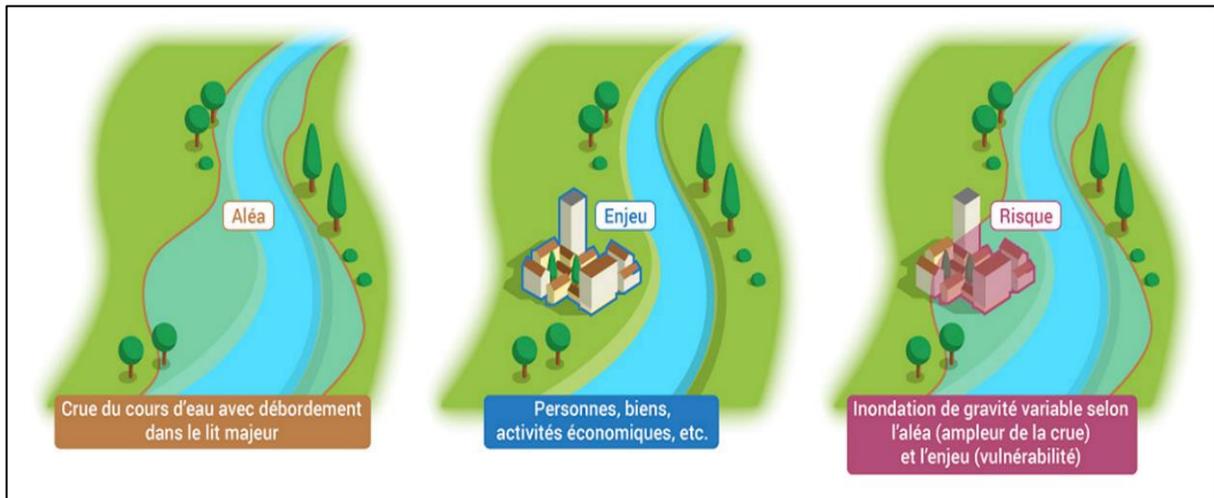
En outre le bassin-versant peut être considéré comme un tout indifférencié qui ne reproduit en sortie que le seul débit observé à l'exutoire ou un espace maillé (B. Ambroise, 1991, <https://www.fao.org/3/W7320B/w7320b33.htm>. Consulté le 14 octobre 2021). Ce débit est dépendant des facteurs climatiques et physiographiques du bassin versant étudié. Le bassin se caractérise alors par sa morphologie, la nature de son sol, son sous-sol et sa couverture végétale. Il est par conséquent influencé par ces différents facteurs qui joueront un rôle déterminant quant à son fonctionnement.

Selon E. Amoussou (2010, p. 84), l'emploi du terme « bassin-versant » est relativement récent. Son emploi est lié au fait hydrologique. Un bassin-versant est donc l'ensemble du territoire drainé par un cours d'eau principal et ses tributaires, tout en considérant les eaux souterraines qui alimentent les cours d'eau en périodes d'étiage, au même titre que les eaux de surface.

Au terme de cette définition de concepts, il y a lieu d'aborder la définition du risque d'inondation. Ce concept est admis par l'Union Européenne dans sa directive de gestion des inondations (Journal Officiel UE, 2007, p. 37). Elle stipule que le risque d'inondation est « *la combinaison de la probabilité d'une inondation et des conséquences négatives potentielles pour la santé humaine, l'environnement, le patrimoine culturel et l'activité économique associés à une inondation* ».

Il ressort de cette définition la description des deux composantes principales du risque d'inondation, à savoir ***l'aléa et les enjeux par leur vulnérabilité***, paramètres sur lesquels toute action de gestion des risques d'inondation doit agir ou tenir obligatoirement compte (**figure 7**).

Ainsi, il faut retenir pour cette étude que le risque d'inondation (fluviale) est lié à une crue par débordement d'eau souvent lent au-delà du lit mineur sur une période relativement longue avec pour impact la menace des enjeux en présence.



**Figure 7 :** Illustration schématique d'un risque d'inondation fluviale (crue par débordement d'eau) ([https://www.eaufrance.fr/prevenir-les-risques,](https://www.eaufrance.fr/prevenir-les-risques)) consulté en octobre 2021

#### 1.4. État des connaissances

Il est consacré à la synthèse des travaux scientifiques liés à la problématique des crues et risques hydroclimatiques mais de façon spécifique des inondations dans l'aménagement du territoire. Certains auteurs ont abordé la problématique des risques naturels (les inondations, l'érosion, les mouvements de terrain, la sécheresse, etc.) sous un angle global. D'autres s'appesantissent sur des composantes (aléas, vulnérabilité, enjeux...) intervenant dans la manifestation de ces phénomènes naturels. En effet, les inondations constituent avec l'érosion côtière, les séismes, les ouragans, les tsunamis et les mouvements de terrain, les principaux phénomènes naturels qui affectent considérablement le globe (UNISDR et EM-DAT, 2015, *The International Database (CRED)*. <http://www.emdat.be/>). Par conséquent, au regard des dégâts inhérents à sa survenue et de la vulnérabilité des enjeux dans les bassins-versants, une attention est portée de façon particulière sur les risques d'inondation fluviale.

De plus, l'implantation des barrages hydroélectriques dans ces bassins-versants constitue une source de préoccupations scientifiques à double titre, en ce sens qu'ils constituent souvent un moyen de lutte contre les inondations, mais également occasionnent des inondations liées à leur fonctionnement.

#### **1.4.1. Risques naturels en Côte d'Ivoire : phénomènes climatiques en croissance avec de réelles conséquences sur les populations et l'environnement**

Les risques naturels sont des phénomènes d'origine naturelle liés à notre environnement physique (A. Bailly, 1996). Autrement dit, l'ampleur de leur manifestation souvent exceptionnelle peut occasionner d'énormes conséquences catastrophiques tant pour les populations que pour l'environnement. En réalité, il existe plusieurs types des risques d'origine naturelle. Ainsi, selon la revue littéraire, il y a :

- les risques géologiques : séismes ou tremblements de terre, liés au jeu des plaques tectoniques, et les éruptions volcaniques
- les risques liés aux mers et océans dont les impacts sont importants dans les zones côtières : raz-de-marée (tsunamis), surcotes, érosion
- les risques liés aux phénomènes atmosphériques : ce sont essentiellement les ouragans ou tornades, typhons, hurricanes, cyclones ;
- les risques liés aux pentes : laves torrentielles, c'est-à-dire les coulées de boue, écroulements ou éboulements, effondrements, glissements de terrain et avalanches
- les risques liés à l'eau que sont les inondations et les crues
- etc.

À l'instar de nombreux pays en développement sous les tropiques, le territoire ivoirien est confronté à la manifestation de différents aléas naturels dont les plus frappants sont l'inondation et l'érosion sous toutes ses formes (D. A. Alla et *al.*, 2018, p. 102). À ces deux phénomènes récurrents, on peut associer les glissements de terrain qui ne passent pas souvent inaperçus quand ils surviennent.

En Côte d'Ivoire, la prise de conscience de la problématique des risques naturels remonte à l'époque coloniale surtout avec les risques côtiers (M. Robin et C. Hauhouot, 2000, p. 299). Depuis lors, plusieurs études scientifiques se sont attelées à l'analyse de ces phénomènes hydroclimatiques sous plusieurs angles. Dans l'ensemble, ces différentes études ont eu pour cadre spatial la sphère urbaine.

En effet, les recherches sur les risques naturels en zone urbaine ne sont pas un fait nouveau, cependant elles suscitent depuis plusieurs années un intérêt social, économique et politique croissant. Contrairement aux autres zones du territoire de la Côte d'Ivoire, force est de constater que les zones du Sud et le littoral ivoirien constituent les zones d'étude scientifique de prédilection de nombreux auteurs. Selon D. A. Alla et *al.* (2018, p. 102), cette situation se justifie dans la mesure où cette zone de la Côte d'Ivoire regorge de nombreuses infrastructures

avec une forte concentration démographique, mais surtout elle est la zone la plus exposée aux risques naturels, précisément l'érosion côtière. Dans la même veine, M. Robin et C. Hauhouot (2004, p. 300), soutiennent que l'exposition aux risques naturels du littoral ivoirien est confortée plutôt par cette forte occupation humaine avec notamment le développement de deux zones industrialo-portuaires à savoir San-Pédro et Abidjan.

Eu égard aux dégâts inhérents à sa manifestation aggravée par l'augmentation du niveau de la mer chaque année, l'érosion côtière constitue une véritable menace tant pour la ville d'Abidjan que pour tout le littoral ivoirien. En ce qui concerne la ville d'Abidjan par exemple, 26 % de sa superficie est classée comme zones à risques dominées par les glissements de terrain et inondations (OCHA, 2014, p. 1). Toujours selon OCHA, neuf (9) personnes en moyenne perdent la vie chaque année pendant la saison des pluies dans cette ville du littoral ivoirien.

En plus, de par sa position, la Côte d'Ivoire subit les effets de la grande variabilité spatio-temporelle des précipitations en Afrique tropicale. C'est donc un pays (la Côte d'Ivoire) beaucoup arrosé avec des hauteurs moyennes de pluies supérieures à 1000 mm dans la partie Sud et sur le littoral en général. Selon C. Hauhouot (2008, p. 78), ces pluies sont abondantes, continues et redoutables dans le temps surtout au niveau de la zone d'Abidjan. Cette situation met à mal la perméabilité des sols et la capacité des systèmes d'assainissement pluvial. Cela entraîne souvent des inondations aux conséquences dramatiques tant pour les populations que pour l'environnement. Abondant dans la même logique, D. A. Alla (2013, p. 15) affirme que les inondations qui se manifestent au niveau d'Abidjan sont dues aux différentes formes de reliefs à savoir les fonds de vallée, les cuvettes et les plaines littorales. Ces différentes zones constituent pour la plupart des zones inondables ou non aedificandi. Aujourd'hui, l'extension spatiale des villes, liée à la forte croissance démographique et au besoin de développement tous azimuts actuels, nécessite la prise en considération de la question des risques naturels dans les différents schémas d'aménagement en vigueur. Cela permettra de garantir la sécurité des populations face aux multiples effets des phénomènes climatiques.

#### **1.4.2. Impacts des aménagements des barrages hydroélectriques : entre développement socio-économique et génération de dégâts naturels et sociaux**

Il existe une véritable controverse sur les répercussions inhérentes à la construction des barrages, surtout en ce qui concerne les modifications limnologiques fondamentales et les débits des cours d'eau (A. Assani, 2007, p. 128). Ces aspects semblent d'ailleurs les mieux documentés. Les impacts liés à la mise en place d'un barrage sont à la fois multiples et

multiformes. Ils sont bénéfiques pour certains et négatifs pour d'autres (surtout pour les anti-barrages et défenseurs de l'environnement), tout dépendant de l'angle d'analyse sous lequel on se place.

La réalisation d'un barrage répond généralement à deux objectifs majeurs. Il est construit soit pour une vocation hydroagricole, soit pour une vocation hydroélectrique. Dans le premier cas, il répond à un besoin de développement agricole par l'irrigation des terres et d'alimentation en eau douce. Dans ce cas, il réduit l'amplitude des crues et permet l'écêtement des points de crues tout en assurant un débit minimal en saison sèche pour soutenir l'étiage et les cultures (S. Duval et O. Hamerlynck, 2006, p. 6). Contrairement au premier type de barrage, les barrages hydroélectriques ont pour vocation la production d'énergie par la mise en service de turbines. Ces turbines fonctionnent grâce à un débit continu maintenu par le réservoir d'eau, ce qui permet la suppression d'une éventuelle crue annuelle.

En effet, la réalisation d'un barrage comme ci-haut souligné, surtout dans le cadre de la production d'énergie ne se fait sans conséquences majeures, car son aménagement perturbe le milieu à l'échelle locale et régionale. En amont du site du barrage, ce sont de grands lacs artificiels, véritables mers intérieures qui se forment avec des superficies de plusieurs centaines à milliers de km<sup>2</sup> (V. L. Jacob, 1983, p. 2). En conséquence, l'écosystème terrestre devient brusquement aquatique avec tous les changements physiques, biologiques, hydrologiques et morphologiques que cela suppose.

Sur le plan socio-culturel, ces aménagements hydroélectriques affectent les relations traditionnelles d'échanges sociaux des populations par le déplacement des populations impactées vers de nouveaux sites de recasement. Selon la Commission Mondiale des Barrages (CMB, 2002, p. 7), ces différents déplacements entraînent la désintégration des communautés tribales, indigènes et rurales, une augmentation des problèmes de santé mentale et physique. En aval, l'économie rurale des populations dépendantes des fluctuations annuelles et naturelles des cours d'eau est fortement atteinte, car elles sont privées de leurs ressources naturelles de subsistance à cause de la régularisation des débits des eaux. En outre, ces personnes vivant en aval des barrages sont souvent confrontées aux maladies transmises par l'eau. C'est pourquoi, les aménagements hydrauliques peuvent, en l'absence de mesures préventives et d'actions efficaces, être à l'origine d'une extension rapide des fléaux tels que le paludisme, la bilharziose, l'onchocercose ou autres (L. B. Diallo, 2009, p. 40).

De plus, S. Duvail et O. Hamerlynck, (2006, p. 6) révèlent que l'absence prolongée de lâchers d'eau douce en aval du barrage anti-sel de Diama sur le delta du Sénégal, près d'une décennie, a fortement diminué la ressource halieutique et favorisé la quasi disparition de la végétation estuarienne. En conséquence, ces perturbations du milieu naturel dans le delta du fleuve Sénégal par l'aménagement des barrages anti-sel de Diama et à réservoir de Manantali au Mali ont eu un impact d'autant plus négatif sur les économies villageoises que sur tout l'hydrosystème du bassin versant du fleuve Sénégal.

La Commission Mondiale des Barrages (CMB, 2002, p. 9) renchérit en soutenant que la plupart des barrages n'ont pas fourni les bénéfices que leurs partisans avaient prévus. Au contraire leurs impacts négatifs ont largement dépassé les prévisions. Par exemple, elle révèle que 1 à 28 % des émissions globales de gaz à effet de serre sur la planète sont le fait des retenues des barrages. En somme, la construction des barrages à travers la planète a entraîné le déplacement de 40 à 80 millions de personnes de leurs maisons et de leurs terres. Appliqué à la population mondiale aujourd'hui, cela représente une (1) personne déplacée sur cent (100) par barrage selon la Commission Mondiale des Barrages (CMB, 2002, p. 14).

Abondant dans le même sens, R. Loire et *al.* (2018, p. 3) affirment que l'exploitation de huit (8) barrages hydro-électriques sur le cours de la rivière Durance en France confine le lit de la rivière au débit réservé. Cela engendre un important colmatage du fond du chenal par des argiles et limons, affectant ainsi la reproduction des espèces piscicoles. Ces mêmes auteurs révèlent également que l'ouvrage capacitif du barrage de Maury sur la rivière Selves a fortement modifié le débit de cette rivière et favorisé une accumulation de fines et de sables provenant de ses affluents. À cet effet, selon L. B. Diallo (2009, p. 35), des études ont révélé qu'environ 3 mètres de hauteur de sable sont entassés dans ce lac du barrage de Kompienga depuis sa mise en exploitation en 1989.

Toujours dans cette même logique de péjoration de l'existence des barrages, S. Duvail et O. Hamerlynck (2006, p. 6) soutiennent que le fleuve Tana au Kenya est aussi confronté à une réduction drastique de ses débits suite à l'aménagement de cinq barrages hydro-électriques sur son bassin-versant. Selon ces auteurs, en plus de diminuer les volumes et la qualité d'eau apportés aux zones côtières, les barrages modifient l'hydrogramme de crue d'une rivière.

De même, différentes études effectuées au Québec par plusieurs auteurs dont A. Assani et *al.* (2007, p. 128) ont démontré les impacts des barrages sur les débits moyens annuels. Selon ces auteurs, l'ampleur des changements hydrologiques induits par les barrages dépend du mode

de gestion et de la taille des bassins-versants. Cette diversité de modes de gestion des barrages et de tailles des bassins-versants peut donc entraîner des impacts différents sur les débits moyens annuels.

Selon la Commission Internationale des Grands Barrages, lorsque les barrages et réservoirs sont bien conçus sur le cours des rivières, ils ne modifient en rien la géométrie naturelle. Par conséquent, les lâchers d'eau fournissent le débit adéquat pour le maintien de la qualité et le volume d'eau nécessaires à l'équilibre naturel du milieu. Cette thèse est défendue par A. Assani, F. Lajoie et C. Laliberté (2007, p. 128). Pour eux, les barrages ne modifient pas les débits moyens annuels puisque toute la quantité d'eau stockée au cours d'une année hydrologique est intégralement lâchée.

Dans la même veine d'idées, selon E. Ago et *al.* (2005, p. 9), le fonctionnement du barrage hydroélectrique de Nangbeto au Bénin-Togo a influencé le régime hydrologique du fleuve Mono de façon positive. La régularité de l'écoulement en aval du barrage a permis une bonification agricole de près de 18 000 hectares de terres jadis marécageuses, donc inaccessibles avant la construction de ce barrage.

De ce qui précède, les barrages peuvent avoir plusieurs fonctions qui sont difficilement conciliables. S'ils s'accompagnent d'une vocation hydroélectrique, l'enjeu pour les concessionnaires est d'avoir suffisamment d'eau pour turbiner toute l'année. S'ils interviennent pour soutenir les étiages ou retenir une quantité d'eau pour l'alimentation, conserver un stock d'eau suffisant est également important. À l'inverse, s'ils peuvent concourir à limiter des crues et des inondations à l'aval, le réservoir ou la retenue doit pouvoir accueillir une quantité d'eau importante en cas de fortes précipitations. C'est pourquoi, selon A. Metzger et J. Linton (2016, p. 9), ces difficultés de gestion de ce double but de pallier les étiages et d'éviter les crues à risques d'inondation constitue un jeu d'équilibriste parfois délicat dans le fonctionnement et la gestion des barrages en général.

### **1.4.3. Barrages hydroélectriques, crues et risques d'inondation**

Les rapports établis entre les barrages hydroélectriques et les risques d'inondation sont fondés sur deux aspects ; soit sur l'exploitation de ces infrastructures soit sur leur rupture. Au regard du fonctionnement des barrages, une controverse existe entre le fait que les ouvrages hydroélectriques accentuent les inondations ou qu'ils régulent et réduisent ces risques.

Selon S. Houessou (2016, p. 63), les barrages jouent un rôle important dans le mécanisme de défense contre les inondations indépendamment d'assurer la demande en eau. Ce qui sous-entend que la régulation des eaux dans un contexte de gestion des crues contribue à une gestion de potentielles inondations.

En effet, 8 % des barrages à fonction unique et 39 % des barrages à fonction polyvalente sont construits avec pour objectif spécifique, limiter et gérer les risques d'inondation ; quoique cela consiste en une fonction secondaire pour d'autres (M. Acreman, 2000, p. 9). Cela traduit que les barrages, non seulement garantissent l'approvisionnement en eau pendant les sécheresses, l'irrigation, l'usage domestique et industriel, mais réduisent également les conséquences négatives des inondations. Ainsi, la construction du barrage de Nangbeto sur le fleuve Mono, entre le Bénin et le Togo a considérablement réduit les risques récurrents d'inondation dans cette basse vallée depuis sa mise en service (E. Ago et *al.*, 2005, p. 10 ; E. Amoussou, 2010, p. 81). De plus, selon le gestionnaire du barrage à savoir la Communauté Électrique du Bénin (CEB), les causes des inondations constatées dans la basse vallée du Mono seraient le fait des facteurs liés à la variabilité climatique et non au fonctionnement du barrage de Nangbeto sur le Mono (E. Ago et *al.*, 2005, p. 2).

Il ressort que le rôle des barrages dans la limitation des crues est en effet un enjeu décisif, très discuté revenant souvent sur le devant de la scène lors d'épisodes majeurs. Si certains grands barrages n'ont pas pour fonction première ou secondaire d'écrêter les crues, ils peuvent y contribuer fortement, donc occasionner de graves inondations de par leur fonctionnement (A. Metzger et J. Linton, 2016, p. 5). Dès lors, les inondations occasionnées par les barrages surviennent dans deux contextes particuliers notamment à l'occasion de lâchers d'eau incontrôlés et de rupture d'ouvrage.

Pour la Commission Mondiale des Barrages (CMB, 2002, p. 34), les barrages contribuent certes au contrôle des crues, cependant, ils rendent plus vulnérables les populations habitant l'aval des ouvrages du fait des dégâts importants inhérents la mauvaise gestion des crues et lâchers d'eau intempestifs. Ces dégâts sont occasionnés soit par des problèmes techniques ou par des lâchers inadéquats en période de pointe provoquant la montée subite des eaux.

En ce qui a trait aux lâchers d'eau de barrages, leur rôle dans l'accroissement des risques d'inondation est fonction de la structure initiale du régime hydrologique des bassins-versants (S. Houessou, 2016, p. 63). Cette affirmation de l'auteur fait suite aux études de E. Amoussou en 2010, qui ont révélé que l'augmentation des écoulements dans la basse vallée du Mono, entre

1988 et 2000 était occasionnée par les lâchers d'eau du barrage de Nangbeto construit sur le cours du Mono. Cette situation est donc en partie responsable des récurrentes inondations observées dans cette basse vallée selon les populations riveraines du Mono (E. Ago et *al.*, 2005, p. 11).

Par ailleurs, si les barrages écrêtent de petites et moyennes crues, ils ne peuvent contenir de l'eau que jusqu'à un certain seuil. Au-delà, ils ne pourraient que lâcher un débit égal à celui en amont ; ce qui pourrait occasionner de graves inondations (A. Metzger et J. Linton, 2016, p. 13).

L'autre aspect du risque d'inondation occasionné par un barrage relève de la rupture des ouvrages. C'est un risque particulier caractérisé par une probabilité d'occurrence faible, mais avec des conséquences particulièrement dramatiques (P. Royet, 2004, p. 4). En effet, le phénomène de rupture de barrage correspond à une destruction partielle ou totale d'un barrage. Elle peut se manifester de deux façons notamment de façon progressive ou brutale (DDRM, 2016, p. 130). La rupture progressive se fait par érosion régressive, suite à une submersion de l'ouvrage ou à une fuite à travers celui-ci. Quant à la manière brutale, elle a lieu dans le cas des barrages en béton, par renversement ou par glissement d'un ou plusieurs plots.

Ainsi, la sécurité des barrages exige une attention grandissante et des investissements accrus pour les coûts d'entretien surtout lorsque le parc commence à vieillir. Selon C. Lévêque (2005, p.9), chaque année, la destruction de nombreux petits barrages du fait de leur vieillissement passe souvent inaperçue à travers le monde. Cependant pour un barrage de 10 à 15 mètres de haut avec un stockage de quelques centaines de milliers de mètres cubes, la rupture de l'ouvrage peut créer des crues dangereuses de plusieurs centaines de mètres cube par seconde. Autrement dit, la rupture de l'ouvrage entraîne une onde de submersion se traduisant par une élévation brutale du niveau de l'eau à l'aval, d'où la manifestation d'une inondation catastrophique (C. Lévêque, 2005, p. 9 ; S. Houessou, 2016, p. 63). Le vieillissement des ouvrages tout comme le défaut de fonctionnement des vannes permettant l'évacuation des eaux, ou encore les vices de conception, de construction ou de matériaux constituent les causes techniques majeures de rupture de barrage. À ces causes, il faut ajouter les causes d'origines naturelle et humaine.

En ce qui concerne les causes naturelles, elles sont caractérisées souvent par des séismes, des crues exceptionnelles ou même des glissements de terrain. Selon P. Royet (2004, p. 3), ces causes constituent les principaux aléas externes auxquels sont exposés les barrages. Quant aux facteurs humains de rupture d'ouvrage, on peut citer les insuffisances des études préalables et

du contrôle d'exécution, des erreurs d'exploitation et de surveillance. Par exemple, une étude réalisée par le CEMAGREF a mis en évidence le vieillissement prématuré de plusieurs barrages de la rivière Gers dans le Sud-ouest français du fait des causes techniques et humaines ci-haut citées (C. Lévêque, 2005, p. 9).

De nombreuses méthodes d'aide à l'expertise pour le diagnostic et l'analyse de barrages sont développées et d'autres toujours en cours de développement. Par exemple à travers des modélisations mathématiques, une estimation rapide du risque d'inondation à l'aval d'une digue permet de connaître les caractéristiques d'une onde de submersion de rupture de barrage en tout point de la vallée (DDRM, 2016, p. 134). Également, cette simulation permet aussi d'apprécier les conséquences d'inondations sur les enjeux en aval du barrage et facilite l'établissement des plans de secours et d'alerte. L'objectif est donc de capitaliser la connaissance et les différents retours d'expérience d'évènements afin de mieux se projeter dans l'étude des risques liés au barrage.

Parmi ces nombreuses méthodes, il y a lieu de souligner le cas des méthodes et outils hydrologiques qui constituent des voies incontournables de prévision des phénomènes de crues et risques d'inondation. Il existe les méthodes spécifiques de détermination ou de caractérisation des crues et les méthodes de prévision et simulation des débits de crues à l'exutoire d'un bassin-versant. Toutes ces techniques d'analyse sont indispensables à une gestion durable des problématiques hydrologiques. Dès lors, la section ci-dessous portera sur la littérature liée à quelques méthodes d'études et de détermination des débits de crues.

#### **1.4.4. Méthodes de détermination des débits de crues**

L'étude des crues est d'une importance majeure, car elles font partie des risques naturels auxquels l'Homme et son environnement sont constamment soumis à travers la planète. Dès lors et de tout temps, l'Homme s'est intéressé aux crues, que ce soit à leur détermination (ou prédétermination) ou à leur prévision. Ainsi, il en a résulté aujourd'hui une diversité de méthodes d'étude. Cependant, une conclusion saute aux yeux, c'est que malgré cette palette de méthodes, le problème des crues semble loin d'être réglé à travers le monde.

La prédétermination du débit d'une crue consiste à associer au dépassement d'un certain débit une probabilité d'occurrence. La mise en place de dispositifs de lutte contre le risque d'inondation causé par les crues repose alors sur la connaissance et la détermination (ou prédétermination) des débits extrêmes de référence. Ces extrêmes sont caractérisés par des

périodes de retour. C'est par définition le terme probabiliste qui caractérise l'acceptabilité des seuils de dégâts (N. Souanef, 2015, p. 40). Ces périodes de retour peuvent varier par exemple de 2, 5, 10, 50, 100 voire à 1000 ans.

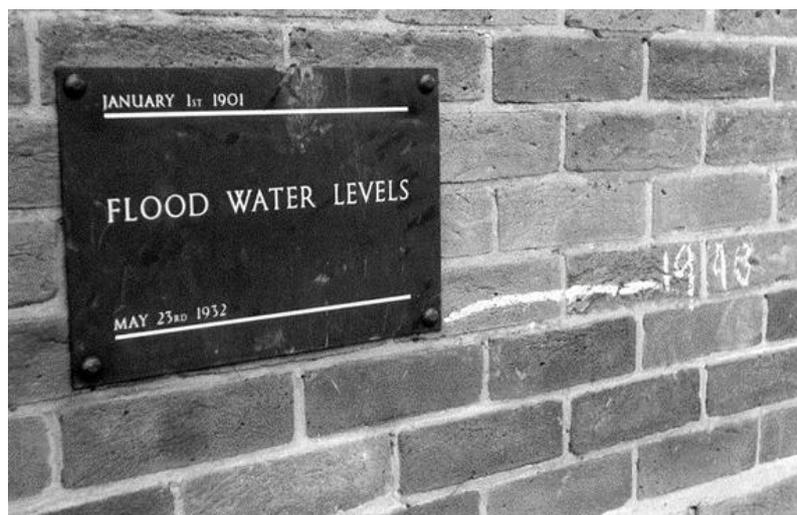
Par ailleurs, la recherche d'événements historiques constitue un moyen d'étude des crues. Elles sont basées sur des observations plus ou moins longues, plus ou moins stables. Les résultats d'investigations historiques permettent de vérifier les estimations de débits de crues faites par d'autres méthodes. Les paramètres essentiels influençant le débit de crue de fréquence pour un bassin versant sont définis par la surface, la pluviométrie et la nature géologique du bassin (J. P. Laborde, 2009, p. 141). Par conséquent, la confiance accordée à un type de méthode dépend d'abord du problème à résoudre, ensuite de facteurs économiques et géographiques (pour la réalisation de grands ouvrages hydrauliques), et enfin du bon sens dans le choix des variables à étudier. Deux (2) grandes méthodes sont très utilisées, à savoir les méthodes empiriques et les méthodes statistiques.

#### *1.4.4.1 Méthodes empiriques d'étude des crues*

Ces méthodes sont le plus souvent utilisées lorsqu'on manque de données. Loin d'être exhaustive, l'analyse s'attardera sur quelques-unes.

##### *1.4.4.1.1 Méthode de reconstitution des crues à partir des côtes atteintes dans le passé*

Elle se définit par l'exploitation des traces des crues et des hauteurs de pluie délaissées par le passage de la crue sur les bâtiments, les arbres, les cultures comme le montre la **figure 8**.



*Figure 8 : Repère de crues sur un mur (N. Souanef, 2015, p. 43).*

#### **1.4.4.1.2 Méthode paléohydrologique de reconstitution des crues extrêmes**

À travers l'évaluation de la capacité des terrasses fluviales d'un cours d'eau à enregistrer des événements passés, couplée à l'analyse des dépôts sédimentaires et à une modélisation hydraulique unidimensionnelle d'un bassin-versant, il est possible de reconstituer les paléo-événements de crues. En effet, la paléohydrologie permet d'apporter des solutions à la connaissance des crues extrêmes passées. Elle s'effectue à partir de l'étude stratigraphique et la datation des dépôts laissés par les crues, soit directement dans le champ d'inondation, soit dans les grottes qui surplombent le lit mineur du cours d'eau (L. Dezileau et *al.*, 2014, p. 44). Cela permet également de reconstituer le niveau atteint par les plus fortes crues depuis des millénaires. Ces approches permettent d'élargir de façon considérable l'échelle chronologique d'investigation et donnent des éléments objectifs sur les crues majeures survenues sur le bassin-versant.

#### **1.4.4.2 Méthode d'estimation de la crue maximum à partir des précipitations**

La méthode d'estimation de la crue maximum est basée sur une série d'observations de débits maxima annuels. Cette méthode n'utilise pas toute l'information disponible au cours des observations de précipitations génératrices de crues. L'application de cette méthode part du modèle de transformation pluie-débit avec un opérateur linéaire comme :

$$Q(t) = Q_0 + \int_0^t C(\tau) I(\tau) K(T - \tau) d\tau \quad (2)$$

Où :

- Q(t) représente le débit observé à l'instant t
- Q<sub>0</sub> le débit de base caractéristique de l'état du bassin au début de la pluie
- I (τ) l'intensité de la pluie à l'instant τ
- C (τ) le coefficient d'écoulement représentant l'abattement à faire subir par la pluie pour tenir compte de ce qui est perdu pour l'écoulement
- K une fonction d'écoulement qui caractérise la redistribution dans le temps par le bassin d'un volume pluvial unité

Ce modèle ne rend pas véritablement compte de la réalité, cependant avec une bonne estimation de certains paramètres tels que K(t) et C(t) à partir de quelques hydrogrammes de crues observées, on peut aboutir à des résultats pratiques. Les paramètres intervenant dans cette méthode sont calculés à partir des lois de probabilités des précipitations et des débits.

Quand les données de débits sont disponibles, on a recours aux méthodes statistiques, pour une prédétermination des débits maximum de crues.

#### ***1.4.4.3 Méthodes statistiques d'étude des crues***

Il est possible de procéder à un ajustement statistique puis à une extrapolation sur les fréquences lorsque les données de débits de crue sont disponibles. Cette méthode est parfaitement justifiée si on dispose suffisamment d'observations d'au moins 10 ans (J. P. Laborde, 2009, p. 155). L'estimation statistique des débits (extrêmes) de crue peut se faire suivant deux méthodes : la méthode des maxima annuels et la méthode des valeurs supérieures à un seuil.

##### ***1.4.4.3.1 Méthode des valeurs maximale annuelles***

L'analyse par valeurs maximales annuelles est l'approche statistique couramment retenue pour l'exploitation de l'information statistique disponible (pluviométrie, hydrométrie, etc.). La méthode des maxima annuels consiste en l'application de la théorie de valeurs extrêmes, à une série de données. Ces données sont constituées en extrayant une valeur maximale par année. L'échantillon de données constituées, elles sont ajustées à une loi statistique. La simplicité de sa mise en œuvre, surtout à travers les lois GEV et GUMBEL, a contribué à sa prédominance en matière de quantification du risque associé aux pluies extrêmes. De nombreux travaux en Afrique de l'Ouest comme dans le monde y ont été consacrés.

Cependant, cette approche comporte certaines limites liées à la procédure d'échantillonnage. En effet, une seule valeur (la maximale) est considérée chaque année, ce qui entraîne le rejet de beaucoup d'évènements extrêmes. Les valeurs très élevées prises en compte par la méthode sont donc finalement peu nombreuses, et cela d'autant plus que certaines années ne connaissent pas de pluie journalière abondante.

##### ***1.4.4.3.2 Méthode des valeurs supérieures à un seuil***

Lorsque les séries sont supérieures à 10 ans ou encore comprises entre 10 et 20 ans d'observation, la méthode des valeurs supérieures à un seuil est appliquée. Cette méthode est par ailleurs appelée méthode des excès ou méthode POT (Peaks Over Threshold). Le mode d'échantillonnage est délicat et consiste en l'extraction de toutes les données dépassant un seuil donné, assez bas pour obtenir des approximations raisonnables sur la base des conditions d'indépendance des données. Dans ce cas, les données utilisées sont alors les débits

de pointe supérieurs à un seuil préalablement fixé. Plus le seuil est élevé, plus les maxima sont indépendants, et plus courte est la série. Plus le seuil est bas, plus nombreuses seront les crues retenues, mais les maxima seront dépendants les uns des autres car appartenant au même événement (D. Koumassi, 2014, p. 88). Un choix judicieux du seuil permet de retenir par année un nombre moyen de crues de l'ordre de 2 à 3 et de constituer une série comportant suffisamment de données pour réaliser l'ajustement d'une loi statistique (M. Meddi et A. S. Ben Abbes, 2014, p. 5). Ce type d'approche des débits de crues est efficace pour extraire des informations concernant de véritables événements extrêmes.

L'application de ces méthodes obéit au respect de certaines étapes dont :

- échantillonnage de la série de débits et de précipitations ;
- choix d'une loi statistique ;
- contrôle de l'ajustement ;
- analyse des incertitudes.

Ainsi, le choix d'une technique dépend essentiellement des moyens de calcul dont on dispose, de la taille de l'échantillon et du type de loi qui peut être guidé par des tests statistiques.

#### **1.4.4.4 Méthode du Gradex**

La méthode du Gradex a été développée par Guillot et Duband de la DTG-EDF de Grenoble en 1967. Elle permet l'estimation de la crue de sécurité des grands barrages dont la période de retour est d'au moins 1 000 ans. En effet, c'est une méthode de détermination des crues basées sur le traitement statistique des seules valeurs des débits observés. Elle repose sur une analyse conjointe des séries hydrométriques et pluviométriques et s'appuie principalement sur trois hypothèses.

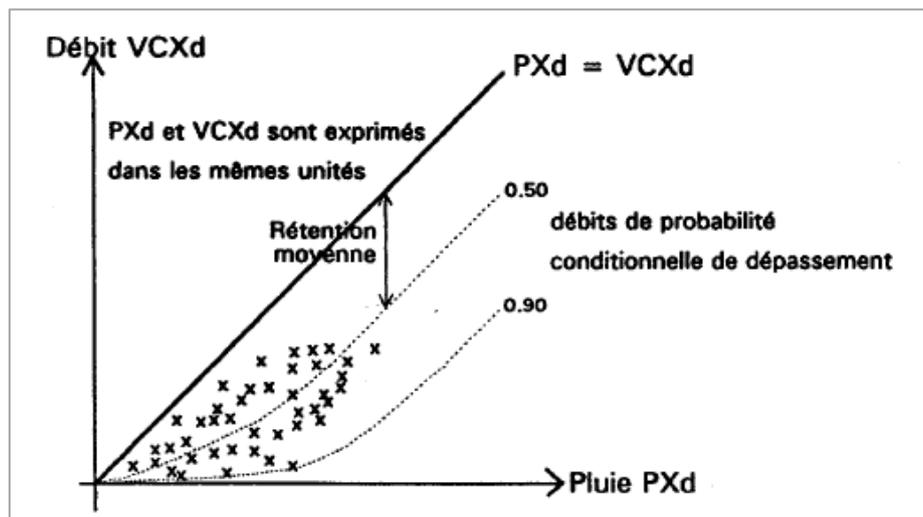
- *Hypothèse 1* : la fonction de répartition des précipitations tombant sur le bassin, au pas de temps retenu comme pertinent, est asymptotiquement à décroissance exponentielle simple, c'est-à-dire que la fréquence de dépassement des précipitations maximales, moyennées sur une durée de quelques heures à quelques jours, est à décroissance exponentielle simple.

$$\text{Log} [1 - Cp(PXd)] = - PXd/a_p + \text{const.} \quad (3)$$

Ce qui se traduit par la loi de Gumbel pour la distribution des pluies :

$$Gp(PXd) = \exp[-\exp[-(P-P_0)/a_p]] \quad (4)$$

- *Hypothèse 2* : le déficit d'écoulement, défini comme la différence entre le volume d'eau précipité et le volume d'eau écoulé à l'exutoire du bassin-versant pendant un pas de temps équivalent, n'augmentent plus, en valeur moyenne, au-delà d'une certaine valeur de pluie. En d'autres termes, à partir d'un certain état de saturation du bassin-versant, la distribution du déficit d'écoulement ne dépend plus de la valeur de pluie ou de débit. On en déduit que pour les fortes périodes de retour, sur le graphique de Gumbel, la loi du débit a une courbure positive et tend vers une asymptote parallèle à la loi de pluie, dont la pente est le Gradex (**figure 9**).



**Figure 9** : Courbe de l'application de la méthode du GRADEX

Cette courbe se définit également selon l'équation :

$$Gq(Q)_{\text{Televée}} \cong Gp(P - E(\Delta)) \quad (5)$$

Où  $E(\Delta)$  est la valeur centrale du déficit d'écoulement  $A = P - Q$ . En pratique, la distribution  $G_q(VCXd)$  des débits VCXd, calculés sur la durée  $d_H$ , durée moyenne de l'hydrogramme de ruissellement direct, est extrapolée directement à partir d'un seuil  $T_g$  (égal en général à 10 ans) :

$$VCXd_H(T_g) = VCXd(T) + a_p \cdot \text{Log}(T/T_g) \quad (6)$$

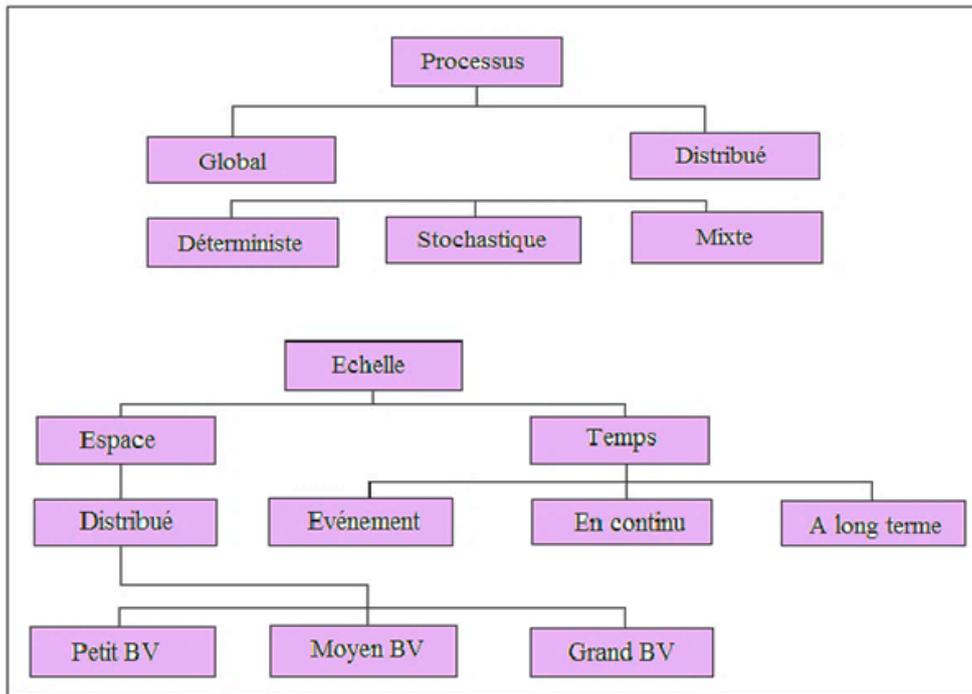
- *Hypothèse 3* : Quelle que soit sa fréquence ou sa durée de retour, le débit de pointe de crue (valeur maximale observée) peut être calculé à partir du volume écoulé (sur le pas de temps considéré) en utilisant un coefficient multiplicatif moyen caractéristique du bassin versant. Ce coefficient, nommé coefficient de forme ou coefficient d'affinité peut être estimé à partir des hydrogrammes de crues enregistrées sur le bassin versant.

Le grand intérêt de la méthode est de valider l'extrapolation de la distribution des débits par l'information pluviométrique. La méthode du gradex permet de pallier les limites de l'approche statistique classique sur les débits. Les informations locales en débit sont le plus souvent insuffisantes (20 à 30 ans d'observation en continu) et sujettes à caution pour les crues les plus fortes (N. Souanef, 2015, p. 50).

Par ailleurs, il faut noter que la communauté hydrologique française, sans être uniformément adepte de la méthode, s'est accordée sur le fait que le GRADEX propose un compromis précision-robustesse précieux pour l'ingénieur en charge du dimensionnement d'ouvrages. Cependant, au niveau international, de nombreuses critiques ont été soulevées contre cette méthode en ce qui concerne ses limites (F. Garavaglia et *al.*, 2012). La prévision des risques hydrologiques liés aux événements extrêmes comme les crues nécessite une bonne approche de celles-ci afin de mieux planifier les mesures de protection des populations locales ou alors établir des plans de secours. Les méthodes foisonnent en matière de prédétermination (ou détermination) des débits de crue. Des méthodes empiriques aux méthodes statistiques en passant par les méthodes déterministes. Leur utilisation s'impose dans la mesure où il y a insuffisance de données hydrologiques. Les méthodes statistiques de détermination des débits extrêmes ou débits de pointe restent les mieux adaptées à la plupart des situations, car elles se rapprochent plus de la réalité. Cependant, la rareté des données rend souvent la tâche laborieuse et complexe. Dès lors, il existe des méthodes de prévision de ces événements extrêmes.

#### **1.4.5 Méthodes hydrologiques de prévision des crues et risques d'inondation**

La modélisation hydrologique constitue une des solutions à la problématique générale de la gestion des ressources en eau des bassins versants, à l'aménagement du territoire, ou à l'une des différentes facettes des risques hydrologiques à savoir les inondations. C'est en ce sens que F. Kessasra (2017, p. 6) soutient que la conceptualisation des phénomènes est un puissant outil de résolution des problèmes liés à l'espace et au temps. Avec l'évolution remarquable des sciences hydrologiques, il existe en effet une palette de modèles hydrologiques ayant chacun leurs spécificités et leurs domaines d'application. Cependant, en intégrant la description des processus physiques, les caractéristiques du bassin-versant et le facteur temps, on obtient les modèles conceptuels ou physiques, les modèles globaux ou distribués et les modèles déterministes ou stochastiques ou encore mixtes (**figure 10**).



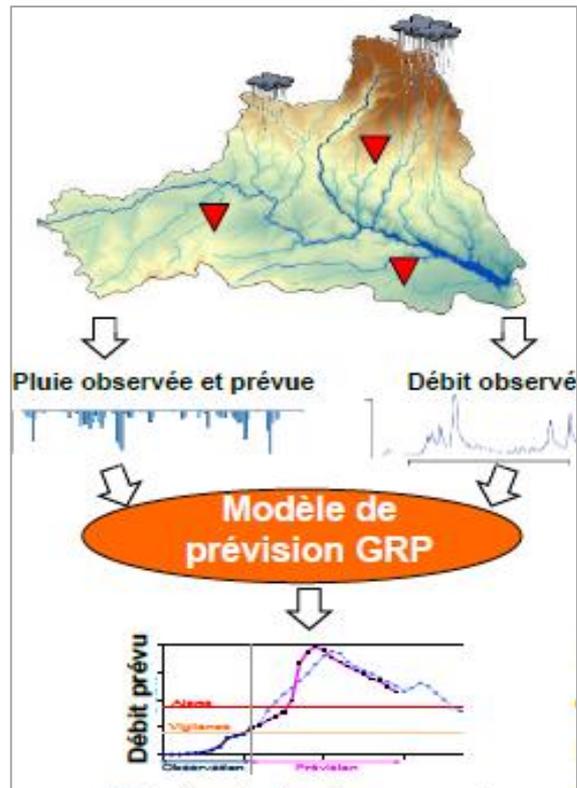
*Figure 10 : Classification des modèles proposées par Singh (1995)*

Selon M. Bekkadour (2020, p. 22), un modèle hydrologique n'est qu'une simplification d'un système complexe qui définit donc une représentation simplifiée d'une réalité physique. La modélisation concerne généralement la relation pluie-débit, c'est-à-dire que les modèles utilisent la pluie comme variable d'entrée et calculent un hydrogramme en sortie du bassin. Par conséquent, loin d'explicitier la spécificité et les conditions de mise en œuvre des différents modèles, il existe le modèle conceptuel GR (génie rural) du Cemagref, le TOPMODEL (Topography based hydrological Model), le modèle HEC-HMS (Hydrologic Modeling System du Hydrologic Engineering Center) et le modèle CEQUEAU, la liste n'étant pas exhaustive.

Concernant les modèles GR, ils sont efficaces pour reproduire et prévenir les crues, surtout à court terme. Il a beaucoup été utilisé par certains auteurs dont C. Perrin, E. Amoussou, S. Houessou. Ces auteurs ont orienté leurs travaux sur des bassins-versants de la sous-région ouest-africaine, notamment le bassin du Mono au Bénin.

#### ***1.4.5.1 Modèles opérationnels de prévision de crue et gestion des situations des catastrophes d'inondation : modèle GRP***

Le modèle GRP (modèle du **G**énie **R**ural pour la **P**révision) est un modèle de prévision des crues en temps réel. Il a été conçu spécifiquement pour l'aide à l'alerte aux crues. Le modèle GRP prévoit les débits futurs en un point jaugé d'un cours d'eau à partir des mesures et des prévisions de pluies précipitées sur le bassin versant correspondant (**figure 11**).



**Figure 11 :** Principe de fonctionnement du modèle GR en temps réel (IRSTEA, 2020)

C'est donc un modèle hydrologique global, continu, fonctionnant au pas de temps horaire, donc journalier. C'est-à-dire que le modèle représente le bassin versant de manière simplifiée, limitant ainsi les besoins en données pour s'adapter à des dynamiques de crues variées en considérant des conditions pluviométriques passées.

Également, le modèle GRP modélise le bassin versant comme un assemblage de réservoirs représentant les stocks d'eau dans les sols, et les nappes et leur transfert vers l'exutoire du bassin. Le modèle comporte que trois paramètres libres. Cela lui confère une bonne robustesse. Les paramètres sont déterminés pour chaque bassin-versant par optimisation automatique.

En entrée, les paramètres sont constitués des données pluviométriques et hydrométriques (ou observées) issues des mesures des postes du bassin. Ce qui permet, par assimilation, de mettre le modèle en conformité avec les observations, pour obtenir de meilleures prévisions. Dans son fonctionnement, le modèle GRP tient également compte des erreurs de prévision antérieures pour mieux s'adapter aux conditions spécifiques de l'événement. Ainsi, en sortie, le modèle GRP est capable de fournir les débits horaires prévus jusqu'à 120 h, soit 5 jours à l'avance. Le logiciel GRP est constitué de deux utilitaires à savoir le calage et la prévision.

L'utilitaire de calage permet d'évaluer les performances du modèle, de déterminer ses paramètres et les incertitudes prédictives sur les chroniques de données historiques. Le calage est réalisé sur l'ensemble des données disponibles, avec des ajustements au besoin. Il permet également de générer les paramètres du modèle et les bases de données nécessaires à son fonctionnement en temps réel.

Quant à l'utilitaire de prévision, il permet de calculer des prévisions de débit en temps réel et de rejouer des événements en temps différé. Il est conçu pour interfacer avec des plateformes de modélisation temps réel permettant la visualisation des résultats.

Le modèle GRP se révélant très simple, fait preuve non seulement d'une robustesse, mais surtout d'une efficacité à simuler et à prédire les crues dans la perspective d'une gestion des hydrocatastrophes (C. Perrin *et al.*, 2007, p. 8 ; E. Amoussou, 2015, p. 23). Comme le modèle GRP, il existe d'autres modèles d'efficacité identique et de mise en œuvre simple. Parmi ces modèles GR, il y a le modèle GR4J.

#### ***1.4.5.2 Cas du modèle hydrologique GR4J***

Tout comme le GRP, le modèle de Génie Rural Journalier à 4 paramètres (GR4J) est un modèle global apparenté aux modèles conceptuels. Ce modèle global permet d'évaluer la réponse d'un bassin versant en termes de débit à l'exutoire de ce bassin. Du fait de son approche empirique, il ne fait appel à aucune physique des écoulements. Le modèle GR4J fonctionne donc au pas de temps journalier avec 4 paramètres optimisables. Il est issu de la famille des modèles hydrologiques GR (GR4H, GR1A, GR2M, GR4J, GR5J, GR6J) développé par le Cemagref. Ils permettent de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire. Son développement a été entrepris au Cemagref au début des années 1980. Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successives qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle (C. Perrin *et al.*, 2007, p. 9). Le GR4J a une structure apparentée à celle des modèles conceptuels. Elle est basée sur des fonctions de production et de routage représentées par des réservoirs interconnectés qui traduisent la transformation de la pluie en débit.

En effet, la simulation du débit à l'exutoire d'un bassin-versant est nécessaire voire indispensable pour de nombreuses applications d'ingénierie et de gestion de la ressource en eau, telles que le dimensionnement et la gestion d'ouvrages, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impact. C'est pour répondre à ces questions que le Cemagref a commencé à

développer au début des années 1980 des modèles hydrologiques (du Génie Rural – GR). Ces modèles permettent de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire (C. Perrin et *al.*, 2007, p. 3). Pour cette étude, le modèle GR4J est celui qui est choisi afin de reproduire les conditions hydrologiques de crues à l'exutoire du bassin de Soubré susceptible d'occasionner des inondations.

#### **1.4.6 Approches multiples des risques d'inondation**

L'étude des risques d'inondation, à l'instar des risques naturels en général relève d'une complexité (S. Cartier, 2005, p. 5). Cette complexité se justifie dans la mesure où la sphère d'étude de ces phénomènes est fondée sur la manifestation d'aléas dépendant eux-mêmes d'incertitude de la nature. Le concept de risque naturel repose donc sur un modèle théorique. Il est la résultante de deux autres concepts : celui d'aléa et celui de la vulnérabilité (Y. Manche, 2000, p. 14).

Selon S. Cartier (2005, p. 2), les risques d'inondation constituent un terrain de prédilection pour démontrer comment la maîtrise des risques physiques suppose un contrôle social des conditions de vulnérabilité et d'aggravation des interdépendances entre activités humaines. C'est en cela que les différentes approches des risques d'inondation concernent pour la plupart, l'étude de la vulnérabilité des territoires et des populations. Elles permettent d'analyser également la résilience des populations, l'identification simple de zones inondables ou encore l'évaluation des enjeux exposés dans un lieu géographique donné.

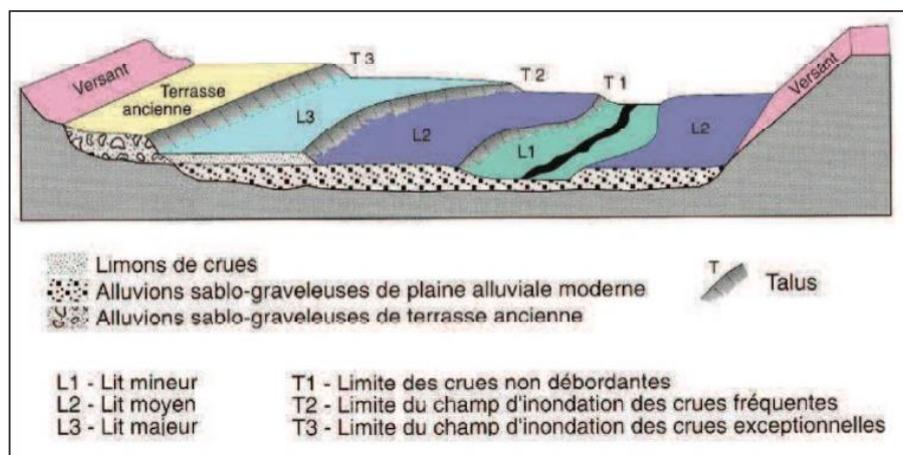
Dans le cadre d'étude de la vulnérabilité et la résilience des territoires par exemple, l'accent est mis sur le retour d'expérience (F. Léone et F. Vinet, 2006, p. 4). Cette technique constitue une analyse à posteriori des risques naturels afin de mieux capitaliser les connaissances pertinentes sur le phénomène étudié dans la zone concernée.

Dans cette palette d'approches des risques d'inondation ou de la détermination des zones inondables, la synthèse de la littérature loin d'être exhaustive, présente différentes méthodes. Ce sont entre autres, l'approche classique hydrologique et hydraulique, la méthode hydrogéomorphologique, la méthode inondabilité, pour ne citer que celles-ci. Les outils d'analyse spatiale des systèmes d'informations géographiques dans le contexte d'étude des risques d'inondation sont aussi abordés.

### 1.4.6.1 Méthode hydrogéomorphologique (HGM)

Initiée en France dès le début des années 1980, la méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables connaît sa première présentation en 1996 (J. L. Ballais et *al.*, 2011, p. 8). La méthode hydrogéomorphologique est une méthode complémentaire à l'approche hydraulique classique pour la détermination des zones inondables. Pour M. A. Lelièvre, T. B. Bélanger et F. Morneau (2008, p. 2), cette approche a été largement développée en France dans le cadre des Plans de prévention des risques d'inondation par le Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement en 1999. Selon les mêmes auteurs, cette méthode trouve également une équivalence dans la typologie des types de crues mise de l'avant aux États-Unis et le développement d'un cadre d'analyse pour les rivières australiennes.

C'est une méthode de cartographie des zones à risques d'inondation qui s'intéresse aux formes de la plaine alluviale révélant les crues passées mais susceptibles de se reproduire dans le futur. Elle consiste à délimiter trois unités morphologiques de la plaine alluviale : les lits mineurs, moyen et majeur. Ces éléments représentent les enveloppes morphologiques contenant les crues fréquentes, rares et exceptionnelles (**figure 12**).



**Figure 12** : Unités hydrogéomorphologiques (E. Masson et al., 1996)

C'est donc une méthode basée sur une démarche naturaliste mettant en évidence les différents lits des cours d'eau et les divers aménagements susceptibles de perturber les écoulements (J. L. Ballais et *al.*, 2011, p. 8). Elle favorise aussi la maîtrise des zones inondables ainsi que les valeurs approchées des paramètres physiques des inondations. Autrement dit, l'approche hydrogéomorphologique repose sur la reconnaissance des unités géomorphologiques non contestables, façonnées par les écoulements de surface et qui révèlent les limites spatiales ainsi que les mécanismes régulateurs des inondations potentielles.

Enfin, la méthode hydrogéomorphologique s'appuie sur l'interprétation stéréoscopique de photographies aériennes, sur des observations de terrain et l'utilisation des modèles numériques d'élévation à haute résolution spatiale.

#### **1.4.6.2 Méthode Inondabilité**

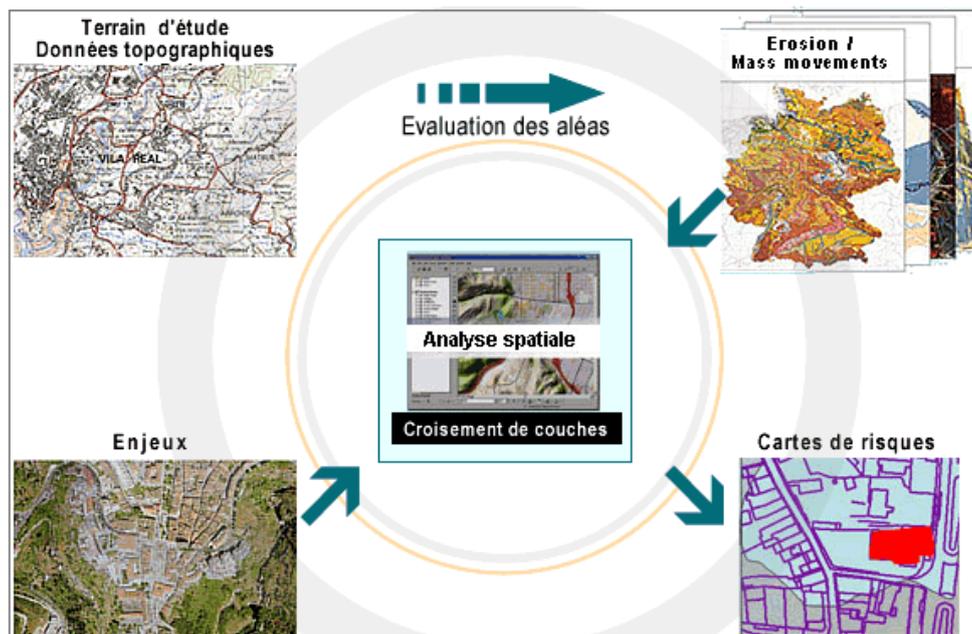
Selon M. Lang et *al.* (2009, p. 1), la méthode Inondabilité a été développée dans les années 1990 par le Cemagref pour disposer d'un outil d'évaluation du risque d'inondation à l'échelle du bassin versant et proposer un cadre de négociation sur la notion de risque acceptable. Elle repose sur l'idée d'exprimer aléa et vulnérabilité avec une même unité hydrologique, la période de retour. C'est par conséquent une méthode d'aménagement intégré du territoire à l'échelle du bassin versant pouvant apporter des réponses face au risque d'inondation. La méthode Inondabilité s'intéresse au continuum des crues possibles et repose sur la simulation du champ d'inondation de toute une famille d'événements hydrologiques (M. Lang et *al.*, 2009, p. 4). Avec comme référence la crue faible (période de retour  $T = 1$  an) aux crues moyennes et fortes ( $T = 10$  à  $100$  ans) jusqu'à la crue exceptionnelle (par exemple  $T = 1000$  ans). L'aléa représente la période de retour de l'événement. Il est alors possible de déterminer par interpolation spatiale, pour chaque point du territoire, la période de retour notée TAL (période de retour  $T$  de l'Aléa) de la première crue inondant par exemple (M. Lang et *al.*, 2009, p. 3).

Dans cette approche, la vulnérabilité est définie comme la période de retour associée à un niveau de protection souhaité. Elle indique ainsi la rareté de l'événement en deçà de laquelle l'inondation est considérée comme inacceptable et est notée TOP, pour la période de retour  $T$  de l'Objectif de Protection (M. Lang et *al.*, 2009, p. 3). Un des fondements de la méthode repose certes, sur une analyse du risque à travers le croisement de la vulnérabilité et l'aléa, mais surtout sur la base d'une définition indépendante et d'une comparaison objective de ces deux variables. Ainsi l'originalité de la méthode Inondabilité tient à la quantification de l'aléa et de la vulnérabilité en une même unité et une période de retour. Cela facilite une comparaison objective des deux grandeurs très différentes que sont l'aléa et la vulnérabilité (M. Lang et *al.*, 2009, p. 8).

Aussi, ces méthodes intègrent-elles dans leur analyse des outils de traitement et de cartographie basés sur l'utilisation des systèmes d'information géographique dont l'efficacité n'est plus à démontrer au vu de son emploi dans ce domaine assez complexe.

### 1.4.7 Systèmes d'information géographique (SIG) et risque d'inondation

Dans cette variété de méthodes, l'utilisation des Systèmes d'information géographique (SIG) et de la télédétection constitue un champ privilégié d'approche des risques naturels. Loin de faire une revue de littérature exhaustive sur la contribution des SIG à l'approche des risques naturels notamment les inondations, il faut retenir qu'un SIG comporte une série d'outils pour traiter l'information spatialisée. Comme avec n'importe quel outil, l'efficacité dépend du paradigme de départ. La boîte à outils permet de croiser des couches d'information de natures différentes suffisamment nombreuses, à une échelle pertinente, etc. La création de la banque de données est une étape très importante du SIG dans le cas d'une problématique complexe. Elle permettra de faire apparaître et d'illustrer des relations de cause à effet. L'aspect essentiel de cette méthode réside dans la mise en place de matricielles (couches de données) représentant les aléas, leurs degrés et les enjeux en présence. Leur croisement se fait à l'aide des fonctions d'analyse spatiale présentées dans les logiciels de systèmes d'informations géographiques (SIG) comme l'illustre la **figure 13**.



**Figure 13** : Principe des SIG appliqués à l'étude des risques naturels (<https://e.cours.univ-paris1.fr/modules/uved/risques-naturels/html/1/index.html>, Dumolard, Université de Grenoble, 2008)

C. Billot et al. (2003, p. 1-7) par exemple, à partir des fonctions d'analyses des logiciels SIG, mettent en place un outil qualitatif pour l'étude des risques d'inondation dans le bassin versant de l'Avançon, au sud du canton de Vaud (France).

À l'instar des auteurs précédents, D. A. Alla et A. Kangah (2013, p. 1-12) appliquent la même approche méthodologique en allant un peu plus loin. Ils associent également aux systèmes d'information géographique, le modèle numérique de terrain (MNT) pour déterminer les zones inondables, les niveaux d'inondation ainsi que les niveaux de risques dans le bassin-versant de Bonoumin-Palmeraie à Cocody dans la ville Abidjan.

De même, O. Dembélé et I. Ouattara (2019, p. 256-277) ont mis en place à partir des SIG un outil d'orientation des décideurs de la ville de Bamako dans les options d'aménagement pour une réduction des risques d'inondation dans les années à venir.

Quant à M. B. Saley et *al.* (2014, p. 170-191), ils associent aux systèmes d'informations géographiques des données de télédétection pour cartographier les zones à risques d'inondation dans le sud-ouest de la Côte d'Ivoire. De plus, à partir des systèmes d'informations géographiques, des scénarios et des modélisations sont mis en place dans le cadre d'étude prédictive et de gestion des risques naturels. C'est le cas du risque Natech d'inondation (E. H. Carine, 2013, p. 1). Le risque Natech relève d'un accident technologique induit par la manifestation d'un phénomène naturel comme l'inondation sur un site industriel.

En somme, les écrits exploités sur les risques d'inondation s'appuient de plus en plus sur de nouvelles techniques de traitement de données basées en partie sur le couplage de données (raster ou vectorielle) à l'aide des différents logiciels SIG. Ces données géographiques (vectorielles ou raster) sont issues des réalités du terrain et sont transformées en des variables ou couches superposables dans les logiciels à référence spatiale (**figure 13**). Par conséquent, les SIG facilitent toutes les mesures de gestion et de prévention des risques d'inondation. Ils constituent donc des outils de traitements et d'analyses des informations dont la performance n'est plus à démontrer dans le cadre d'études des risques naturels (inondations) comme le démontre l'abondance d'articles sur la question.

#### **1.4.8 Intérêt de la cartographie de l'occupation du sol**

L'analyse de l'occupation du sol permet de faire un état des lieux évolutif des ressources d'une surface, comparée à des données équivalentes antérieures (I. Diédhiou et *al.*, 2020, p. 8). Elle permet d'appréhender les changements de couvertures du sol et évaluer l'impact de ces changements sur les ressources naturelles (FAO et CCR, 2012, p. 14). L'occupation du sol se différencie de l'analyse de l'utilisation du sol qui établit un lien direct entre l'occupation du sol et l'activité des hommes dans leur environnement. C'est-à-dire l'utilisation des terres sous-

entend une dimension humaine ou un objectif d'exploitation de la terre (FAO et CCR, 2012, p. 15). A ce titre, la revue méthodologique montre que diverses méthodes (technique de régression d'image, ACP, NDVI, classification) existent pour mettre en évidence cette dynamique de l'occupation du sol par la détection des états de surface d'un espace notamment un bassin-versant. L'évolution des méthodes et des critères de classification par exemple se différencie dans le raffinement et la complexité, et la façon de catégoriser varie souvent d'un auteur à l'autre. En raison de ce qui précède, le choix d'une méthode pose donc des contraintes d'acquisition des données, de temporalité, d'échelle, de typologie d'images, sans toutefois oublier la complexité des différentes technologies d'utilisation.

Généralement, ces méthodes se fondent sur des étapes clés de traitement numériques à travers le déchiffrement des données satellitaires et de photographie aérienne. Ces données servent d'appui à l'interprétation des résultats finaux afin d'obtenir l'information désirée. Cela aboutit à l'extraction d'information cartographique de grande précision pour l'analyse de la dynamique de l'occupation du sol à l'aide des outils de synthèse des logiciels SIG.

De ce fait, les cartes décrivant l'occupation des sols constituent de puissants outils scientifiques et décisionnels faisant partie des cinq (5) Variables Climatiques Essentielles (VCE) hautement prioritaires identifiés par le Global Climate Observing System (GCOS) (C. Pelletier, 2017, p. 28). Par leur particularité informative, ces cartes guident et soutiennent également les travaux de recherches du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) sur les mesures d'adaptation et d'atténuation aux changements climatiques à travers le monde.

En conclusion, parmi ces nombreuses méthodes de traitements des images satellitaires pour l'analyse de l'occupation du sol, la méthode de la FAO et le CCR développé au cours du projet TREES-3, MONDE et FOREST semble beaucoup apprécier du fait de leur flexibilité et des résultats d'application. Selon A. Di Gregorio et J. M. Jansen (2000, p. 24) le système méthodologique développé par la FAO est pragmatique et sert au mieux un grand nombre d'utilisateurs. Il favorise la standardisation des normes et critères de traitement notamment pour le continent africain.

#### **1.4.9 Synthèse des travaux sur les risques d'inondation dans le bassin-versant du Sassandra**

Le bassin-versant du Sassandra a fait l'objet de nombreuses réflexions scientifiques. En ce qui concerne les risques d'inondation, la littérature existante semble stérile, car il est difficile de trouver des ouvrages ayant abordé cette thématique dans sa globalité.

Toutefois, V. M. Sorokoby (2013, p. 171-172) s'est penché sur le sous-bassin du Débo, une rivière et affluent de la rive Sud-est du Sassandra. Il a montré que les zones à forte vulnérabilité à l'inondation occupent 24,11 % de la surface de ce sous-bassin et sont situées à proximité des lits des affluents du Débo. Elles sont caractérisées par des pentes douces avec un drainage assez important correspondant aux plaines alluviales.

Par ailleurs, les écrits foisonnent en ce qui a trait à l'hydrologie dans toute sa dimension scientifique, mais aussi aux effets induits de la variabilité climatique sur les ressources hydriques de ce bassin-versant. Cela pourrait se justifier sans doute du fait de sa dimension transfrontalière et sous-régionale d'une part, et d'autre part à travers les potentialités diverses de ce cours d'eau dans un contexte d'instabilité des ressources.

De façon générale, les conclusions de certains travaux sur les effets de la variabilité climatique sur le système hydrologique de la Côte d'Ivoire révèlent des anomalies pluviométriques qui se sont répercutées sur les écoulements des cours d'eau (V. M. Sorokoby, 2013 ; p. 288 ; K. M. Kouassi, 2018, p. 135 ; A. M. Kouassi et *al.*, 2010, p. 3). Cela a provoqué une baisse considérable de leurs caractéristiques hydrologiques notamment les débits moyens annuels, les débits moyens journaliers maximums, les débits d'étiage, etc. D'autres ont plutôt révélé une réduction du potentiel de recharge de la nappe phréatique (K. T. Yao, 2009, p. 86 ; V. M. Sorokoby, 2013, p. 135).

Face à la persistance des effets de la variabilité climatique, V. M. Sorokoby (2013), dans ces travaux de thèse, a mis en évidence les potentialités en ressources en eau. En outre, la cartographie de l'aléa climatique du département de Soubré situé dans le bassin-versant du Sassandra a été mis en évidence. De même, avant les travaux de V. M. Sorokoby en 2013, K. T. Yao en 2009 a caractérisé la circulation des eaux souterraines dans cette même partie du bassin-versant du Sassandra et cela aux moyens des outils de la télédétection, de la géomorphologie et de l'hydrogéochimie.

Certaines études ont permis la connaissance de la répartition des paramètres physico-chimiques, ainsi que la détermination des dépressions et des processus d'érosion au fond de l'estuaire du fleuve Sassandra (Y. N'Guessan et *al.*, 2015, p. 161-171).

Quant aux études réalisées en 1995 sur le bassin du fleuve Sassandra, E. Servat et M. Sakho, elles ont mis en exergue une méthode d'évaluation des performances et des défaillances des aménagements dudit bassin dans un contexte d'instabilité des ressources hydriques. Cette situation est due en partie par la réduction de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest selon ces mêmes auteurs. Cette étude a eu pour objectif d'envisager une nouvelle démarche en matière de planification des aménagements et de gestion de la ressource.

En somme, la présente revue de la littérature, loin d'être exhaustive a permis de parcourir plusieurs ouvrages, publications, et articles en rapport avec le thème d'étude. Ces écrits scientifiques ont abordé les questions de l'impact et de l'influence des barrages notamment sur le milieu physique et le plan humain. Ces questions ont été appréhendées sous un angle plus critique péjorativement pour certains et d'autres de façon positive globalement.

Aussi, certains écrits ont-ils analysé la question des crues et inondations mais surtout des risques liés au barrage. Si ces questions constituent des préoccupations scientifiques, pour bon nombre de pays d'Afrique de l'Ouest, notamment le Bénin, le Togo, le Sénégal et le Burkina Faso pour ne citer que ceux-ci, il n'en demeure pas véritablement le cas pour la Côte d'Ivoire. Les différentes approches des risques d'inondation et de l'analyse des crues ont été aussi abordé dans cette revue de la littérature.

Il ressort que la littérature fait preuve de stérilité sur la question des ouvrages accordant leur regard scientifique à cette question d'intérêt sécuritaire dans ce contexte alarmant des effets du changement climatique. D'ailleurs, c'est ce que fait remarquer N. H. Mélédje et *al.* (2015, p. 187), quand ils soulignent que le manque d'études sur les tendances climatiques et les prévisions hydrologiques ne permet pas aux gestionnaires des barrages d'anticiper les problèmes environnementaux tels que les inondations en aval de certains barrages en Côte d'Ivoire. À sa suite, le rapport du CIMA Research Foundation sur les consultations nationales d'intégration des risques d'inondation dans les planifications nationales fait écho de peu de données de recherches sur les risques d'inondation en Côte d'Ivoire (2021, p. 20). C'est pourquoi, cette présente étude se justifie comme une contribution notable sur les risques d'inondation dans les bassins-versants anthropisés, particulièrement dans le bassin-versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré dans le Sud-ouest de la Côte d'Ivoire.

De ce qui précède, il se dégage la problématique de la caractérisation des crues et de risque d'inondation à l'intérieur du bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré. En d'autres termes, il s'agit d'évaluer le risque d'inondation fluvial et la dynamique hydropluviométrique du bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré.

## **1.5. Problématique**

L'ampleur des problèmes climatiques et hydrologiques dans le monde a suscité de nombreuses inquiétudes qui ont favorisé depuis des décennies d'importantes réflexions scientifiques à travers des rencontres, colloques, ateliers, projets, etc. De nombreuses études se sont alors consacrées aux répercussions générales de l'évolution du climat, surtout en Afrique de l'Ouest. Dans l'ensemble, certaines études et recherches ont montré une tendance de l'impact de la variabilité du climat sur le système hydrologique et pluviométrique ouest africain (G. Mahé et J. C. Olivry, 1995, p. 109-117 ; E. Servat et *al.*, 1996, p. 835-838 ; G. Mahé 1993, J. C. Olivry et E. Servat, 2005, p. 169-176 ; A. M. Kouassi et *al.*, 2010, p. 1-27 ; S. Ardoin et *al.*, 2005, p. 195-202 ; E. Amoussou, P. Camberlin et G. Mahé, 2012, p. 805-817 ; C. Faye, 2018, p. 1-22).

D'après le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2007, p. 9), les effets du dérèglement hydrologique sur la planète entière sont considérables à tous les niveaux : économie, agriculture, santé, eau, etc. Les prévisions révèlent un risque croissant des événements extrêmes tels que les excès de pluie, entraînant souvent des débordements catastrophiques de fleuves et rivières ou des hausses de température inattendues, donc de fortes chaleurs (GIEC, 2007, p. 9). Ainsi, l'occurrence de ces phénomènes extrêmes tels que les fortes précipitations couplées aux actions anthropiques a fait de l'Afrique de l'Ouest l'une des zones les plus vulnérables au changement climatique (A. Faye, 2019, p.8). Dans ce contexte, une étude réalisée dans 189 pays par le Groupe de la Banque Mondiale sur le Changement Climatique et le Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR) révèle que 587 millions de personnes sont exposées à un risque d'inondation dont 171 millions en Afrique subsaharienne et 132 millions en situation d'extrême pauvreté (J. Rentschler et M. Salhab, 2020, p. 2).

En effet, les populations pauvres et déjà affaiblies sont la plupart du temps les premières victimes de ces catastrophes. C'est pourquoi, face à une croissance du nombre d'événements au cours de ces dernières décennies, celui des personnes affectées augmente également. Par conséquent, de 2000 à 2016, plus de 220 millions de personnes ont été affectées par les

catastrophes naturelles et plus de 92 000 y ont trouvé la mort. (EM-DAT, 2016, consulté en ligne, octobre 2018, [www.emdat.be](http://www.emdat.be))

À l’instar de la plupart des pays d’Afrique de l’Ouest, en zone intertropicale, la Côte d’Ivoire n’est pas épargnée par la survenance de ces phénomènes hydroclimatiques. En effet, l’ensemble de son système hydrologique et pluviométrique subit de façon imprévisible les conséquences induites par les effets de la variabilité des aléas du climat à telle enseigne qu’aucune année n’y échappe. (A. M. Kouassi *et al.*, 2010, p. 3 ; V. M. Sorokoby, 2013, p. 288 ; K. Martin, 2018, p. 135). Cette variation des conditions hydropluviométriques est confortée par les incertitudes du climat à l’échelle régionale, mais aussi par les effets des actions anthropiques au niveau local.

À titre d’illustration, en octobre et novembre 2010 et 2011, et en juillet 2018, les crues de la Bia, un important fleuve transfrontalier Côte d’Ivoire-Ghana, ont occasionné des inondations de grandes ampleurs. Les conséquences de ces inondations se traduisent par des destructions de plantations à l’aval des barrages hydroélectriques d’Ayamé 1 et 2, les plus anciens barrages de la Côte d’Ivoire (N. H. Mélédje *et al.*, 2015, p.187 ; L. A. N’Cho, 2022, p.127-129). De même, en septembre 2018, dans la ville d’Agboville, la crue du fleuve Agnéby a provoqué une inondation entraînant le déplacement de près de 150 familles sinistrées. Au Centre-Ouest en septembre 2018, le fleuve Bandama est sorti de son lit et a inondé plusieurs localités riveraines, en particulier dans les villes de Bouaflé et de Zuénoula. En septembre 2019, une crue du fleuve Sassandra dans la zone du barrage de Soubré a poussé les autorités régionales et CI-Énergies à produire un communiqué d’alerte et de vigilance sur le risque d’inondation découlant de cette crue.

Selon un rapport du CIMA Research Foundation (2021, p. 18), en 2018, les inondations en Côte d’Ivoire ont touché près de 3115 familles et causé 34 décès. L’année suivante en 2019, ce sont près de 12000 personnes touchées et plusieurs dégâts matériels dont 202 maisons submergées par les crues de cours d’eau et 72 habitations complètement détruites toujours selon le même rapport de CIMA Research Foundation. Dans ce même contexte, une estimation du Bureau des Nations Unies pour la Stratégie Internationale de prévention des Catastrophes - United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR, 2018, p. 12), réalisée à partir de données climatiques satellitaires a montré que les inondations ont un impact considérable sur la population de la Côte d’Ivoire et toucheraient environ 60 000 personnes par an, soit environ 0,3 % de la population totale du pays. Ainsi, les personnes les plus touchées par les inondations en Côte d’Ivoire sont dans les zones côtières et Sud-ouest, aussi bien dans

le scénario du climat actuel que celui du contexte d'un climat futur, avec une tendance semble plus marquée dans la partie Sud-ouest.

Au regard, de la manifestation de ces événements hydroclimatiques extrêmes (inondations) qui accroissent sa vulnérabilité, la Côte d'Ivoire a adopté un Plan National de Réduction des Risques et Catastrophes naturelles (Plan RCC 2016-2020), actualisé dans la Stratégie Nationale de Réduction des Risques et Catastrophes (SN-RRC 2020-2030). Cette stratégie nationale sert de cadre pour la mise en œuvre des dispositions du Cadre d'action de Sendai 2015-2030 dont le pays est signataire. Ce cadre d'action préconise l'intégration des risques et catastrophes naturelles telles que les inondations dans les politiques et programmes de développement des pays engagés en vue de la réduction des conditions d'exposition croissante des populations et leur patrimoine.

Cependant force est de constater que cela n'est pas encore le cas dans la planification et l'aménagement du territoire en Côte d'Ivoire. Cela se constate par le faible niveau de perception des risques éventuels et par les réponses déficientes menées çà et là dans le cadre de la gestion des situations de crises liées à ces phénomènes naturels, surtout les inondations (pluviales et fluviales). Toutes ces faiblesses dans la prévention et la gestion des risques de catastrophes naturelles pourraient s'expliquer par l'insuffisance de travaux en lien avec la problématique des risques naturels, notamment la gestion anticipative des crues des cours d'eau et des risques d'inondation qui en découlent.

Pourtant, la Côte d'Ivoire dispose d'un réseau dense de cours d'eau, de plans d'eau (lacs de barrages) et d'une côte maritime d'environ 600 km de long (M. Gbêgbé et *al.*, 2019, p. 2). Ces nombreux cours et plans d'eaux naturels drainent des bassins-versants très importants et offrent des potentialités pour l'agriculture, le développement de projets touristiques, hydrauliques ou hydroélectriques (OMM, 2009, p. 6). Ainsi, la Côte d'Ivoire possède deux barrages hydroélectriques dans le bassin-versant de la Bia (Ayamé 1 et 2), deux barrages hydroélectriques dans le bassin-versant du Bandama (Kossou et Taabo) et trois dans le bassin-versant du fleuve Sassandra (Soubré, Buyo et Gribo-Popoli).

C'est le cas précis du bassin-versant du fleuve Sassandra qui nous intéresse dans cette étude. Depuis les années 1980, ce bassin-versant qui draine une superficie d'environ 62 000 km<sup>2</sup> dans la région de Soubré (H. Camus, 1969, p. 30), au Sud-Ouest du pays, fait l'objet de nombreux aménagements hydroélectriques.

Ces nombreux projets d'aménagement des bassins interagissent entre eux, avec les ouvrages en construction et avec la ressource eau. Ils occasionnent une nouvelle dynamique de l'espace et du système hydrologique naturel des bassins-versants fluviaux, créant ainsi une exposition de ces bassins fluviaux aux risques de crue et inondation fluviale.

Selon J. Rentschler et M. Salhab (2020, p. 3), 29 % de la population mondiale est exposée à une crue centennale à risque. Cela représente une probabilité de survenance de 1 % sur 10 ans ou de 50 % sur une vie de 68 ans. Pour plus de la moitié d'entre elles, la hauteur des crues pourrait atteindre des niveaux potentiellement mortels plus élevés, en particulier pour les enfants et les personnes en situation de handicap.

Dès lors, les ambitions de la présente étude sur « *Crues et risques d'inondation dans le bassin-versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré* » sont multiples. Il s'agit, d'une part, d'apporter une contribution aux travaux de recherche sur les risques d'inondation à l'échelle des bassins aménagés et, d'autre part, de proposer des mesures de protection des populations et de leurs patrimoines contre la récurrence des aléas d'inondation dans une société sans cesse vulnérable. De plus, cette étude vise à aider les décideurs à intégrer la connaissance et la gestion des risques d'inondation fluviale dans les prises de décision.

De tout ce qui précède, la question principale qui attire notre attention sur le bassin-versant du Sassandra à l'exutoire de Soubré est : les crues du fleuve Sassandra occasionnent-elles des inondations dans sa section aménagée à l'exutoire de Soubré ? En d'autres termes, comment se présente le risque d'inondation fluviale dans le bassin-versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré ? Pour répondre à cette principale interrogation, quatre questions subsidiaires méritent d'être posées.

- Comment se présente l'évolution spatio-temporelle des conditions physiques dans le bassin-versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré ?
- Quelle est la dynamique d'évolution des facteurs pluviohydrologiques de crues et d'inondation dans le bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré ?
- Quels sont les niveaux de risque d'inondation fluviale dans le bassin aménagé du fleuve Sassandra à Soubré ?
- Quelles sont les conséquences des inondations et les stratégies pour une gestion durable du risque d'inondation dans le bassin aménagé de Soubré ?

La réflexion liée à ce sujet s'est réalisée à travers la définition d'objectifs de travail dont la finalité est d'apporter des réponses spécifiques aux différentes interrogations soulevées ci-haut.

## **1.6. Objectifs de la recherche**

Cette thèse a pour objectif général de caractériser les crues et les facteurs de risque afin de proposer des outils de gestion durable et préventive du risque d'inondation fluviale dans le bassin-versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré. Pour atteindre cet objectif général, quatre objectifs spécifiques sont définis comme suit :

- Étudier l'évolution spatio-temporelle des conditions physiques du bassin-versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré.
- Analyser la dynamique d'évolution des facteurs de crues et d'inondation dans le bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré.
- Évaluer les niveaux de risque d'inondation fluviale dans le bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré à travers les aléas et la vulnérabilité des enjeux en présence.
- Proposer des stratégies pour une gestion durable du risque d'inondation dans le bassin-versant aménagé de Soubré.

## **Conclusion partielle**

Cette partie consacrée à la clarification des mots et concepts employés dans cette étude a permis de contextualiser le cadre théorique de l'étude. Quant à la revue de la littérature, elle a permis de s'imprégner des travaux scientifiques déjà effectués dans la zone d'étude, mais surtout d'en connaître les limites donnant une justification au présent sujet de recherche. La problématique et les objectifs, en même temps qu'ils soulèvent les préoccupations de cette étude, retracent ses orientations.

Le chapitre suivant aborde les caractéristiques physiques et humaines du bassin-versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré.

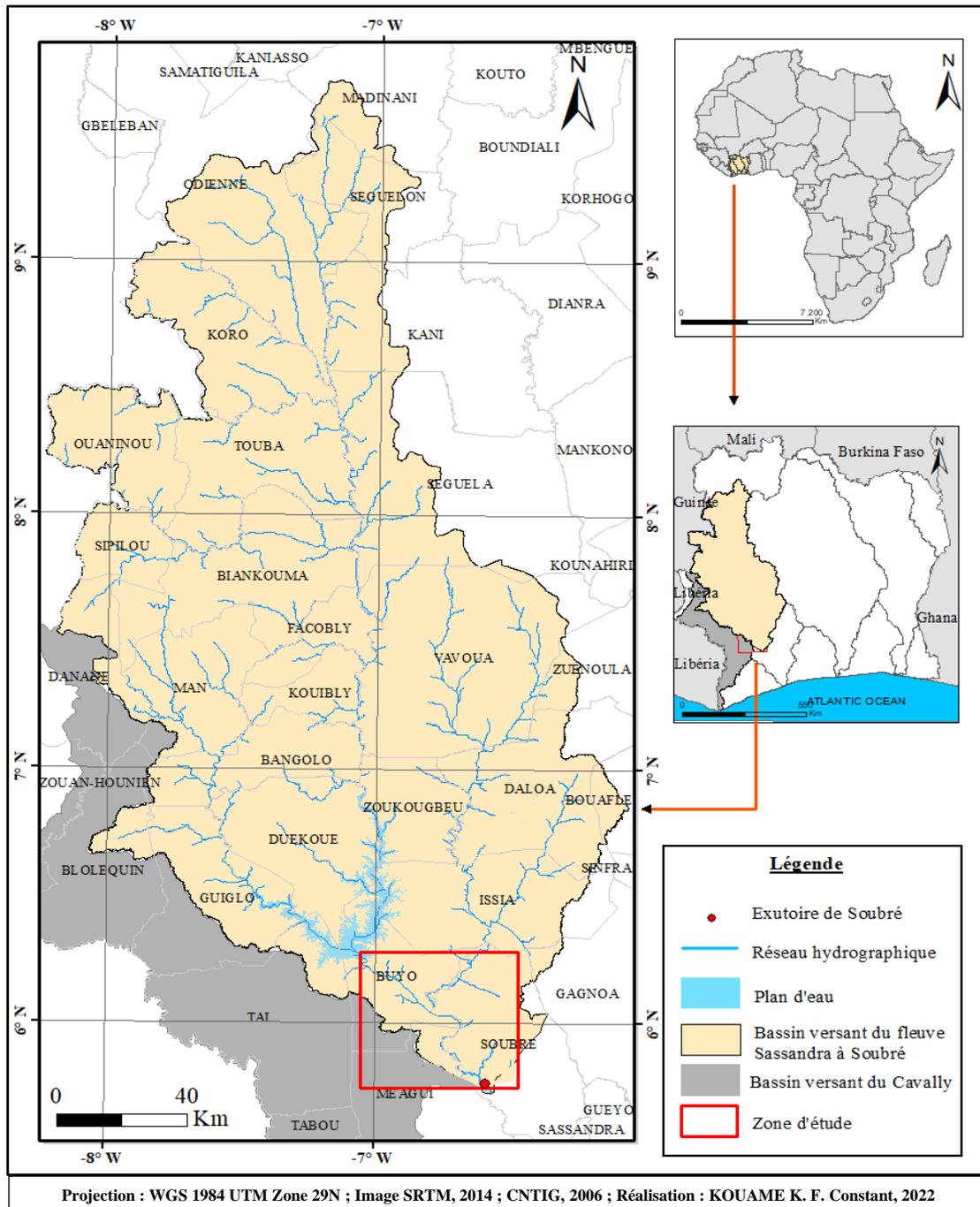
## **CHAPITRE 2 : CONTEXTES PHYSIQUE ET HUMAIN DU BASSIN-VERSANT AMÉNAGÉ DU SASSANDRA À L'EXUTOIRE DE SOUBRÉ**

Ce chapitre présente les caractéristiques physiques et humaines du bassin-versant aménagé duassandra à l'exutoire de Soubré. Ces caractéristiques du milieu favorisent la réalisation de diverses activités anthropiques notamment la pratique d'activités agricoles, la construction de barrages. À cet effet, le processus de réalisation des ouvrages des barrages de Buyo et Soubré sera également décrit. Mais, avant tout cela, la présentation de tout le bassin-versant qui inclut le secteur d'étude est indispensable pour mieux situer l'hydrosystème, facteur de prédisposition du risque d'inondation fluviale.

### **2.1 Situation géographique du bassin-versant du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré**

Le grand bassin-versant du fleuve Sassandra est situé dans la zone Ouest de l'Afrique. Il est partagé entre la Guinée et la Côte d'Ivoire où se trouve la plus grande partie. Cette partie du bassin-versant du fleuve Sassandra s'étend du Nord au Sud dans l'Ouest ivoirien, entre les coordonnées 9°45' et 4°55' latitude Nord et longitude 8°45' et 5°45' Ouest (figure 14). Le Sassandra prend sa source dans la dorsale guinéenne (ou massif Fouta Djallon), au Sud-est de Beyla, au Nord-ouest des Monts Tetini, vers 700 mètres d'altitude (H. Camus, 1969, p. 10). Ce fleuve fait partie des quatre grands cours d'eau de la Côte d'Ivoire. Il totalise une longueur de 840 km avant de se jeter dans le Golfe de Guinée, et draine près de 75 000 km<sup>2</sup> de superficie (H. Camus, 1969, p. 10), dont 62 000 km<sup>2</sup> pour la Côte d'Ivoire, ce qui représente environ 20 % du territoire de la Côte d'Ivoire.

Le bassin-versant du fleuve Sassandra à Soubré est limité par le bassin versant du fleuve Niger au Nord, à l'Est par les bassins du Bandama et du Niouniourou, à l'Ouest par les bassins du Cavally et du San-Pedro et au Sud par le bassin du Sassandra à Gaoulou (**figure 14**).



**Figure 14 :** Situation géographique du bassin versant du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré

Aussi, le bassin-versant du Sassandra couvre en grande partie, depuis la frontière de la Guinée forestière jusqu'à l'océan Atlantique, les régions d'Odienné, Touba, Séguéla, Man, Guiglo, Duekoué, Vavoua, Daloa, Gagnoa, Soubré et enfin Sassandra, la ville qui porte son nom. Également, dans la zone de Soubré se trouve l'un des exutoires du fleuve Sassandra (figure 14). À cet exutoire, il présente la superficie la plus importante à savoir 62 000 km<sup>2</sup> et recouvre l'ensemble des sous-bassins du N'Zo, du Lobo, du Boa et du Bafing. Le bassin du Sassandra à l'exutoire de Soubré représente près de 80 % de la superficie totale du bassin

versant fluvial du Sassandra. L'autre particularité de cette zone du bassin, c'est qu'elle regorge des potentialités hydroélectriques et agricoles. Ainsi, y sont aménagés deux (2) des six (6) barrages hydroélectriques de la Côte d'Ivoire. Ce sont les barrages de Buyo et Soubré construits respectivement en 1980 et 2018. Le second se trouvant en aval du premier à près de 70 km à vol d'oiseau.

Notre zone d'intérêt est la zone encadrée et contient les deux barrages hydroélectriques (Buyo et Soubré) du fleuve Sassandra (figure 14). Cette zone sera admise comme la « *zone aménagée du bassin-versant du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré* », notre espace d'étude. Elle représente environ 5000 km<sup>2</sup> soit environ 8 % du bassin-versant du Sassandra à l'exutoire de Soubré.

## **2.2 Caractéristiques physiques du bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré**

### **2.2.1 Relief et morphologie du bassin-versant aménagé**

Le relief est le résultat d'une conjugaison de plusieurs facteurs et particulièrement par l'évolution géologique et l'action de l'érosion à une grande échelle. Il est l'un des facteurs clés contrôlant la réponse hydrologique d'un bassin-versant. Les pentes et la topographie influencent à la fois les vitesses et les puissances spécifiques des écoulements ainsi que le temps de réponse hydrologique (D. Koumassi, 2014, p. 76). Il constitue donc un facteur de prédisposition naturelle de la manifestation des risques d'inondation dans un milieu donné.

Dans la partie aménagée (**figure 15**) du bassin du Sassandra, de la zone de Buyo à l'exutoire de Soubré, le relief revêt la forme d'une vaste pédiplaine ondulée s'inclinant graduellement d'une altitude moyenne de 200 mètres. Cette zone insensiblement inclinée vers le Sud est largement entaillée par les cours d'eau Hana, Sassandra et Lobo. Ce glacis méridional de la vieille plate-forme africaine est formé de surfaces granitiques à l'Est et à l'Ouest et de surfaces schisteuses dans la région de Buyo (K.T. Yao, 2009, p. 46).

La partie Nord-ouest de l'exutoire de Soubré présente une série de basses collines appelées les monts Kourabahi autour de la localité de Obrouayo. Aussi, le bassin-versant du Sassandra comporte-t-il un bassin sédimentaire côtier au Sud au niveau de son embouchure sur l'océan Atlantique. Ainsi, qu'en est-il du réseau hydrographique spécifique à cette disposition du relief ?

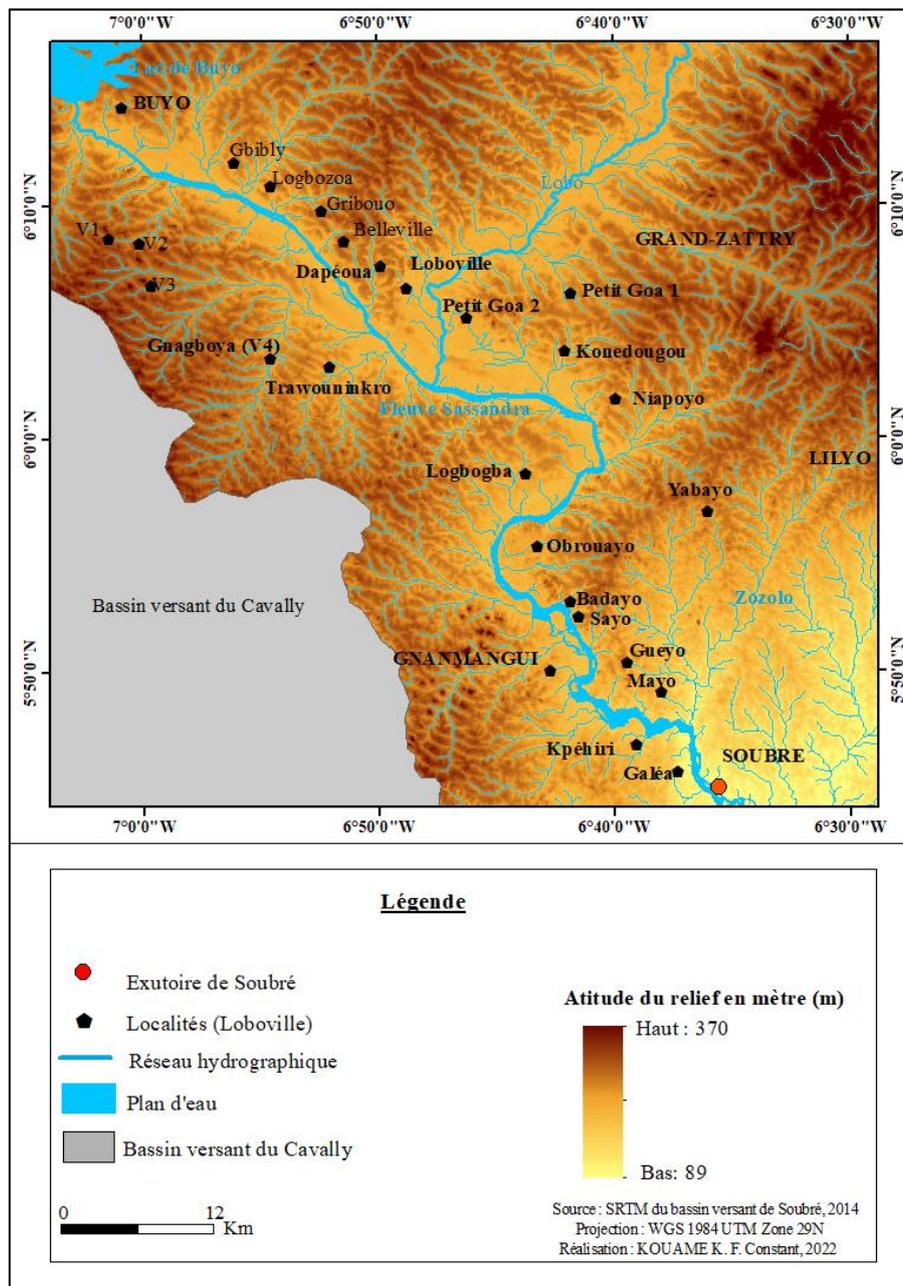


Figure 15 : Relief de la zone aménagée du bassin versant du Sassandra à l'exutoire de Soubré

### 2.2.2 Réseau hydrographique du bassin-versant aménagé

Les conditions climatiques spécifiques et la présence d'un relief élevé au Nord-ouest du confèrent au bassin du Sassandra un réseau hydrographique dense. Le fleuve Sassandra prend sa source en Guinée à la confluence du système Boa / Sien / Tiemba, au Nord de Touba (K. T. Yao, 2009, p. 46). S'écoulant plein Sud sur environ 200 km, il reçoit respectivement en rive droite l'affluent Bafing qui vient de Guinée, et N'Zo drainant les régions montagneuses de Man et Guiglo. La pente moyenne sur ce bief est de 0,04 %. Depuis la construction du barrage de Buyo, le lac de retenue envoie la confluence du Sassandra et du N'Zo et étend ses bras le long

de ces deux vallées (P. Y. Bourgin et M. Riffard-Chenet, 2015, p. 3). Le Lobo à l'aval de Buyo et le Davo à quelques kilomètres avant son embouchure constituent les principaux grands affluents du fleuve Sassandra en rive gauche.

Dans la zone aménagée à l'aval du barrage de Buyo, jusqu'à l'exutoire de Soubré, la zone est drainée par un réseau de cours d'eau particulièrement important. Le fleuve Sassandra reçoit à ce niveau comme affluent respectivement en rive droite le Zakué, le Gue et le Nairo, et en rive gauche, le Lobo et le Zozoro (**figure 16**).

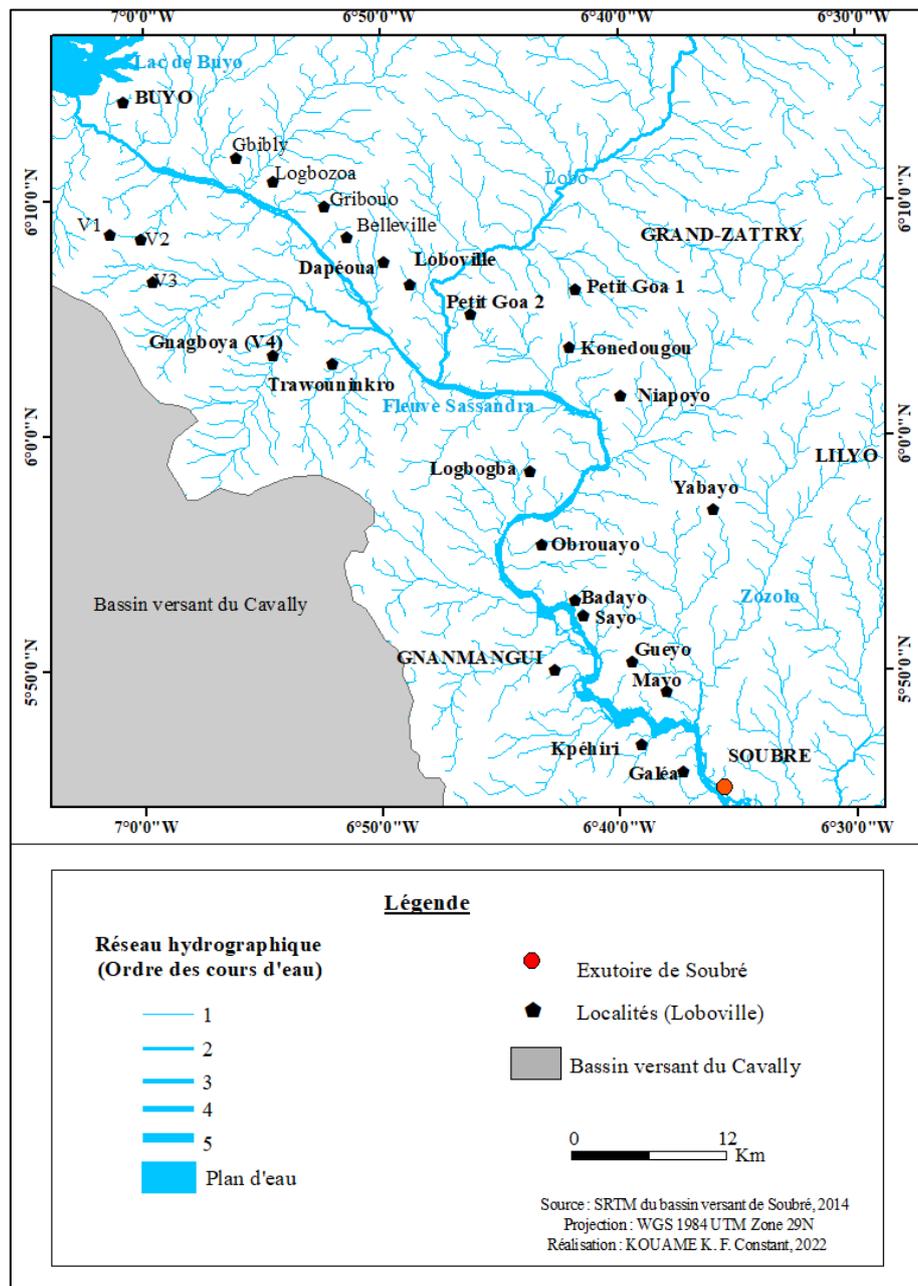
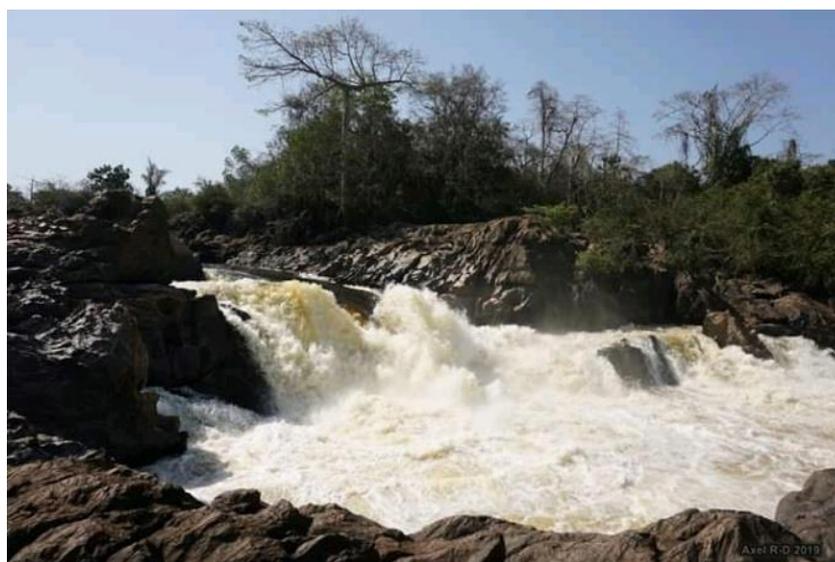


Figure 16 : Réseau hydrographique de la zone aménagée du bassin versant du Sassandra à Soubré

Pour le reste, la pente moyenne de ce fleuve est de 0,5 m par kilomètre (K. T. Yao, 2009, p. 46). Son profil a un aspect heurté, en marches d'escalier, avec de nombreuses portions en pente forte liées aux rapides qui accidentent son cours sinueux jusqu'à l'embouchure. La pente se redresse dans la zone de Soubré où le lit s'encombre de nombreuses îles. Plusieurs rapides se succèdent jusqu'à l'embouchure, à l'instar des chutes de la Nawa à Soubré, comme l'illustre la **photo 1**.



*Photo 1: Chutes pittoresques du Nawa dans la zone de Soubré  
(Source cliché : Kouamé K., mars 2020)*

En somme, à son exutoire à Soubré, le fleuve Sassandra totalise une longueur estimée à 650 km environ et un bassin-versant d'une superficie de 62 000 km<sup>2</sup> drainé par de nombreux affluents avec une pente moyenne de 0,85 % (**tableau 1**).

*Tableau 1 : Quelques caractéristiques des principaux affluents du Sassandra à son exutoire à Soubré*

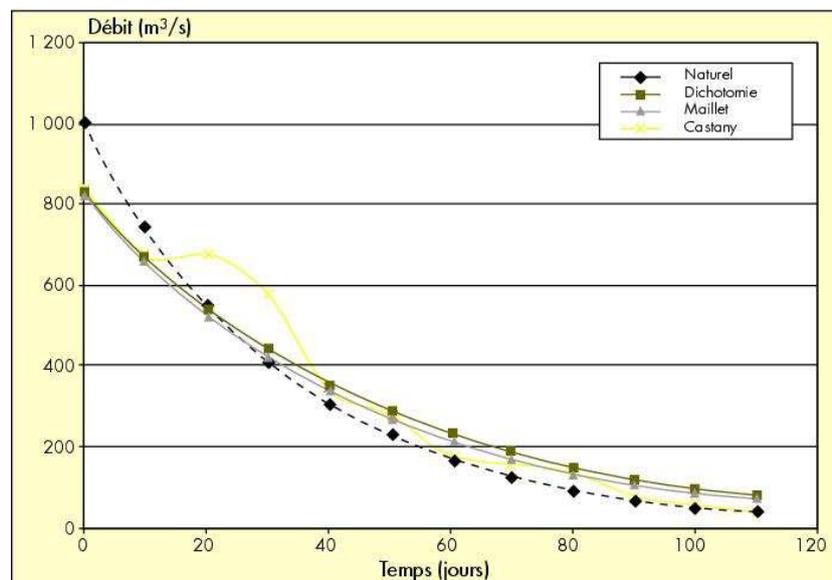
Fleuve	Affluents et leurs longueurs	
	Rive droite	Rive gauche
<b>Sassandra (840 km)</b>	- Bafing (280 km)	- Boa (180 km)
	- N'Zo (255 km)	- Lobo (290 km)

*Source : Extrait de H. Camus, 1969, p.5*

### 2.2.3 Régime et caractéristiques hydrologiques du bassin-versant aménagé à Soubré

D'une façon générale, le régime des rivières est irrégulier dans le bassin-versant du Sassandra. En période de pluie, les débits sont forts et parfois les crues sont importantes (K. T. Yao, 2009, p. 48). Les débits moyens du Sassandra ont été calculés sur les 30 dernières années. On note environ  $310 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  lorsqu'il pénètre dans la région en aval du lac de retenue de Buyo,  $350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  à la station de Soubré et environ  $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  à l'embouchure au niveau de la zone de Sassandra (K. T. Yao, 2009, p. 48). Tout ceci démontre la densité assez importante du débit de ce cours d'eau sur tout son parcours jusqu'à l'embouchure.

En ce qui concerne l'évolution de tarissement, la recherche documentaire fournit une étude sur la courbe de tarissement du fleuve Sassandra à Piebly, au nord du lac de Buyo (**figure 17**).



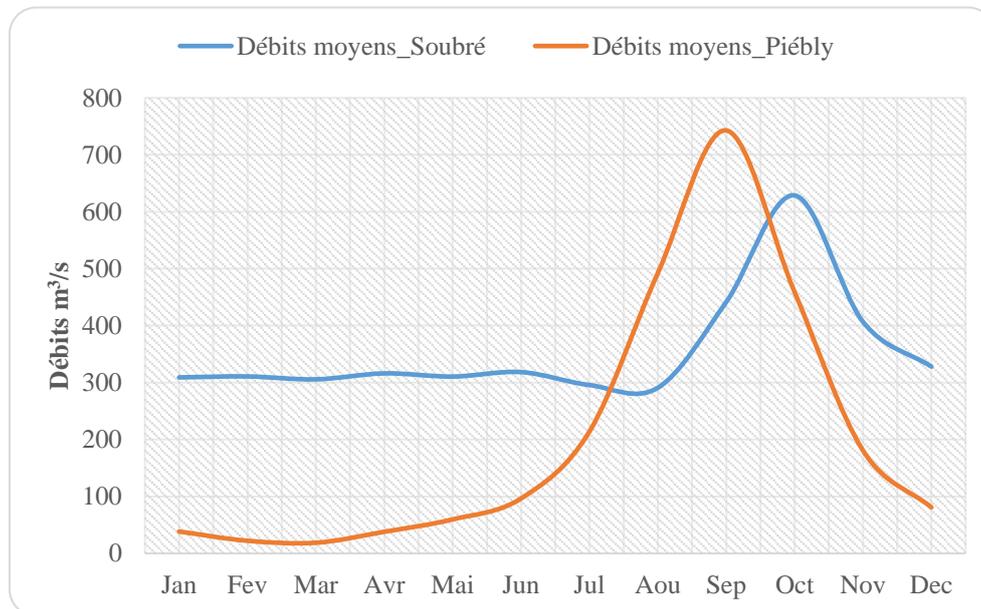
**Figure 17 :** Courbes de tarissement calculées et observées (naturelle) du fleuve Sassandra à Piebly en 1993 établie par Savané et al., 2003

Le village de Piebly (Latitude :  $7,257$  ou en DMS  $7^{\circ}15'25$  N, Longitude :  $-7,065$  ou en DMS  $7^{\circ}3'55$  W) est situé à 205 mètres d'altitude dans la Région du Haut-Sassandra. Cette courbe établie en 2003 par Savané et al., présente une allure de tarissement moyen à long, d'une durée de 100 jours. Elle a été tracée selon trois méthodes, celles de Castany, de Maillet, et celle par dichotomie (K. T. Yao, 2009, p. 48).

Après la comparaison des différentes courbes sur un même graphe avec la courbe des débits mesurés à Piebly, il a été conclu que les trois courbes épousent correctement le débit observé. Cette courbe moyenne est liée à une reprise des précipitations précédant le tarissement.

La durée du régime non influencé se trouve raccourcie en raison de la diversité des climats affectant le bassin-versant drainé par l'exutoire de Piebly (climat de montagne à l'Ouest et climat soudanien au Nord). Tout cela justifie une influence nette des précipitations sur le régime du Sassandra. En effet, le fleuve Sassandra est influencé par quatre régimes hydrologiques : le régime tropical de transition au Nord du bassin versant, le régime équatorial de transition au Sud, le régime équatorial de transition atténué au Centre et le régime de montagnes à l'Ouest.

Pour ce qui est de la zone aménagée, un débit journalier de  $2196 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  a été observé en 2016 en octobre sur une période de 39 ans (1980-2019) à la station hydrométrique de la ville de Soubré. De même, les débits moyens mensuels interannuels les plus élevés obtenus sont de  $629 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (octobre) à Soubré et  $743 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  à Piebly en septembre (**figure 18**).



**Figure 18** : Courbe des débits mensuels (en  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ) du fleuve Sassandra à la station de Soubré sur la période 1980-2019

#### 2.2.4 Caractéristiques climatiques de la zone aménagée à l'exutoire de Soubré

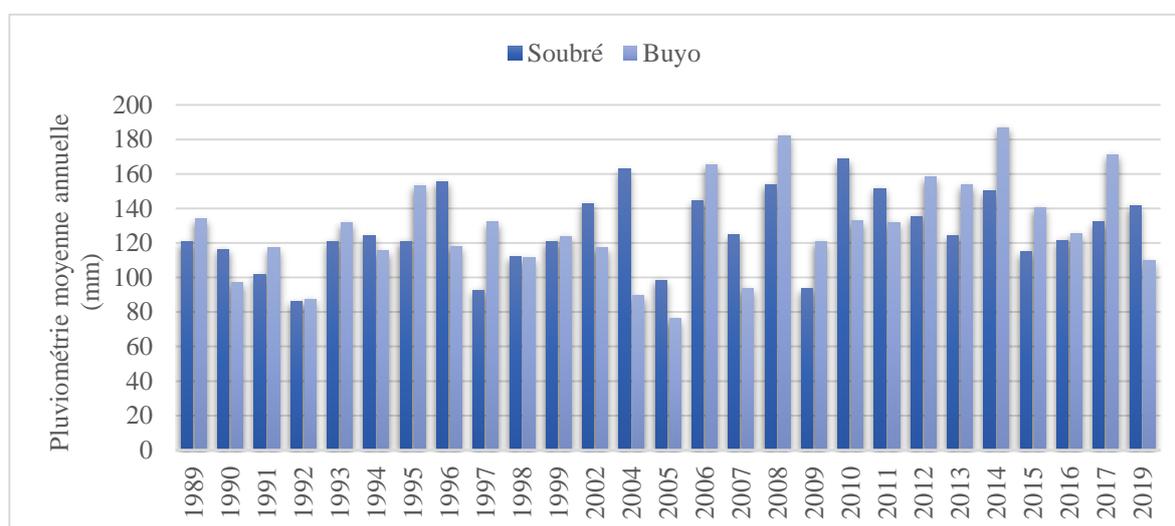
Les conditions climatiques jouent un rôle important dans le régime d'un cours d'eau, mais surtout en ce qui concerne les précipitations génératrices des crues. En Côte d'Ivoire, la classification des régimes climatiques correspond à celle des différents régimes pluviométriques liés à l'abondance des précipitations et à leur répartition spatio-temporelle. Celle-ci s'est faite également en correspondance avec les types de végétations rencontrées (M. Eldin, 1978, p. 20). Le bassin-versant du Sassandra est soumis à différentes influences

climatiques. Du Nord au Sud, de l'Est à l'Ouest, on observe différentes variations de saisons et des facteurs climatiques dont la température et les précipitations.

Ainsi, la zone aménagée du bassin-versant du Sassandra à l'exutoire de Soubré est caractérisée par un régime subéquatorial (P. Y. Bourgin et M. R. Chenet, 2015, p. 3). Une première saison des pluies est observée de mars à juin, suivie d'un ralentissement entre juillet et août et enfin d'une seconde saison des pluies de septembre à octobre. La saison sèche, entre novembre et février est assez bien marquée.

#### 2.2.4.1 Pluviométrie générale dans le bassin aménagé à l'exutoire de Soubré

La **figure 19** présente l'évolution des précipitations annuelles dans la zone objet de cette étude à travers les données recueillies aux stations de Soubré et Buyo.

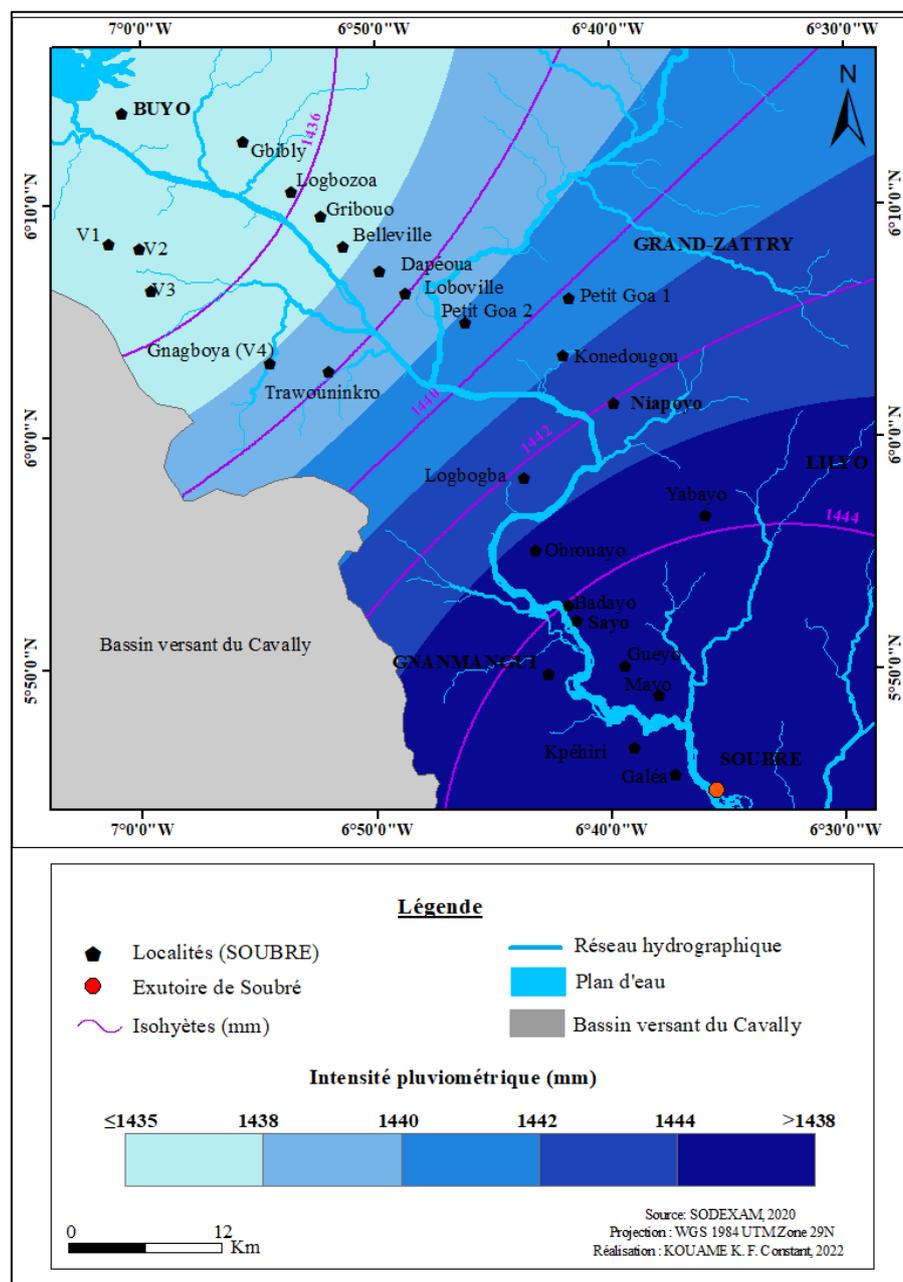


**Figure 19** : Pluviométrie annuelle sur la chronique 1989-2019 aux stations de Soubré et Buyo dans le bassin aménagé de Soubré.

À l'instar de toute la zone équatoriale de transition du Sud-ouest, la zone subéquatoriale (zone aménagée du Sassandra à l'exutoire de Soubré) est caractérisée par l'alternance de deux saisons des pluies et de deux saisons sèches. Dans cette partie du bassin (zone de Soubré), la pluviométrie annuelle oscille selon l'année et le lieu entre 1 400 mm et 1 600 mm. La pluviométrie moyenne annuelle est de 1455 mm à la station météorologique de Soubré et de 1661 mm à celle de Buyo. L'analyse des valeurs mensuelles des précipitations à ces deux stations météorologiques (1989-2019) montre que celles de Buyo dépassent celles de Soubré au cours des saisons pluvieuses et le rapport s'inverse pendant les saisons sèches. Le déficit hydrique cumulé varie de 150 à 250 mm.

### 2.2.4.2 Répartition des pluies dans le bassin aménagé de Soubré

La zone du Sud-ouest de la Côte d'Ivoire est sous l'influence des grosses pluies qui tombent dans la région du bassin aménagé de Soubré chaque année. En effet, pendant les périodes de pluies, les plus importantes quantités sont enregistrées durant les mois de juin et octobre. Les hauteurs pluviométriques moyennes cumulées dépassent très souvent les 1400 mm au niveau des deux postes de Buyo et Soubré sur la période 1989 - 2019. La **figure 20** présente l'intensité pluviométrique sur la base des précipitations mensuelles cumulées annuellement au niveau de la station de Soubré sur la période 1989-2019.



**Figure 20** : Répartition des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant aménagé à Soubré sur la période 1989-2019

La moyenne pluviométrique mensuelle oscille autour de 125 mm. Les précipitations croissent à partir de la fin du mois de mars et restent constantes au-dessus de la moyenne entre les mois d'avril (159,32 mm), mai (161,70 mm) et juin (223,32 mm) avant de baisser en juillet. Elles reprennent au-dessus de la normale pendant les mois d'août et d'octobre (186 mm) avant de fléchir jusqu'à fin mars (121 mm). Les événements pluvieux mensuels atteignent facilement les 300 mm en juin et octobre.

En outre, l'analyse du champ de pluie indique que la zone aménagée de Soubré est soumise à des précipitations comprises entre 1400 mm et 1500 mm. Ce sont donc de fortes pluies qui tombent sur tout le territoire du bassin. Cependant, les hauteurs de pluies baissent légèrement du Sud-est vers le Nord-est.

#### ***2.2.4.3 Humidité relative et température dans le bassin aménagé de Soubré***

De par sa situation, la zone du Sud-ouest est caractérisée par une forte humidité relative de l'air. Elle présente un maximum très élevé qui atteint 90 % au niveau de la zone aménagée à l'exutoire de Soubré et une moyenne de 85 % pendant les saisons pluvieuses.

La température moyenne de la région est inférieure à 28° C. Au cours de l'année, la température varie généralement de 21 °C à 33 °C et est rarement inférieure à 18 °C ou supérieure à 35 °C.

Les températures élevées (temps chaud) durent environ trois (3) mois, de janvier au début avril, avec une température quotidienne moyenne maximale supérieure à 32 °C. Le mois le plus chaud de l'année à Soubré est généralement celui de février, avec une température moyenne maximale de 33 °C et minimale de 23 °C.

Les mois les plus chauds correspondent à la grande saison sèche, où le maximum de chaleur est enregistré entre janvier et février.

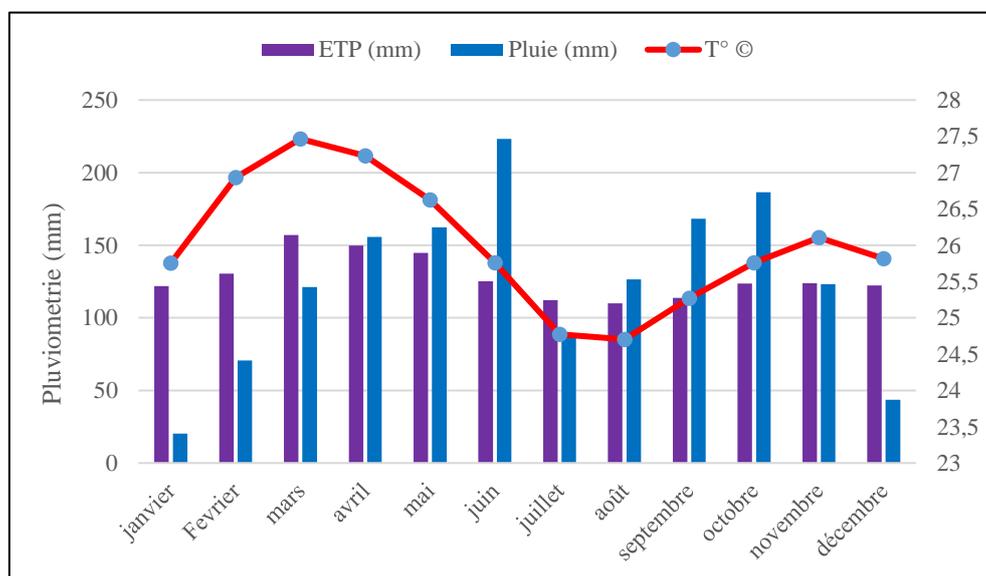
En ce qui concerne la saison froide (températures basses), elles durent également environ 3 mois, soit de juin à septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale inférieure à 29 °C. Le mois le plus froid de l'année dans la zone est août, avec une température moyenne minimale de 22 °C et maximale de 28 °C.

#### 2.2.4.4 Évapotranspiration potentielle (ETP) dans le bassin aménagé de Soubré

L'évapotranspiration potentielle correspond à l'évaporation maximale d'une surface suffisamment approvisionnée en eau selon les conditions climatiques données. Ce sont entre autres la température de l'air, le déficit hygrométrique, la vitesse et la turbulence du vent, ainsi que le rayonnement solaire. Pour un bassin-versant, elle représente la totalité des pertes d'eau en un an. Elle est égale au déficit d'écoulement qui se calcule en faisant la différence entre la hauteur de pluie annuelle et la lame d'eau écoulée à l'issue du bassin-versant (M. Eldin, 1971, p. 15). En effet, la variabilité spatiale des températures ou du rayonnement sont des variables d'entrée du calcul de l'ETP, mais beaucoup moins fortes que celle des précipitations.

En ce qui concerne le bassin du Sassandra, les données recueillies au pas de temps mensuel sur les moyennes interannuelles à la station de Soubré durant la période 1981-2005 ont permis à K. T. Yao (2009, p. 41) de calculer l'ETP au niveau de ce bassin versant par la méthode de l'équation de Thornthwaite.

Les résultats illustrés par l'histogramme de la **figure 21** montrent que l'ETP maximale est de 146 mm en mars, tandis que le minimum de 99 mm est noté en août.



**Figure 21** : Variations en moyenne interannuelle (1989-2019) de la pluviométrie, de l'évapotranspiration et de la température mensuelles du bassin du Sassandra à la station de Soubré

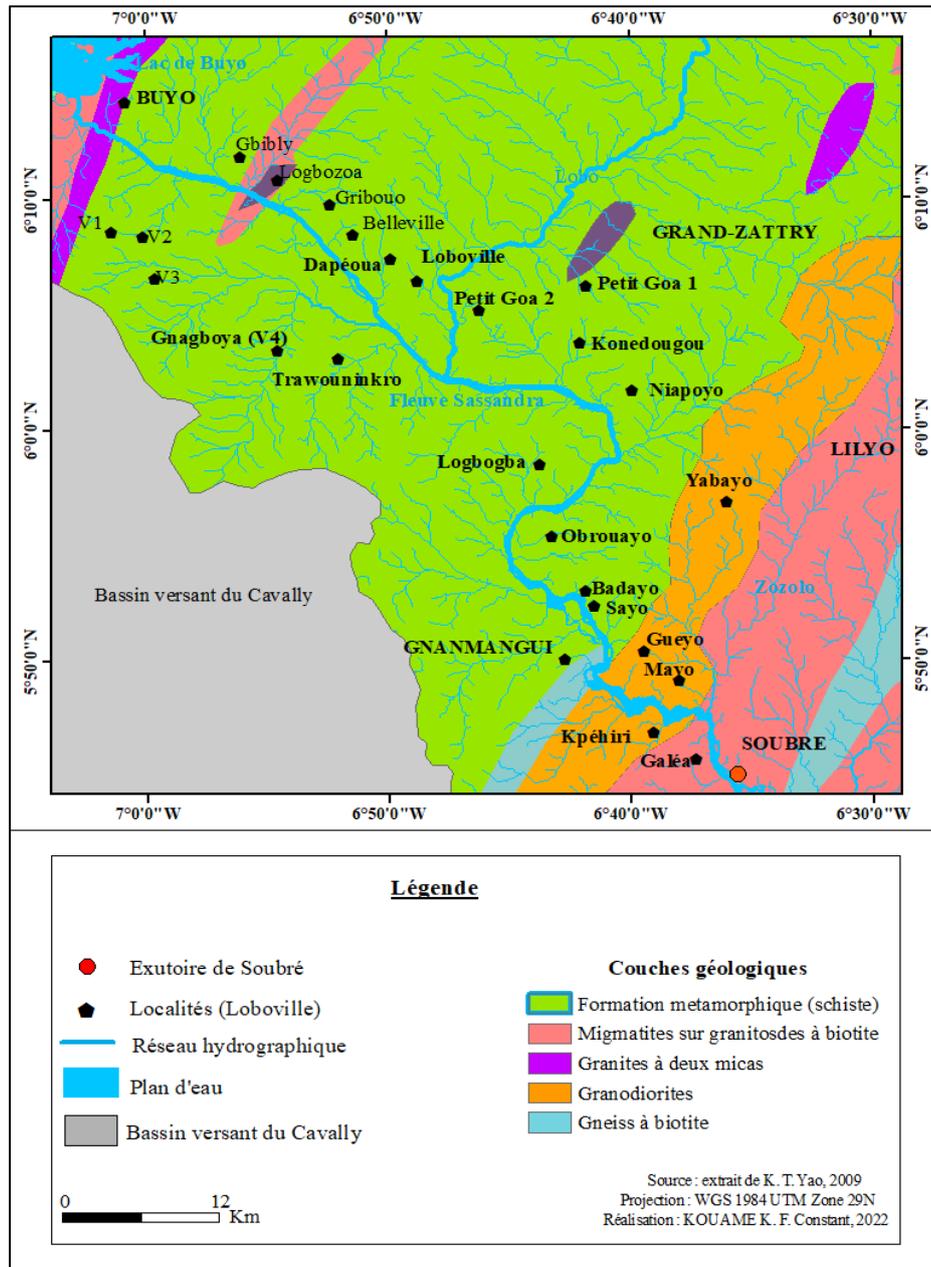
La moyenne interannuelle de l'évapotranspiration mensuelle est supérieure à celle de la pluviométrie de décembre à avril, ainsi qu'en juillet. L'évapotranspiration diminue au fur et à mesure que la pluviosité augmente de mars à juin. Elle amorce une nouvelle croissance à partir du mois d'août pour atteindre son maximum en mars.

### 2.2.5 Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques du bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré

La géologie des terrains influe non seulement sur le ruissellement des surfaces, mais également sur l'écoulement de l'eau souterraine. Dans le premier cas, l'étude des composantes géologiques d'un bassin-versant dans le cadre de l'étude des risques hydroclimatiques permet de déterminer la perméabilité des formations lithologiques. Celle-ci intervient sur la vitesse de montée des crues, sur leur volume, ainsi que sur l'aggravation du phénomène d'inondation.

En effet, l'ensemble du bassin du Sassandra est constitué par le socle ancien des formations du précambrien inférieur et moyen. Le précambrien inférieur se caractérise par la présence de gneiss, migmatites et quartzites au Sud de la zone d'Odienné et un peu à l'Ouest de Séguéla. Le précambrien moyen occupe les 95 % du socle du bassin du Sassandra (H. Camus, 1969, p. 15) soit 97 % du bassin de Soubré. Il est marqué par des granites et des migmatites du Nord au Sud sur l'ensemble du bassin. On note cependant la présence de quelques époinçements de dolérites et basaltes du Primaire dans la région de Touba et au Sud-est d'Odienné.

De façon spécifique, la zone aménagée du Sassandra à Soubré fait partie du Sud-ouest ivoirien que Papon et Lemarchand (1973) définissent comme le domaine SASCA (Sassandra Cavally). La particularité de ce domaine réside dans la coexistence des formations archéennes et des formations birimiennes métamorphiques. Autrement dit, la zone est caractérisée de tufs et rhyolites métamorphiques et de schistes dans la zone de Buyo, tandis qu'on rencontre des formations migmatitiques (gneiss) et granitiques (à deux micas) dans la zone de Soubré (granodiorites d'anatexie) (**figure 22**).

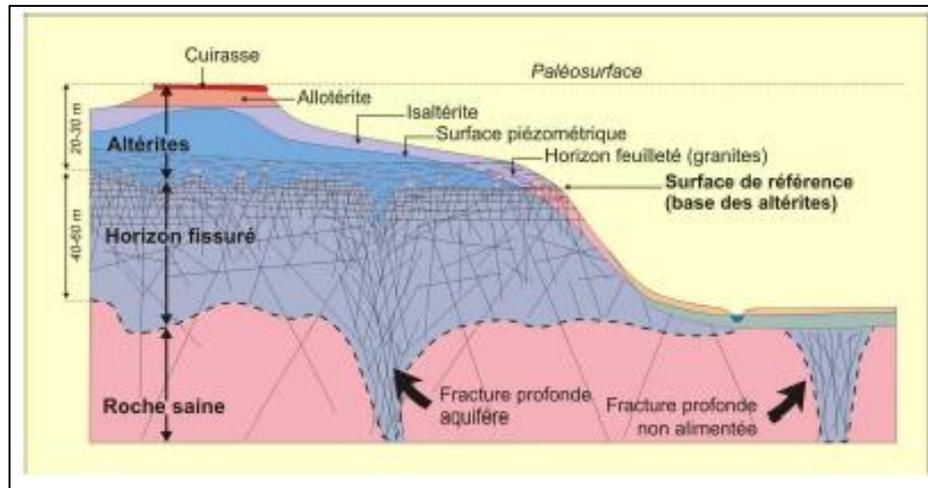


**Figure 22** : Géologie de la zone aménagée du bassin versant du Sassandra à l'exutoire de Soubré (K. T. Yao, 2009, p. 38, modifié).

Sur le plan hydrogéologique, il faut s'intéresser spécifiquement à la zone d'intérêt à l'exutoire du Sassandra à Soubré. Cette zone présente différents types de réservoirs qui se superposent (K. T. Yao, 2009, p. 71).

Le premier réservoir est constitué d'altérites argilo-sableux, d'épaisseur variable (20-30 m) et de très faible perméabilité. En effet, les altérites meubles sont issus de la décomposition prolongée de la roche mère (**figure 23**). Ce processus d'altération est à l'origine des propriétés des aquifères. Ainsi, les altérites constituent le premier réservoir accessible assurant une

fonction de stockage d'eau souterraine. Les stocks d'eau de ces réservoirs dépendent de leur volume, de la perméabilité verticale des horizons qui contrôle l'infiltration, et du niveau piézométrique des altérites. La présence de l'argile dans les altérites leur permet une grande capacité d'emmagasiner d'eau.



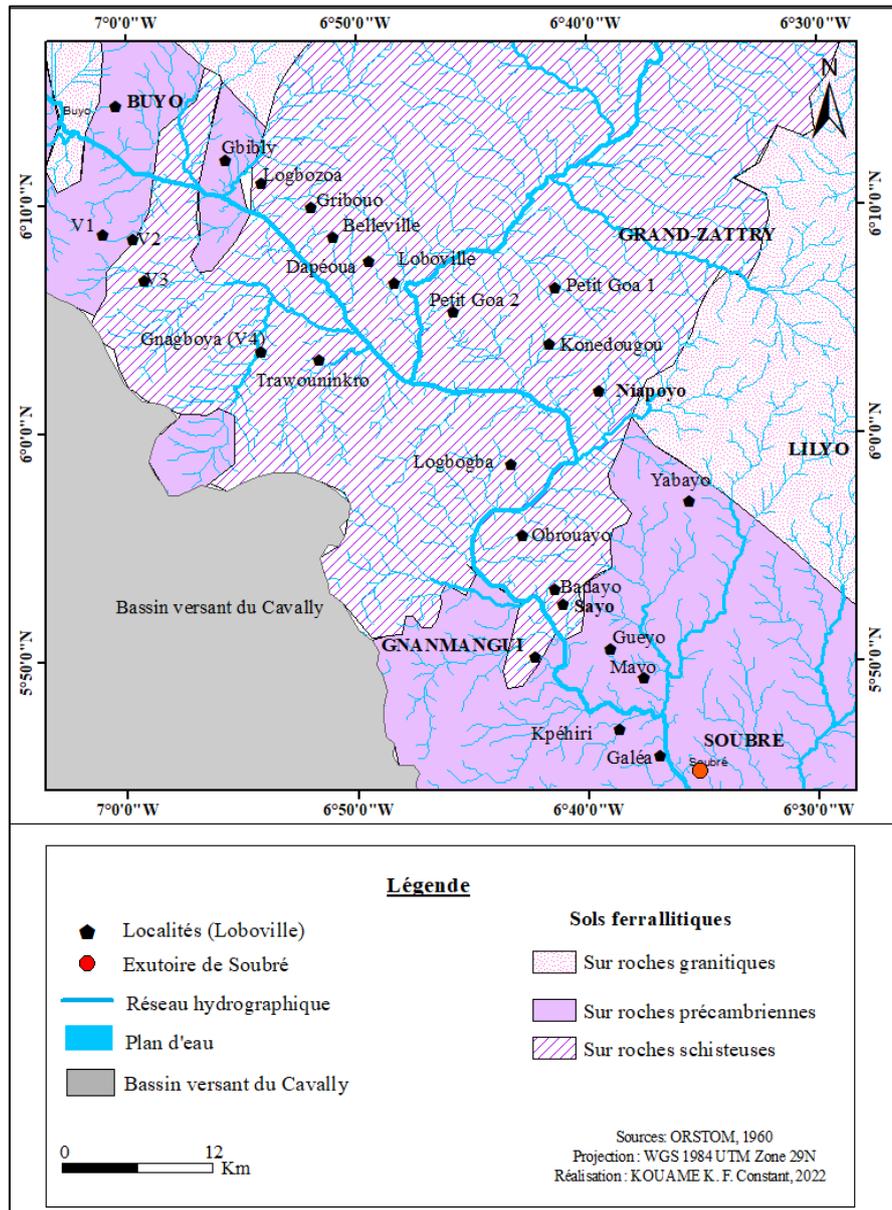
**Figure 23 :** Représentation schématique de la structure hydrogéologique des aquifères du socle  
(K. T. Yao, 2009, p. 71)

Le second réservoir situé plus profondément en dessous du premier est une zone de fissures, beaucoup plus perméable et drainé par les cours d'eau. Par sa grande composition en schistes, ce réservoir peut fournir des débits très forts avec une transmissivité de l'ordre de  $10^{-4}$  à  $10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Ce type d'aquifère est rencontré dans la zone Sud-ouest de Buyo dans les localités de Dapéoua et Belleville avec des débits d'exploitation respectifs de  $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  et  $13 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

## 2.2.6 Pédologie du bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré

Le manteau pédologique d'une zone donnée est généralement le résultat de l'action combinée de plusieurs facteurs : le climat, les formations végétales, la nature et l'altération du substratum géologique, mais également, de l'action anthropogénique. Quant à son aptitude culturale, elle dépend essentiellement de sa capacité de rétention en eau, elle-même fonction de sa granulométrie ou de sa texture et de sa teneur en matière organique (D. Koumassi, 2014, p. 27). Dans le bassin-versant du Sassandra à Soubré, les matériaux originels constitutifs des sols ont des origines plus ou moins variées. Il s'agit, soit de matériaux d'apport d'origine alluviale, soit de matériaux sédimentaires anciens, soit encore de matériaux d'altérations dérivant du socle granito-gneissique constituant la grande partie du territoire du bassin (M. Avenard et *al.*, 1971, p. 340).

En ce qui concerne notre zone d'intérêt, selon Tagini (1971), cité par V. M. Sorokoby (2013, p. 38-41), elle est définie essentiellement par cinq formations géologiques regroupées en deux unités : les formations libériennes et les formations éburnéennes de l'unité Hana-Lobo. La quasi-totalité du bassin-versant aménagé du Sassandra à Soubré est constituée de sols ferrallitiques moyennement désaturés (**figure 24**).

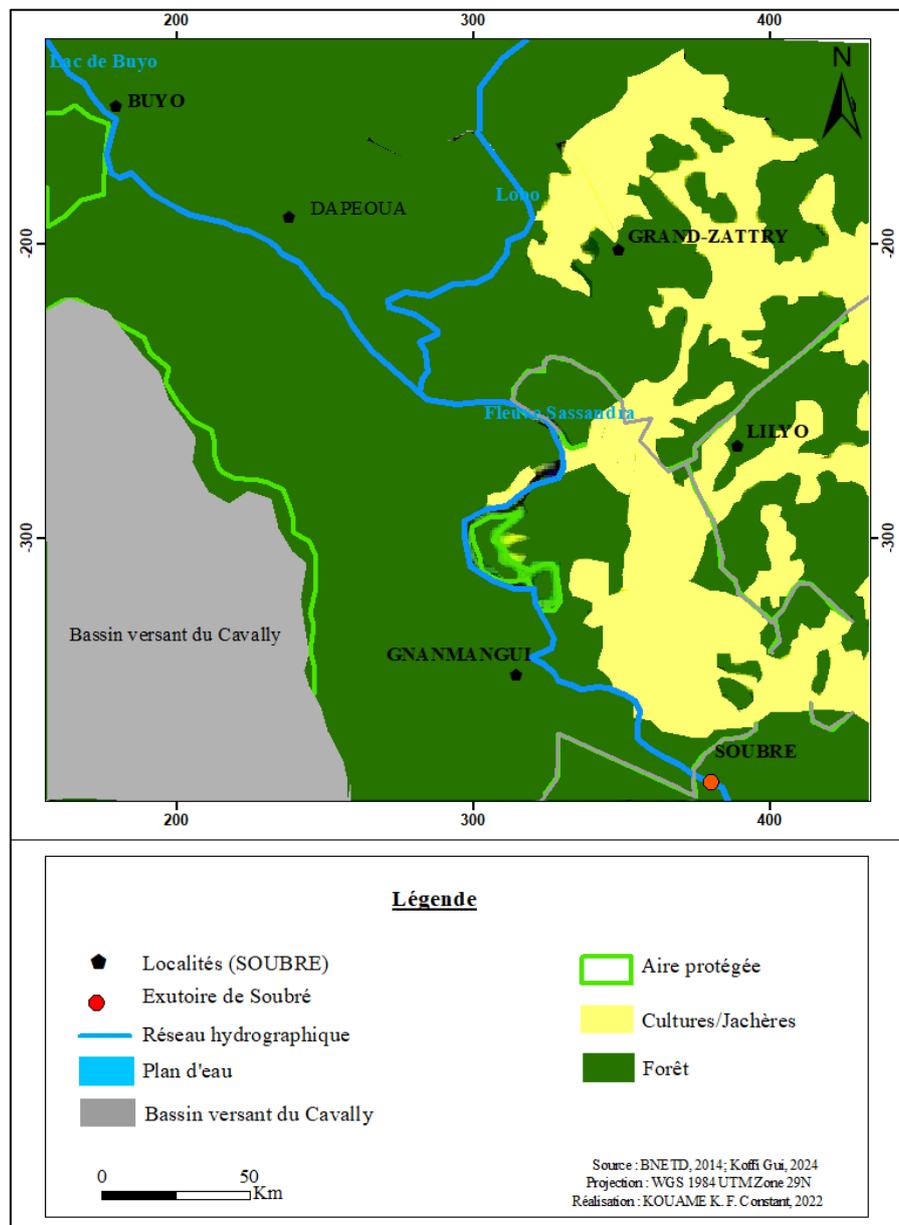


**Figure 24 :** Pédologie du bassin-versant aménagé du Sassandra à Soubré (ORSTOM, 1960)

Ces sols ferrallitiques moyennement désaturés montrent un remaniement gravillonnaire. Tous ces types de sols servent à l'agriculture de façon générale. La qualité de leur fertilité permet soit le développement de cultures industrielles soit de cultures vivrières selon les habitudes et besoins alimentaires des différentes zones du bassin.

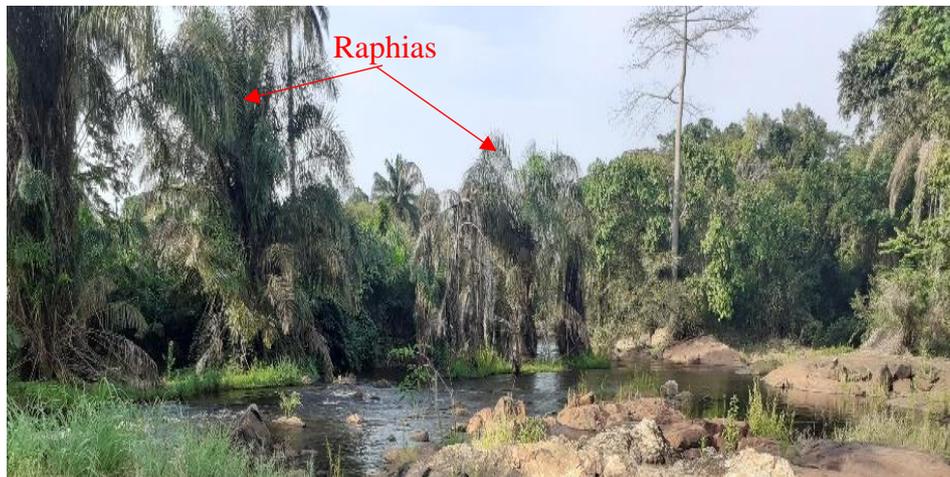
### 2.2.7 Végétation du bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré

La couverture végétale joue un rôle essentiel dans la protection du sol contre l'érosion. De même, en diminuant l'agressivité des gouttes d'eau, elle empêche l'écoulement pluvial et favorise l'infiltration. Cette résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense. En effet, le bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré fait partie de la région de la Nawa, une région qui appartient au secteur de la forêt dense humide sempervirente (végétation verte toute l'année), et déborde légèrement sur la forêt dense mésophile (semi-décidue) dans sa partie est (**figure 25**).



**Figure 25 :** Végétation du bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré en 1969 (BNETD/CIGN, 2014 ; G. Koffi, 2019)

Plusieurs espèces végétales se développent dans ce secteur. Ce sont les espèces telles que *Cola lorougnonis*, *Celtis sepp*, et *Triplochiton scleroxylon* (samba) (J. L. Guillaumet et E. Adjanohoun, 1971, p. 189). Dans la zone aménagée du bassin, des espèces végétales telles que les formations à *Raphia farinifera* se rencontrent le long du fleuve Sassandra (**photo 2**), *Eremospatia macrocarpa* et *Diospyros mannii* (N. G. Apling, 2008, p. 106).



**Photo 2 :** *Végétation de Raphia farinifera le long du Sassandra à Soubré*  
(Source cliché : Kouamé K., mars 2020)

Ces formations autrefois naturelles, avec des aires protégées telles que la forêt classée du Mont Kourabahi dans la zone d'Obrouayo, ont fait place aux formations anthropiques telles que les jachères et les mosaïques de cultures de rente comme les plantations de cacaoyers, d'hévéa, de palmiers à huile, etc. (**photo 3**).



**Photo 3 :** *Plantation de cacaoyers dans la forêt classée du Mont Kourabahi à Obrouayo*  
(Source cliché : Kouamé K., mars 2020)

Cependant, il est encore possible de rencontrer quelques touffes arbustives qui échappent à la conquête des terres cultivables ou issues d'opérations de reboisement dans le cas des aires protégées. Depuis les années 1960, le Sud-Ouest ivoirien est au cœur de la nouvelle « boucle du cacao » dans le département de Soubré. Les divers paysages naturels et anthropiques ainsi créés constituent des enjeux dont ceux qui longent de part et d'autre le fleuve Sassandra et ses affluents sont susceptibles d'être affectés, en cas d'inondations consécutives à des crues.

De plus, dans les environs immédiats des barrages où le couvert végétal a pratiquement disparu, les surfaces de ruissellement dominant dans l'espace, ce qui est susceptible d'engendrer, en période de pluie, un fort écoulement et une accumulation d'eau dans la plaine d'inondation (**photo 4**).



*Photo 4 : Plaine inondable en amont du barrage de Soubré occasionnée par le bassin de retenue du barrage (Source cliché : Kouamé K., mars 2020)*

### **2.3 Caractéristiques humaines et aménagement des barrages hydroélectriques du bassin-versant du Sassandra à Soubré**

Les populations et les différentes activités qu'elles mènent sont les premières victimes des risques d'inondation. Elles sont les plus exposées aux conséquences des risques hydroclimatiques qui affectent le bassin-versant. La dynamique démographique dans le bassin-versant ainsi que les activités exercées par les populations sont abordées ici à travers les fondements humains dans le bassin-versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré.

### **2.3.1 Peuplement et caractéristiques démographiques des populations dans le bassin versant aménagé du Sassandra à l'exutoire à Soubré**

La connaissance des caractéristiques démographiques et socio-économiques de la population vivant dans le bassin-versant de Soubré permet une meilleure prise en compte des facteurs démographiques dans l'évaluation du niveau de vulnérabilité du bassin, mais aussi de la mise en place des stratégies et outils durables de gestion des risques d'inondations.

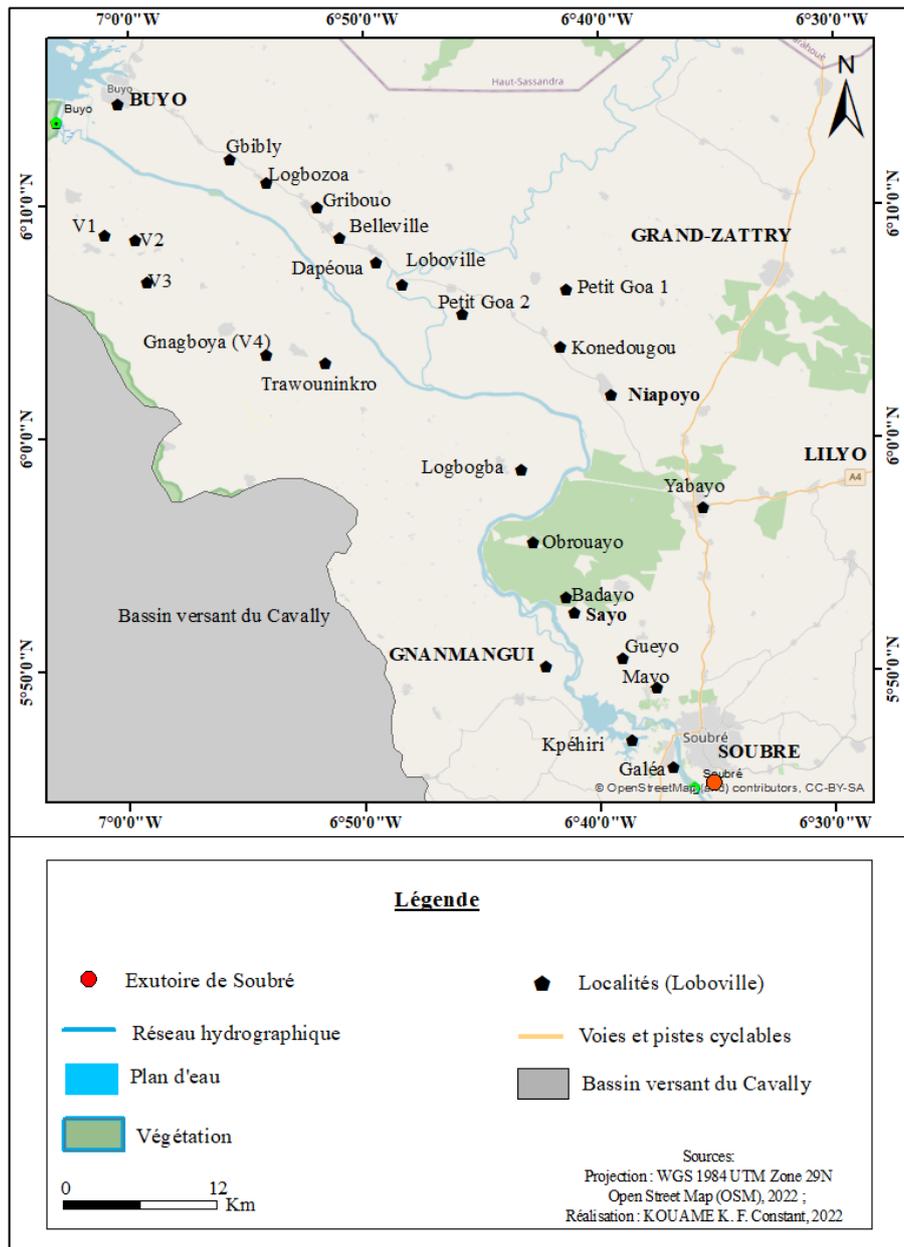
Du Nord à son exutoire à Soubré au Sud, le bassin versant du fleuve Sassandra est peuplé par une diversité d'ethnies. Il est peuplé majoritairement par les autochtones Kouzié occupant la région de Buyo, les Bété et Kodia dans la région de Soubré et enfin le groupe Bakwé en aval de Buyo, de la rive droite du Sassandra jusqu'à son exutoire à Soubré.

Sur le plan organisationnel, le village constitue la première entité politique de base dans cette région comme partout ailleurs en Afrique de l'Ouest. Ainsi, le système est organisé socialement par canton, c'est-à-dire le regroupement de villages de la même ethnie ou affinité qui ont à leur tête un chef accepté comme tel par ses communautés et reconnu par l'autorité étatique.

L'historique du peuplement de cette partie de la Côte d'Ivoire s'est faite autour du 19<sup>ème</sup> et 20<sup>ème</sup> siècle à la faveur de nombreux programmes de développements. Ces programmes dont le plus important était l'Aménagement de la Région du Sud-Ouest (ARSO en 1969) ont favorisé un flux migratoire important des allochtones et étrangers dans le Sud-ouest du pays. Cela a fortement contribué au développement tous azimuts de cette région avec un taux de migration extérieur élevé de 23 % pour la zone de Soubré contre 14 % au niveau national (INS, RGPH 1998). Divers motifs dont le commerce et l'agriculture favorisent la migration des populations vers la région de Soubré.

En effet, la recherche de terres fertiles cultivables constitue le premier motif de migration des populations allochtones et étrangères de la sous-région vers ce bassin-versant qui regorge d'énormes potentialités agro-pédologiques favorables au développement d'une agriculture pérenne de rentes. Dès lors, la pratique d'une agriculture extensive utilisant très peu d'intrants adaptés aux contraintes pédologiques, de même qu'une augmentation de la pression démographique entraînée par le flux migratoire a pour conséquence une pression foncière, une dégradation des sols et du couvert végétal, mais surtout une réduction du temps des jachères.

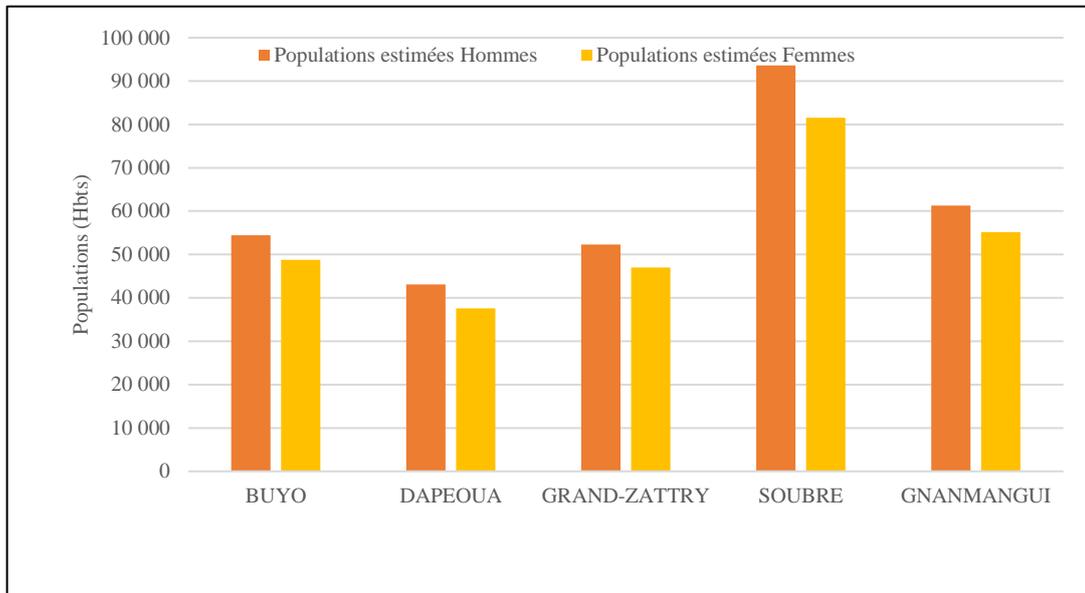
La zone d'intérêt de cette étude touche plusieurs localités appartenant toutes à la région du Nawa. Ce sont de grandes localités chefs-lieux de départements ou sous-préfectures, notamment Buyo, Dapéoua, Grand-Zattry, Soubré, Oupoyo, Gnanmangui et Méagui. Plusieurs autres localités dépendant de leurs ressorts administratifs sont riveraines du fleuve Sassandra et constituent des enjeux exposés à l'aléa d'inondation fluvial dans le bassin-versant aménagé à l'exutoire de Soubré (**figure 26**).



**Figure 26 :** Répartition des localités dans le bassin aménagé du fleuve Sassandra de Soubré

De plus, la population de la région du Nawa est estimée à 1 053 084 habitants, soit 4,6 % du poids démographique national, avec une densité de 109,2 hbts/km<sup>2</sup> (INS, RGPH

2014). Aussi, 95 % de cette population est-elle constituée d'une jeunesse de moins de 50 ans et d'une population de 47 % de femmes (**figure 27**). La population issue des localités riveraines du fleuve Sassandra dans le bassin versant aménagé est estimée à 574 856 habitants (INS, RGPH 2014).



**Figure 27 :** Populations estimées des chefs-lieux de sous-préfectures dans le bassin aménagé à Soubré (INS, RGPH 2014)

En somme, par son dynamisme, la population vivant dans le bassin-versant aménagé du Sassandra à Soubré exerce une pression sur l'environnement, engendrant une transformation progressive de celui-ci au travers les différentes activités socio-économiques exercées.

### 2.3.2 Activités socio-économiques dans le bassin aménagé du Sassandra à Soubré

Des facteurs comme le climat et la mise en place de conditions sociales favorables permettent la diversité des activités socio-économiques menées par les populations dans le bassin-versant aménagé de Soubré. Les activités pratiquées regroupent tous les secteurs d'activités, avec un secteur primaire dominant. L'agriculture, l'élevage et la pêche constituent ainsi les principales activités du secteur primaire dans le bassin-versant de Soubré.

En ce qui concerne le secteur secondaire, il présente d'énormes opportunités de développement à l'instar des autres régions du pays, notamment l'exploitation des ressources minières et forestières. Cependant, le manque d'infrastructures et d'investissement adéquats freinent ce développement. Le secteur minier, surtout celui des métaux précieux comme l'or souffre d'une exploitation artisanale et clandestine généralisées. Elle est pratiquée très souvent

sur les bords du fleuve Sassandra. Cette activité inorganisée entraîne une dégradation du lit et de la qualité des eaux du bassin du Sassandra.

Concernant le secteur tertiaire, il est porté par le commerce qui occupe 15 % de la population au niveau des principaux centres urbains comme Soubré et Buyo, et est dominé par le commerce informel de produits alimentaires et autres produits de consommation quotidienne (PEMED-CI, 2015, p. 28).

Certes une diversité d'activités socio-économiques est pratiquée, toutefois l'attention sera portée sur le secteur agricole qui à lui seul impacte de diverses manières la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin-versant aménagé du Sassandra à Soubré.

### **2.3.3 Importance de l'agriculture dans le bassin aménagé du Sassandra à Soubré**

Compte tenu de ses grandes potentialités agro-pédologiques favorables aux cultures, la région de Soubré demeure l'une des régions les plus dynamiques sur le plan agricole en Côte d'Ivoire.

En effet, les cultures de rente sont réalisées par une majorité de petits et moyens producteurs. Ils fournissent aux moyens des techniques manuelles et traditionnelles la plus grande partie de la production au sein d'exploitations de 2 à 10 ha en moyenne, sans toutefois oublier quelques grandes exploitations de sociétés agro-industrielles de la région (PEMED-CI, 2015, p. 30). Parmi ces cultures, il y a le cacao.

En ce qui concerne particulièrement le cacao, la région du Nawa qui abrite le bassin-versant aménagé de Soubré constitue la première zone productrice sur le plan national, faisant ainsi de la région de Soubré, la nouvelle boucle du cacao en Côte d'Ivoire. À cet effet en 2014, elle a produit environ 300 000 tonnes, soit près de 20 % de la production nationale (Conseil Café-Cacao, 2014).

À la culture favorite du cacao, il faut souligner la présence de plusieurs autres cultures de rentes pérennes notamment le palmier à huile, le café et l'hévéa. À cela s'ajoutent diverses cultures vivrières dominées par le riz notamment le riz pluvial, l'igname, la banane, le manioc, et le maïs. Toutes ces spéculations fournissent des productions annuelles importantes non négligeables sur des superficies variées (**tableau 2**).

**Tableau 2 : Superficies et productions des spéculations de la région du Nawa – Soubré**

Cultures de rente		
Spéculation	Superficies (Ha)	Productions (t)
Cacao	19 328	272 265
Café	69 822	244
Palmier à huile	1 312	10 496
Hévéa	445	1 246
Cultures vivrières		
Spéculation	Superficies (Ha)	Productions (t)
Banane plantain	47	661
Igname	330	4 620
Riz pluvial	1 312	10 496
Riz de bas-fond	445	1 246
Mais	2 344	7 032
Arachide	4 959	ND
Manioc	834	12 510

(Source : PEMED-CI, 2015, p. 30)

Bien qu'assurant aux populations la subsistance et l'essentiel de leurs revenus, l'essor de ces cultures pérennes et vivrières est à l'origine des conflits fonciers dans la région, mais il contribue surtout à la destruction du couvert végétal déjà en déclin, notamment celui des aires protégées.

#### **2.3.4 Pêche dans le bassin versant aménagé du Sassandra à Soubré**

La pêche dans le bassin-versant aménagé de Soubré semble relativement développée. Bénéficiant la présence de deux lacs de grandes capacités notamment les lacs des barrages de Buyo (240 km<sup>2</sup>) et Soubré (17,5 km<sup>2</sup>), elle se pratique de manière artisanale sur tout le long du fleuve Sassandra et sur certaines sections de ses affluents comme le Lobo.

En 2019, près de 200 acteurs de la pêche de la zone de Soubré sont formés sur la gestion intégrée des ressources halieutiques afin de favoriser une cohésion sociale entre les communautés du bassin-versant (Agence Ivoirienne de Presse, mars 2019). Auparavant, c'est-à-dire, environ un an plutôt (2018), c'est près de 150 aspirants pêcheurs ou pêcheurs dont les capacités ont été renforcées dans le domaine de la confection des engins de pêche et de la bonne pratique de cette activité dans le bassin-versant aménagé de Soubré.

En effet, selon les statistiques du District du Bas-Sassandra auquel appartient la zone du bassin-versant aménagé du Sassandra à Soubré, ce sont 162 sites de pêcheurs artisanaux et 1850

embarcations traditionnelles qui ont été recensés en 2014 (PEMED-CI, 2015, p. 32). Ces chiffres représentent respectivement 12 % des sites de pêcheurs et 16 % des embarcations au niveau national. En ce qui concerne les embarcations, elles sont dominées par les pirogues à membrures non motorisées, suivies de loin par les pirogues monoxyles non motorisées et les pirogues à membrures motorisées. La plus grande partie de ces captures est soit revendue, soit remise à la famille pour vente, ou encore transformée via fumage ou fermentation. A cela s'ajoute une pisciculture en voie de développement spécifiquement dans le bassin aménagé du Sassandra à Soubré.

Par ailleurs, les eaux du fleuve Sassandra ainsi que des différents lacs des barrages du bassin-versant aménagé renferment une grande diversité de poissons. Ainsi les produits comestibles issus de la pêche sont constitués principalement des grands groupes de poissons notamment les *Mormyridés* (poissons éléphants, poissons électriques), les *Notoptéridés* (poissons-couteaux), le redoutable *Malapterurus electricus* (poisson-chat électrique), des *Mastacembelidés* (anguilles épineuses), des Cyprinidés (plusieurs espèces du genre *Barbus*), des *Anabantidés* (*Ctenopoma*), plusieurs familles de poissons-chats (*Clariidés*, *Mochokidés-Synodontis*), etc. et enfin plusieurs genres de Cichlidés (*Hemichromis*, *Oreochromis*, *tilapias*) (photo 5).



**Photo 5 :** Quelques espèces de poissons vendues sur le marché à Soubré au bord du fleuve Sassandra (Source cliché : Kouamé K., mars 2020)

Enfin, malgré un plan de développement du secteur de la pêche à Soubré et la réalisation de projets divers dans ce secteur, notamment le Projet d'Appui à la Pêche Continentale et Lagunaire (NEPAD-PDDAA) initié par l'État et ses partenaires en 2005, et différentes

interventions d'acteurs en charge des lacs des barrages hydroélectriques du bassin aménagé, la pêche est sujette à quelques problèmes relatifs au facteur d'eau, couplés aux moyens de production et de conservation rudimentaire voire archaïque. Cela empêche ce secteur d'être encore plus profitable pour les différents acteurs de la zone.

### **2.3.5 Élevage dans le bassin aménagé du Sassandra à Soubré**

L'élevage existe sous toutes ses formes dans le bassin-versant aménagé du Sassandra à Soubré. Il concerne la volaille, le bovin, l'ovin et le porc. Cependant, à cause de certains facteurs culturels et naturels dont la végétation et le climat, la région de Soubré n'est pas une zone naturellement dédiée à l'élevage. Toutefois, grâce à l'appui de certaines structures étatiques comme l'Agence Nationale d'Appui au Développement Rural (ANADER) et privées dont la Société Ivoirienne de Production Animale (SIPRA) à travers son unité de production IVOGRAIN, l'élevage est en train de gagner en importance, notamment l'aviculture et la porciculture.

Ainsi dans le District du Bas-Sassandra, la région du Nawa (Soubré) concentre à elle seule environ 85 % du cheptel d'animaux, hors volailles ; soit 65 % des bovins, 80 % des ovins et caprins et enfin 86 % des porcins (PEMED-CI, 2015, p. 31).

Au demeurant, l'élevage des bovins est pratiqué en majorité par les allogènes Peuls Maliens et Burkinabé, car les populations autochtones n'ont pas de tradition pastorale. Cette situation entraîne une insuffisance d'offre bovine locale qui se répercute sur la plupart des approvisionnements des marchés. Ces approvisionnements sont assurés par les pays frontaliers du Mali, et du Burkina Faso via les villes du Nord de la Côte d'Ivoire telles que Boundiali, Korhogo, Séguéla et Mankono.

Dans l'ensemble, l'élevage tel que pratiqué dans le bassin-versant aménagé du Sassandra est de type transhumant et peu organisé, source de conflits réguliers entre agriculteurs et éleveurs. Tous ces problèmes liés à l'élevage dans le bassin-versant sont tout autant des contraintes à la production agricole.

### **2.3.6 Historique et caractéristiques des aménagements hydroélectriques sur le bassin versant du Sassandra à l'exutoire de Soubré**

Les aménagements de barrages hydroélectriques répondent à plusieurs fonctions dont la principale est éventuellement la production d'électricité par l'énergie hydraulique. Dans le

bassin-versant du fleuve Sassandra, plusieurs aménagements ont été entrepris au nombre desquelles les constructions des barrages hydroélectriques de Buyo (1980) et Soubré (2017).

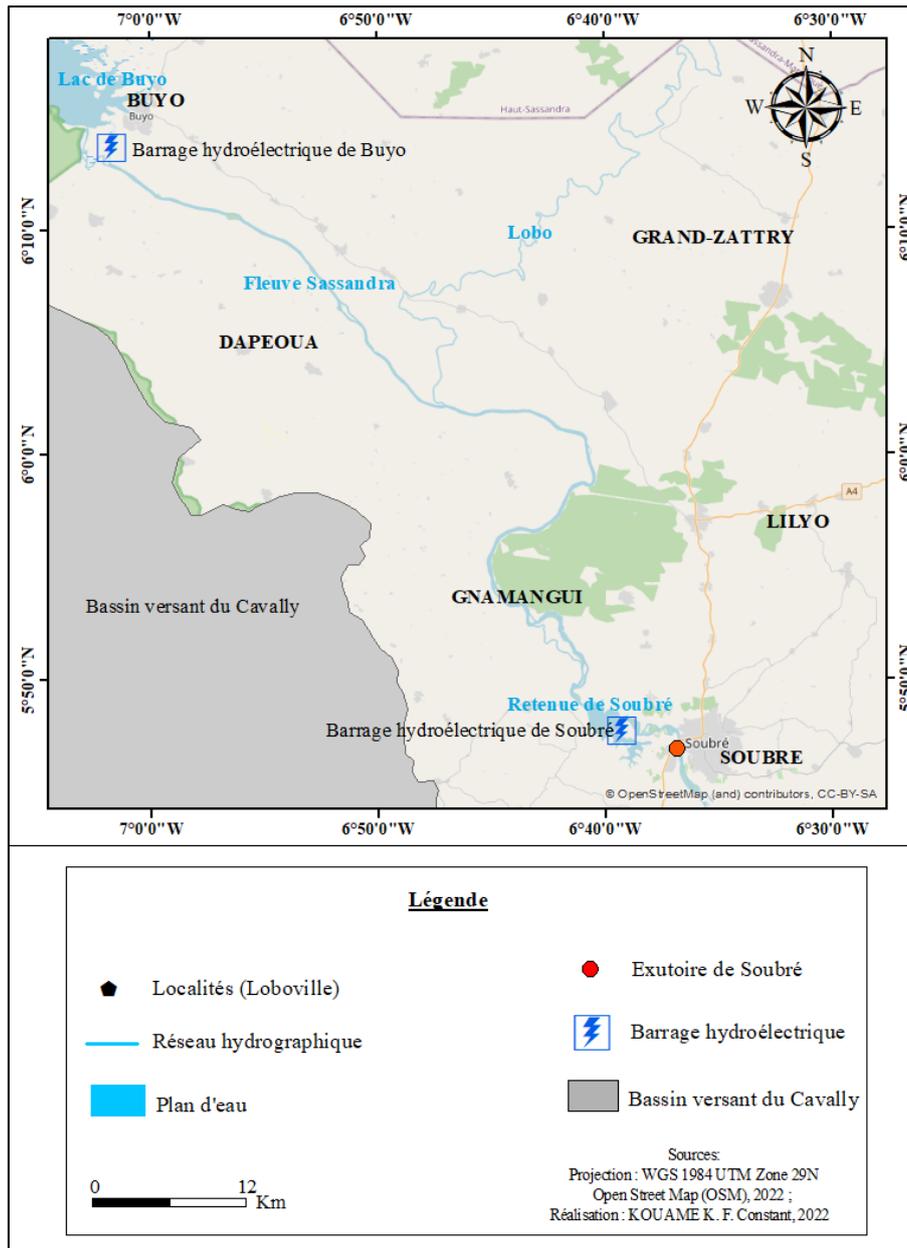
Dans cette partie du manuscrit, il s'agit de faire une historique du contexte des aménagements des barrages au niveau du bassin-versant du Sassandra à l'exutoire de Soubré et la description du processus de mise en place des équipements ainsi que la caractérisation des différents barrages.

### **2.3.6.1 Contexte des aménagements des barrages sur le bassin versant du Sassandra à l'exutoire de Soubré**

Dans l'optique de subvenir à ces nombreux besoins et de réaliser ces divers projets, l'Homme tente depuis des siècles de dompter l'eau sous toutes ses formes. Parmi ces nombreuses réalisations se positionnent les barrages. En effet, le premier barrage connu a été construit en Égypte vers 4000 av. J.C. pour faire dévier le Nil afin de créer un site pour la ville de Memphis (Comité Français des Barrages et Réservoirs - CFBR, 2013, p. 2). Dès lors, de nombreux barrages en terre sont bâtis durant l'Antiquité pour former des systèmes d'irrigation élaborés qui ont permis de rendre fertiles des régions jusque-là improductives et alimenter en eau et en énergie d'importantes populations. Les avancées de la connaissance et des techniques ont permis d'élever progressivement plusieurs types de barrages d'une part, et d'autre part, l'accroissement des besoins a entraîné la multiplication des barrages partout dans le monde. Il existe aujourd'hui plus de 35 000 barrages (dépassant les 15 mètres) et plus de 1 500 grands barrages sont en construction selon ce comité en 2013.

Concernant la Côte d'Ivoire, le pays commence à l'aube des années 60, la mise en place de nombreux barrages hydroélectriques. Depuis cette époque, ce sont 7 barrages de caractéristiques diverses réalisés. Ce sont Ayamé I (1959), Ayamé II (1965), Kossou (1972), Taabo (1979), Buyo (1980), Grah (1983) et Soubré (2017) qui ont été construits et mis en service par la Côte d'Ivoire (Situation de l'hydroélectricité en Côte d'Ivoire, 2007, p. 4).

Les barrages de Buyo et Soubré sont situés dans le bassin-versant du fleuve Sassandra dans le Sud-ouest de la Côte d'Ivoire (**figure 28**). Les sites abritant ces deux barrages ont été identifiés lors de l'inventaire du potentiel hydroélectrique de la Côte d'Ivoire réalisé par Électricité de France (EDF) en 1979. C'est également pendant ces études que les chutes de la Nawa, site du barrage de Soubré ont été découvert en 1962.



**Figure 28** : Situation géographique des barrages de Buyo et de Soubré

Par ailleurs, d'autres sites potentiels suscitent des perspectives d'investissement et donc un regain d'attention des planificateurs et consultants en charge de la réalisation des études de faisabilité des aménagements hydroélectriques.

Les résultats de cette étude ont montré que les sites de barrages hydroélectriques reconnus sur le bassin-versant du Sassandra ont une puissance équitable de 1100 MW pour un productible annuel de 5900 GWh, voire au-delà, comme l'illustre bien le **tableau 3** après la mise à jour des études. Certains sites se situent à l'amont du barrage de Buyo, notamment Gao, Koulikoro sur la Bafing, et Tayaboui. Dans la zone à l'aval de Soubré, il y a Gribo-Popoli dont la construction

a débuté en 2017, Boutoubré et Louga pour ne citer que ceux-ci. La construction du barrage de Buyo a débuté vers 1980 et a été mis en service en 1981.

**Tableau 3 : Potentiels hydroélectriques des sites de barrages sur le fleuve Sassandra**

Sites	Puissance totale (MW)	Productible annuel (GWH)
BUYO	165	900
SOUBRE	270	1 600
GRIBO-POPOLI	112	515
BOUTOUBRE	156	785
TAYABOUI	100	515
LOUGA	280	1 330
DABOITIER	91	375
GAO	75	475
KOUROUKORO	32	215
<b>TOTAL</b>	<b>1 281</b>	<b>6 710</b>

*Source : Rapport de l'hydroélectricité en CI, 2012, p. 12*

Quant au barrage de Soubré, sa construction a commencé en 2013 et s'est achevée puis mis en service en 2017-2018. En effet, c'est le seul grand barrage hydroélectrique que la Côte d'Ivoire réalise depuis plus de 3 décennies après celui de Buyo et Fayé. Il faut souligner que pendant cette période, le pays a connu plusieurs situations de délestages qui ont entraîné des difficultés dans la gestion de l'offre et la demande en énergie ; car non seulement d'assurer la disponibilité de la demande nationale, le pays exporte l'énergie vers certains pays voisins. La Côte d'Ivoire est un membre essentiel du West African Power Pool (WAPP) qui promeut les échanges de l'électricité. Il en exporte par le biais de l'interconnexion vers les 5 pays voisins notamment le Ghana, le Burkina Faso, le Mali, le Bénin et le Togo ainsi que le Liberia pour un volume de 855 GWh en 2015, 1 650 GWh en 2016 et 1225 GWh en 2017 (**tableau 4**).

**Tableau 4 : Proportion d'électricité exportée en fonction des destinations en 2017.**

SONABEL (Burkina Faso)	VRA (Ghana)	LEC (Liberia)	EDM (Mali)	CEB (Togo et Bénin)
47,6 %	18,0 %	0,70 %	27,8 %	06,00 %

*Source : CIE Annual Report, 2017*

Ainsi, la réalisation du barrage de Soubré qui constitue le plus gros ouvrage en termes d'investissement des gouvernants actuels s'inscrit dans la stratégie de mise en valeur équilibrée des ressources énergétiques du pays. Cet important ouvrage vient donc assurer à moyen terme, un équilibre de l'offre et de la demande en électricité. De même, il permettra de relever le niveau de l'hydroélectricité en Côte d'Ivoire, de rééquilibrer le mix-énergétique et de faire face, à moindre coût, à l'évolution croissante de la consommation nationale, car le pays importe une partie de son électricité du Ghana : 17,4 GWh en 2015 et 19,0 GWh en 2016.

En effet, en 2018, le mix énergétique est constitué de 22 % d'énergie hydraulique et de 78 % d'énergie thermique. Ce mix vise en 2030 un objectif de 16 % en énergies renouvelables, de 28 % en énergie hydraulique et de 56 % en énergie thermique.

Le projet de construction du barrage de Soubré a bénéficié d'un financement de la part d'Eximbank Chine à hauteur d'un coût total de 331 milliards de F CFA. Ce coût est reparti à 85 %, soit 239 milliards F CFA, pour la partie chinoise et à 15 % correspondant à environ 92 milliards pour la partie ivoirienne mobilisable sur une durée de 5 ans. Le taux d'intérêt est de 2 % et la durée de remboursement est de 20 ans avec un différé de 9 ans.

Enfin, la pose de la première pierre de ce barrage a eu lieu le 25 février 2013, sa mise en eau en mars 2018 et sa mise en service effective dans le courant avril-mai 2018.

#### ***2.3.6.2 Caractéristiques des barrages hydroélectriques de Buyo et Soubré sur le bassin-versant duassandra à l'exutoire de Soubré***

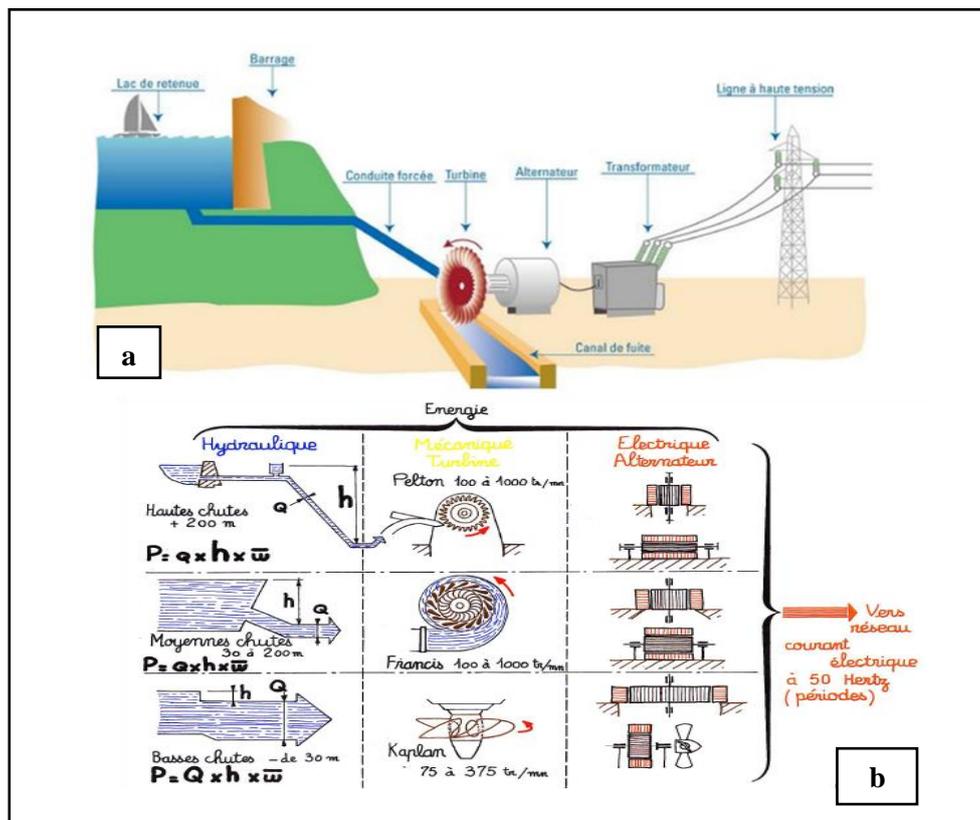
L'aménagement d'un barrage hydroélectrique doit répondre à plusieurs conditions techniques d'ordre topographique, géologique et hydrologique. En effet, de meilleures conditions topographiques sont idéales pour la réalisation du lac de retenue en amont du barrage pour le stockage de l'eau qui alimentera les usines.

Au niveau de la géologie, les roches sur lesquelles s'appuie le barrage doivent être stables et étanches, à la fois pour des raisons d'efficacité et de sécurité. Elles constituent le socle des aménagements et des ouvrages. De plus, de bonnes conditions pluviométriques, à savoir les précipitations sur le bassin versant qui alimente la cuvette du barrage doivent être suffisantes pour la remplir et compenser les pertes d'évaporation du lac de retenue.

À tout cela s'ajoute souvent la question de la prise en compte des risques (inondation, crue, ruptures d'ouvrages) liés à la conception des ouvrages du barrage.

Il faut noter également qu'il existe plusieurs types de barrages dont les barrages-poids, les barrages à voûtes et les barrages à contreforts. Peu importe le type de barrage, le béton est le seul matériau commun qui rentre dans la construction de ces ouvrages hydroélectriques. A ces formes de barrages, il faut associer les différents types de centrales hydroélectriques. Les centrales hydroélectriques se composent de 4 éléments essentiels à savoir les ouvrages de prise d'eau, les ouvrages d'amenée et de mise en charge, les équipements de production et les ouvrages de restitution.

Ainsi, un aménagement hydroélectrique type comprend trois grands éléments : l'ouvrage de fermeture qui est la digue ; l'ouvrage de sécurité ou l'évacuateur de crues, qui permet de réguler la retenue d'eau en laissant passer le trop plein d'eau ; les ouvrages de production composés de la prise d'eau, de la conduite forcée et de l'usine qui prend en compte le groupe turbine, alternateur et transformateur pour la production d'électricité (**figure 29**)



**Figure 29** : (a) schéma de fonctionnement type d'un barrage hydroélectrique et (b) principe de transformation de l'énergie hydraulique en énergie électrique (SHEMA - EDF, 2010)

### 2.3.6.2.1 Barrage hydroélectrique de Buyo

L'aménagement du barrage de Buyo est situé à 70 km à vol d'oiseau au Nord de l'exutoire du bassin-versant du Sassandra à Soubré. Il est le premier barrage hydroélectrique réalisé sur le cours du fleuve Sassandra. Sa réalisation à l'aval du barrage de Soubré s'est voulue dans une optique de développement et d'optimisation du potentiel hydroélectrique du fleuve Sassandra selon les résultats d'études entreprises depuis les années 70.

Le barrage de Buyo est de type remblai fait de terre et d'enrochements fonctionnant avec des turbines type « Groupe Kaplan ». Il a une capacité de génération de puissance totale d'énergie de 165 MW et un productible annuel moyen de 900 GWH. Son aménagement est composé de plusieurs ouvrages qui sont représentés sur les **photos 6 a, b, c, d**.



**Photo 6 a, b, c, d :** Aménagement du barrage hydroélectrique de Buyo  
(Source cliché : Kouamé K., 2020 et Situation sur l'hydroélectricité en CI, 2007)

C'est en moyenne 9 545 millions de m<sup>3</sup> d'eau qui sont turbinés chaque année et 1 106 millions de m<sup>3</sup> d'eau qui sont vidangés et déversés (**tableau 5**).

**Tableau 5 : Quelques caractéristiques générales du barrage hydroélectrique de Buyo**

<b>Caractéristiques</b>	
Nom du barrage	Buyo
Année de mise en service	1980
Coordonnées géographiques (Latitude Nord / Longitude Ouest)	6°14' / 7°10'
Structure responsable d'exploitation	CIE
Fleuve	Sassandra
Superficie réceptrice du site du barrage (Km <sup>2</sup> )	46 250
Type de barrage	Terre et enrochements
Hauteur du barrage	37
Volume de barrage (million m <sup>3</sup> )	6,9
Crête du barrage El (El m)	204
Crête de barrage Longueur (m)	6 290
Type de turbine et nombre de groupes	Kaplan / 3
Puissance totale installée (MW)	165
Production annuelle (GWH)	900
Réservoir volume HWL (million m <sup>3</sup> )	8 300
Réservoir volume LWL (million m <sup>3</sup> )	1 300
Réservoir volume effectif (HWL-LWL) (million m <sup>3</sup> )	7 000
Réservoir superficie (Km <sup>2</sup> )	895
Réservoir surface (Km <sup>2</sup> )	240
Rendement énergétique moyen (m <sup>3</sup> /KWh)	13
Hauteur de chute brute maximale (m)	36,1
Hauteur de chute brute minimale (m)	22,6
Débit total maximal (m <sup>3</sup> /s)	555
Apports annuels année moyenne (Mm <sup>3</sup> /an)	12 550
Apports annuels année humide (Mm <sup>3</sup> /an)	18 290
Apports annuels année sèche (Mm <sup>3</sup> /an)	7 880

*Source : recherches documentaires, 2020*

Aménagé sur un bassin versant de 46 250 Km<sup>2</sup>, le barrage de Buyo a une hauteur de 36 mètres et un volume de 6,9 millions m<sup>3</sup> (**tableau 6**). Il est sous la responsabilité de la Compagnie

Ivoirienne d'Électricité (CIE) avec pour objectif principal la production d'électricité et objectif secondaire la pisciculture.

**Tableau 6 : Bilan en eau du réservoir de Buyo calculé sur la période 1981-2014**

Bilan en eau réservoir de Buyo	Volume turbiné	Volume vidangé et déversé	Volume évaporé	Apports bruts	Pluie directe	Apports nets
Moyenne annuelle sur la période 1981-2014, (millions de m <sup>3</sup> )	9 545	1 106	931	11 621	955	10 631

*Source : (CIE Buyo et P. Y. Bourgin, 2015, p.10)*

### 2.3.6.2.2 Barrage hydroélectrique de Soubré

Inscrit au Plan de Stratégie de Développement 2011-2030, du Ministère des Mines, du Pétrole et de l'Énergie dans le secteur électrique, le projet de la construction du barrage hydroélectrique de Soubré a débuté en 2013 (Portail officiel du gouvernement de Côte d'Ivoire, 2017). Désigné comme le plus grand et gigantesque barrage hydroélectrique de la Côte d'Ivoire, le barrage de Soubré se situe à environ 3 km de l'exutoire du bassin-versant du fleuve Sassandra à Soubré. Il est aménagé à partir des chutes de la rivière Nawa, une branche du fleuve Sassandra (**photo 7**).



**Photo 7 : Aménagement hydroélectrique de Soubré (Source : CI-ENERGIE, 2020)**

L'aménagement hydroélectrique de Soubré est constitué d'un barrage hydroélectrique de 275 MW et d'un réseau d'évacuation d'énergie (Portail officiel du gouvernement de Côte d'Ivoire, 2017). Construit sur un bassin versant intermédiaire de 2000 km<sup>2</sup>, le barrage de Soubré est un barrage de type « barrage-voûte » fait de terre et d'enrochements. Ce type de construction

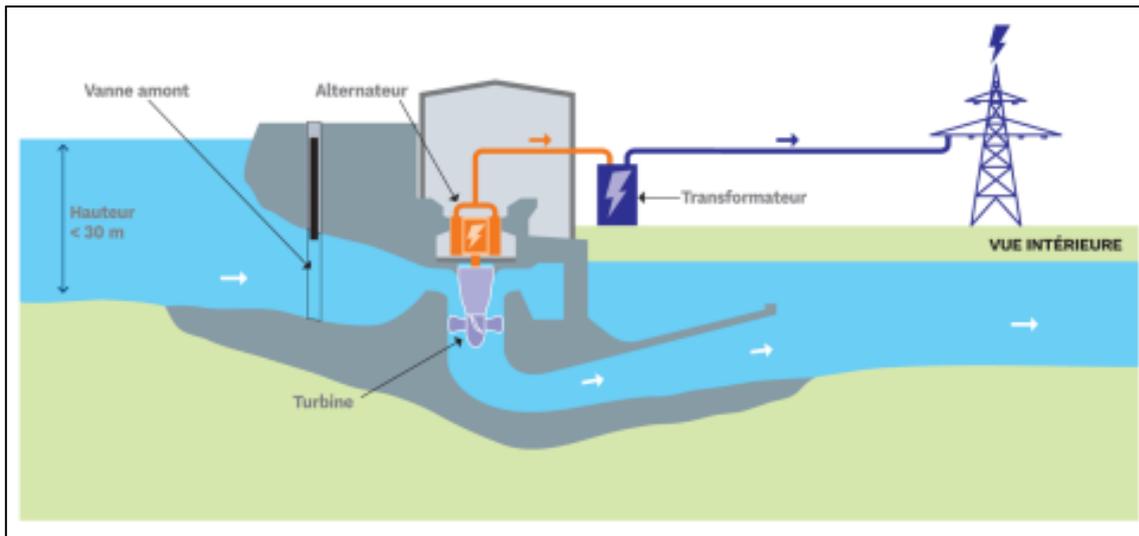
consiste à étaler des couches de matériaux successives, préalablement humidifiées si nécessaire, pour obtenir le compactage recherché. Son lac de retenue a une superficie de 17 km<sup>2</sup>. La production d'énergie électrique est assurée par quatre (4) groupes de type Kaplan dont trois (3) groupes de 90 MW et 5 MW comme le montre le **tableau 7** (Portail officiel du gouvernement de Côte d'Ivoire, consulté en octobre 2022).

**Tableau 7 :** *Quelques caractéristiques principales du barrage hydroélectrique de Soubré*

<b>Caractéristiques</b>	
Nom du barrage	Soubré
Année de mise en service	2018
Coordonnées géographiques (UTM)	29 N 759615 642097
Structure responsable d'exploitation	CI-ENERGIES
Fleuve	Sassandra
Superficie réceptrice du site du barrage (Km <sup>2</sup> )	2000
Bassin versant (Km <sup>2</sup> )	62 000
Type de barrage	Terre et enrochements
Volume de barrage (million m <sup>3</sup> )	83
Superficie du lac de retenue (Km <sup>2</sup> )	17,3
Type de turbine et nombre de groupes	Kaplan / 4
Puissance totale installée (MW)	275
Production annuelle (GWH)	1600
Hauteur de chute nominale (m)	43
Débit total maximal (m <sup>3</sup> /s)	714
Apports annuels année moyenne (Mm <sup>3</sup> /an)	14 000

*Source : recherches documentaires, 2020*

C'est donc un barrage avec une centrale de basse chute ou "fil de l'eau" (**figure 30**). Le réseau de transport d'énergie de l'aménagement hydroélectrique de Soubré est constitué d'une ligne haute tension de 225 KV de 365 km allant de Soubré à plusieurs autres aménagements hydroélectriques dont Taabo et Yopougon 2.



**Figure 30 :** Schéma de process d'une centrale de basse chute ou fil de l'eau (EDF, 2022)

### 2.3.6.2.3 Impacts du barrage hydroélectrique de Soubré dans la région du Sud-ouest ivoirien

La construction d'un barrage hydroélectrique modifie le cours des choses au sens propre comme au sens figuré, l'effacement d'un paysage et la création d'un autre (J. L. Bordes, 2010, p.70).

Sur le plan des effets bénéfiques, l'aménagement hydroélectrique de Soubré a été un facteur de développement économique et d'impulsion de la région. L'objectif du gouvernement ivoirien était d'assurer la sécurité énergétique du pays tout en luttant contre les disparités régionales. Il a donc amélioré la production énergétique du pays et joué le rôle d'un complexe industriel de production et de transport d'énergie pour satisfaire les besoins des ménages et des unités industrielles. En conséquence, le barrage de Soubré représente un accroissement de 65 % avec une capacité de 1170 GWh générée (Portail officiel du gouvernement de Côte d'Ivoire, consulté en octobre 2022).

Toujours sur les externalités positives, l'aménagement du barrage de Soubré a engendré la forte urbanisation de la ville de Soubré et de sa périphérie (Y. G. P. Soro et *al.*, 2022, p. 14). De nombreuses cités modernes ont été construites pour les villages recasés dont Kouamékro, Kopéragui et Kpéhiri. Ils ont été dotés d'équipements d'intérêt collectif. Selon CI-ENERGIES, Maître d'ouvrage de ce projet, les populations déplacées ont bénéficié de 389 logements construits (**tableau 8**).

**Tableau 8 : Caractéristiques des logements construits dans le cadre du recasement des ménages impactés par le barrage hydroélectrique de Soubré**

Nombre de personnes par ménage	Nombre de pièces par habitat	Superficie utile (m <sup>2</sup> )	Kopéragui	Kpéhiri	Kouamékro	Total de logements à construire	Total de logements construits
1 à 2	2	200 à 250	41	21	0	63	62
3 à 5	3	300 à 350	51	48	14	84	113
6 à 10	4	300 à 400	46	57	23	126	126
+ de 10	5	400 à 500	17	49	22	75	88
<b>Total de logements construits</b>			<b>155</b>	<b>175</b>	<b>59</b>	<b>348</b>	<b>389</b>

Source : CI-ENERGIES, 2020

Par ailleurs, la construction du barrage de Soubré a créé plus de 3000 emplois selon le gouvernement de Côte d'Ivoire en 2017. La pêche est désormais une activité en croissance source de revenus importants pour les populations. Un vaste périmètre autour du site du barrage est protégé pour préserver la biodiversité (Fraternité Matin, mars 2017).

Toutefois, la construction d'un barrage hydroélectrique n'a que des aspects bénéfiques. De nombreux ménages et villages ont été déplacés. En effet, l'aménagement du barrage hydroélectrique de Soubré a enrayé en partie ou totalement les villages Kpéhiri, Kouamékro et Kopéragui, des départements de Soubré. De nouvelles localités à la périphérie de la ville ont été créées. Ce sont au total 2 483 personnes déplacées dont 496 personnes de Kouamékro, 709 personnes de Kopéragui, une partie de la population de Kpéhiri, soit 1 253 personnes et de 25 personnes de Gnamangui (CI-ENERGIES, 2020).

Sur le plan économique, l'aménagement du barrage a occasionné une réduction des productions agricoles par la perte de plantation et une raréfaction d'apport de denrées agricoles. L'appauvrissement des populations qui accueillent le projet constituent à moyen et long terme des motifs sérieux de crises sociales (Y. G. P. Soro et *al.*, 2022, p. 15).

Sur le plan écologique, la mise en eau du lac a entraîné la destruction du couvert végétal et la consommation de vastes superficies de terres lors de sa réalisation avec pour conséquences des déplacements massifs de populations. La fragilisation de la couverture végétale a alors exposé les sols aux phénomènes d'érosion qui se généralisent sur l'ensemble du bassin. Du fait de sa position géographique, la ville de Soubré avec ce barrage constitue une porte avancée de la zone portuaire avec un afflux probable de population. (Y. G. P. Soro et *al.*, 2022, p. 14).

Enfin, sur le long terme, la présence du barrage pourrait amplifier le phénomène d'urbanisation non maîtrisée à l'intérieur du bassin-versant à l'exutoire de Soubré dans un contexte d'exposition permanente au risque d'inondation fluviale.

### **Conclusion partielle**

Le bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré est caractérisé par différents activités et aménagements sur lesquels repose son dynamisme. Toutes ces activités et aménagements participent à l'essor socio-économique de la région. Certains constituent des facteurs de prédisposition du risque d'inondation.

La deuxième partie suivante de cette étude met en exergue les données et la méthodologie adoptées pour l'analyse des crues et risques d'inondation fluviale dans la section aménagée du bassin-versant du Sassandra à l'exutoire de Soubré, notre zone d'étude.

## **DEUXIÈME PARTIE**

### **DONNÉES ET APPROCHES MÉTHODOLOGIQUES DE L'ÉTUDE**

**Chapitre 3 : Données et méthodes d'acquisition de l'information  
de l'étude**

**Chapitre 4 : Méthodes de traitement des données**

## **Introduction de la deuxième partie**

Cette seconde partie de ce manuscrit met en évidence les données sollicitées pour cette étude dans le chapitre troisième et les techniques de leur traitement dans le chapitre quatrième. Il s'agit des données textuelles, hydrométriques et pluviométriques, des données cartographiques et satellitaires, des données d'observations et d'enquêtes de terrain. Ces données ont servi pour l'analyse des crues et risques d'inondation fluviale dans le bassin-versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré.

En ce qui concerne les méthodes et techniques de traitement utilisées, elles sont essentiellement statistiques, cartographiques et hydrologiques. Ces méthodes ont pour objectif de mieux appréhender le caractère des crues et l'analyse des facteurs et risque d'inondation fluviale dans le bassin-versant.

## **CHAPITRE 3 : DONNÉES ET MÉTHODES D'ACQUISITION DE L'INFORMATION DE L'ÉTUDE**

Ce chapitre présente les sources et la qualité des données collectées pour cette étude. Il s'agit des données pluviométriques et hydrométriques, des données cartographiques et satellitaires, des données d'observations et d'enquêtes de terrain sans toutefois oublier les données textuelles.

### **3.1 Sources et qualités des données collectées**

#### **3.1.1 Documents textuels**

La documentation constitue une étape importante dans la réalisation de cette étude. Les documents textuels sont constitués d'informations issues des travaux de recherche, thèses de fin de cycle, revues et publications scientifiques, rapports de séminaires et projets d'études en rapport avec la présente recherche.

Ces données proviennent des bibliothèques d'instituts et centres de recherche dont l'Institut de Géographie Tropicale (IGT) et de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Par ailleurs, à l'aide d'internet des données ont été téléchargées en ligne. C'est l'exemple des données du Centre de Recherche sur l'Épidémiologie des Désastres (CRED, EM-DAT) et des données de réanalyses. Le CRED constitue l'une des sources fiables de données en ligne relatives aux catastrophes et risques naturels à travers le monde. Ainsi, toute la bibliographie utilisée a été acquise au moyen d'internet. Plusieurs ouvrages de disciplines autre que la géographie ont été téléchargés et exploités. Il s'agit des ouvrages en lien avec l'hydrologie et les statistiques descriptives. De plus, des données documentaires ont été collectées auprès du Service Technique de la Direction de Production d'Électricité de la Compagnie Ivoirienne d'Électricité (CIE). Aussi, des données iconographiques ont-elles-été obtenues dans plusieurs documents.

Enfin, la consultation de ces diverses données a orienté la rédaction des méthodes de traitement de l'information. En résumé, la recherche textuelle et documentaire se veut indispensable pour atteindre les objectifs d'étude fixés.

#### **3.1.2 Données hydroclimatiques (hydrométriques et pluviométriques)**

Ces données sont relatives aux informations et relevés des stations du réseau d'observation météorologique du bassin-versant aménagé de Soubré. Il s'agit des deux (2)

stations hydrométriques (Soubré et Piebly) et deux (2) autres stations pluviométriques notamment les stations météorologiques de Soubré et Buyo. Elles sont constituées des hauteurs de pluies tombées et des débits du fleuve Sassandra directement mesurés ou calculés à partir d'une courbe de tarage de manière continue ou discontinue, voire épisodique. Les données de pluie couvrent la période de 1989 à 2019 et les données de débits de 1980 à 2019.

Les données de précipitations ont été acquises auprès de la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) et les données de débits ont été fournies par la Direction de l'Hydraulique Humaine (DHH).

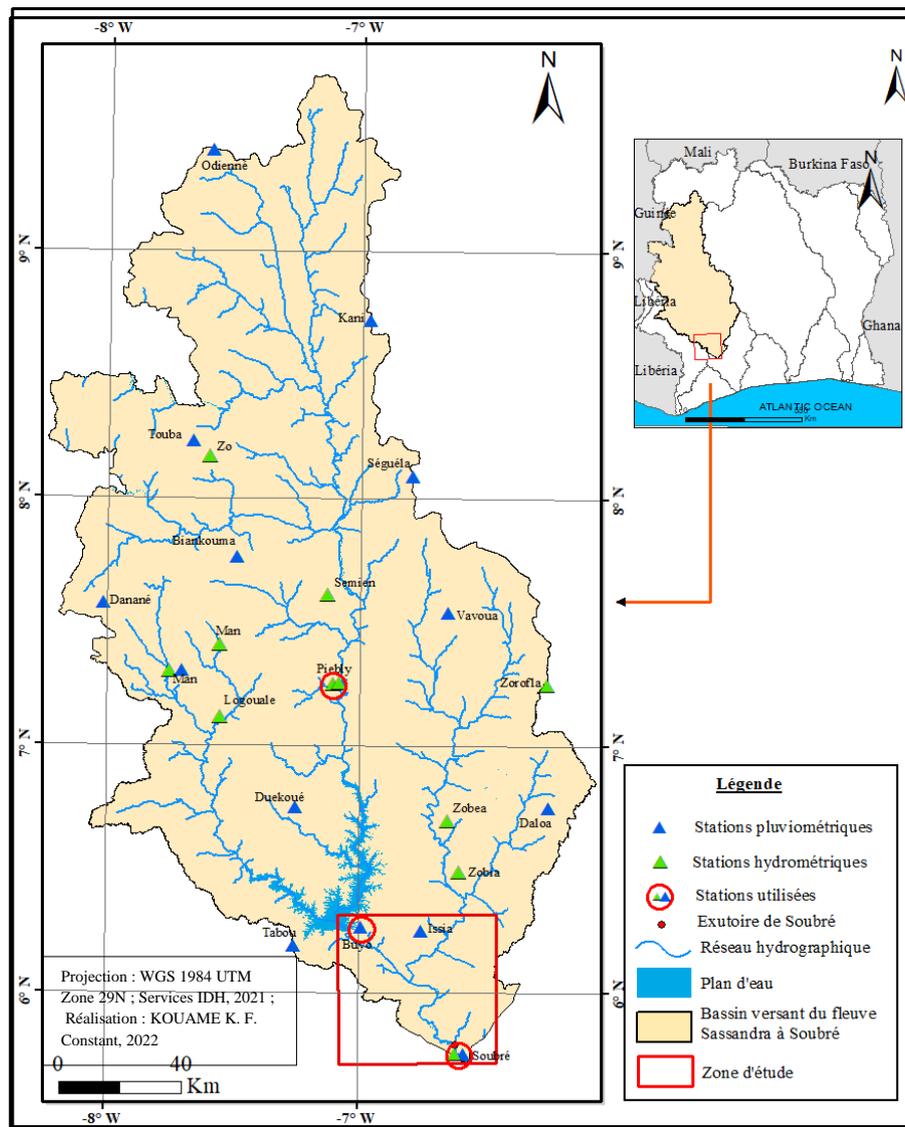
### ***3.1.2.1. Choix des stations de mesures et échelle spatio-temporelle***

Avant d'entreprendre cette étude statistique des débits et précipitations, il importe de s'assurer que l'information disponible est complète et ne peut pas être améliorée. En d'autres termes, sachant quelle station météorologique à considérer, il faut vérifier si la série des débits ou précipitations en cette station est suffisante. Dans le cas contraire, on recherche s'il n'y a pas d'autres stations hydrométriques plus anciennes ou des stations pluviométriques également plus anciennes qui soient susceptibles d'accroître l'information disponible (P. Dubreuil, 1994, p.38).

De ce fait, la sélection des stations s'est effectuée en tenant compte :

- du nombre d'année d'observation, à savoir supérieure ou égale à trente (30) années comme le recommande les normes de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM, 2012, p.30). L'OMM considère qu'une période de trente (30) ans est assez longue pour éliminer les variations interannuelles, car toute étude hydrologique est basée sur l'exploitation de séries de données recueillies pendant des périodes plus ou moins longues, continues ou discontinues.
- le dernier critère concerne la position géographique de la station par rapport à la zone aménagée du bassin à l'exutoire de Soubré. Ce critère permet de mettre en évidence les stations qui présentent des variations suspectées non naturelles, typiquement lorsque les changements sont radicaux, généralisés sur un grand nombre d'indices hydrologiques. En effet, le fonctionnement des barrages hydroélectriques modifie le cours naturel du fleuve en aval. L'intérêt de ce critère réside dans l'utilisation des données hydrométriques (débits) pour la prévision des crues dans un contexte naturel d'écoulement du fleuve. Par conséquent, le choix a été porté sur les stations

météorologiques de Buyo et Soubré pour les données pluviométriques. Quant aux données hydrométriques, les stations de Piebly et Soubré ont été sollicitées (**figure 31**).



**Figure 31** : Répartition géographique des stations météorologiques dans le bassin-versant

En ce qui concerne particulièrement la station de Piebly, elle se situe en amont du lac-barrage de Buyo. Les débits ne sont pas influencés par le barrage de Buyo, avant d’intégrer la zone du bassin étudié. Cette approche se justifie lorsqu’on souhaite évoluer en cours d’eau naturels, et du fait de la forte proportionnalité entre les débits (annuels, mensuels et journaliers) malgré l’influence des autres facteurs physiographiques (A. Assani et *al.*, 2007, p. 131).

Sur le plan de l’échelle spatio-temporelle des données utilisées, les séries de données de pluie couvrent la période 1989 - 2019 et les données de débits la période de 1980 à 2019. En outre, vu les manipulations envisagées, ces différentes chroniques de données ont été choisies

avec des pas de temps annuels et mensuels pour les hauteurs pluviométriques. Les données de débits ont été choisies au pas de temps journalier. Ces données pluviométriques sont importantes car elles ont permis d'analyser l'évolution spatio-temporelle et les caractéristiques des précipitations ainsi que leur rôle dans la genèse des crues et inondation. Quant aux données hydrométriques, elles ont permis d'apprécier le régime hydrologique, son implication et la modélisation hydrologique des crues pour des périodes de retour choisies.

Cependant, les données issues des différents fichiers des valeurs brutes des précipitations et débits sont souvent entachées d'erreurs aléatoires d'origines diverses à savoir, les erreurs de transmission, d'archivage ou même d'appareillage et de modification de l'environnement du site de mesure.

### ***3.1.2.2. Critiques des données pluviométriques et hydrométriques***

L'analyse exploratoire des données brutes de précipitations disponibles de la station de Buyo fait état d'une absence de relevés allant de la période de novembre 1983 à décembre 1984, soit 13 mois de données manquantes (lacunes au pas de temps annuel). Tandis que dans cette même région à environ 70 km à vol d'oiseau en aval, la station pluviométrique de Soubré présente des relevés de précipitations de cette même période. Par conséquent, l'exploitation des séries de données recueillies et leur analyse statistique exigent de celles-ci une homogénéité de leurs composants pour disposer de chroniques complètes, fiables et exploitables. Cependant, selon D. Koumassi (2014, p.66) citant S. Ardoin (2004), la reconstitution des données manquantes est toujours entachée d'incertitudes, quel que soit le procédé mis en œuvre. Parmi ces méthodes, il y a la méthode des doubles cumuls.

En plus de ces données premières (données observées), des données d'estimations satellitaires maillées (températures, précipitations, Évapotranspiration potentielle, etc.) ont été obtenues sur différentes plateformes de données climatiques interpolées.

### ***3.1.2.3. Les données climatologiques interpolées***

#### ***3.1.2.3.1 CHIRPS : Le Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data***

Les données du CHIRPS sont un ensemble de données pluviométriques quasi mondiales sur plus de 35 ans. Couvrant 50°S-50°N (et toutes les longitudes) et allant de 1981 à presque aujourd'hui. CHIRPS intègre notre climatologie interne, CHPclim, des images satellites à résolution de 0,05° et des données de stations in situ pour créer des séries chronologiques de

précipitations journalières maillées pour l'analyse des tendances et la surveillance saisonnière de la sécheresse (<https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/>, consulté le 22 juillet 2022). Ainsi, les données de précipitations journalières du CHIRPS ont servi à la modélisation hydrologique en absence de données journalières produites par la SODEXAM.

#### **3.1.2.3.2 Les données de température JRA-55 du JMA**

Ce sont les données produites lors de la deuxième réanalyse atmosphérique mondiale effectuée par l'Agence météorologique japonaise (JMA) sur 55 ans nommées JRA-55. Il couvre la période à partir de 1958, lorsque les observations régulières par radiosondage ont commencé à l'échelle mondiale. JRA-55 est la première réanalyse complète qui a couvert le dernier demi-siècle depuis la réanalyse sur 45 ans du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ERA-40), et est la première à appliquer une analyse variationnelle en 4 dimensions à cette période (<https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/focus/2020/fact-sheet-reanalysis>, consulté le 22 juillet 2022). Ces données de températures ont été utilisées dans la mise en application du modèle hydrologique GR4J.

Quant aux données d'évapotranspiration, elles ont été produites en utilisant la formule proposée par L. Oudin et *al.* (2005). Cette méthode utilise des données de températures moyennes et latitude de la station de mesure pour estimer l'évapotranspiration potentielle.

#### **3.1.2.4. Données sur l'occupation du sol**

Ces données concernent l'occupation et les usages du sol, c'est-à-dire les champs et exploitations agricoles riveraines du fleuve, les cours d'eau, etc. Elles permettent d'apprécier l'évolution des états des surfaces occupées par les différentes formations végétales, notamment les forêts, les jachères, les cultures, les plans d'eau et le bâtis. En d'autres termes, ces données ont permis l'étude de la dynamique de l'espace, donc du changement d'affectation du sol dans le bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré. Cela a permis également d'identifier les secteurs les plus vulnérables au risque d'inondation fluviale. L'obtention de ces données s'est faite à partir des images satellitaires obtenues après traitement confirmé par l'observation sur le terrain.

#### **3.1.2.5. Données satellitaires et cartographiques**

Il s'agit essentiellement des données satellitaires (Landsat et SRTM). Elles ont été téléchargées à partir du site internet (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) de L'Institut d'études géologiques des États Unis (en anglais : *United States Geological Survey*, USGS). L'USGS est

un organisme gouvernemental américain qui se consacre aux sciences de la terre. Ces plateformes satellitaires couvrent l'ensemble de la terre avec une longue série temporelle d'images, et des caractéristiques spatiales et spectrales appropriées pour la détection de changements de couverture végétale et de l'occupation du sol (P. Dusseux et *al.*, 2019, <https://journals.openedition.org/cybergeo/33245>). Cependant la temporalité de ces capteurs entraîne souvent des manques de données et la présence de défauts dus à certains facteurs comme la couverture nuageuse ou l'ombrage dense. La combinaison des années d'acquisition permet de résoudre ces déficits de qualité d'images.

Ainsi, la zone aménagée du bassin-versant du Sassandra à l'exutoire de Soubré couvre deux (2) scènes (197-055 et 198-056). Les images des capteurs sollicités sont les images spectrales Landsat 8 OLI/TIRS (Imagerie terrestre opérationnelle / Capteur Infrarouge Thermique) de l'année 2020 avec une résolution 30 m x 30 m (**tableau 9**).

**Tableau 9 : Caractéristiques des images spectrales utilisées**

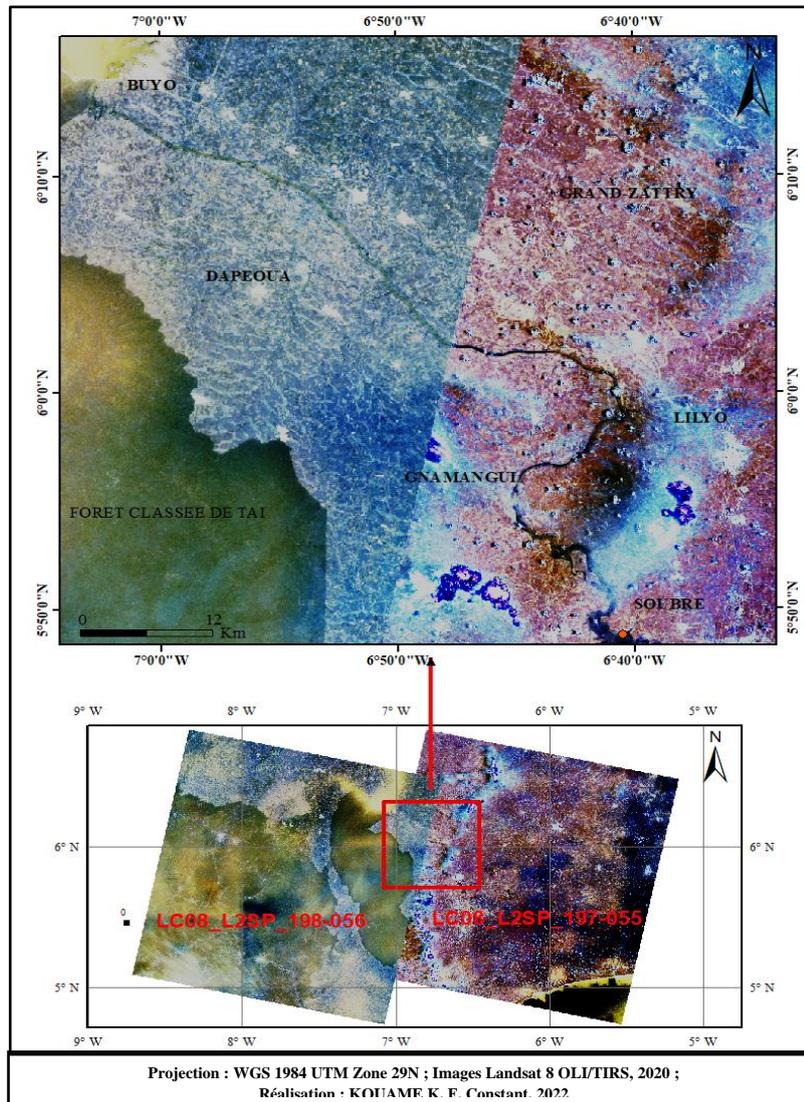
LANDSAT 8 OLI/TIRS		
Bandes spectrales	Résolution spectrale (µm)	Résolution spatiale (m)
Band 1 - Coastal aérosol	0,43 à 0,45	30
Band 2 - Bleu	0,45 à 0,51	30
Band 3 - vert	0,53 à 0,59	30
Band 4 - Rouge	De 0,64 à 0,67	30
Bande 5 - proche infrarouge (NIR)	0,85 à 0,88	30
Band 6 - MIR 1	1,57 à 1,65	30
Band 7 - MIR 2	02.11 à 02.29	30
Band 8 - panchromatique	0,50 à 0,68	15
Band 9 - Cirrus	1,36 à 1,38	30

*Source* : [https://landsat.usgs.gov/band\\_designations\\_landsat\\_satellites.php](https://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php), 2020

Elles ont été prises dans une période propice notamment la période sèche de décembre à février avec une couverture nuageuse inférieure à 10 %. Après téléchargement de ces scènes, un mosaïquage a été réalisé afin d'obtenir une image unique exploitable contenant la zone d'étude (**figure 32**).

De même, l'image Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de 2014 d'une résolution de 30 mètres a été utilisée pour délimiter la zone d'étude afin de permettre une bonne transcription de la réalité du terrain en termes de relief. Le modèle numérique de terrain (MNT) obtenu a permis de mettre en œuvre des dérivées de la topographie (pentes, orientation, courbures, altitude), des analyses et la recherche de directions d'écoulement des eaux pour les réseaux hydrographiques.

Quant aux fonds de cartes, elles concernent les cartes géologique et pédologique de de la Côte d'Ivoire à l'échelle 1/2000000 obtenues dans les archives textuelles de l'ORSTOM.



*Figure 32 : Mosaïque des deux (2) scènes couvrant le bassin aménagé duassandra*

## 3.2. Méthodes d'acquisition de l'information

### 3.2.1 Données issues d'enquêtes sur le terrain

Ces informations proviennent des données recueillies à travers l'observation directe et les entretiens effectués sur le terrain. Elles ont permis d'analyser la dynamique des populations au sein du bassin, mais surtout de mieux cerner leur vulnérabilité au risque d'inondation par leurs perceptions des risques climatiques.

### 3.2.1.1. *Observation directe*

Observer exige une attention volontaire et une intelligence orientée selon un objectif, mais aussi dirigée par un objet afin de recueillir des informations (H. Kakai, 2008, p. 3). Sur le terrain, notre attention s'est portée sur les enjeux riverains du fleuve Sassandra, notamment l'identification des enjeux caractérisés par les infrastructures, les villages et agglomérations, les exploitations agricoles et leur proximité au lit du fleuve et enfin les aménagements et ouvrages hydroélectriques des barrages de Buyo et Soubré.

### 3.2.1.2. *Entretiens*

Le relevé des informations a obéi à une logique d'entretien ouvert. Il s'agit d'entretiens semi-directifs et d'interviews qui sont des techniques d'investigation souvent utilisées. Cette enquête de terrain est orientée vers les usagers quotidiens des services écosystémiques du bassin (gestionnaire du barrage, paysans, pêcheurs, vendeurs, responsables coutumiers des localités riveraines du fleuve), mais surtout les personnes cibles qui ont été choisies sur la base de plusieurs critères.

Par ailleurs, notre entretien a été orienté par un questionnaire-guide (annexe 7) qui s'est appuyé sur plusieurs critères d'ordre qualitatif énumérés dans le tableau 11. En effet, cette collecte des données socio-économiques de terrain a porté sur plusieurs points en lien avec les objectifs visés par cette étude.

**Tableau 10 : Critères des entretiens de terrain**

	Qualitatifs/ Quantitatifs
Critères	<ul style="list-style-type: none"><li>-Les savoirs et connaissances endogènes sur les phénomènes d'hydroclimatiques à l'échelle du bassin d'étude</li><li>-La proximité des exploitations agricoles et agglomérations au fleuve Sassandra et ses affluents (5 km)</li><li>-La position géographique des enjeux et exploitations agricoles par rapport aux barrages hydroélectriques</li><li>-Localités situées à 5 km à équidistance du fleuve Sassandra et ses affluents</li></ul>

*Source : recherches de données, 2020*

Sur la base du critère de distance des localités par rapport au fleuve Sassandra, ce sont 28 localités (villages et villes) riveraines qui ont été identifiées. Ces différentes localités sont situées de part et d'autre des deux rives de la section aménagée du bassin, partant du barrage de Buyo jusqu'à l'exutoire de Soubré. Ainsi sur la base d'un choix raisonné et pour des contraintes

de terrain, ce sont au final 14 localités qui ont été touchées par les enquêtes de terrain (tableau 11).

*Tableau 11 : Localités riveraines du fleuve Sassandra dans sa section aménagée de l'exutoire de Soubré jusqu'à Buyo*

Localités	
Rive droite	Rive gauche
Galéa – Kpéhiri - Kopéragui - Gnamangui (Amaragui - Tiémé - John Sarakagui – Amaragui - Adamagui – Gbatina) – Logbogba – Trawouninkro – Gnagboya – V1-V2 – V3 -V4	Soubré – Mayo- Gueyo – Sayo – Badayo – Obrouayo – Niapoyo – Konédougou - Petit Goa 2 – Loboville – Dapéoua - Belleville – Gribouo - Logbozoa – Gbibly - Buyo
14 localités où les entretiens ont eu lieu	
Galéa – Kpéhiri - Gnamangui	Soubré – Mayo- Gueyo – Sayo – Badayo – Obrouayo – Niapoyo – Konédougou, Petit Goa 2 - Loboville

*Source : données textuelles, 2020*

Concernant les villages, les comités villageois de gestion du foncier rural (CVGFR) ont été sollicités afin de mener à bien les investigations de terrain. Ensuite, compte tenu de la complexité du terrain et de l'absence de données fiables, ce sont au total (2) entretiens (focus-group) par localité. Les entretiens ont été constitués de 2 catégories d'acteurs : les membres des comités villageois et des paysans disposant de parcelles riveraines au fleuve Sassandra et affluents. Ainsi, 28 entretiens ont été réalisés au niveau des villages. Ensuite, cette enquête a touché 22 autres personnes relevant de la gestion des barrages, des usagers (laveurs, pêcheurs et vendeuses de poissons, etc.) du fleuve Sassandra à Soubré (**photo 8**). Ce sont donc au total 50 entretiens qui ont été réalisés.



*Photo 8 : Séance d'entretien avec un usager (pêcheur) du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré (Cliché, Kouamé K., 2020)*

### **3.3 Outils et matériels de traitement des données**

Les données et les informations collectées ont été traitées puis organisées en fonction des objectifs de l'étude. Tous les traitements ont été faits à partir d'un certain logiciels. Les tableaux et figures d'illustration ont été réalisés à partir du logiciel Microsoft Excel (version 2016) et pour le traitement de textes Microsoft Word (version 2016).

Le logiciel KHRONOSTAT a permis le traitement des données hydropluviométriques pour l'analyse de la dynamique hydroclimatique. Ce logiciel comporte plusieurs tests statistiques qui ont été appliqués aux séries chronologiques utilisées.

Le logiciel ArcGIS version 10.8 qui est un outil SIG et de traitement de données cartographique a permis la réalisation des différentes cartes de cette étude grâce à ses nombreuses fonctionnalités intégrées. Il a permis spécifiquement la modélisation des différents croisements de données pour l'évaluation des facteurs de risque d'inondation fluviale dans le bassin aménagé de Soubré.

Le logiciel R version 3.4.4 avec un environnement de programmation, a permis l'analyse et le traitement des données de la mise en œuvre de l'application du modèle hydrologique GR4J pour la simulation des débits de crue.

Le logiciel HYFRAN-PLUS a permis de réaliser l'analyse fréquentielle hydrologique notamment l'étude des crues à travers le traitement des valeurs extrêmes de débits. Il peut être utilisé également pour l'analyse de n'importe quelle série de valeurs extrêmes et selon différents pas de temps tout en respectant les conditions d'indépendance et de distributions des observations (B. Bobée et S. El Adlouni, 2014, p. 16).

#### **Conclusion partielle**

Ce chapitre a présenté les différentes données utilisées dans le cadre de cette étude. Il s'agit notamment des données hydrométriques (1980-2019), pluviométriques (1989-2019), des données cartographiques et satellitaires, des données d'observations et d'enquêtes de terrain. Les outils et matériels de traitement de l'information ont été également décrits.

Le chapitre suivant s'attarde sur les traitements méthodologiques appliqués pour parvenir aux résultats de cette étude.

## CHAPITRE 4 : MÉTHODES DE TRAITEMENT DES DONNÉES

Les techniques et méthodes de traitement des données utilisées pour cette étude sont diverses. Elles partent des méthodes statistiques admis en hydrologie aux méthodes d'analyse multicritère, aux méthodes cartographiques à travers l'utilisation de plusieurs outils de SIG et enfin à celles des prévisions hydrologiques. Ces méthodes ont permis d'appréhender le caractère des paramètres de crue et l'évaluation du risque d'inondation fluviale à l'échelle du bassin aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré.

### 4.1. Comblement des données hydrométriques (méthode des débits spécifiques)

Cette méthode a été appliquée par plusieurs auteurs dont V. M. Sorokoby (2013, p. 63) dans le bassin-versant de Soubré et M. R. Fossou et *al.* (2020, p. 70) sur le bassin-versant du N'Zi en Côte d'Ivoire.

L'utilisation de cette méthode suppose que l'hypothèse de pseudo-proportionnalité est vérifiée. C'est-à-dire que les stations à partir desquelles les séries sont considérées appartiennent aux mêmes conditions climatiques. Il est important d'identifier la station de base ou de référence pour pouvoir détecter et corriger les erreurs de la station à étudier.

Dans cette étude, le comblement des données de débits de la station de Soubré s'est fait avec les données de la station de Piebly comme référence, située en aval de la première. Les deux stations hydrométriques sont placées sur le même cours d'eau (fleuve Sassandra) et les superficies des sous-bassins de Soubré et Piebly fournies par la direction de l'hydrologie sont connues. Cette méthode est basée sur une relation linéaire de type d'équation suivante :

$$\frac{Q1}{S1} = \frac{Q2}{S2} \quad (7)$$

Avec ; Q1 et Q2 représentant les débits observés aux exutoires des stations 1 et 2 ; S1 et S2 les superficies des sous-bassins.

Cela a permis de combler les valeurs de débits lacunaires en vue de la modélisation hydrologique avec le modèle GR4J.

### 4.2. Régionalisation du champ de pluie

La régionalisation ou la généralisation spatiale des données pluviométriques est une approche basée sur des relations statistiques avec des propriétés mesurables sur des bassins-

versants non jaugés dans un milieu donné (D. J. Kodja, 2018, p. 76). Elle s'opère à travers un processus d'estimation rendant possible la prévision de valeurs inconnues à partir de valeurs mesurées en un certain nombre de sites localisés dans un bassin-versant. Il existe une pluralité de méthodes permettant ce transfert d'information hydropluviométrique d'un point jaugé à un autre non jaugé. Il y a les méthodes d'interpolation spatiale, les méthodes d'analyses fréquentielles régionales et la méthode des moyennes arithmétiques, et bien d'autres.

Concernant les méthodes d'interpolation, il y a celle de l'interpolation par polygones de Thiessen, et les fonctions de corrélation spatiale (Krigage ordinaire par bloc). Ces méthodes d'interpolation utilisent des approches géométriques ou les fonctions de corrélation spatiale pour estimer à un site cible la précipitation associée à un événement ou à une fréquence donnée (E. Vissin, 2007, p. 99).

Dans le cadre de cette étude, le choix est porté sur la méthode Inverse Distance Weighted désignée souvent dans la littérature par « Méthode IDW ». Elle se base sur le principe que, pour une même variable, l'influence relative d'un point d'observation diminue avec la distance qui le sépare du point de l'espace dont la valeur est à estimer (D. Baka et *al.*, 2019, p. 3). La moyenne des mesures des stations d'observation est calculée avec un poids plus important donné aux points les plus proches. La valeur prédite pour un point de l'espace est déterminée par la formule :

$$Z = \left[ \sum_{i=1}^N Z_i / d_i^k \right] / \left[ \sum_{i=1}^N 1 / d_i^k \right] \quad (8)$$

Où :

Z = la variable estimée ;

Z<sub>i</sub> = la valeur connue au point de mesure i ;

d = la distance entre le point de valeur inconnue et le point de mesure i ;

N = est le nombre de sites utilisés pour l'interpolation ;

k = la puissance à laquelle est élevée la distance ; prenant souvent la valeur 2

### 4.3 Méthode d'analyse du régime hydropluviométrique et des fréquences des précipitations

La mise en évidence du régime pluviométrique et la distribution des précipitations a nécessité l'utilisation de paramètres et méthodes statistiques communément admises en hydrologie.

#### 4.3.1 Étude des tendances et paramètres de dispersion

La caractérisation des régimes pluviométrique et hydrologique à partir des données des différentes stations d'étude peut se faire à travers les paramètres tels que la moyenne arithmétique et l'écart-type. Ces paramètres ont été appliqués dans diverses études similaires (E. Vissin, p. 84-85 ; V. M. Sorokoby, 2013, p. 64-65 ; D. Koumassi, 2014, p. 81).

#### 4.3.2 La moyenne arithmétique

C'est le paramètre fondamental de tendance centrale, représentée ici par la « normale », moyenne calculée sur une série de 31 ans. Elle s'exprime de la façon suivante :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (9)$$

Avec :

- $x_i$  la valeur de la hauteur de pluie ou de débit pour l'année  $i$  et
- $n$  le nombre d'années.

La moyenne  $\bar{X}$  permet de caractériser le régime pluviométrique et de calculer les indices de dispersion les plus significatifs.

#### 4.3.3 Les paramètres de dispersion

L'analyse de la dispersion autour de la moyenne mensuelle et interannuelle s'apprécie à travers les différents paramètres statistiques tels que, l'écart-type, l'écart moyen absolu et le coefficient de variation.

- L'écart-type est par excellence l'indicateur de la variabilité. Il permet d'évaluer la dispersion des valeurs autour de la moyenne « normale ». Il se détermine par le calcul de la racine carrée de la variance :

$$\sigma(x) = \sqrt{V} \quad (10)$$

Où  $V$  est la variance

- Le coefficient de variation (V) est le rapport de l'écart type par la moyenne. Il se détermine ainsi :

$$V = \frac{\sigma(x)}{\bar{x}} \quad (11)$$

Le calcul de l'écart-type permet de standardiser les données pour les transformer en anomalies centrées réduites, donnant ainsi à chaque valeur le même poids.

#### 4.3.4 Les indices hydropluviométriques de caractérisation des précipitations

Les indices hydrologiques et pluviométriques permettent d'analyser l'évolution, le rythme et les variations de pluies dans une région donnée. Ils mettent ainsi en exergue la distribution des pluies qui constituent le paramètre prépondérant dans la survenance des crues et inondations.

##### 4.3.4.1 Le cumul pluviométrique (CP)

Les totaux pluviométriques permettent d'étudier les quantités de pluies et leurs rythmes. Ils sont obtenus par la méthode du simple cumul. De nombreux travaux l'ont utilisé pour des études pluviométriques dont V. M. Sorokoby (2013, p.65).

$$T_{pan} = ni_1 + n_2 + \dots + n_{12} \text{ ou encore } (T_{pan} = \sum_1^{12} ni) \quad (12)$$

Avec :

- $T_{pan}$  le cumul pluviométrique annuel
- $N_i$  la valeur mensuelle des précipitations

##### 4.3.4.2 L'indice de pluviosité (IP)

C'est le rapport de la hauteur de précipitation d'une année  $P_i$  à la hauteur moyenne annuelle des pluies  $P_m$  de la série. Une année est qualifiée d'humide si ce rapport est supérieur à 1 et de sèche s'il est inférieur à 1. Pour dégager les grandes tendances (sèche ou humide) de la pluviométrie annuelle et supprimer les faibles fluctuations, on utilise aussi le cumul de l'écart proportionnel à la moyenne qui diffère de l'indice de la pluviosité en soustrayant 1 de la valeur obtenue. Il s'apparente à l'indice de J. W. Nicholson et al. (1988). Ainsi quand la somme des indices croit, il s'agit d'une tendance humide. La tendance est sèche dans le cas contraire. La formule est :

$$IP = \frac{P_i}{P_m} - 1 \quad (13)$$

Cet indice a été utilisé par V. M. Sorokoby (2013, p. 128) dans le bassin versant du Sassandra à Soubré

#### **4.3.4.3 L'indice de précipitation normalisé (ou standardisé-SPI)**

Fruit des recherches et des travaux conduits en 1992 par McKee, Doesken et Kleistn à l'Université d'État du Colorado aux États-Unis, l'Indice de précipitation normalisé (SPI Standardized Precipitation Index en anglais) a été conçu pour quantifier le déficit de précipitations à différentes échelles de temps.

Ces échelles de temps traduisent les incidences de la sécheresse sur la disponibilité des différents types de ressources en eau. De ce fait, il permet de caractériser les déficits de précipitation pour une période donnée et correspond à la transformation de la série temporelle des précipitations en une distribution normale de moyenne nulle et d'écart-type unitaire. C'est un indicateur statistique recommandé par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM, 2012, p. 12) et fortement utilisé pour la caractérisation de phénomènes hydroclimatiques (inondation et sécheresse) locales ou régionales.

Simple et robuste, le calcul de l'indice SPI en un lieu, quel qu'il soit, est basé sur des chroniques de précipitations de longue durée correspondant au laps de temps étudié, de préférence de série chronologique de 50 à 60 ans (OMM, 2012, p. 12). Les calculs et ajustement se font autour de la distribution de la fréquence des précipitations sommées ou moyennées sur une échelle temporelle définie généralement en k-mois (3, 6, 9, 12 et 24 mois). Les valeurs positives de l'indice SPI indiquent des précipitations supérieures à la médiane et les valeurs négatives, des précipitations inférieures à la médiane. Chaque valeur du SPI est alors reliée à au caractère humide ou non de la période concernée. L'indice comporte une échelle d'intensité pour calculer les valeurs positives et négatives en corrélation directe avec les épisodes humides et secs. Il se définit à partir de l'équation suivante :

$$SPI = \frac{P - P_m}{\sigma} \quad (14)$$

Avec :

- $P$  la précipitation totale d'une période (mm)

- $P_m$ , la précipitation moyenne historique de la période (mm)

-  $\sigma$  l'écart-type historique des précipitations de la période (mm)

À l'issue d'une telle opération, il est possible de déterminer le nombre d'années par gamme SPI et la signification correspondante en termes d'ampleur du phénomène climatique (**tableau 12**) :

**Tableau 12 : Différentes valeurs de l'indice SPI et signification**

<b>Classe SPI</b>	<b>Interprétation</b>
2,0 et plus	Extrêmement humide
1,5 à 1,99	Très humide
1,0 à 1,49	Modérément humide
-0,99 à 0,99	Proche de la normale
-1,0 à -1,49	Modérément sec
-1,5 à -1,99	Très sec
-2 et moins	Extrêmement sec

*Source : OMM, 2012, p. 5*

De même, cette étude a analysé les indices SPI sur trois (3) échelles de temps notamment 1 mois, 3 mois et 12 mois.

L'indice SPI calculé sur 1 mois (SPI-1) représente le pourcentage de la normale des précipitations pour une période de 30 jours. Il représente des conditions à courte échéance permettant de suivre les sécheresses météorologiques, l'humidité du sol et le stress hydrique subi par les cultures, en particulier au cours de la période végétative.

L'indice SPI sur 3 mois (SPI-3) établit la comparaison entre les précipitations sur la période de trois mois examinés et les totaux des précipitations pour cette même période de trois mois. Le SPI-3 fournit une indication sur les conditions d'humidité à courte et moyenne échéances et une estimation des précipitations sur une saison. Les mois de septembre, octobre et novembre ont été choisis

Quant à l'indice SPI sur 12 mois (SPI-12), il révèle le modèle de précipitation. Il fournit une indication sur les régimes de précipitations annuelles. Cela favorise une analyse des tendances pluviométriques sur une zone donnée.

#### **4.3.4.4 Estimation de la moyenne mensuelle des données pluviométriques décennales**

La démarche consiste à calculer la moyenne pluviométrique mensuelle sur une période de 10 ans (une décennie) selon l'équation 15 :

$$P_{mens} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} P_i \quad (15)$$

Où :

- $P_{mens}$  est la moyenne pluviométrique mensuelle sur la décennie concernée et

- $P_i$ , la pluviométrie mensuelle pour chaque année constituant la décennie.

Après le calcul des moyennes pluviométriques mensuelles pour chaque décennie, celles-ci sont représentées sur le même graphique. Ceci a l'avantage de permettre une analyse aisée des différentes courbes de variation en vue de révéler la variabilité de la pluviométrie au sein du bassin-versant (V. M. Sorokoby, 2013, p. 65).

#### **4.3.5 Tests statistiques au sein des séries chronologiques**

Les tests statistiques appliqués ont eu pour objectif d'apprécier les éventuelles variations dans les différentes séries de données pluviométriques et hydrométriques utilisées dans cette étude. Cela a permis de caractériser les différents régimes pluviométriques et hydrologiques. En effet, une batterie de tests statistiques existe selon qu'on recherche, la tendance, la périodicité, l'autocorrélation ou l'aspect aléatoire au sein d'une série temporelle. Parmi ces nombreux tests d'analyses statistiques, certains sont couramment utilisés du fait de leur robustesse.

##### **4.3.5.1. Test de « rupture » de PETTITT (Pettit, 1979)**

Le test de Pettitt est adapté à la détection d'un changement de moyenne dans une série chronologique. Il ne suppose aucune distribution particulière des données. Il repose sur les signes des différences entre les valeurs qui forment l'échantillon. La littérature foisonne de l'application de ce test non paramétrique du fait de sa robustesse. Le test de Pettitt a été utilisé pour des analyses dans plusieurs travaux notamment ceux de T. D. Soro et *al.* (2011, p. 6), K. E. Ahoussi et *al.* (2013, p. 36), V. M. Sorokoby (2013, p. 38), D. J. Kodja (2018, p. 79), T. B. Agbanou et M. Paegelow (2018, p. 86)

Selon la formulation du test, l'hypothèse nulle ( $H_0$ ) du test est l'absence de rupture dans la série. La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant  $t$  variant de 1 à  $N$ , les séries  $(x_i)$ ,  $i=1$  et  $(x_i)$ ,  $i=t+1, N$  appartiennent à la même population. Il se définit comme suit :

$$U_{t, N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_y \quad (16)$$

Avec  $D_y = \text{sgn}(X_t - X_j)$ ,  $\text{sgn}(Z)=1$ , tel que Si  $Z > 0$  ; 0 si  $Z = 0$  et si  $Z < 0$

Soit  $KN$  la variable définie par le maximum en valeur absolue de  $U_{t,N}$  pour  $t$  variant de 1 à  $N-1$ . Si  $K$  désigne la valeur de  $KN$  prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur est donnée approximativement par :

$$\text{Prob}(K_n > K) \approx 2 \exp(-6K^2 / (N_3 + N_2))$$

Pour un risque  $\alpha$  de première espèce donnée, si  $\text{Prob}(K_n > K)$  est inférieure à  $\alpha$ , l'hypothèse nulle ( $H_0$ ) est rejetée.

#### 4.3.5.2. Statistique $U$ de **BUISHAND** (Buishand, 1982, 1988)

La statistique  $U$  de Buishand est de nature bayésienne et fait référence au modèle simple. C'est également un test performant pour détecter un changement de moyenne au milieu d'une série. Ce test s'avère performant pour tout changement de moyenne survenant au milieu de la série sur la base d'une hypothèse d'une distribution normale des variables de la série. Son application suppose une distribution *a priori* uniforme pour la position du point de rupture  $m$ . La statistique  $U$  se définit selon l'équation 17 :

$$U = [N(N + 1)]^{-1} \sum_{k=1}^{N-1} \left( \frac{S_k}{D_x} \right)^2 \quad (17)$$

#### 4.3.5.3. Ellipse de contrôle (Ellipse de **P. BOIS**)

Le test de P. Bois est basé sur une méthode fondée sur le cumul des résidus. Elle permet de déterminer un seuil à partir duquel la cassure est significative. La difficulté revient à rechercher une courbe de contrôle telle que tout dépassement conduit à repousser l'hypothèse d'homogénéité de la série avec un seuil de confiance choisi. P. Bois a montré que la courbe de contrôle a une forme ellipsoïdale (ellipse).

Cette méthode permet de dilater les différences, ce qui amplifie largement la clarté du graphique spécialement dans le cas où les écarts-types sont faibles. Dès que les valeurs sortent de cette ellipse l'hypothèse  $H_0$  est rejetée au seuil de confiance  $1-\alpha / 2$ , soit un risque de 1<sup>ère</sup> espèce  $\alpha$ . La région de confiance appelée ellipse de contrôle est définie par la formule suivante :

$$\pm \frac{U_{1-\alpha/2} \sqrt{k(N-k)}}{\sqrt{(N-1)}} D_x \quad (18)$$

$U$  désigne la variable normale réduite. Une relation entre la valeur du seuil de confiance et un nombre maximum admissible de points hors de l'ellipse. Pour que la série étudiée soit déclarée homogène, elle peut être estimée par simulation.

Pour finir, tous ces tests statistiques ont été réalisés grâce au logiciel Khronostat 1.01, développé par le laboratoire Hydrosiences Montpellier. Ce logiciel regroupe plusieurs autres tests de vérification du caractère aléatoire de l'échantillon dont les tests d'autocorrélation et test de corrélation sur le rang.

#### **4.3.6 Analyse de la relation statistique entre la pluie et les débits**

L'analyse de la relation pluie-débit vise à mesurer le degré de liaison ou de dépendance linéaire qui existe entre les précipitations et les écoulements de surface dans le bassin-versant. Il s'est fait à travers un graphique. Cela a permis d'analyser l'évolution des débits par rapport aux précipitations sur une même période de temps.

#### **4.4 Méthode de caractérisation des débits de crues : méthode fréquentielle**

L'analyse des débits extrêmes s'est faite à travers un modèle fréquentiel. Cette méthode a énormément été employée dans plusieurs travaux dont ceux de D. Koumassi (2014, p. 86-90), A. I. Ague et A. Afouda (2015, p. 122-123), D. J. Kodja (2018, p. 91-92), N. Souanef (2015, p.101-124), A. V. S. Assoko et *al.* (2021, p. 118-122).

L'analyse fréquentielle permet de prédéterminer les valeurs extrêmes probables en fonction de leurs importantes périodes de retour (P. Meylan et A. Mussy, 1999, p. 13-14). C'est-à-dire que l'analyse fréquentielle tend à prédire le comportement des cours d'eau tout en déterminant les quantiles correspondants à des périodes de retour données par une approche statistique (J. P. Laborde, 2009, p. 155).

Selon P. Meylan et A. Mussy (1999, p. 13-15), l'analyse fréquentielle est appliquée spécifiquement pour estimer l'ampleur de l'événement temporel  $T_x$  auquel est associée une période de retour  $T$  (quantile de période de retour  $T$  ou de probabilité au dépassement  $p = \frac{1}{T}$ ). L'estimation  $T_x$  de la valeur du quantile s'obtient en ajustant une loi de probabilité  $F(x; \theta)$  à un échantillon de  $n$  observations,  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  où  $\theta$  représente le vecteur de paramètres associé à la distribution de probabilité  $F$ .

L'estimation de la probabilité d'apparition d'un événement hydro-pluviométrique se fait à partir d'une série de débits ou de pluie sur une période d'observation donnée. Ensuite la série observée est échantillonnée pour sélectionner les valeurs maximales.

Dans cette étude, pour l'analyse des fréquences de précipitations, les hauteurs pluviométriques maximales au pas de temps mensuel aux stations de Buyo et Soubré ont été choisies à défaut des précipitations journalières. Quant aux données hydrométriques, ce sont les débits maximums journaliers enregistrés à l'exutoire du bassin-versant de Soubré. Les principales étapes à suivre sont :

- échantillonnage de la série des valeurs ;
- vérification de la série des valeurs à travers des tests d'hypothèses ;
- choix du modèle du modèle fréquentiel (ou d'une loi statistique) ;
- contrôle de l'ajustement ;
- analyse des incertitudes.

#### **4.4.1 Échantillonnage (constitution de la série des valeurs)**

Selon P. Meylan et A. Mussy (1999, p. 15), l'échantillonnage consiste à l'extraction des valeurs les plus significatives de la série. Elle peut se faire de deux manières : la méthode des maxima annuels et la méthode des valeurs supérieures à un seuil. Cette étude a employé la méthode des maxima annuels.

##### ***4.4.1.1 Méthode des valeurs maximales annuelles***

La méthode des maxima annuels consiste à sélectionner la variable maximale de chaque année (J. P. Laborde, 2009, p. 155). Cette méthode utilise l'année comme durée de regroupement et permet de suivre au mieux le régime hydrologique du cours d'eau. Cette approche a été adoptée dans le cadre d'étude similaire (A. M. Kouassi et *al.*, 2018, p. 150).

#### 4.4.1.2 Vérification des tests d'hypothèses

Après constitution des échantillons, les valeurs de la série obtenue sont soumises à des tests statistiques afin d'en vérifier l'indépendance, la stationnarité et l'homogénéité, conditions d'un bon ajustement.

##### 4.4.1.2.1 Test d'indépendance

Ce test permet de vérifier l'absence d'autocorrélation entre les débits. En effet, on parle d'indépendance statistique, lorsque la densité de probabilité jointe d'une série chronologique ou une collection de  $n$  variables aléatoires peut être écrite comme un produit de densité marginale pour chacune des  $n$  variables aléatoires (J. C. Ondo et al., 1997, p. 46). Il se présente selon l'équation suivante :

$$f_{x_1, x_2, \dots, x_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_{x_1}(x_1) \cdot f_{x_2}(x_2) \dots f_{x_n}(x_n) \quad (19)$$

Ou encore selon N. Souanef (2015, p. 61), un échantillon est dit indépendant, si une collection d'événements pris deux à deux vérifie :  $Prob(x_i, x_j) = Prob(x_i)Prob(x_j)$ . Autrement dit, une série de données est dite indépendante si une donnée n'est pas influencée par la donnée qui la précède. Plusieurs techniques statistiques dont celui de Wald-Wolfowitz permettent de vérifier cette hypothèse.

##### - Test de Wald-Wolfowitz

C'est l'un des tests statistiques non paramétriques le plus utilisé pour vérifier l'hypothèse d'indépendance d'une série de données.

Pour vérifier l'hypothèse d'indépendance des observations de série d'échantillons, il faut opposer l'hypothèse d'indépendance (comme étant l'hypothèse nulle par exemple) à l'hypothèse alternative raisonnable (qui correspond aux différents types de dépendances pouvant affecter la chronique de séries : effet de persistance, effet de tendance ou effet cyclique).

Soient  $X_1, X_2, \dots, X_n$  variables aléatoires, le test permet de comparer les deux hypothèses suivantes :

-Hypothèse nulle  $H_0$  :  $H_1, H_2, \dots, H_n$  sont indépendantes ou

-Hypothèse alternative  $H_1$  :  $H_1, H_2, \dots, H_n$  ne sont pas indépendantes (autocorrélées).

La statistique de Wald-Wolfowitz se calcule de la manière suivante :

$$W = \sum_{i=1}^{n-1} (X_i X_{i+1}) + X_1 X_n \quad (20)$$

Lorsque  $n$  est suffisamment grand, sous l'hypothèse nulle ( $H_0$ ) d'indépendance, la statistique  $W$  suit approximativement une distribution normale  $U$  de moyenne  $\bar{W}$  et de variance  $Var(W)$  :

$$\bar{W} = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2 - \sum_{i=1}^n (x_i)^2}{n-1} \quad (21)$$

Avec  $S = \sum_{i=1}^n x_i$ , on a :

$$Var(W) = \frac{S_2^2 - S_4}{n-1} + \frac{S_1^4 - 4S_1^2 S_2 + 4S_1 S_3 + S_2^2 - 2S_4}{(n-1)(n-2)} - \bar{W}^2 \quad (22)$$

La statistique du test devient alors :

$$U = \frac{W - \bar{W}}{\sqrt{Var(W)}} \quad (23)$$

#### 4.4.1.2.2 Test d'homogénéité

Le test d'homogénéité cherche à vérifier si les données d'un échantillon proviennent de la même distribution et ont été prises dans les mêmes conditions. C'est-à-dire, vérifier que les observations de la chronique sont homogènes. Il s'agit dans l'application de comparer des moyennes de variables (débits) obtenues avant et après la date de changement dans la procédure d'acquisition des données, lorsque cette dernière date de changement est connue. Le test de Wilcoxon est l'un des tests statistiques qui permet d'examiner cette hypothèse.

##### - Test de Wilcoxon

Le test de Wilcoxon est un test non paramétrique faisant partie des plus utilisés pour vérifier l'homogénéité d'un échantillon de données. Il permet d'effectuer des comparaisons entre deux sous échantillons et de vérifier si leurs moyennes sont significativement différentes. C'est-à-dire que le fondement de ces tests est de remplacer les observations par leurs rangs, après les avoir classés par ordre croissant. Les calculs s'appuient sur ces rangs, leurs moyennes, leurs variances et d'autres paramètres. Ainsi, les tests d'homogénéité basés sur les moyennes visent à quantifier l'importance d'une hétérogénéité dans la série chronologique.

Selon N. Souanef (2015, p. 61), considérons une série de données notées respectivement  $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$  et  $x_{n+1}, x_{n+2}, x_{n+3} \dots x_m$  avec comme moyennes respectives  $M_1$  et  $M_2$ . Le test se fonde sur la comparaison des hypothèses suivantes :

$$H_0 : M_1 = M_2$$

$$H_1 : M_1 \neq M_2$$

La statistique du test ( $V$ ) est distribuée asymptotiquement selon une loi normale centrée réduite. Cette statistique s'exprime comme suit :

$$w = \sum_{i=1}^m R_i s(R_i) \quad (24)$$

Avec :

- $R_i$ , le rang du classement des variables aléatoires des deux échantillons combinés et triés en ordre croissant.

- $s(R_i)$ , le facteur multiplicateur égal à (0) si la donnée est effectuée après le changement,  $s(R_i)$  est égal à l'unité si la donnée est réalisée après.

La variance de la statistique s'exprime par la formule suivante :

$$Var(V) = \frac{n(m-n)(n-1)}{12} - \frac{n(n-m) \sum_{i=1}^k (d_k^3 - d_k)}{12m(m-1)} \quad (25)$$

Avec :

-  $k$ , le nombre de groupes distinct contenant des observations égales.

-  $d$ , le nombre d'observations égales dans chacun des groupes.

Ce test suit les mêmes règles de décision à un seuil de confiance  $\alpha$  que pour la loi normale :

- Rejet de  $H_0$  si  $|(v)| > Z_{\alpha/2}$  et  $H_0$  est accepté au cas contraire.

$Z_{\alpha/2}$  représente le quantile de probabilité au dépassement  $\alpha/2$  de la loi normale centrée réduite.

#### 4.4.1.2.3 Test de stationnarité

Ce test vise à montrer l'indépendance des propriétés statistiques du phénomène étudié par rapport au temps. Une série chronologique (échantillon) est stationnaire lorsque les propriétés de la loi de probabilité qui régit le phénomène (moyenne, variance ou moments d'ordre supérieur) sont invariables au cours du temps (J. C. Ondo, 2002, p. 3). L'hypothèse de stationnarité est donc une des conditions préalables à l'analyse fréquentielle d'une série chronologique de données. Le test de Mann-Kendall est l'un des tests statistiques qui permet de vérifier la stationnarité d'un échantillon de données.

##### - Test de Mann-Kendall

C'est l'un des tests les plus utilisés pour procéder à la vérification de l'hypothèse de stationnarité d'une série temporelle. Ce test s'appuie sur le calcul du tau de Kendall mesurant

l'association entre deux échantillons et lui-même basé sur les rangs à l'intérieur des échantillons. Ce test permet de comparer les hypothèses suivantes :

- $H_0$  : les caractéristiques statistiques des variables aléatoires sont constantes dans le temps (pas de tendance)

Ou encore :

- $-H_1$  : les caractéristiques statistiques des variables aléatoires ne sont pas constantes dans le temps

Soient  $n$  variables aléatoires  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ , classées par ordre chronologique (selon leur rang respectif  $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ )

La statistique  $S$  de ce test s'exprime par l'équation suivante :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \left[ \sum_{j=i+1}^n \text{signe}(R_j - R_i) \right] \quad (26)$$

La fonction  $\text{signe}(X)$  fait référence au signe de la variable  $X$  et prend les valeurs 1, 0 ou - selon que la variable  $X$  soit positive, nulle ou négative ; c'est-à-dire :

- $\text{signe}(x) = 1$  pour  $X > 0$

- $\text{signe}(x) = 0$  pour  $X = 0$  ; - $\text{signe}(x) = -1$  pour  $X < 0$

Si l'hypothèse nulle ( $H_0$ ) est vraie, la statistique  $S$  est distribuée asymptotiquement selon une loi normale de moyenne nulle ( $\mu$ ) et de variance  $Var(S)$  s'exprimant comme suit :

$$\begin{aligned} \mu &= 0 \\ Var(S) &= \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \end{aligned} \quad (27)$$

S'il y a des valeurs égales dans la série, la variance se calcule comme suit :

$$Var(S) = \frac{1}{8} \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q E_p(E_p-1)(2E_p+5) \right] \quad (28)$$

Dans cette formule,  $E_p$  désigne le nombre d'égalités identifiées dans la série impliquant  $p$ -valeurs.

Si le nombre  $n$  de valeurs de la série est supérieur à 10, l'application du test fait intervenir une variable aléatoire  $Z$  définie par :

$$Z = 0 \text{ si } S = 0 \quad (29)$$

$$Z = \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \text{ si } S > 0 \quad (30)$$

$$Z = \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \text{ si } S < 0 \quad (31)$$

Plus la statistique du test  $S$  est proche de 0 plus les observations seront considérées comme stationnaires.

#### 4.4.2 Choix et type de modèle fréquentiel

Le choix du type de modèle fréquentiel constitue une des étapes non moins importantes en analyse fréquentielle, du fait des grandes incertitudes que cela implique. L'utilisation d'un modèle fréquentiel opérationnel et sa loi d'ajustement repose sur le phénomène hydrologique étudié. Le **tableau 13** montre à cet effet, les phénomènes hydrologiques et la plupart des lois qui s'y ajustent généralement.

*Tableau 13 : Variables hydropluviométriques et lois d'ajustement*

Lois	Variables
<b>Normale</b>	Précipitations annuelles, Débits, Volume de stockage des réservoirs
<b>Lognormale</b>	Débits maxima annuels, Précipitations journalières, Précipitations annuelles, Volume du ruissellement mensuel, Volume du ruissellement annuel
<b>Pearson type III (Gamma)</b>	Débits maxima annuels, Précipitations journalières, Précipitations annuelles, Volume du ruissellement mensuel, Volume du ruissellement annuel
<b>Loi de Gumbel et Fréchet</b>	Débits maxima annuels
<b>Loi exponentielle</b>	Précipitations journalières, Durée entre deux événements

(Source : extrait de N. Souanef, 2015)

L'adoption d'un modèle fréquentiel pour l'étude de phénomènes hydrologiques est une décision, un choix. Il existe de nombreuses approches basées sur les considérations théoriques, l'expérience et la coutume, l'utilisation des tests d'adéquation ou la méthode graphique. Selon N. Souanef (2015, p. 64) citant A. Dubreuil (1974), le choix du type de modèle fréquentiel tient lieu de deux critères expérimentaux, notamment l'information régionale et le critère statistique.

#### 4.4.2.1 Choix d'une loi statistique d'analyse des fréquences (ajustement)

Le choix d'une loi d'ajustement peut se faire de telle façon que la loi retenue soit cohérente avec les observations et que le raisonnement soit également adapté sur la famille de distribution de la variable étudiée (B. Bobée, 1999, p. 101). Lorsque la série de données de débits par exemple est échantillonnée et ordonnée, elle est soumise à un ajustement d'une loi statistique qui permet de prévoir la fréquence d'apparition du phénomène hydrologique étudié à partir de la fonction de répartition de débits  $F(q)$ . Plusieurs méthodes existent dont la méthode graphique. Cette dernière consiste à placer sur un graphique les points constituant un échantillon donné, calculant pour chaque valeur sa fréquence expérimentale de dépassement ou de non dépassement ( $P_m$ ). La fréquence expérimentale associée à chaque événement est calculée à travers la formule générale suivante :

$$P_m = \frac{m - \alpha}{n + 1 - 2\alpha} \quad (32)$$

Où :

$P_m$  : la probabilité au dépassement au  $m^{\text{ème}}$  valeur

$m$  : le rang qu'occupe la valeur

$n$  : le nombre d'années d'observations

$\alpha$  : un paramètre qui varie entre 0 et 0,5

Plusieurs formules sont présentées dans la littérature pour parvenir au calcul de la fréquence expérimentale (tableau 15). Elles dépendent de nombreux critères dont la position de la probabilité de non dépassement par rapport aux valeurs extrêmes, l'universalité de la formule, sa compréhensibilité, etc (P. Meylan et A. Mussy, 1999, p. 84). C'est pourquoi Gumbel en 1958, préconise la formule de Weibull pour laquelle  $\alpha = 0$ .

Cependant, plusieurs auteurs ont mis en cause le fondement statistique du choix de Gumbel et proposent d'autres formules. C'est le cas de Cunnane en 1978 qui propose un coefficient  $\alpha = 0,40$  comme un meilleur compromis.

Dans le cadre de cette étude, c'est la formule empirique de Hazen de 1978 qui est utilisée (**tableau 14**). À travers la loi statistique ajustée, l'extrapolation a permis d'obtenir les valeurs des quantiles en fonction des périodes de retour  $T$ . En effet, la formule empirique de Hazen ( $\alpha = 0.5$ ) a été employé dans les travaux à l'échelle de la région du Sud-ouest de la Côte d'Ivoire (A. V. S. Assoko et *al.*, 2021, p. 118-122).

**Tableau 14 : Quelques formules empiriques les plus utilisées**

Nom des auteurs	Formule	$\alpha$	Notes
<b>WEIBULL</b>	$P_m = \frac{m}{n+1}$	0	Beaucoup utilisée aux Etats-Unis
<b>HAZEN</b>	$P_m = \frac{m-0.5}{n}$	0.5	Classique en France
<b>CHEGODAYEV</b>	$P_m = \frac{m-0.3}{n+0.4}$	0.3	-
<b>HOSKING</b>	$P_m = \frac{m-0.35}{n}$	-	Non paramétrique utilisée pour la méthode PWM et L-Moments
<b>CUNNANE</b>	$P_m = \frac{m-0.44}{n+0.2}$	0.40	-
<b>GRINGORTEN</b>	$P_m = \frac{m-0.4}{n+0.12}$	0.44	-

Source : P. Meylan et A. Mussy, 1999

#### 4.4.2.2 Choix du modèle fréquentiel

La validité des résultats d'une analyse fréquentielle dépend de la pertinence du modèle fréquentiel et plus particulièrement de son type. Plusieurs lois statistiques sont utilisées en analyse fréquentielle dont certaines pour la caractérisation des risques hydroclimatiques.

Il n'existe en effet, aucune méthode faisant l'unanimité (P. Meylan et A. Mussy, 1999, p. 61). Cette étude a fait les choix des lois de Gumbel, Log-normale et Pearson type 3 pour une comparaison des résultats. La simplicité de mise en œuvre de ces lois a contribué à leur prédominance en matière de quantification du risque associé aux extrêmes hydrologiques. Ces approches statistiques ont été utilisées par quelques auteurs en Côte d'Ivoire pour la représentation des valeurs extrêmes pluviométriques.

##### 4.4.2.2.1 Loi de Gumbel

Selon P. Meylan et A. Musy (1999, p. 68), c'est le modèle fréquentiel le plus utilisé pour décrire le comportement statistique des valeurs extrêmes à travers la distribution statistique de Gumbel (loi double exponentielle ou loi de Gumbel). C'est la forme limite de la distribution de la valeur maximale d'un échantillon de n valeurs. Le maximum annuel d'une variable étant considéré comme le maximum de 365 valeurs journalières. D'où la capacité de cette loi à décrire les séries de maxima annuels. La fonction de répartition de la loi de Gumbel  $F(x)$  s'exprime selon l'équation suivante :

$$F(x) = \exp\left(-\left(1 - c \frac{x-a}{b}\right)^{\frac{1}{c}}\right) \quad (33)$$

Où :

- $a$  est le paramètre de position ;

- $b$  le paramètre d'échelle ;

- $c$  le paramètre de forme et

- $x$  la variable des débits.

Par ailleurs, le temps de retour  $T$  d'un événement est défini comme étant l'inverse de la fréquence d'apparition de l'événement, soit :

$$T = \frac{1}{1 - F(x)} \quad (34)$$

#### 4.4.2.2.2 *Loi de Log-normale et Pearson type 3*

La loi Log-normale (ou Lognormale) est préconisée par certains hydrologues dont V.-T. Chow en 1974. Ils le justifient en argumentant que l'apparition d'un événement hydrologique résulte de l'action combinée d'un grand nombre de facteurs qui se multiplient. Dès lors la variable aléatoire  $X = X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_r$  suit une loi Log-normale. En effet le produit de  $r$  variables se ramène à la somme  $r$  de logarithmes de celles-ci. Ainsi le théorème central-limite permet d'affirmer la log-normalité de la variable aléatoire. Cette loi se justifie par le faible nombre de paramètres nécessaires avec une méthode d'estimation relativement simple. Si  $X$  suit une loi Log-normale, alors  $Y = \log(X - a)$  a une distribution normale.

Selon P. Meylan et A. Mussy (1999, p. 68), plus le nombre de paramètres d'une loi est grand, plus l'incertitude dans l'estimation est importante. Par conséquent, il est préférable d'éviter l'utilisation de lois à 3 paramètres ou plus comme la loi gamma incomplet appelée également loi de Pearson type 3. Les distributions des lois Log-normale et Pearson type 3 sont représentées dans le **tableau 15**.

**Tableau 15 : Fonctions de distributions des probabilités courantes.**

Distribution	Densité de Probabilité	Domaine de définition	Nombre de paramètres
Gumbel	$f(x) = \frac{\alpha^\lambda}{\Gamma(\lambda)} x^{\lambda-1} e^{-\alpha x}$	$x > 0$	2
Normale	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}$	$-\infty < 0$ $x < +\infty$	2
Log-normale	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\}$	$x > 0$	2
Log-normale	$f(x) = \frac{1}{(x-m)\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln(x-m) - \mu]^2}{2\sigma^2}\right\}$	$x > m$	3
Pearson type 3	$f(x) = \frac{\alpha^\lambda}{\Gamma(\lambda)} (x-m)^{\lambda-1} \exp[-\alpha(x-m)]$	$x > m$	3

Source : P. Meylan et A. Mussy (1999, p. 85)

#### 4.4.2.3 Ajustement du modèle fréquentiel (loi de Gumbel)

L'ajustement permet de déterminer les paramètres qui s'ajustent au mieux à l'échantillon des valeurs de la série. C'est-à-dire chercher à déterminer une loi issue d'une famille paramétrique  $(f; \theta)$ , où  $\theta$  est l'ensemble des paramètres de la loi. Il existe de nombreuses méthodes (statistiques et graphiques) pour l'estimation des paramètres de loi des distributions. Parmi les méthodes statistiques, la méthode des moments de probabilité pondérée, la méthode des L-moments et la méthode du maximum de vraisemblance sont les méthodes les plus utilisées du fait de leur simplicité pour la majorité des distributions. Cette étude fait le choix de la dernière méthode citée.

##### 4.4.2.3.1 La méthode du maximum de vraisemblance

C'est une méthode statistique d'estimation des paramètres qui suppose que les  $m_1$  et  $m_2$  devraient être celles qui maximisent la probabilité d'obtenir les valeurs observées pour la variable  $x$ . Par conséquent, la procédure d'estimation par le maximum de vraisemblance définit de prime abord une fonction de  $m_1$  et  $m_2$ , dite fonction de vraisemblance. Elle permet de décrire la probabilité d'obtenir les valeurs observées de  $x$  puis la maximisation de cette fonction pour  $m_1$  et  $m_2$  (N. Souanef, 2015, p. 66). La fonction définissant la probabilité d'un échantillon avec une valeur comprise entre  $x_i + dx/2$  et  $x_i - dx/2$  est selon la loi de densité ci-dessus :

$$f(x_i, m_1, m_2, \dots, m_p) dx = Pr(x_i - dx/2 < X < x_i + dx/2) \quad (35)$$

Si les valeurs  $x_i$  sont indépendantes, la probabilité d'avoir tiré, dans n'importe quel ordre les  $n$  valeurs  $x_1, x_2, \dots, x_n$  (à plus ou moins  $dx/2$ ) est le produit de ces  $n$  probabilités ; c'est donc une fonction des  $p$  paramètres pour les  $n$  valeurs  $x_i$  données. La méthode du maximum de vraisemblance à choisir les valeurs des  $p$  paramètres qui rendent cet échantillon le plus probable possible, au vu d'une loi choisie préalablement.

#### 4.4.2.3.2 Ajustement graphique et contrôle visuel

La méthode graphique, bien qu'étant une méthode limitée, a pour avantage de fournir une représentation visuelle des données et de l'ajustement. Elle repose sur le fait de l'expression d'un quantile correspond à l'équation d'une droite (P. Meylan et A. Mussy, 1999, p. 89). À partir du tracé d'une droite d'équation dans le système d'axes ( $x ; y$ ), on déduit les paramètres  $a$  et  $b$  qui définissent mieux la loi de probabilité. Par exemple, pour une loi de Gumbel, les différents paramètres qui s'y invitent sont résumés dans le **tableau 16** suivant, où on a  $\theta$  ( $m_1 ; m_2$ ),  $m_1$  la moyenne et,  $m_2$  l'écart type.

**Tableau 16 : Différents paramètres de la loi de Gumbel**

<b>Fonction de répartition</b>	$G(x \mu, \sigma) = \exp \left[ -\exp \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]$
<b>Fonction de densité</b>	$g(x \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma} \exp - \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right) \exp \left[ -\exp \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]$
<b>Paramètres de la loi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Méthode du maximum de vraisemblance</li> <li>-Vraisemblance des <math>n</math> observations</li> </ul> $\begin{cases} \hat{\sigma} = \bar{x} - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \exp \left( -\frac{x_i}{\hat{\sigma}} \right)}{\sum_{i=1}^n \exp \left( -\frac{x_i}{\hat{\sigma}} \right)} \\ \hat{\mu} = \hat{\sigma} \ln \left( \frac{n}{\sum_{i=1}^n \exp \left( -\frac{x_i}{\hat{\sigma}} \right)} \right) \end{cases}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- Méthode des moments</li> </ul> $\begin{cases} m_1 = \mu + \sigma\gamma \\ m_2^2 = \frac{\pi^2}{6} \sigma^2 \end{cases}$ <p>Avec <math>\gamma = 0.5772</math> (constante d'Euler) d'où :</p> $\begin{cases} \hat{\sigma} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} m_2 \\ m_1 = \mu - \sigma\gamma \end{cases}$
<b>Expression du quantile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fonction de la probabilité d'occurrence : <math>Q(P) = \mu - \sigma \ln(-\ln(1 - p))</math></li> <li>- Fonction de la période de retour <math>Q(T) = \mu - \sigma \ln \left( -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right)</math></li> </ul>

Source : Extrait de N. Souanef, 2015

#### 4.4.2.4 Contrôle de l'ajustement du modèle fréquentiel

##### 4.4.2.4.1 L'ajustement graphique

Le modèle d'ajustement est soumis à différents tests afin de vérifier son adéquation à l'échantillon choisi. Il existe toujours des écarts entre les fréquences expérimentales des valeurs observées et les fréquences des mêmes valeurs calculées à partir d'une fonction de répartition quelconque. C'est pourquoi l'ajustement graphique est préconisé avant tout autre test statistique (N. Souanef, 2015, p. 76 ; S. El Adlouni et B. Bobbée, 2014, p. 53). C'est un moyen simple et efficace qui permet de juger si une loi statistique est bien ajustée à la série de débits observés.

Par ailleurs, l'objectif des tests d'adéquation est d'accepter ou de rejeter l'hypothèse nulle  $H_0$ , selon laquelle, les données observées sont engendrées par un modèle faisant intervenir une loi de probabilité, ou une famille de probabilité (P. Meylan et A. Mussy, 1999, p. 89). Les tests couramment utilisés sont le test  $\chi^2$  et le texte de Kolmogorov Smirnov ou le critère d'information d'Akaike (AIC) et le critère d'information Bayésien (BIC). Les critères AIC et BIC ont été préférés dans cette étude.

##### 4.4.2.4.2 Critère de validation (AIC et BIC)

En plus des résultats graphiques, le choix de la distribution statistique la mieux ajustée aux échantillons a été confortée par l'application des critères de comparaison AIC (Critère d'Information d'Akaike) et BIC (Critère d'Information Bayésien) (S. El Adlouni et B. Bobbée, 2014, p. 50-51). Ces deux critères permettent de choisir la loi la mieux ajustée en tenant compte de l'erreur d'estimation et de la parcimonie (nombre de paramètres à ajuster). La distribution pour laquelle les valeurs des deux critères sont les plus faibles est la distribution la mieux adéquate. Soit une pseudo distance entre une vraie distribution ( $g$ ) inconnue, et une distribution arbitraire ( $f$ ) paramétrée par  $\theta$ . Les expressions mathématiques de ces deux (2) critères se présentent comme ci-dessous :

$$\text{Critère d'Akaike (AIC)} : AIC(f, x) = -2\ln L(\theta, x) + 2k \quad (36)$$

$$\text{Critère d'Akaike (BIC)} : BIC(f, x) = 2\ln L(\theta, x) + 2k \cdot \ln(N) \quad (37)$$

Où :

$L$  est la vraisemblance de l'échantillon,

$N$  la taille de l'échantillon et

$k$  le nombre de paramètre

Ces traitements sont possibles grâce au logiciel HYFRAN-PLUS, version 2.1 qui intègre toutes ces fonctionnalités et tests statistiques.

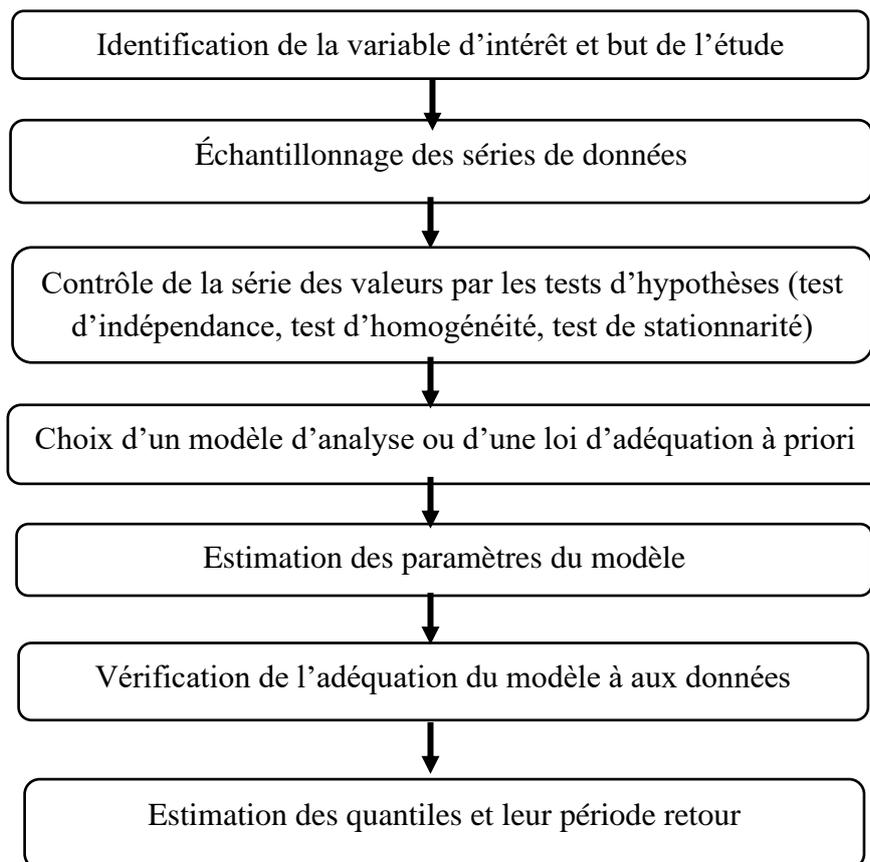
#### 4.4.2.5 Exploitation du modèle fréquentiel

Le modèle fréquentiel peut être exploité dans la mesure où il est choisi et validé. Le but de l'analyse fréquentiel est bien de déterminer des quantiles, en fonction de la période de retour souhaitée à partir du modèle fréquentiel choisi. Le temps de retour  $T$  d'un événement étant défini comme l'inverse de la fréquence d'apparition de l'événement, avec la loi de Gumbel, on a :

$$Q(T) = \mu - \sigma \ln \left( -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (38)$$

Avant l'exploitation du modèle fréquentiel, il faut définir l'intervalle de confiance. La notion d'intervalle de confiance représente un certain nombre de chances de trouver la vraie valeur du paramètre cherché. Il permet d'expliciter l'importance des erreurs d'échantillonnage.

Les différentes étapes clés de l'analyse fréquentielle sont résumées à travers la **figure 33** suivante :



**Figure 33** : Les différentes étapes de l'analyse fréquentielle (D. Koumassi, 2014, p. 90, modifié)

## **4.5 Méthode d'évaluation du risque d'inondation fluviale dans le bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré**

La représentation cartographique se révèle comme le premier et le plus informatif des outils d'analyse des risques d'inondation (G. Palka et *al.*, 2016, p. 75). La cartographie des risques d'inondation se fonde sur la combinaison de différents facteurs dérivant de la dynamique de ces deux composantes principales. Il s'agit de l'aléa et des enjeux auxquels il faut lier leur vulnérabilité et pour lesquels de nombreux travaux ont été consacrés (O. Gilard et N. Gendreau, 1998, p. 3 ; B. M. Saley et *al.*, 2005, p. 7 ; D. Soto et F. Renard, 2014, p. 3 ; D. A. Alla, 2013, p. 10 ; A. Kangah et D. A. Alla, 2015, p. 301 ; K. D. Kouassi et *al.*, 2021, p. 1-7).

Par conséquent, pour cette étude, le risque d'inondation fluviale est analysé suivant deux étapes complémentaires :

- la première approche élabore la cartographie des différents facteurs concourants à une susceptibilité à l'inondation dans le bassin ;
- et la deuxième approche complémentaire concerne l'application la Méthode de Hiérarchie Multicritère (MHM), appelée aussi technique AHP (Analytic Hierarchy Process) de T. L. Saaty (2008, p. 85-86).

Cette approche de l'AHP se justifie par sa capacité à élaborer un modèle composé d'une hiérarchie de critères dans le but d'évaluer des alternatives considérées pour l'atteinte d'un objectif donné (R. Rivest, 2019, p. 17). C'est donc une méthode d'aide à la planification et à la décision dont l'efficacité n'est plus à démontrer (C. Billot et *al.*, 2003, p. 7). Elle permet par conséquent de mieux qualifier et spatialiser les zones à risque d'inondation fluviale.

### **4.5.1 Cartographie des facteurs d'aléa inondation fluviale dans le bassin versant du Sassandra à Soubré**

Le facteur pluviométrique, la densité du réseau de drainage, les flux d'accumulation des débits et les dérivés de la topographie notamment la pente, l'altitude et l'indice d'humidité topographique constituent les facteurs de détermination de l'aléa inondation dans le contexte de cette étude.

#### **4.5.1.1. Cartographie de l'intensité pluviométrique**

Les données de mesures des précipitations obtenues aux stations pluviométriques de Buyo et Soubré sur la période 1989-2019 ont permis de réaliser les cartes des intensités

pluviométriques (isohyètes). Les coordonnées géographiques et les données pluviométriques de chaque station ont été utilisées. Ensuite, avec les fonctionnalités du logiciel ArcGIS 10.8, les coordonnées des différents points et les mesures ont d'abord été converties en fichiers vectoriels, puis interpolés par la méthode d'interpolation IDW (Inverse Distance Weighted - Inverse de la distance pondérée). Cette méthode est une technique d'interpolation déterministe locale les plus utilisées (déjà expliqué dans le point 4.2 de ce chapitre). Elle calcule donc la valeur d'un point en effectuant la moyenne des valeurs des points situés dans le voisinage pondéré par l'inverse de la distance au point calculé à travers un ensemble de sous-méthodes intégré dans le logiciel ArcGIS. Enfin, le facteur pluviométrique est analysé pour sa fonction de déclencheur de l'aléa climatique étudié.

#### ***4.5.1.2. Cartographie des altitudes et des pentes***

Le relief (altitude et pente) étant lié au ruissellement, il conditionne le processus d'écoulement des eaux dans un bassin-versant. Après le téléchargement de l'image satellitaire de la mission SRTM de 2014 sur le site internet (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), un modèle numérique de terrain (MNT) du bassin a été réalisé. De ce MNT, plusieurs fichiers et l'espace d'étude ont été extraits.

Ainsi, des courbes de niveaux de la zone d'étude, la carte des altitudes est élaborée à partir de ce Modèle Numérique de terrain (MNT-SRTM) qui permet de représenter le relief en X/Y (longueur et largeur). Les altitudes obtenus varient entre 80 m et 370 m.

En ce qui concerne les pentes, après extraction de la zone d'étude et le traitement du MNT, l'outil « *Slope de Spatial analyst* », une fonctionnalité du logiciel ArcGIS 10.8 a permis de mettre en évidence et de regrouper les valeurs de pentes similaires après avoir défini celle des altitudes du relief. Ensuite une reclassification est effectuée manuellement dans le logiciel en fonction des objectifs visés pour une bonne analyse de l'information. Pour finir, les pentes sont exprimées en pourcentage et les classes d'analyses retenues vont de pentes inférieures à 2 % à pentes de plus de 15 %.

#### ***4.5.1.3. Cartographie de la densité de drainage***

La carte de densité de drainage découle de la réalisation du réseau hydrographique du bassin-versant étudié. Après l'extraction de l'ordre des cours d'eau et du réseau hydrographique (*Hydrology – stream Order*), l'outil « *Line Density de Spatial Analyst Tools* » du logiciel

ArcGIS 10.8 est appliqué sur le réseau hydrographique en vue de l'obtention de la densité de drainage et de la restitution cartographique. La réalisation de la carte de la densité du drainage a permis d'apprécier les différents apports des affluents du fleuve et est exprimé en Km/Km<sup>2</sup>.

#### **4.5.1.4. Cartographie de l'accumulation des débits**

La réalisation de la carte de l'accumulation des flux de débits dérive de celle du réseau hydrographique et de la pente. Cette carte s'obtient en calculant la tangente des pentes obtenues précédemment à travers l'outil « *flow direction* » et de la condition mathématique « *con= tan (slope >0, tan (slope), 0,001* » dans le logiciel ArcGIS 10.8, puis en agrégeant les flux d'eau de la montée à la descente sur la grille de sortie. Des valeurs élevées de débits accumulés indiquent les zones dans lesquelles l'eau qui s'écoule a tendance à se concentrer.

#### **4.5.1.5. Cartographie de l'indice d'humidité topographique (TWI)**

Concernant l'Indice d'Humidité Topographique (TWI), appelé également indice de Beven-Kirkby, il caractérise l'indice topographique d'estimation de la position des sols potentiellement saturés en eau (TTI, 2020, p. 20). Le TWI peut être calculé à partir des outils de l'algorithme *SAGA Wetness Index* du logiciel SAGA-GIS (E. Drolet, 2020, p. 25) ou à partir des fonctionnalités du logiciel ArcGIS. Il est dérivé de la pente et de l'accumulation de flux diffus multiples. Il concentre les fortes valeurs d'accumulation, correspondant généralement aux milieux humides et hydriques. Son utilisation ne peut être autre que l'indication d'une probabilité de présence, mais ne prend pas en compte le contexte de la zone (TTI, 2011, p. 22). Ainsi, les couches produites fournissent de l'information sur le potentiel d'accumulation d'eau sur le territoire concerné en fonction de la pente et de l'aire de drainage spécifique à un pixel donné. Sa formule se présente comme suit :

$$TWI = \ln \left( \frac{SCA}{Tan\beta} \right) \quad (39)$$

Avec SCA : aire drainée au point considéré (aire de drainage divisée par la largeur du flux, et  $\beta$  : angle de la pente.

De plus, la méthode de classification par seuils naturels (Jenks) a été utilisée pour optimiser le regroupement des valeurs similaires pour faciliter l'analyse des différents milieux selon leur niveau d'humidité.

En somme, par le biais des outils SIG, l'aléa d'inondation fluviale du bassin aménagé de Soubré est évalué par l'analyse croisée des facteurs densité de drainage, accumulation des flux de débits, pente du relief, indice d'humidité topographique (TWI) du bassin et altitude du relief.

Pour chaque facteur, la gamme des variations de valeurs est divisée en cinq classes correspondant à l'indice du facteur : très faible, faible, moyen, fort et très fort.

#### **4.5.2 Évaluation des enjeux exposés à l'inondation fluviale dans le bassin-versant aménagé du Sassandra à Soubré**

La densité de la population, la distance des enjeux par rapport au réseau hydrographique (ou la zone d'influence des cours d'eau) et les unités d'occupation du sol ont été choisis comme facteurs d'enjeux (vulnérabilité) face à l'inondation fluviale, après une analyse profonde de la revue de littérature (M. Kouamé, 2023, p. 435 ; K. D. Kouassi, p. 32, A. Kangah et D. A. Alla, 2015, p. 301). L'aléa ne devient un risque qu'en présence d'enjeux humains, économiques et environnementaux.

##### ***4.5.2.1 Cartographie de la densité de population***

La densité de population constitue un facteur non moins important des enjeux (vulnérabilité) exposés à l'inondation fluviale. Cette densité de population a été obtenue à partir des données de recensement général de la population et de l'habitat de l'Institut National de la Statistique (INS-RGPH 2014) de cinq (5) grandes sous-préfectures/communes de la zone d'intérêt. Il s'agit des sous-préfectures de Buyo, Dapéoua, Grand-Zattry, Soubré et Gnanmangui. La densité de population s'obtient par le quotient du nombre d'habitants (hbts) par la superficie (km<sup>2</sup>) de l'espace concerné. Puis un traitement est effectué par les fonctionnalités du logiciel ArcGIS 10.8 afin d'élaborer la carte finale. Enfin, une classification a été effectuée afin d'apprécier la densité de la population dans chaque secteur de l'espace d'étude.

##### ***4.5.2.2 Cartographie de la zone d'influence du réseau hydrographique***

La manifestation du risque d'inondation fluviale est plus importante généralement aux abords immédiats des cours d'eau au-delà du lit mineur. Les enjeux proches des rives des cours d'eau sont les plus exposés et donc plus vulnérables aux inondations. Par conséquent, la distance des enjeux exposés au réseau hydrographique constitue un facteur très important de la définition de zones d'enjeux face à l'aléa inondation fluviale. En effet, la carte de la distance au réseau hydrographique se réalise à travers l'outil « *Buffer* » en définissant un intervalle

d'influence du réseau hydrographique, après la création du fichier vectoriel du réseau hydrographique. Pour cette étude, l'intervalle choisi est de 200 mètres. Ces différentes opérations ont lieu dans le logiciel ArcGIS 10.8 utilisé.

#### ***4.5.2.3 Cartographie de l'occupation du sol dans le bassin-versant de Soubré***

La prise en compte de l'influence des états de surface dans la survenance des événements d'inondation est nécessaire pour la gestion optimale des risques d'inondation à l'échelle du bassin-versant fluvial. L'apport de l'imagerie satellitaire par télédétection pour l'étude de la dynamique des changements de l'occupation ou de l'utilisation du sol n'est plus à démontrer vu sa constante évolution. Contrairement à la photo aérienne qui semble désormais atteindre ses limites, et elle devrait donner à la cartographie des performances inédites à ce jour (J. Maréchal, 2012, p. 16).

##### ***4.5.2.3.1 Traitement numérique des images satellitaires***

Après acquisition des images satellitaires, le traitement peut se résumer en trois étapes essentielles avec des étapes intermédiaires non moins importantes : la préparation de l'image, son interprétation et l'organisation des résultats de l'interprétation. Les techniques et méthodes de traitement des images satellitaires visent à mettre en évidence les objets ou les phénomènes concernés, sans qu'il y ait une perte de l'information initiale. Le traitement d'images permet par conséquent de rehausser la qualité finale des images et de faciliter leur interprétation.

##### ***4.5.2.3.2 Prétraitement des données et informations des images satellitaires***

Les prétraitements réunissent l'ensemble des opérations nécessaires avant l'analyse principale. Les images téléchargées subissent des corrections géométriques et radiométriques. Ces corrections concernent la projection et le géoréférencement (projection UTM ellipsoïde WGS 1984 zone 29 N par exemple) ainsi que la transformation des formes et géométrie des images.

Quant au traitement radiométrique, il concerne la correction des artefacts, le contraste et le rehaussement de la qualité des images brutes téléchargées. Cela permet d'améliorer leur apparence visuelle et facilite l'interprétation des scènes (K. D. Kpedenou et *al.*, 2016, p. 11).

Le bassin versant de Soubré est à cheval de plusieurs scènes Landsat. De façon spécifique, les scènes 197-056 et 198-056 ont été choisies au niveau des capteurs OLI/TIR de Landsat 8 avec une couverture nuageuse inférieure à 10 % à la date du 12/02/2020. À la suite de cette

étape, un mosaïquage est réalisé à partir des deux (2) scènes afin d'avoir une image homogène et unique.

Le mosaïquage est en effet le procédé qui permet de joindre plusieurs images géoréférencées afin de former une image couvrant une zone plus grande. Il consiste en d'autres termes à juxtaposer les différentes bandes identiques des scènes entre elles pour en former une image plus complète qui soit utilisable. Toutes ces opérations ont pour but de faciliter la bonne superposition des couches d'informations à la base de données cartographiques disponibles.

#### **4.5.2.3.3 Composition colorée**

Après l'amélioration de la qualité et des formes de l'image, on procède à une composition colorée. Selon J. P. Donnay (2000, p. 8), la composition colorée est la combinaison de trois bandes spectrales et leur affectation respective à une des trois couleurs primaires disponibles : le Bleu, le Vert et le Rouge (ou le Proche Infrarouge - PIR). Le choix des bandes spectrales affichées est fait en fonction des propriétés spectrales des éléments d'occupation du sol de la zone d'étude.

Dans la quête d'image plus interprétable et lisible par rapport à la thématique choisie, on est amené à réaliser plusieurs tentatives de compositions colorées avec les différents canaux des bandes spectrales. La composition colorée 4-3-2 (couleur vraie) a servi pour le traitement des images du capteur OLI/TIRS de Landsat 8 pour l'année 2020. Ces compositions colorées présentent les meilleures discriminations des types d'occupation du sol.

Ainsi, l'objectif de cette opération a été d'avoir une synthèse d'informations enrichies de l'apport spécifique des différentes bandes spectrales en vue de faire une bonne discrimination des unités d'occupation du sol. Après cette étape, il faut procéder à une interprétation visuelle afin d'identifier les différentes informations contenues dans l'image.

#### **4.5.2.3.4 Interprétation visuelle des images**

L'interprétation visuelle des images après la composition colorée a permis d'identifier les différents types d'occupation du sol à travers la classification. La classification a pour but de représenter de façon abstraite la situation réelle du terrain en utilisant des paramètres bien définis et en les classant par pixels ou objet. L'image issue de la classification est composée de pixels appartenant chacun à une classe particulière choisie. Le résultat d'une classification est une nouvelle image dont chaque pixel est défini par une catégorie particulière (JIRCAS, p.

26) citant J. Defourny (2004). Pour cette étude les classes sont au nombre de cinq (5) à savoir : plan d'eau/cours d'eau, forêt, cultures/jachères, zones bâties et enfin sols nus.

Il existe deux approches de classifications notamment la classification non supervisée et la classification supervisée. La classification supervisée est celle qui est choisie car les domaines de classes sont connus à priori. Ce type de classification est caractérisée par deux phases, à savoir la phase entraînement et la phase de classification à proprement parlée.

Dans une approche de classification supervisée d'image, la qualité des résultats dépend en partie d'une bonne maîtrise des sites d'entraînement, qui sont des zones de l'image dont l'occupation du sol est connue. À travers cette classification, le même traitement est appliqué à chaque pixel indépendamment des pixels voisins. La délimitation de ces zones entraînement est corroborée par la connaissance du terrain et par l'utilisation d'autres sources d'informations à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) comme Google Earth. Cette délimitation a été réalisée par la fonction « *Interactive Classification* » inclus dans le logiciel ArcGis 10.8 utilisé.

#### **4.5.2.3.5 Classes d'occupation du sol retenues**

Dans une démarche de classification supervisée, il convient de définir un ensemble de classes auxquelles on pourra attribuer les différents pixels ou objets. La définition de ces classes est faite en fonction des objectifs d'étude. La typologie des classes d'occupations des sols retenue provient de celle proposée par le Centre d'Information Géographique et du Numérique (CIGN), un pôle d'expertise du Bureau National d'Études Techniques (BNETD). Cette nomenclature tient compte des recommandations du GIEC et des diverses occupations du sol connues sur l'ensemble du pays (C. N'Doume, 2018, p. 17). Partant de ces suggestions et pour des questions de lisibilité, c'est au total 5 grandes catégories de classes qui sont retenues (**tableau 17**) comme souligné dans le point 4.5.2.3.4 de ce chapitre.

**Tableau 17 : Typologie des classes d'occupations du sol**

Catégorie des classes	Code	Description de la classe
Forêt	F	<p>-Formations naturelles de type primaire, peuplement fermé avec des arbres et arbustes atteignant diverses hauteurs entre 5 et 50 m ; les cimes des arbres sont relativement jointives ; l'ensemble du couvert demeure dense</p> <p>-Formation forestière sous influence de la dégradation et recrûs forestiers en régénération, mais dont la couverture est néanmoins supérieure à 30 % ; structure constituée de stades successifs de développement de végétation instable. La différence est marquée par la structure/composition des espèces par rapport aux forêts primaires voisines</p> <p>-Formation forestière (couverture supérieure à 30 %) établie sur des sols hydromorphes (vallée, estuaire, bas-fonds, marécages) proches des cours d'eau (fleuve, retenue d'eau, rivière), où la présence d'eau est quasi permanente</p>
Culture / jachère	CJ	<p>-Plantations agricoles de palmiers à huile, hévéa, cacao café</p> <p>-Zones de cultures non différenciées et des vergers divers, y compris les cultures de bas-fonds et les jeunes jachères entre (généralement formés de recrûs herbeux post-cultureaux). Ces cultures sont annuelles à cycle court et à cycle long (riz, igname, maïs, manioc, etc.).</p>
Plan d'eau	PE	<p>Ensembles des zones de dépression contenant de l'eau sous forme de retenue et d'écoulement d'eau interconnecté de largeur importante (fleuve)</p> <p>-Terres humides et bourbeuses constituées de marais et de marécages, où le sol est recouvert, en permanence ou par intermittence, d'une couche d'eau stagnante, peu profonde,</p>
Zones bâties (Habitations)	HS	-Zones résultant d'activités humaines (habitations, activités industrielles, exploitations minières, carrières, orpaillages, défrichements, etc).
Sol nu	SN	<p>Voies de transport et réseau routier</p> <p>-Terrain dépourvu de couvert végétal naturel ne constituant pas une aire de culture</p>

Source : CIGN/BNETD, 2018 (adapté de C. N'Doume, 2018)

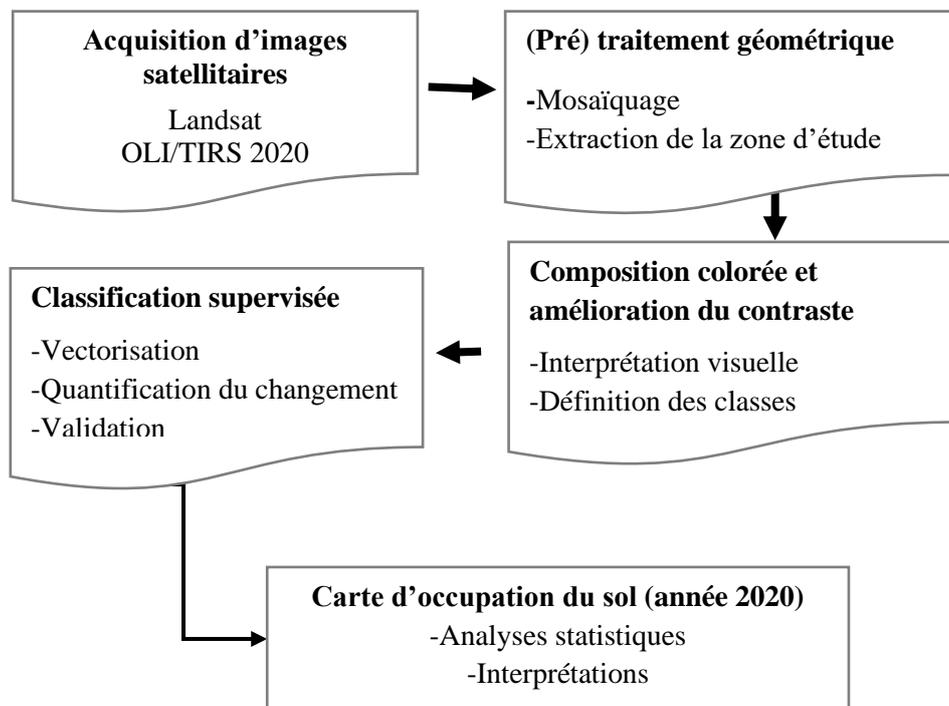
#### 4.5.2.3.6 Classification supervisée des images et validation

La classification des images est faite à l'aide de l'algorithme Maximum de Vraisemblance (*Maximum Likelihood*). À chaque pixel de l'image est associée une catégorie de classe. Avec cette méthode, la probabilité d'appartenance d'un pixel à une classe est donnée. Plus cette probabilité est grande que le pixel est proche d'une classe connue, et inconnue d'une catégorie lorsque la probabilité est faible. La classification a été réalisée par l'outil « *Training Sample Manager* » après avoir sélectionné la fonction « *Interactive Classification* » inclus dans le

logiciel ArcGis 10.8 utilisé. Chacune des classes obtenues contient des informations sur l'occupation du sol.

La validation d'une classification se fait en analysant une matrice de confusion. Il s'agit de relever un minimum de points dans chacune des classes présentes sur l'image et un maximum de points au total sur l'ensemble de l'image et ensuite, de vérifier pour ces points la correspondance entre l'occupation du sol et la classe attribuée sur la carte réalisée.

Enfin, la méthode de classification donne un fichier IMAGINE (.img) composé d'une seule couche. Après différentes opérations de segmentations et de vectorisations, le fichier est transformé au format « shapefile » pour permettre l'élaboration de la carte d'occupation du sol selon les différentes unités de paysages définies. Les étapes de la méthodologie adoptée pour réaliser la carte de l'occupation du sol ont été résumées à travers la **figure 34**.



*Figure 34 : Étapes méthodologiques adoptées pour l'étude de l'occupation du sol*

#### 4.5.3 Application de la méthode d'analyse multicritère de Saaty (AHP)

La carte du risque d'inondation fluviale et des différents niveaux de risques est définie par le croisement de l'aléa et des enjeux. Cette méthodologie a été utilisée dans plusieurs travaux pour sa pertinence. Vu que les facteurs intervenant dans la manifestation des inondations n'ont pas tous la même importance, l'application de cette méthode exige un procédé d'analyse hiérarchique des différents facteurs qui interviennent.

Pour ce faire, une méthode de notation est adoptée sur la base d'une progression arithmétique (valeur ordinale) de sorte que les points d'un facteur puissent être additionnés avec ceux des classifications relatives aux autres facteurs. Ces notes varient de 1 (indice nul) à 5 (indice très élevé) pour tous les facteurs (**tableau 18**).

**Tableau 18** : Notes attribuées aux indices de facteurs de risque d'inondation fluviale (aléa et enjeux)

Indice des facteurs	Note
Très faible	1
Faible	2
Moyen	3
Élevé	4
Très élevé	5

*Source : inspiré de D. A. Alla, 2013, p. 96*

Par ailleurs, il faut souligner que le mécanisme principal de cette méthode repose sur la comparaison par paire de chacune des alternatives entre elles, et non pas seulement sur une pondération arbitraire des critères ou facteurs. De nombreuses démarches existent dans la conduite d'une étude de situation de décision multicritère. Dans le cadre de cette étude, la démarche adoptée est celle indiquée par T. L. Saaty. L'application de cette méthode peut être résumée brièvement à trois étapes comme l'ont fait D. A. Alla (2013, p. 98) et G. Nanfack (2021, p. 4064) :

- la première étape concerne la construction de la matrice et l'établissement des priorités.
- la deuxième étape analyse la cohérence logique de la procédure. C'est la démarche par laquelle on teste la cohérence des appréciations. En effet, un raisonnement est dit cohérent si son indice de cohérence est inférieur ou égal à 10 %.
- la troisième étape est liée à la pondération et l'agrégation des facteurs. Elle consiste à affecter à chaque facteur d'aléa ou d'enjeux son coefficient de pondération pour tenir compte de l'importance qu'on lui accorde dans la manifestation du risque d'inondation fluviale. Enfin, on procède à la réalisation de la carte du risque d'inondation fluviale définitive par le croisement de l'aléa et des enjeux.

#### **4.5.3.1 Hiérarchisation des facteurs d'analyse du risque d'inondation fluviale**

##### **4.5.3.1.1 Hiérarchisation des facteurs d'aléa inondation**

Pour cette étude, les facteurs d'aléa choisis à priori sont la densité de drainage, l'accumulation des débits, la pente, l'indice d'humidité topographique (TWI), l'altitude du

relief du bassin aménagé et l'intensité pluviométrique. Cependant, bien que les intensités des pluies varient dans l'espace étudié, elles sont partout élevées dans le bassin aménagé, avec des précipitations annuelles supérieures à 1400 mm. Cette situation montre que la prédisposition à l'aléa inondation fluviale du fait des quantités de pluies est la même sur l'ensemble du bassin. Par conséquent, ce facteur que l'on peut considérer comme invariable dans la zone d'étude n'a pas été retenu.

- ***Hierarchisation du facteur « densité de drainage »***

Ce facteur est de loin l'un des facteurs intervenant dans la réalisation de l'aléa inondation fluviale du fait de la dépendance des crues au réseau hydrographique. En effet, plus le réseau hydrographique est dense avec d'importants affluents, plus le phénomène de ruissellement est élevé, plus les zones proches de ces cours d'eau sont susceptibles de subir une inondation fluviale dans le bassin-versant. Les valeurs relatives à la susceptibilité à l'inondation fluviale attribuées aux différentes classes partent de 1 à 5 selon le niveau de densité adopté (**tableau 19**). Ces paramètres ont été également suivis par V. M. Sorokoby (2013, p. 96) pour l'analyse de la vulnérabilité à l'inondation dans le sous-bassin de la Débo, un affluent du cours inférieur du fleuve Sassandra dans la région de Soubré.

**Tableau 19** : Notation des classes de densité de drainage

<i>Facteur</i>	<i>Valeurs en Km/km<sup>2</sup></i>	<i>Niveau</i>	<i>Note</i>
Densité du réseau de drainage	>1	Très faible	1
	2 à 3	Faible	2
	4 à 5	Moyen	3
	5 à 6	Fort	4
	7 à 8	Très fort	5

*Source* : nos traitements de données, 2021

- ***Hierarchisation du facteur « accumulation des flux de débits »***

L'accumulation des flux de débits est un facteur lié à la concentration des débits du cours d'eau en un point donné. Les secteurs où ces valeurs de concentration sont importantes indiquent des zones plus sujettes aux crues, donc à l'aléa inondation. Pour cette étude, les valeurs de concentration partent de très faible (1 à 2) à très forte (64 à 128) comme l'indique le **tableau 20**.

**Tableau 20 : Notation des classes d'accumulation des flux de débits**

<i>Facteur</i>	<i>Valeur</i>	<i>Niveau</i>	<i>Note</i>
Accumulation des flux de débits	1 à 2	Très faible	1
	2 à 8	Faible	2
	8 à 32	Moyen	3
	32 à 64	Fort	4
	64 à 128	Très fort	5

*Source : nos traitements de données, 2021*

- **Hiérarchisation des facteurs « altitude » et « pente »**

Les niveaux d'altitude et de pente constituent des facteurs topographiques très importants qui influencent l'écoulement superficiel de l'eau dans un bassin fluvial tel que celui étudié. Plus de 64 % de la superficie du département de Soubré, duquel est extrait notre zone d'étude, présente un niveau de pente très faible, inférieurs à 2 % (V. M. Sorokoby, p. 163). Il en découle une prédisposition à l'aléa d'inondation fluviale, car les altitudes et les pentes s'affaiblissent autour des cours d'eau avec l'existence de zones planes qui favorisent la faiblesse des écoulements. Ainsi, les classes d'altitude et de pente suivent les catégorisations identiques aux facteurs précédents (**tableaux 21 et 22**).

**Tableau 21 : Notation des niveaux d'altitude à l'aléa inondation**

<i>Facteurs</i>	<i>Valeurs (en m)</i>	<i>Niveau</i>	<i>Note</i>
Altitude	> 220	Très faible	1
	150 à 220	Faible	2
	120 à 150	Moyen	3
	95 à 120	Fort	4
	≤ 95	Très fort	5

**Tableau 22 : Notation des niveaux de pente à l'aléa inondation**

<i>Facteur</i>	<i>Valeurs en %</i>	<i>Niveau</i>	<i>Note</i>
Pente	>15	Très faible	1
	7 à 15	Faible	2
	5 à 7	Moyen	3
	2 à 5	Fort	4
	< 2	Très fort	5

*Source : nos traitements de données, 2021*

- **Hiérarchisation du facteur « Indice d'Humidité Topographique (TWI) »**

L'indice d'humidité topographique ou *Topographic Wetness Index* (TWI) est un facteur important de susceptibilité de l'aléa inondation dans le contexte fluvial. Il s'obtient à partir du

modèle numérique de terrain du bassin-versant étudié (voir point 4.5.1.5 du ce chapitre). Pour une valeur d'aire de drainage élevée ayant une pente élevée, le TWI est faible. Dans le cas contraire, l'indice est important pour une aire de drainage et une pente très faible. Pour cette étude, la plus grande valeur d'indice est supérieure à 14. Ce qui est lié à une pente inférieure à 2 %. Le **tableau 23** donne la classification adoptée pour ce facteur d'aléa.

*Tableau 23 : Notation des indices d'humidité topographique (TWI)*

<i>Facteur</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Niveau</i>	<i>Note</i>
Indice d'humidité topographique (TWI)	3 à 6	Très faible	1
	6 à 8	Faible	2
	8 à 10	Moyen	3
	10 à 14	Fort	4
	>14	Très fort	5

*Source : nos traitements de données, 2021*

#### **4.5.3.1.2 Hiérarchisation des facteurs d'enjeux exposés à l'aléa inondation fluviale**

L'aléa ne devient un risque qu'en présence de divers enjeux importants dont les enjeux humains, économiques et environnementaux. Dès lors, la densité de population, les unités d'occupation du sol et la distance par rapport au réseau hydrographique constituent les facteurs choisis.

- **Hiérarchisation du facteur « densité de population »**

Le facteur démographique est un enjeu très important de l'analyse de la susceptibilité d'un territoire à l'aléa inondation. En effet, le facteur humain est au cœur de tous les concepts de vulnérabilité lié aux enjeux exposés à un aléa hydroclimatique. Plus un territoire est peuplé, plus les potentiels endommagements liés à l'exposition de la manifestation de l'aléa peuvent être importants. Dans le contexte de notre étude, la densité de population est obtenue à partir des données démographiques de 5 sous-préfectures de la région de Soubré. Les zones plus peuplées sont affectées des notes plus élevées et de la classe forte ou très forte (**tableau 24**).

**Tableau 24 : Notation du facteur d'enjeux « densité de population »**

<i>Facteur</i>	<i>Valeurs (en hbts/km<sup>2</sup>)</i>	<i>Niveau</i>	<i>Note</i>
Densité de population	0 - 41	Très faible	1
	42 - 67	Faible	2
	67 - 100	Moyen	3
	100 - 122	Fort	4
	123 - 470	Très fort	5

*Source : nos traitements de données, 2021*

- **Hiérarchisation du facteur « occupation du sol »**

De façon générale, chaque unité de l'occupation du sol joue un rôle particulier dans la susceptibilité à l'aléa inondation fluviale. Cependant, dans le contexte de notre analyse, il s'agit de considérer plutôt ces unités comme exposées à un impact potentiel de l'aléa inondation fluviale. Quatre (4) unités ont été retenues parmi les unités générées par la carte de l'occupation du sol. Cette carte a été réalisée à partir des images satellitaires de Landsat 8 OLI/TIRS de l'année 2020. Il s'agit des unités : zones bâties (infrastructures socio-économiques, bâties), des cultures et jachères (exploitations agricoles et autres), des sols nus (voiries et pistes cyclables) et enfin des forêts (forêts sous toutes leurs formes, aires classées). Ainsi, une note est affectée à chaque unité d'occupation du sol du plus exposée (5) au moins exposée (1), donc du plus vulnérable au moins vulnérable à la manifestation de l'aléa inondation fluviale (**tableau 25**).

**Tableau 25 : Notation du facteur d'enjeux « occupation du sol »**

<i>Facteur</i>	<i>Classes</i>	<i>Valeurs (en ha)</i>	<i>Note</i>
Occupation du sol	Plan d'eau	113	-
	Sols nus	93	3
	Zones bâties	113	5
	Forêt	154	2
	Cultures/jachères	161	4

*Source : images satellitaires Landsat 8, 2020*

- **Hiérarchisation du facteur « distance au réseau hydrographique »**

Dans le contexte du risque d'inondation fluviale, la zone où le risque d'inondation lié aux crues est susceptible de se produire s'étend sur les bordures des cours d'eau. Les enjeux présents

et proches de ces cours d'eau ont une propension d'exposition plus élevée que ceux qui en sont éloignés, en cas de débordement des cours d'eau. Pour cette étude, les zones considérées comme proches sont situées à moins de 200 mètres. Le **tableau 26** présente la notation et la classification adoptées pour ce facteur d'exposition des enjeux à l'aléa d'inondation fluviale.

**Tableau 26** : Notation du facteur « distance au réseau hydrographique »

<i>Facteur</i>	<i>Classe</i>	<i>Niveau</i>	<i>Note</i>
Distance des enjeux par rapport au réseau hydrographique	0-200	Très fort	5
	200-400	Fort	4
	400-600	Moyen	3
	600-800	Faible	2
	> 800	Très faible	1

*Source* : nos traitements de données, 2021

#### 4.5.3.2 Classification et standardisation des critères de risque d'inondation fluviale

Après le choix et la notation des différents facteurs, une classification est effectuée afin de permettre une bonne analyse multicritère à travers une comparaison des facteurs deux par deux. Cette étape consiste à attribuer des valeurs d'ordre ordinal à des jugements ou appréciations sur l'importance d'un facteur par rapport à un autre sur la base d'une échelle de valeurs numériques proposée en 1984 par T. L. Saaty (**tableau 27**). Les éléments de décision peuvent à la suite être classés selon leur importance relative les uns par rapport aux autres.

**Tableau 27** : Échelle des valeurs et expression qualitative associée

Degré d'importance	Définition	Commentaire
1	Importance égale de deux éléments	Deux éléments contribuent autant à la propriété
3	Faible importance d'un élément par rapport à l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelle favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
5	Importance forte ou déterminante d'un élément par rapport à un autre	L'expérience et l'appréciation personnelle favorisent fortement un élément par rapport à un autre
7	Importance attestée d'un élément par rapport à un autre	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
9	Importance absolue d'un élément par rapport à un autre	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible
2,4,6,8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines	Un compromis est nécessaire entre deux appréciations

*Source* : T. L. Saaty, 1984

#### 4.5.3.3 Pondération des critères d'analyse du risque d'inondation fluviale

Les **tableaux 28 et 29** présentent respectivement les résultats de la matrice de comparaison par paire adoptée pour chaque composante d'aléa et d'enjeux.

*Tableau 28 : Matrice de comparaison par paire des différents facteurs d'aléa d'inondation*

<b>Facteurs</b>	Densité de drainage	Accumulation des débits	Pente	Indice d'Humidité Topographique (TWI)	Altitude
Densité de drainage	1	2	3	3	2
Accumulation des débits	1/2	1	2	1/2	1/2
Pente	1/3	1/2	1	1/2	2
Indice d'Humidité Topographique (TWI)	1/3	2	1/2	1	1/2
Altitude	1/2	2	1/2	2	1
<b>Somme colonne (<math>\Sigma</math>)</b>	8/3	15/2	7	7	6

*Source : traitements de données, 2021*

*Tableau 29 : Matrice de comparaison par paire des différents facteurs d'enjeux*

<b>Facteurs</b>	Occupation du sol	Densité de population	Distance au réseau hydrographique
Occupation du sol	1	3	1/2
Densité de population	1/3	1	1/3
Distance au réseau hydrographique	2	3	1
<b>Somme colonne (<math>\Sigma</math>)</b>	10/3	6	11/6

*Source : traitements de données, 2021*

#### 4.5.3.4 Normalisation de la matrice

L'objectif de la normalisation de la matrice est de déterminer la valeur propre de chaque facteur. Pour ce faire, chaque valeur d'appréciation d'une colonne est divisée par la somme de cette colonne (**tableaux 30 et 31**).

**Tableau 30:** Normalisation de la matrice des facteurs d'aléa inondation

Facteurs	Densité de drainage	Accumulation des débits	Pente	Indice d'Humidité Topographique (TWI)	Altitude
Densité de drainage	0,375	0,267	0,429	0,429	0,333
Accumulation des débits	0,188	0,133	0,286	0,071	0,083
Pente	0,125	0,067	0,143	0,071	0,333
Indice d'Humidité Topographique (TWI)	0,125	0,267	0,071	0,143	0,083
Altitude	0,188	0,267	0,071	0,286	0,167

Source : traitements de données, 2021

**Tableau 31 :** Normalisation de la matrice des facteurs des enjeux

Facteurs	Occupation du sol	Densité de population	Distance au réseau hydrographique
Occupation du sol	0,300	0,429	0,273
Densité de population	0,100	0,143	0,182
Distance au réseau hydrographique	0,600	0,429	0,545

Source : traitements de données, 2021

Par la suite, on calcule la moyenne de chaque ligne, ce qui permet d'obtenir la priorité de chaque facteur. La somme des priorités doit être égale à 1 ou 100 %.

Pour la priorité des facteurs d'aléa, on a :

- Densité de drainage :  $(0,375+0,267+0,429+0,429+0,333)/5 = 0,366$  ou 36 %

- Accumulation des débits :  $(0,188+0,133+0,286+0,071+0,083)/5 = 0,152$  ou 15 %

- Pente :  $(0,125+0,067+0,143+0,071+0,333)/5 = 0,148$  ou 15 %

- Indice d'Humidité Topographique :  $(0,125+0,267+0,071+0,143+0,083)/5 = 0,138$  ou 14 %

- Altitude :  $(0,188+0,267+0,071+0,286+0,167)/5 = 0,196$  ou 20 %

Partant, la priorité du facteur " Densité du drainage " vaut  $P_{Dd} = 0,36$  ; celle du facteur "Accumulation des débits" vaut  $P_{Ad} = 0,15$  ; celle du facteur " Pente " vaut  $P_p = 0,15$  ; celle du facteur " Indice d'Humidité Topographique " vaut  $P_{twi} = 0,14$  et celle du facteur " Altitude " vaut  $P_A = 0,20$ .

Pour la priorité des facteurs d'enjeux, on a :

- Occupation du sol :  $(0,300+0,429+0,273)/3 = 0,34$  ou 34 %
- Densité de population :  $(0,100+0,143+0,182)/3 = 0,14$  ou 14 %
- Distance au réseau hydrographique :  $(0,600+0,429+0,545)/3 = 0,52$  ou 52 %

Ainsi, au niveau des enjeux, la priorité du facteur " Occupation du sol " vaut  $P_{Os} = 0,34$  ; celle du facteur " Densité de la population " vaut  $P_{Dp} = 0,14$  et celle du facteur " Distance au réseau hydrographique " vaut  $P_{Drh} = 0,52$ .

Après cette étape, toutes ces données obtenues au niveau de chaque facteur sont soumises à des tests de cohérence.

#### 4.5.3.5 Vérification de la cohérence du jugement

Le but est de vérifier s'il existe une logique entre les valeurs obtenues, ou encore si la démarche suivie est cohérente. Pour cela, il faut déterminer plusieurs paramètres dont le ratio de cohérence. Il s'obtient en divisant la somme de la ligne des vecteurs de priorité par le vecteur de priorité du facteur concerné. Les **tableaux 32 et 33** présentent les ratios de cohérence des différents facteurs d'aléa et d'enjeux de cette étude.

**Tableau 32 : Détermination des ratios de cohérence (facteurs d'aléa)**

Critères	Somme des vecteurs de priorité	Priorité de chaque facteur	Ratios de cohérence
Densité de drainage	1,92	0,36	5,24
Accumulation des débits	0,80	0,15	5,24
Pente	0,81	0,15	5,45
Indice d'Humidité Topographique (TWI)	0,74	0,14	5,34
Altitude	1,03	0,20	5,28
<b>Somme colonne (<math>\Sigma</math>)</b>	5,29	1	5,29

Source : nos traitements de données, 2021

**Tableau 33 : Détermination des ratios de cohérence (facteur d'enjeux)**

Critères	Somme des vecteurs de priorité	Priorité de chaque enjeu	Ratios de cohérence
Occupation du sol	1,02	0,34	3,058
Densité de population	0,43	0,14	3,021
Distance au réseau hydrographique	1,62	0,52	3,082
<b>Somme colonne (<math>\Sigma</math>)</b>	3,070	1	3,070

Source : traitements de données, 2021

Ensuite, il faut calculer la valeur propre maximale de chaque matrice appelée Lamda ( $\lambda_{\max}$ ). La valeur de  $\lambda_{\max}$ , est égale à  $n$  ou supérieure à  $n$  si et seulement si la matrice est à priori cohérente (M. Brunelli, 2015, p. 29). Dans le cas contraire, il faut déterminer l'indice de cohérence (IC) proposé par T. L. Saaty. Il s'agit de valider les priorités obtenues et de donner un sens « logique et cohérent » à la matrice de jugement ou de comparaison. Lamda ( $\lambda_{\max}$ ) se calcule selon l'équation :

$$\lambda_{\max} = \Sigma D / n \quad (40)$$

Avec  $n$  le nombre de critères ou de facteurs et  $D$  la somme des ratios de cohérence. On obtient par conséquent pour chaque composante :

- $\lambda_{\max}$  (aléa) :  $(5,24+5,24+5,45+5,34+5,28)/5 = 5,31$ , avec  $n=5$
- $\lambda_{\max}$  (enjeux) :  $(3,058+3,021+3,082)/3 = 3,05$  avec  $n=3$

Les différentes valeurs propres maximales d'aléa ( $5,31 > 3$ ) et d'enjeux ( $3,05 > 3$ ) sont supérieures à  $n$ , par conséquent la matrice de comparaison est à priori cohérente.

Toutefois, l'indice de cohérence (IC) et le ratio (ou rapport) de cohérence (RC) sont déterminés pour confirmer ce résultat. L'indice de cohérence (IC) est déterminé selon l'équation suivante :

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} ; \text{ Avec } n : \text{ nombre de facteurs à comparer.} \quad (41)$$

Soit pour les facteurs d'aléa :

$$IC(\text{aléa}) = \frac{5,31 - 5}{5 - 1} = 0,078$$

Et pour les facteurs d'enjeux :

$$IC(aléa) = \frac{3,05-3}{3-1} = 0,027$$

Quant au ratio (ou rapport) de cohérence RC, il s'obtient selon l'équation ci-contre :

$$RC = \frac{IC}{IA}; \text{ Avec IA : l'Indice Aléatoire.} \quad (42)$$

Les valeurs de l'indice aléatoire (IA) sont données en fonction du nombre de facteurs comparés. Ces différentes valeurs sont déjà déterminées par T. L. Saaty sur la base de plusieurs échantillons de matrice. Ils sont présentés dans le **tableau 34**.

*Tableau 34 : Indices aléatoires selon le nombre de critères à comparer*

Nombre de critères ou facteurs (n)	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Valeurs IA	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

*Source : T. L. Saaty, 1990*

Dans le cadre de cette étude, il y a 5 facteurs d'aléa et 3 d'enjeux. Selon le tableau 35, l'indice aléatoire des facteurs d'aléa vaut 0,58 et celui des enjeux est égal 1,12. Partant, on obtient les ratios de cohérence suivants :

$$RC(aléa) = \frac{0,078}{1,12} = 0,069 < 0,1 \text{ ou } 0,6 \% < 10 \%$$

$$RC(enjeux) = \frac{0,027}{0,58} = 0,46 < 0,1 \text{ ou } 4,6 \% < 10 \%$$

Les différents ratios de cohérence sont inférieurs à 0,10 soit 10 % au niveau de chaque composante. Par conséquent, le raisonnement utilisé pour la matrice de comparaison des différents facteurs du risque d'inondation fluviale dans le bassin aménagé de Soubré a suivi une logique cohérente.

#### **4.5.3.6 Agrégation des facteurs**

Cette étape consiste en la sommation des valeurs normalisées et pondérées de chaque facteur intervenant dans le phénomène étudié. En d'autres termes, elle consiste à multiplier chaque facteur par son coefficient de pondération et ensuite à additionner ces résultats selon la formule suivante :

$$S = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (43)$$

Avec :

S le résultat final ;

$W_i$  le poids du facteur ou critère  $i$  ;

$X_i$  la valeur standardisée ou normalisée du facteur  $i$

Ainsi pour l'élaboration de la carte du risque d'inondation fluviale, résultant des différentes composantes d'aléa et d'enjeux, on utilise l'équation 1 suivante :

**Risque d'inondation = Aléa\*Enjeux**

$$Aléa = 0,36*nDd + 0,15*nAd + 0,15*nP + 0,14*nTWI + 0,20*nA$$

$$Enjeux = 0,14*nDp + 0,34*nOs + 0,52*nDrh$$

Avec :

Dd : Densité du drainage ; Ad : Accumulation des débits ; P : Pente ; TWI : Indice d'humidité topographique et A : Altitude ;

Os : Occupation du sol ; Dp : Densité de population et Drh : Distance par rapport au réseau hydrographique et n : note affectée aux classes des facteurs

De ce qui précède, les poids pondérés des facteurs de chaque composante de risque d'inondation fluviale sont présentés dans **les tableaux 35 et 36**.

**Tableau 35 : Classes des notes pondérées des facteurs d'aléa à l'inondation fluviale**

Facteurs d'aléa	Classification	Valeurs Classes	Poids pondérés
Densité du Réseau de drainage	Très faible	>1	0,36
	Faible	2 à 3	0,72
	Moyen	4 à 5	1,08
	Fort	5 à 6	1,44
	Très fort	7 à 8	1,80
Accumulation des débits	Très faible	1 à 2	0,15
	Faible	2 à 8	0,30
	Moyen	8 à 32	0,45
	Fort	32 à 64	0,60
Pente	Très fort	15 à 64	0,15
	Fort	7 à 15	0,30
	Moyen	5 à 7	0,45
	Faible	2 à 5	0,60
Indice d'Humidité Topographique (TWI)	Très faible	3 à 6	0,14
	Faible	6 à 8	0,28
	Moyen	8 à 10	0,42
	Fort	10 à 14	0,56
	Très fort	>14	0,70
Altitude	Très fort	>220	0,20
	Fort	150 à 220	0,40
	Moyen	120 à 150	0,60
	Faible	95 à 120	0,80
	Très faible	≤95	1,00

*Source : traitements de données, 2021*

**Tableau 36 : Classes des notes pondérées des facteurs d'enjeu face à l'inondation fluviale**

Facteurs d'enjeu	Classification	Valeurs des classes	Poids pondérés
Occupation du sol	Plan d'eau	113	0,33
	Sols nus	93	0,99
	Zones bâties	113	1,65
	Forêt	154	0,66
	Cultures/jachères	161	1,32
Densité de population	Très faible	0-41	0,15
	Faible	42 - 67	0,30
	Moyen	67 - 100	0,45
	Fort	100 - 122	0,60
	Très fort	123 - 470	0,75
Distance au réseau hydrographique	Très fort	0 - 200	2,60
	Fort	200 - 400	2,08
	Moyen	400 - 600	1,56
	Faible	600 - 800	1,04
	Très faible	> 800	0,52

*Source : traitements de données, 2021*

Enfin, toute la démarche cartographique suivie est résumée dans la **figure 35**.

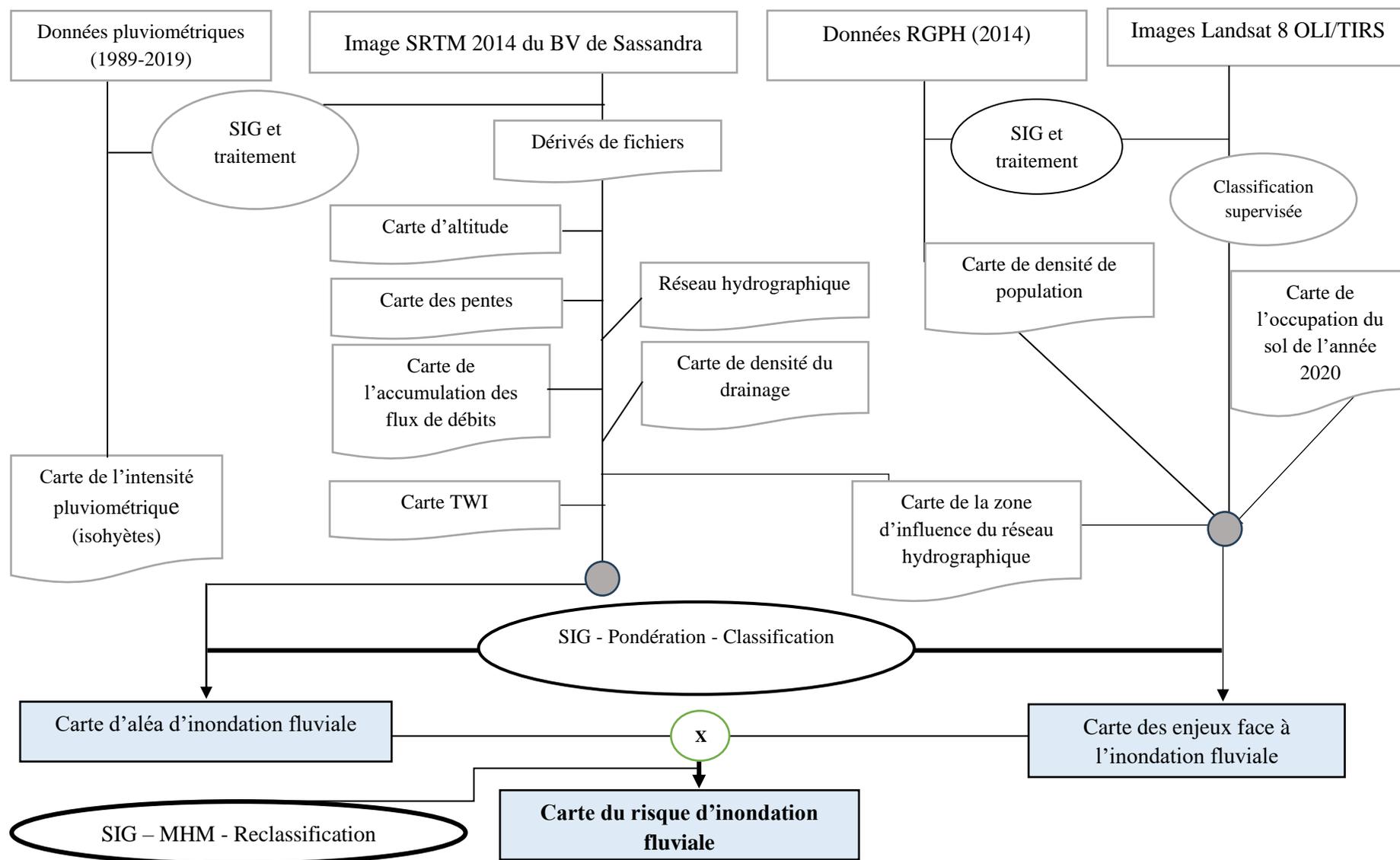


Figure 35 : Schéma méthodologique d'évaluation du risque d'inondation fluviale

#### 4.6 Méthode d'application du modèle hydrologique GR4J pour la prévision des crues dans le bassin hydrographique du Sassandra à l'exutoire de Soubré

La modélisation hydrologique est l'ensemble des techniques et méthodes mises en œuvre pour reproduire le comportement hydrologique du bassin, en l'occurrence les débits à l'exutoire du bassin. Autrement, c'est une représentation mathématique des processus hydrologiques à l'échelle du bassin-versant. De la revue bibliographique, il existe une panoplie de modèles hydrologiques réparties en plusieurs classes, notamment l'unité spatiale, la description du processus hydrologique, le pas temps, etc. Cependant, il convient de noter que les modèles hydrologiques ne sont qu'une représentation simpliste de la réalité. C'est pourquoi, lors de la mise en œuvre d'un modèle sur un bassin, on procède à un ajustement des paramètres en vue de l'adapter au mieux que possible au contexte du bassin.

##### 4.6.1 Structure et fonctionnement du modèle GR4J

Dans le cadre de la présente étude, le modèle du génie rural à quatre (4) paramètres journaliers (GR4J) a été choisi devant une palette d'autres modèles (**figure 36**). Il s'agit donc d'analyser la prédétermination des crues pouvant aboutir sur des risques d'inondation à travers les paramètres hydro-climatiques à l'échelle du bassin aménagé à l'exutoire de Soubré.

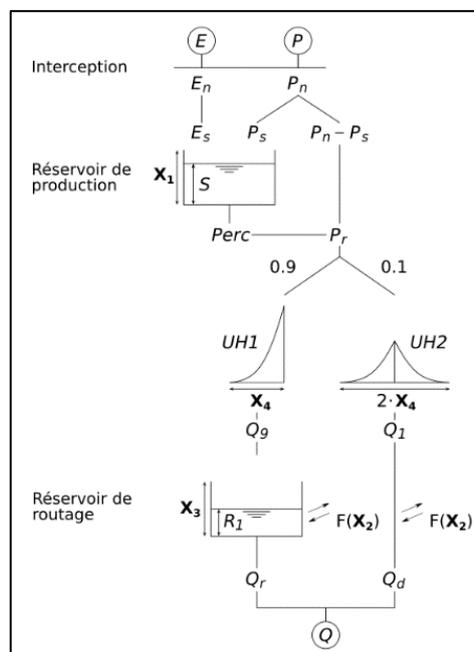


Figure 36 : Structure schématique de fonctionnement du modèle GR4J

Où

- $E_0$  est l'évapotranspiration potentielle,  $P$  la précipitation,  $T$  la température et  $Q$  le débit.

- $X_1$  : paramètre représentant la capacité du réservoir de production (mm). Lorsqu'il diminue, l'amplitude du débit augmente. Il y a donc un étirement vertical des valeurs de débit. La capacité de rétention diminuant, le débit issu de ce réservoir est donc plus important.
- $X_2$  : coefficient d'échanges souterrain (mm). Lorsque ce paramètre diminue, les valeurs de débits sont translatées vers le bas. En effet,  $X_2 > 0$  correspond à un apport souterrain, tandis que  $X_2 < 0$  correspond à une perte.
- $X_3$  : capacité à un jour du réservoir de routage (mm) Lorsqu'il diminue, les valeurs de  $Q$  sont augmentées. En effet, si la capacité de réservoir diminue, l'excédent d'eau arrivant au réservoir est restitué sous forme de débit, d'où son augmentation.
- $X_4$  : temps de base de l'hydrogramme unitaire (jour). Lorsque ce paramètre augmente, une translation des valeurs de débit vers la droite est constatée. Les pics de valeurs sont également lissés. L'augmentation de  $X_4$  entraîne l'allongement de la réponse du bassin versant, d'où la translation

Ainsi, ces réservoirs se remplissent et se vident afin de modéliser la réponse du bassin-versant. Il existe un régime transitoire pendant lequel les différents réservoirs se remplissent avant d'atteindre le régime avec les valeurs demandées. Il est donc nécessaire de réaliser une initialisation du modèle. Les quatre (4) paramètres optimisables du modèle GR4J permettent de réguler la capacité des réservoirs et leurs remplissages. Aussi, pour de meilleurs résultats, il est important de disposer d'une chronique de débits observés suffisamment longue et de bonne qualité. Par conséquent, les données de débits utilisés dans cette étude ont été soumises à la technique de validation-croisée

## 4.6.2 Validation croisée et comblement des débits lacunaires

### 4.6.2.1 Validation croisée (cross-validation)

La validation croisée ou cross-validation (en anglais) est une technique très utilisée en machine Learning pour la conception et l'évaluation des modèles. Elle permet d'étudier la performance du modèle et la pertinence des intrants utilisés. Elle permet également de comparer la performance de différents modèles afin de sélectionner celui susceptible de mener aux meilleures prévisions (D. Baka et *al.*, 2019, p. 2019). Pour S. Arlot (2017, p. 2), la validation croisée se place dans un contexte de prévision et permet d'éviter les erreurs empiriques d'échantillonnage.

De façon pratique, la technique consiste à découper la série de données en  $n$  sous-série et à utiliser les  $n-1$  sous-séries pour calibrer le modèle. La sous-série restante est conservée pour la validation. La technique se fait de façon itérative en changeant à chaque itération les sous-séries de calibration et de validation. Dans cette étude, la série de données a été découpée en trois (3) sous-séries de dix (10) années chacune (1980-1989 ; 1990-1999 ; 2000-2009). Deux processus de mise en œuvre ont été effectués. Pour le premier processus, la calibration du modèle a été effectuée sur les deux premières sous-séries, c'est-à-dire de 1980-1999. La validation quant à elle s'est faite sur la dernière sous-série (2000-2009). Pour le second processus, les deux dernières sous-séries (1990-2009) ont été utilisées pour la calibration et l'autre sous-série (1980-1989) pour la validation.

Le test de validation croisée a révélé que les données de débits observées à la station de Soubré n'étaient pas idoines pour la réalisation d'une modélisation pluie-débit efficace. Par conséquent, il faut procéder à un comblement des débits lacunaires au niveau de la station de Soubré par la méthode du double cumul.

#### 4.6.2.2 Critère de qualité de l'ajustement du modèle

La validation du modèle est vérifiée par une comparaison des débits calculés et observés à travers un ou plusieurs critères de qualité. Les critères utilisés pour évaluer la performance du modèle sont le critère d'efficacité de J. Nash et V. Sutcliffe (1970), le coefficient de corrélation  $R^2$  et le pourcentage de biais. Ces critères ont été proposés par J. G. Arnold et al. (2012, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00279-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00279-1)). Le critère de J. Nash et V. Sutcliffe (1970) est sans doute le critère le plus utilisé en modélisation hydrologique, il varie entre  $-∞$  (44) meilleur score étant 1. Toutefois, il convient de noter que dans la pratique, cette valeur optimale ne peut être atteinte. Lorsque le Nash est  $\geq 0,5$ , le  $P_{\text{biais}} \pm 25 \%$  et le coefficient  $R^2 \geq 0,5$ , le modèle est jugé acceptable. Le critère de J. Nash et V. Sutcliffe (1970) comme susmentionné s'exprime à travers l'équation ci-dessous :

$$Nash \ \& \ Sutcliffe \ (\%) = 100 \left[ 1 - \frac{\sum_i (Q_{i \text{ obs}} - Q_{i \text{ cal}})^2}{\sum_i (Q_{i \text{ obs}} - Q_{i \text{ moy}})^2} \right]$$

Dans cette formule, on a :

- Nash exprimé en pourcentage (%),
- $Q_{\text{obs}}$  : débit observé,
- $Q_{\text{cal}}$  : débit calculé,

- $\overline{Q_{iObs}}$  : moyenne des débits observés sur la période

Également, on estime la performance du modèle ou la qualité de la simulation selon les valeurs prises par le critère de Nash (C. H. Berthier, 2005, p.19) :

- Nash  $\geq$  90 % : le modèle est excellent ;
- 80 % < Nash < 90 % : le modèle est très satisfaisant ;
- 60 % < Nash < 80 % : le modèle est satisfaisant ;
- Nash < 60 % : le modèle est mauvais.

Le coefficient  $R^2$  s'exprime selon l'équation suivante :

$$R^2 = \frac{\sum_t^T (Q_{Sim}^t - \overline{Q_{Sim}^t}) (Q_{Obs}^t - \overline{Q_{Obs}^t})}{\sqrt{(\sum_t^T (Q_{Sim}^t - \overline{Q_{Sim}^t})^2)} \sqrt{(\sum_t^T (Q_{Obs}^t - \overline{Q_{Obs}^t})^2)}} \quad (45)$$

Le pourcentage de biais :

$$PBiais = \frac{\sum_t^T (Q_{Obs}^t - Q_{Sim}^t)^2}{\sum_t^T Q_{Obs}^t} * 100 \quad (46)$$

#### 4.6.2.3 Calibration du modèle

Pour mener à bien cette modélisation hydrologique, la calibration constitue une étape du travail à réaliser. Celle-ci a pour but de définir le modèle à construire et de le faire coïncider au maximum avec un événement réel pris comme référence. C'est-à-dire l'objectif de la calibration est d'établir une concordance entre les débits simulés et observés en ajustant de façon itérative les paramètres internes du modèle. Pour les modèles à base physique qui sont fortement paramétrés, en amont de la calibration une étude de sensibilité est souvent nécessaire pour identifier les paramètres qui influent plus sur le processus hydrologique. Par contre, pour un modèle conceptuel comme GR4J, qui ne possède que quatre (4) paramètres journaliers, cette étape peut être négligée. Les paramètres du modèle seront adaptés au modèle et au phénomène étudié afin de tendre plus vers la réalité. Cette phase doit être effectuée avec la plus grande attention car elle constitue la base du travail qui permet de déterminer le paramètre optimal., En d'autres termes, il s'agira de sélectionner le jeu de paramètres d'un modèle de façon à ce que celui-ci simule le comportement hydrologique du bassin versant de la meilleure façon possible (H. Madsen, 2000, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00279-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00279-1)).

Dans le contexte de notre modélisation hydrologique, la calibration du modèle a été effectuée sur une période comportant treize (13) années d'observation (1983-1995). La période 1981-1982 a servi de période de routage du modèle.

#### **4.6.2.4 Validation du modèle**

La validation succède à la calibration ; elle a pour but de tester les performances du modèle sur une période autre que celle utilisée pour la calibration. C'est-à-dire que la validation porte sur l'application des données qui n'ont pas été utilisées lors de la calibration du modèle. En d'autres termes, elle vise à étudier la transférabilité des paramètres du modèle dans le temps, en évaluant les performances du modèle sur une période différente de celle de la calibration. Ainsi, la modélisation sera d'autant plus satisfaisante que les débits calculés ( $Q_c$ ) seront proches des débits effectivement observés ( $Q_o$ ).

Techniquement, la validation s'effectue en forçant le modèle avec les paramètres optimaux identifiés lors de l'étape de la calibration tout en évaluant les performances. Pour cette étude, la validation a été réalisée sur la période 1996-2001 soit six années d'observation. Le modèle est validé lorsque les trois critères de qualités cités plus haut satisfont aux conditions définies par (J. G. Arnold *et al.*, 2012, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00279-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00279-1)). Une fois le modèle validé, on procède ensuite à la simulation en utilisant les paramètres optimaux et les données climatiques.

#### **Conclusion partielle**

Ce chapitre a présenté un ensemble de méthodes de traitement de données statistiques et hydrologiques. L'objectif étant de mieux cerner les contours de cette étude. Ces méthodes et traitement de données ont permis d'atteindre les objectifs spécifiques définis pour cette étude.

## **Conclusion de la deuxième partie**

L'analyse des conditions pluvio-hydrologiques d'apparition des crues et des facteurs d'évaluation des risques d'inondation fluviale dans le bassin-versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré obéit à un ensemble de méthodes de traitement de données. Ces techniques se résument en des méthodes statistiques descriptives des données pluviométriques et hydrométriques relatives aux crues, des techniques de réalisation de cartes thématiques des facteurs de risque d'inondation dans le bassin aménagé. À cela, s'ajoutent la méthode d'analyse fréquentielle et de la détermination des périodes de retour des événements extrêmes, une méthode admise dans le cadre des études de notre problématique.

Par ailleurs, ce chapitre a été le lieu d'aborder la méthode de la modélisation hydrologique des débits moyens à partir du modèle conceptuel global GR4J. Enfin, cette méthodologie adoptée a permis d'obtenir les différents résultats présentés dans les chapitres suivants de la troisième partie.

## **TROISIÈME PARTIE**

### **ANALYSE DES RÉSULTATS, INTERPRÉTATIONS ET DISCUSSIONS**

**Chapitre 5 : Dynamique des conditions pluvio-hydrologiques de crues dans le bassin-versant aménagé du Sassandra à Soubré**

**Chapitre 6 : Fréquence des facteurs pluvio-hydrologiques de génération des crues dans le bassin-versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré.**

**Chapitre 7 : Risque d'inondation fluviale dans le bassin-versant aménagé du fleuve Sassandra à Soubré.**

**Chapitre 8 : Conséquences et mesures stratégiques de gestion intégrée des risques d'inondation à l'échelle du bassin-versant aménagé de Soubré.**

### **Introduction de la troisième partie**

Après la définition des données collectées et des méthodes de traitement adéquats dans la deuxième partie, la troisième et dernière partie de ce manuscrit présente les différents résultats obtenus au cours de cette étude. Ces résultats sont interprétés et discutés relativement aux résultats d'études similaires. Cette partie est donc composée de quatre (4) chapitres à savoir les chapitres 5, 6, 7 et 8.

Ainsi, la dynamique des conditions hydroclimatiques de crues dans le bassin versant aménagé du Sassandra à Soubré est étudiée dans le chapitre 5.

Ensuite, le chapitre 6 étudie les facteurs pluvio-hydrologiques de génération des crues.

Puis, l'analyse du risque d'inondation fluviale à travers les facteurs d'aléas et d'enjeux du bassin aménagé est abordée au niveau du chapitre 7.

Pour finir le chapitre 8 s'attarde sur les conséquences ainsi qu'aux mesures et stratégies de gestion intégrée de ces risques d'inondation à l'échelle du bassin-versant aménagé. Cet axe aborde également l'étape de l'application du modèle hydrologique GR4J (pluie-débit) en vue d'une prévision des normes hydrologiques des crues à risque d'inondation dans le bassin-versant.

## CHAPITRE 5 : DYNAMIQUE DES CONDITIONS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE CRUES DANS LE BASSIN-VERSANT AMÉNAGÉ DU FLEUVE SASSANDRA À L'EXUTOIRE DE SOUBRÉ

Ce chapitre a trait aux conditions de manifestation des crues. Il s'agit des dispositions pluviométriques et hydrométriques participant à la dynamique des crues dans le bassin-versant de Soubré. Plus concrètement, l'étude est portée sur l'analyse de l'évolution des précipitations et des débits dans le bassin fluvial de Soubré. Elle s'est faite sur la base des données de la période 1989-2019 pour les précipitations et 1980 à 2019 pour les débits.

### 5.1 Analyse spatio-temporelle des conditions pluviométriques dans le bassin-versant aménagé du Sassandra à Soubré

#### 5.1.1 Caractéristiques des séries pluviométriques dans le bassin aménagé de Soubré

L'analyse des caractéristiques des paramètres pluviométriques permet d'apprécier leur dispersion les uns par rapport aux autres, mais aussi leur variation par rapport à la moyenne. Les résultats sont consignés dans le **tableau 37**.

*Tableau 37 : Caractéristiques statistiques des séries pluviométriques de Soubré et Buyo (1989-2019)*

Stations	Caractéristiques des variables						
	Moyenne ( $\bar{x}$ ) (mm)	Écart-type (mm)	Écart-moyen (mm)	Variance (Var.) (mm)	Coefficient de variation (mm)	Hauteur minimum (mm)	Hauteur maximum (mm)
Soubré	1452,5	277,98	203,93	77273,38	0,19	814,2	2024,5
Buyo	1424,2	424,9	323,0	181098,5	0,29	457,2	2184,1

*Source : traitements données SODEXAM, 2020*

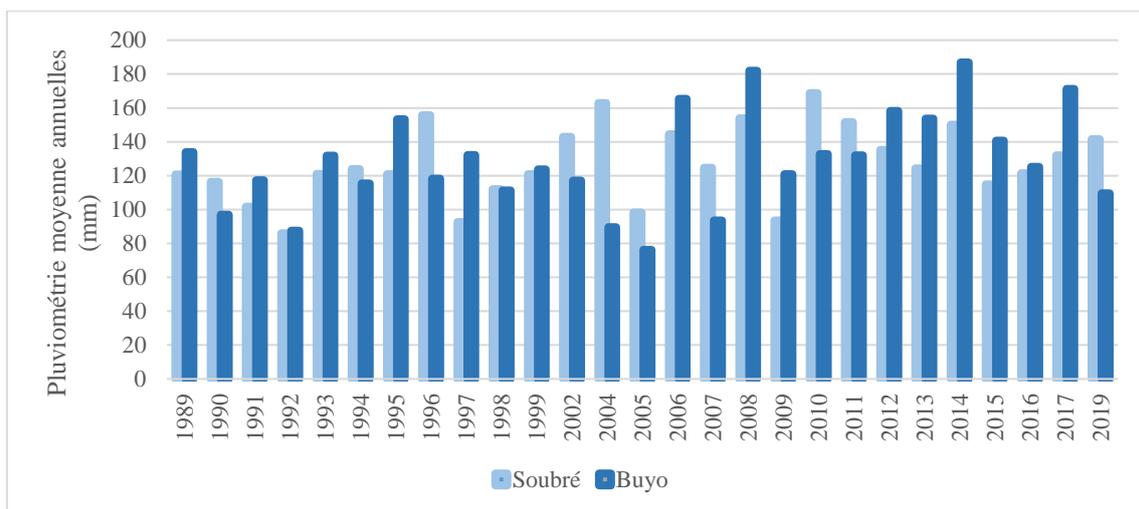
Par ailleurs, il faut souligner que la corrélation des données pluviométriques observées et ajustées a donné respectivement des coefficients de 60 % à la station de Soubré et 10 % à Buyo. Par conséquent, les données observées (Soubré) ont été utilisées pour cette partie de l'étude en éliminant les séries de données annuelles présentant plus de 30 % de lacunes.

Au regard des éléments du **tableau 37**, il ressort que le bassin aménagé du Sassandra à Soubré est soumis à une pluviométrie qui varie entre 1100 mm et 2200 mm de pluie sur la période d'étude. Les minimums pluviométriques sont de 814,2 mm et 457,2 mm respectivement

aux stations de Soubré et Buyo, tandis que les maximums aux mêmes stations sont de 2024,5 mm et 2184,1 mm. Les moyennes pluviométriques sont sensiblement égales et oscillent autour de 1400 mm, avec précisément 1424,2 mm à Buyo et 1452,5 mm à la station de Soubré. Les coefficients de variation sont respectivement 0,19 à la station de Soubré et 0,29 à la station de Buyo.

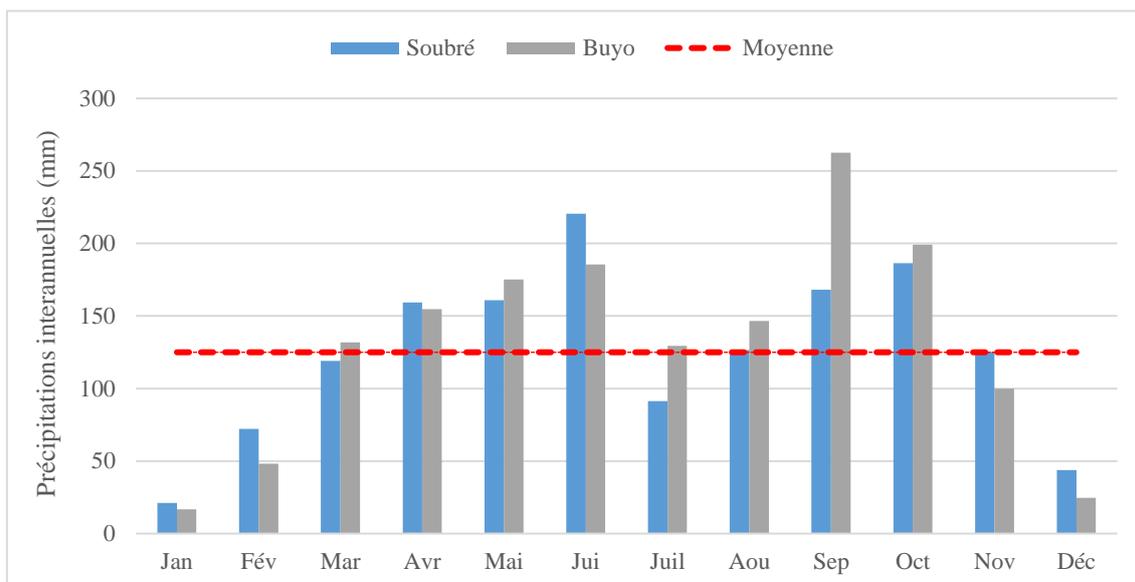
### 5.1.2 Précipitations moyennes dans le bassin aménagé du Sassandra à Soubré

Le Sud-ouest de la Côte d'Ivoire où se situe le bassin aménagé, à l'instar des zones tropicales est soumis à de fortes et intenses pluies chaque année. La **figure 37** présente la variation des précipitations moyennes au niveau des 2 stations pluviométriques du bassin aménagé sur la période 1989-2019. La moyenne pluviométrique à l'exutoire du bassin à Soubré gravite autour de 125 mm pendant qu'à Buyo, elle oscille autour de 130 mm, soit une légère différence de 5 mm.



**Figure 37 :** Évolution des précipitations moyennes à Soubré et Buyo (1989-2019)

Concernant la **figure 38**, elle présente la variation interannuelle des précipitations mensuelles au niveau des deux stations météorologiques. Au niveau des 2 zones (Soubré et Buyo), on constate que les précipitations croissent à partir de la fin du mois de mars et restent constantes au-dessus du module moyen entre les mois d'avril (159 mm à Soubré et 155 mm à Buyo), mai (161 mm à Soubré et 175 mm à Buyo) et juin (223,32 mm à Soubré et 185 à Buyo) avant de baisser en juillet. Elles reprennent au-dessus de la normale (125 mm) pendant les mois d'août et octobre avec une moyenne générale de 190 mm pendant cette période avant de fléchir jusqu'à la fin du mois de mars à 125,5 mm.



**Figure 38 :** Variation des précipitations moyennes interannuelles sur la période 1989-2019

De plus, elle met en relief la saisonnalité temporelle au niveau du bassin aménagé à travers les données pluviométriques des stations météorologiques de Soubré et Buyo.

Par ailleurs, l'analyse de cette figure indique que la première saison humide entame sa montée sensiblement à partir du mois de mars jusqu'à juin où le premier pic annuel est observé. Ensuite, une baisse légère mais au-dessous du module pluviométrique est enregistrée de juillet à août. C'est une période intermédiaire pauvre en précipitations. Cette période cède à son tour la place à la seconde phase très pluvieuse de l'année avec des records pluviométriques à la fin septembre ou début octobre. C'est en moyenne 200 mm de pluie enregistrées pour ces 2 mois (septembre - octobre) sur la période 1989-2019. Pendant cette saison, d'intenses averses sont observées sur la majeure partie des façades du golfe de Guinée. À la fin de cette période, c'est l'amorce de la saison sèche avec une pluviosité généralement faible, voire nulle jusqu'à mars.

La répartition de la pluviométrie mensuelle à l'intérieur de cette partie du bassin du Sassandra s'apparente à celui d'un climat équatorial de transition. La saison des pluies recommencera dès mars avec la remontée du Front Intertropical (FIT) et sa migration progressive vers les latitudes septentrionales. En somme, la pluviométrie est caractérisée par une inégale répartition spatio-temporelle.

### 5.1.3 Cumul pluviométrique et indice de pluviosité du bassin à l'exutoire de Soubré

Les figures 39 et 40 présentent les cumuls pluviométriques aux stations de Soubré et Buyo sur la période 1989-2019.

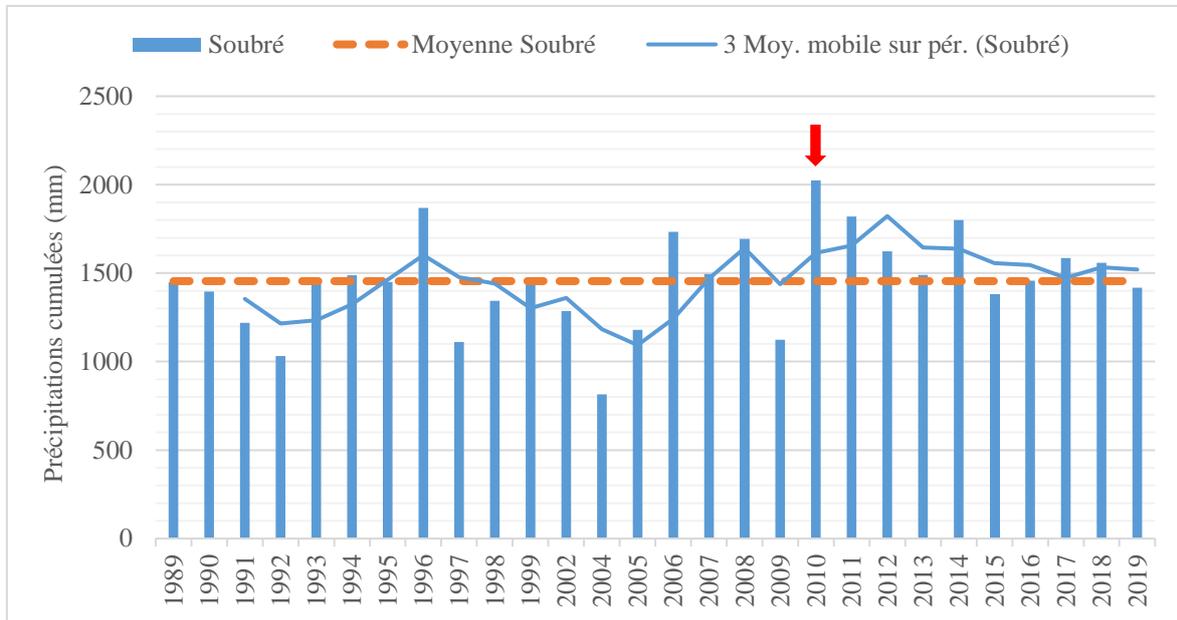


Figure 39 : Cumul pluviométrique à la station de Soubré (1989-2019)

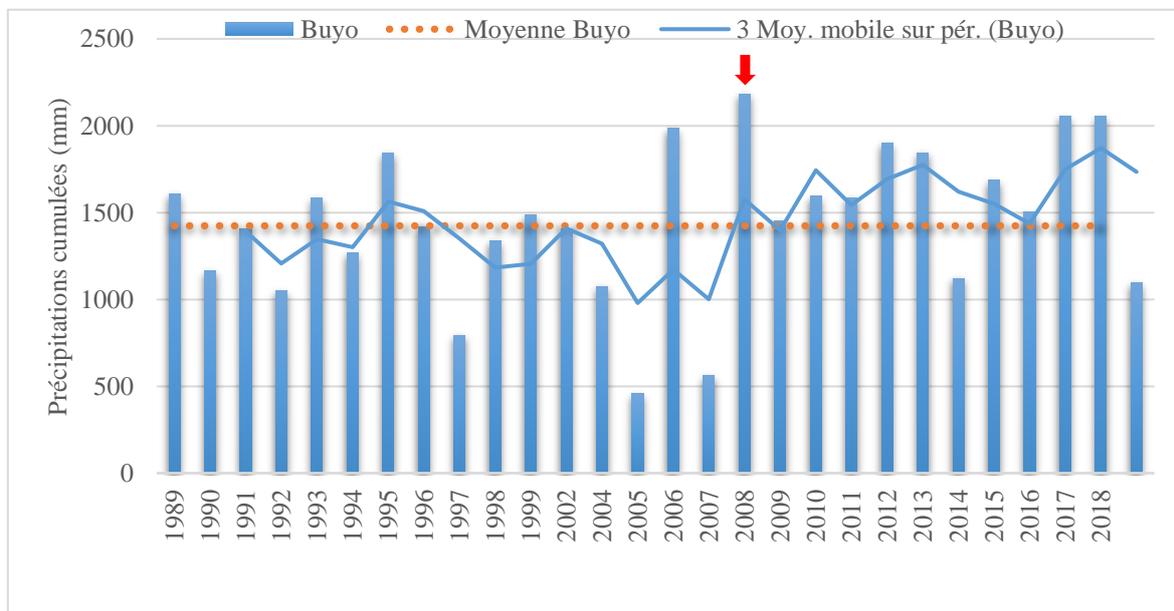


Figure 40 : Cumul pluviométrique à la station de Buyo (1989-2019)

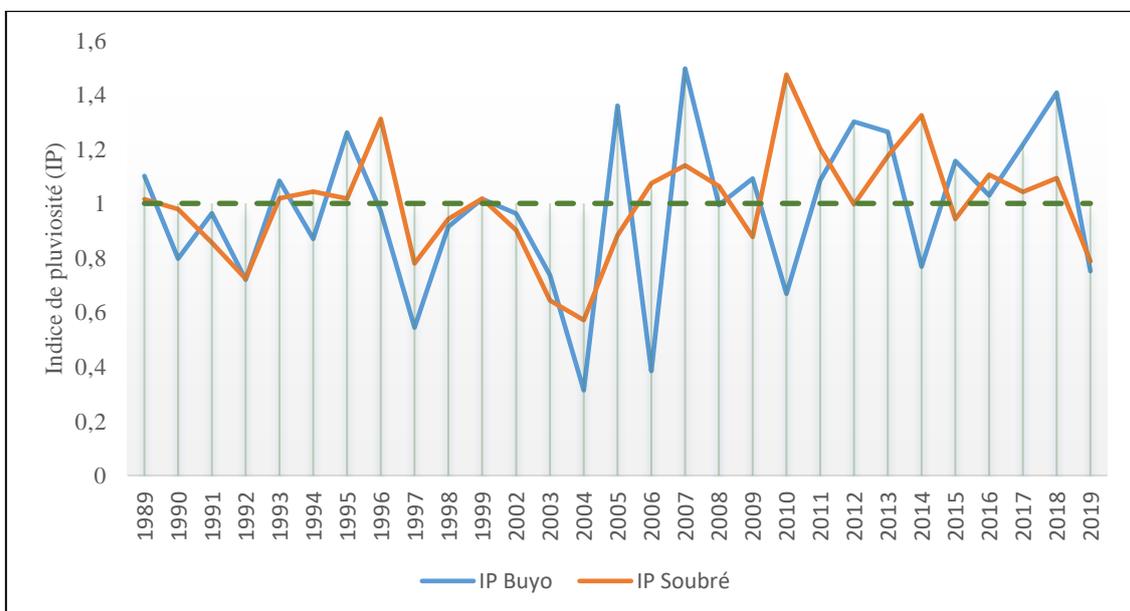
Au regard des figures et des données traitées, la moyenne des précipitations annuelles cumulées s'élève à 1455 mm de pluie sensiblement pour les 2 stations à savoir Buyo et Soubré. Cette donnée est proche des 1500 mm caractéristiques de cette zone du Sud-ouest ivoirien. Le

maximum pluviométrique a été observé en 2010 sur cette période avec 2025 mm (Soubré) contre 2184 à Buyo, 2 ans plutôt, soit en 2008 (**figure 40**).

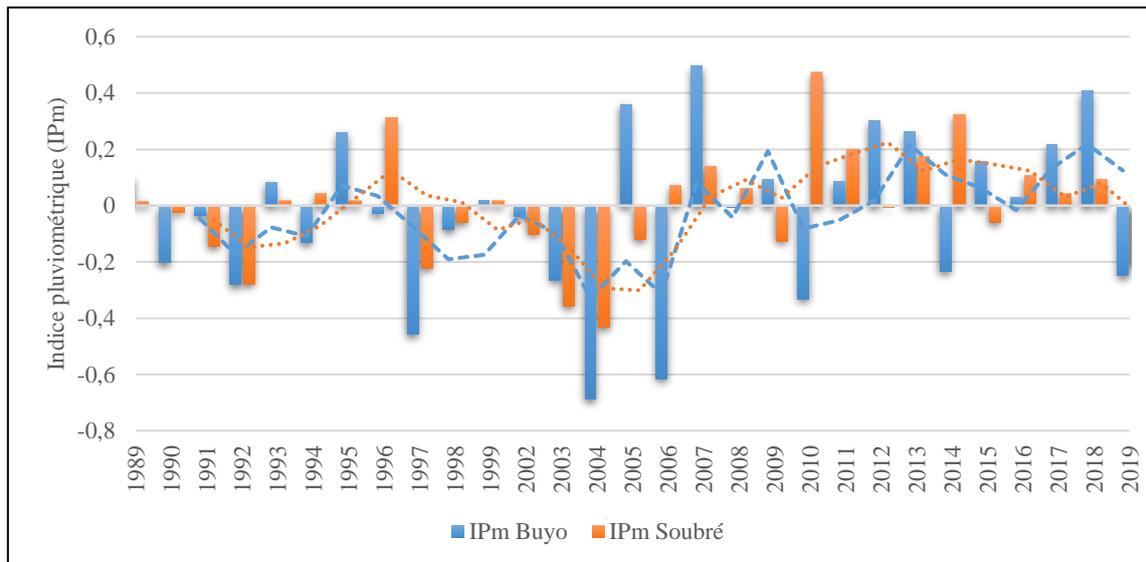
Par ces présents résultats, une nette régression des précipitations au niveau de Buyo est observée et une certaine constante pluviométrique à la station de Soubré. En plus, l'analyse des moyennes mobiles calculées sur 3 ans permet d'apprécier au mieux les contrastes entre les pluies élevées et les faibles pluies. Elle montre aussi les périodes déficitaires et excédentaires.

#### 5.1.4 Régime pluviométrique du bassin à l'exutoire de Soubré

Les figures ci-dessous montrent les variations pluviométriques à l'intérieur du bassin aménagé de Soubré obtenues à partir de l'indice de pluviosité (**figure 41**) et l'indice pluviométrique annuel (**figure 42**).



**Figure 41** : Évolution de l'indice de pluviosité (IP) dans le bassin aménagé.



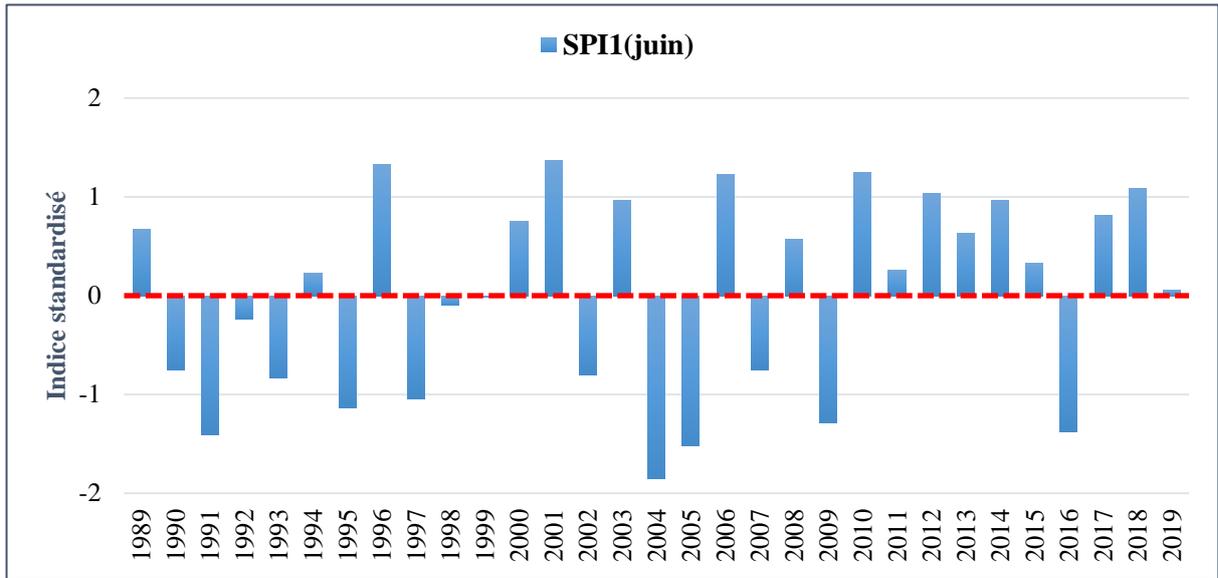
**Figure 42 :** Indice pluviométrique (IPm) dans le bassin aménagé.

À la lumière de la **figure 42**, les déficits pluviométriques observés sur les périodes 1989-1995 et 1996 à 2005 au niveau de Soubré sont sensiblement identiques à la zone de Buyo. Ces périodes déficitaires caractérisent une période sèche. Les périodes humides correspondent aux années 1996 et pratiquement à la dernière décennie 2010-2019. Les déficits ou les excès pluviométriques sont plus marqués au niveau de Buyo qu'à Soubré. Cela pourrait s'expliquer par les différentes influences climatiques régionales auxquelles le bassin-versant du Sassandra est soumis. Ce qui traduit plusieurs régimes pluviométriques à l'intérieur du même bassin, comme c'est le cas entre les zones de Buyo et Soubré.

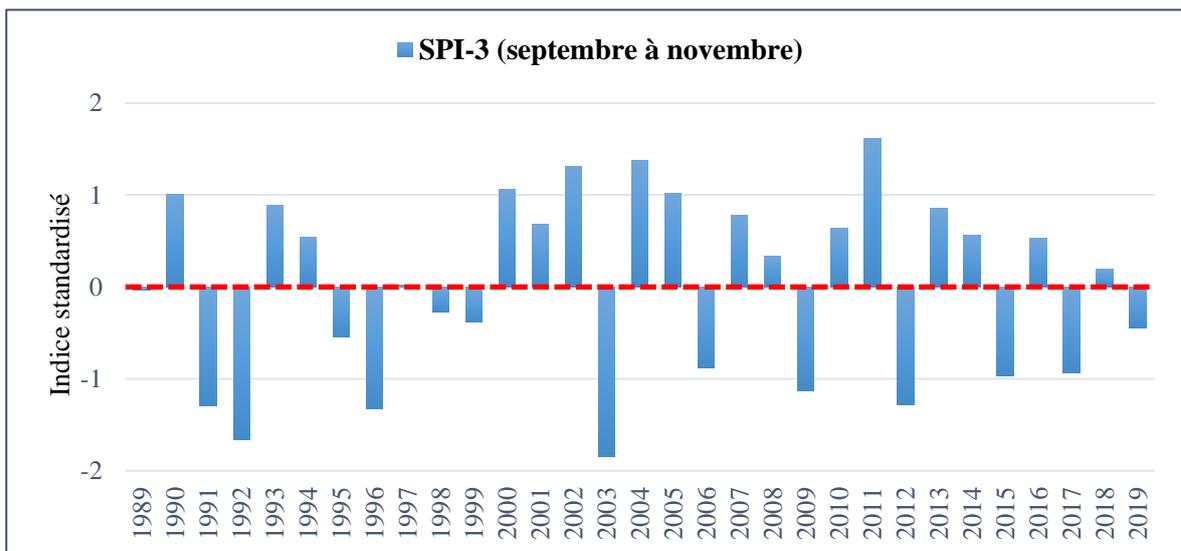
En définitive, le régime pluviométrique à l'exutoire du bassin aménagé du Sassandra à Soubré est caractérisé par deux grandes tendances. L'une sèche qui part de 1989 à 2005 et l'autre humide sensiblement constante jusqu'à l'année 2014, mais qui décroît nettement. Cela se justifie par un indice de pluviosité moyen de 0,90 pour la période sèche et 1,04 pour la période humide.

### 5.1.5 Analyse de l'indice standardisé (ou normalisé) de précipitation (SPI) à l'exutoire de Soubré (station de Soubré)

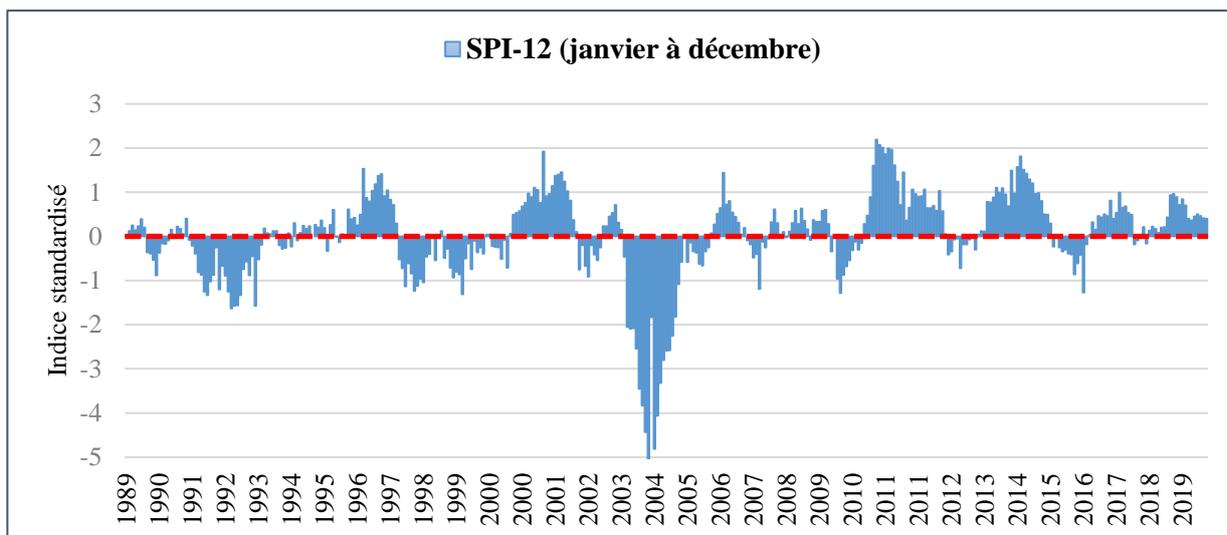
Les **figures 43, 44 et 45** montrent l'évolution temporelle des indices normalisés (ou standardisés) des précipitations (SPI) de la station de Soubré sur la période 1989-2019 située à l'exutoire du bassin-versant. Les SPI calculés sont respectivement aux échelles de 1 mois (juin), 3 mois (septembre à novembre) et 12 mois (janvier à décembre).



**Figure 43 :** Évolution temporelle de l'indice normalisé des précipitations à l'échelle de temps de 1 mois (juin) à l'exutoire du bassin versant de Soubré (1989-2019)



**Figure 44 :** Évolution temporelle de l'indice normalisé des précipitations à l'échelle de temps de 3 mois (septembre à novembre) à l'exutoire du bassin versant de Soubré (1989-2019)



**Figure 45 :** Évolution temporelle de l'indice normalisé de précipitation à l'échelle de temps de 12 mois (janvier à décembre) à l'exutoire du bassin versant de Soubré (1989-2019)

Le choix des différentes échelles de temps est fonction des objectifs recherchés à travers cette étude. Les valeurs de SPI obtenues sont variables quel que soit l'échelle temporelle ou saisonnière choisie, car le SPI est fortement corrélé aux caractéristiques pluviométriques de la zone d'étude.

L'analyse des résultats montre que les valeurs de SPI calculés varient de -1,85 à 1,37 pour le SPI 1 (juin), de -1,85 à 1,62 pour l'échelle de temps de 3 mois (septembre à novembre), et enfin, de -5,08 à 2,19 pour le SPI 12 (janvier à décembre).

Le SPI 1 du mois de juin le plus élevé est de 1,37 obtenu au cours de l'année 2014. Cette valeur représente une période modérément humide au-dessus de la moyenne normale.

Concernant le SPI-3, la période météorologique est caractérisée par une saison très humide avec un SPI de 1,62 provenant de l'année 2019.

Quant au SPI-12, représentant la tendance météorologique générale sur une année, elle (la tendance) est caractérisée par une période extrêmement humide due au SPI le plus élevé qui est de 2,19. En outre, de façon générale, les SPI des différentes échelles de temps sont majoritairement caractérisés par des périodes humides météorologiques proches de la normale. Ainsi, les SPI-1, SPI-3 et SPI-12 sont caractérisés par une période humide respectivement à 58,06 %, 61,3 % et 84 %. Cela traduit des précipitations supérieures à la médiane sur les différentes échelles de temps choisies.

De plus, le **tableau 38** ci-dessous présente les différentes catégories de périodes humides traduisant la variabilité météorologique sur la période de l'étude. L'analyse du SPI-12 révèle que sur la période d'étude, seules les années 2001, 2011 et 2014 sont modérément humides.

**Tableau 38** : Nombre de périodes humides sur les différents SPI à la station de Soubré sur la période 1989-2019

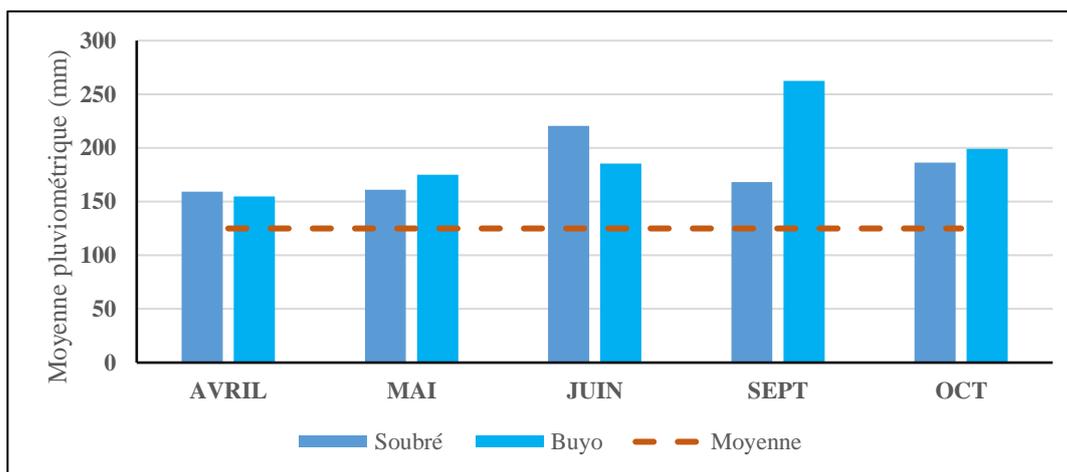
Classe SPI	SPI-1	SPI-3	SPI-12	Interprétation (années)
2 < SPI	0	0	0	Extrêmement humide
1,5 < SPI < 1,99	0	1	0	Très humide
1,0 < SPI < 1,49	6	5	3	Modérément humide
-0,99 < SPI < 0,99	18	19	26	Proche de la normale
-1,0 < SPI < -1,49	5	4	1	Modérément sèche
-1,5 < SPI < -1,99	2	2	0	Très sèche
SPI < -2	0	0	1	Extrêmement sèche
<b>TOTAL</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	

Source : traitements données SODEXAM, 2020

Cette période est marquée par des précipitations au-dessus de la normale avec une tendance à la hausse sur la dernière décennie de la période. Sur toutes les échelles de temps, les SPI sont proches de la normale. Cette situation est confortée par une tendance à l'augmentation des précipitations en Afrique de l'Ouest dans la période post année 70 comme l'ont souligné déjà plusieurs auteurs. Tous ces constats traduisent une exposition du bassin aménagé de Soubré à une vulnérabilité à l'inondation.

### 5.1.6 Analyse interannuelle des mois pluvieux dans le bassin aménagé du Sassandra à Soubré

La **figure 46** met en exergue la variation interannuelle des moyennes pluviométriques des mois de forte précipitations. Sur la période de référence considérée (1989-2019), les mois les plus pluvieux correspondent aux mois d'avril, mai et juin pour la première saison des averses et les mois de septembre et octobre pour la seconde saison. En effet, ces mois présentent une moyenne de 190 mm soit 65 mm de plus à la moyenne générale de la période de référence qui est de 125 mm.



**Figure 46 :** Variation interannuelle des moyennes pluviométriques des mois pluvieux dans le bassin aménagé de Soubré sur la chronique 1989-2019 (Soubré et Buyo)

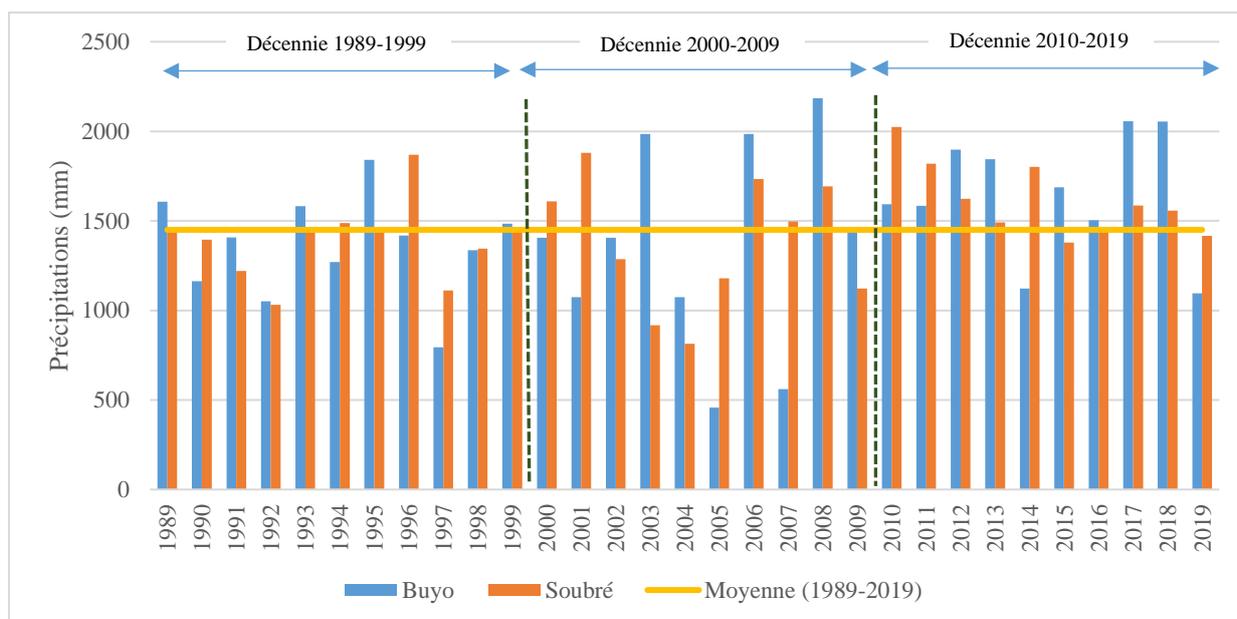
Les pics mensuels sont observés pendant le mois de juin (220,6 mm) à Soubré et septembre (262,6mm) au niveau de Buyo. Ainsi, ces deux mois enregistrent les moyennes pluviométriques les plus élevées oscillant autour de 200 mm, donc une forte intensité des précipitations. Le mois de juin au niveau de Soubré totalise un cumul pluviométrique de 5 740 mm, soit environ 4 fois (3,95) la moyenne du cumul moyen des précipitations.

Quant à Buyo, le mois de septembre totalise un cumul de plus de 6 022 mm, soit également plus de 4 fois (4,14) la moyenne cumulée des précipitations. Aussi, pendant ces mois, on observe des périodes pluvieuses plus longues et souvent continues sur plusieurs jours.

En somme, il ressort que les précipitations sont plus intenses au niveau de Buyo qu'à Soubré. Une tendance à la hausse des précipitations pendant les mois pluvieux est observée au niveau des deux (2) stations météorologiques. L'abondance des précipitations s'explique par la différence de régimes pluviométriques entre le nord et le sud de cette section du bassin du fleuve Sassandra. La zone de Buyo est caractérisée par un régime équatorial de transition bien marquée par de fortes pluies pendant les mois de juin à octobre avec une végétation de forêt claire. Quant à la zone de Soubré au sud du bassin, elle est définie par un régime pluviométrique de transition plus atténué avec une végétation mixte de savane et forêt.

### **5.1.7 Analyse des moyennes décennales pluviométriques dans le bassin au cours des décennies 1989-1998, 1999-2009, 2010-2019**

La **figure 47** présente la variation pluviométrique sur les trois sous-périodes (décennies) de la période de référence au niveau des deux stations météorologiques.



**Figure 47 :** Évolution temporelle et décennale des hauteurs pluviométriques sur la période 1989-2019

Comme déjà souligné, cette période 1989-2019 présente une hauteur pluviométrique moyenne de 1 450 mm proche de la moyenne historique de 1 500 mm dans cette partie du bassin du fleuve Sassandra à Soubré. Seule la dernière décennie 2010-2019 de la période présente des hauteurs moyennes largement supérieures à la moyenne de la zone, soit environ une différence de 100 mm de pluie aux deux stations du bassin aménagé. Il s’agit respectivement de 1 644 mm à Buyo et 1 615 mm pour la station de Soubré. De même, des différences notables sont observées au niveau des précipitations entre les différentes décennies qui constituent la période d’étude 1989-2019 (**tableau 39**).

**Tableau 39 :** Caractéristiques pluviométriques des différentes décennies (1990-1999, 2000-2009, 2010-2019) dans le bassin aménagé de Soubré

Décennies	Stations	Moyenne décennale (mm)	Moyenne pluviométrique (mm)	Écart moyen (mm)
1990-1999	Buyo	1359	1450	330,79
2000-2009		1358		
2010-2019		1644		
1990-1999	Soubré	1387	1456	211,83
2000-2009		1673		
2010-2019		1615		

Source : traitements données SODEXAM, 2020

Au niveau de Buyo, les moyennes des deux premières décennies notamment 1989-1999 et 2000-2009 sont inférieures à celle de la décennie 2010-2019. On note une différence pluviométrique de près de 300 mm et un écart moyen de 330,79 mm (tableau 40). Ce constat

est pratiquement identique au niveau de la station de Soubré. La moyenne pluviométrique de la décennie 2010-2019 enregistre une différence pluviométrique oscillant autour de 280 mm sur les décennies 1990-1999 et 2000-2009, avec également un écart moyen à la moyenne de 211,83 mm. De plus, le découpage de la période de référence (1989-2019) en trois (3) sous-périodes décennales a permis d'observer une reprise des précipitations au niveau de la dernière décennie 2010-2019.

#### **5.1.8 Variation spatio-temporelle de la pluviométrie dans le bassin aménagé duassandra à Soubré au cours des décennies 1990-1999, 2000-2009, 2010-2019**

La **figure 48** met en exergue la répartition spatiale des précipitations dans le bassin aménagé au cours des différentes décennies 1990-1999, 2000-2009 et 2010-2019. On peut retenir que :

- au cours la décennie 1990-1999, la zone aménagée du bassin du Sassandra est marquée par une pluviométrie comprise entre 1300 mm et 1400 mm. Durant cette première sous-période, les deux zones du bassin notamment Soubré et Buyo sont arrosées avec des intensités de pluie légèrement différentes avec un avantage pluviométrique au niveau de Soubré au sud du bassin (**figure 48 a**).
- durant la deuxième sous-période 2000-2009 (**figure 48 b**), la réduction de la pluviométrie apparaît. Ainsi, l'isohyète 1400 mm disparaît pour fait place à l'isohyète 1300 soit une diminution de 100 mm de pluie de façon générale au niveau des deux zones (Buyo et Soubré). Cependant la zone de Soubré au sud du bassin demeure toujours légèrement plus arrosée que celle du nord à Buyo.
- enfin, sur la dernière décennie (2010 – 2019), une augmentation du champ pluvieux est enregistrée. Cette décennie présente une pluviométrie dépassant légèrement les 1600 mm de pluie (**figure 48 c**). Dans cette période, les précipitations sont comprises entre les isohyètes 1600 mm et 1700 mm. Cette dernière décennie est plus marquée en termes de précipitation dans la zone de Buyo au nord du bassin contrairement aux deux (2) précédentes décennies au Sud avec la zone de Soubré.

En résumé, l'appréciation de l'évolution de la pluviométrie interannuelle à l'échelle du bassin aménagé montre une tendance à l'augmentation des précipitations au cours des différentes décennies. Elle est plus marquée au niveau de la dernière (2010-2019) avec une pluviométrie avoisinant les 1700 mm.

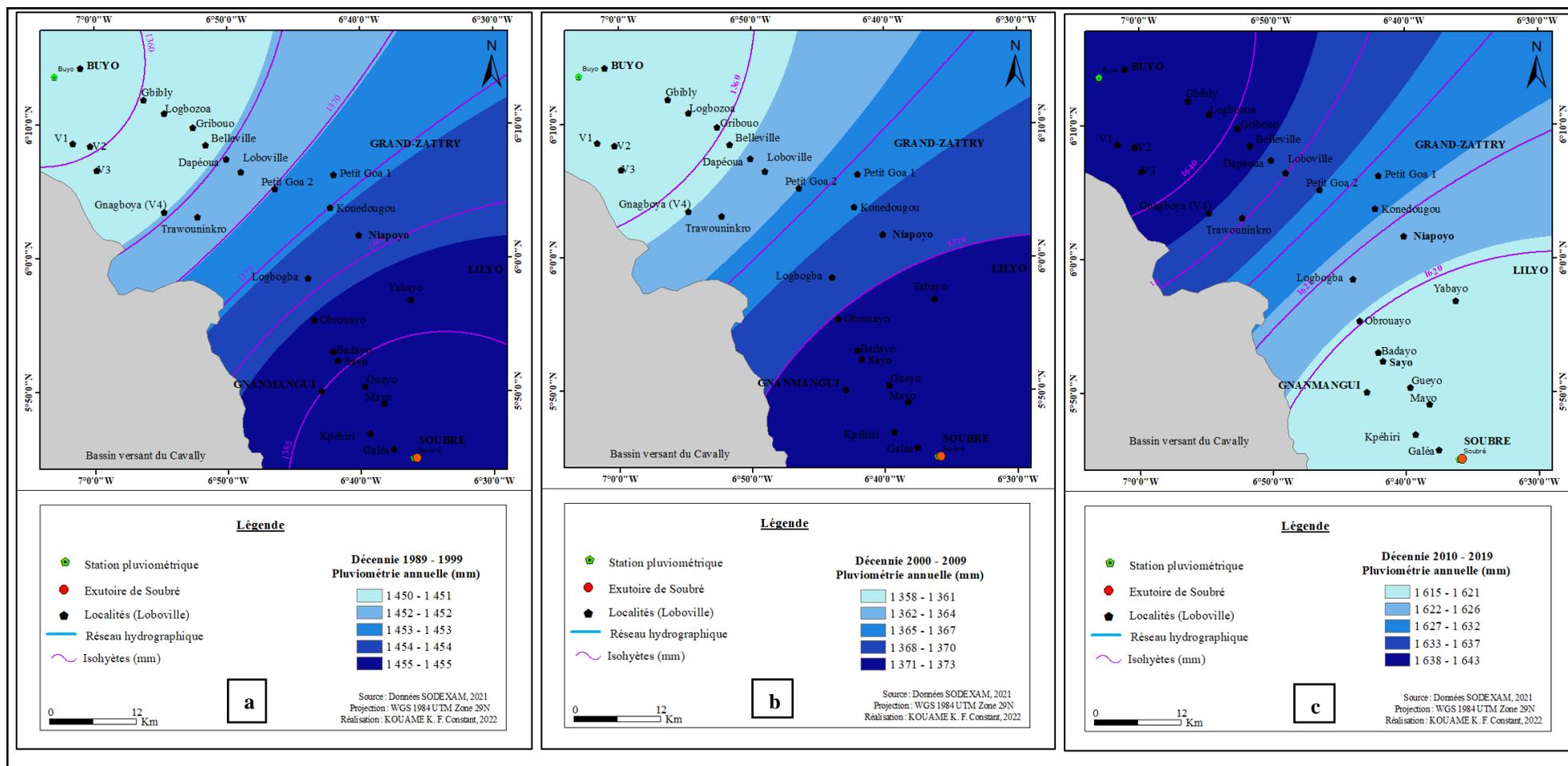
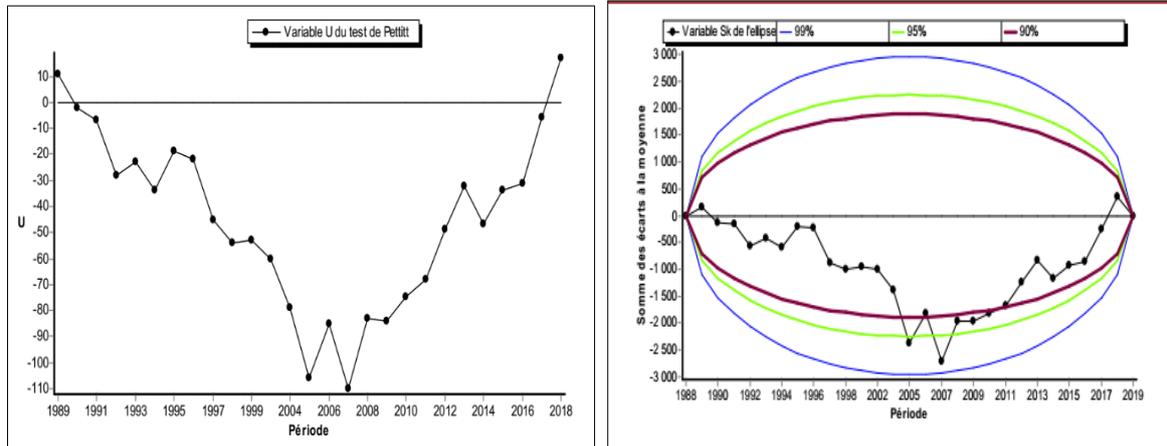


Figure 48 : Évolution spatio-temporelle des précipitations dans le bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré au cours des décennies [a (1990-1999) ; b (2000-2009) et c (2010-2019)]

### 5.1.9 Tendances et ruptures au sein des séries pluviométriques de la période 1989-2019 dans le bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré

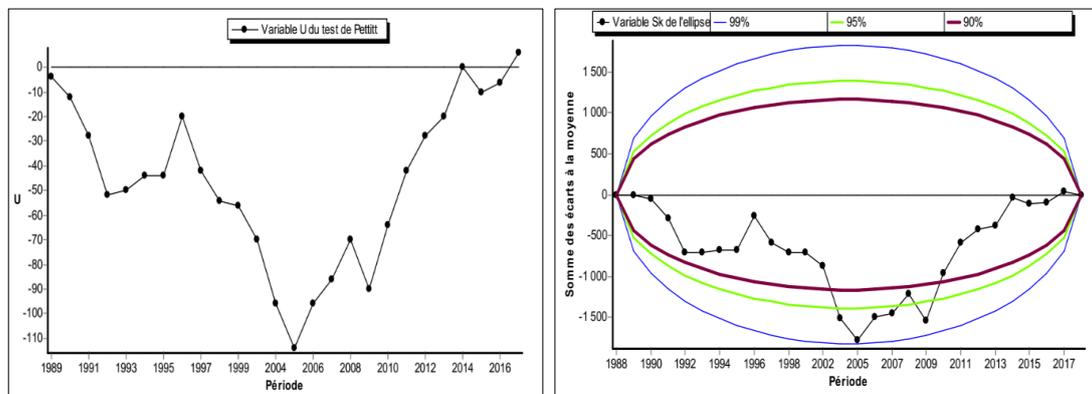
La **figure 49** ci-dessous montre respectivement les résultats de l'application des tests de Pettitt, Buishand et Ellipse de Bois sur les séries pluviométriques de Buyo (1989-2016) dans le bassin aménagé du Sassandra.



**Figure 49** : Rupture de stationnarité par le test de Pettitt et Buishand au sein de la série pluviométrique de Buyo dans le bassin aménagé de Soubré

Au niveau de Buyo, le test de corrélation sur le rang, le test de Buishand et Ellipse de BOIS sont acceptés aux différents seuils de 99 %, 95 % et 90 % (**figure 49**). L'hypothèse nulle ( $H_0$ ) est vérifiée avec le test de Pettitt, donc une absence de rupture au sein de la série pluviométrique de Buyo aux seuils de 99 % et 95 % et est rejetée à un seuil d'erreur de 10 % à l'année 2007.

En ce qui concerne, la zone de Soubré, l'analyse des résultats montre un rejet de l'hypothèse nulle ( $H_0$ ) aux seuils d'erreurs significatifs de 1 % et 5 % avec le test de Pettitt, donc une rupture dans la série (**figure 50**).



**Figure 50** : Rupture de stationnarité par le test de Pettitt et Buishand au sein de la série pluviométrique de Soubré

L'année 2005 est identifiée comme celle du point de rupture le plus significatif à travers l'analyse des courbes de la variable U de Pettitt (figure 50). Par contre, l'hypothèse alternative ( $H_1$ ) est acceptée au seuil de 90 %. Quant au test de corrélation sur le rang, il est accepté aux différents seuils.

## 5.2 Dynamique hydrologique dans le bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré

### 5.2.1 Caractéristiques des séries hydrométriques dans le bassin aménagé à Soubré

Le **tableau 40** met en exergue les différentes caractéristiques des variables des séries hydrométriques. L'analyse des variables statistiques permet d'apprécier la dispersion de ces paramètres les uns par rapport aux autres, mais aussi leur variation par rapport à la moyenne.

**Tableau 40** : Caractéristiques des séries hydrométriques de Soubré (1980-2019) et Piebly (1981-2001)

Station	Caractéristiques des variables ( $m^3.s^{-1}$ )						
	Moyenne	Écart-type	Écart-moyen	Variance	Coefficient de Variation	Débit moyen maximum	Débit moyen minimum
<b>Soubré</b>	358	106,92	83,89	11826,584	0,30	650,9	88,5
<b>Piebly</b>	207	67,20	58,1	4742,1615	0,32	299	63

Source : traitements données DHH, 2020

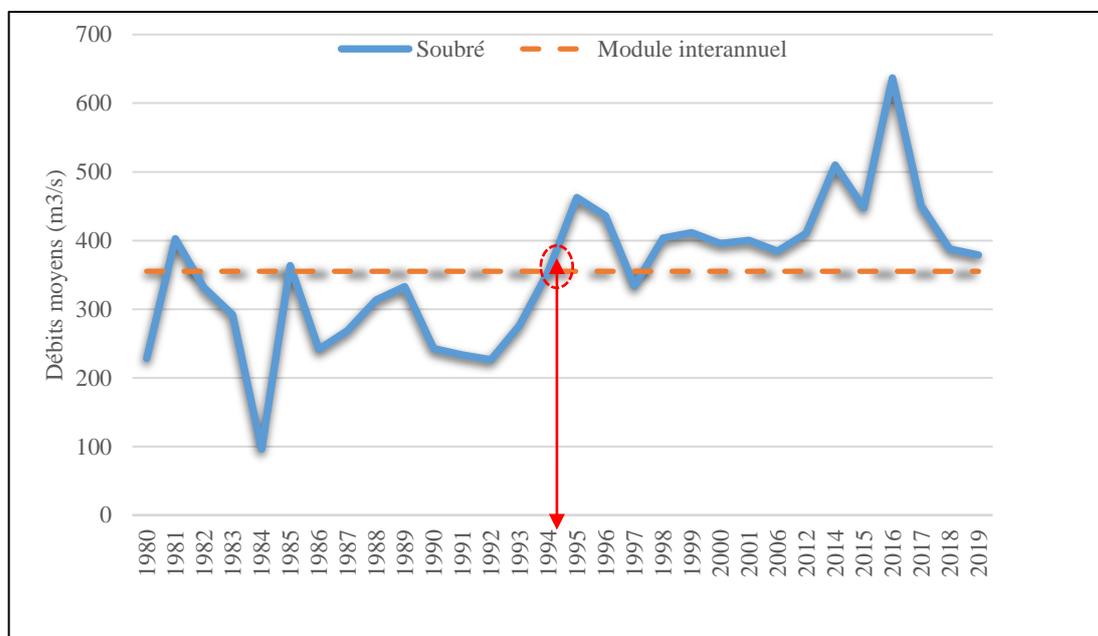
À l'analyse des données du tableau 41, les débits moyens annuels du Sassandra à l'exutoire de Soubré oscillent entre  $80 m^3.s^{-1}$  et  $650 m^3.s^{-1}$  avec une moyenne de  $358 m^3.s^{-1}$  et un écart moyen de  $83,89 m^3.s^{-1}$ .

Pendant ce temps à Piebly, zone naturelle d'entrée des débits dans le bassin aménagé avant le lac de Buyo, le fleuve Sassandra présente un débit moyen  $207 m^3.s^{-1}$ . Ces débits varient entre  $60 m^3.s^{-1}$  et  $300 m^3.s^{-1}$  avec un coefficient de variation sensiblement égal à celui de l'exutoire de Soubré comme illustré dans le **tableau 40**. Avec la construction du barrage hydroélectrique en amont à 3 km de l'exutoire de Soubré couplée à certains forcings du climat, le régime hydrologique du fleuve Sassandra connaît d'intenses fluctuations avec des répercussions sur l'hydrosystème du bassin-versant.

## 5.2.2 Débits moyens annuels du fleuve Sassandra dans le bassin aménagé de Soubré

### 5.2.2.1 Au niveau de l'exutoire de Soubré

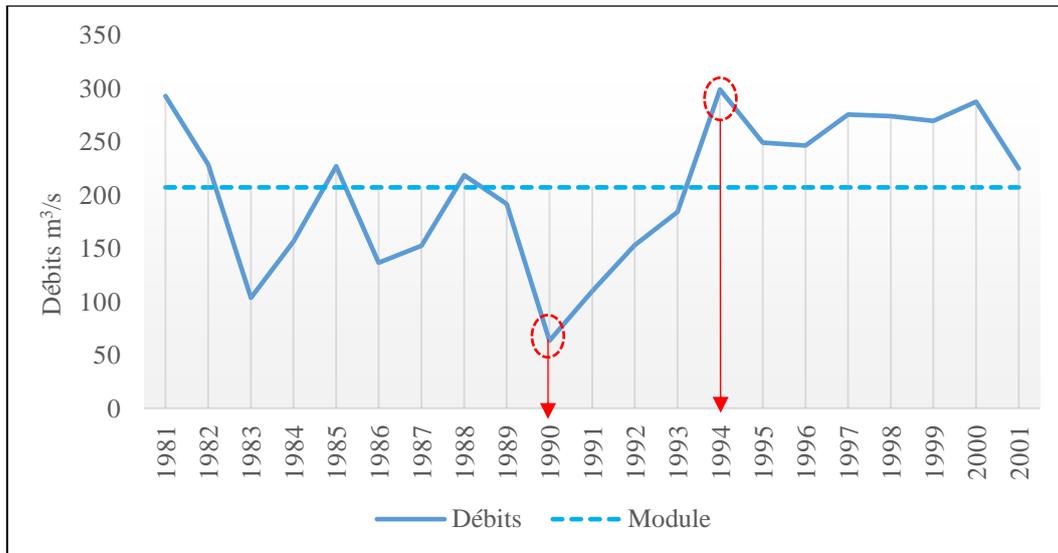
Le débit moyen donne un aperçu de l'envergure moyenne du flux à une section du cours du fleuve. L'analyse de l'évolution des débits moyens annuels montre une tendance à l'augmentation des débits. En effet, sur la période d'étude (1980 – 2019), le maximum est de 636,8 m<sup>3</sup>/s. Ce débit est observé en année hydrologique 2016-2017, contre un minimum de 96,18 m<sup>3</sup>/s enregistré en 1984. De même la variation des débits est restée constante en dessous de la moyenne de 358 m<sup>3</sup>/s de 1980 jusqu'à l'année hydrologique 1994-1995 où une croissance progressive est observée jusqu'en 2019. Enfin, l'année 1984 fut celle d'une chute significative des débits moyens (**figure 51**).



**Figure 51 :** Évolution des débits moyens annuels à l'exutoire de Soubré

### 5.2.2.2 Au niveau de l'exutoire de Piebly

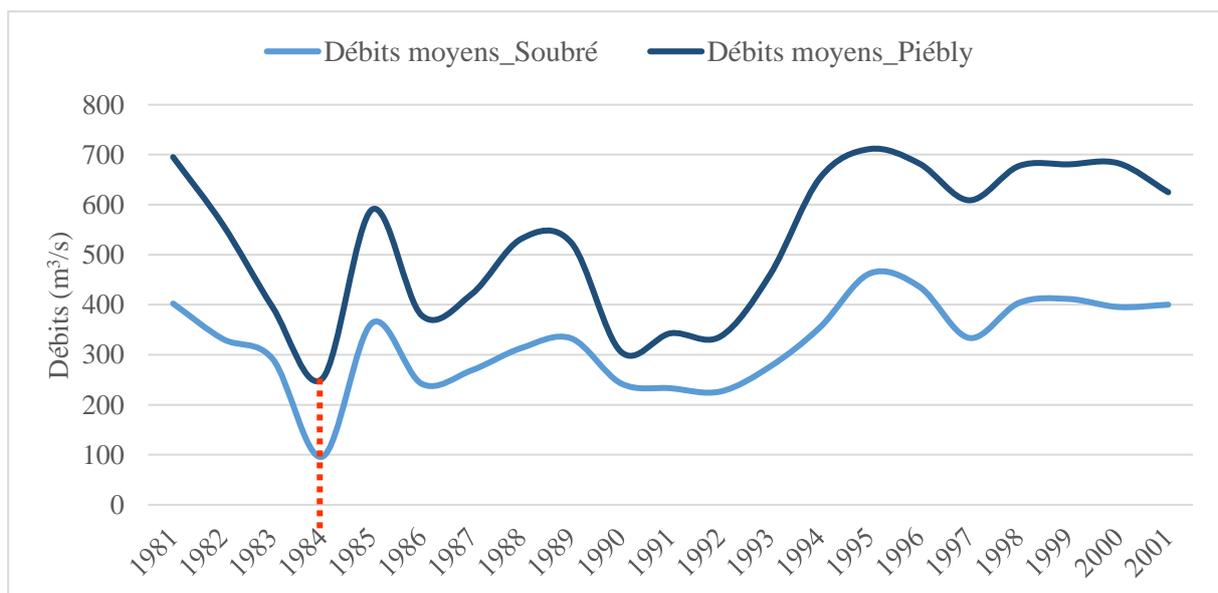
Au niveau de l'exutoire de Piebly considéré comme le point d'entrée de la zone aménagée du bassin du Sassandra jusqu'à l'exutoire de Soubré, la moyenne des débits oscille autour de 200 m<sup>3</sup>/s. En ce qui concerne les extrêmes, le maximum avoisine les 300 m<sup>3</sup>/s. Cette valeur a été enregistrée à l'année 1994 contre un minimum de 63 m<sup>3</sup>/s quatre (4) années plutôt, c'est-à-dire en 1990 (**figure 52**).



**Figure 52 :** *Évolution des débits moyens annuels à l'exutoire de Piebly dans le bassin aménagé du Sassandra à Soubré*

En effet, au niveau de cet exutoire, la période 1980-1994 est caractérisée par une baisse constante des débits du fleuve Sassandra avec une chute en 1990. À partir de la période 1993-1994, une tendance à l'augmentation des débits est observée. Cette situation pourrait s'inscrire dans un contexte de reprise légère des précipitations dans la région avec une incidence sur l'augmentation des écoulements des cours d'eau dont le fleuve Sassandra.

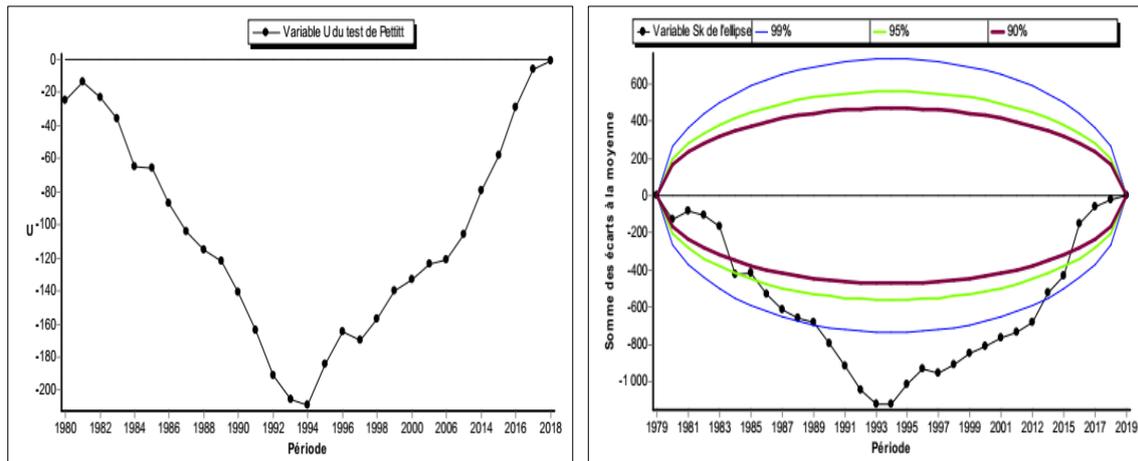
Enfin, sur la période de référence générale, une tendance à l'augmentation des débits est observée. L'année 1984 fut celle d'une chute significative des débits moyens au niveau des deux stations de mesures (**figure 53**).



**Figure 53 :** *Évolution comparée des débits moyens dans le bassin aménagé de Soubré (Soubré et Piébly)*

### 5.2.3 Évolution des débits annuels du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré

Tout comme les hauteurs de pluie, les débits du fleuve Sassandra dans la zone aménagée de Soubré sont soumis au test de Pettitt afin de détecter les possibles ruptures et tendance dans la série chronologique (**figure 54**). La série chronologique hydrométrique s'étale sur une période allant de 1980 à 2019 afin de minimiser les lacunes contenues dans l'observation des données de débits.

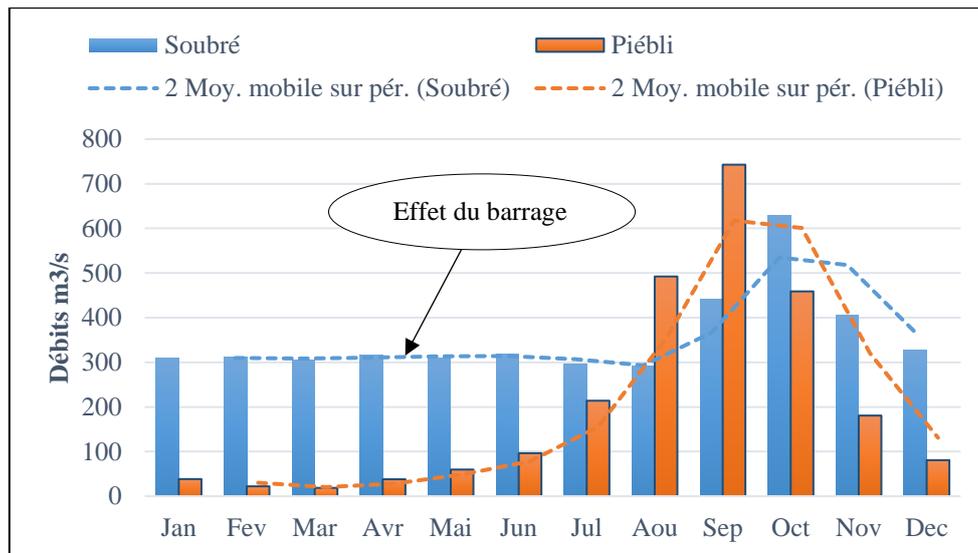


**Figure 54** : Rupture de stationnarité sur la chronique des débits du Sassandra à la station de Soubré

Il ressort des différents tests de Pettitt et Bushand appliqués à la chronique des débits, que la détection des ruptures de stationnarité à Soubré débute déjà au début de la décennie 1980 avec un point de rupture en 1993. Cette rupture de stationnarité est confirmée aux différents seuils de 99 %, 95 % et 90 %.

### 5.2.4 Analyse du régime hydrologique du Sassandra à l'exutoire de Soubré

La **figure 55** présente l'évolution interannuelle des débits à l'exutoire de Soubré. En effet, sur la quasi-totalité des mois de l'année, à l'exception des mois de septembre, octobre et novembre, les débits du Sassandra évoluent au-dessus de la moyenne. En régime normal, ils oscillent autour de 400 m<sup>3</sup>/s au niveau des mois de septembre et novembre ; et plus de 600 m<sup>3</sup>/s en octobre au niveau de Soubré. Cette situation est en partie imputable aux écoulements qui sont contrôlés la majeure partie de l'année, notamment de janvier à août par les lâchers d'eau du barrage de Buyo depuis sa mise en service en 1981.

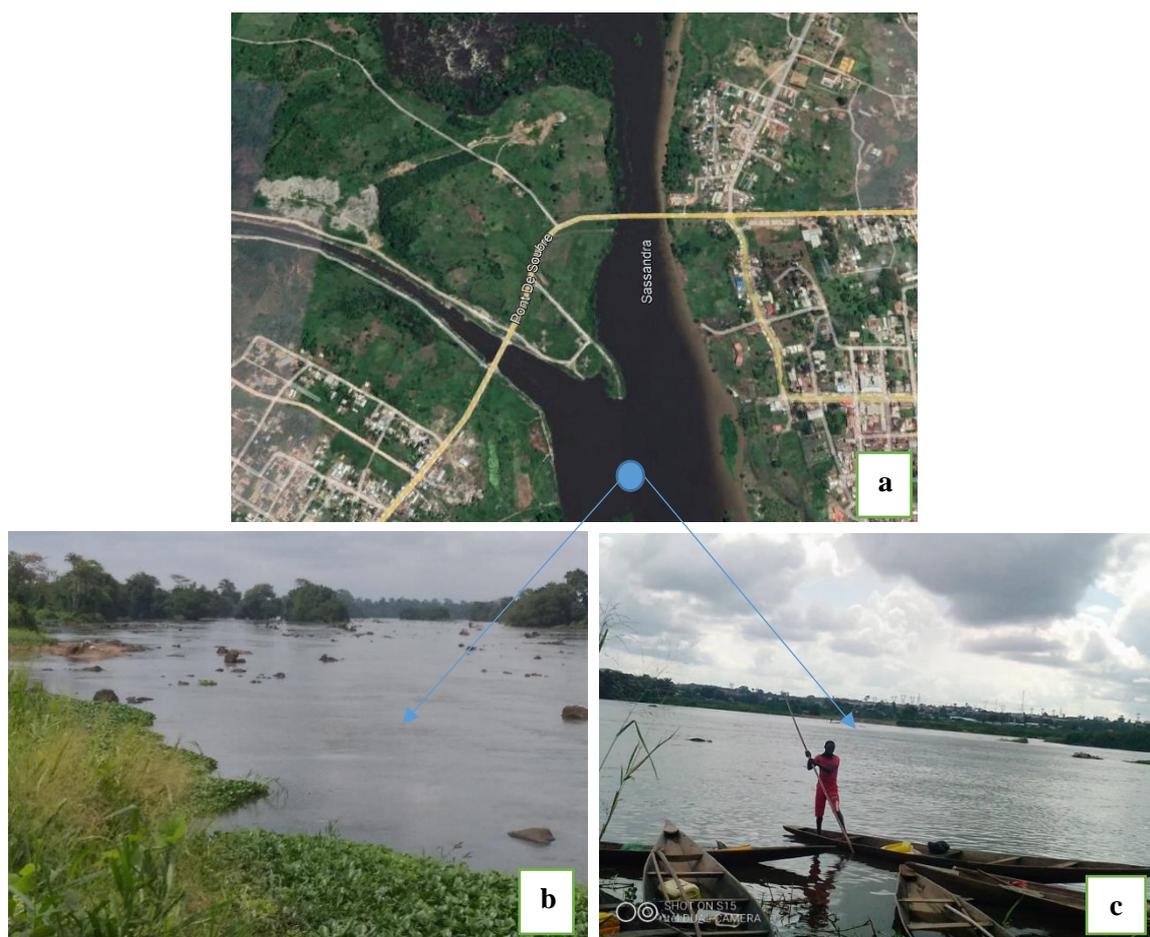


**Figure 55 :** Régime hydrologique du bassin aménagé du Sassandra à Soubré

Par contre à Piébly, c'est pendant les mois d'août, septembre et octobre que les débits les plus élevés sont enregistrés. Le mois de septembre présente un pic de plus de 700 m<sup>3</sup>/s pendant qu'à Soubré, les débits oscillent autour de 400 m<sup>3</sup>/s. Pendant les sept premiers mois civils (janvier à juillet), une évolution progressive des débits est observée jusqu'à atteindre le pic du mois de septembre, pour ensuite décroître de novembre à janvier. Ces différents mois où une hausse des débits est observée de part et d'autre des deux zones marquent la seconde saison pluvieuse dans la région. Durant cette saison, les précipitations sont abondantes et les jours pluvieux assez longs. Cette période est par ailleurs caractérisée par le débordement des cours d'eau qui inondent les champs et perturbent les activités économiques des populations.

De plus, le bassin-versant du Sassandra bénéficie en partie de la jonction des trois zones climatiques très arrosées qui contribuent à réguler son régime (V. M. Sorokoby, 2013, p. 37). Partant donc de l'amont, le Sassandra est arrosé par les effets pluviométriques d'un climat de montagne où les précipitations sont autour de 1700 mm jusqu'à la zone de Soubré avec une légère diminution des précipitations oscillant à 1500 mm en moyenne. Ce qui justifie le niveau élevé des débits à Piébly, situé presque dans la zone montagneuse du bassin.

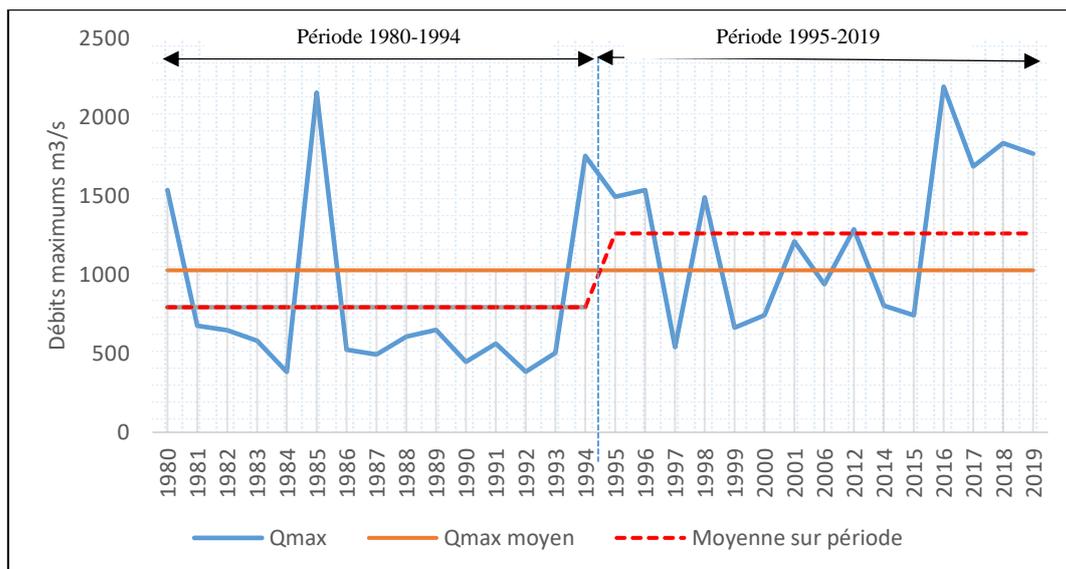
De ce fait, les écoulements du fleuve Sassandra semblent constants toute l'année avec un débit moyen autour de 300 m<sup>3</sup>/s et un pic pendant la seconde saison des pluies en octobre (**photos 9 a, b, c**) où les événements hydrologiques sont observés avec la montée des eaux jusqu'au mois de décembre.



**Photo 9 :** *a) Image satellite du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré ; b) Le Sassandra à Soubré dans le mois de mars (saison sèche) ; c) Le fleuve Sassandra en octobre à Soubré (saison des pluies) (Source cliché : Kouamé K., 2020)*

### 5.2.5 Évolution des débits extrêmes du fleuve Sassandra à Soubré et Piebly

La **figure 56** met en exergue la fluctuation des débits maxima journaliers à l'exutoire de Soubré sur la période d'étude. Il ressort du graphique que sur l'ensemble de la période, le débit maximum moyen oscille autour de  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le pic des débits maximum a été enregistré à l'année 2016 avec environ  $2196 \text{ m}^3/\text{s}$ . Sur l'ensemble de la période, seules les années 2016 et 1985 ont enregistré des débits élevés représentant plus du double des débits maximums moyens. L'analyse de l'évolution de ces débits a permis de scinder la période de référence en deux sous-périodes avec différentes fluctuations :



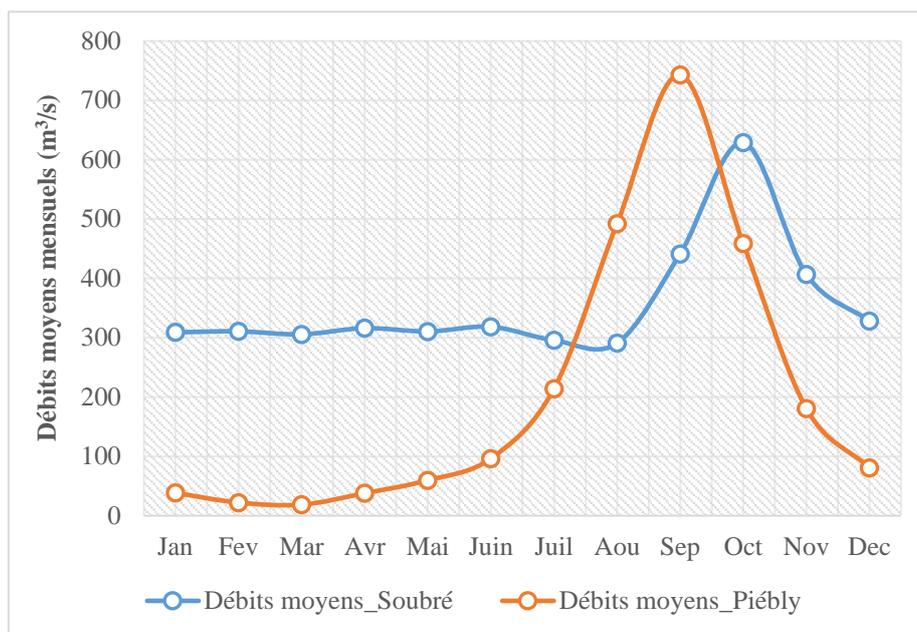
**Figure 56 :** Fluctuation des débits maxima journaliers du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré sur la période 1980-2019

- En effet, pratiquement sur la première sous-période (1980-1994) comme illustré par la **figure 56**, les débits maximums du fleuve Sassandra à Soubré ont évolué de façon constante en dessous du débit maximum moyen avec un seul pic en 1985 (2158 m<sup>3</sup>/s).
- Dans la deuxième sous-période (1995-2019), on constate une reprise des maximums au-dessus de la moyenne avec un débit maximum moyen oscillant autour de 1200 m<sup>3</sup>/s. C'est au niveau de cette sous-période qu'est enregistré le plus élevé des débits maxima de l'année 2016 avec 2196 m<sup>3</sup>/s. En outre, les débits maxima journaliers évoluent autour de la moyenne interannuelle sur cette période. Cela traduit la conséquence de la reprise générale des précipitations dans la région.

En définitive, l'évolution des débits maxima journaliers à l'exutoire de Soubré est en phase avec la variation des précipitations de la période post rupture des années 1969-1970. Et les débits représentent pour la plupart les débits des hautes-eaux.

### 5.2.6 Fluctuation des débits moyens mensuels dans le bassin versant aménagé à Soubré

La **figure 57** met en évidence la variation moyenne des débits du Sassandra aux stations de Piebly et Soubré durant les mois de l'année civil.



**Figure 57 :** Évolution des débits moyens mensuels dans le bassin aménagé du Sassandra aux exutoires de Soubré et Piébly

Au niveau de l'exutoire à Soubré, les débits entament leur évolution dès les premières pluies de la première saison pluvieuse et varient toute l'année relativement à l'évolution des hauteurs de pluie. Ils atteignent leur pic dans la seconde saison des pluies entre les mois d'août-septembre et octobre après une évolution constante la première moitié de l'année (janvier à juin).

En ce qui concerne la station de Piébly, les débits moyens évoluent en-dessous des 300 m<sup>3</sup>/s durant la moitié de l'année civile (janvier à juin). Ils augmentent à partir de juin pour atteindre leur pic entre les mois d'août septembre et octobre. Durant ces périodes, les débits de pic dépassent largement 400 m<sup>3</sup>/s. Ainsi, durant ces périodes marquées par la seconde saison des pluies dans le bassin, les débits à Piébly sont plus élevés que ceux à la station de Soubré. Par conséquent, plus les pluies sont abondantes, plus les écoulements augmentent. Dès lors, les précipitations constituent le facteur primordial déclencheur des forts débits qui engendrent des crues dans le bassin-versant aménagé.

### 5.3 Discussion

L'analyse des données pluviométriques et hydrométriques à travers plusieurs indices pluviohydrologiques a permis d'apprécier la tendance générale de ces paramètres climatiques et leur implication dans la genèse des crues et inondations fluviales dans le bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré.

Les données de pluie utilisées couvrent une période de plus de trente (30) ans allant de 1989 à 2019. Les tests réalisés sur les séries chronologiques présentent une année de rupture à la station de Soubré en 2005 contre une absence de rupture au niveau de Buyo. Ces résultats sont liés à un fléchissement général des précipitations dans cette zone avec la phase post-rupture pluviométrique observée autour de la période 1968-1970. Ces constats sont en accord avec des études qui ont caractérisées cette baisse générale des précipitations à environ 20 à 25 % dans plusieurs parties Ouest de l'Afrique (E. Servat et *al.*, 1998, p. 837 ; E. A. Assemian et *al.*, 2013, p. 257 ; V. M. Sorokoby, 2013, p. 128 ; T. D. Soro et *al.*, 2011, p. 2). En conséquence, la zone du Sud-ouest de la Côte d'Ivoire n'a pas été épargnée par cette situation pluviométrique morose.

Le cumul interannuel moyen des précipitations obtenu (1455 mm) évolue sensiblement vers 1500 mm historique de la zone avec un indice pluviométrique moyen (1,04) supérieur à la moyenne pour la période humide. Ces résultats sont sensiblement supérieurs à ceux obtenus par V. M. Sorokoby (2013, p. 104-105) à savoir 1 447 mm obtenu au poste pluviométrique de Soubré sur la période 1971-2008. L'analyse de ce résultat traduit une tendance linéaire à la hausse pour le régime pluviométrique à l'intérieur du bassin aménagé. Cette situation est la conséquence d'une reprise légère des précipitations en Afrique de l'Ouest dans la période post année 70. En plus, les mois de juin et octobre marquent les mois les plus pluvieux des différentes saisons pluvieuses avec une moyenne oscillant autour de 190 mm soit 65 mm de plus que la moyenne générale de la période de référence qui est de 125 mm. D'abondantes précipitations sont observées pendant ces mois, et ils caractérisent les deux (2) phases saisonnières où les fluctuations pluviométriques ont été observées sur la période d'étude. Cette reprise générale des précipitations dans le bassin-versant du Sassandra à Soubré est en accord avec des études de plusieurs auteurs dont V. M. Sorokoby (2013, p. 128), B. S. Ardoïn, et *al.* (2005, p. 198) et E. A. Assemian et *al.* (2013, p. 257). De même, selon E. Assoumou (2010, p. 9), ce constat de la légère reprise des précipitations a été fait dans le sous-bassin du Couffo au Bénin au cours de la décennie 1990. Cet état de reprise de la pluviométrie générale a pour conséquence le maintien des bassins fluviaux dans un état humide permanent. Cela est corroboré par l'analyse de l'indice standardisé de précipitation de 2,19 obtenu sur le pas de temps annuel (janvier – décembre) à la station de Soubré sur la période 1989-2019.

En plus, l'analyse de la variabilité des précipitations à l'échelle du bassin aménagé à Soubré s'est faite à travers plusieurs échelles de temps de l'indice de précipitation standardisée (SPI-1 mois, SPI-3 mois et SPI-12 mois). En effet, les différents SPI obtenus sont fortement corrélés aux caractéristiques pluviométriques de la zone étudiée. Ce résultat semble similaire à

ceux de C. Faye et *al.* (2019, p. 11.) à travers l'analyse des indices standardisés de précipitations dans la vallée du fleuve Sénégal sur la période 1980 à 2017. Ainsi, les valeurs de SPI obtenues sont variables quel que soit l'échelle temporelle ou saisonnière choisie. L'indice SPI a été fortement utilisé pour analyser les anomalies pluviométriques et caractériser les périodes météorologiques à l'échelle de plusieurs espaces hydrologiques en Afrique de l'Ouest (C. Faye et *al.*, 2019, p. 111 ; D. J. Kodja, 2018, p. 89 ; S. Bouly et *al.*, 2018, p. 110). Au-delà de l'Afrique de l'Ouest, N. Tarmoul et B. Boulemtafes (2018, p. 43) ont également utilisé le SPI pour identifier, caractériser et quantifier les risques d'inondation dans le bassin-versant du moyen Sébaou en Algérie. Ces auteurs ont utilisé des données pluviométriques de 40 ans de mesure sur trois (3) stations pluviométriques. Quant à B. Maud et *al.* (2006, p. 254), ils ont aussi employé l'indice pluviométrique sahélien pour mettre en relief les facteurs marquants qui différencient les années sèches et les années humides dans la zone du Sahel (Niger). Cette forte utilisation de cet indice standardisé démontre la pertinence des indices pluviométriques pour l'analyse des conditions climatiques mais aussi des tendances météorologiques à l'échelle du bassin versant aménagé dans cette étude.

En ce qui concerne l'évolution hydrologique du Sassandra à Soubré, les tests statistiques effectués sur la série chronologique (1980-2019) à la station de Soubré ont montré une rupture malgré un débit moyen supérieur à 1200 m<sup>3</sup>/s. Cette rupture hydrologique a débuté depuis la période 1980. L'année 1984 fut donc celle d'une chute significative des débits moyens au niveau des deux stations de mesures notamment Piebly et Soubré à l'exutoire du bassin avec un débit inférieur à la moyenne de référence. Cette situation est la conséquence des périodes de fléchissement pluviométrique dans la zone d'étude observée autour des années 1970 jusqu'à 1980. Par conséquent, les différents débits d'écoulements observés dépendent de l'intensité des séquences pluvieuses. Ces résultats sont en accord avec les travaux de V. M. Sorokoby (2013, p. 116) sur la période hydrologique 1970-2004 à Soubré, mais également avec plusieurs autres auteurs dont D. Koumassi (2014, p. 110) sur le bassin versant de la Sota au Bénin. Par ailleurs, une tendance à l'augmentation des débits est observée du fait de la reprise légère des précipitations dans la région de Soubré sur la décennie 2010 – 2019. Cela est conforme aux constats de reprise des écoulements observée sur le cours du fleuve Sassandra selon V. M. Sorokoby et *al.* (2013, p. 292).

En somme, la rupture pluviométrique a engendré une rupture hydrologique dans les cours d'eau de la région dont le fleuve Sassandra. L'analyse des indices et variables pluviométriques a montré que la variation de la pluviométrie est un facteur de survenance de crue et inondation.

Le comportement hydrologique d'un cours d'eau à l'intérieur d'un bassin-versant est influé par la variation pluviométrique, surtout lorsque la distribution des débits dans le bassin-versant est soumise à un régime unique. Par conséquent, les conditions hydroclimatiques du bassin-versant aménagé de Soubré sont favorables à la manifestation des risques de crues et inondations.

### **Conclusion partielle**

Ce chapitre a permis de mettre en lumière les conditions pluviométriques et hydrométriques du bassin aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré. Cette étude s'est réalisée à travers plusieurs indices notamment l'indice de pluviosité, l'indice pluviométrique et l'indice normalisé de précipitation (SPI) sur la période 1989-2019 pour les chroniques pluvieuses. Pour les séries hydrométriques, la période considérée est celle de 1980-2019. L'analyse des différentes données montre une dynamique des conditions pluviométriques et hydrologiques confortée par une reprise légère des précipitations. Il apparaît que le bassin aménagé a été caractérisé par deux (2) grandes tendances climatiques avec des indices pluviométriques de 0,90 pour la période sèche et 1,04 pour la période humide. L'indice normalisé de précipitation calculé au pas de temps de 12 mois (SPI-12) a montré une zone humide au-dessus de la normale pluviométrique avec un SPI de 2,19 obtenu en 2016.

Au niveau hydrologique, le bassin présente un débit moyen mensuel oscillant autour de 355 m<sup>3</sup>/s et un débit journalier maximum de 2196 m<sup>3</sup>/s au poste de Soubré. L'intensité et la durée des périodes pluvieuses définissent la variation des débits, donc l'écoulement à l'exutoire du bassin aménagé. La relation pluie-débit à l'intérieur de ce bassin aménagé définit la récurrence des crues et inondations. Dès lors, le cumul des précipitations amplifie la probabilité des événements pluvieux extrêmes dont les conséquents sont les forts écoulements observés en situation exceptionnelle. C'est pourquoi, la caractérisation des facteurs hydropluviométriques permettra d'appréhender les différentes fréquences d'apparition des débits et pluies susceptibles d'engendrer des inondations dans le bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré. C'est l'objet du chapitre suivant.

## CHAPITRE 6 : FRÉQUENCE DES FACTEURS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE GÉNÉRATION DES CRUES DANS LE BASSIN-VERSANT AMÉNAGÉ DU FLEUVE SASSANDRA À L'EXUTOIRE DE SOUBRÉ

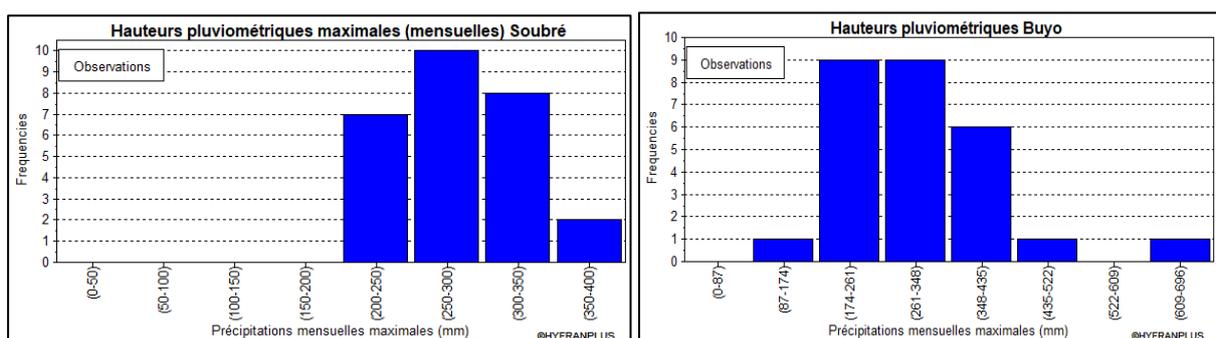
Ce chapitre traite la caractérisation des facteurs pluviométriques et hydrologiques à travers une analyse fréquentielle des événements extrêmes associés aux inondations fluviales dans le bassin-versant aménagé de Soubré. Cette analyse fréquentielle aboutit à la prédétermination des précipitations et débits susceptibles d'engendrer des crues et inondations fluviales ainsi que leurs périodes prévisionnelles de retour. Elle s'est faite sur la base des données pluviométriques (1989-2019) et de débits (1980-2019).

### 6.1 Analyse fréquentielle des hauteurs pluviométriques à l'exutoire du bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré

Pour mieux caractériser l'ampleur des phénomènes extrêmes, en ce qui concerne l'aléa pluviométrique, l'analyse fréquentielle porte sur les précipitations maximales annuelles. Et pour les débits, elle est axée sur les maxima de débits journaliers.

#### 6.1.1 Fréquence des hauteurs pluviométriques dans le bassin aménagé

Pour l'analyse des fréquences de précipitations, les hauteurs pluviométriques maximales au pas de temps mensuel ont été choisies à défaut des précipitations journalières. La **figure 58** présente les fréquences d'apparition des hauteurs pluviométriques annuelles dans le bassin aménagé de Soubré (au niveau des stations de Soubré et Buyo)



**Figure 58 :** Fréquence d'apparition des pluies extrêmes mensuelles dans le bassin aménagé du Sassandra à Soubré (1989 - 2019) et Buyo (1989 – 2019)

À l'analyse de la **figure 58**, il ressort que les précipitations maximales mensuelles les plus élevées oscillent entre 350 mm et 400 mm de pluie à Soubré, pendant qu'à Buyo, ces maximales varient entre 609 mm et 696 mm de pluie. Ces hauteurs apparaissent 2 fois sur la période

considérée, soit 6,66 % sur la série pluviométrique de Soubré, alors qu'à Buyo, ces précipitations extrêmes apparaissent 1 fois sur la période, soit 3,70 %.

Ensuite, les plus faibles hauteurs pluviométriques (200-250 mm) apparaissent 7 fois soit 25,92 % à Soubré. Au niveau de Buyo, les plus faibles précipitations maximales ont la même fréquence d'apparition que les maximales, c'est-à-dire 1 fois, soit 3,70 % sur la série et varient entre 87 et 147 mm de pluie.

De même à Soubré, les hauteurs de pluies maximales comprises entre 250 mm et 300 mm, puis 300 mm et 350 mm apparaissent respectivement 10 et 8 fois. Cela représente une fréquence d'apparition de 37,03 % pour les maximales comprises entre 250 mm et 300 mm. Celles situées entre 300 mm et 350 mm représentent 29,62 %. Ces deux dernières classes de pluie sont les plus abondantes. Leur cumul représente 71 % des hauteurs des pluies de la série.

Du côté de Buyo, les précipitations maximales allant de 174 mm à 261 mm et 361 mm à 348 mm apparaissent 10 fois chacune soit 37,03 % de la série pour chacune des intervalles. Elles représentent 74,07% des fréquences d'apparition des hauteurs maximales pluviométriques à Buyo sur la période d'étude. Pour finir, les précipitations maximales qui oscillent entre 435 mm et 522 mm apparaissent 1 fois soit 3,70 % de la série pluviométrique.

Au regard des résultats, les hauteurs maximales comprises entre 174 - 261 mm et 261-348 mm (Buyo), et celles situées entre 250 - 300 mm et 300 - 350 mm (Soubré) constituent les moyennes des maximales pluviométriques du bassin aménagé de Soubré sur la période d'étude. Ces pluies maximales sont la résultante d'intenses et continues averses journalières, dont leur occurrence peut entraîner des événements extrêmes de crues dans le bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré.

### **6.1.2 Vérification des hypothèses de base appliquées aux maximales pluviométriques**

Les différents tests d'indépendance (Wald-Wolfowitz) et de stationnarité (Kendall) appliqués sont acceptés à l'hypothèse  $H_0$  à un niveau de signification de 5 % et les données maximales annuelles sont homogènes sur la période 1989-2017. Les différents résultats des tests réalisés au niveau de Soubré sont résumés dans le **tableau 41**.

**Tableau 41 : Tests statistiques appliqués aux hauteurs maximales pluviométriques annuelles à Soubré**

Station	Test d'indépendance		Test de stationnarité		Test d'homogénéité (annuel 1989-2017)	
	U	P	K	P	W	P
Soubré	0.352	0.725	0.125	0.900	1.22	0.223
	Acceptée		Acceptée		Acceptée	

Source : traitements de données, 2020

En ce qui concerne les maximales pluviométriques de Buyo, les différents tests d'indépendance (Wald-Wolfowitz) et de stationnarité (Kendall) appliqués sont également acceptés à l'hypothèse  $H_0$  à un niveau de signification de 5 %. Quant au test d'homogénéité, l'hypothèse  $H_0$  est acceptée avec un niveau de signification de 5 % sur la période 1989-2017. Les différents résultats des tests réalisés au niveau de Buyo sont résumés dans le **tableau 42**.

**Tableau 42 : Tests statistiques appliqués aux hauteurs maximales pluviométriques annuelles à Buyo**

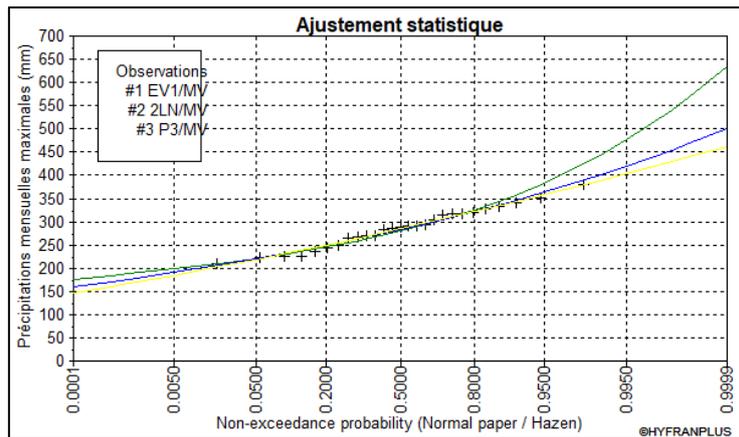
Station	Test d'indépendance		Test de stationnarité		Test d'homogénéité (annuel 1989-2017)	
	U	P	K	P	W	P
Buyo	0.457	0.648	0.625	0.532	0.578	0.563
	Acceptée		Acceptée		Acceptée	

Source : traitements de données, 2020

Les différents tests de base liés à l'indépendance, à la stationnarité et à l'homogénéité des données étant vérifiés, l'application de la méthode des valeurs extrêmes aux précipitations maximales annuelles est possible dans le bassin aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré.

### 6.1.3 Ajustement graphique des hauteurs maximales de pluie mensuelle

Plusieurs lois et méthodes existent pour l'ajustement des distributions statistiques aux échantillons de données. La méthode de maximum vraisemblance a été employée pour toutes les lois d'ajustement. Ainsi trois (3) lois d'ajustements notamment les lois de Gumbel, de Pearson Type 3 et Log-normale ont été utilisées. Il s'agit de déterminer la loi qui s'ajuste au mieux à la série chronologique des hauteurs pluviométriques maximales. Le résultat graphique du test de comparaison des différents ajustements est présenté par la **figure 59**.



**Figure 59 :** Comparaison graphique des maximales pluviométriques avec les lois de Gumbel, Pearson Type 3, et Log-normale (Soubré)

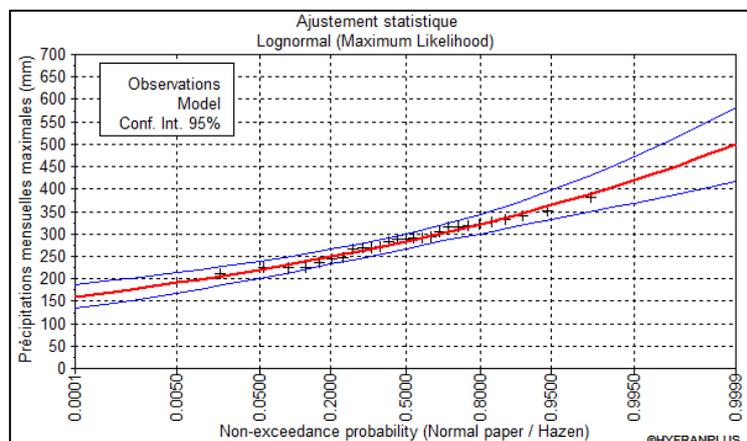
De l'analyse du graphique (**figure 59**), il est difficile de choisir la loi d'ajustement la plus adéquate. Par conséquent, en accord avec les résultats des critères d'information AIC et BIC (**tableau 43**), se dégage aisément.

**Tableau 43 :** Comparaison des lois d'ajustement à l'aide des critères d'information (Soubré)

Modèles	Nombre de paramètres	Quantile de retour	P(Mi)	P(Mi   x)	BIC	AIC
Lognormal (Maximum de vraisemblance)	2	404.212	33.33	61.32	285.713	283.121
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	448.953	33.33	25.39	287.476	284.885
Pearson type 3 (Maximum de vraisemblance)	3	391.158	33.33	13.29	288.771	284.883

**Source :** traitements de données, 2020

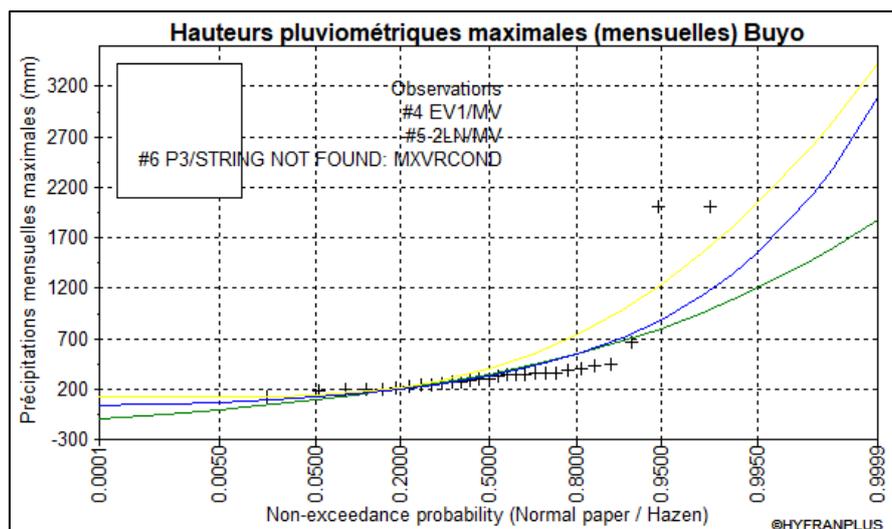
Il apparaît que la loi Lognormale de maximum vraisemblance est la mieux adaptée pour représenter la série des hauteurs pluviométriques maximales dans le bassin aménagé au niveau de Soubré (**figure 60**).



**Figure 60 :** Ajustement graphique des maximales pluviométriques avec la loi Log-normale (Soubré)

De cette **figure 60**, il ressort que les hauteurs maximales pluviométriques à Soubré suivent le modèle dans un intervalle de confiance avec une probabilité de non-dépassement de 95 %, c'est à-dire une marge d'erreur de 5 % au plus.

En ce qui concerne les précipitations extrêmes au niveau de Buyo, les résultats de la comparaison graphique (**figure 61**) ont été couplés aux résultats des critères d'information AIC et BIC du **tableau 44**.



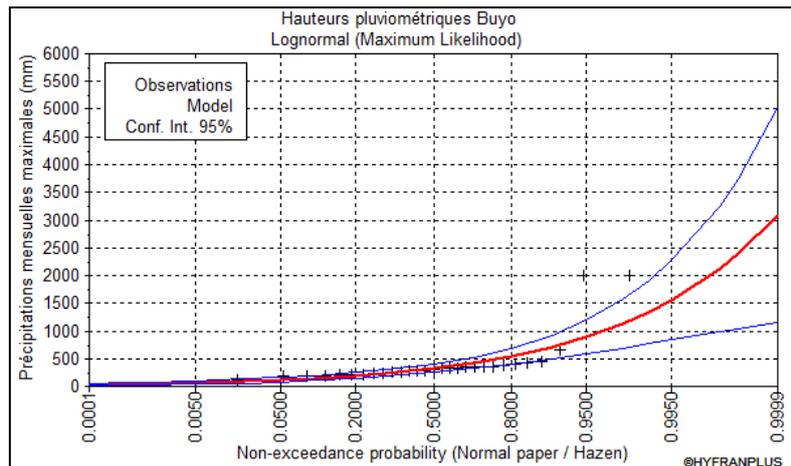
**Figure 61** : Comparaison graphique des maximales pluviométriques avec les lois de Gumbel, Pearson Type 3, et Log-normale (Buyo)

**Tableau 44** : Comparaison des lois d'ajustement à l'aide des critères d'information (Buyo)

Modèles	Nombre de paramètres	Quantile de retour	P(Mi)	P(Mi   x)	BIC	AIC
Lognormale (Maximum de vraisemblance)	2	1337.247	33.33	99.84	394.864	392.129
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	1080.870	33.33	0.16	407.776	405.041
Pearson type 3 (Maximum de vraisemblance)	3	1801.623	33.33	N/D	N/D	N/D

Source : traitements de données, 2020

Il ressort que la loi Log-normale de maximum vraisemblance est la mieux adaptée pour représenter la série des hauteurs pluviométriques maximales dans le bassin aménagé dans la zone de Buyo (**figure 62**).



**Figure 62 :** Ajustement graphique des maximales pluviométriques avec la loi Lognormale (Buyo)

À l’instar de Soubré, les hauteurs pluviométriques maximales suivent également le modèle dans l’intervalle de confiance avec une probabilité de non dépassement de 95 % à Buyo. De tout ce qui précède, il ressort que la loi Lognormale de maximum vraisemblance est la mieux adéquate pour représenter les séries des hauteurs pluviométriques maximales dans le bassin aménagé de Soubré.

#### 6.1.4 Estimation des périodes de retour des hauteurs pluviométriques maximales dans le bassin aménagé du Sassandra à l’exutoire de Soubré

À partir de l’ajustement des hauteurs pluviométriques maximales par les tests statistiques, des quantiles estimés pour différentes périodes de retour ont été fournis. Le **tableau 45** présente les différentes périodes de retour et les intervalles de confiance permettant d’évaluer l’incertitude associée à ces estimations pluviométriques.

**Tableau 45 :** Période de récurrence des hauteurs pluviométriques maximales aux stations de Soubré et Buyo

Buyo			Soubré		
Périodes retour	Quantiles estimés (mm)	Intervalle de Confiance (95 %) en mm	Périodes retour	Quantiles estimés (mm)	Intervalle de Confiance (95 %) en mm
2 ans	330	257 – 402	2 ans	283	267 - 300
5 ans	547	407 – 687	5 ans	322	300 - 344
10 ans	713	500 – 925	10 ans	344	317 - 372
20 ans	887	586 – 1190	20 ans	364	332 - 397
50 ans	1130	691 – 1580	50 ans	388	348 - 428
100 ans	1340	766 – 1910	100 ans	404	359 - 450

Source : traitements données SODEXAM, 2020

Au niveau de Buyo à l'entrée de la zone aménagée, l'analyse des données ce tableau montre que les précipitations maximales ayant une probabilité d'apparition tous les 5 ans s'élèvent à 547 mm et comprises entre 407 mm et 687 mm. Les pluies de 700 mm sont susceptibles de se produire une fois par décennie, c'est-à-dire tous les 10 ans. Ce maximum pluviométrique décennal varie de 500 mm à 925 mm.

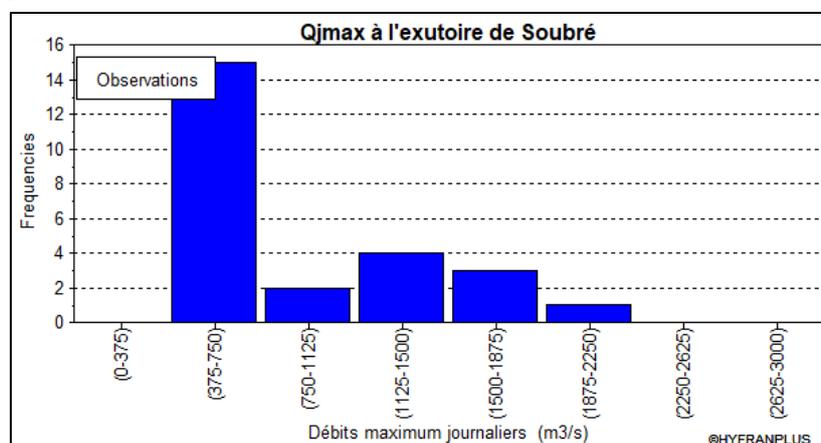
Quant à la zone exutoire à Soubré, en aval, les précipitations maximales oscillent en général autour de 300 mm. Ainsi, la probabilité d'une pluie extrême comprise entre 300 mm et 344 mm se produit chaque 5 ans. De plus, la probabilité d'une pluie exceptionnelle de 400 mm se produit tous les 100 ans ; ce qui correspond à une pluie centenaire à l'exutoire de Soubré.

## 6.2 Analyse fréquentielle des débits maximaux journaliers à l'exutoire du bassin aménagé de Soubré

Cette partie aborde l'analyse des débits maximaux journaliers observés à la station de Soubré. Il s'agit, tout comme les maximums pluviométriques, d'étudier la fréquence d'apparition des débits de crue susceptibles d'occasionner des inondations dans le bassin-versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré à travers les valeurs extrêmes journalières sur la période 1980-2019.

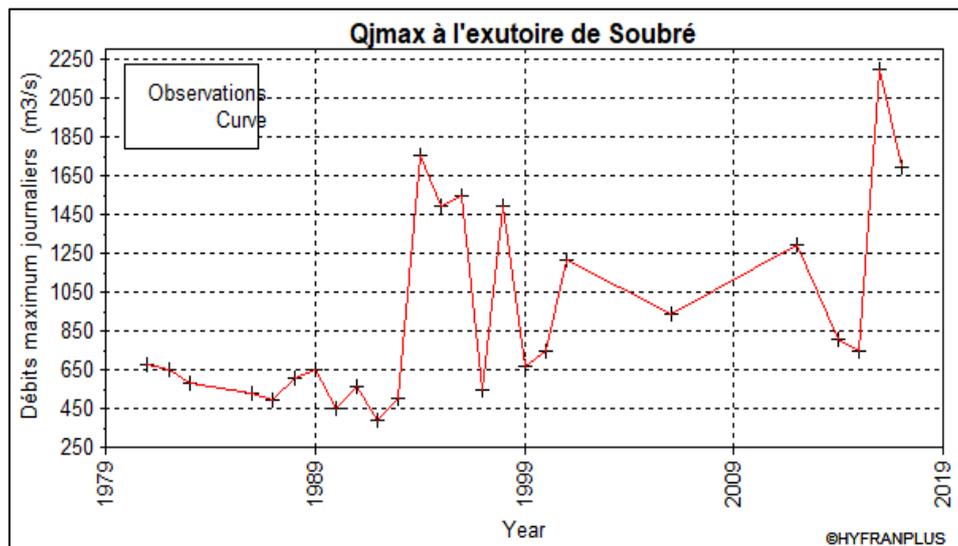
### 6.2.1 Fréquence d'apparition des débits maximaux dans le bassin aménagé de Soubré

La **figure 63** présente la fréquence d'apparition des débits journaliers maximums à l'exutoire du bassin aménagé de Soubré. Il ressort de l'analyse de cette figure 64 que les débits maximums journaliers varient dans l'ensemble dans l'intervalle  $375 \text{ m}^3/\text{s}$  -  $2250 \text{ m}^3/\text{s}$  à Soubré. Les débits compris entre  $375 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $750 \text{ m}^3/\text{s}$  constituent plus de la moitié et la plus forte fréquence d'apparition, soit 15 fois, c'est-à-dire 60 %.



**Figure 63** : Fréquences des valeurs de débits journaliers maximums à Soubré

Cette classe est suivie successivement par les débits journaliers maximums qui oscillent entre 1500 m<sup>3</sup>/s et 1875 m<sup>3</sup>/s, 1125 m<sup>3</sup>/s à 1500 m<sup>3</sup>/s, 750 à 1125 m<sup>3</sup>/s et 1875 à 2250 m<sup>3</sup>/s. Ils représentent respectivement 18,51 % (5 fois), 14,81 % (4 fois), 7,40 % (2 fois) et enfin 3,70 % (1 fois). Ainsi, les débits journaliers qui varient de 1875 m<sup>3</sup>/s à 2250 m<sup>3</sup>/s sont les plus forts observés à la station de Soubré comme le montre la courbe chronologique des débits journaliers maximums (**figure 64**).



**Figure 64** : Courbe chronologique des débits journaliers maximums

## 6.2.2 Vérification des hypothèses appliquées aux débits maximums annuels

Les débits observés ont été soumis aux différents tests d'indépendance (Wald-Wolfowitz), de stationnarité (Kendall) et d'homogénéité (Wilcoxon) afin de vérifier l'hypothèse nulle ( $H_0$ ) de la série chronologique. Les résultats sont consignés dans le **tableau 46**.

**Tableau 46** : Résultats des tests d'hypothèses appliqués

Station	Test d'indépendance		Test de stationnarité		Test d'homogénéité	
	U	P	K	P	W	P
Soubré	1.81	0.0709	2.57	0.0102	1.46	0.145
Hypothèse $H_0$	Acceptée		Rejetée (à 5%)		Acceptée	

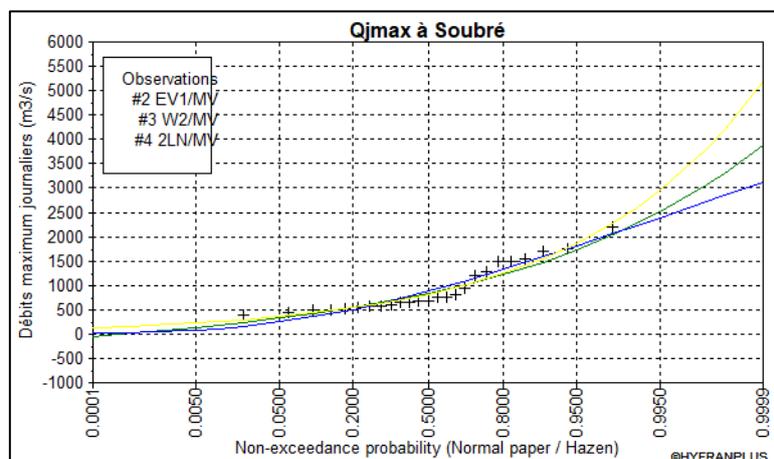
Source : traitements de données DHH, 2020

Il apparaît que l'hypothèse  $H_0$  du test d'indépendance est acceptée à un niveau de signification de 5 %. L'hypothèse nulle ( $H_0$ ) du test de stationnarité est rejetée à un niveau de

signification de 5 % mais acceptée au seuil de 1 %. Quant au test d'homogénéité de Wilcoxon, il est accepté sur la période 1981-2016. Par conséquent, ces données sont homogènes donc acceptables pour l'étude fréquentielle. C'est pourquoi, ces ajustements permettent d'estimer les différents quantiles de débits et leurs différentes périodes de retour dans le bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré.

### 6.2.3 Ajustement graphique des débits maximaux dans le bassin aménagé de Soubré

La **figure 65** présente les résultats de la comparaison graphique des ajustements des séries de débits extrêmes (maximums) avec le maximum vraisemblance de la loi Lognormale, la loi de Gumbel et Weibull à l'exutoire du bassin aménagé de Soubré.



**Figure 65 :** Comparaison de l'ajustement graphique des débits avec les lois de Gumbel

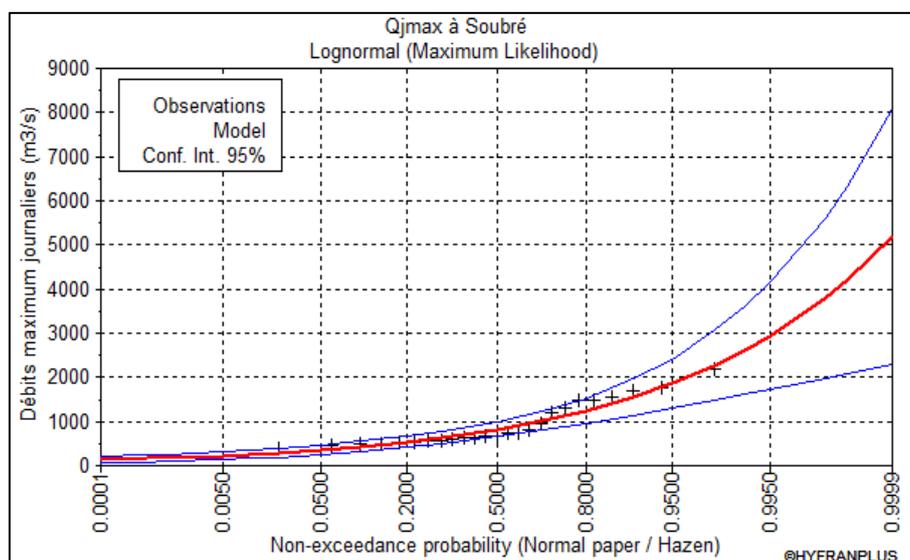
Il ressort de l'analyse visuelle de la **figure 65** que les débits maximums à l'exutoire de Soubré suivent correctement les différents modèles avec un intervalle de confiance de 95 % avec le maximum de vraisemblance. Cependant, le choix de la meilleure loi d'ajustement s'est fait à travers les critères d'information d'Akaike (AIC) et d'information Bayésien (BIC) conformément à la méthode d'application (**tableau 47**).

**Tableau 47 :** Comparaison des lois d'ajustement à l'aide des critères d'information (Soubré)

Modèles	Nombre de paramètres	Débit de retour	P(Mi)	P(Mi   x)	BIC	AIC
Log-normale (Maximum de vraisemblance)	2	2602.570	33.33	73.96	<b>376.820</b>	<b>374.383</b>
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	2283.232	33.33	20.50	379.387	376.949

*Source : traitements de données SODEXAM, 2020*

Les résultats donnent la loi Log-normale comme la meilleure loi d'ajustement des débits à la station de Soubré (**figure 66**).



**Figure 66** : Ajustement graphique des débits maximums journaliers

Par conséquent, la loi Lognormale a été utilisée pour estimer les probabilités d'occurrence des débits de crues, les quantiles et leurs périodes de retour.

#### 6.2.4 Estimation des périodes de retour des débits journaliers maximums dans le bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré

Le **tableau 48** présente les différentes périodes de retour et les intervalles de confiance qui permettent d'évaluer l'incertitude associée aux estimations de débits de crue.

**Tableau 48** : Période de récurrence des débits caractéristiques annuels à Soubré

Période retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Quantiles estimés (m <sup>3</sup> /s)	819	1240	1550	1850	2270	2600
Intervalle de Confiance (95 %) (m <sup>3</sup> /s)	659 - 979	961 - 1530	1140 - 1960	1290 - 2420	1480 - 3060	1610 - 3590

Source : traitements données DHH, 2020

Il ressort que les débits de crue (quantiles estimés) ayant une probabilité de survenir à l'exutoire du bassin aménagé du Sassandra à Soubré sont compris entre 819 m<sup>3</sup>/s et 2600 m<sup>3</sup>/s

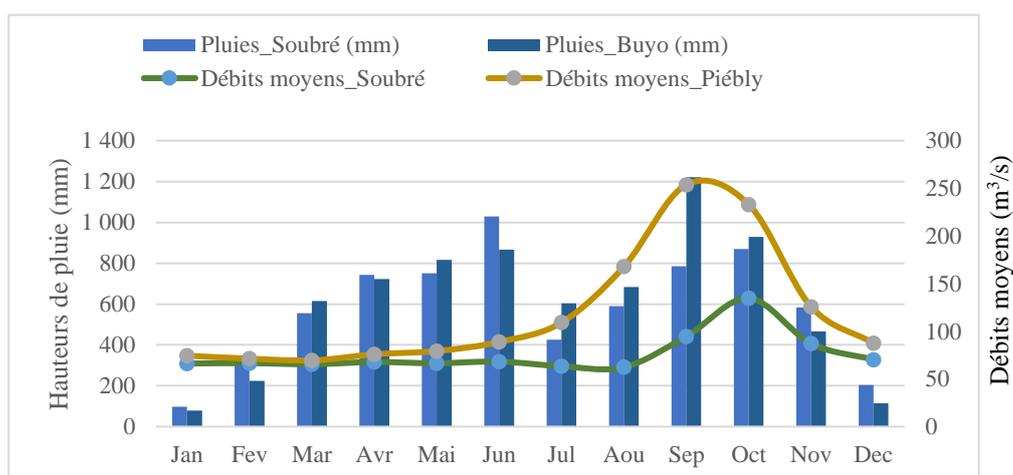
sur une période de retour allant de 2 à 100 ans. Ainsi, les débits de crue ayant une chance tous les deux ans de survenir oscillent entre 659 m<sup>3</sup>/s et 979 m<sup>3</sup>/s.

Quant aux débits de crue décennale ayant une probabilité d'apparition tous les dix (10) ans, ils varient entre 1140 m<sup>3</sup>/s et 1960 m<sup>3</sup>/s. Avec un débit moyen annuel estimé, avoisinant légèrement 1000 m<sup>3</sup>/s.

En effet, le fleuve Sassandra présente un débit de crue moyen spécifique de 40 à 50 m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>, soit un débit moyen annuel supérieur ou égale à 1100 m<sup>3</sup>/s. Cela correspond à la manifestation d'une crue annuelle médiane en tenant compte des données de référence de l'ORSTOM (G. Girard et L. Touchebeuf, 1962, p. 44). Ces données ont été obtenues par extrapolation de la loi de répartition aléatoire des crues connues sur le fleuve Sassandra. De ce fait, les crues importantes décennales, centennales et exceptionnelles correspondraient respectivement à des débits spécifiques de 2150 m<sup>3</sup>/s, 2900 m<sup>3</sup>/s et 3500 m<sup>3</sup>/s. On peut donc affirmer qu'à partir des débits de crues récurrentes de 5 ans, les situations climatiques extrêmes telles que les inondations sont susceptibles de se manifester à l'exutoire du bassin à Soubré.

### 6.3 Crues : résultantes de la relation entre intensités de pluies et débits dans le bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré

Afin de mieux cerner le lien entre la génération des crues et les précipitations à l'exutoire de Soubré, les débits moyens et les hauteurs moyennes de pluie sont représentés sur un même graphique (**figure 67**).



**Figure 67** : Relation pluie-débit dans le bassin aménagé de Soubré

Il ressort de cette figure que les débits aux stations de Soubré et Piéibly évoluent disproportionnellement à la variation des moyennes pluviométriques le premier semestre de

l'année civil, c'est-à-dire du mois de janvier à juin. Ces débits du fleuve Sassandra restent constants autour de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  entre les mois de janvier et juin, pendant que les hauteurs de pluie croissent progressivement (21 mm en janvier à Soubré et 17 mm à Buyo) pour atteindre leurs premiers pics au mois de juin (Soubré = 221 mm et Buyo = 186 mm), puis deux autres pics respectivement en septembre (Soubré = 168 mm et Buyo = 262 mm) et octobre. Durant la seconde saison des pluies, les débits atteignent des pointes de crues importantes avec des pics en août-septembre (Soubré =  $441 \text{ m}^3/\text{s}$  et Piebly =  $743 \text{ m}^3/\text{s}$ ) et octobre (Soubré =  $629 \text{ m}^3/\text{s}$  et Piebly =  $459 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Selon les témoignages recueillis et les observations faites sur le terrain, c'est à cette période que les inondations dues aux débordement de plusieurs cours d'eau sont observées. En témoignent les inondations relatives aux débits des crues d'octobre 2016, des mois de mai et juin 2017 avec un débit journalier dépassant les  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$  pour la première semaine d'octobre 2016, soit près de 6 fois la moyenne des débits journaliers. En plus, cette même année, la hauteur totale des précipitations mensuelles enregistrées était de 290 mm (octobre 2016), dépassant la moyenne mensuelle pluviométrique (125 mm) dans la région de Soubré. Dès lors, les débits de crues importantes sont liés à des épisodes pluvieux consécutifs sur plusieurs jours quel que soit la période. En effet, les débits spécifiques augmentent naturellement avec la pluviométrie annuelle, mais ils dépendent également de la répartition saisonnière des précipitations. Les incidences de ces crues importantes sont généralement des inondations avec diverses conséquences notamment la perte des récoltes, la coupure des pistes de champs par les eaux, les routes impraticables, etc.

En définitive, les précipitations constituent le facteur déclencheur des écoulements de surface par conséquent de la génération des crues et inondations fluviales dans l'espace étudié.

#### **6.4 Discussion**

L'analyse des maxima hydropluviométriques sur les périodes 1980-2019 (débit) et 1989-2019 (pluviométrie) a permis de connaître les quantiles de débits et de pluies susceptibles d'occasionner des risques climatiques tels que les inondations ainsi que leur période d'occurrence certaine dans le bassin aménagé du fleuve Sassandra à Soubré.

Cette analyse fréquentielle a l'avantage de prévenir la survenance de ces phénomènes dont l'intensité et la fréquence ont de graves conséquences environnementales, socio-économiques et humaines. Ce constat est souligné par D. Koumassi et al. (2014, p. 146). Les

données utilisées proviennent des stations météorologiques de Soubré et Buyo. Ces données hydro-pluviométriques ont respecté les exigences du nombre d'année d'observation, à savoir supérieure ou égale à 30 ans (1980-2019) comme le recommande les normes de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). En effet, l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM, 2014, p. 30) considère qu'une période de trente (30) ans est assez longue pour éliminer les variations interannuelles. Toute étude hydrologique est basée sur l'exploitation de séries de données recueillies pendant des périodes plus ou moins longues continues ou discontinues. Cette norme est appliquée dans plusieurs travaux d'études hydropluviométriques dont ceux de A.M. Kouassi et *al.* (2021, p. 246). Ainsi, les résultats de cette étude montrent que dans le bassin aménagé de Soubré, les quantiles de débits et pluies augmentent de façon proportionnelle à celle des périodes de retour retenues (2 ans, 5 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans). Lorsque ces périodes de retour augmentent, la valeur du quantile associé augmente. Ce constat a été fait par A. I. Ague et A. Afouda (2015, p. 124) au Bénin pour les maximas pluviométriques annuelles sur la période 1921 – 2001 à travers les données de 35 stations pluviométriques. En Il ressort des analyses que les quantiles de débits estimés ayant une probabilité de survenir varient de 819 m<sup>3</sup>/s à 2600 m<sup>3</sup>/s sur une période de retour allant de 2 à 100 ans. Les débits de crue ayant une chance tous les dix (10) ans de survenir oscillent entre 1140 m<sup>3</sup>/s et 1960 m<sup>3</sup>/s. Concernant les précipitations, les quantiles varient de 283 mm à 404 mm à la station Soubré pendant qu'elles oscillent entre 330 mm et 1340 mm au niveau de Buyo sur une période de retour de 2 à 100 ans. Par ailleurs, les critères de comparaison d'Akaike (AIC) et Bayésien (BIC) ont montré que la loi Lognormale est la loi statistique la mieux appropriée pour décrire toutes les séries des maxima de pluies et de débits au niveau des différentes stations de Soubré et Buyo. Dans la même logique, les résultats de A. M. Kouassi et *al.* (2019, p. 133) confirment l'ajustement au mieux de la loi Log-normale avec une marge d'erreur de 1 à 5 %. Son analyse a porté sur les débits moyens d'étiage sur la période 1960 - 2016 dans le bassin-versant du N'Zi-Bandama en Côte d'Ivoire. Par conséquent, la loi de Gumbel couramment utilisée pour estimer les extrêmes hydro-pluviométriques dans la région ouest de l'Afrique et qui en fait une prédominance n'est pas totalement adaptée à la zone sud-ouest ivoirien. Ces résultats confirment le scepticisme de nombreux auteurs sur la prédominance de la loi de Gumbel pour l'estimation des quantiles hydro-pluviométriques.

En ce qui concerne la relation pluie-débit, les résultats ont montré que de façon générale, les débits spécifiques augmentent tout naturellement avec la pluviométrie annuelle, et que ces dernières sont la principale cause de génération des crues. Dès ce fait, les débits spécifiques de

crue augmentent avec la hauteur annuelle des pluies, parce que la saturation du sol est mieux assurée lorsque les précipitations sont abondantes. Ce constat a été fait par G. Girard et L. Touchebeuf (1962, p. 43) au niveau de tous les bassins-versants des cours d'eau de Côte d'Ivoire. Leur analyse a porté cependant sur une dizaine d'année d'observations (1953 - 1962).

### **Conclusion partielle**

L'analyse fréquentielle des données maximales pluvio-hydrologiques (pluies et débits) à l'échelle du bassin-versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré a été réalisée à partir des données des périodes 1989-2019 (pluie) et 1980-2019 (débits). Les hauteurs de pluies maximales mensuelles et les débits de crue proviennent des stations météorologiques de Soubré et Buyo. Les tests statistiques hydrologiques (stationnarité, indépendance et homogénéité) ont été effectués sur l'ensemble des séries de données de pluies et de débits avec un taux de signification de 1 à 5 %. On retient que les quantiles de débits de crue exceptionnelle ayant une probabilité de survenir varient entre 819 m<sup>3</sup>/s et 2600 m<sup>3</sup>/s sur une période de retour allant de 2 à 100 ans.

En ce qui concerne les précipitations, les quantiles estimés varient de 283 mm à 404 mm à la station de Soubré pendant qu'elles oscillent de 330 mm à 1340 au niveau de Buyo sur une période de retour de 2 à 100 ans.

De plus, la relation pluie-débit est établie du fait que la génération des crues suit la pluviométrie dans le bassin avec une influence liée à la répartition saisonnière des précipitations. C'est pourquoi, la maîtrise et la connaissance de ces paramètres hydro-pluviométriques (spécifiques, rares ou exceptionnelles) s'avèrent plus qu'utiles pour la mise en place d'outils d'aide à la décision et dans un contexte de prévision des risques climatiques tels que les inondations dans le bassin anthropisé de Soubré.

Ce chapitre a donc permis d'analyser ces paramètres descripteurs de l'occurrence et la susceptibilité de survenance du risque d'inondation à l'exutoire de Soubré. Ces différents quantiles estimés ainsi que leurs périodes d'occurrence constituent un important moyen d'aide à la décision dans les processus de recherche des stratégies de lutte contre les risques hydro-climatiques en général et les inondations en particulier dans le bassin aménagé du fleuve Sassandra à Soubré.

## CHAPITRE 7 : RISQUE D'INONDATION FLUVIALE DANS LE BASSIN-VERSANT AMÉNAGÉ DU FLEUVE SASSANDRA À SOUBRÉ

Ce chapitre aborde l'analyse du risque d'inondation fluviale dans la zone aménagée du bassin-versant du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré. Cette analyse se fait à travers le croisement des différents facteurs d'aléas et d'enjeux qui influencent la genèse et le degré de manifestation des inondations fluviales. Il s'agit donc de territorialiser ou spatialiser le risque d'inondation fluviale dans la zone aménagée du bassin-versant.

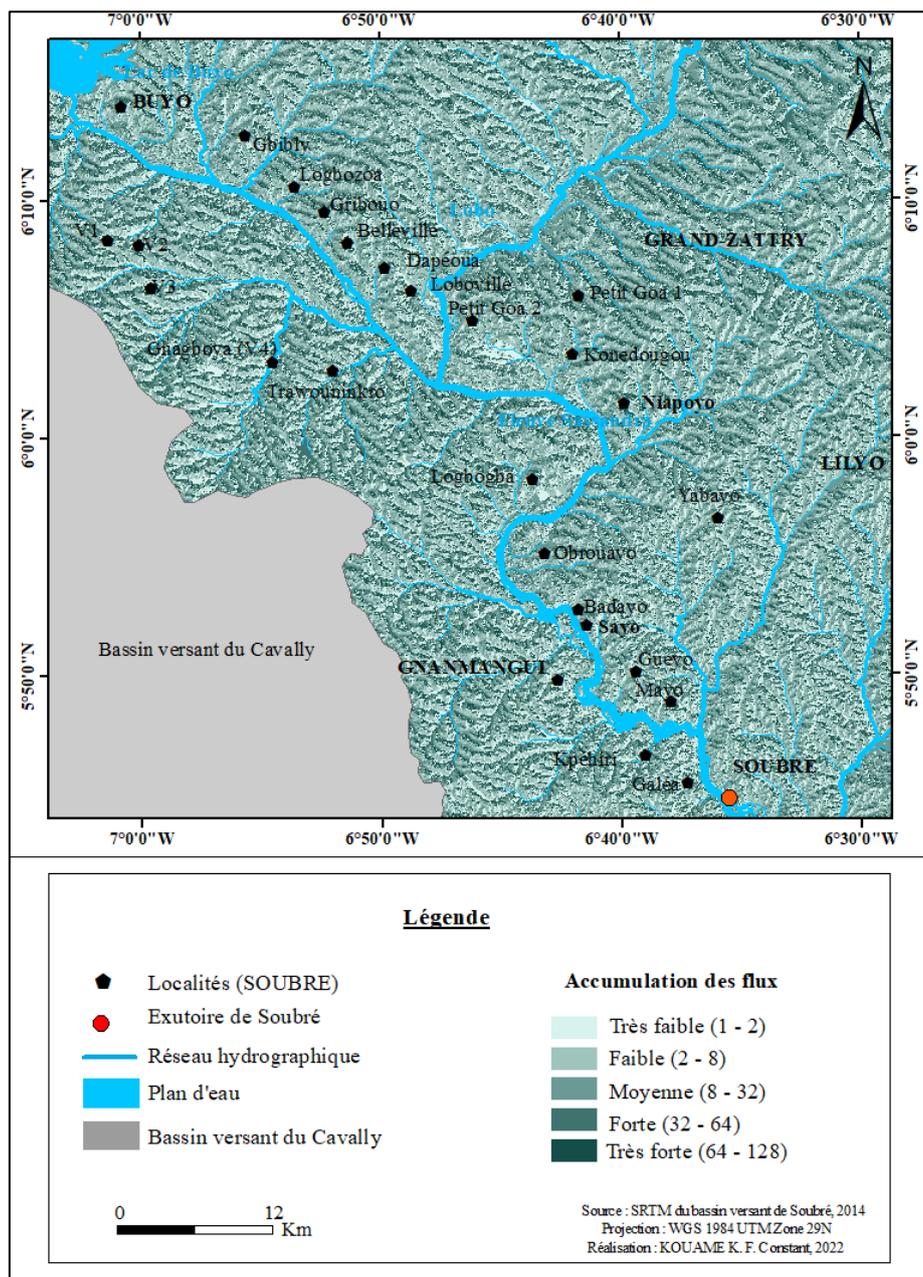
### 7.1 Cartographie des facteurs du risque d'inondation fluviale dans le bassin aménagé de Soubré

Pour cette étude, les facteurs d'aléa sont portés sur la densité du réseau de drainage, le flux d'accumulation des débits, la pente, l'altitude du relief et l'indice d'humidité topographique. Quant aux principaux enjeux, ils concernent l'occupation du sol, la densité de population et la distance des enjeux au réseau hydrographique.

#### 7.1.1. Cartographie des facteurs d'aléa à l'inondation fluviale dans la zone aménagée de Soubré

##### 7.1.1.1 Ruissellement résultant de la relation pluie-débit dans le bassin aménagé de Soubré

La **figure 68** montre le niveau d'accumulation des débits dans le bassin aménagé. L'accumulation de débits élevés présente certainement une plus grande prédisposition à l'aléa inondation fluviale. En effet, dans la zone inférieure du bassin, de la ligne de partage des eaux au niveau de Piebly jusqu'à l'exutoire de Soubré, le fleuve Sassandra est alimenté par de nombreux affluents de niveau inférieur dont l'un des plus importants est le Lobo. Ces différents affluents (Hana, Zozolo, etc.) participent à l'accumulation des débits qui concourent au ruissellement des eaux. L'accumulation des flux de débits est un critère important de l'occurrence des inondations. Elle se fait en agrégeant les flux d'eau de la montée à la descente sur la grille de sortie. Des valeurs élevées de débits accumulés indiquent les cellules dans lesquelles l'eau qui s'écoule a tendance à se concentrer comme le présente la **figure 68**. Ces zones sont concentrées autour des cours d'eau avec des classes de valeurs très fortes (64 – 128) et forte (32 – 64). Ces zones sont plus sujettes au risque d'inondation fluviale.



**Figure 68 :** Niveau d'accumulation des débits dans le bassin versant aménagé du Sassandra à Soubré

### 7.1.1.2 Carte des dérivés topographiques (altitude, pentes, TWI)

Le bassin-versant représente une portion de la surface à l'intérieur de laquelle les pentes topographiques amènent tout le ruissellement qui se produit vers un seul et même exutoire. Il représente donc des zones d'acheminement naturel des eaux drainées aux exutoires. En effet, le relief est un facteur passif des inondations et sans doute le plus important après la pluviométrie. À travers l'altitude, les pentes et l'indice d'humidité topographique (TWI), le relief influence sur l'écoulement des eaux fluviales dans le bassin aménagé de Soubré.

### 7.1.1.2.1 Carte d'altitude et pente

Le bassin aménagé est caractérisé par un relief avec des altitudes qui oscillent entre 89 mètres et 400 mètres (**figure 69**). Ces différents niveaux de la topographie ont un effet sur la génération du ruissellement et la quantité d'accumulation de débit à n'importe quel endroit dans le bassin-versant. En fait, au fur et à mesure que la distance augmente par rapport au réseau de drainage, les altitudes deviennent plus élevées. Ainsi, aux abords des différents cours d'eau, les altitudes sont les plus basses du relief, avec des classes de valeurs inférieures à 95 m et de 95 à 120 m.

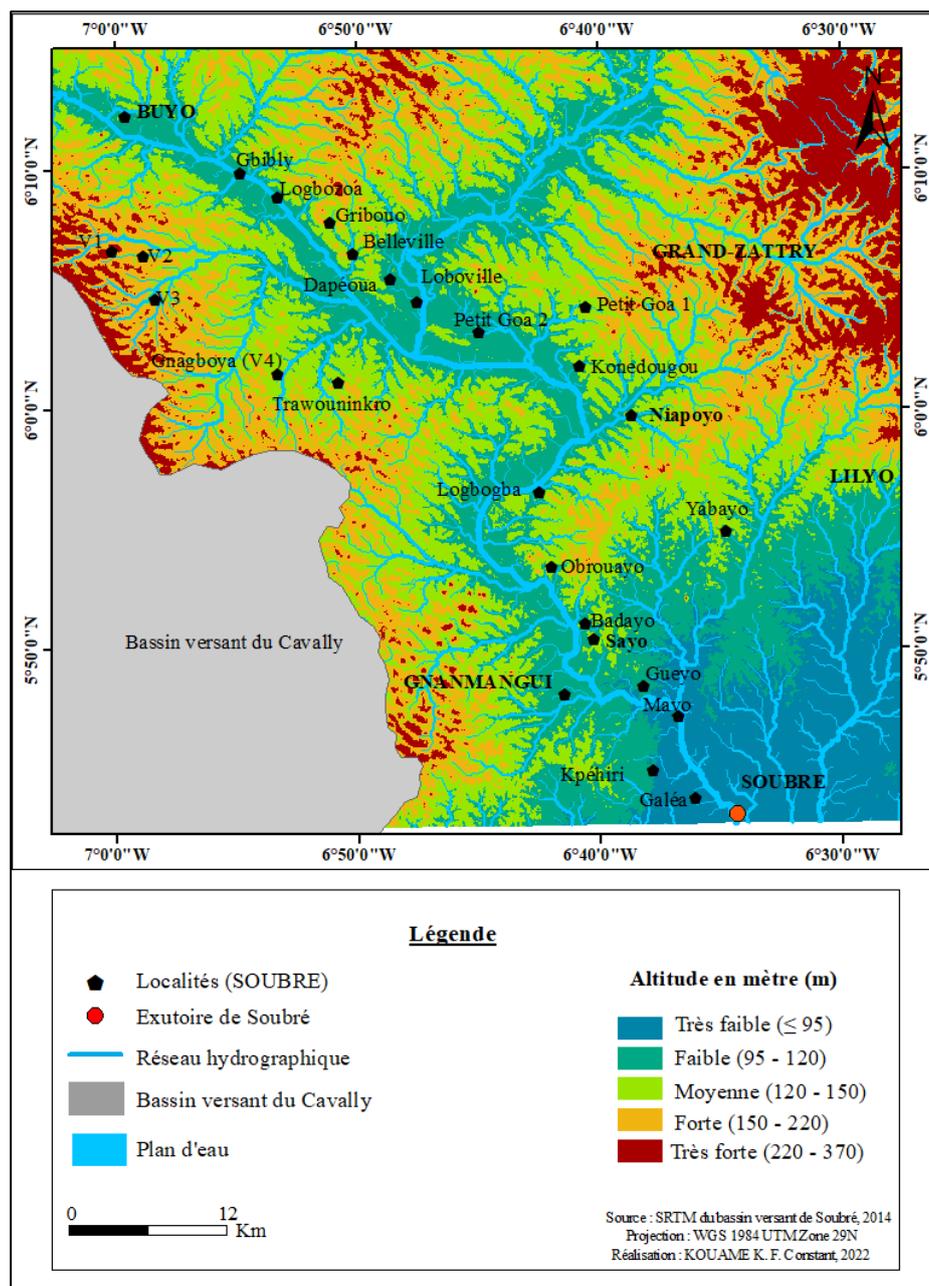
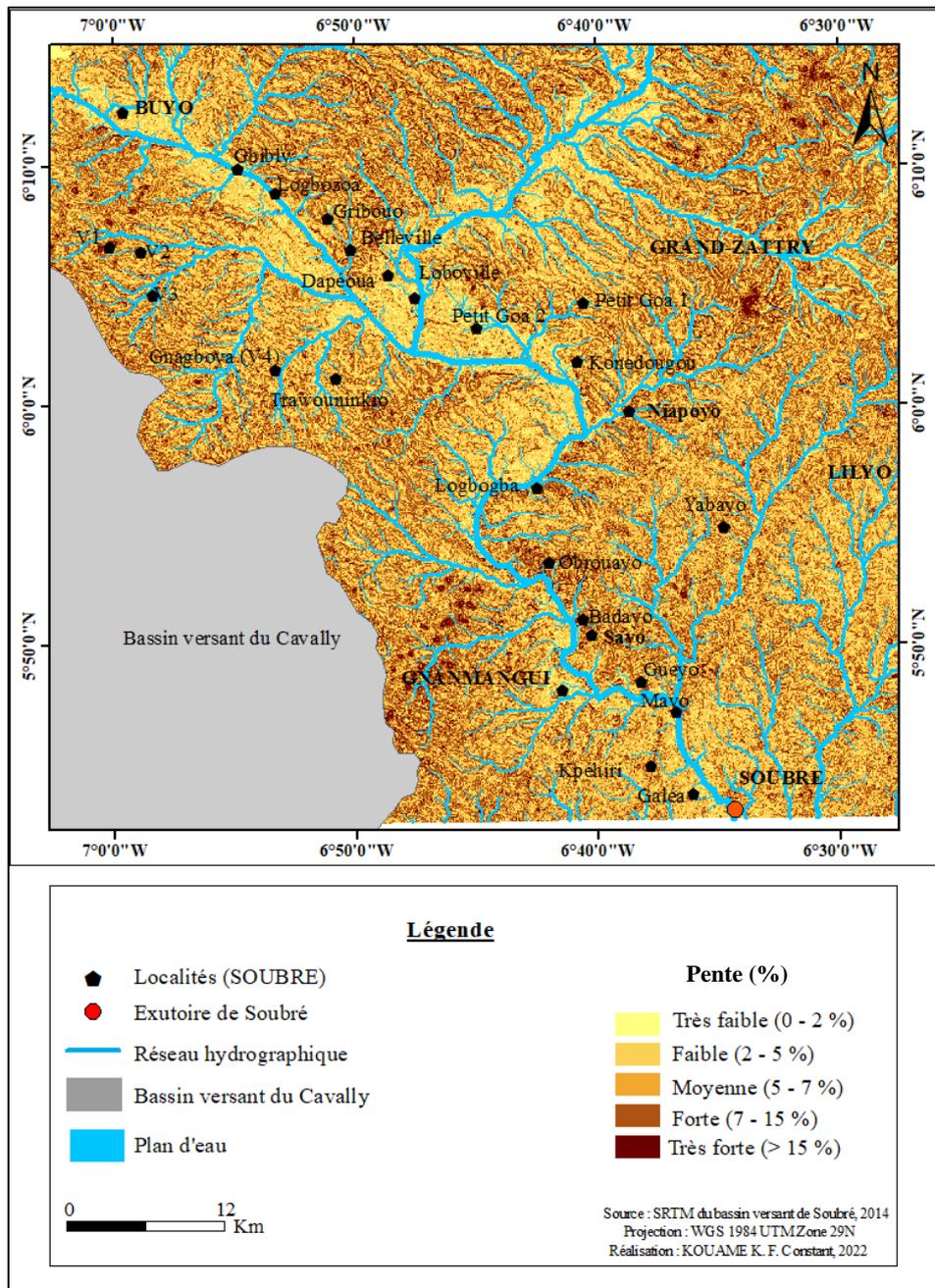


Figure 69 : Différents niveaux d'altitude du relief dans le bassin aménagé

En ce qui concerne la pente, elle accélère le ruissellement quand l'inclinaison est accentuée et favorise la concentration des eaux lorsqu'elle est faible voire très faible. Dans la zone aménagée du bassin de Soubré, les pentes du relief varient de moins de 2 % à plus de 15 % (**figure 70**). La quasi-totalité des pente faibles (0 à 5 %) sont situées le long des cours d'eau sur tout le bassin-versant aménagé, dans les zones de Buyo, Loboville, Dapéoua, Gnamangui et autour des localités situées dans la zone de l'exutoire de Soubré comme Galéa et Kpéhiri.

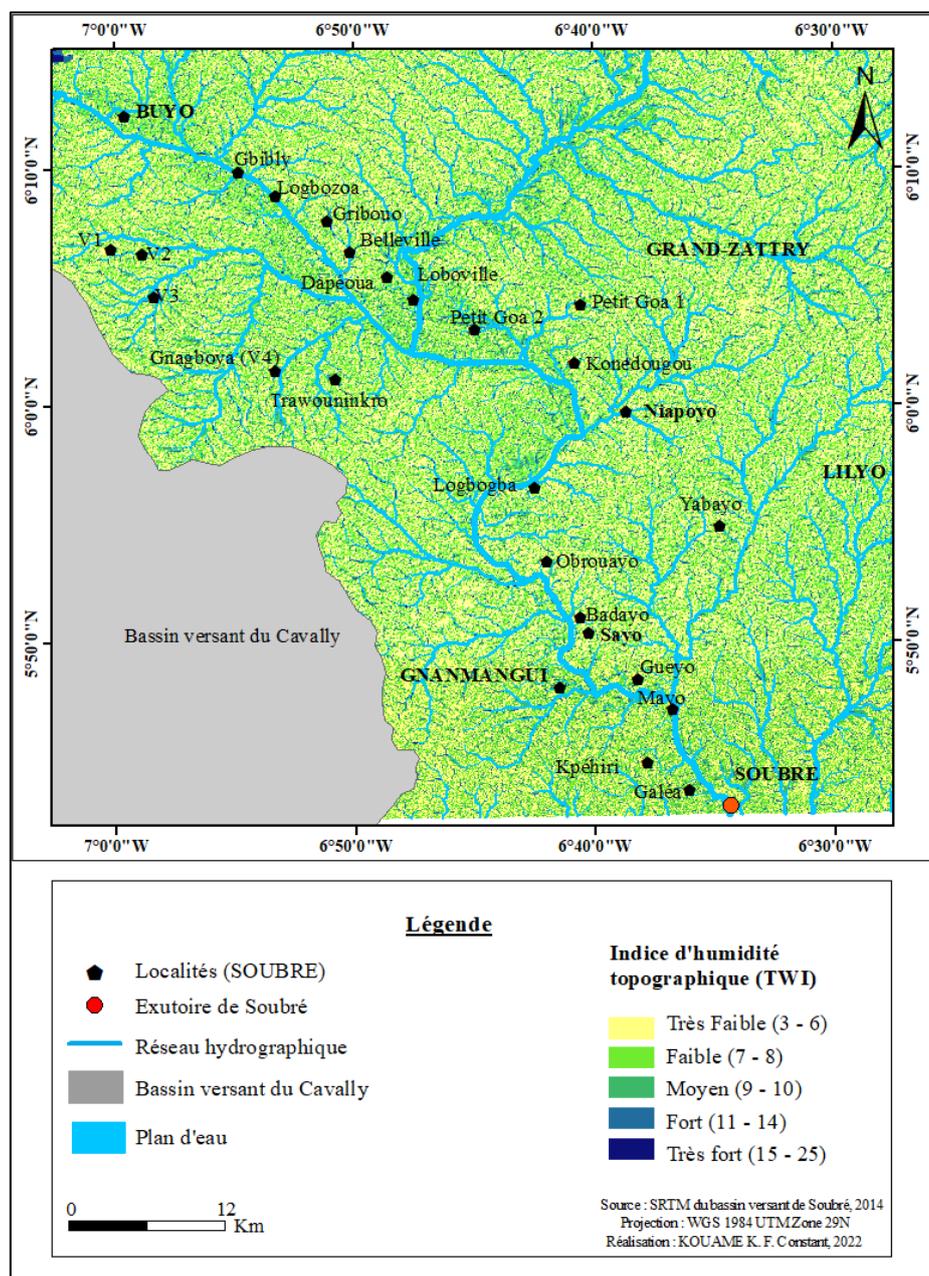


**Figure 70 :** Niveaux de pente dans le bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré

### 7.1.1.2.2 Carte de l'indice d'humidité topographique (TWI)

Le TWI détermine les lieux où l'eau a le plus de probabilité de rester plus ou moins temporairement et donc de présenter des zones humides favorables aux crues et inondations. Un indice élevé correspond à une forte probabilité de présence de zones humides, donc un potentiel élevé d'accumulation en raison de la faible pente et vice-versa.

La **figure 71** présente l'indice d'humidité topographique de la zone d'étude. Il ressort que le TWI du bassin aménagé oscille entre la valeur 3 pour le TWI le plus faible et la valeur 25 pour le TWI le plus élevé.



**Figure 71** : Indice d'humidité topographique du bassin aménagé du Sassandra à

Quant aux zones à TWI moyen, ils sont compris entre les valeurs 8 et 11. Les milieux à faible et très faible TWI occupent respectivement les valeurs 3 à 6 et 7 à 8 dans le bassin aménagé. Les zones présentant un TWI fort/très fort (11 à 25) sont caractérisées par les dépressions tels que les drains et talwegs. Ces zones à indice d'humidité topographique élevé révèlent la disposition au risque d'inondation fluviale du bassin due à la faiblesse des pentes combinée à l'abondance des cours d'eau.

En définitive, ces trois dérivés du relief contribuent à divers degrés à l'occurrence des crues et inondations dans le bassin aménagé de Soubré. Par conséquent, ils constituent des facteurs fondamentaux de génération des crues et d'exacerbation du risque d'inondation fluviale.

#### ***7.1.1.3 Densité du drainage***

La **figure 72** présente la densité de drainage dans la zone aménagée du Sassandra à Soubré. La dissection du relief du bassin-versant aménagé de Soubré présente une zone assez densément drainée du fait de la présence de nombreux cours d'eau et affluents non moins importants comme le Lobo vers Buyo, le Hana vers Dapéoua et le Zozolo à Soubré. L'accumulation et la concentration des précipitations dues à des épisodes de pluies sur plusieurs jours peuvent entraîner des débordements, donc des sorties de l'eau du lit naturel ou mineur des cours d'eau. Dans ce contexte, les zones plus proches du réseau fluvial ou des cours d'eau secondaires sont les lieux spécifiques où la manifestation des crues se concentre.

Dans le bassin aménagé de Soubré, la densité du drainage oscille entre 1 et 8 km/km<sup>2</sup>. La très forte densité varie entre 7 et 8 km/km<sup>2</sup> et touche les zones proches des cours d'eau notamment les localités dans la zone Sud du bassin. La densité au km<sup>2</sup> est égale à 0,8 km de cours d'eau. Cette densité des cours d'eau ou du réseau de drainage constitue un facteur important dans la distribution spatiale des crues et inondations par débordement des eaux fluviales. Enfin, cette densité est très forte.

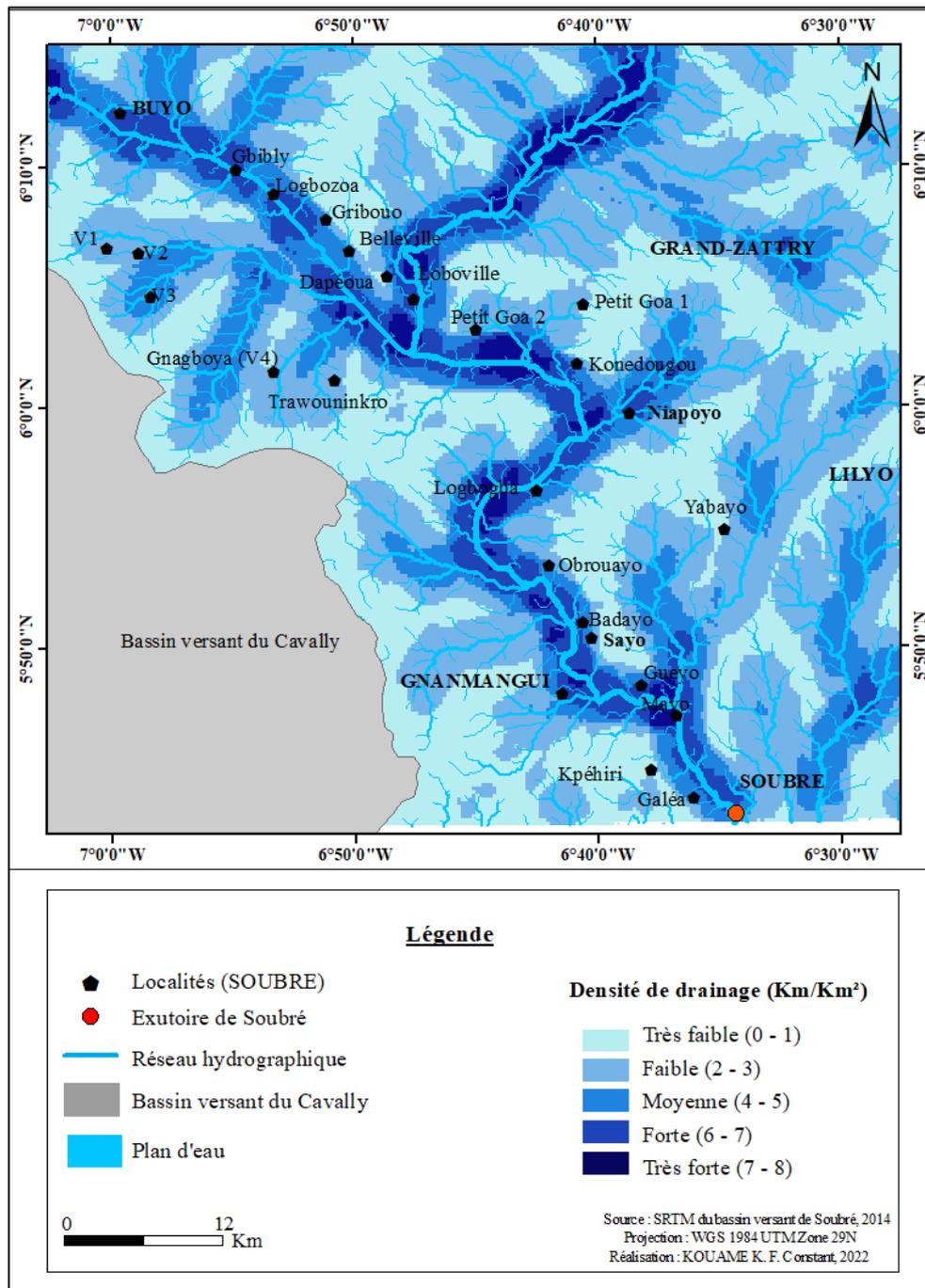


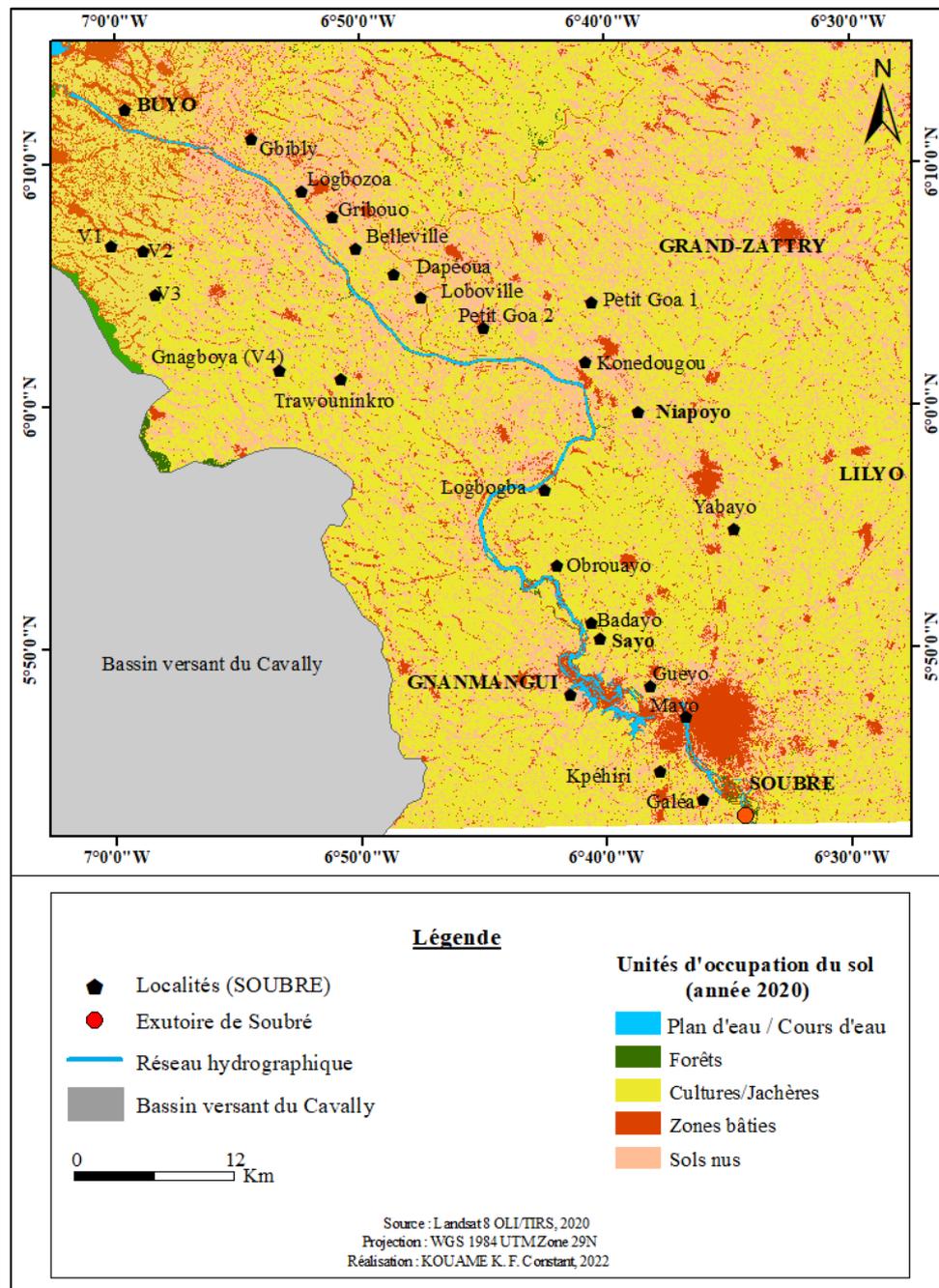
Figure 72 : Densité du réseau de drainage dans le bassin aménagé du Sassandra de Soubré

## 7.1.2. Enjeux face à l'inondation fluviale dans la zone aménagée de Soubré

### 7.1.2.1 Unités d'occupation et d'usage du sol dans la zone aménagée

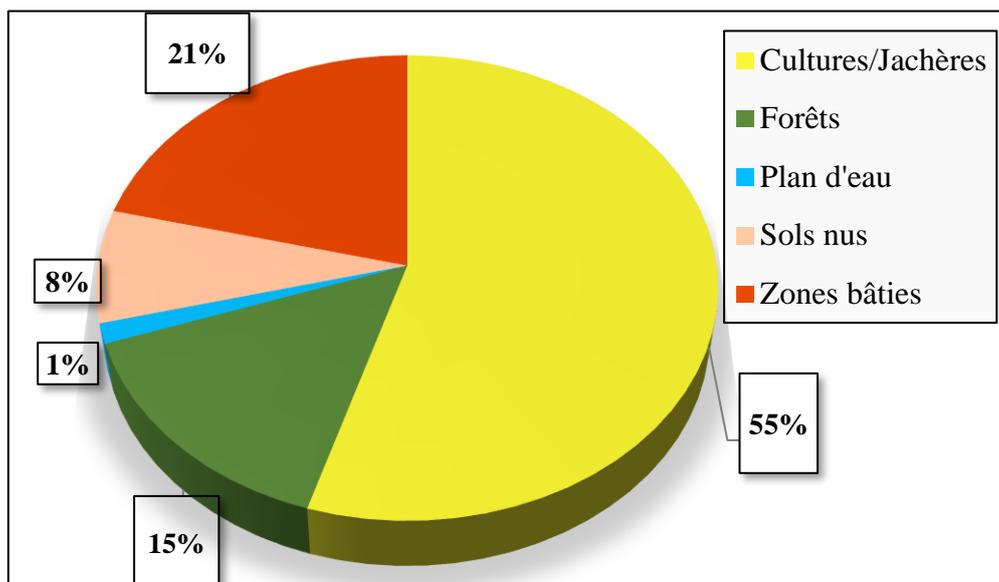
La figure 73 présente la carte d'occupation du sol dans la zone d'étude. Elle provient du traitement de l'image ETM+ de Landsat 8 de l'année 2020. Les unités d'occupation du sol sont constituées des terres agricoles (cultures et jachères), des zones habitées, de terres nues, de forêt, de plan et de cours d'eau. Chose remarquable, les villages sont alignés en suivant le tracé

du fleuve. Quant à la ville de Buyo, elle se développe à proximité du plan d'eau, tandis que Soubré, la principale ville de la région, est traversée par le Sassandra.



**Figure 73 :** Unités d'occupation du sol du bassin versant aménagé de Soubré

Il ressort également de la figure 73 que les terres agricoles couvrent plus de la moitié de la zone d'étude, soit 55 %. Ensuite, viennent les zones bâties (villes et villages), à raison de 21%, puis les lambeaux de forêts (15 %). Le reste de la zone est occupé par les sols nus et le plan et cours d'eau dont l'emprise spatiale est inférieure à 10 % (**figure 74**).



**Figure 74 :** Proportion des unités d'occupation du sol du bassin-versant aménagé de Soubré

#### 7.1.2.2 Densité de population, facteur d'enjeu humain

Révéléateur de la présence humaine sur un territoire, la densité de population révèle les enjeux humains présents sur un territoire face à la manifestation du risque, en l'occurrence le risque d'inondation fluviale dans le contexte de cette étude.

À travers l'exploitation des données du Recensement Général de la Population et de l'Habitat (INS-RGPH) réalisé en 2014, il ressort que la densité de la population au niveau des cinq (5) importantes localités considérées oscille entre 43 et 469 habitants au km<sup>2</sup> comme le présente la **figure 75**. La zone de Soubré avec ses localités (Kpéhiri, Galéa, Mayo, Badayo, Obrouayo, Sayo) situées le long du fleuve Sassandra présente une très forte densité de population comprise entre 124 et 469 habitants/km<sup>2</sup>. Ensuite, viennent les localités des grands départements de Grand-Zattry et Buyo, avec respectivement des densités forte (109 - 123 habitants/km<sup>2</sup>) et moyenne (90 -108 habitants/km<sup>2</sup>). La zone de Gnanmangui présente la plus faible présence de population au km<sup>2</sup>, soit environ 42 habitants.

Ainsi, ce facteur montre l'importance du facteur anthropique dans la composante majeure de vulnérabilité pour l'analyse du risque d'inondation fluviale dans le bassin aménagé de Soubré.

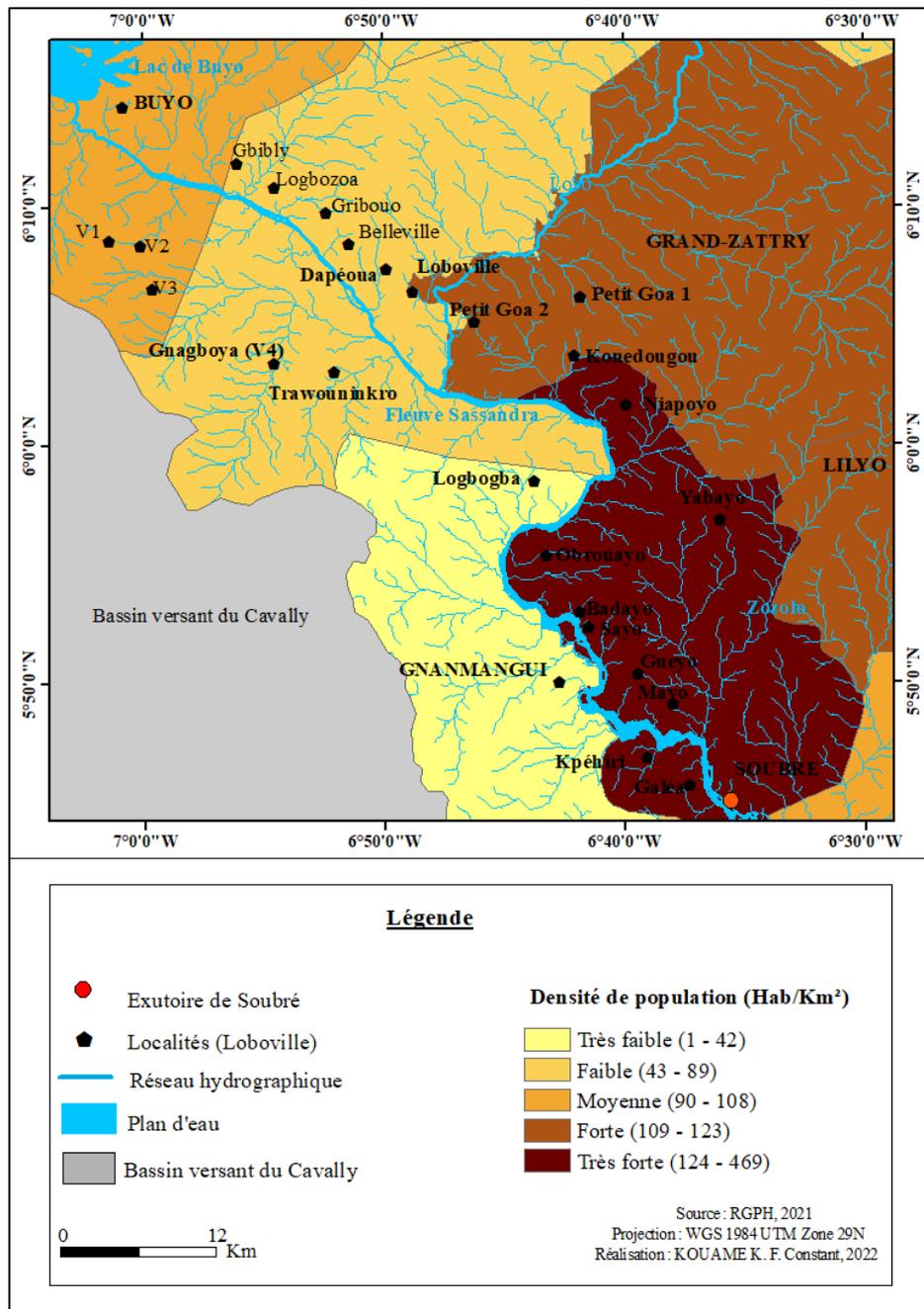
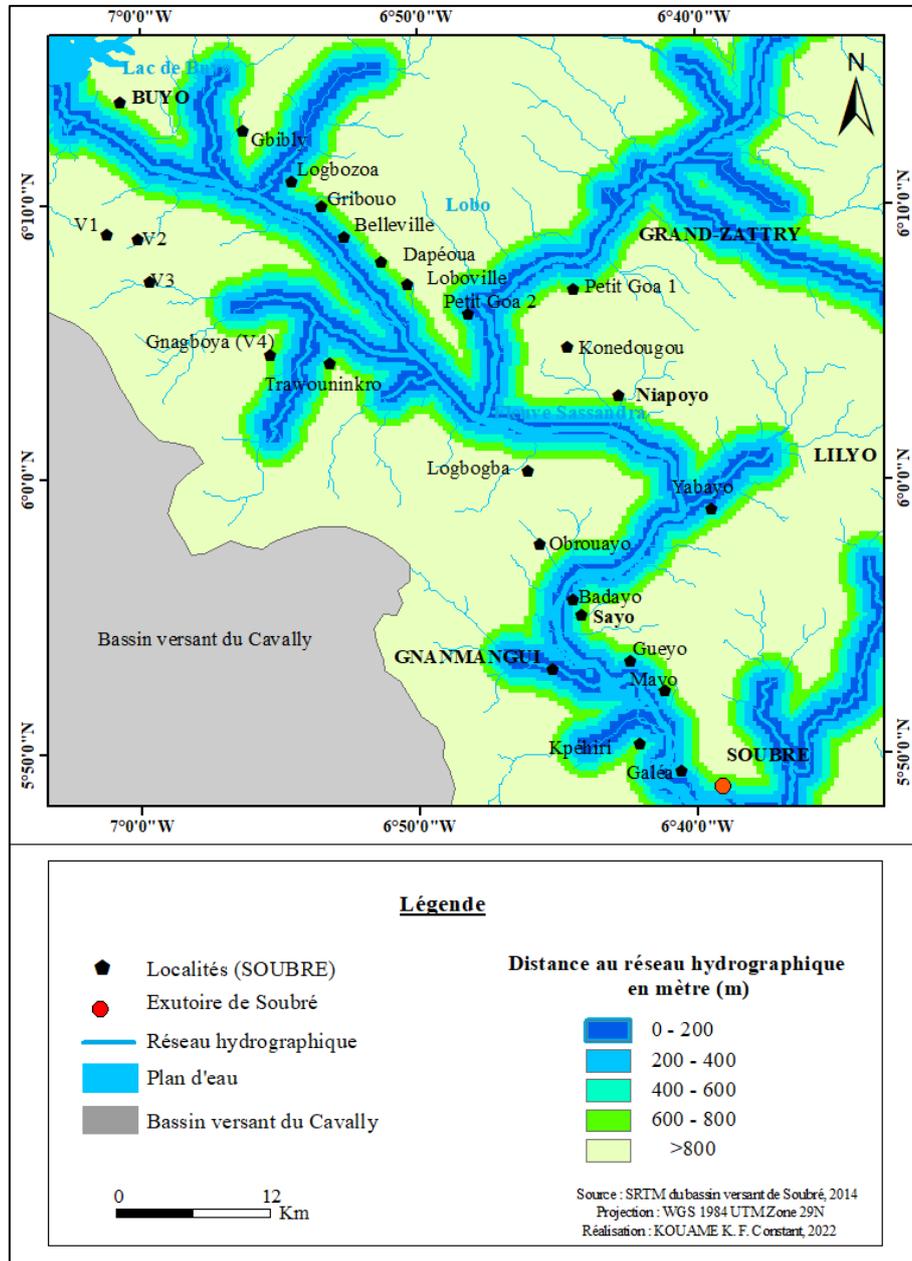


Figure 75 : Densité de la population dans le bassin versant aménagé à Soubré

### 7.1.2.3 Carte de la distance des enjeux au réseau hydrographique

La distance au réseau fluvial est un facteur déterminant dans l'étude des crues et inondations de type fluvial. Les débordements de rivières peuvent déclencher une inondation, car l'eau déborde du lit mineur du cours d'eau et se répand dans les environs notamment le lit majeur.

De ce fait, les enjeux constitués par les équipements socio-économiques divers, les exploitations agricoles, les voies et réseaux divers proches du fleuve Sassandra sont plus vulnérables à l'inondation fluviale ou par débordement des eaux que les zones éloignées comme le montre la **figure 76**.



**Figure 76** : Zone d'influence du réseau hydrographique dans le bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré

En considérant que les zones proches du réseau de drainage sont celles de moins de 200 à 400 mètres, il ressort que les enjeux situés à équidistance de 0 à 400 mètres du fleuve Sassandra et ses affluents sont les plus exposés au risque d'inondation fluviale.

À titre d'illustration, au niveau de l'exutoire à Soubré, ce sont plusieurs équipements socio-économiques qui seront impactés dont les installations hydrauliques de la SODECI, le marché à poisson de CI-ENERGIES et bien d'autres équipements privés comme le grand espace détente du PAM'S KALLY de Soubré (**photo 10**).



*Photo 10 : Complexe détente PAM'S KALLY en bordure (moins de 5 mètres) du fleuve Sassandra à l'exutoire Soubré*

Au niveau des localités, ce sont plusieurs localités dont les villages de Buyo, Loboville, Soubouo, Kpéhiri, Galéa, Mayo 1, Sayo, Petit Guéyo, Gnamangui (pour ne citer que celles-ci) pourraient être impactés du fait de leur proximité au cours d'eau.

Quant à la zone de Buyo, toute la partie ouest et nord de la ville serait emprise par les cours d'eau dont la zone d'influence s'étend sur 1000 à 3000 mètres. À partir de 200 m, les localités de Petit Goa en bordure du Lobo et Dapéoua seront touchées.

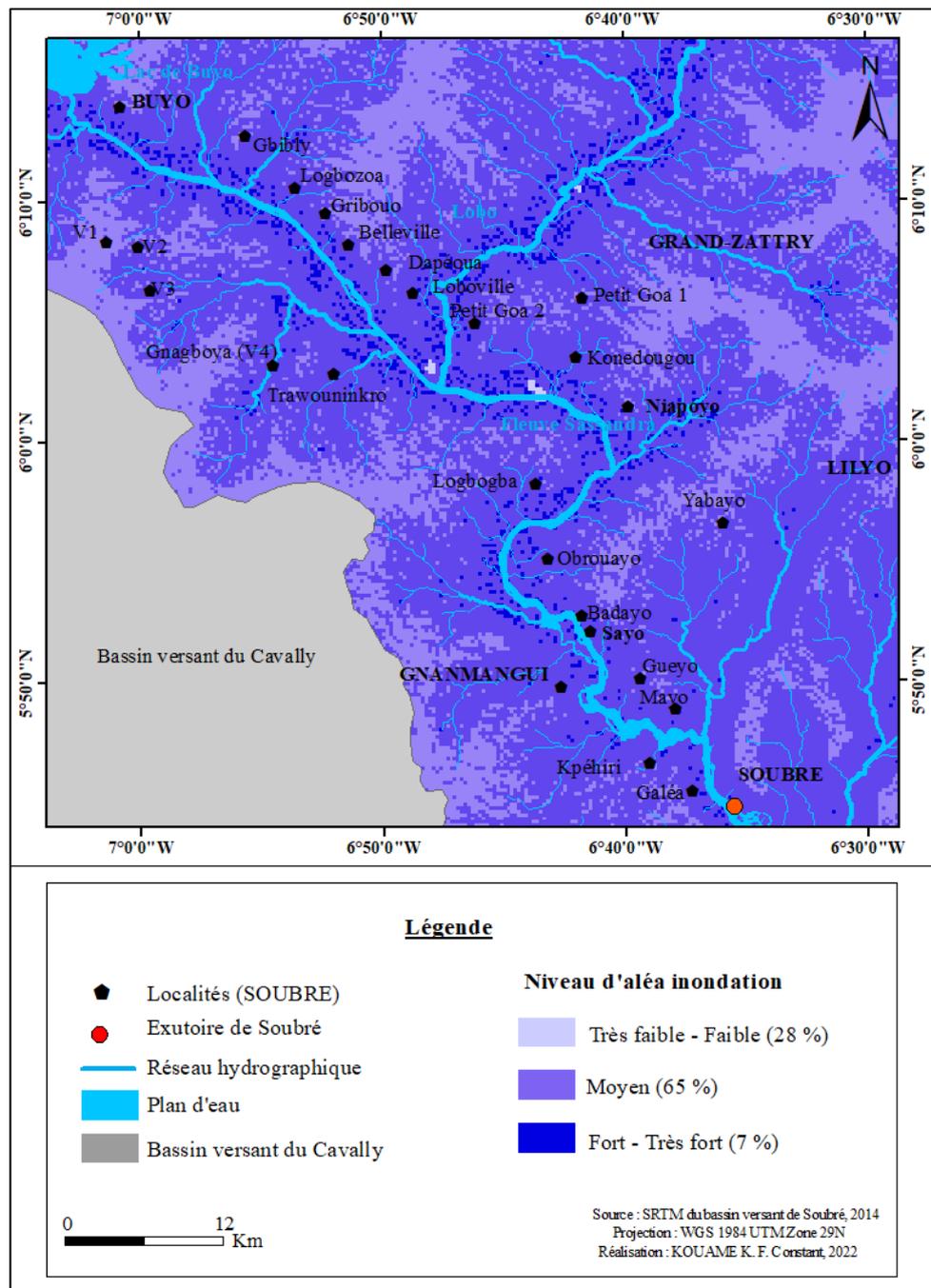
## **7.2 Analyse des niveaux de risque d'inondation fluviale dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré**

L'analyse du risque d'inondation fluviale dans la zone aménagée du fleuve Sassandra s'est faite par l'application de la méthode multicritère de T. L. Saaty dont les différentes étapes (matrice de comparaison par paire, normalisation de la matrice, détermination des indices et ratio de cohérence et pondération) sont déjà décrites plus haut dans la section méthodologique de cette étude. Cette méthode a permis de déterminer les différents niveaux de risque d'inondation par débordement du fleuve Sassandra et affluents à l'exutoire de Soubré.

### **7.2.1 Définition de la zone d'aléa d'inondation fluviale dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré**

L'inondation fluviale est qualifiée de phénomène naturel traduisant une submersion temporaire de terres émergées par l'eau. À ce titre, elle est caractérisée par un certain nombre

de facteurs concourants dont d'intenses précipitations confortées par une faiblesse d'écoulement. La **figure 77** ci-dessous présente les zones de susceptibilité d'aléa inondation fluviale définie par la combinaison de cinq (5) facteurs dans le contexte de cette étude à l'exception des intensités de précipitations. Ce sont la densité du réseau de drainage, l'accumulation des flux de débits, la pente, l'indice d'humidité topographique et l'altitude du relief.



**Figure 77** : Carte de l'aléa inondation fluviale dans le bassin aménagé du fleuve Sassandra à Soubré

Une reclassification pour l'aléa inondation a été adoptée afin de mieux appréhender l'analyse des informations : niveau faible (très faible à faible), niveau moyen et niveau fort (fort à très fort).

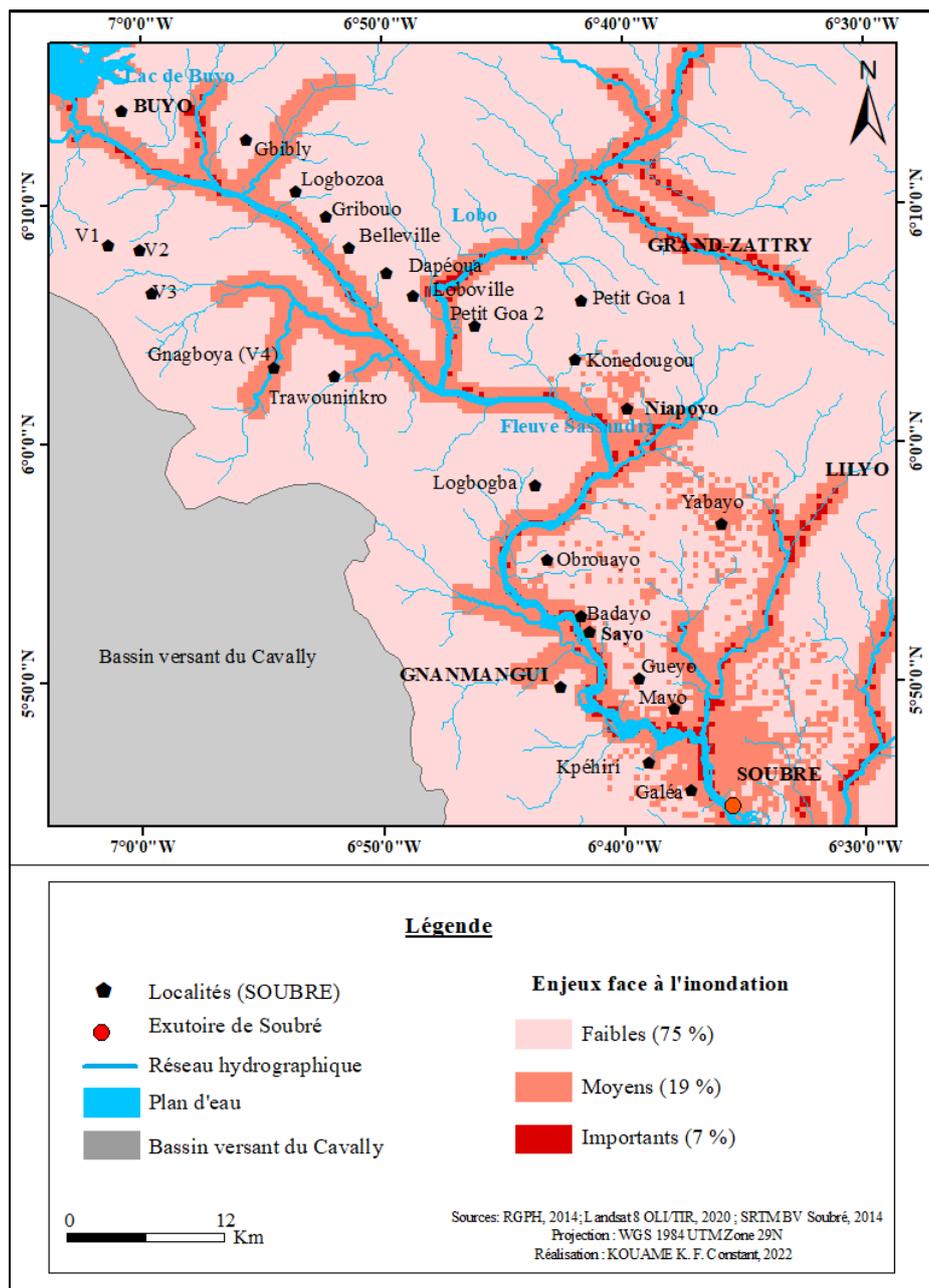
De ce fait, l'analyse de cette figure 77 montre que l'aléa inondation de niveau moyen se manifeste sur plus de la moitié du bassin, soit environ sur 65 % de l'espace du bassin aménagé. Les zones d'aléas de niveaux fort à très fort occupent 7 % du territoire du bassin aménagé. La susceptibilité de ces aléas de niveau élevé se manifeste du Nord au Sud du bassin le long des cours d'eau avec emprise des différents lits majeurs.

Quant au reste du bassin aménagé, il est occupé par l'aléa de niveau très faible à faible (28 %) situé dans quelques secteurs de la partie Nord du bassin, au Nord-est avec quelques endroits de Grand-Zattry. Pour finir, on note également que toutes les zones situées le long de la limite du bassin du Cavally représentent dans l'ensemble des zones de successibilité faible d'aléa inondation.

### **7.2.2 Enjeux dans le bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré**

Les enjeux dans le bassin aménagé sont constitués de l'homme, de ses installations et de ses biens présents dans la zone d'aléa d'inondation fluviale. En effet, tout risque implique la présence d'une société humaine face à un aléa. De ce fait, l'analyse croisée des différents facteurs d'enjeux (vulnérabilité) considérés (la densité de population, l'occupation du sol et la distance par rapport au réseau hydrographique) présente plusieurs niveaux d'exposition des enjeux.

La **figure 78** ci-dessous présente la carte des enjeux socio-économiques et humains dans le bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré. Une reclassification en enjeux faibles (très faibles à faibles), moyens et importants (importants à très importants) fait ressortir que la zone aménagée du bassin est couverte à 7 % par une exposition d'enjeux importants et à 19 % par les enjeux moyens. Quant aux zones à faibles enjeux, elles occupent 75 % de du bassin aménagé, soit les 3/4 de l'espace étudié. Cette catégorie est liée aux zones les plus éloignées du réseau hydrographique, donc très faiblement vulnérables à une inondation fluviale.

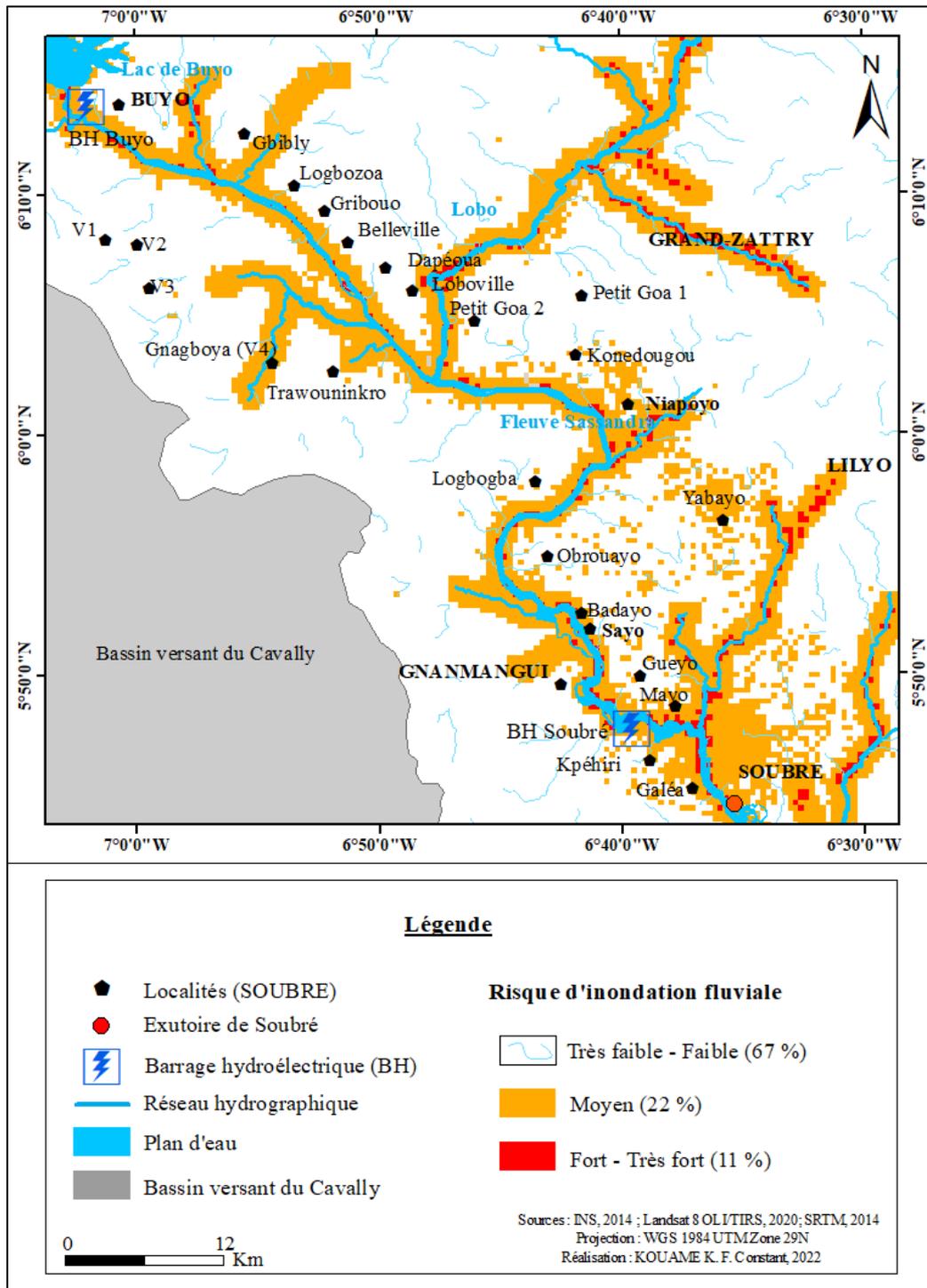


**Figure 78:** Carte des enjeux face à l'inondation fluviale dans le bassin aménagé à Soubré

En effet, les zones proches du fleuve Sassandra et certains affluents présentent presque toutes des niveaux d'enjeux élevés face à l'aléa inondation du fait de leur proximité aux zones d'influence hydrographique des cours d'eau. Il s'agit presque de toutes les zones autour de l'exutoire de Soubré, des localités de Dapéoua, Buyo, Loboville, Gnamangui, Sayo, Gueyo et Badayo. Ces endroits sont constitués de plaines où la submersion se fait très rapidement pendant les saisons des pluies et le long du cours d'eau de part et d'autre des deux rives des grands cours d'eau (Sassandra et Lobo). Ces résultats montrent l'exposition réelle des enjeux proches des cours d'eau du bassin à une éventuelle manifestation de l'aléa inondation fluviale.

### 7.2.3 Niveau de risque d'inondation fluviale dans le bassin aménagé du Sassandra à Soubré

L'évaluation du risque d'inondation fluviale s'est faite par l'approche croisée des paramètres descripteurs des enjeux (vulnérabilité) du bassin et des facteurs d'aléa. Ainsi, la **figure 79** présente la spatialisation du risque d'inondation fluviale dans le bassin aménagé.



*Figure 79 : Carte du risque d'inondation fluviale dans le bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré*

Les différentes reclassifications font ressortir trois (3) niveaux de risque à savoir les niveaux très faible à faible, moyen et fort à très fort.

Ainsi, les niveaux de risque fort à très fort représentent 11 % du bassin aménagé. Ils sont liés aux zones de pente faible allant de 0 à 4 %. Ce degré de risque épouse les zones d'importants enjeux (7 %) dans le bassin. Ils se manifestent majoritairement dans les zones de forts enjeux avec une densité du réseau hydrographique. Ce sont les secteurs de Soubré à l'exutoire du bassin (Kpéhiri, Galéa, Soubou) les secteurs de Grand-Zatry, Dapéoua, Petit Goa, Badayo, Gueyo, Gnamangui, Buyo, Loboville et environs. En plus, ces localités sont situées dans un espace d'influence immédiate (lits mineur et moyen) des différents cours d'eau.

Concernant les secteurs à risque moyen, ils occupent 22 % de la zone d'étude. Ces zones à risque d'inondation moyen sont situés au-delà de la zone d'influence première des cours d'eau, soit plus de 200 à 500 mètres d'équidistance des rives sur les lits majeurs. Le risque moyen est lié aux zones d'enjeux (vulnérabilité) moyens à l'intérieur du bassin aménagé. Ce type de risque s'étale presque partout dans le bassin aménagé où existe un cours d'eau.

Quant aux risques de niveau très faible à faible, ils occupent environ 67 % du bassin aménagé. Cela traduit que le risque d'inondation fluviale est quasi-nulle dans ces zones du bassin bien qu'il existe des petits cours d'eau isolés.

### **7.3 Discussion**

La délimitation des zones potentiellement inondables constitue un véritable outil de prévention des risques d'inondation, surtout ceux liés aux débordements des cours d'eau dans un contexte d'anthropisation accélérée d'un bassin fluvial. Selon les données EM-DAT, entre les périodes 1970 et 2019, les aléas météorologiques, climatiques et hydrologiques ont été à l'origine de 50 % de toutes les catastrophes répertoriées dans le monde (OMM, 2021, p. 16). Les inondations représentent pour l'Afrique sur cette même période 60 % des catastrophes liées au temps, au climat et à l'eau le plus fréquent (OMM, 2021, p. 22). De ce fait, de nombreux facteurs influencent la genèse des inondations.

Dans le contexte de cette étude, les facteurs d'aléas (densité de drainage, accumulation des débits du fleuve, pente, altitude du relief et indice d'humidité topographique) et d'enjeux (unités d'occupation du sol, densité de population et zone d'influence du réseau hydrographique) ont permis la cartographie et l'analyse du risque d'inondation fluviale dans le bassin d'étude. La pertinence de ces facteurs est donc en accord avec des études similaires

d'évaluation des risques d'inondation à l'échelle des bassins-versants ruraux ou urbanisés à l'exception du facteur pluviométrique non utilisé (K. D. Kouassi *et al.*, 2021, p. 32 ; S. Das, 2018, p. 5-9 ; A. Sumatra, 2018 p. 3-5 ; A. Eba *et al.*, 2021, p. 7-9 ; H. Koumassi, 2014, p. 132 ; H. N'Guessan *et al.*, 2014, p.7). Cela pose le problème de l'identification et du choix des critères à confronter qui n'est pas toujours aisé d'une étude à une autre.

C'est pourquoi, la littérature dénombre plusieurs méthodes d'études sur les risques d'inondation. En effet, le processus de hiérarchie analytique (AHP de T. L. Saaty) est une méthode très extensible, bien structurée et beaucoup employée. Elle a la capacité de déchiffrer des problèmes de décision complexes intégrant plusieurs facteurs. En plus, elle définit l'importance des différents paramètres à intégrer dans l'évaluation du risque d'inondation. Ainsi, à partir de l'outil de calcul matriciel intégré dans le logiciel de type système d'information géographique (SIG), les différents critères sont croisés. En fonction des valeurs obtenues, plusieurs cartes thématiques y compris la carte du risque d'inondation ont été élaborées. De ce fait, l'efficacité de cette méthode n'est plus à démontrer dans le contexte d'une décision multiparamètres. Toutefois, il se pose le problème de la subjectivité qui entoure le processus de pondération des critères d'analyse. Ce qui est relevé d'ailleurs par A. Eba *et al.* (2021, p. 295) dans leurs études sur la vulnérabilité à l'inondation dans la commune de Bingerville en Côte d'Ivoire.

Aussi, les différents résultats de cette étude ont-ils permis de spatialiser les zones à risque d'inondation sur la base de la classification d'intensité de risque allant de très faible à très fort. Le risque fort s'est révélé dans les secteurs à pente faible représentés par les zones de plaine autour de l'exutoire de Soubré et le long du fleuve et ses affluents. Ce risque occupe environ 11 % du bassin aménagé. Un résultat similaire a été mis en exergue par V. M. Sorokoby (2013, p. 142-143) dans le bassin-versant de la rivière Débo, un affluent de la rive gauche du fleuve Sassandra. Les zones des villages d'Ottawa, d'Oupoyo, de Grébouo et Tagbayo, avec de forte vulnérabilité à l'inondation sont également situées le long du parcours de cette rivière jusqu'à son embouchure avec le fleuve Sassandra. De même, ces résultats sont en accord avec ceux de V. H. N'guessan BI *et al.* (2014, p. 13). Leurs études réalisées dans le bassin de la rivière Houda ont permis de révéler que 17 % du territoire du bassin dont le département de Sinfra, dans le centre-ouest de la Côte d'Ivoire, présentaient un risque élevé d'inondation par débordement des eaux de ladite rivière. Dans cette logique, C. Faye *et al.* (2021, p. 7) ont montré que près de 40 % du sous-bassin Niéri-Ko dans le bassin de la Gambie sont soumis à un risque d'inondation élevé à travers la méthode dénommée « FIGUSED-S ». En fait, la méthode « FIGUSED-S »

utilisée est une variante de la méthode AHP qui obéit au même processus d'approche multicritère sur la base de l'importance de chaque facteur intervenant dans la genèse du risque d'inondation fluviale. Elle a également été utilisée par plusieurs auteurs dont O. Patrikaki et *al.* (2018, p. 2), F. Z. Echogdali et *al.* (2018, p. 9), A. Sumatra (2018, p. 2). Cette méthode « FIGUSED-S » fait référence aux initiales des différents paramètres considérés en anglais « (*F*), *rainfall intensity (I)*, *geology (G)*, *land use (U)*, *slope (S)*, and *elevation (E)* ». Elle aboutit donc à l'évaluation du risque d'inondation fluviale à travers l'indice de risque d'inondation « *FHI – Flood Hazard Index* » comme l'ont fait R. C. Wibow et *al.*, (2020, p. 2) et C. Faye et *al.*, (2021, p. 11).

Cependant tous ces auteurs ont analysé le risque d'inondation fluvial sous un angle compact ou global sans toutefois faire ressortir les facteurs des enjeux exposés et d'aléas, composantes du risque d'inondation fluviale. De ce fait, leur méthode s'oppose à la notion de risque qui résulte du croisement des données d'aléas et d'enjeux vulnérables sur un espace comme admis par les plateformes internationales de la réduction des risques de catastrophes. En effet, une analyse séparée des différents composantes notamment d'aléa et d'enjeux redéfinirait les résultats leurs études.

Par ailleurs, les résultats cette étude montre que le risque d'inondation fluviale est fortement lié à la configuration du relief et de la topographie. Cette remarque est similaire aux résultats de K. D. Kouassi et *al.* (2021, p. 4-5) et K. L. N'Cho (2022, p.200). Avec une analyse séparée des composantes de risque (aléa et enjeux), K. D. Kouassi et *al.* (2021, p. 4-5) ont montré que les inondations dans la commune d'Abobo sont liées de manière générale aux zones d'accumulation des eaux d'écoulement que sont les cuvettes et les vallées, influencées par les dérivés de la topographie comme la pente et l'altitude du bassin. Quant à K. L. N'Cho (2022, p.200), il souligne que le relief est un facteur déterminant de la définition des couloirs inondables en aval des barrages d'Ayamé dans le bassin-versant du cours d'eau transfrontalier Bia en Côte d'Ivoire.

Il ressort cette étude que l'emploi multiple de la méthode d'analyse multicritère couplée au système d'information géographique facilite l'étude des risques d'inondation à l'échelle des bassins-versants. Cependant la question du choix des facteurs d'aléas et d'enjeux à considérer exige une expertise ou une bonne connaissance du phénomène à étudier. Pour finir, la connaissance et la maîtrise des zones inondables permettent la mise en place d'outils cartographiques de prévention en vue des dispositifs d'anticipation du risque d'inondation fluviale. Ce qui permet de réduire la vulnérabilité des populations riveraines des cours d'eau

comme le fleuve Sassandra qui connaît une anthropisation du fait des nombreux aménagements liés à la ressource en eau. Par conséquent, l'approche de cette étude s'inscrit dans un contexte de prévention et d'anticipation du risque d'inondation fluviale opposée donc à l'approche catastrophe qui met en exergue les conséquences de la manifestation de l'inondation fluviale.

### **Conclusion partielle**

L'identification des zones exposées et des différents niveaux de risque associés permet de prendre des mesures proactives à l'échelle du bassin-versant afin de prévenir les risques d'inondation fluviale. Cela permet également d'identifier les biens et les personnes vulnérables à ce type événements climatiques.

La méthodologie utilisée a identifié les différents facteurs d'enjeux (vulnérabilité) et d'aléas intervenant dans la genèse des inondations fluviales. Elle implique la combinaison des facteurs considérés dans un système d'information géographique (SIG) à référence spatiale. Les facteurs d'aléas considérés sont la densité du drainage, l'accumulation des débits, la pente, l'indice d'humidité topographique et l'altitude du relief. Quant aux facteurs d'enjeux (vulnérabilité) du bassin, l'étude a préféré la densité de population, les unités d'occupation du sol et la distance des enjeux au réseaux hydrographiques. Après une reclassification des niveaux de risques, il ressort que les secteurs à risque très fort à fort occupent 11 % du bassin aménagé. Les zones à risque moyen sont dispersées sur environ 22 % du bassin aménagé contre 67 % pour les zones de niveau faible à très faible. Le niveau de risque fort est lié aux zones de pente de 0 à 4 % s'étalant aux abords immédiats des cours d'eaux et affluents du Sassandra à travers le bassin aménagé. Ces résultats montrent une exposition des zones proches des cours d'eau du bassin aménagé au risque d'inondation fluviale découlant de crues des cours d'eau. Cette situation pourrait être exacerbée par les lâchers (ou lâchures) d'eau des barrages de Buyo et Soubré dans la zone aménagée.

L'approche méthodologique employée dans cette étude a la capacité de servir de recommandation pour la gestion anticipative des inondations dans la zone d'étude qui connaît une anthropisation accélérée du fait des multiples aménagements hydroélectriques et hydroagricoles sur le cours d'eau principal : le fleuve Sassandra.

Dès lors, qu'en est-il des conséquences de leur manifestation et des stratégies mises en place contre les risques d'inondation fluviale à l'exutoire du bassin-versant aménagé de Soubré ?

## CHAPITRE 8 : CONSÉQUENCES ET MESURES STRATÉGIQUES DE GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES D'INONDATION À L'ÉCHELLE DU BASSIN-VERSANT AMÉNAGÉ DE SOUBRÉ

La lutte contre les risques d'inondation fluviale nécessite la mise en place de plans et stratégies d'actions adéquates à plusieurs échelles du territoire. Ce présent chapitre aborde plusieurs points notamment, les conséquences des inondations et les mesures de gestion durable des risques de crues et inondation. Il aborde également la prédiction des crues à travers l'application opérationnelle de l'outil de prévision hydrologique GR4J.

### 8.1. Conséquences des inondations dans le bassin aménagé du Sassandra à Soubré

En Côte d'Ivoire, les inondations ont un impact considérable sur la population et touchent environ 60 000 personnes par an, soit environ 0,3 % de la population totale du pays (CIMA et UNISDR, 2018, p. 12)

En ce qui concerne le bassin aménagé du fleuve Sassandra, les conséquences des crues et inondations concernent en premier lieu les champs ou les exploitations agricoles, viennent après les habitations et équipements socio-économiques (**photo 11 a**). Les populations paysannes rencontrées affirment souvent être surprises de la montée des eaux du fleuve ou des petits cours d'eau au retour des champs après des jours de pluies consécutives. En effet, ces enjeux sont exposés aux bords ou dans le lit majeur des cours d'eau. De plus, l'une des conséquences est la traversée de certain cours d'eau au retour des travaux champêtres suite à des crues subites (**photo 11 b**)



**Photo 11 :** *a) Des maisons inondées à Soubré dans la zone de l'exutoire en 2017 ;  
b) une crue subite de la rivière Zozolo près de Soubré en 2017*  
(Source clichés, Kouamé K., 2017)

Par ailleurs, avec la présence de deux grands barrages dans le bassin, le risque de rupture est une conséquence à prendre en compte en termes de facteur de risque d'inondation. En réalité, la rupture d'un barrage hydroélectrique engendrerait des risques majeurs pouvant entraîner la submersion subite et violente de la vallée en aval. Cela mettrait en péril les systèmes humains, environnementaux et matériels. À cet effet, les barrages intéressent la sécurité publique dès lors qu'ils sont susceptibles, en cas de rupture, de causer des répercussions graves sur les personnes et les biens.

## **8.2. Plan d'actions et stratégies de gestion des risques de crues et inondations**

### **8.2.1 Stratégies de gestion du risque d'inondation à l'échelle du bassin-versant aménagé de Soubré**

En Côte d'Ivoire, la prise de conscience progressive de la question climatique et des incidences négatives des phénomènes hydroclimatiques extrêmes a incité les gouvernements successifs à mettre en place des services de gestion des risques climatiques. Cela s'est traduit par la collecte des données, la recherche et la création de services climatologiques à travers l'exécution de nombreux projets.

Au niveau du bassin-versant aménagé de Soubré, il n'existe pas chez les populations, de stratégies particulières de gestion des risques de crues et inondations. Les dispositions mises en place pour la gestion des risques d'inondation à l'échelle du bassin s'intègrent dans le Plan d'Action Nationale de gestion et de Réduction des Risques et Catastrophes.

### **8.2.2 Plan d'action national et stratégies de gestion du risque d'inondation**

La Côte d'Ivoire n'a pas suffisamment d'expérience dans la stratégie et la planification des risques de catastrophes au vu des actions de réponses face aux différentes manifestations des phénomènes et catastrophes naturelles telles que les inondations. Cependant, le pays fait partie de plusieurs plateformes internationales d'analyse et de gestion des risques de catastrophes naturelles. Cela a abouti à l'élaboration du Plan National d'Action Environnemental couvrant la période 1996-2010. Dans cette partie, l'analyse va porter sur le cadre normatif récent lié à la gestion des risques de catastrophes telles que les inondations.

#### ***8.2.2.1 Cadres institutionnel, réglementaire et organisationnel de gestion du risque de catastrophes en Côte d'Ivoire***

Aujourd'hui, la Côte d'Ivoire dispose de cadres institutionnel, législatif et réglementaire plus récents de la gestion de risque dont souvent la mise en application se confronte à diverses

difficultés. En effet, la décision nationale de mettre en place une plateforme et développer une stratégie pour la gestion des risques de catastrophes a été motivée et portée par des initiatives régionales et internationales.

Au niveau du cadre réglementaire de gestion des risques de catastrophes comme les inondations, la Côte d'Ivoire a mis en place le Plan Orsec (Devenu Organisation de la réponse de sécurité civile). C'est le Plan d'Organisation des Secours (ORSEC - décret du 8 Août 1979 portant organisation du Plan des secours à l'échelon national en cas de catastrophe). Il s'agit d'un mécanisme de coordination des opérations de secours existant au niveau national, départemental et communal en vue de gérer les urgences liées aux catastrophes susceptibles de survenir. Ce plan constitue le cadre légal national de gestion des situations d'urgence et permet de mobiliser des ressources exceptionnelles pour faire face à une catastrophe. Au décret de 1979, ont été ajoutés un ensemble de documents normatifs constituant le document appelé « Plan ORSEC ».

Sur le plan régional, l'activation du plan Orsec est de l'initiative du Préfet. Au niveau communal, c'est le maire qui intervient. Dans le cas échéant, lorsqu'un sinistre se produit sur le territoire d'une ville ou d'une commune, le maire est chargé de la police municipale, de la prévention par des précautions convenables, et de la réparation par la distribution des secours nécessaires (article 72 nouveau de la loi n°80-1180 du 17 Octobre 1980, relative à l'organisation municipale, modifiée par la loi n°85-578 du 29 Juillet 1985). Il doit prendre d'urgence toutes les mesures de sécurité, d'assistance et de secours. Si le sinistre dépasse les capacités du maire, il fera appel à l'administration supérieure.

En outre, l'Office National de la Protection Civile (ONPC) est la structure chargée de la réponse face aux catastrophes dont les inondations. En 2008, le décret n° 2008 R 60 du 28 février 2008 transforme l'ONPC en une Direction Générale et lui confère plusieurs missions.

Pour ce qui est des plateformes nationales, il y a entre autres celle du Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe (2015-2030). Les actions prioritaires issues de ce cadre récent ont permis à la Côte d'Ivoire d'élaborer un plan stratégique national pour le renforcement des capacités mais aussi pour la réduction des risques de catastrophes naturelles. De ce plan est née la Stratégie Nationale de Réduction des Risques de Catastrophes Naturelles (SN-RCC 2020-2030). C'est une démarche organisée autour de quatre (4) actions prioritaires et développée avec l'aide du Capacity for Disaster Reduction Initiative (CADRI) en 2016.

### 8.2.2.2 *Plan d'action national de réduction des risques de catastrophes (RRC)*

Ce plan d'action de la réduction des risques de catastrophes est intégré dans le Programme National de Développement (PND) à travers les plans sectoriels et locaux de développement.

À travers la mise en œuvre des actions prioritaires prévues par le Plan d'Action National ou Stratégie Nationale 2020-2030, la Côte d'Ivoire veut parvenir à une réduction substantielle des pertes et des risques liés aux catastrophes en termes de vies humaines, d'atteintes aux moyens de subsistance, à la santé des personnes, d'atteintes aux biens économiques, physiques, sociaux, culturels et environnementaux des personnes, des entreprises et des collectivités (PAN-RCC, 2016). Ces actions prioritaires se déclinent comme suit :

- Priorité 1 : Comprendre des risques de catastrophes naturelles (ex : inondation).
- Priorité 2 : Renforcer la gouvernance et les institutions pour la gestion des risques de catastrophes.
- Priorité 3 : Investir dans la résilience économique, sociale, culturelle et environnementale.
- Priorité 4 : Améliorer la préparation pour une réponse efficace, assurer le relèvement et la catastrophe.

De façon spécifique, *la priorité 1* a pour objectif de mettre en place des politiques et un cadre institutionnel, législatif et réglementaire claires. Ces cadres sont basés sur une bonne maîtrise et une connaissance des risques de catastrophes naturelles dans toutes leurs dimensions, notamment les aléas et l'environnement, l'exposition des enjeux ainsi que la vulnérabilité des populations.

Concernant *l'action prioritaire 2*, elle a pour objectif de doter la Côte d'Ivoire d'un système de gouvernance de la gestion des risques de catastrophe pour la prévention, la préparation, la réponse et le relèvement. Cette action est basée sur la collaboration et le partenariat entre les institutions afin de faciliter la mise en œuvre effective des mesures pertinentes aux risques de catastrophes. Cela prend en compte également les risques associés à la variabilité et au changements météorologiques.

En ce qui a trait à *la priorité 3*, elle vise à motiver l'investissement public et privé dans la prévention des catastrophes et de la réduction des risques météorologiques en Côte d'Ivoire. Elle se fait à travers une approche intégrée des mesures structurelles et non structurelles de développement au niveau de tous les secteurs prioritaires entre autres l'aménagement du

territoire, le secteur agricole, la santé, l'éducation et l'enseignement. Cela permettra de renforcer la résilience économique, sociale, culturelle des personnes, des communautés et de leurs actifs.

Au niveau de *la 4ème et dernière action prioritaire*, la Côte d'Ivoire a mis en place des capacités renforcées à tous les niveaux partant de la préparation à la réponse aux urgences en intégrant toujours la réduction des risques de catastrophes dans les mesures de développement. Il s'agit de mettre en place des mécanismes d'alerte précoce centralisés à travers un système intégré développé de gestion de l'information, des capacités pour le relèvement et la reconstruction post-catastrophe.

En somme, la Côte d'Ivoire dispose d'une volonté manifeste de lutte contre les risques de catastrophes naturelles telles que les inondations, toutefois plusieurs facteurs limitent l'applicabilité de ces dispositions de façon pratique et réelle sur le terrain.

### **8.3. Mesures et outils prévisionnels des crues et risques d'inondation dans le bassin aménagé de Soubré**

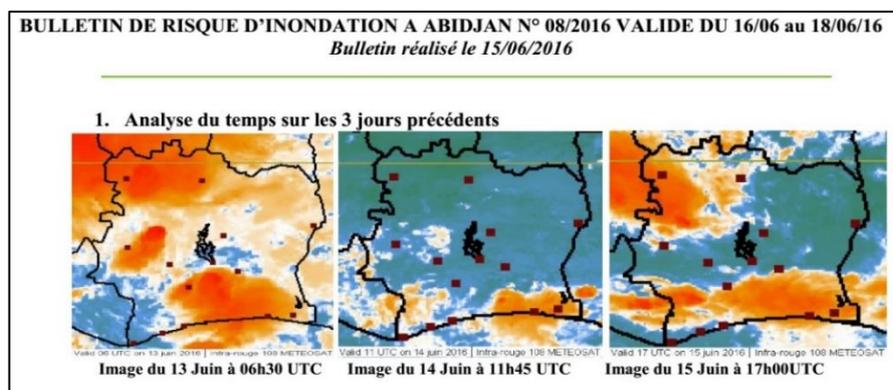
De nombreuses mesures de gestion et de prévision des risques de crues et inondations ont été développées à travers le monde. Selon G. Scarwell et R. Laganier (2017, p. 117) la gestion du risque d'inondation est le fruit d'une longue évolution portant sur la conception même du risque. Elle a longtemps reposée sur des actions de proximité des villageois et sur des réalisations d'ouvrages techniques dont des systèmes de surveillance des débits de crues et d'alerte des populations.

#### **8.3.1. Surveillance et alerte**

Les systèmes de surveillance et d'alerte précoce sont un moyen de réduction des risques naturels. Ils permettent la cueillette d'informations sur une circonstance ou un aléa potentiellement dangereux, et favorisent une préparation anticipée pour réduire le risque (D. Didier et *al.*, 2017, p. 116).

En Côte d'Ivoire de façon générale et plus précisément dans le bassin aménagé du fleuve Sassandra à Soubré, il n'y a pas de système d'Alerte Précoce clairement identifié. De plus, il n'existe pas à ce jour de seuils d'alerte établis, ni de procédures d'alertes écrites. Le système actuel s'appuie sur les capacités de la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM).

La SODEXAM est le service météorologique qui en dépit de ses moyens modestes, est chargé de l'alerte précoce des administrations et de la population en matière de risques liés aux événements météorologiques. Elle émet des avertissements ou alertes concernant tout le pays pendant les périodes de pluie. Ce sont des alertes de vigilance ou des bulletins de prévision. Les avertissements sont réalisés et transmis souvent à la population en se basant sur les valeurs prévues pour certains paramètres. Ces prévisions peuvent porter plusieurs paramètres comme la température, le vent, l'état du ciel et d'autres phénomènes. Avec l'avènement des multiples technologies de l'information et de communication, la SODEXAM s'appuie fortement sur les différents canaux tels que les réseaux sociaux pour véhiculer les alertes sous forme de textes et d'images. Ces informations d'alerte ont une validité allant de moins de 24 heures à 5 jours selon les situations météorologiques. L'autre aspect de ces informations d'alertes, c'est qu'elles sont beaucoup accentuées sur la zone d'Abidjan et le littoral environnant (**figure 80**).



**Figure 80 :** Bulletin et image satellite d'alerte météo sur les inondations (SODEXAM, 2016)

Malgré cela, à l'exutoire du bassin-versant du fleuve Sassandra à Soubré, il existe deux (2) limnimètres de crues qui permettent la mesure des débits du cours d'eau, un élément d'alerte en cas de montée des eaux du fleuve (**photo 12**). L'un des limnimètres (**photo 12 a**) date de 1958 et serait non fonctionnel.



**Photo 12 :** Limnimètres à l'exutoire du bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré datant de 1958 (**a**) et 2018 (**b**) (Source cliché : Kouamé K., 2021)

### **8.3.2. Gestion des situations de catastrophes d'inondations : plans d'Urgence au niveau départemental**

À l'instar de toutes les régions de Côte d'Ivoire, la zone du bassin-versant aménagé du Sassandra à Soubré est soumise aux mêmes mesures de gestion des catastrophes ou sinistres à l'échelle des départements. Ces mesures se définissent en plans d'Urgences à travers le décret n° 98-505 du 06 septembre 1998 portant définition des Plans de Secours en cas d'accident, de sinistre ou de catastrophe en Côte d'Ivoire. Ils visent la préparation des mesures de sauvegarde et la mise en œuvre des moyens de secours nécessaires en vue de faire face aux catastrophes. Il faut rappeler que les plans d'urgence émanent du plan ORSEC national. Dans le cadre du bassin d'étude à cheval des départements de Buyo et Soubré, l'ensemble des opérations de secours est placé sous la direction d'un Préfet de Région qui en assure toute la coordination.

En effet, lorsque les Plans d'Urgence sont liés aux risques de catastrophes dues à l'existence ou au fonctionnement d'installations ou d'ouvrages déterminés tels que les barrages hydroélectriques, les Plans Particuliers d'Intervention (PPI) sont mis en œuvre. Lorsque ces plans sont destinés à portés assistance et secours à un grand nombre de victimes, ils sont dénommés « PLANS ROUGES ».

La gestion des catastrophes d'inondation implique de multiples acteurs (État, collectivités locales, experts scientifiques, populations) et met en jeu des intérêts parfois contradictoires (développement économique immédiat, protection à long terme des populations). C'est dans ce contexte que l'État de Côte d'Ivoire a mis en place dans la région de Soubré un Centre de Secours d'Urgences (CSU) avec agents de protection civile appelés pompiers civils. Dépendant de l'Office National de la Protection Civile (ONPC), le pompier civil a pour mission le sauvetage des personnes et des biens, notamment en situation de catastrophes comme les inondations (décret n°2014-394 du 25 juin 2014 portant création de l'emploi de pompier civil.) Ainsi de nombreuses situations de sauvetage et d'interventions ont été réalisées par ces agents depuis leur installation en 2016 dans la région de Soubré. À titre d'illustration, les pompiers civils sont intervenus dans le barrage hydroélectrique de Soubré pour la maîtrise d'un incendie au niveau de la turbine n° 2 en 2021 (**photo 13**).



*Photo 13 : Pompiers civils après la maitrise d'un incendie de turbine au barrage hydroélectrique de Soubré (ONPC, 2021)*

En outre, ils ont extrait un corps sans vie d'un pêcheur au niveau du fleuve Sassandra (photo 14) (ONPC, 2021).



*Photo 14 : Pompiers civils extrayant un corps à l'exutoire du fleuve Sassandra à Soubré (ONPC, 2021)*

Avec les évolutions hydrométéorologiques actuelles, facteurs de manifestation des risques hydrocatastrophes, la prévision des crues et la prévention du risque d'inondation fluviale sont essentielles dans le contexte du bassin-versant aménagé de Soubré. Cette prévisibilité peut se faire à travers une modélisation hydrologique des crues à l'exutoire du bassin aménagé.

#### **8.4. Modélisation hydrologique pour la prévision des crues dans le bassin aménagé à l'exutoire de Soubré**

##### **8.4.1. Vérification de la consistance des données de modélisation avant reconstitution**

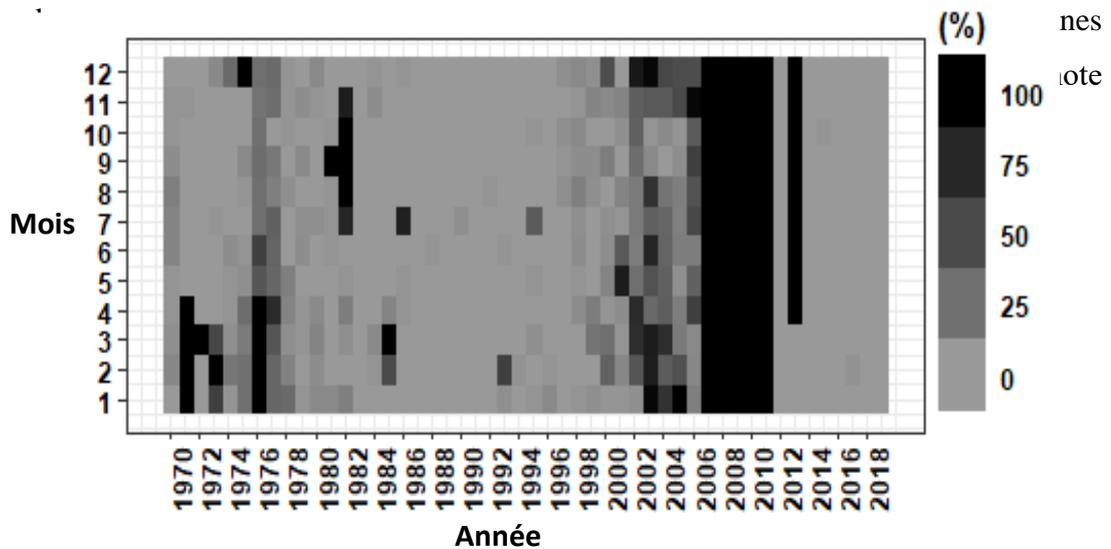
Le **tableau 49** ci-dessous donne quelques détails sur la consistance des données utilisées.

**Tableau 49 : Données utilisées pour la modélisation**

Variables	Pas de temps	Période	Observation
Débit	Jour	1980-2019	Présence de lacune
Précipitation	Jour	1977-2016	Pas de lacune
Températures (max, min)	Jour	1977-2016	Pas de lacune

Sources : données DHH, 2020 ; données CHIRPS, 2021 et JRA-55

Il ressort de l'examen des données, une bonne couverture temporelle des différentes variables. Cependant les données de débits sont caractérisées par la présence de lacunes, c'est-à-dire c'est observé fondam



**Figure 81 : Mise en évidence des lacunes sur les séries chronologiques des débits**

#### 8.4.2. Cohérence entre les données de débits observés et les précipitations enregistrées à la station de Soubré

La **figure 82** suivante met en évidence la cohérence des données hydrologiques ainsi que la relation entre les débits et les précipitations. L'examen graphique révèle que le régime hydrologique du cours d'eau est très variable suivant les années. Qui plus est, les débits mensuels sont presque invariables pour certaines années, notamment les années 1991, 1997 et 2022. Pour ces trois années, aucun pic ne se manifeste malgré les variations pluviométriques.

En ce qui concerne la relation entre les débits et les précipitations, on constate que cette relation est totalement instable. En effet, d'une année à une autre, la relation entre les débits et les précipitations varient de façon significative.

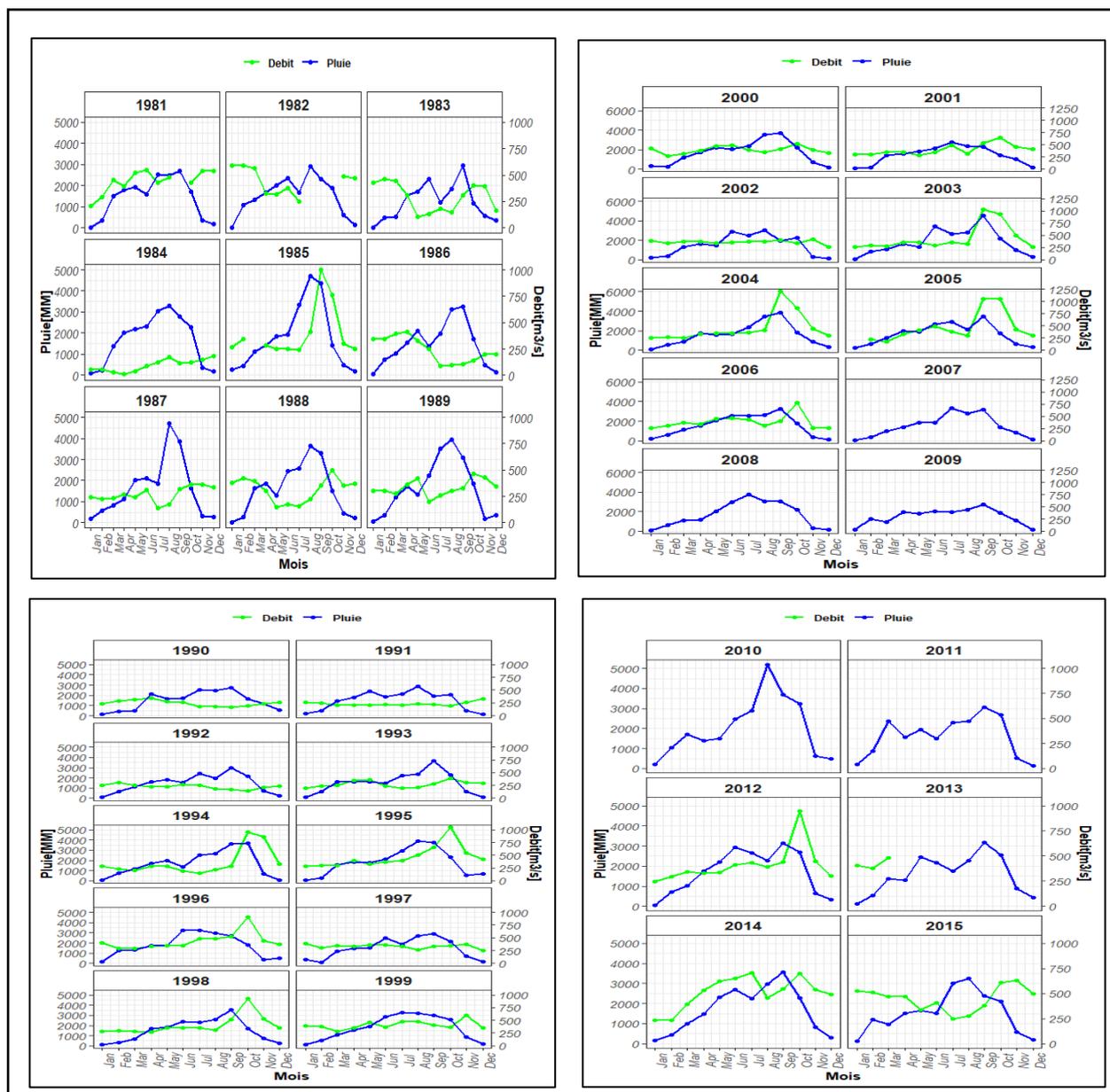
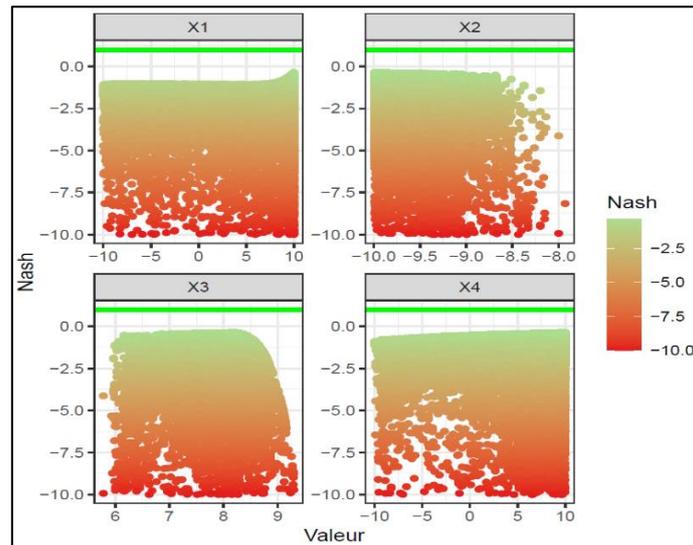


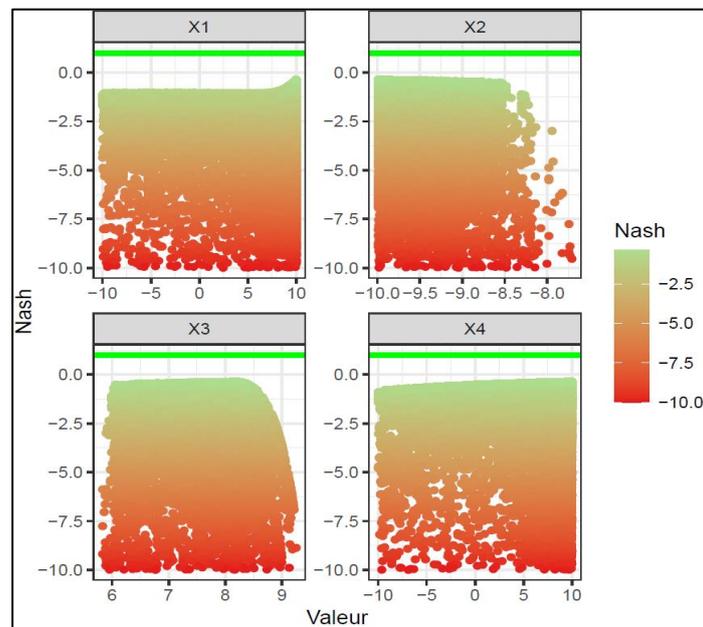
Figure 82 : Vérification de la cohérence des données de débits par décennie sur la période 1981-2019

### 8.4.3. Variabilité des débits observés et simulés à Soubré avant reconstitution

Les figures 83 et 84 illustrent l'évolution du critère de Nash en fonction des valeurs prises par les paramètres du modèle. De l'observation de ces différentes figures, il ressort que l'évolution du Nash en fonction des paramètres est indépendante de la période de calibration. L'évolution du Nash sur les deux périodes de calibration (1980-1999 ; 1990-2009) est presque identique. L'analyse de ces figures a permis de réajuster les plages de variation des différents paramètres de sorte à optimiser les performances de l'algorithme de calibration dans le logiciel R utilisé pour la modélisation.

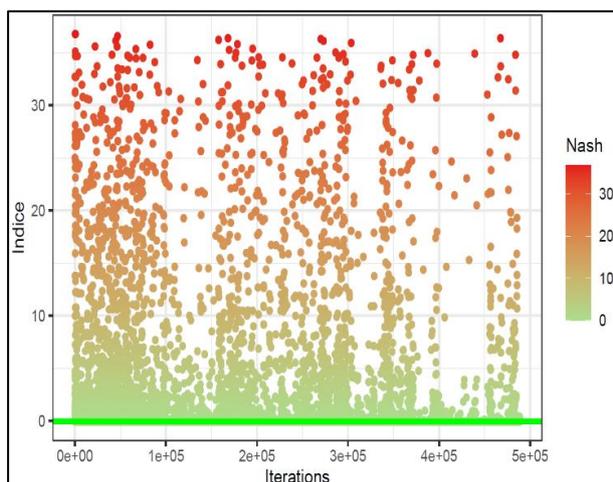


**Figure 83 :** Évolution du critère de Nash en fonction des paramètres du modèle (1980-1999)

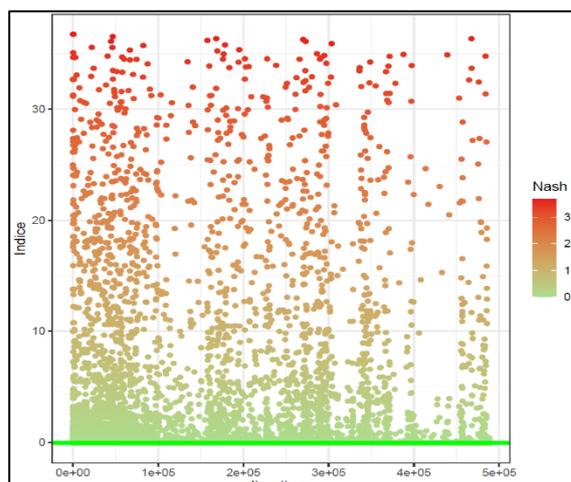


**Figure 84 :** Évolution du critère de Nash en fonction des paramètres du modèle (1990-2009)

Quant aux **figures 85 et 86**, elles décrivent la variation du Nash au cours des différentes itérations. Ce sont 215 484 et 488 665 itérations effectuées respectivement pour le premier et le deuxième processus. L'analyse graphique de ces différentes figures révèle que la variation du critère de Nash devient de plus en plus faible lorsque le nombre d'itérations augmente. Cela indique que le modèle a convergé vers sa performance limite



**Figure 85** : Variation du critère de Nash au cours des différentes itérations (1980-1999)



**Figure 86** : Variation du critère de Nash au cours des différentes itérations (1990-2009)

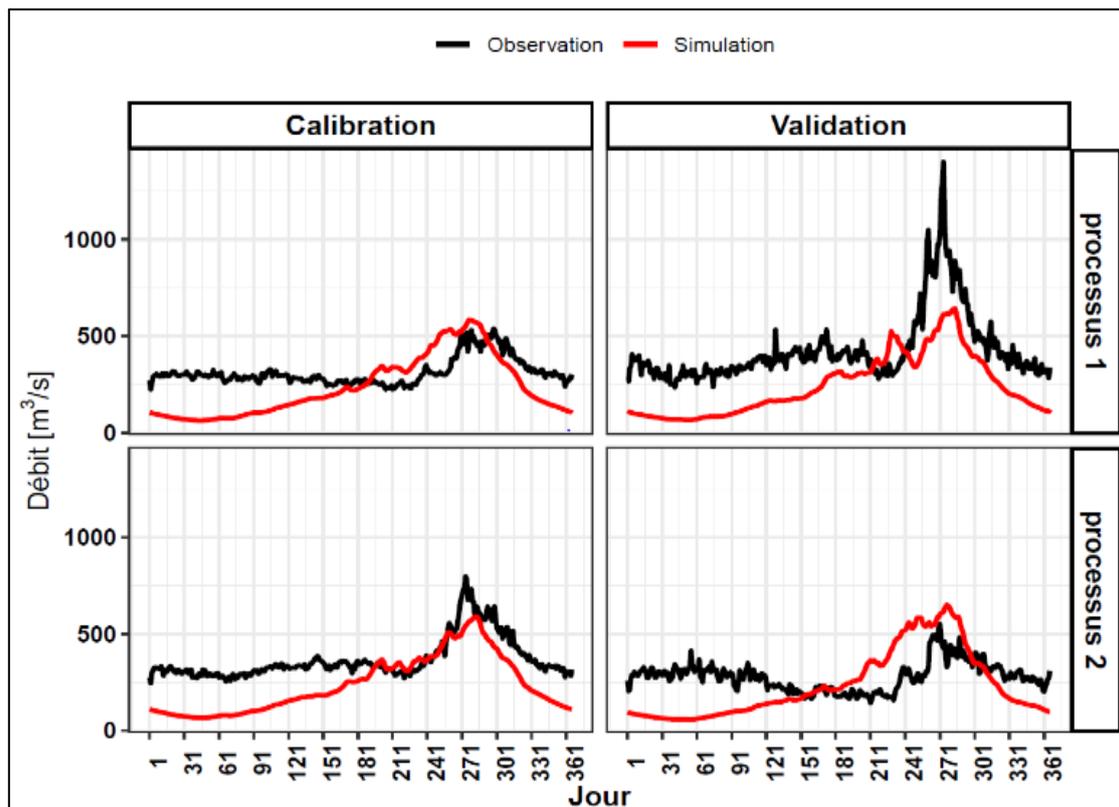
Les performances obtenues lors de la calibration et de la validation pour chaque processus sont présentées dans le **tableau 50**. Il ressort de ce tableau que les performances du modèle sont insatisfaisantes à tous les niveaux et un risque de "overfitting"(surajustement) est observé lorsque le nombre d'itérations est important

**Tableau 50** : Meilleurs résultats des différentes itérations

Processus 1			Processus 2		
Critères de qualité	Calibration (1983-1999)	Validation (1990-2009)	Critères de qualité	Calibration (1990-2009)	Validation (1983-1989)
Nash	-0.37	-0.14	Nash	-0.13	-0.67
R <sup>2</sup>	0.13	0.35	R <sup>2</sup>	0.28	0.06
P-biais	-24.20	-40.30	P-biais	-34.70	-13.50

Source : traitements de données, 2021

Par exemple, concernant le processus 2, où le nombre d'itérations est plus important les performances enregistrées du modèle sont meilleures à la calibration qu'à la validation. La **figure 87** est une illustration graphique de la performance du modèle à la calibration et la validation pour chaque processus. L'analyse graphique confirme la mauvaise représentation des débits par le modèle.



*Figure 87 : Comparaison des hydrogrammes moyens journaliers*

L'analyse exploratoire a révélé des lacunes assez importantes dans les données hydrologiques « naturelles » à la station de Soubré. Les résultats de la simulation hydrologique sont insatisfaisants à tous les niveaux avec des critères de Nash négatifs pour les différentes sous-séries des processus simulés. Par conséquent, pour parvenir à des résultats plus satisfaisants, la reconstitution des débits lacunaires est apparue nécessaire avec les données de la station hydrométrique de Piebly établie dans les mêmes conditions climatiques et sur le même cours d'eau.

#### **8.4.4. Variabilité des débits observés et simulés à l'exutoire de Soubré après reconstitution**

La **figure 88** montre l'évolution du critère de Nash et les résultats obtenus après la reconstitution des données de débits à la station de Soubré en calibration (**figure 89**) et en validation (**figure 90**).

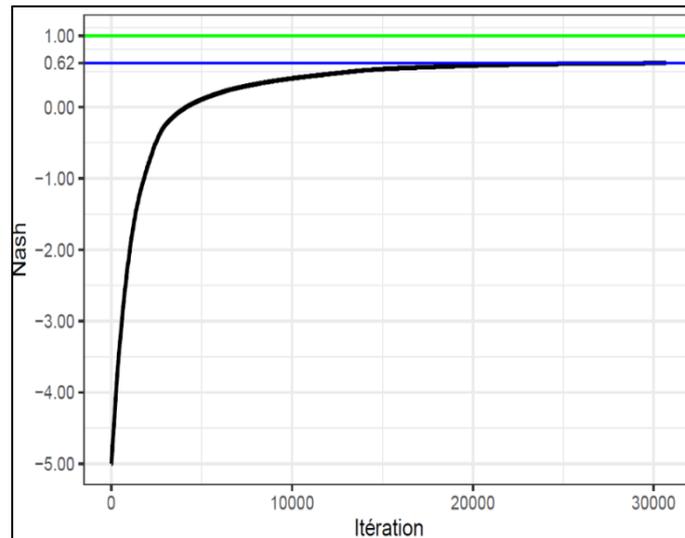


Figure 88 : Évolution du critère de Nash (calibration)

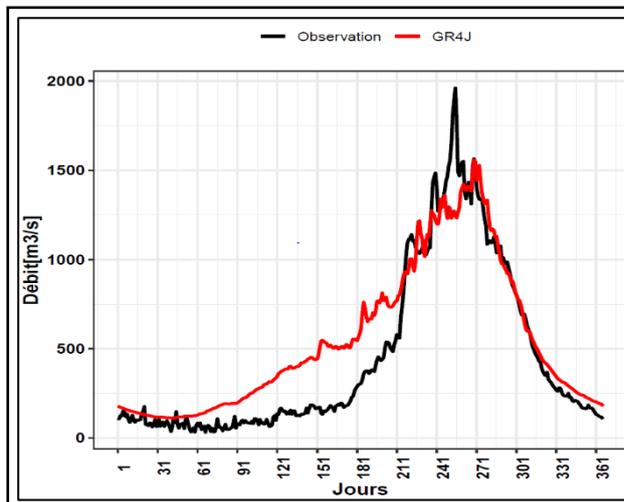


Figure 89 : Comparaison des hydrogrammes simulés et observés (calibration)

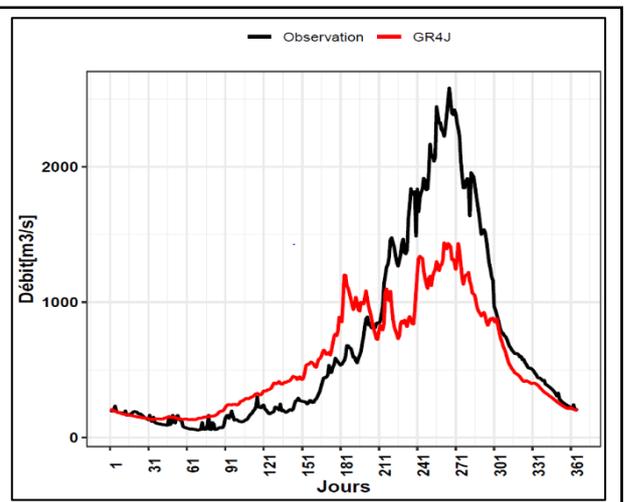


Figure 90 : Comparaison des hydrogrammes simulés et observés (validation)

La corrélation entre les débits observés et simulés est suffisamment stable et forte avec des paramètres optimaux acceptables (**tableau 51**). Autrement dit, les fluctuations pluviométriques sont ressenties au niveau des débits.

Tableau 51 : Paramètres optimaux de la modélisation

Paramètre	X1	X2	X3	X4
Valeurs	9.551839	-9.98073	9.031441	-8.967319

Source : traitements de données, 2021

Les résultats de la simulation hydrologique ont donné après itérations, des valeurs de Nash de 0,62 et 0,55 respectivement en calibration (1983-1995) et validation (1996-2001). Le coefficient  $R^2$  est de 0,62 avec un pourcentage de biais négatif (P-biais) de -16,4 % en validation (tableau 52).

*Tableau 52 : Critères de performances obtenus*

	<b>Critères</b>	<b>Nash (%)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>P-biais (%)</b>
<b>Période et valeurs</b>	Calibration (1983-1995)	0,62	0,64	22,8
	Validation (1996-2001).	0,55	0,61	-16,4

*Source : traitements de données, 2021*

De ces différents résultats susmentionnés, il apparaît que la qualité des intrants (débits) disponibles après reconstitution permet de simuler avec une précision assez bonne la réponse hydrologique du bassin avec le modèle conceptuel GR4J.

Cependant, les résultats pourraient être très satisfaisants si les données ou les intrants étaient moins lacunaires. Cette situation pourrait s'expliquer à travers soit la présence des barrages de Soubré et Buyo, soit des lacunes dues à l'absence de relevés de débits qui influencent la qualité des données finales.

## **8.5. Recommandations**

Au regard de tout ce qui précède, et face au risque d'inondation (fluviale et pluviale) qui accroît la vulnérabilité des enjeux et populations exposés chaque saison des pluies, la mise en place d'un certain nombre de recommandations (non-exhaustive) s'avère nécessaire :

- ❖ Créer une structure étatique (office ou agence) avec des attributions et missions spécifiques orientées à la gestion intégrée de toute la problématique liée à la réduction des risques et catastrophes en Côte d'Ivoire, spécifiquement les inondations. Cette structure pourrait collaborer avec des structures existantes telles que l'ONPC (Office Nationale de la Protection Civile) et la SODEXAM afin de mutualiser leurs efforts à chaque situation de crise. Elle aura également en charge l'application réelle des différents cadres institutionnels et politiques existants et toutes les actions et stratégies de gestion intégrée du cycle des risques d'inondation.

- ❖ Appliquer les résultats des études scientifiques déjà menées sur la cartographie des risques d'inondation à l'échelle des bassins-versants ruraux et urbanisés, des grandes agglomérations et localités en développement. Il s'agit de façon spécifique de mettre en application les résultats des travaux de recherche après un inventaire et une catégorisation de ceux-ci selon les zones de développement en accord avec les exploitants des bassins-versants et gestionnaires des barrages hydroélectriques (CI-ENERGIES et CIE)
- ❖ Faire de la cartographie des zones inondables en Côte d'Ivoire, un instrument visant à améliorer la connaissance du risque d'inondation et réduire la vulnérabilité territoires sous toutes leurs formes. Il s'agit d'encourager toutes les collectivités locales à disposer d'un outil cartographique sur les zones à risque d'inondation (pluviale et fluviale).
- ❖ Impliquer plus directement les communautés locales dans le cycle de gestion du risque d'inondation. Cela consistera à la formation de comités locaux dans les zones à fort risque d'inondation à l'échelle des villages ou communes.
- ❖ Mettre en place une législation sur le processus obligatoire d'évaluation des risques naturels notamment les inondations. Cela constitue un préalable à toute stratégie efficace d'anticipation, de ciblage et de dimensionnement des infrastructures d'assainissement de drainage des eaux pluviales (surtout en zone urbaine). Il en est ainsi des études d'impact environnemental et social exigées à tout projet de développement, lorsque celui-ci, en raison de sa nature, de ses dimensions, du site d'accueil, pourrait porter atteinte ou constituer un risque avec des répercussions sur l'environnement, les personnes et leurs biens.
- ❖ Vulgariser les Systèmes d'Alerte Précoce (SAP) sur la base des standards de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et les adapter à la réalité hydroclimatique du pays, mais surtout sur la base des savoirs endogènes des populations riveraines des cours d'eau. Cela passe par des actions chronologiques basées sur : (i) la connaissance du risque d'inondation ; (ii) la surveillance et la prévision ; (iii) la diffusion et la communication efficace des alertes ; et enfin (iv) la préparation et la réponse.

Concernant par exemple la surveillance et la prévision, de nombreux outils de prévision hydrologique existent. Leur efficacité et leur performance permettent de reproduire les débits extrêmes de crues dans un bassin. Ils peuvent donc servir comme outil d'aide à la décision pour l'actualisation des normes hydrologiques à l'échelle de nos bassins-versants.

## 8.6. Discussion

La maîtrise et la connaissance des risques de crues et inondations constituent un facteur de lutte et d'intégration de ces phénomènes dans les politiques de développement. Cependant force est de constater que dans le bassin aménagé du fleuve Sassandra à Soubré, les populations rurales les plus exposées ont de faibles connaissances de la manifestation de ces phénomènes. Dans ce contexte les stratégies et plans de réduction des risques d'inondation initiés par les autorités au niveau national peinent à trouver une applicabilité réelle à toutes les échelles administratives.

En ce qui concerne la prévision des crues à l'exutoire du bassin-versant aménagé de Soubré, l'analyse a été réalisée à partir des données de précipitations et de débits journaliers. Les données de précipitations journalières sont issues de la plate-forme satellitaire du JRA-55. Les lacunes observées sur les débits ont favorisé un comblement des chroniques à partir de la méthode de double cumul. Il ressort que la qualité des débits disponibles après reconstitution permet de simuler avec une assez bonne précision la réponse hydrologique du bassin à partir du modèle conceptuel GR4J.

Cependant, les résultats pourraient être très satisfaisants si les données ou les intrants étaient moins lacunaires. Cette situation pourrait s'expliquer à travers la présence des barrages de Soubré et Buyo ou des erreurs dans les relevés des données. Pour les barrages de Buyo par exemple, les différentes opérations de manipulation et vidanges d'eau rendent invariable le débit du fleuve Sassandra presque toute l'année à l'aval du barrage à l'exutoire de Soubré. En effet, ce constat est fait par M. G. Adja et *al.* (2020, p. 207) citant Brou et *al.* (1997) qui ont signifié que certaines perturbations anthropiques sont à l'origine de la modification du régime hydrologique des bassins-versants soumis déjà aux effets de la variabilité climatique. Ainsi, cette situation complexifie davantage les simulations hydrologiques, donc la prévision des risques de crues et inondations fluviales. Des résultats approchants ont été aussi obtenus par S. Sossou et *al.* (2011, p. 4) dans le sous-bassin du Bafing où des critères de Nash inférieurs à 70 % ont été obtenus avec des débits naturels en amont du barrage de Manantali. Dans ce même élan, M. G. Adja et *al.* (2020, p. 207) ont aussi obtenu un critère de Nash compris entre 68,10

% et 78,60 % en validation et 69 % à 52,10 % en calibration par la méthode de validation-croisée avec le modèle GR4J. Nos résultats sont également en accord avec ceux de M. R. Fossou et *al.* (2020, p. 84). Ils ont obtenu des résultats similaires dans le bassin du N'Zi avec un critère de Nash qui varie de 40,80 à 67,40 % pour les débits élevés. Ces simulations ont été faites à travers des sous-séries chronologiques comme procédé dans cette étude. Pour ces différentes études, les critères de performance obtenus sont supérieurs à 60 % à tous les niveaux.

En somme, il revient d'indiquer que le modèle GR4J peut convenir à reproduire les débits de crues dans un contexte de disponibilité totale des données d'entrée. Sa facilité de mise en œuvre fait du modèle GR4J, un modèle régional applicable à l'échelle d'un bassin-versant pour la simulation des débits (S. Mouheli, 2003, p. 266). Cependant, la qualité des intrants (débits, pluies) constituera un élément de réussite fondamentale de ce processus. Plusieurs facteurs anthropiques notamment la dynamique des hydro-aménagements à l'intérieur des bassins-versants influent énormément sur le comportement et l'évolution des débits comme c'est le cas au niveau du bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré. C'est pourquoi l'exploration d'un autre modèle tel que le modèle HEC-RAS est envisagé pour des études futures à l'échelle de ce bassin aménagé.

### **Conclusion partielle**

Ce présent chapitre a appréhendé les conséquences des risques saisonniers de crues et inondations et les mesures de gestion de ces risques extrêmes. Ensuite, la possibilité de la reproduction des crues à risque d'inondation à travers l'application du modèle hydrologique GR4J a été abordée.

Il ressort que les risques de crue sont manifestes mais avec une certaine méconnaissance des gravités de la part des populations riveraines du fleuve Sassandra. Les acteurs sociaux non spécialistes ne disposent que d'une connaissance partielle des risques d'inondations fluviales, qui ne leur permet pas d'en comprendre toute la problématique.

Concernant la tentative de modélisation hydrologique, le modèle hydrologique pluie-débit GR4J (Génie Rural à 4 paramètres au pas de temps journalier) a été réalisé à travers la technique de validation croisée. Les données lacunaires observées ont été reconstituées par la méthode de double cumul. Les données de la station de Piebly en amont du barrage de Buyo ont été utilisées afin de procéder à une modélisation efficace avec le modèle choisi.

Les résultats de la simulation hydrologique ont donné après itérations, des valeurs de Nash de 0,62 et 0,55 respectivement en calibration (1983-1995) et validation (1996-2001). Le coefficient  $R^2$  est de 0,61 avec un pourcentage de biais négatif (P-biais) de -16,4 % en validation. En calibration, le coefficient  $R^2$  donne une valeur de 0,64 avec un pourcentage de biais (P-biais) de 22,8 %. Cela traduit donc des critères de performance moyennement satisfaisante du modèle GR4J dans l'ensemble avec des performances meilleures à la calibration qu'à la validation. Ces analyses ont par ailleurs révélé l'influence des barrages et aménagements sur le régime des débits du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré. Cette situation met en exergue la question de la qualité et la fiabilité des données historiques souvent très difficiles à obtenir. Elles ne sont pas disponibles là où on en a besoin et n'ont pas toujours la qualité souhaitée lorsqu'elles le sont. Dès lors, l'utilisation des données altimétriques (LEGOS) obtenues par satellites sont recommandées afin d'obtenir des résultats plus affinés.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail de recherche est une contribution d'approche à la problématique des risques et catastrophes naturelles en Côte d'Ivoire, en particulier les crues et inondations dans les bassins fluviaux à fort degré d'anthropisation. De façon précise, cette aventure doctorale s'est donnée pour objectif de caractériser les crues afin de proposer des outils de gestion durable du risque d'inondation fluviale dans le bassin-versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré. Parvenir à cet objectif obéit à une méthodologie qui a permis d'obtenir plusieurs résultats, qu'il est utile de rappeler à cette étape du manuscrit.

En effet, le bassin-versant du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré comme tous les autres bassins-versants des cours d'eau en Afrique subsaharienne est fortement sollicité pour les potentialités diverses qu'il offre en matière de développement. Ce bassin, qui est l'un des plus grand de la Côte d'Ivoire occupe dans l'ensemble près de 62 000 km<sup>2</sup> d'espace. Les différents espaces de plaines et la topographie offre la possibilité aux développements d'infrastructures hydroagricoles, de pêches mais surtout hydroélectriques énormes. Cette situation a par conséquent favorisé des implantations humaines le long du cours d'eau principal, le Sassandra. Ainsi, la zone aménagée fait référence à la partie du bassin située entre les deux (2) grands barrages hydroélectriques de Buyo et Soubré à l'exutoire. Les nombreuses activités impactent de façon particulière les caractéristiques physiques du cours d'eau, mais surtout le fonctionnement du fleuve Sassandra. Tous ces éléments constituent des facteurs de prédisposition au risque d'inondation fluviale.

Plusieurs données ont constitué les intrants de cette étude. Il s'agit entre autres des données climatologiques couvrant la période 1989-2019 (pluie) et 1980-2019 (débits), des données géospatiales, des données d'enquêtes et diverses données textuelles et documentaires pour ne citer que ceux-ci. De façon particulière, l'analyse des données pluviométriques et hydrométriques a permis d'apprécier la tendance générale de ces paramètres climatiques et leur implication dans la genèse des crues et inondations fluviales dans le bassin aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré.

Les tests réalisés sur les séries chronologiques ont présenté une année de rupture à la station de Soubré en 2005 contre une absence de rupture au niveau de Buyo. Ces résultats sont la conséquence d'une baisse générale des précipitations dans cette zone avec la phase post-rupture pluviométrique observée autour de 1968-1970. De plus, un découpage de la période de référence (1989-2019) en trois (3) sous-périodes décennales a permis d'observer une reprise

des précipitations au niveau de la dernière décennie 2010-2019. Cette dernière sous-période présente les caractéristiques pluviométriques de la grande période humide qui a précédé la phase de rupture pluviométrique des années 1970. Dans ce contexte, le cumul interannuel moyen des précipitations obtenu est de 1455 mm avec un indice pluviométrique moyen de 1,04 supérieur à la moyenne pour la période humide. Cela traduit une tendance linéaire à la hausse pour le régime pluviométrique à l'intérieur du bassin aménagé. En outre, les mois de juin et octobre marquent les mois les plus pluvieux de la zone avec une moyenne oscillant autour de 190 mm soit 65 mm de plus que la moyenne générale de la période de référence qui est de 125 mm. Le mois de septembre entame les fortes précipitations avant celui d'octobre. D'abondantes précipitations sont donc observées pendant ces mois qui caractérisent également les deux (2) phases saisonnières où les fluctuations pluviométriques ont été observées sur la période d'étude.

De même, l'analyse de l'indice standardisé de précipitations (SPI) et de l'indice de pluviosité révèlent une humidité au-dessus de la moyenne à l'échelle du bassin. L'indice standardisé de précipitation obtenu au pas de temps annuel (janvier – décembre) est de 2,19 et l'indice de pluviosité de 0,90 à la station de Soubré sur la période 1989-2019.

En ce qui a trait à l'évolution hydrologique du Sassandra à Soubré, les tests statistiques effectués sur la série chronologique (1980-2019) du poste de Soubré ont montré une rupture malgré un débit moyen mensuel de 355 m<sup>3</sup>/s. Cette rupture hydrologique semble amorcée depuis la période 1980 avec une chute significative des débits moyens en 1984 au niveau des deux stations de mesures de Piebly et Soubré, avec un débit inférieur à la moyenne de référence. Cette situation est la conséquence des périodes de fléchissement pluviométrique dans la zone d'étude observée autour des années 1970 jusqu'à 1980. Le débit journalier de pointe caractéristique des crues dans le bassin aménagé du fleuve Sassandra à Soubré est de 2196 m<sup>3</sup>/s observé en 2016, deux (2) ans avant la mise en eau du barrage de Soubré. En plus, ce régime d'écoulement subit l'influence des différents barrages de Soubré et Buyo. Cet impact des barrages est fortement ressenti sur le cours du Sassandra à travers les débits enregistrés à la station hydrométrique de Soubré.

Ensuite, l'analyse fréquentielle des données maximales pluvio-hydrologiques (pluies et débits) à l'échelle du bassin-versant aménagé à Soubré a été réalisée à partir des données de la période d'étude. Les tests statistiques de stationnarité, d'indépendance et d'homogénéité ont été effectués sur l'ensemble des séries de données de pluies et de débits. Il apparaît que sur des périodes de retour allant de 10 à 100 ans, les quantiles de débits de crues exceptionnelles ayant

une probabilité de survenir sont compris entre 1040 m<sup>3</sup>/s et 4050 m<sup>3</sup>/s. Pour ce qui concerne les précipitations, les quantiles estimés varient de 379 mm à 796 mm à la station de Soubré pendant qu'elles oscillent entre 330 mm et 1340 mm au niveau de Buyo sur une période de retour de 10 à 100 ans. Les critères de comparaison d'Akaike (AIC) et Bayésien (BIC) ont montré que la loi Lognormale est la loi statistique la mieux appropriée pour décrire toutes les séries des maxima de pluies et de débits au niveau des différentes stations de Soubré et Buyo. Ces paramètres décrivent l'occurrence et la susceptibilité de survenance du risque d'inondation fluviale. De ce fait, ces différents quantiles estimés ainsi que leurs périodes d'occurrence constituent un important moyen d'aide à la décision dans les processus de recherche des stratégies de lutte contre les risques pluvio-hydrologiques en générale et les inondations en particulier dans le bassin aménagé du fleuve Sassandra à Soubré.

Concernant le risque d'inondation fluviale, la spatialisation des zones inondables et des différents niveaux de risques associés a permis d'identifier huit (8) facteurs d'aléas et de d'enjeux (vulnérabilité) intervenant dans la genèse de ce phénomène climatique. L'évaluation a mis en exergue la densité du drainage, l'accumulation des débits, la pente, l'indice d'humidité topographique et l'altitude du relief comme facteurs spécifiques d'aléa. Quant aux facteurs d'enjeux (vulnérabilité) du bassin, l'étude a considéré la densité de population, l'occupation du sol et la distance au réseau hydrographique (zone d'influence du réseau hydrographique par rapport aux enjeux). La méthodologie utilisée s'est appuyée sur la méthode de hiérarchie multicritère de T. L. Saaty. La combinaison des différents facteurs d'aléa et d'enjeux considérés dans un Système d'Information Géographique (SIG) à référence spatiale a permis d'élaborer les différentes cartes d'aléas, d'enjeux et de risque d'inondation fluviale. Selon la classification adoptée, il ressort que les niveaux de risque fort à très fort occupent 11 % du bassin aménagé et les zones à risque moyen sont réparties sur environ 22 % du territoire du bassin. Quant au risque très faible à faible, il occupe 67 % de l'espace d'étude. Les niveaux de risque fort sont liés aux zones de pente faible allant de 0 à 4 %. Ils s'étalent sur des zones d'influence immédiate des cours d'eaux et affluents du Sassandra, majoritairement dans les milieux de concentration humaine autour de grandes zones de Soubré, Buyo, Grand-Zattry, Dapéoua à travers les lits majeurs.

La tentative de modélisation hydrologique s'est réalisée avec le modèle hydrologique pluie-débit GR4J (Génie Rural à quatre paramètres au pas de temps journalier) à travers la technique de validation croisée. Cette méthode a permis d'étudier la performance du modèle et la pertinence des intrants sur la base d'un découpage de la série de données en  $n$  sous-série, en

utilisant les  $n-1$  sous-séries pour la calibration. Ainsi, la série de données a été découpée en trois (3) sous-séries d'environ dix (10) années chacune (1980-1989 ; 1990-1999 ; 2000-2009). Deux processus de mise en œuvre ont découlé de cette technique. Les résultats moins satisfaisants dûs aux données lacunaires ont conduit à une reconstitution des débits à l'exutoire de Soubré par celle de Piebly. Les résultats ont donné après reconstitution et plusieurs itérations, des critères de Nash moyennement satisfaisants de 62 % et 55 % respectivement en calibration (1983-1995) et en validation (2000-2009). Le coefficient  $R^2$  est de 0,64 et 0,61 successivement en calibration et validation. Les performances du modèle sont meilleures à la calibration qu'à la validation. Cependant, les résultats pourraient être très satisfaisants si les données utilisées étaient moins lacunaires. Cette situation s'explique à travers la présence des barrages de Soubré et Buyo. En effet, les différentes opérations de manipulation et vidanges d'eau rendent invariables le débit du fleuve Sassandra presque toute l'année à l'aval du barrage à l'exutoire de Soubré.

De ce fait, il revient d'indiquer que le modèle GR4J peut convenir à la reproduction des débits de crues à risque d'inondation à l'exutoire de Soubré. Néanmoins, la qualité des simulations est intrinsèquement liée à celle des intrants qui sont souvent influencés par des facteurs anthropiques énormes. Toute situation qui rend souvent complexe les procédés de simulation hydrologique permettant de mieux apprécier les relations pluie-débit dans un contexte de variabilité des conditions climatiques et de prévisibilité des risques d'inondations fluviales.

D'un autre côté, il faut retenir que dans le bassin-versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré, les populations font face à la manifestation des risques saisonniers de crues entraînant des inondations fluviales. Cependant leur perception de ces risques met en évidence une faible connaissance de ces phénomènes, surtout en milieu rural.

Pour le reste, l'approche méthodologique adoptée dans cette étude a la capacité de servir de recommandation aux acteurs de la protection civile pour la gestion des inondations dans la zone d'étude avec ces multiples aménagements hydroélectriques et hydroagricoles sur le cours d'eau principal : le fleuve Sassandra. Elle permet de prendre des mesures proactives à l'échelle du bassin-versant afin de prévenir les risques d'inondation fluviale et d'identifier les biens, les personnes et les zones vulnérables à ce genre événements climatiques sans cesse croissants. Également, le modèle hydrologique GR4J peut être recommandé comme outil décisionnel de

prévision et de mise à jour des normes hydrologiques (débits de crues) à l'exutoire de nos bassins fluviaux.

Au terme de cette recherche, il apparaît que les crues sont manifestes et la susceptibilité des risques d'inondation fluviale est évidente à divers degrés de gravité selon les positions des zones par rapport aux différents cours d'eau de la zone aménagée. Ces risques d'inondation fluviale qui résultent de la rencontre de plusieurs facteurs d'aléas et d'enjeux pourraient connaître une occurrence croissante nul doute avec un contexte de variation multiple des paramètres climatiques actuels.

### **Perspectives**

Cette thèse n'a pas la prétention d'avoir abordé tous les aspects de l'analyse des crues et risques d'inondation fluviale à l'échelle du bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré. Les recherches doivent par conséquent se poursuivre dans le but d'aller vers une élaboration des plans d'évaluation et d'options de gestions des risques d'inondation fluviale à l'échelle de nos villes et localités riveraines des cours d'eau. Cela permettra la mise en place d'un système de veille intégré et d'alerte précoce des crues et risques d'inondation fluviale le long du parcours des cours d'eaux importants. C'est pourquoi, ces études doivent intégrer plusieurs facteurs de risques en prenant en compte les réalités intrinsèques de ces entités à l'intérieur des bassins fluviaux, mais surtout des secteurs prioritaires de développement. À ces matrices et outils de prévention des risques d'inondation fluviale, doivent être associée une modélisation hydrologique des paramètres hydropluviométriques. De même, une autre ouverture peut être faite sur l'impact ou les effets des crues et inondations fluviales sur l'insécurité foncière et alimentaire en zone rurale de façon spécifique. Tout cela aidera à la mise à disposition des décideurs des outils d'aide à la planification et d'intégration des risques climatiques (crues et inondations) dans l'aménagement des territoires à toutes les échelles ; car il est aujourd'hui indéniable l'apport de ces bassins fluviaux à la gestion intégrée des ressources diverses dans un contexte de changement climatique aux effets imprévisibles. C'est tout le sens de la problématique de la prise en compte des chocs météorologiques dans la planification et les politiques de développement de nos territoires.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES

**ACREMAN Mike, 2000**, *Managed flood releases from reservoirs: issues and guidance*, Center for Ecology and Hydrology, UK, 88 p.

**ADJA Miessan Germain, DJEMIN Edoukou Jacques, N'DRI Okon Franck-Armstrong, TOHOURI Privat, KOUAMÉ Kan Jean et JOURDA Jean Patrice, 2019**, *Apport de l'analyse hydrologique et de la modélisation de la relation pluie-débit dans le suivi quantitatif des ressources en eau dans un contexte de variabilité climatique : cas du sous-bassin versant du Kouto (Nord de la Côte d'Ivoire)*. European Scientific Journal, Vol. 154, N° 2 Octobre 2019, pp. 192-212.

**AFD-RECEP, 2014**, *Agence Française de Développement - Renewable Energy Cooperation Programme. Etude sur le développement de l'hydroélectricité de petite et moyenne puissance en Afrique Subsaharienne. Rapport final d'étude*. Tractabel Engineering-SA, 126 p.

**AGO Expédit Évariste, PETTIT François et OZER Pierre, 2005**, « Analyse des inondations à l'aval du barrage de Nangbéto sur le fleuve Mono (Togo et Bénin) », *Geo-Eco-Trop*, N°29, pp. 1-14.

**AGUE Alain I. et AFOUDA Abel, 2015**, « Analyse fréquentielle et nouvelle cartographie des maxima annuels de pluies journalières au Bénin », *International Journal Biological and Chemical Sciences*. N° 9(1), pp. 121-133.

**ALLA Della André, 2013**, *Risques naturels dans l'agglomération d'Abidjan (Côte-d'Ivoire)*, Thèse d'État, Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, 387 p.

**ALLA Della André, ATTA Kouacou Jean-Marie et YASSI Assi Gilbert, 2018**, *Les risques naturels et leurs manifestations dans une ville secondaire : érosion et inondation à Daloa (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire)*, *Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement*, n°2, (EDUCI), pp. 101-113.

**ALLA Della André, 2013**, *Cartographie des zones à risque d'inondation, d'érosion côtière et de mouvements de terrain dans la ville d'Abidjan*, 34p. « <http://www.environnement.gouv.ci/pollutec/CTS3%20LD/CTS%203.5.pdf> ».

**AMBROISE Bruno, 1999**, *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Processus, facteurs, modèles*. Éditions HGA, Bucarest, 200 p.

**AMOUSSOU Ernest, 2010**, *Variabilité pluviométrique et dynamique hydrosédimentaire du bassin versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest)*. Thèse de Doctorat unique, Université de Bourgogne, Dijon, France, CRC-CNRS UMR5210, 313 p.

**AMOUSSOU Ernest, TOTIN V. S. Henry, HOUESSO Sotelle, TRAMBLAY Yves, CAMBERLIN Pierre, HOUNDENOU Constant, BOKO Michel, MAHE Gil et PATUREL Jean-Emmanuel, 2015**, « Application d'un modèle conceptuel à l'analyse de la dynamique hydrométéorologique des crues dans un bassin-versant en milieu tropical humide : cas du fleuve Mono », *XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Liège 2015, 8 p.

**AMOUSSOU Ernest, TRAMBLAY Yves, TOTIN V. S. Henry, MAHE Gil et CAMBERLIN Pierre, 2014**, « Dynamique et modélisation des crues dans le bassin du Mono à Nangbéto (Togo/Bénin) », *Hydrological Sciences Journal.*, N° 59, pp. 2060-2071.

**ANARE, 2012**, *Autorité Nationale de Régulation du secteur de l'Électricité, Rapport d'activités de l'année 2012*, Abidjan, 54 p.

**APHING-Kouassi N. G., 2001**, *Le tourisme littoral dans le sud-ouest ivoirien*, Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan, 135 p.

**ARLOT Sylvain, 2017**, « Validation croisée », *arXiv :1703.03167v1 [math.ST]* 9 Mar 2017, 34 p.

**ARNOLD J. G., MORIASI D. N., GASSMAN P. W., ABBASPOUR K. C., White M. J., SRINIVASAN R., SANTHI C., HARMEL R., VAN Griensven A. et VAN Liew M. W., 2012**, "SWAT: Model use, calibration, and validation". *Transactions of the ASABE*, pp. 1491-1508.

**ASSANI Ali Arkamose, GRAVEL Edith, BUFFIN-Bélangier T. et ROY André G., 2002**, « Analyse d'impacts d'un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin (Québec, Canada) ». *Revue des sciences de l'eau*, N°15, pp. 557-574.

**ASSANI Ali Arkamose, GRAVEL Edith, BUFFIN-Bélangier T. et ROY André G., 2005**, « Impacts des barrages sur les débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada) », *Revue des sciences de l'eau*, N°18, pp. 103-127.

**ASSANI Ali Arkamose, LAJOIE Francis et LALIBERTE Charles, 2007**, « Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits moyens annuels en fonction du mode de gestion et de la taille des bassins versants au Québec », *Revue des sciences de l'eau*, N°20, pp. 127-146.

**ATTA Kouacou Jean-Marie, 2009**, Contribution de la Télédétection et des SIG pour une approche modélisatrice de la déforestation en vue d'une gestion durable des forêts tropicales - cas des Forêts classées de Béki et de Bossématié dans l'Est de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Nantes, 370 p.

**AVAHOUNLIN Ringo F., LAWIN Agnindé E., ALAMOU Eric, CHABI Amédée et AFOUDA Abel, 2013**, « Analyse fréquentielle des séries de pluies et débits maximaux de l'Ouémé et estimation des débits de pointe », *European Journal of Scientific Research*, N° 3, Volume 107, pp. 355-369.

**AVENARD Jean-Michel, ELDIN Michel, GIRARD Georges, SIRCOULON Jacques, TOUCHEBEUF Pierre, GUILLAUMET Jean-Louis, ADJANOHOUN Edmond et PERRAUD Alain, 1971**, *Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire*, Mémoires ORSTOM, N°50, Paris, ORSTOM, 401 p.

**BAKA Derving, KPAMPOU Monsia Jean-Claude, AHOUSSE Ernest Kouassi, AGOUA Anne Apo et TAKPA Teti Prince, 2019**, « Étude de la variabilité spatiale de la pluviométrie par la méthode géostatistique et IDW (inverse distance weighted) au Centre-ouest de la Côte d'Ivoire », *In American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*, 2019 ; 9(2), pp. 216-223.

**BALLAIS Jean Louis, CHAVE Sylvain, DUPONT Nadia, MASSON Eric et PENVEN Marie-José, 2011**, « La méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables », *Physio-Géo, Géographie Physique et Environnement, Collection « Ouvrages »*, 172 p.

**BAXTER R. M. et GLAUDE Pierre, 1980**, « Les effets des barrages et des retenues d'eau sur l'environnement au Canada : expérience et perspectives d'avenir » *Can. Bull. Fish. Aquat. Sc.* 205F, 36 p.

**BENAOUDJ Abderraouf, TOUAIBIA Bénina et HUBERT Pierre, 2014**, « Inondations dans la vallée du M'Zab : Genèse et prédiction », *Revue scientifique et technique Life* N° 24&25juin-dec, 15 p.

**BENHATTAB Karima, BOUVIER Christophe et MEDDI Mohamed, 2014**, « Analyse fréquentielle régionale des précipitations journalières maximales annuelles dans le bassin hydrographique - Chélif, Algérie » *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, N°27 Volume 27, pp. 189-203.

**BENMANSOUR Nadir, 2009**, *Étude de crues et localisation des zones inondables*. Mémoire de magistère en sciences agronomiques, École Nationale Supérieure Agronomique El Harrach Alger, 146 p.

**BEUCHER Stéphanie et RODE Sylvain, 2009**, *L'aménagement des territoires face aux risques d'inondation : regards croisés sur la Loire moyenne et le Val-de-Marne*, Mappemonde 94 N° 22, 19 p.

**BILLOT Caroline, DURLER Sandrine et WIDMER Bernard, 2003**, *Élaboration d'un outil d'estimation qualitative du risque naturel à moyenne échelle*, SIRNAT-JPRN Orléans, 7 p.

**BOUKA Biona C., LOUBELO Madiela B., ARVOR D. et DURIEUX L., 2016**, Classification des séries temporelles Landsat-8 pour la cartographie du gradient de végétation dans le Nord de la République du Congo, *Annales de l'Université Marien NGOUABI, 2015-2017, Sciences et Techniques*, pp. 11-21.

**BOUFFIER Jacques, 2015**, *Introduction à l'imagerie spatiale et à ses usages*. CEREMA, 31 p.

**BOULY Sané, CISSÉ Aissatou, FAYE Cheikh et SANÉ Tidiane, 2020**, « Utilisation de l'indice standardisé de précipitation et d'évapotranspiration (SPEI) de 1950 à 2018 pour caractériser la tendance de la sécheresse sur la BASSE CASAMANCE », *Revue Espace Géographique et Société Marocaine*, n°32, pp. 107-133.

**BOURGIN Pierre Yves et CHENET Marine-RIFFARD, 2015**, « État et perspectives d'aménagement du bassin du Sassandra en Côte d'Ivoire », *Conférence Internationale sur l'hydrologie des grands bassins Africains Hammamet*, Tunisie, 17 p.

**BOURGIN Pierre Yves, 2019**, « Modèle intégré du fonctionnement hydrologique du bassin versant du Sassandra », *La Houille Blanche* N°5-6, pp. 124-139.

**BOUVEYRON Charles et GIRARD Stéphane, 2009**, « Classification supervisée et non supervisée des données de grande dimension ». *La revue MODULAD*, N° 40, pp. 81-102.

**CADRI (CAPACITY FOR DISASTER REDUCTION INITIATIVE), 2016**, *Plan d'Action National pour le Renforcement des capacités en matière de RRC en Côte d'Ivoire 2016-2020*, Rapport final, 30 p.

**CAMUS H., 1969**, *Hydrologie du bassin du Sassandra (Note préliminaire)*, Côte d'Ivoire : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Centre d'Adiopodoumé d'Abidjan, volume N°5/69, 79 p.

**CARTIER Stéphane, 2005**, Les sciences sociales et les risques naturels : approches récentes, *Natures Sciences Sociétés* 2005/4 (Vol. 13), pp. 454-457.

**CFBR, 2013**, *Comité Français des Barrages et Réservoirs. L'histoire des barrages. Document technique, juin 2013-révision B1*, 29 p.

**CI-ENERGIES, 2019**, *Diagnostic du secteur de l'énergie en Côte d'Ivoire. Rapport final de l'étude de collecte des données relatives au secteur de l'énergie électrique-mars 2019*. Asia Engineering Consultant Co., Ltd, 229 p.

**CIMA (CENTRE INTERNATIONAL DE SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTALE et UNISDR (BUREAU DES NATIONS UNIES POUR LA REDUCTION DES RISQUES DE CATASTROPHE), 2018**, *Profil de Risque de Catastrophe en Côte d'Ivoire*, CIMA Research Foundation, 24 p.

**CORBANE Christina, BAGHDADI Nicolas, HOSFORD S., SOMMA Janine et CHEVREL Stéphane, 2004**, « Application d'une méthode de classification orientée objet pour la cartographie de l'occupation du sol : résultats sur ASTER et Landsat ETM. » *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection (RFPT)*, N° 175, pp. 13-26.

**CORNEC Mathieu, 2009**, *Validation croisée et modèles statistiques appliquées. Élément de présentation de Thèse de Doctorat*, Université Paris X, 47 p.

**DAS Sumit, 2018**, "Geographic information system and AHP based flood hazard zonation of Vaitarna basin, Maharashtra, India" *Arabian Journal of Geosciences*, N°576, 13 p.

**DEMBELE Omar et OUATTARA Issa, 2019**, « Contribution du SIG à la prévention et à la gestion des risques d'inondation dans le district de Bamako au Mali ». *European Scientific Journal., ESJ*, N°15, volume 30, pp. 256-277.

**DEZILEAU Laurent, TERRIER Benoît, BERGER Jean François, BLANCHEMANDE F., LATAPIE A., FREYDIER Rémi, PAQUIER A., LANG Michel et DELGADO J. L., 2014,** « Reconstitution des crues extrêmes du Gardon à partir d'une analyse paléohydrologique », *La Houille Blanche*, EDP Sciences, N°4, pp. 44-52.

**DIALLO Lamizana Birguy, 2009,** *Impact de la crue fluviale sur les écosystèmes et les conditions de vie des populations riveraines du Nakanbé (Burkina Faso)*. Thèse de Doctorat, Université de Ouagadougou, 147 p.

**DIDIER Didier, BERNATCHEZ Pascal et DUMONT Dany, 2017,** Systèmes d'alerte précoce pour les aléas naturels et environnementaux : virage ou mirage technologique. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 30(2), pp. 115–146. <https://doi.org/10.7202/1042922ar>

**DIONE Ousmane, 1992,** *Ajustement statistique à des échantillons de pluies et débits : application aux données du bassin versant de la Falème (Sénégal)*. Rapport de stage de D.E.A., Université Cheikh Anta Diop, 31 p.

**DOSSIER DEPARTEMENTAL DES RISQUES MAJEURS, 2016,** *Les risques technologiques : le risque de rupture de barrage du département des Vosges*, pp. 115-127

**DUBREUIL Pierre, 1974,** *Initiation à l'analyse hydrologique*. Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Paris. Masson & Cie, 226 p.

**DUVAIL Stéphanie et HAMERLYNCK Olivier, 2006,** « Crues artificielles et gestion intégrée des basses vallées des fleuves africains. Les exemples du fleuve Sénégal (Afrique de l'Ouest) et du fleuve Rufiji (Afrique de l'Est) ». In : *"Pêche et aquaculture, pour une exploitation durable des ressources vivantes de la mer et du littoral"*, Presses Universitaires de Rennes, collection Espace et Territoires, pp. 471-485

**EBA Anowa Evradé Larissa, AKE Gabriel Etienne, GOUADOU D'Avila Françoise et JOURDA Jean Patrice, 2021,** « Évaluation de la vulnérabilité à l'inondation des communes à proximité des grandes villes ouest africaines : Cas de la commune de Bingerville (Est d'Abidjan - Côte d'Ivoire) ». *European Scientific Journal.*, ESJ, N° 14, Volume 17, pp. 277-299

**EL ADLOUNI Salaheddine et BOBBÉE Bernard, 2014,** *Analyse fréquentielle avec le logiciel HYFRAN-PLUS, Guide d'utilisateur*, 71 p.

**EMRAN Anas et TRACHE Abdelhak, 2005**, *Workshop International Télédétection et Systèmes d'Information Géographique "Information Spatiale et Développement Durable"*, du 14 au 16 novembre 2005, Rabat, Maroc, Compte rendu, 53 p.

**EM-DAT, 2014**, « Nombre de catastrophes naturelles enregistrées dans le monde de 1950 à 2012 » © *notre-planete.info* ; données : *EM-DAT : The OFDA/CRED International Disaster* « <http://www.notre-planete.info/actualites/4381-catastrophes-naturelles-climat> », (consulté le 11 août 2016).

**EUROPEAN COMMUNITIES, 2001**, *Manual of concepts on land cover and land user information systems*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 93 p.

**FAYE Adama, LEJEUNE Quentin, SYLLA Mouhamadou Bamba, NEYA Oblé, THEOKRITOFF Emily et D'HAEN Sarah, 2019**, *Points clés pour l'Afrique de l'Ouest du rapport spécial du GIEC sur le changement climatique et les terres*. 21 p.

**FAYE Cheikh, SIDY Dieye, BOUBACAR Solly et FALL Ababacar, 2021**, « 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) » *Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement*, N° 1, Volume VI, pp. 40-51.

**FAYE Cheikh, BA Djibrirou Daouda et SY Baba, 2019**, « Quantification de la sécheresse météorologique par des indices standardisés de précipitations dans la vallée du fleuve Sénégal de 1980 à 2017 ». *Revue de géographie du laboratoire Léidi*, Volume N° 2, pp. 108-122.

**FAYE Cheikh, 2018**, « Analyse des tendances de la distribution régionale et de l'intensité des précipitations : utilisation d'indices climatiques dans le bassin de la Casamance (Sénégal) ». *Courrier du Savoir* – N°25, pp. 53-60.

**FAO (ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE) et CCR (CENTRE COMMUN DE RECHERCHE), 2012**, *Changement d'utilisation des terres forestières mondiales 1990-2005, Étude FAO : Forêts N° 169*, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture et Centre Commun de Recherche de la Commission européenne, Rome, FAO, 56 p.

**FOSSOU N'Guessan Marie-Rosine, SORO Tanina Drissa, SORO Gbombélé, OROU Kotchi Rodrigue et GONÉ Droh Lanciné, 2020**, *Modélisation de la relation pluie-débit dans*

*un contexte de gestion en eau : cas du sous bassin versant du N'zi en Côte d'Ivoire*. European Scientific Journal, Vol. 16, N° 21 Juillet 2020, pp. 62-88

**GANÇARSKI Pierre, 2013**, *Classification d'images : cas de la télédétection – classification multistratégie*. ICube-CNRS - Université de Strasbourg. 37 p.

**GAUME Eric, 2002**, *Éléments d'analyses sur les crues éclairs*. Thèse de Doctorat, Université du Québec, 360 p.

**GENDREAU Nicolas, LONGHINI Marion et COMBE Pierre-Marie, 2010**, *Gestion du risque d'inondation et méthode Inondabilité : une perspective socio-économique*. Ingénieries - EAT, IRSTEA édition 1998, pp. 3-15.

**GILARD Olivier et GENDREAU Nicolas, 1998**, « Inondabilité : une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants », *Revue des sciences de l'eau. Journal of Water Science*, N° 3, vol. 11, pp. 429-444.

**GIRARD Michel Claude, 1995**, *Apport de l'interprétation visuelle des images satellitaires pour l'analyse spatiale des sols. Un exemple dans la région de Lodève*. Étude et Gestion des Sols 2, 1, pp. 7-24.

**GIEC (GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'EVOLUTION DU CLIMAT), 2023**, *Synthèse du sixième rapport de synthèse du GIEC-The Shifters, Mars 2023*. 17 p.

**GIEC (GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'EVOLUTION DU CLIMAT), 2007**, *Résumé à l'intention des décideurs*. In : *Changements climatiques 2007 : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, Cambridge University Press, Cambridge, UK et New York, NY, USA. 18 p.

**GLEYZE Jean François, 2002**, *Rapport Risque*, Institut Géographique National., Laboratoire COGIT, 256 p.

**GOULA Bi Tié Albert, KONAN Brou, BROU Yao Téléphore, SAVANE Issiaka., FADIKA Vamoryba et SROHOUROU Bernard, 2007**, « Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale : cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois Lognormale et de Gumbel » *Hydrological Sciences Journal.*, N° 1, Volume 52, pp. 49-67.

**GUILLERMO A. Mendoza et MACOUN Phil, 2000**, *Application de l'analyse multicritère à l'évaluation des critères et indicateurs*. CIRAD, CIFOR, Montpellier- France, 79 p.

**HAUHOLOT Célestin, 2008**, « Analyse du risque pluvial dans les quartiers d'Abidjan. Étude de cas à Attécoubé », *Géo-Eco Trop*, N° 32, pp. 75-82.

**HEBAL Aziz et REMINI Boualem2, 2011**, « Choix du modèle fréquentiel le plus adéquat à l'estimation des valeurs extrêmes de crues (cas du nord de l'Algérie) », *In Canadian Journal of Civil Engineering*, 32 p.

**HOUESSO Sotelle, 2016**, *Les inondations et les risques prévisionnels liés aux barrages hydroélectriques dans la basse vallée du Mono*. Thèse de Doctorat Unique, Université d'Abomey-Calavi, 198 p.

**IBGE (CATALOGUE EN LIGNE BRUXELLES ENVIRONNEMENT), 2013**, *Fiche méthodologique. Carte : aléa inondation*, 17 p.

**IMHOF Aviva, WONG Suzanne et BOSSHARD Peter, 2002**, *Guide du citoyen pour la Commission Mondiale des Barrages*, International Rivers Network, 64 p.

**ISDR (INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION), 2011**, *Africa Regional Strategy for Disaster Risk Reduction, Stratégie Nationale de Gestion des Risques de Catastrophes & Plan d'Action, Côte D'Ivoire*, UN-ISDR 65 p.

**JACQUET Jean, 1964**, « Les méthodes statistiques dans les calculs de prédétermination des crues ». *Revue de statistique appliquée*, tome 12, n° 1, pp. 49-61.

**JAVELLE Pierre, 2001**, *Caractérisation du régime des crues : le modèle débit-durée-fréquence convergent. Approche locale et régionale*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 277 p.

**JOBIN Benoît, LATENDRESSE Claudie, MAISONNEUVE Charles et SEBBANE Aissa, 2007**, *Changements de l'occupation du sol dans le sud du Québec pour la période 1993-2001*. Série de rapports techniques n° 483, Environnement Canada, Service canadien de la faune, région du Québec, Sainte- Foy, Québec. 128 p.

**JOURDA Jen Patrice, 2002**, « Les ressources en eau souterraine de la Côte d'Ivoire et le cas des aquifères transfrontaliers entre la Côte d'Ivoire et le Ghana. » *Proceedings of the*

*International Workshop, Managing shared aquifer resources in Africa, Tripoli, Libya, 2– 4 June 2002.*

**J.V.E. (JEUNES VOLONTAIRES POUR L'ENVIRONNEMENT), 2017,** Rapport d'évaluation des impacts sociaux et environnementaux du barrage de Soubré Côte d'Ivoire, 31 p.

**KADILAMIO Leslie Bouetou, IFO Suspense Averti et BINSANGOU Stoffenne, 2017,** « Changement de couverture forestière dans le département de la Likouala dans la période de 1986 à 2015, République du Congo ». *European Scientific Journal, No.24, Volume.13, 36 p.*

**KANGAH Armand et ALLA Della André, 2013,** « Détermination des zones à risque d'inondation à partir du modèle numérique de terrain (MNT) et du système d'information géographique (SIG) : Cas du bassin-versant de Bonoumin-Palmeraie (commune de Cocody, Côte d'ivoire) », *Géo-Eco-Trop.*, N° 2, Volume 39, pp. 297-308.

**KESSASRA Farès, 2017,** *Cours de Modélisation en Hydrologie et Hydrogéologie, Master 1 : Eau et Environnement*, Université de Jijel Alger, 61 p.

**KODJA Domiho Japhet, 2018,** *Indicateurs des événements hydroclimatiques extrêmes dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou en Afrique de l'Ouest.* Thèse de Doctorat en Géographie. Université Montpellier, Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 288 p.

**KODJA Domiho Japhet, MAHE Gil, VISSIN Expédit W., AMOUSSOU Ernest, PATUREL Jean-Emmanuel, HOUNDENOU Constant E. et BOKO Michel, 2017,** « Étude des indices de débits journaliers extrêmes à l'inondation dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou » *XXX<sup>ème</sup> Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Sfax 03-06 juillet 2017*, pp. 451-537.

**KOFFI Koménan, 2012,** *Situation de l'hydroélectricité en Côte d'Ivoire, Atelier régional de la CEDEAO sur la petite hydroélectricité, Monrovia-Libéria du 16-20 Avril 2012*, 28 p.

**KOUASSI Amani Michel, 2007,** *Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte d'Ivoire.* Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan, 234 p.

**KOUASSI Amani Michel, KOUAME Koffi Ferdinand, GOULA Bi Tié Albert, LASM Théophile, PATUREL Jean Emmanuel et BIEMI Jean, 2008**, « Influence de la variabilité climatique et de la modification de l'occupation du sol sur la relation pluie-débit à partir d'une modélisation globale du bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte d'Ivoire ». *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, Volume 11, pp. 207-229.

**KOUDAMILORO Olivier, VISSIN Expédit Wilfrid et DIPAMA Jean-Marie, 2017**, « Caractérisation des risques hydroclimatiques dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou au Bénin (Afrique de l'ouest) ». *European Scientific Journal*, N° 15, Volume 13, 18 p.

**KOUMASSI Dègla Hervé, 2014**, *Risques hydroclimatiques et vulnérabilités des écosystèmes dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri*. Thèse de Doctorat Unique, Université d'Abomey-Calavi, 246 p.

**KOUMASSI Dègla Hervé, TCHIBOZO Eric, VISSIN Expédit et HOUSSOU Christophe, 2014**, « Analyse fréquentielle des événements hydropluviométriques extrêmes dans le bassin de la Sota au Bénin », *Afrique SCIENCE*, N° 2, Volume 10, pp. 137-148.

**KPEDENOU Koffi Djagnikpo, DRABO Ousmane, OUOBA Awa Pounyala, DAPOLA Da Constant et TCHAMIE Thiou, 2017**, « Analyse de l'occupation du sol pour le suivi de l'évolution du paysage du territoire Ouatchi au sud-est Togo entre 1958 et 2015 ». *CAHIERS DU CERLESHS, Presses de l'Université de Ouagadougou, 2017*, N° 55, Volume 31, pp. 203-228.

**LABELLE Jean-François et VARIN Mathieu, 2021**, *Analyse de l'efficacité de l'indice d'humidité topographique (TWI) à cartographier les milieux humides. Rapport de synthèse, CERFO-Québec*, 27 p.

**LABORDE Jean Pierre, 2009**, *Éléments d'hydrologie de surface, Manuel de cours, École Polytechnique de l'Université de Nice - Sophia Antipolis - Département Hydroinformatique et Ingénierie de l'Eau*, 202 p.

**LANG Michel, CHASTAN Bernard et GRELOT Frédéric, 2009**, *La méthode Inondabilité : appropriation par les hydrologues de la vulnérabilité dans le diagnostic sur le risque d'inondation*. Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés, L'Harmattan, pp. 244-255.

**LAROCHE Anne-Marie, DIRAMBA Wissi Mathilde, DUMONT Gabriel et YOUSFI Nawres, 2016, *Cartographie des zones inondables des terres intérieures de bassins versant non jaugés – Phase I : modélisation hydrologique*. Rapport du Fond en Fiducie pour l’environnement du Nouveau-Brunswick, Université de Moncton, 41 p.**

**LE DELLIOU Patrick, 2003, *L’analyse des risques appliquée aux barrages*. Rapport BETCGB-Grenoble, France, 8 p.**

**LELIEVRE Marie-Andrée, BELANGER-Buffin Thomas et Morneau François, 2008, *L’approche hydrogéomorphologique pour la cartographie des zones à risque d’inondation dans les vallées de petites et moyennes tailles, Géorisques/Geohazards, Comptes rendus de la 4e Conférence canadienne sur les géorisques : des causes à la gestion*, 8 p.**

**LEON Frédéric et VINET Freddy, 2006, *La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des méthodes d’évaluation des risques naturels*, Gestion des sociétés, des territoires et des risques, Université Paul-Valéry, Montpellier III, pp. 10-24.**

**LEVEQUE Christian, 2005, « Conséquences des barrages sur l’environnement ». *Colloque « irrigation et développement durable »* volume n° 1, pp. 33-43.**

**LOIRE Rémi, PIEGAY Hervé, MALAVOI Jean-René et KONDOLF G. Mathias, 2018, *Les lâchers morphogènes en aval des barrages hydroélectriques : comment concilier la production électrique et l’environnement. I.S Rivers*, 3 p.**

**MAHE Gil et OLIVRY Jean Claude, 1995, « Variations des précipitations et des 670 écoulements en Afrique de l’ouest et centrale de 1951 à 1989 ». *Sécheresse*, N°1, Volume 6, pp. 109-117.**

**MAHE Gil, OLIVRY Jean Claude et SERVAT Eric, 2005, « Sensibilité des cours d’eau ouest-africains aux changements climatiques et environnementaux : extrêmes et paradoxes ». *Proceedings of symposium S6 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, IAHS Publ.*, pp. 169-171.**

**MANCHE Yannick, 2000, *Analyse spatiale et mise en place de système d’information pour l’évaluation de la vulnérabilité des territoires de montagnes face aux risques naturels*. Thèse de Géographie, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 176 p.**

**MARCHANDISE Arthur, 2007**, *Modélisation hydrologique distribuée sur le Gardon d'Anduze ; étude comparative de différents modèles pluie-débit, extrapolation de la normale à l'extrême et tests d'hypothèses sur les processus hydrologiques*. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, 176 p.

**MASCLE S. H., 2005**, *Classification d'images de télédétection pour l'estimation et le suivi de paramètres géophysiques*, HDR, Université de Versailles-Saint Quentin-En-Yvelines, 111 p.

**MASSUE Jean Pierre, 2004**, *Les institutions internationales et la gestion des risques naturels*, Strasbourg, 172 p.

**MEDD (MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE), 2004**, « Les inondations. » *Dossier d'informations sur les risques naturels majeurs, Août 2004, Alp' Géorisques et Graphies*, 24 p.

**MEDDI Mohamed et ABBES Ben Sadeuk Abdelkader, 2014**, Analyse statistique et prévision des débits de crues dans le bassin versant de l'Oued Mekerra (Ouest de l'Algérie), *Revue « Nature & Technologie ». C- Sciences de l'Environnement, n° 10/Janvier 2014, pp. 21-31*.

**MÉLEDJE N'Diaye Hermann, KOUASSI Kouakou Lazare, N'GO Yao Alexis et SAVANE Issiaka, 2015**, « Caractérisation des occurrences de sécheresse dans le bassin hydrologique de la Bia transfrontalier entre la Côte d'Ivoire et le Ghana : contribution des chaînes de Markov » *Cah Agric N° 3 volume 24*, pp. 186-197.

**METZGER Alexis et LINTON Jamie, 2016**, Les barrages qui cachent l'eau : l'oubli des vulnérabilités aux inondations lors de l'aménagement de la Dordogne (1917-1935). *VertigO, Volume 16, numéro 3, 19 p.*

**MEYLAN Paul et MUSY André, 1999**, *Hydrologie fréquentielle*. Editions H.G.A Bucarest, 413 p.

**MINESUDD (MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DE LA SALUBRITÉ ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE), 2016**, *Plan d'action national pour le renforcement des capacités en matière de Réduction des Risques de Catastrophes en Côte d'Ivoire 2016-2020, Rapport final*, 30 p.

**MONTOROI Jean-Pierre, 2012**, « Rôle des sols sur la genèse des inondations, *Problème actuels de la protection contre les inondations, Symposium Européen, Paris – Orléans*, 6 p.

**MOUELI Safouane, 2003**, *Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier*, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts, France, 323 p.

**MORICE Eugène, 1956**, « Quelques tests non paramétriques ». *Revue de statistiques appliquées, Tome 4, N°4*, pp. 75-107.

**MORTON F. I., 1983**, “Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology”. *Journal of hydrology*, 66(1-4), pp1-76.

**NASH J. E. et SUTCLIFFE J. V., 1970**, “River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles”. *Journal of hydrology*, Volume 10, N°3, pp. 282-290.

**N’CHO Ohoueu Kikou Arnaud Lionel, 2022**, *Analyse du risque d’inondation en cas de rupture des barrages Ayamé 1 et 2 dans le département d’Aboisso (Sud-Est, Côte d’Ivoire)*, Thèse de Doctorat, Université Felix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, 262 p.

**NEKTARIOS Kourgialas et GEORGE Karatzas, 2011**, “Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas a case study” *Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques*, pp. 212-225.

**NEPAD-PDDA, 2005**, Appui à la mise en œuvre du NEPAD–PDDAA. Profil de projet d’investissement bancable du NEPAD–PDDAA « *Appui à la pêche continentale et lagunaire* ». TCP/IVC/2903 (I), NEPAD Réf. 05/25 F, Volume V et VI. 38 p.

**N’DOUME Claude, 2018**, Production cartographique dans le cadre de la surveillance spatiale des terres (SST) en Côte d’Ivoire. Bureau National d’Études Techniques et de Développement (BNETD)/Centre d’Information Géographique et du Numérique (CIGN), *3e Forum des usagers EUMETSAT, Abidjan, 24 au 28 septembre 2018*, 27 p.

**N’GUESSAN Bi Vami Hermann, SALEY M. Bachir, WADE Soulèye, DJAGOUA Eric Valère, KOUAMÉ Fernand et AFFIAN Kouadio, 2014**, Cartographie du risque d’inondation par une approche couplée de la télédétection et des systèmes d’informations géographiques (SIG) dans le département de Sinfra (centre-ouest de la Côte d’Ivoire). *European Scientific Journal*, N° 2, volume 10, pp. 170-191.

**OBSERVATOIRE DU SAHARA ET DU SAHEL, 2015**, *Cartographie de l'occupation du sol - Spécifications techniques, Projet amélioration de la résilience des populations sahéliennes aux mutations environnementales* - REPSAHEL, 36 p.

**OBSERVATOIRE DU SAHARA ET DU SAHEL, 2015**, *Cartographie de l'occupation du sol - Guide pratique, Projet amélioration de la résilience des populations sahéliennes aux mutations environnementales* - REPSAHEL, 28 p.

**ONDO Jean Cléophas, OUARDA Taha B. M. J. et BOBÉE Bernard, 1997**, *Revue bibliographique des tests d'homogénéité et d'indépendance*, Rapport de recherche N R-500, Institut national de la Recherche Scientifique, INRS-Eau, Canada, 85 p.

**ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE et PARTENARIAT MONDIAL POUR L'EAU (GWP), 2016**, *Manuel des indicateurs et indices de sécheresse*. Programme de gestion intégrée des sécheresses, Integrated Drought Management Programme Tools and Guidelines Series 2, (document OMM-N° 1173) Genève, OMM 2016, 46 p.

**ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE, 2009**, *Gestion intégrée des crues : document de fond*, Document technique APFM, Collection « Politiques de gestion des crues » (document OMM-N° 1047), Genève, OMM, juin 2009, 32 p.

**ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE, 2012**, - *Hydrologie - De la mesure à l'information hydrologique*. Guide des pratiques hydrologiques (document OMM-N° 168, sixième édition) Genève, Volume 1, OMM, 2012, 322 p.

**ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE, 2012**, *Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé*. (M. Svoboda, M. Hayes et D. Wood) (OMM-N°1090), Genève, OMM, 2012, 25 p.

**OSZWALD Johan, ATTA Kouacou J. M., KERGOMARD C. et ROBIN Marc, 2007**, Représenter l'espace pour structurer le temps : approche des dynamiques de changements forestiers dans le Sud-est de la Côte d'Ivoire par télédétection. *Revue Télédétection*, N°1-2-3-4, volume 7, pp. 271-282.

**OUATTARA Abdoulaye Tiodionwa, 2017**, *Cartographie de l'occupation du sol de la région de la Mé*. Etc RONGED, Projet RED+, 28 p.

**LOUDIN Ludovic, HERVIEU Frédéric, MICHEL Claude, PERRIN Charles, ANDREASSIAN Vazken, ANCTIL François et LOUMAGNE Cécile, 2005, “Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model ? Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling”. *Journal of hydrology*, 303(1-4), pp. 290-306.**

**PATRIKAKI Olga, KAZAKIS Nerantzis, KOUGIAS Ioannis, PATSIALIS Thomas, THEODOSSIOU Nicolaos et VOUDOURIS Konstantinos, 2018, “Assessing Flood Hazard at River Basin Scale with an Index-Based Approach: The Case of Mouriki, Greece”, *Géosciences*, 8,50, 13 p.**

**PEMED-CI, 2015, *Études monographiques et économiques des Districts de Côte d’Ivoire. Note de synthèse du District du Bas-Sassandra*, 70 p.**

**PERRIN Charles, 2000, *Vers une amélioration d’un modèle global pluie-débit au travers d’une approche comparative*. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 292 p.**

**PELLETIER Charlotte, 2017, *Cartographie de l’occupation des sols à partir de séries temporelles d’images satellitaires à hautes résolutions*. Thèse de Doctorat. Université Toulouse 3 Paul Sabatier, Toulouse, 289 p.**

**PERRIN Charles, MICHEL Claude et ANDREASSIAN Vazken, 2007, *Les modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)*. Rapport technique Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés. Antony, 16 p.**

**PNUD (PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR LE DÉVELOPPEMENT), 2004, *La réduction des risques de catastrophes. Un défi pour le développement. Un rapport mondial* – Bureau pour la prévention des crises et le relèvement, New-York, 159 p.**

**RAKOTOMALALA Ricco, 2008, *Comparaison de populations, tests non paramétriques. Support de cours*, version 1.0. Université de Lyon 2. 201 p.**

**RAMALLO Cynthia, 2013, *Caractérisation du régime pluviométrique et sa relation à la fonte du glacier Zongo (Cordillère Royale)*. *Sciences de la Terre*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble Alpes, 267 p.**

**REDD+ (REDUCING EMISSIONS FROM DEFORESTATION AND FOREST DEGRADATION) et FAO (ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE), 2017, *Données forestières de base pour la REDD+ en Côte d'Ivoire : Cartographie de la dynamique forestière de 1986 à 2015*. FAO – REDD+, Abidjan, 32 p.**

**RENTSCHLER Jun et SALHAB Melda, 2020, "People in Harm's Way: Flood exposure and poverty in 189 countries" *Policy Research working paper* n° 9447, 28 p.**

**ROBIN Marc, HAUHOUOT Célestin, AFFIAN Kouadio, ANOH Paul, ALLA Della André et POTTIER Patrick, 2004, « Les risques côtiers en Côte d'Ivoire (*Coastal hazards in Ivory Coast*) ». In : *Bulletin de l'Association de géographes français, 81e année, 2004-3 (septembre). Aménagement des littoraux et conséquences géomorphologiques / Les littoraux sableux et dunaires*, pp. 298-314.**

**ROBIN Marc et HAUHOUOT Célestin, 1999, « Les risques naturels côtiers en Côte d'Ivoire », *Cahiers Nantais*, N° 51, pp. 169-183.**

**ROYET Paul, 2004, « Barrages et risques ». *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, Lavoisier N° 38. Irstea-Cemagref, p. 11-15.**

**SAATY Thomas L., 1977, "A scaling method for priorities in hierarchical structures". *Journal of Mathematical Psychology*, 15, pp. 234-281.**

**SAATY Thomas L., 1984, Décider face à la complexité. Une approche multicritère d'aide à la décision. Collection Université-Entreprise, Les Éditions ESF, 231 pages, consulté en ligne, [https://books.google.ci/books?id=SZzaO8JkyFMC&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.ci/books?id=SZzaO8JkyFMC&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false).**

**SALEY M. Bachir, KOUAMÉ Fernand, PENVEN Marie Josée, BIEMI Jean et BOYOSSORO Kouadio Hélène, 2003, Cartographie des zones à risque d'inondation dans la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire : Apport des MNA et de l'imagerie satellitaire. *Revue de Télédétection*, 2003, vol.5, n° (1-2-3), pp. 53-67.**

**SAKOUT Samir et GUILBOT Alain, 1988, « Essais d'estimation des débits de pointe de crue à partir des caractéristiques physiques et climatiques des bassins versants en région méditerranéenne », *Hydrologie Continentale*, n° 3, volume 3, pp. 57-65.**

**SAKO Nakouma et BELTRANDO Gérard, 2014**, « Dynamiques spatiales récentes du Parc National du Banco (PNB) et stratégies de gestion communautaire durable de ses ressources forestières (District d'Abidjan en Côte d'Ivoire) », *Echo-Géo* 30/2014, 20 p.

**SERVAT Eric et SAKHO Mamadou, 1992**, « Fonctionnement d'un système d'eau sous différentes hypothèses de ressources en eau : cas du bassin du Sassandra en Côte d'Ivoire », *VIIIe journées hydrologiques*, Orstom- septembre 1992, pp. 397-409.

**SHEMA-EDF, 2010**, *Société Hydraulique d'Études et de Missions d'Assistance – Électricité De France. L'énergie hydraulique*, Lycée Chevrollier, 75 p.

**SORO Gneneyougo Émile, DAO Amidou, FADIKA Vamoryba, GOULA BI Tié Albert et SROHOROU Bernard, 2016**, « Estimation des pluies journalières extrêmes supérieures à un seuil en climat tropical : cas de la Côte d'Ivoire. » *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, volume 10, pp. 211-227.

**SORO Gbombélé, AHOUSI Kouassi Ernest, KOUADIO Ernest Konan, SORO Tanina Drissa, OULARE Sékouba, SALEY M. Bachir, SORO Nagnin et BIEMI Jean, 2014**, « Apport de la télédétection à la cartographie de l'évolution spatio-temporelle de la dynamique de l'occupation du sol dans la région des Lacs (Centre de la Côte d'Ivoire) ». *Afrique SCIENCE*, 10(3), pp. 146-160.

**SOROKOBY Vano Mathunaise, 2013**, *Étude hydrologique et hydrogéologique de la région de Soubré (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire) dans un contexte de variabilité climatique*. Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan, 219 p.

**SOSSOU Sambou, MASSECK Boye, BADJI Ansou Malang, EDMOND Nicaise, ANSOUMANA Bodian, KURUMA Mussa, MARIKO Adama, BAMBA Fatogoma, DACOSTA Honoré, MALOU Raymond, BARRY Alpha, KANE Alioune, FALL Awa et HAMADOUN Soumane, 2011**, *Calage et validation des modèles hydrologiques GRJ4 et GR2M sur le bassin du Bafing en amont de Bafin-Makana : vers l'étude de l'impact du climat sur les ressources en eau de la retenue de Manantali*. 6<sup>ème</sup> Journée Scientifique du ZIE, 4 – 8 avril 2011, Campus ZIE Ouagadougou, 6 p.

**SOUANEF Nassima, 2015**, *Analyse fréquentielle des débits max de crues de l'Oued Abiod*, Magister en Hydraulique, Université Mohamed Biskra, Algérie 134 p.

**TANGARA Mamoutou, 2005**, *Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global.*, Thèse de l'EPHE, Unité de Recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés, Cemagref, Antony, École pratiques des hautes études de Paris, France, 374 p.

**TANGUY Marion, 2012**, *Cartographie du risque d'inondation en milieu urbain adaptée à la gestion de crise. Analyse préliminaire.* Rapport de recherche doctorale R1395. Institut national de la recherche scientifique, Québec, 103 p.

**TOMETY Yaovi Djivénoù, 2017**, *Exposition et vulnérabilité face aux risques d'inondation au Burkina Faso : cas de la ville de Dori.* Mémoire de Master des Sciences de Gestion de l'Environnement, Université de Liège, 88 p.

**TRAORE Kinakpefan Michel, 2016**, *Analyse des vulnérabilités de la ville côtière de San-Pédro (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire).* Thèse de Doctorat, Université Felix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, 356 p.

**TTI et ACER Campestre, 2011**, *Étude de prélocalisation des zones humides sur le territoire du SAGE Nappe de Beauce. PHASE 1 : prélocalisation des enveloppes de fortes probabilités de présence de zones humides.* Rapport d'étude, 97 p.

**UNISDR (BUREAU DES NATIONS UNIES POUR LA REDUCTION DES RISQUES DE CATASTROPHE), 2015**, *Rapport Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe 2015 – 2030*, 40 p.

**VANNIER Olivier, 2013**, *Apport de la modélisation hydrologique régionale à la compréhension des processus de crue en zone méditerranéenne*, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France 283 p.

**VARIN Mathieu, 2021**, *Analyse de l'efficacité de l'indice d'humidité topographique (TWI) à cartographier les milieux humides*, Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte Foy inc. (CERFO). Rapport 2021-13. 28 p.

**VAUZELLE Michel, 1988**, « L'imagerie de télédétection : méthodologie de traitement en géographie » *In : Revue de géographie de Lyon*, Volume 63, N°2-3, 1988. Les nouveaux outils dans l'enseignement de la géographie, pp. 37-45.

**VINET Freddy, 2017**, *Inondations 1 : la connaissance du risque*, ISTE Éditions, London, 10 p.

**VISSIN Expédit Wilfrid, 2007**, *Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Hydrologie*. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, France, 311 p.

**YAO Affoué Berthe, GOULA Bi Tié, KANE Alioune, OI MANGOUA Jules Mangoua et KOUAMÉ Auguste Kouassi, 2016**, Cartographie du potentiel en eau souterraine du bassin versant de la Lobo (Centre-Ouest, Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère, *Hydrological Sciences Journal– Journal des Sciences Hydrologiques*, 2016 vol. 61, no. 5, pp. 856–867.

**YAO Koffi Théodore, 2009**, *Hydrodynamisme dans les aquifères de socle cristallin et cristallophyllien du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire : cas du département de Soubré : apports de la télédétection, de la géo- morphologie et de l'hydrogéochimie. Océan, Atmosphère*. Thèse Unique de Doctorat, Conservatoire national des arts et métiers – CNAM, Université de Cocody, Abidjan Côte d'Ivoire, 216 p.

**TCHOTSOUA Michel, FOTSING Jean Marie et MOUSSA A., 2007**, « Évaluation des risques d'inondation dans la vallée de la Bénoué en aval du barrage de Lagdo (Cameroun) ». *Actes des JSIRAUF, Hanoi, 6-9 novembre 2007*, 9 p.

**ZINE El Abidine, Roukh Z. El A. et NADJI A., 2018**, « Cartographie de la susceptibilité aux inondations par la méthode de l'analyse multicritère et SIG : Cas de la wilaya d'Oran Nord-Ouest de l'Algérie ». *Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement* : Volume III - Numéro 1 - Avril 2018, pp. 67-73.

## **ANNEXES**

## ANNEXES

### 1-Autorisations de recherches

#### ➤ Préfecture de SOUBRÉ

REGION DE LA NAWA  
DEPARTEMENT DE SOUBRE  
PREFECTURE DE SOUBRE  
☎ : 34-72-55-32  
Fax : 34-72-22-83.  
N° 019 /PS-CAB.

REPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE  
Union - Discipline - Travail  
Soubré, le 04 février 2020  
LE PREFET DE LA REGION DE LA NAWA,  
PREFET DU DEPARTEMENT DE SOUBRE  
A  
Monsieur le Sous-préfet  
De SOUBRE

Objet : Autorisation de recherches.

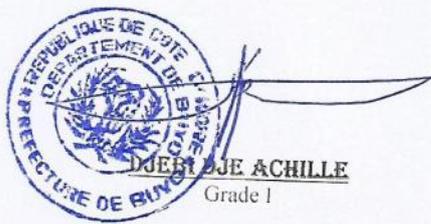
J'ai l'honneur de vous demander de bien vouloir recevoir Monsieur KOUAME Kouakou Fidèle Constant, Etudiant, inscrit en thèse de Doctorat au Département de Géographie de l'Université Félix HOUPHOUET-BOIGNY d'Abidjan-Cocody, au titre de l'année académique 2018-2019. L'intéressé effectue une recherche sur le thème : « Crues et risques d'inondations dans le bassin-versant aménagé de Sassandra à l'exutoire de Soubré (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire) ».

Le soutien de vos services lui sera d'une utilité certaine.

C'est pourquoi, il importe de lui réserver un bon accueil et faciliter ainsi ses recherches auprès de vos populations. /-

Pour le Préfet et P.D.  
Le Secrétaire Général de la Préfecture  
  
  
Bonaventure TIEGHE  
Préfet Grade L, 2<sup>ème</sup> Echelon

➤ **Préfecture de BUYO**

RÉGION DE LA NAWA ----- DÉPARTEMENT DE BUYO ----- PRÉFECTURE DE BUYO -----		RÉPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE Union-Discipline-Travail -----
N° 023/P-BYO/SG		Buyo, le 22 juillet 2020
		Le PRÉFET à Monsieur KOUAME Kouakou Fidèle Constant à <u>SOUBRE</u>
<b>OBJET:</b> Réponse à votre requête. <b>RÉF.:</b> V/L du 06 juillet 2020		
Monsieur,		
Comme suite à votre lettre citée en référence et ayant trait à votre sollicitation d'obtention d'une autorisation de recherche dans le Département de Buyo en vue d'une étude doctorale.		
J'ai l'honneur de vous faire connaître que je souscris à votre requête et me tiens éventuellement à votre disposition en cas de besoin.		
Je vous prie de recevoir, monsieur, l'assurance de ma considération distinguée.		
 DJEI DJE ACHILLE Grade I		
BP : 300 BUYO <b>TÉL. :</b> 34728514 / <b>FAX :</b> 34728513 <b>EMAIL :</b> prefecturebuyo@gmail.com		

## 2-Contrat de licence d'utilisation non commerciale du logiciel GRP/GR4J

### **ARTICLE 9 – RENONCIATION**

Le fait que l'une ou l'autre des Parties n'exerce pas l'un quelconque de ses droits au titre des présentes ne saurait emporter renonciation de sa part à son exercice, une telle renonciation ne pouvant procéder que d'une déclaration expresse de la partie concernée.

### **ARTICLE 10 - VALIDITÉ**

Dans l'hypothèse où une ou plusieurs dispositions du présent contrat seraient considérées comme non valides par une juridiction compétente, les autres clauses conserveront leur portée et effet.

### **ARTICLE 11 - DURÉE**

Le présent contrat entre en vigueur à compter de sa signature pour une durée de dix (10) ans. Il n'est renouvelable et ne peut être modifié que par avenant signé des deux Parties.

### **ARTICLE 12 – DROIT APPLICABLE - RÉGLEMENT DES LITIGES**

Le présent contrat est soumis au droit français.

En cas de contestation sur l'interprétation ou sur l'exécution de l'une quelconque des dispositions de ce contrat, et à défaut d'accord amiable entre les Parties, les tribunaux de Paris seront seuls compétents pour connaître du litige.

### **ARTICLE 13 – CESSION**

Il est expressément entendu entre les Parties qu'à compter du 1<sup>er</sup> janvier 2020, l'intégralité des droits et obligations d'Irstea au titre du Contrat est automatiquement cédée à l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) issu de la fusion d'Irstea et de l'INRA conformément au décret n° 2019-1048 du 10 octobre 2019 relatif à l'organisation et au fonctionnement de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.

Fait à Andony, en deux exemplaires originaux, le 18 décembre 2019

Pour le Détenteur



Mme. Céline Yolande BIKPO,  
Directrice de la faculté et  
Professeure Titulaire

Pour Irstea



M. Marc Michel, Président

### 3 - Communiqué d'information sur une crue dans le bassin aménagé de Soubré (CI-Energies, 20/09/2019)



LA NAWA  
CONSEIL RÉGIONAL



CI-ENERGIES  
CÔTE D'IVOIRE ÉNERGIES

COMMUNIQUÉ

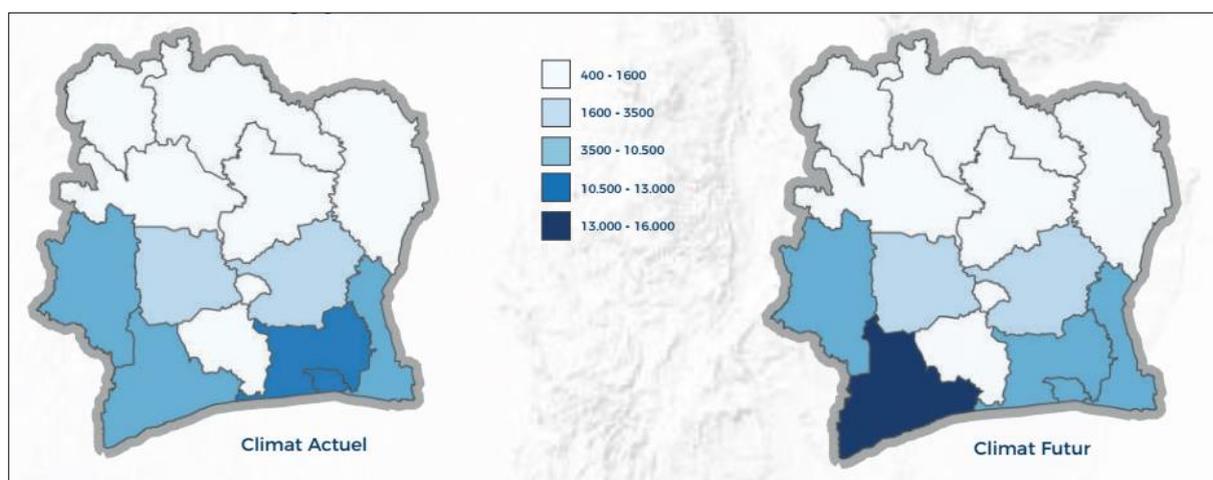
Des crues d'eau du **fleuve Sassandra** ont été enregistrées au niveau du barrage de **Soubré**.

Ainsi, **CI-Energies**, société gestionnaire du barrage, pourrait effectuer des travaux en vue d'évacuer le surplus d'eau, dans les prochains jours.

Ces opérations peuvent présenter des dangers pour les populations riveraines aussi bien en amont du barrage de Soubré qu'à son aval. **Le Conseil Régional de la Nawa invite toutes les populations concernées à redoubler de vigilance.**

*source : CI-Energies*

### 4 - Zone géographique et nombre de personnes touchées par les inondations en moyenne par an en Côte d'Ivoire (CIMA et UNISDR, 2018)



## 5- Données pluviométriques de l'étude

STATION	ANNEES	JAN	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	TOTAL ANNUEL
SOUBRE	2000	0	20,9	121	58,8	182								382
	2002			42,6	152	79,7	169,2	95,5	97,5	82,9	185,5	381,3		1285,8
	2003		80,7	180	159	181	293,9	22,7						917,3
	2004								104,5	268,8	262,6	128,5	49,8	814,2
	2005	0	78,1	80,4	125	115	122,2	15,2	73,9	246,9	288,8	70,7	42,1	1258,3
	2006	83,5	106	170	191	225	317,2	43,9	29,2	185,6	145,9	33,8	0	1530,3
	2007	0	151	90,3	151	101	172,4	141,8	156,6	187,1	236,2	150	87	1625
	2008		66,7	116	112	145	262,9	211,8	69,7	320,8	102,4	91,1	16,9	1515,5
	2009	31,9	50,7	121	211	185	137,9	69,5	36,5	31	89,8	216,1	69,5	1249,6
	2010	66	119	170	143	222	318,9	124,3	351	246,3	180,6	127,3	31,7	2100,3
	2011	5,5	152	179	107	144	240	96,6	85,3	340,7	279,5	76	7,2	1712,5
	2012	7,5	193	53,4	136	202	301,2	69,3	55,2	66,3	147,1	105,3	84,8	1421
	2013	11,5	14,1	195	124	231	268	117,4	50,6	122,9	145,6	314,9	77,9	1673,5
	2014	44,7	76,3	171	211	233	294,3	132,1	146,9	268,5	99,1	175,4	34,5	1886,5
	2015	0	36	102	266	211	245,1	26,3	92,1	51,5	189,2	114,3	10,1	1342,7
	2016	10,2	15	92	106	253	132,3	115,2	212,8	189,2	290,3	60	100	1575,8
	2017	0	34,5	80,8	254	121	281,5	114	241	125	192,5	41,5	0	1486,1
	2019	30	35	87,8	216	209	226	76,7	211,5	175	150	90,6	50	1557,6
	2020	20	25	147	207	253	60	70				341,2		1123,2
STATION	ANNEES	JAN	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	TOTAL ANNUEL
BUYO	2006	9,5	78,8	346	265	285	308,4	55,6	123,6	262,1	246,7	200,8	2,8	2184,1
	2008	0	28	221	76,8	114	245,3	181,2	60,1	218,9	244,6	61,9	0	1451,5
	2009	0	140	150	219	229	186,5	9,6	64,5	299,5	123,3	143,9	29,2	1593,4
	2010		143	138	149	293	251,9							975,7
	2011	0	53,2	34	188	141	66	337,3	199,5	197,9	283,8	71,9	11,9	1584,4
	2012	11,6	166	69,7	89,1	263	203,5	209,9	169,6	153,9	361,1	176,9	24,1	1898,1
	2013	13,6	54,9	91	170	324	270,9	121,2	86,6	386,2	184,3	140,8	0	1843,4
	2014	13,1	114	127	252	338	277,8							1121,4
	2015	0	36,2	126	237	78,2	192,8	84	143,8	307,5	329,6	153,1	0	1687,4
	2016	40,7	12,3	150	80,3	133	217,4	110,7	229,9	265,7	152,3	49,2	61,5	1503,7
	2018	27,1	87,5	156	56,4	137	333,7	104,4	80,5	659,5	283,8	105,8	23,9	2055,5
	2019	0	8,9	48,6	162	221	198,3	115,4			242,7	59,2	39,2	1096,1
2020	0	51,3	176	171	128	66,1							592,3	

Source : SODEXAM, 2020

## 6- Données de débits de l'étude

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	QMA
1981				51,66	101,69	74,68	395,81	743,58	747,49	319,97	139,96	59,93	293
1982	29,5	26,1	22,2	70,9	95,5	114,1	256,9	602,1	819,9	428,4	198,3	78,3	229
1983	41,4	32,5	15,4	19,3	42,6	68,4	85,6	222,5	420,0	178,0	78,9	36,1	103
1984	12,3	5,0	7,0	11,4	54,3	100,7	182,6	478,4	582,4	293,9	105,6	41,7	156
1985	17,9	5,9	6,8	8,8	36,1	41,5	265,3	860,3	890,1	375,7	152,5	60,9	227
1986	24,9	13,0	23,8	20,8	29,1	43,5	105,2	322,4	519,2	279,8	203,6	53,1	137
1987	24,7	14,3	12,3	14,2	7,5	54,0	70,5	308,7	695,8	445,6	120,5	60,4	152
1988	21,1	7,8	6,3	14,0	32,9	55,8	184,0	687,9	1 076,7	345,0	131,6	58,7	218
1989	19,7	7,6	14,4	14,4	0,0	36,5	204,4	579,2	875,4	370,8	120,9	54,9	192
1990	30,3	9,5	7,1	24,6	64,4	39,1	107,5	0,0	375,3	0,0	0,0	101,3	63
1991	31,3	15,0	15,1	32,7	61,0	116,9	200,0	400,1	0,0	279,4	120,7	46,7	110
1992	16,8	14,2	7,2	12,3	40,0	110,7	204,9	482,8	537,3	409,1	0,0	0,0	153
1993	0,000	7,950	37,871	40,159	72,219	114,443	207,065	368,161	637,700	472,161	177,172	73,926	184
1994	30,3	18,9	18,8	21,0	33,7	59,6	162,6	226,4	1 032,1	1 255,4	581,5	145,2	299
1995	64,3	29,2	30,7	68,8	79,0	86,3	204,5	625,2	1 043,0	444,3	215,7	96,4	249
1996	49,9	62,7	40,4	57,6	71,6	165,4	232,6	445,5	926,4	596,5	184,1	122,6	246
1997	71,3	27,2	11,9	82,4	103,0	254,4	344,4	670,0	952,9	431,2	250,2	103,1	275
1998	48,4	30,1	12,8	59,9	112,0	160,4	442,6	610,0	896,8	577,8	223,3	110,1	274
1999	56,4	24,7	24,8	46,3	59,5	74,8	196,6	422,1	987,9	913,7	277,3	146,3	269
2000	110,6	59,1	27,5	47,1	87,1	160,6	222,6	689,7	860,5	752,1	300,9	131,0	287
2001	66,7	31,9	31,0	78,3	70,2	92,4	217,0	592,7	722,2	467,5	211,3	115,8	225
QMIA	38	22	19	37	58	97	205	480	743	466	183	82	202

Source : DHH, 2020

## 7 - Protocole d'entretiens

**Sujet de thèse de doctorat : « Crues et risques d'inondation dans le bassin versant aménagé du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré (Sud-ouest de la Cote d'Ivoire)**

Questionnaire à destination des ménages/exploitants agricoles et personnels administratifs

### A/ Renseignements personnels :

❖ Vous êtes :

Un homme

Une femme

❖ Vous avez :

Moins de 30 ans

Entre 31 ans et 40 ans

Entre 41 ans et 50 ans

Entre 51 ans et 70 ans       Plus de 70 ans

❖ Quelle profession exercez-vous ?

.....

❖ Votre niveau d'étude ?

Aucun       Primaire       Secondaire       Universitaire

❖ Depuis quand vivez-vous ici ?

.....

**B/ Connaissance des risques et catastrophes naturelles.**

1 Avez-vous déjà entendu parler de risques naturels ?

Oui       Non       Je ne sais pas

2 Connaissez-vous les risques d'inondation ?

Oui       Non       Un peu

3 Avez-vous déjà été victime d'inondation ? (Oui ou non)

Oui       Non

Si oui, à quel niveau ?

Habitation       Exploitation (Champ)       Autre

4 Avez-vous déjà entendu parler des inondations dans la zone du bassin du Sassandra ?

Oui       Non

Si oui, citez le lieu et l'année

.....

5 Selon vous quelles sont les causes des inondations

- Ouverture du barrage       Pluie excessive      Autres   
 Phénomènes divins (naturels)

6 A quel degré (niveau) les inondations vous ont-elles marqué (réponse libre) ?  
 .....  
 .....

7 Selon vous qu'est ce qui est plus dangereux ?

L'ouverture des vannes des barrages

La montée des eaux du fleuve par la pluie  
 8 Précisez les conséquences et les dégâts des inondations

(Conséquences matérielles, humaines et environnementales)

.....  
 .....  
 .....

9 Comment viviez-vous lorsque vos champs ou habitations sont exposés aux eaux pendant les saisons de pluie (inondation) ?

.....  
 .....

10 A quand (la date) remonte la dernière inondation dont vous souvenez-vous ?

.....

### C/ Barrage de Soubré et Buyo

11 Que pensez-vous de la construction des barrages hydroélectriques dans le bassin versant du Sassandra à Soubré.

- Utile pour le développement de la région       Source de destruction des cultures  
 Production d'électricité       Indifférent

12 Quels sont les changements occasionnés par les barrages ?

.....  
 .....

13 Existe-t-il un moyen d'alerte ou d'information des crues mis en place par les gestionnaires des barrages ?

Oui

Non

Je ne sais pas

**D/ Gestion et stratégies d'adaptation au risque d'inondation**

14 Vous sentez-vous en sécurité dans votre plantation (ou habitation) par rapport au risque d'inondation pendant les saisons de pluie ?

Très en sécurité

Plutôt en sécurité

Pas du tout en sécurité

15 Quelles sont les mesures de prévention que vous prenez ?

.....  
.....

16 Que faudrait-il faire pour limiter le risque d'inondations selon vous ?

.....  
.....

17 Combien d'inondations avez-vous connu depuis que vous vivez (ou travaillez) ici ?

.....

18 Existe-t-il une stratégie locale de gestion des risques d'inondation dans le bassin versant dont vous avez déjà entendu parler ?

Oui

Non

Je ne sais rien

19 Pensez-vous que les barrages constituent un moyen de lutte contre les inondations fluviales au sein du bassin du Sassandra ? Si Oui (expliquer votre réponse si possible)

Oui

Non

Je ne sais rien

.....  
.....

**MERCI POUR VOTRE DISPONIBILITE !**

## 8 – Débits de crues de référence au niveau bassin versant du Sassandra à Soubré

**TABLEAU IV**  
**DEBITS de CRUES**

Cours d'eau	Station	Superficie du bassin versant km <sup>2</sup>	Crue annuelle médiane		Crue décennale		Crue centenaire		Crue exceptionnelle	
			Débit absolu m <sup>3</sup> /s	Débit spécifique l/s.km <sup>2</sup>	Débit absolu m <sup>3</sup> /s	Débit spécifique l/s.km <sup>2</sup>	Débit absolu m <sup>3</sup> /s	Débit spécifique l/s.km <sup>2</sup>	Débit absolu m <sup>3</sup> /s	Débit spécifique l/s.km <sup>2</sup>
CAVALLY	FLAMPLEU	2 200	200	91	300	135	450	205	600	270
	TAI	12 400	730	59	1200	97	1700	137	2250	182
	GRABO	27 500	(1400)	(51)	(2000)	(72,5)	(2800)	102	(3500)	(127)
SASSANDRA	SEMIEN	29 300	1200	41	1800	61,5	2500	85,5	3200	109
	GUESSABO	35 400	1500	42,5	2150	61	2900	82	3500	99
	SOUBRE	62 200	H = 410 cm	-	H = 520 cm	-	(H = 650 cm)	-	(H = 750 cm)	-
BAFING	KAMANO (Rte MAN-TOUBA)	5 930	(300)	(50,5)	(525)	(88,5)	(750)	(126)	(1050)	(177)
	TABALA	7 740	(375)	(48,5)	(650)	(84)	(925)	(120)	(1300)	(168)
DROU	MAN (prise d'eau)	50	12,5	250	30	600	-	-	100	2000
BOUBO	DIVO	2 680	75	28	200	75	-	-	-	-
BANDAMA	Rte FERKESSEDOUGOU-KORHOGO	7 000	220	31,5	540	77	950	135	1400	200
	MARABADIASSA	22 330	(725)	(32,5)	(1230)	(55)	(1900)	85	(2600)	116,5
	Rte BEOUMI-SEGUELA	26 200	800	30,5	1350	51,5	2050	79	2800	107
	KOSSOU	32 400	950	29	1575	48,5	2400	74	3250	100
	BRIMBO	60 300	1400	23	2300	38,1	3350	55,5	4500	75
	TIASSALE	94 250	1800	19	3100	33	5000	53	7000	74,5
MARAHOUE	MANKONO	6 670	(380)	(57)	(760)	(114)	(1300)	(195)	(2000)	(300)
	Rte BEOUMI-SEGUELA	12 660	560	44	1025	81	1700	134	2500	197
	BOUAFLE	20 700	590	28,5	1075	52	1800	87	2600	126
NZI	FETEKRO	10 500	45	4,3	140	13,3	350	33	700	66,5
	ZIENOA	33 150	480	14,5	1000	30	1700	51	2500	75
AGNEBY	AGBOVILLE	4 600	90	19,5	190	41	350	76	550	120
COMOE	ANIASSUE	70 200	1300	18,5	2400	34	3850	55	5500	78,5
BIA	AYAME	9 320	450	48	650	70	925	100	1200	129
BAGOE	GUINGUERINI	1 040	100	96	200	192	330	315	500	480

Source : G. Girard et L. Touchebeuf, (1962, p. 44)

## 9- Cadre institutionnel de gestion des crues et principaux acteurs techniques

Institution	Direction /Service	Responsabilités
Ministères de l'Assainissement et de la Salubrité Urbaine	Office National de l'Assainissement et du Drainage (ONAD)	Maîtrise d'ouvrage déléguée des projets et la supervision des contrats d'exploitation. Intervention lors des inondations dans la gestion des actions de reconstruction et de relèvement.
Ministère de la Santé et de l'Hygiène publique	Institut National d'Hygiène Publique (INHP) et comité de gestion des épidémies	Veille des épidémies au niveau national, ainsi que dans la réponse aux catastrophes
	Service d'Aide Médicale d'Urgence (SAMU)	Intervention médicale
Ministère de la Solidarité, de la Cohésion Sociale et de l'Indemnisation des Victimes		Affaires sociales, intervient dans la réponse lors des inondations
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique	UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières de l'Université	Etudes prospectives dans le domaine de la gestion des risques naturels
	UFR des Sciences de Gestion et de l'Environnement	
	Institut de Géographie tropicale	Etudes sur les risques et leurs conséquences
Ministère en charge de transport	Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM)	Service de météorologie nationale ; veille climatique et météorologique (bulletins météorologiques et les alertes précoces)
Ministère de la Communication	Radiotélévision Ivoirienne (RTI 1, RTI 2, la Radio - Côte d'Ivoire et le quotidien FRATERNITE MATIN)	Sensibilisation et informations
<b>AU PLAN LOCAL</b>		
Union des Villes et Communes de Côte d'Ivoire (UVICOCI)	Villes et Communes	Amélioration du cadre de vie des populations locales
Assemblée des Régions et Districts de Côte d'Ivoire (ARDCI)	Régions et Districts	Amélioration du cadre de vie des populations locales
Croix Rouge de Côte d'Ivoire		Réponse aux besoins des sinistrés

### Principaux acteurs techniques dans la gestion des risques de catastrophes

Institution	Direction /Service	Responsabilités
ONPC	Campagne de sensibilisation menée une fois par an contre les effets de pluies diluviennes.	Les messages du gouvernement sont diffusés sur des thématiques spécifiques, en collaboration avec les communes, à Abidjan et à l'intérieur du pays, dans le but de limiter les dommages et les pertes dus aux inondations.
ONAD	Construction des barrages écrêteurs des crues dans les zones de la ville d'Abidjan qui connaissent des inondations récurrentes.	Des constructions anarchiques ont été démolies et certains caniveaux débouchés afin de limiter ou de freiner la récurrence des inondations urbaines.
Préfecture d'Abidjan	Déclenchement plan ORSEC	Intervention
SODEXAM	Bulletins météorologiques et alertes précoces	Prévention

### Principaux partenaires financiers dans la gestion des risques de catastrophes

ABV	Réhabilitation du bassin versant et de sa côte en aval.	Etude sur la restauration et la protection des lits de la Volta Noire et de ses affluents à travers des campagnes participatives de reboisement » dans la zone ivoirienne du bassin de la Volta
PNUE/FEM	Analyse des contraintes – politiques législatives et institutionnelles – de gouvernance	Amélioration des capacités des pays à planifier et à gérer le bassin versant de la Volta sur leur territoire, ses ressources aquatiques et ses écosystèmes de manière durable.
UEMOA	Analyse des vulnérabilités aux catastrophes et des capacités de réponse en Côte d'Ivoire	Conception du document - outil d'aide à la décision, de guide d'information, d'éducation, de sensibilisation et d'auto formation en Gouvernance du risque et diagnostic de vulnérabilité de la Côte d'Ivoire
PNUE/FEM	Analyse diagnostique transfrontalière du bassin versant de la Volta	Résolution des problèmes transfrontaliers dans le bassin versant de la Volta et sa zone côtière en aval...
PNUD	Appui au renforcement des capacités en matière de réduction des risques de catastrophe, de préparation à la	A travers son programme Protection de l'Environnement et Gestion Durable des Ressources Naturelles (PEGDRN) qui incluait un volet changement climatique, catastrophes naturelles et technologiques

## TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE.....	2
DÉDICACE.....	3
REMERCIEMENTS .....	4
RÉSUMÉ.....	6
ABSTRACT .....	7
LISTE DES FIGURES .....	8
LISTES DES TABLEAUX.....	12
LISTES DES PHOTOS.....	14
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES .....	15
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	17
1. Contexte scientifique de l'étude .....	17
2. Structure du document.....	18
<b>PREMIÈRE PARTIE : CADRE THÉORIQUE ET CARACTÉRISTIQUES DU BASSIN-VERSANT AMÉNAGÉ DU FLEUVE SASSANDRA À L'EXUTOIRE DE SOUBRÉ.....</b>	<b>20</b>
CHAPITRE 1 : CADRE THÉORIQUE DE L'ÉTUDE.....	22
1.1. Justification du choix du sujet .....	22
1.2. Motivations de l'étude .....	23
1.3. Définition des concepts .....	24
1.4. État des connaissances.....	35
1.4.1. Risques naturels en Côte d'Ivoire : phénomènes climatiques en croissance avec de réelles conséquences sur les populations et l'environnement .....	36
1.4.2. Impacts des aménagements des barrages hydroélectriques : entre développement socio-économique et génération de dégâts naturels et sociaux .....	37
1.4.3. Barrages hydroélectriques, crues et risques d'inondation .....	40
1.4.4. Méthodes de détermination des débits de crues .....	43
1.4.5 Méthodes hydrologiques de prévision des crues et risques d'inondation .....	49
1.4.5.1 Modèles opérationnels de prévision de crue et gestion des situations des catastrophes d'inondation : modèle GRP .....	50
1.4.5.2 Cas du modèle hydrologique GR4J.....	50
1.4.6 Approches multiples des risques d'inondation.....	53

1.4.7	Systèmes d'information géographique (SIG) et risque d'inondation.....	56
1.4.8	Intérêt de la cartographie de l'occupation du sol.....	57
1.4.9	Synthèse des travaux sur les risques d'inondation dans le bassin-versant du Sassandra .....	59
1.5.	Problématique.....	61
<b>CHAPITRE 2 : CONTEXTES PHYSIQUE ET HUMAIN DU BASSIN-VERSANT</b>		
	<b>AMÉNAGÉ DU SASSANDRA À L'EXUTOIRE DE SOUBRÉ.....</b>	<b>66</b>
2.1	Situation géographique du bassin-versant du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré .....	66
2.2	Caractéristiques physiques du bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré..	68
2.2.1	Relief et morphologie du bassin-versant aménagé.....	68
2.2.2	Réseau hydrographique du bassin-versant aménagé.....	69
2.2.3	Régime et caractéristiques hydrologiques du bassin-versant aménagé à Soubré.....	72
2.2.4	Caractéristiques climatiques de la zone aménagée à l'exutoire de Soubré.....	73
2.2.4.1	Pluviométrie générale dans le bassin aménagé à l'exutoire de Soubré.....	74
2.2.4.2	Répartition des pluies dans le bassin aménagé de Soubré.....	75
2.2.4.3	Humidité relative et température dans le bassin aménagé de Soubré.....	76
2.2.4.4	Évapotranspiration potentielle (ETP) dans le bassin aménagé de Soubré.....	77
2.2.5	Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques du bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré.....	78
2.2.6	Pédologie du bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré.....	80
2.2.7	Végétation du bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré.....	82
2.3	Caractéristiques humaines et aménagement des barrages hydroélectriques du bassin- versant du Sassandra à Soubré.....	84
2.3.1	Peuplement et caractéristiques démographiques des populations dans le bassin versant aménagé du Sassandra à l'exutoire à Soubré.....	85
2.3.2	Activités socio-économiques dans le bassin aménagé du Sassandra à Soubré.....	87
2.3.3	Importance de l'agriculture dans le bassin aménagé du Sassandra à Soubré.....	88
2.3.4	Pêche dans le bassin versant aménagé du Sassandra à Soubré.....	89
2.3.5	Élevage dans le bassin aménagé du Sassandra à Soubré.....	91
2.3.6	Historique et caractéristiques des aménagements hydroélectriques sur le bassin versant du Sassandra à l'exutoire de Soubré.....	91
<b>DEUXIÈME PARTIE : DONNÉES ET APPROCHES MÉTHODOLOGIQUES DE</b>		
	<b>L'ÉTUDE .....</b>	<b>104</b>

CHAPITRE 3 : DONNÉES ET MÉTHODES D'ACQUISITION DE L'INFORMATION DE L'ÉTUDE.....	106
3.1 Sources et qualités des données collectées .....	106
3.1.1 Documents textuels.....	106
3.1.2 Données hydroclimatiques (hydrométriques et pluviométriques).....	106
3.1.2.3.1 CHIRPS : Le Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data....	109
3.1.2.3.2 Les données de température JRA-55 du JMA.....	110
3.2. Méthodes d'acquisition de l'information .....	112
3.2.1 Données issues d'enquêtes sur le terrain .....	112
3.3 Outils et matériels de traitement des données .....	115
CHAPITRE 4 : MÉTHODES DE TRAITEMENT DES DONNÉES .....	116
4.1. Comblement des données hydrométriques (méthode des doubles cumuls) .....	116
4.2. Régionalisation du champ de pluie.....	116
4.3 Méthode d'analyse du régime hydropluviométrique et des fréquences des précipitations .....	118
4.3.1 Étude des tendances et paramètres de dispersion .....	118
4.3.2 La moyenne arithmétique .....	118
4.3.3 Les paramètres de dispersion.....	118
4.3.4 Les indices hydropluviométriques de caractérisation des précipitations.....	119
4.3.4.1 Le cumul pluviométrique (CP) .....	119
4.3.4.2 L'indice de pluviosité (IP) .....	119
4.3.4.3 L'indice de précipitation normalisé (ou standardisé-SPI) .....	120
4.3.4.4 Estimation de la moyenne mensuelle des données pluviométriques décennales .....	122
4.3.5 Tests statistiques au sein des séries chronologiques.....	122
4.3.5.1. Test de « rupture » de PETTITT (Pettit, 1979) .....	122
4.3.5.2. Statistique U de BUISHAND (Buishand, 1982, 1988).....	123
4.3.5.3. Ellipse de contrôle (Ellipse de P. BOIS) .....	123
4.3.6 Analyse de la relation statistique entre la pluie et les débits .....	124
4.4 Méthode de caractérisation des débits de crues : méthode fréquentielle.....	124
4.4.1 Échantillonnage (constitution de la série des valeurs).....	125
4.4.1.1 Méthode des valeurs maximales annuelles.....	125
4.4.1.2 Vérification des tests d'hypothèses .....	126
4.4.1.2.1 Test d'indépendance.....	126
4.4.1.2.2 Test d'homogénéité .....	127

4.4.1.2.3 Test de stationnarité .....	128
4.4.2 Choix et type de modèle fréquentiel.....	130
4.4.2.1 Choix d'une loi statistique d'analyse des fréquences (ajustement).....	131
4.4.2.2 Choix du modèle fréquentiel .....	132
4.4.2.2.1 Loi de Gumbel.....	132
4.4.2.2.2 Loi de Log-normale et Pearson type 3 .....	133
4.4.2.3 Ajustement du modèle fréquentiel (loi de Gumbel) .....	134
4.4.2.3.1 La méthode du maximum de vraisemblance.....	134
4.4.2.3.2 Ajustement graphique et contrôle visuel.....	135
4.4.2.4 Contrôle de l'ajustement du modèle fréquentiel.....	136
4.4.2.4.1 L'ajustement graphique.....	136
4.4.2.4.2 Critère de validation (AIC et BIC).....	136
4.4.2.5 Exploitation du modèle fréquentiel .....	137
4.5 Méthode d'évaluation du risque d'inondation fluviale dans le bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré.....	138
4.5.1 Cartographie des facteurs d'aléa inondation fluviale dans le bassin versant du Sassandra à Soubré .....	138
4.5.1.1. Cartographie de l'intensité pluviométrique.....	138
4.5.1.2. Cartographie des altitudes et des pentes.....	139
4.5.1.3. Cartographie de la densité de drainage .....	139
4.5.1.4. Cartographie de l'accumulation des débits .....	140
4.5.1.5. Cartographie de l'indice d'humidité topographique (TWI) .....	140
4.5.2 Évaluation des enjeux exposés à l'inondation fluviale dans le bassin-versant aménagé du Sassandra à Soubré .....	141
4.5.2.1 Cartographie de la densité de population .....	141
4.5.2.2 Cartographie de la zone d'influence du réseau hydrographique .....	141
4.5.2.3 Cartographie de l'occupation du sol dans le bassin-versant de Soubré.....	142
4.5.2.3.1 Traitement numérique des images satellitaires .....	142
4.5.2.3.2 Prétraitement des données et informations des images satellitaires.....	142
4.5.2.3.3 Composition colorée .....	143
4.5.2.3.4 Interprétation visuelle des images .....	143
4.5.2.3.5 Classes d'occupation du sol retenues .....	144
4.5.2.3.6 Classification supervisée des images et validation .....	145
4.5.3 Application de la méthode d'analyse multicritère de Saaty (AHP).....	146

4.5.3.1 Hiérarchisation des facteurs d'analyse du risque d'inondation fluviale.....	147
4.5.3.1.1 Hiérarchisation des facteurs d'aléa inondation .....	147
4.5.3.1.2 Hiérarchisation des facteurs d'enjeux exposés à l'aléa inondation fluviale.....	150
4.5.3.2 Classification et standardisation des critères de risque d'inondation fluviale.....	152
4.5.3.3 Pondération des critères d'analyse du risque d'inondation fluviale .....	153
4.5.3.4 Normalisation de la matrice.....	153
4.5.3.5 Vérification de la cohérence du jugement .....	155
4.5.3.6 Agrégation des facteurs .....	157
4.6 Méthode d'application du modèle hydrologique GR4J pour la prévision des crues dans le bassin hydrographique du Sassandra à l'exutoire de Soubré.....	161
4.6.1 Structure et fonctionnement du modèle GR4J.....	161
4.6.2 Validation croisée et comblement des débits lacunaires .....	162
4.6.2.1 Validation croisée (cross-validation).....	162
4.6.2.2 Comblement des données de débits.....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DÉFINI.</b>
4.6.2.3 Critère de qualité de l'ajustement du modèle .....	163
4.6.2.4 Calibration du modèle .....	164
4.6.2.5 Validation du modèle.....	165
<b>TROISIÈME PARTIE : ANALYSE DES RÉSULTATS, INTERPRÉTATIONS ET DISCUSSIONS.....</b>	
<b>167</b>	
<b>CHAPITRE 5 : DYNAMIQUE DES CONDITIONS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE CRUES DANS LE BASSIN-VERSANT AMÉNAGÉ DU FLEUVE .....</b>	
<b>SASSANDRA À L'EXUTOIRE DE SOUBRÉ.....</b>	
<b>169</b>	
5.1 Analyse spatio-temporelle des conditions pluviométriques dans le bassin-versant aménagé du Sassandra à Soubré.....	169
5.1.1 Caractéristiques des séries pluviométriques dans le bassin aménagé de Soubré .....	169
5.1.2 Précipitations moyennes dans le bassin aménagé du Sassandra à Soubré .....	170
5.1.3 Cumul pluviométrique et indice de pluviosité du bassin à l'exutoire de Soubré .....	172
5.1.4 Régime pluviométrique du bassin à l'exutoire de Soubré.....	173
5.1.5 Analyse de l'indice standardisé (ou normalisé) de précipitation (SPI) à l'exutoire de Soubré (station de Soubré) .....	174
5.1.6 Analyse interannuelle des mois pluvieux dans le bassin aménagé du Sassandra à Soubré.....	177
5.1.7 Analyse des moyennes décennales pluviométriques dans le bassin au cours des décennies 1989-1998, 1999-2009, 2010-2019 .....	178

5.1.8	Variation spatio-temporelle de la pluviométrie dans le bassin aménagé du Sassandra à Soubré au cours des décennies 1990-1999, 2000-2009, 2010-2019.....	180
5.1.9	Tendances et ruptures au sein des séries pluviométriques de la période 1989-2019 dans le bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré.....	182
5.2	Dynamique hydrologique dans le bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré.....	183
5.2.1	Caractéristiques des séries hydrométriques dans le bassin aménagé à Soubré .....	183
5.2.2	Débits moyens annuels du fleuve Sassandra dans le bassin aménagé de Soubré.....	184
5.2.2.1	Au niveau de l'exutoire de Soubré .....	184
5.2.2.2	Au niveau de l'exutoire de Piebly .....	184
5.2.3	Évolution des débits annuels du fleuve Sassandra à l'exutoire de Soubré.....	186
5.2.4	Analyse du régime hydrologique du Sassandra à l'exutoire de Soubré .....	186
5.2.5	Évolution des débits extrêmes du fleuve Sassandra à Soubré et Piebly.....	188
5.2.6	Fluctuation des débits moyens mensuels dans le bassin versant aménagé à Soubré..	189
5.3	Discussion.....	190

## CHAPITRE 6 : FRÉQUENCE DES FACTEURS PLUVIO-HYDROLOGIQUES DE

### GÉNÉRATION DES CRUES DANS LE BASSIN-VERSANT AMÉNAGÉ . DU FLEUVE SASSANDRA À L'EXUTOIRE DE SOUBRÉ.....

6.1	Analyse fréquentielle des hauteurs pluviométriques à l'exutoire du bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré.....	194
6.1.1	Fréquence des hauteurs pluviométriques dans le bassin aménagé .....	194
6.1.2	Vérification des hypothèses de base appliquées aux maximales pluviométriques.....	195
6.1.3	Ajustement graphique des hauteurs maximales de pluie mensuelle.....	196
6.1.4	Estimation des périodes de retour des hauteurs pluviométriques maximales dans le bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré.....	199
6.2	Analyse fréquentielle des débits maximaux journaliers à l'exutoire du bassin aménagé de Soubré .....	200
6.2.1	Fréquence d'apparition des débits maximaux dans le bassin aménagé de Soubré.....	200
6.2.2	Vérification des hypothèses appliquées aux débits maximums annuels .....	201
6.2.3	Ajustement graphique des débits maximaux dans le bassin aménagé de Soubré .....	202
6.2.4	Estimation des périodes de retour des débits journaliers maximums dans le bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré.....	203
6.3	Crues : résultantes de la relation entre intensités de pluies et débits dans le bassin-versant aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré .....	204

6.4	Discussion.....	205
<b>CHAPITRE 7 : RISQUE D'INONDATION FLUVIALE DANS LE BASSIN-VERSANT</b>		
<b>AMÉNAGÉ DU FLEUVE SASSANDRA À SOUBRÉ.....</b>		
7.1	Cartographie des facteurs du risque d'inondation fluviale dans le bassin aménagé de Soubré.....	208
7.1.1.	Cartographie des facteurs d'aléa à l'inondation fluviale dans la zone aménagée de Soubré.....	208
7.1.1.1	Ruissellement résultant de la relation pluie-débit dans le bassin aménagé de Soubré.....	208
7.1.1.2	Carte des dérivés topographiques (altitude, pentes, TWI).....	209
7.1.1.2.1	Carte d'altitude et pente .....	210
7.1.1.2.2	Carte de l'indice d'humidité topographique (TWI) .....	212
7.1.1.3	Densité du drainage .....	213
7.1.2.	Enjeux face à l'inondation fluviale dans la zone aménagée de Soubré.....	214
7.1.2.1	Unités d'occupation et d'usage du sol dans la zone aménagée .....	214
7.1.2.2	Densité de population, facteur d'enjeu humain .....	216
7.1.2.3	Carte de la distance des enjeux au réseau hydrographique .....	217
7.2	Analyse des niveaux de risque d'inondation fluviale dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré .....	219
7.2.1	Définition de la zone d'aléa d'inondation fluviale dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Soubré .....	219
7.2.2	Enjeux dans le bassin aménagé du Sassandra à l'exutoire de Soubré .....	221
7.2.3	Niveau de risque d'inondation fluviale dans le bassin aménagé du Sassandra à Soubré .....	223
7.3	Discussion.....	224
<b>CHAPITRE 8 : CONSÉQUENCES ET MESURES STRATEGIQUES DE GESTION</b>		
<b>INTÉGRÉE DES RISQUES D'INONDATION À L'ÉCHELLE DU</b>		
<b>BASSIN-VERSANT AMÉNAGÉ DE SOUBRÉ .....</b>		
8.1.	Conséquences des inondations dans le bassin aménagé du Sassandra à Soubré.....	228
8.2.	Plan d'actions et stratégies de gestion des risques de crues et inondations.....	229
8.2.1	Stratégies de gestion du risque d'inondation à l'échelle du bassin-versant aménagé de Soubré.....	229
8.2.2	Plan d'action national et stratégies de gestion du risque d'inondation.....	229
8.2.2.1	Cadres institutionnel, règlementaire et organisationnel de gestion du risque de catastrophes en Côte d'Ivoire .....	229

8.2.2.2 Plan d'action national de réduction des risques de catastrophes (RRC) .....	231
8.3. Mesures et outils prévisionnels des crues et risques d'inondation dans le bassin aménagé de Soubré.....	232
8.3.1. Surveillance et alerte .....	232
8.3.2. Gestion des situations de catastrophes d'inondations : plans d'Urgence au niveau départemental.....	234
8.4. Modélisation hydrologique pour la prévision des crues dans le bassin aménagé à l'exutoire de Soubré.....	235
8.4.1. Vérification de la consistance des données de modélisation avant reconstitution .....	235
8.4.2. Cohérence entre les données de débits observés et les précipitations enregistrées à la station de Soubré .....	236
8.4.3. Variabilité des débits observés et simulés à Soubré avant reconstitution .....	237
8.4.4. Variabilité des débits observés et simulés à l'exutoire de Soubré après reconstitution .....	240
8.5. Recommandations .....	242
8.6. Discussion.....	244
CONCLUSION GÉNÉRALE .....	247
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES .....	252
ANNEXES .....	273
TABLE DES MATIÈRES .....	284

## LISTES DES PUBLICATIONS TIRÉES DE LA THÈSE

1- ANALYSE FRÉQUENTIELLE DES MAXIMA HYDROPLUVIOMÉTRIQUES, FACTEURS DE CRUES ET RISQUE D'INONDATION FLUVIALE DANS LE BASSIN AMÉNAGÉ DU FLEUVE SASSANDRA, SOUBRÉ, CÔTE D'IVOIRE

Rev. Ivoir. Sci. Technol., 42 (2023) 142 - 161 ISSN 1813-3290, <http://www.revist.ci>

Kouakou Fidèle Constant KOUAMÉ, *Institut de Géographie Tropicale (IGT), Groupe de Recherche « Gestion des Risques Naturels dans les Territoires et les Sociétés » (GRTS), Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, BP V34, Abidjan 01, Côte d'Ivoire*  
(reçu le 15 Août 2023 ; accepté le 30 Novembre 2023)

2 - ANALYSE DU RISQUE D'INONDATION FLUVIALE PAR APPROCHE HIERARCHIQUE MULTICRITÈRE DANS LE BASSIN AMÉNAGÉ DU FLEUVE SASSANDRA A SOUBRÉ (CÔTE D'IVOIRE)

*Revue de géographie du laboratoire Leïdi\_ISSN 0851-2515\_N°30\_Décembre\_2023, pp. 66-79*  
Kouakou Fidèle Constant KOUAMÉ, *Doctorant, Institut de Géographie Tropicale (IGT), Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan Côte d'Ivoire*  
Lionel Arnaud N'CHO, *Docteur en Géographie, Ministère de la Construction, du Logement et de l'Urbanisme, Côte d'Ivoire*

3 - CARACTÉRISATION DES CONDITIONS DE RISQUE D'INONDATION FLUVIALE À L'AIDE D'INDICES PLUVIOMÉTRIQUES DANS LE BASSIN AMÉNAGÉ DU SASSANDRA A SOUBRÉ (SUD-OUEST, CÔTE D'IVOIRE)

*Revue Baluki, Juin 2023 (7ème année), n°13, Vol. VII, pp. 128-141*

KOUAKOU FIDÈLE CONSTANT KOUAMÉ, *Doctorant, Institut de Géographie Tropicale (IGT), Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan Côte d'Ivoire*  
ALLA DELLA ANDRÉ, *Professeur Titulaire, Institut de Géographie Tropicale (IGT), Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan Côte d'Ivoire*

4- APPROCHE DE LA PRÉVISION DES CRUES FLUVIALES A PARTIR D'UNE MODÉLISATION HYDROLOGIQUE : CAS DU MODÈLE GR4J APPLIQUÉ AU BASSIN VERSANT AMÉNAGÉ DU FLEUVE SASSANDRA A L'EXUTOIRE DE SOUBRÉ (SUD-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE)

*Revue Espace Géographique et Société Marocaine, Numéro 83, Mars 2024, pp. 125-145*  
Kouakou Fidèle Constant KOUAMÉ, *Doctorant, Institut de Géographie Tropicale (IGT), groupe de recherche, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, kouakou07@gmail.com*

5- RISQUE D'INONDATION PAR DÉBORDEMENT DES COURS D'EAU SUIVANT UNE APPROCHE MULTICRITÈRE DANS LE BASSIN VERSANT AMÉNAGÉ DU FLEUVE SASSANDRA À SOUBRÉ, CÔTE D'IVOIRE

*La Revue des Sciences Sociales « Kafoudal » N°1, 6<sup>e</sup> Année Juin 2024, pp. 51-71*

Kouakou Fidèle Constant KOUAME, Della André ALLA,  
*Institut de Géographie Tropicale (IGT), groupe de recherche « Gestion des risques naturels dans les territoires et les sociétés » (GRTS) Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, Email : kouakou07@gmail.com / Email : gnalladella@gmail.com*