



HAL
open science

ANALYSE DU RISQUE D'INONDATION EN CAS DE RUPTURE DES BARRAGES D'AYAME 1 ET 2 DANS LE DEPARTEMENT D'ABOISSO (SUD-EST COTE D'IVOIRE)

Ohoueu kikou Lionel Arnaud N'CHO

► **To cite this version:**

Ohoueu kikou Lionel Arnaud N'CHO. ANALYSE DU RISQUE D'INONDATION EN CAS DE RUPTURE DES BARRAGES D'AYAME 1 ET 2 DANS LE DEPARTEMENT D'ABOISSO (SUD-EST COTE D'IVOIRE). Sciences de l'Homme et Société. UNIVERSITE FELIX HOUPHOUET BOIGNY DE COCODY, 2022. Français. NNT: . tel-03994785

HAL Id: tel-03994785

<https://hal.science/tel-03994785>

Submitted on 17 Feb 2023

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.

Université Félix Houphouët Boigny



UFR des Sciences de l'Homme et de la Société

Année Académique 2021-2022

Institut de Géographie Tropicale



THÈSE DE DOCTORAT UNIQUE

Discipline : Géographie

Spécialité : GÉOGRAPHIE PHYSIQUE ET ENVIRONNEMENT

ANALYSE DU RISQUE D'INONDATION EN CAS DE RUPTURE DES BARRAGES D'AYAME 1 ET 2 DANS LE DÉPARTEMENT D'ABOISSO (SUD-EST COTE D'IVOIRE)

Présentée par :

N'CHO Ohoueu Kikou Lionel Arnaud

Soutenue publiquement le 30 mars 2022 devant le jury composé de :

M. KOLI-BI ZUELI	Professeur titulaire-Université Félix Houphouët-Boigny	Président
M. ALLA DELLA ANDRE	Professeur titulaire-Université Félix Houphouët-Boigny	Directeur de thèse
M. ZAHIRI ERIC PASCAL GBOAGBLE	Maître de Conférences-Université Félix Houphouët-Boigny	Rapporteur
M. DIPAMA JEAN-MARIE	Professeur titulaire-Université Joseph Ki-Zerbo-Ouagadougou	Rapporteur
M. KONAN KOUADIO EUGENE	Maître de Conférences-Université Félix Houphouët-Boigny	Examineur

SOMMAIRE

<i>PREMIÈRE PARTIE</i>	4
<i>CADRE THEORIQUE ET METHODOLOGIQUE</i>	4
<i>CHAPITRE 1 : CADRE THÉORIQUE</i>	6
<i>CHAPITRE 2 : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE DE L'ÉTUDE</i>	39
<i>DEUXIÈME PARTIE</i>	69
<i>LES BARRAGES D'AYAMÉ 1 ET 2 DANS LE BASSIN VERSANT DE LA BIA</i>	69
<i>CHAPITRE 3 : LE BASSIN VERSANT DE LA BIA</i>	71
<i>CHAPITRE 4 : LES BARRAGES HYDROÉLECTRIQUES D'AYAMÉ ET LES MILIEUX EN AVAL FACE AUX APPORTS HYDROLOGIQUES</i>	108
<i>TROISIÈME PARTIE</i>	132
<i>DOMMAGES POTENTIELS EN CAS DE RUPTURE DES BARRAGES ET GESTION DE L'INONDATION</i>	132
<i>CHAPITRE 5 : CARTOGRAPHIE DE LA ZONE A RISQUE ET DOMMAGES POTENTIELS DES INONDATIONS CAUSEES PAR LA RUPTURE DES BARRAGES</i>	134
<i>CHAPITRE 6 : OUTIL DE GESTION DE L'INONDATION LIEE A LA RUPTURE DES BARRAGES D'AYAME</i>	165
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	194
<i>BIBLIOGRAPHIE</i>	200

DÉDICACE

A mon défunt père N'CHO Abolé Dominique et à mon oncle feu SILLOUE Kati Donatien qui m'ont montré les voies de la réussite.

A ma mère SILIOUE Marie-Joséphine qui a su être patiente.

RÉSUMÉ

Les barrages hydroélectriques sont des infrastructures parfois très imposantes sur le parcours d'un cours d'eau. Ces ouvrages, bien que utiles pour la production d'énergie nécessaire au développement, peuvent aussi mettre en danger les populations installées en aval de leurs réservoirs. La plus grande crainte pour ces habitants serait de voir déferler sur eux l'eau du réservoir d'un barrage qui vient de rompre.

Dans le département d'Aboisso au Sud-Est de la Côte d'Ivoire, les barrages hydroélectriques d'Ayamé 1 et 2 ont été construits sur le fleuve Bia. En aval de ces ouvrages qui retiennent près de 1 000 000 000 m³ d'eau, se trouvent des localités comme Ayamé, Koukourandoumi, Aboisso, Aliékro qui renferment d'importants enjeux dans une vallée régulièrement inondée par la montée des eaux. Les impacts des inondations liées aux crues du fleuve en saison humide ou pendant les déversements des barrages sont considérables, mais restent loin des conséquences qu'une rupture de ces barrages pourrait occasionner. La rupture des barrages étant plus dévastatrice, ce travail vise à analyser le risque d'inondation qu'une telle situation pourrait induire en aval des barrages d'Ayamé 1 et 2. De façon particulière, ce travail a permis d'apprécier les impacts d'écoulement de la retenue d'Ayamé 1 et de connaître l'étendu de l'inondation en aval en cas de rupture de ces ouvrages.

Pour mener cette étude, le SIG est utilisé pour ressortir le modèle numérique de terrain et le réseau hydrographique essentiels à la connaissance des aléas. Sur ces éléments physiques est ensuite superposée la couche des enjeux présents dans le département d'Aboisso. Cette combinaison des aléas et des enjeux a permis de déterminer la zone à risque d'inondation en aval des barrages. Une autre démarche a consisté à simuler la rupture des barrages avec HEC-RAS. Les résultats du modèle sont ensuite intégrés à ArcGis pour réaliser les cartes d'inondation. La simulation révèle une inondation sur une distance de 21,6 km d'Ayamé à Aboisso. A cette échelle comme à celle du département, des villages seront touchés, des plantations et cultures seront détruites et des forêts envahis d'eau. Mais Aboisso reste le site le plus touché en cas de catastrophe, ce qui rendra impossible le transport terrestre entre la Côte d'Ivoire et le Ghana par la route internationale A100.

Mots-clés : Aboisso, barrage hydroélectrique, la Bia, risque d'inondation, catastrophe naturelle, modélisation.

ABSTRACT

Hydroelectric dams are sometimes very imposing infrastructures on the course of a watercourse. These structures, although useful for the production of energy necessary for development, can also endanger the populations installed downstream of their reservoirs. The greatest fear for these inhabitants would be to see the water from the reservoir of a dam that has just broken.

In the department of Aboisso in the south-east of Côte d'Ivoire, the Ayamé 1 and 2 hydroelectric dams were built on the Bia River. Downstream of these structures, which retain nearly 1,000,000,000 m³ of water, are localities such as Ayamé, Koukourandoumi, Aboisso, Aliékro which contain important stakes in a valley regularly flooded by rising waters. The impacts of flooding related to river floods in the wet season or during dam spills are considerable, but remain far from the consequences that a rupture of these dams could cause. The rupture of the dams being more devastating, this work aims to analyze the risk of flooding that such a situation could induce downstream of the dams of Ayamé 1 and 2. In particular, this work made it possible to assess the flow impacts of the Ayamé 1 reservoir and to know the extent of the flood downstream in the event of a rupture of these structures.

To conduct this study, GIS is used to bring out the digital terrain model and the river network essential to the knowledge of hazards. On these physical elements is then superimposed the layer of issues present in the department of Aboisso. This combination of hazards and challenges made it possible to determine the flood risk area downstream of the dams. Another approach was to simulate the rupture of dams with HEC-RAS. The results of the model are then integrated into ArcGis to make the flood maps. The simulation reveals a flood over a distance of 21.6 km from Ayamé to Aboisso. On this scale as in the department, villages will be affected, plantations and crops will be destroyed and forests invaded by water. But Aboisso remains the most affected site in the event of a disaster, which will make it impossible to transport land between Côte d'Ivoire and Ghana by the A100 international road.

Keywords : Aboisso, hydroelectric dam, Bia, flood risk, natural disaster, modelling.

AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS

Cette étude met en relation l'homme et la nature dont les ressources sont utiles pour le développement des territoires. Les pays du nord ont facilité leur développement grâce à l'énergie. Des industries ont ouvert au monde des villes comme Londres et Paris qui sont devenues plus attractives. Mais, l'utilisation des ressources naturelles, la cohabitation de l'homme avec des éléments tels que l'eau où peuvent être érigés des ouvrages défiant parfois des lois de la nature fragilisent souvent le développement tant recherché.

Après les résultats des travaux menés par ALLA Della André, sur "les risques naturels et leur gestion", il s'est révélé pertinent de proposer aux décideurs des outils de gestion préventive des catastrophes et sensibiliser les populations sur les dangers qu'elles encourent en demeurant ou en s'installant dans des zones à risque.

Ce document est le résultat de cinq années de recherches sur le terrain dans le département d'Aboisso et d'échanges enrichissants avec la Compagnie Ivoirienne d'Électricité (CIE).

Pendant ces années, nous avons été encouragé et soutenu par des personnes et c'est là l'occasion de leur exprimer notre gratitude.

Nos remerciements sont d'abord adressés à monsieur ALLA Della André, Professeur Titulaire à l'Institut de Géographie Tropicale (IGT) pour sa confiance et ses conseils, aux familles N'CHO, SILLOUE, YANROU et COULIBALY pour leurs soutiens, leurs conseils et leurs prières.

À ma mère SILIOUE Marie-Joséphine, je dis merci particulièrement pour sa patience. À celle qui était toujours présente quand nous ressentions la fatigue, NONVIDE Danielle, nous espérons qu'elle trouvera satisfaction de son soutien.

Nous n'aurions pas été en thèse sans l'apport de celui qui, pour nous, restera à jamais un maître, le Docteur KRA Yao (☎), Maître-Assistant à l'IGT. Sa rigueur pour l'obtention du MASTER 2 a suscité en nous, l'envie d'aller plus loin. À ses collègues du LAMINAT (Laboratoire d'Etude des Milieux Naturels), le professeur KOLI Bi Zueli et Docteur TOURE Tiyégbo, Maître de Conférence, nous exprimons notre gratitude pour leurs conseils depuis notre admission en géographie physique jusqu'au terme de nos études.

Nous n'oublions pas nos très proches conseillers du LAMINAT, les Docteurs KONAN Eugène, Maître de Conférences et N'GUESSAN Fulgence pour leurs conseils depuis la Licence en Géographie Physique.

Pour écrire cette thèse, il a fallu la volonté d'une société privée qui a bien voulu mettre à notre disposition les données de base. C'est pourquoi nous adressons nos remerciements à la direction générale de la CIE, à la Direction de la Production de l'Energie (DPE). Nos sincères remerciements vont à l'endroit, du directeur des usines d'Ayamé monsieur MANIVOULE Ehui Joseph, de son assistant Monsieur KONE Ladji, de KOUTOUAN Charles de la DPE et tous les agents en poste aux barrages d'Ayamé (KANGAH, TAKI, BOUSSOU, KONE, KAPET, TOURE, etc.) avec qui nous avons mené les enquêtes.

Bien que nous ayons des données de notre étude, l'aspect hydrologique ne pouvait se faire sans l'assistance de spécialistes en hydrologie. C'est pourquoi nous remercions Messieurs KONE et BANDAMA de l'ONEP (Office National de l'Eau Potable) qui nous ont orientés vers des personnes ressources en modélisation hydraulique. En cela, nous remercions le Professeur KOUASSI Lazare de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, les Docteurs MELEDJE et BROU Alexis pour leur très forte contribution dans notre travail.

À nos conseillers en entreprise, Monsieur N'GUESSAN Kouadio Gervais, Maître GNANGORAN De Laurent respectivement Directeur Général et Directeur juridique du CECAT, à Monsieur DADI Désiré de LABEX ; à madame DELOUMEAUX Edith de 2D Consulting, nous leur sommes reconnaissants pour leur confiance.

À nos aînés, amis, père KOUASSI Paulin, père KAMBOU Jean, Docteur GBOGBE Patrick, Docteur MAÏ Gilles, ATCHOUWA Louis, ADOUALOU Jean Michel, YAO Boga Elvis, N'DOMAN Paul, N'CHOT Roméo, KASSI Khan Désiré, ALLA Patrick, ESSAN Jean Baptiste, KONAN Serges et à tous ceux que nous portons dans le cœur.

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

2D CONSULTING	: Développement Durable Consulting
ARIA	: Analyse, Recherche et Information sur les Accidents
CCT	: Centre de Cartographie et de Télédétection
CECAT	: Cabinet d'Étude Cartographique, d'Aménagement et de Tourisme
CHR	: Centre Hospitalier Régional
CIE	: Compagnie Ivoirienne d'Électricité
CIGN	: Centre d'Information Géographique et du Numérique
CILSS	: Comité Permanent Inter État de Lutte Contre La Sécheresse dans le Sahel
CRE	: Centre de Recherche et d'Écologie
CSST	: Comité Santé Sécurité au Travail
DPE	: Direction de la Production de l'Énergie
EECI	: Energie Électrique de Côte d'Ivoire
ESPC	Établissement Sanitaire de Premier Contact
ESRI	: Environmental Systems Research
GPS	: Global Positioning System
GSPM	: Groupement des Sapeurs-Pompiers Militaires
INS	: Institut National de Statistiques
IPCC	: Intergovernmental Panel On Climate Change
IRD	: Institut de Recherche pour le Développement
LABEX	: Laboratoire et Expertise
LAGERIS	: Laboratoire de Géographie de l'Environnement et des Risques
LAMINAT	: Laboratoire d'Etude des Milieux Naturels
LAMTO	: Station de recherche Lamotte et Tournier.

MACOM	: Mission d'Appui à la Conduite d'Opérations Municipales
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NSE-CI	: Nicolas Srouji Établissement Côte d'Ivoire
OCDE	: Organisation de Coopération et de Développement Economique
OIPR	: Office Ivoirien des Parcs et Réserves
OLI	: Operational Land Imager
ONEP	: Office National de l'Eau potable
ONG	: Organisation Non Gouvernementale
ONPC	: Office Nationale de la Protection Civile
ONU-SIPC	: Organisation des Nations Unies - Stratégie Internationale de Prévention des Catastrophes Naturelles
ORSEC	: Organisation de la Réponse de Sécurité Civile anciennement Organisation des Secours
ORSTOM	: Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
PER	: Plans d'Exposition aux Risques
PNUD	: Programme des Nations Unies pour le Développement
POI	: Plan d'Opération Interne
POLLUMAR	: Plan d'urgence de lutte contre les pollutions accidentelles par hydrocarbures et autres produits chimiques dangereux en mer, en lagune et dans les zones côtières
PPI	: Plan Particulier d'Intervention
RETEX	: Retour d'Expérience
RGPH	: Recensement Général de la Population et de l'Habitat
SAGE	: Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux

SIG	: Système d'Information Géographique
SNGRCPACI	: Stratégie Nationale de Gestion des Risques de Catastrophes et Plan d'Action Côte D'Ivoire
SODEXAM	: Société de Développement et d'Exploitation Aéroportuaires, Aéronautique et Météorologique
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission
TIN	: Network Irregular Triangulation
UNESCO- MAB	: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture) - Man and the Biosphere (Programme sur l'Homme et la Biosphère)
UNESCO	: United Nations Educational Scientific and Cultural Organisation (Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture)
WGS	: World Geodesic System (Système Géodésique Mondial)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis les années 1990, on assiste à une augmentation des manifestations des catastrophes naturelles dans le monde (inondations, orages tropicaux, sécheresses, séismes), notamment dans les pays du Sud. Plus de 200 millions de personnes par an sont touchées par des fléaux naturels ou des accidents technologiques, aussi plus de 60 000 personnes sont tuées chaque année selon le haut conseil de la coopération internationale et la Croix-Rouge française (2004). L'un des exemples le plus marquant est le tsunami de 2004 dont les vagues ont déferlé à des hauteurs et vitesses impressionnantes, avec en plus une portée vagues assez grande. Ce tsunami engendré par un séisme sous-marin majeur, a touché les pays du Sud-Est de l'Asie (l'Inde, l'Indonésie, les Maldives, le Sri Lanka et la Thaïlande) et causé plus de 225 000 décès parmi les populations touchées. Selon le rapport de la Fédération Internationale des Sociétés de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge (2009), entre 2004 et 2009, les partenaires de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge ont entrepris la plus grande opération de relèvement après cette catastrophe. Durant les cinq ans qui se sont écoulés depuis la catastrophe, la Croix-Rouge et le Croissant-Rouge ont aidé à construire plus de 51 000 maisons en Inde, en Indonésie, aux Maldives, au Sri Lanka et en Thaïlande, couvrant près de 12 % des besoins totaux en logements dans tous les pays touchés, soit une nouvelle maison sur huit. Et rien qu'au Sri Lanka, la Croix-Rouge et le Croissant-Rouge ont financé 34 000 maisons, soit 30 % du nombre total de maisons endommagées ou détruites.

Ce triste constat confirme cette pensée de Pulvirenti et al. (2011), cité par Tanguy (2012) : "*les inondations sont de toutes les catastrophes naturelles qui frappent le monde chaque année, les plus fréquentes, les plus dommageables et les plus mortelles*". Dans le même ordre d'idées, James et al. (2008) soutiennent que les inondations touchent en moyenne 520 millions d'individus chaque année. Par ailleurs, les inondations ont eu pour conséquences à l'échelle mondiale des pertes économiques importantes.

Dans le documentaire scientifique "*la nature se déchaine*" de la chaîne de télévision Science et Vie TV, diffusé en mars 2016, il est mentionné qu'en termes de dommages et de pertes en vies humaines, l'impact des inondations est plus important dans les pays en voie de développement du fait d'une vulnérabilité humaine et économique plus élevée que dans les pays industrialisés.

On dénombre diverses causes d'inondation dans le monde, notamment les crues, les remontées de nappe, les précipitations, les ruptures de barrage etc. Parmi ces causes, les ruptures de barrage sont les plus rares, mais lorsque les digues cèdent, la quantité d'eau et la vitesse d'écoulement d'amont en aval, sont responsables d'énormes dégâts matériels, économiques, environnementaux et de pertes en vies humaines. Ainsi, le béton utilisé pour la construction de certains barrages, les débris charriés par l'eau causent des dégâts majeurs en plus de ceux déjà provoqués par l'eau elle-même.

Véritables ouvrages d'art issus de technologies humaines, les barrages retiennent parfois de grands volumes d'eau. Ces ouvrages restent cependant vulnérables, ils peuvent céder pour diverses raisons.

En 1959 en France, à la suite des pluies torrentielles du début de l'hiver, le réservoir du barrage de Malpasset sature. Le 2 décembre de la même année, le barrage cède soudainement. Près de 50 millions de m³ d'eau déferlent, ravageant campagnes et villages jusqu'à la mer (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents, 2009).

Au Brésil, dans la nuit du 5 novembre 2015, une gigantesque coulée de boue engloutit plusieurs habitants de la commune de Bentos Rodrigues. Cette catastrophe fait suite à la rupture d'un barrage minier (journal le Monde du 6 novembre 2015).

Dans les deux cas cités, les populations en aval des barrages étaient plus exposées, en raison de leur situation qui les contraint à recevoir tout le flot et les matériaux qu'il transporte.

Hicham (2005) décompose en deux groupes les impacts socio-économiques non négligeables qui découlent de ces catastrophes. Ce sont d'une part des impacts tangibles, pouvant faire l'objet d'une estimation monétaire (biens et services marchands), et les impacts intangibles qui jusque-là, ne sont pas traduits en termes monétaires (la dégradation des milieux naturels et la perte de biens irremplaçables comme le patrimoine). D'autre part, ce sont les effets directement liés aux phénomènes et les conséquences indirectes des évènements.

Au regard de ce qui précède, il est apparu important d'entreprendre cette étude sur les premiers barrages hydroélectriques de la Côte d'Ivoire. Il s'agit de faire une étude

préventive, d'évaluer les dommages potentiels qu'une rupture éventuelle de ces barrages provoquerait dans le département d'Aboisso.

Le travail est organisé en trois parties. Il n'émet pas d'hypothèses de recherche, puisqu'il s'organise autour d'une démarche inductive. La première partie de ce travail est consacrée au cadre théorique et méthodologique. Elle aborde la revue littéraire et les concepts liés à l'étude, pour ensuite dégager le problème, les objectifs et les hypothèses qui en découlent. Les méthodes d'acquisition et de traitement des données sont également abordées dans cette partie.

La deuxième partie présente les barrages d'Ayamé dans le bassin versant de la Bia. Elle aborde les différentes caractéristiques des milieux physique et humain de la zone d'étude, ce qui met en évidence les conditions d'un risque.

Enfin, la troisième partie présente les impacts potentiels, en cas de rupture des barrages d'Ayamé. En outre, cette partie permet d'apprécier le cadre de gestion du risque d'inondation liée aux barrages dans le département d'Aboisso.

Cette étude se termine par des discussions qui permettent de confronter les résultats à ceux des autres études réalisées dans le monde. Cela permet aussi de montrer d'autres aspects autour des risques liés à la rupture des barrages.

PREMIÈRE PARTIE

CADRE THEORIQUE ET METHODOLOGIQUE

Chapitre 1 : Cadre théorique

Chapitre 2 : Approche méthodologique de l'étude

Introduction de la première partie

La présente étude, en plus de la gestion des risques naturels, traite aussi du risque technologique avec la présence de barrages hydroélectriques. Elle met en relation la géographie et l'hydrologie, la télédétection et les mathématiques. Elle est le cadre de l'interaction entre les éléments physiques et l'occupation du sol du département d'Aboisso.

Dans cette première partie les concepts d'usage sont définis et les différentes études dont ils ont fait l'objet sont présentées. Cette analyse est intégralement faite dans le premier chapitre ; cela aide à mieux comprendre le problème.

Dans le chapitre 2, les données et les matériels mobilisés pour mener à bien l'étude sont évoqués. Ce chapitre présente de manière détaillée le cadre méthodologique de ce travail, en exposant toutes les données quantitatives et qualitatives utilisées, les outils de collecte de ces données et les matériels qui ont permis leurs traitements à partir de méthodes scientifiques prouvées.

CHAPITRE 1 : CADRE THÉORIQUE

1.1. JUSTIFICATION DU CHOIX DU SUJET

Les barrages ont une importance capitale pour les pays en voie de développement. L'énergie hydraulique étant moins polluante contrairement au nucléaire, construire des barrages hydroélectriques lorsqu'on bénéficie d'importants cours d'eaux est une solution toute trouvée pour produire l'énergie nécessaire au développement des industries. Cependant, les cours d'eau et les ouvrages qui les modifient ne sont jamais seuls dans leur espace géographique. Si construire des barrages hydroélectriques oblige le déplacement des populations initialement installées sur le site du projet, si une zone de sécurité est souvent définie, cela n'exclut pas que des populations soient toujours dans la zone de submersion, principalement les populations situées en aval du réservoir. Ces populations sont parfois inscrites dans le couloir d'inondation prévu par les plans de construction des barrages hydroélectriques.

Le retour d'expérience des crues des rivières, les effondrements et risques d'effondrement des barrages dans le monde dont sont victimes les populations sont des événements qui rappellent à l'homme, combien il est urgent de prévenir les catastrophes.

Depuis sa création en 2009, le LAGERIS (Laboratoire de Géographie de l'Environnement et des Risques) mène des recherches en rapport avec les problèmes environnementaux. Parmi les axes de recherche du laboratoire figure celui des risques et catastrophes naturelles.

C'est dans ce cadre que se situe cette étude. Elle se veut une analyse préventive de l'inondation qui pourrait survenir en cas de rupture des barrages d'Ayamé, afin de permettre à l'exploitant des barrages, aux autorités administratives du département et aux populations de réagir efficacement en cas de catastrophe.

À travers cette étude, il est aussi question de prendre des dispositions au niveau de tous les barrages hydroélectriques sur le territoire ivoirien, car si les ruptures des barrages sont rares, la fréquence des événements extrêmes s'est accrue depuis le constat du réchauffement climatique.

De plus, la Côte d'Ivoire connaît depuis une dizaine d'années des crues extrêmes qui sont à l'origine de dommages importants. En effet, l'année 2018 restera longtemps dans la mémoire des Ivoiriens qui n'avaient pas vu auparavant des crues se produire au même moment sur leur territoire. En effet, entre juin et octobre de la même année, l'on a assisté aux crues du Bandama, du N'Zi, de l'Agnéby et de la Bia avec des pertes humaines et des dégâts matériels importants. Cette situation est d'autant plus alarmante que c'est maintenant que la Côte d'Ivoire à l'image des pays en voie de développement a entrepris l'élaboration des outils de gestion des catastrophes naturelles.

La récurrence des événements extrêmes étant devenue plus forte dans le monde, il y a donc nécessité de prendre des dispositions préventives pour faire face aux catastrophes éventuelles.

1.2. LES MOTIVATIONS DE L'ETUDE

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la "Prévention des risques et gestion des catastrophes" du groupe de recherche "Gestion des Risques naturels dans les Territoires et les Sociétés" (GRTS), du département de géographie de l'Université Félix Houphouët Boigny, pour la gestion des risques naturels en Côte d'Ivoire.

Aussi, pour avoir longtemps observé les crues liées au simple lâcher d'eau effectué aux barrages d'Ayamé et les impacts de ces déversements sur le milieu aval, il est question d'évaluer dans ce travail, les dommages qu'une rupture de ces barrages provoquerait.

Il s'agit finalement de prévenir le risque d'inondation auquel les populations localisées dans le couloir inondable de la Bia sont exposées.

Prévenir le risque d'inondation lié à la rupture des barrages à partir d'un modèle offre en outre à tous les acteurs du département un outil de gestion de la catastrophe. Mais mener ce travail renvoie avant tout à la compréhension du phénomène étudié à travers toutes ses composantes.

1.3. REVUE DE LITTERATURE ET DEFINITION DES CONCEPTS

1.3.1. Revue de littérature

Pour le gestionnaire d'un barrage, l'analyse des risques d'une inondation consécutive à la rupture de l'ouvrage est très répandue dans les études de danger. Elle permet à l'exploitant du barrage de se doter d'un outil de gestion de catastrophe liée à son activité dans une vallée. En outre, les crises déjà vécues par les populations, l'inquiétude d'autres populations face à la présence d'un barrage en amont de leur territoire ne laissent pas la communauté scientifique indifférente. Des écrits et des travaux scientifiques viennent soutenir les études de danger réalisées afin de réduire les dommages causés par l'inondation après la rupture d'un barrage.

Dans le cadre de ce travail, des ouvrages qui traitent des thèmes suivants ont été consultés : l'utilité des barrages ; la prévention, la gestion des inondations dans le monde ainsi que le retour d'expérience ; les inondations liées aux ruptures des barrages et la modélisation hydraulique.

Ainsi, des mémoires, thèses, articles scientifiques, et rapports techniques d'études se rapportant à ces thèmes importants pour cette étude ont fait l'objet d'une analyse. Cette analyse a par ailleurs permis d'apprécier la pertinence des études menées antérieurement ou leurs insuffisances par rapport à la recherche en cours.

1.3.1.1. Utilité des barrages

- **Irrigation**

Les usages qui sont attribués aux barrages ont fait de ces derniers des infrastructures ayant permis d'amorcer et de garantir le développement des peuples. Le comité français des barrages et réservoirs (2013) instruit sur le cas de 17000 petits barrages construits par les Nabatéens au début de notre ère. Ces ouvrages furent bâtis des deux côtés de l'actuelle frontière Israélo-Jordanienne sur une zone de 125 km². Ils servaient à la fois à la rétention de l'eau et des alluvions, qui permettaient la création de zones de terrains fertiles. Dans la même région, le barrage Proserpina construit avant la fin du premier tiers du 2^{ème} siècle est toujours en exploitation et sert à l'irrigation. Pour les mêmes objectifs, les romains construisirent en Turquie quelques ouvrages comme le barrage d'Orukaya à 190 km au Nord-Est d'Ankara qui avait 16 m de haut et 40 m de long, et le barrage de Cavdarhisar à

210 km au Sud d'Istanbul avec 7 m de haut et 80 m de long (Comité français des barrages et réservoirs, 2013).

La disponibilité des ressources en eau implique une bonne gestion des apports en période humide. Les réserves faites pendant les périodes fastes permettent de répondre aux besoins en temps secs, assurant ainsi la disponibilité de la ressource en eau en dépit des variations climatiques ; pour cette gestion, l'on a parfois recours aux barrages. Selon la Commission mondiale des barrages (2000) les gouvernements des pays semi arides, tels que l'Afrique du sud, l'Australie et l'Espagne ont construit des barrages avec de grandes capacités de stockage afin de satisfaire la demande courante et se sécuriser contre les risques de sécheresse. Cette technique permet également aux pays d'Asie de l'Est et du Sud-Est où durant la mousson, le débit des cours d'eau augmente 10 fois plus qu'en saison sèche, de capter et stocker l'eau durant la saison pluvieuse. Pendant la saison sèche, l'eau stockée est restituée.

Parent (1991) est d'accord avec ce qui précède, car pour lui, en termes de volume, la ressource disponible à une certaine période n'est à priori pas toujours suffisante pour satisfaire la demande. En conséquence de quoi, des réseaux de réservoirs sont indispensables afin de pouvoir stocker l'eau en surplus à une date donnée, et la redistribuer lorsque le besoin se fait ressentir. Et, la version finale de la mise en place d'un cadre de dialogue national, multi-acteurs sur les barrages et le développement durable au Togo (2007) note ce qui suit : la moitié des grands barrages du monde a été construite à des fins d'irrigation exclusivement et selon les estimations disponibles, les barrages contribuent pour 12 à 16% à la production alimentaire. Le même rapport souligne que principalement au Togo il existerait plus d'une centaine d'aménagements hydro-agricoles construits par l'État, les ONG, les privés et confessions religieuses. Les premiers barrages hydro-agricoles ont été construits dans le but d'irriguer des champs de riz variant entre 40 et 50 ha.

Au-delà de leur importance pour l'irrigation, il est nécessaire de comprendre l'utilité des barrages dans la production d'énergie.

- **Production d'énergie**

Le comité français des barrages et réservoirs (2013) enseigne que le besoin manifeste en énergie depuis le XII^{ème} siècle s'est vu combler grâce à des projets adaptés aux

sollicitations. Ce fut le cas du projet du canal et de la digue du Lampy pour les Etats du Languedoc où 221 000 francs du coût du barrage pouvaient être amortis en 20 ans à 5% par les seuls revenus des moulins.

Selon Zufferey (2012), l'hydraulique est de très loin, avec 3000 TWh dans le monde en 2005, la principale source d'électricité d'origine renouvelable. La Chine, le Canada, le Brésil et les USA sont d'ailleurs les plus gros producteurs d'électricité d'origine renouvelable. Mais le Paraguay avec 100 % de production, la Norvège avec 99 % de production et le Brésil avec 84 % de production, sont les plus grands producteurs d'énergie hydraulique.

On note également dans le rapport de la Commission mondiale des barrages (2000) que les pays riches en eau, tels que le Canada, la Norvège, le Brésil et certaines parties de la Russie, ont construit de grands barrages pour la production d'énergie hydro-électrique là où existaient des sites favorables. Aussi, dans plusieurs pays, la production d'électricité est une raison essentielle pour la construction de grands barrages, si bien qu'au cours des 22 dernières années, la production mondiale d'électricité a plus que doublé. Actuellement, l'énergie hydraulique fournit 19% de l'approvisionnement total en électricité dans le monde et est utilisée dans plus de 150 pays. Elle représente plus de 90% du total de la fourniture nationale d'électricité dans 24 pays et plus de 50 % dans 63 pays. Ainsi, dans le monde, environ un tiers des pays dépend actuellement de l'énergie hydro-électrique, et à elle seule, la Russie compte pour plus de la moitié de la production mondiale de l'énergie hydro-électrique.

En cela, Nyaletassi (2014) soutient qu'aujourd'hui, l'énergie hydro électrique représente 20% de la production électrique totale et 7% environ de toute l'énergie consommée dans le monde. Dans les pays en voie de développement c'est souvent la seule ressource disponible localement.

L'hydroélectricité nécessite des critères fondamentaux, comme la disponibilité de la ressource en eau qui elle-même doit avoir un débit important et l'installation de matériels adéquats pour le fonctionnement de l'usine hydro-électrique. Ces critères permettent de mettre en avant-première des pays producteurs de l'énergie hydraulique. Et pour Parent (1991), la part d'hydro-électricité est très variable selon la région du monde. L'électricité produite par des pays comme la Norvège ou le Brésil par exemple est presque exclusivement

d'origine hydraulique (respectivement 99 et 84 % des productions nationales). Il pense qu'à l'heure actuelle, stocker de l'eau dans des retenues est toujours le seul moyen de stocker de l'énergie. Cela permet si besoin, de mobiliser instantanément de la ressource en eau pour produire de l'énergie ce qui est un avantage majeur. De plus, la disponibilité de la ressource en eau et le débit important des cours d'eau permettent si le cours d'eau est également long, de produire une quantité importante d'énergie. Clave et al. (2013) donnent l'exemple du barrage voûte de Kariba construit sur le Zambèze entre 1956 et 1959, qui avec ses 128 m de hauteur alimente deux usines hydroélectriques, d'une capacité cumulée de 1470 MW, et situées sur chacune des rives, en Zambie et au Zimbabwe.

Mais l'usage des barrages ne se limite pas qu'à l'irrigation et la production d'énergie. Les barrages sont aussi utiles pour la pêche ou l'aquaculture, les loisirs, la consommation en eau potable et bien plus étonnant encore par rapport à la présente étude, les barrages sont parfois utilisés pour se protéger des crues.

- **Pêche, aquaculture, loisir, consommation**

En Côte d'Ivoire, la pêche continentale repose sur un ensemble de pêcheries lacustres dont les principales sont les lacs de Kossou (650 km²), Ayamé 1 (160 km²), Buyo (750 km²). Dans cette catégorie de grands barrages dont la superficie est supérieure à 10 km², on dénombre des réservoirs de moindre étendue et qui constituent également des centres importants de production halieutique. Ce sont, en l'occurrence, les barrages de Taabo (bassin du Bandama) et de Faé (bassin du San Pedro) dont les superficies respectives sont de 60 et 16,28 km² (Da Costa et al., 2005).

D'après Zufferey (2012), jamais on n'avait imaginé que les barrages pourraient devenir une attraction touristique avec une demande touristique de plus en plus forte autour de ces sites. Les lacs de retenue s'ouvrent de plus en plus à la pratique des sports nautiques quand la température le permet. La situation idyllique des barrages attire de plus en plus de randonneurs. Hormis son offre nautique, un lac de retenue attire les touristes pour la beauté de ses couleurs ainsi que le rapport contrasté qu'il entretient avec le paysage environnant.

La Commission mondiale des barrages (2000) note que de manière globale, la consommation des zones urbaines représente 7% du total de l'eau prélevée des cours d'eau et 22% de ceux des lacs. De nombreux réservoirs ont été construits pour un

approvisionnement fiable en vue de satisfaire les besoins urbains et industriels qui croissent rapidement. Ils ont été construits en particulier dans les régions sujettes à la sécheresse où les sources naturelles d'eau de surface et les lacs ou cours d'eau étaient considérés comme insuffisants au vu de tous les besoins. De manière globale, environ 12% des grands barrages sont classés comme barrages d'adduction d'eau. Environ 60% de ces barrages se trouvent en Amérique du Nord et en Europe.

Selon la version finale de la mise en place d'un cadre de dialogue national, multi-acteurs sur les barrages et le développement durable au Togo (2007), afin de fournir une eau de qualité aux populations urbaines essentiellement, la régie nationale des eaux du Togo a procédé à la construction d'ouvrages sur des cours d'eau à travers le pays. L'eau des retenues est d'abord envoyée aux différents centres d'exploitation via des tuyaux, pour traitement et épuration selon les normes de l'OMS, puis grâce à des systèmes de pompage électrique, envoyée dans les châteaux d'eau, d'où elle est finalement distribuée aux consommateurs.

- **Protection contre les crues**

S'agissant de la protection contre les crues, un des premiers ouvrages de protection contre les crues avait été la digue du Pinay sur la Loire, barrage à pertuis, construit en 1711, restauré et rehaussé au début du XIX^{ème} siècle, et qui protégea efficacement la ville de Roanne lors des crues de 1846 et 1856 avec ses 52 m de haut. Le barrage du Furens en France, pris comme modèle de barrage en maçonnerie dans le monde entier était également utilisé pour la protection contre les crues (Comité français des barrages et réservoirs, 2013).

Aussi, L'idée de construire un grand barrage comme celui de Serre-Ponçon en amont des usages, se développe dès le début du 19^{ème} siècle. Ce barrage permettait de protéger les installations pour éviter de devoir les reconstruire à chaque passage d'une crue, il permettait aussi de protéger les populations et les cultures de pénuries d'eau trop sévères (Parent, 1991). Et selon la Commission mondiale des barrages (2000), environ 13% des grands barrages dans le monde se trouvant dans 75 pays ont une fonction de maîtrise de crues ; les barrages auraient été historiquement utilisés en grande partie comme moyen de défense contre la montée des eaux. Meybeck et al. (1998) renchérisent que les crues catastrophiques de 1910 et 1924 à Paris, ainsi que l'étiage sévère de 1921 et le

développement de l'activité économique de la région parisienne au cours du dernier siècle, ont rendu nécessaire la régularisation du bassin de la Seine en vue d'un double objectif de protection de cette région contre les crues et de soutien des étiages.

Enfin, d'après Moulin (2003), la poursuite du programme de construction de nouveaux aménagements, en vue d'assurer la protection contre les inondations et la régularisation des débits des rivières à l'étiage, fait partie du cahier de charges de l'Institution Interdépartementale des Barrages Réservoirs du Bassin de la Seine.

De ce qui précède, il convient surtout de retenir que les barrages ont plusieurs fonctions. Ainsi, l'analyse d'un barrage ne devrait pas se limiter qu'à l'ouvrage, il faut également tenir compte de l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage.

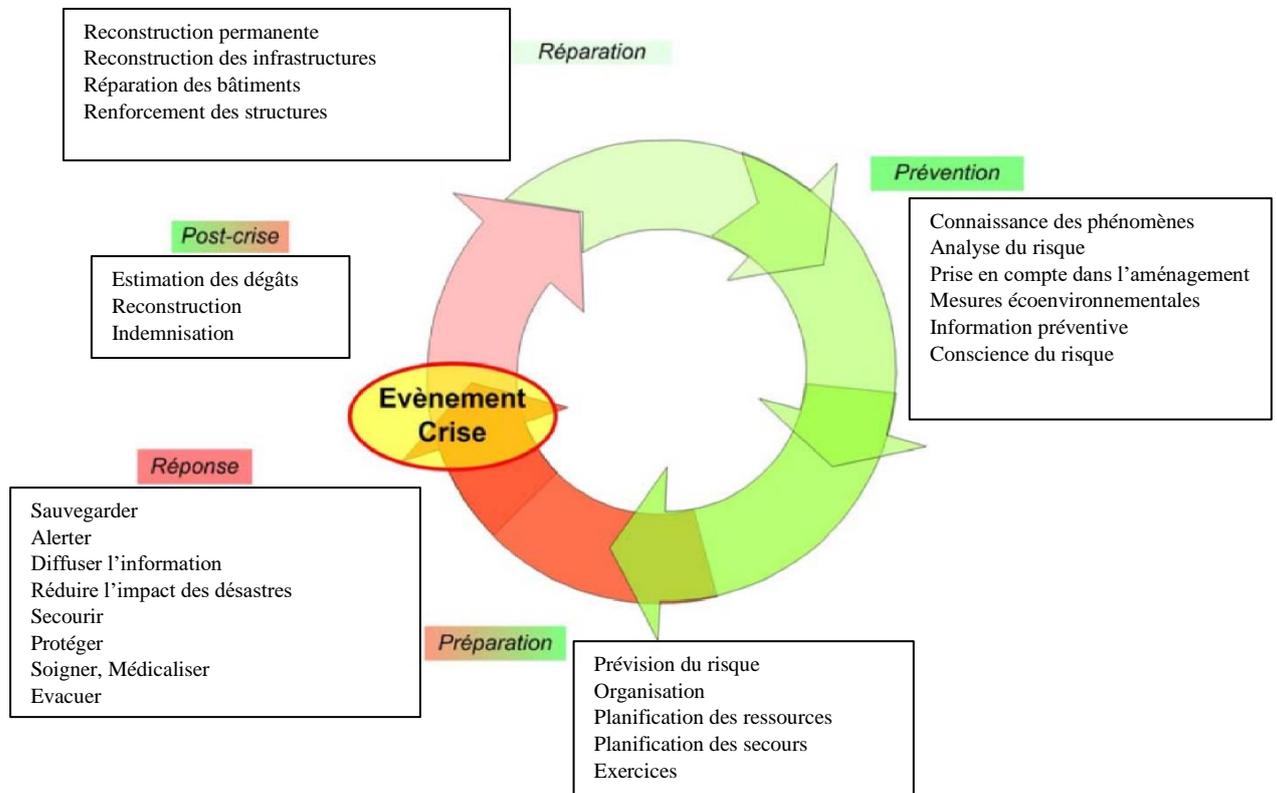
Le barrage d'Ayamé 1 renferme deux fonctions essentielles qu'il faut nécessairement prendre en compte dans sa gestion. Si son principal rôle est la production d'énergie, la pêche qui est une autre fonction est aussi importante. De plus, l'énergie hydroélectrique produite à ce barrage est fortement dépendante du réservoir qui exerce une forte pression continue sur le béton. Il en est de même pour Ayamé 2 et l'ensemble du parc hydroélectrique (kossou, Taabo, Buyo, etc.) de la Côte d'Ivoire concédé par l'Etat à la CIE, hormis le barrage de Soubré sur le fleuve Sassandra.

Certes, ce travail concerne des barrages hydroélectriques en Côte d'Ivoire, mais le territoire Ivoirien renferme aussi des barrages servant à irriguer les plantations ou à approvisionner les populations en eau. Il s'agit notamment des barrages de Trènou à Bouaké, pour la consommation d'eau potable ou Binava à Toumodi, pour l'irrigation, tout aussi dangereux pour l'aval, d'où l'analyse de la gestion des risques naturels, principalement les inondations liées aux barrages dans ces milieux.

1.3.1.2. La gestion des risques naturels

Les risques naturels (inondation, mouvement de terrain, feu de forêt, Cyclone, éruption volcanique) menacent la sécurité des populations exposées à leurs manifestations. Pour garantir la sécurité des populations et leurs biens, ainsi que celle des milieux physiques et biologiques, des actions sont menées à différentes phases, notamment avant, pendant et après la manifestation du phénomène. Dès lors, Tacnet et al (2007) proposent les différentes

phases de la gestion des risques naturels illustrées dans la **figure 1**, qui permettent aux acteurs d'interagir, afin de limiter ou éviter, quand cela est possible les pertes lorsque la catastrophe est imminente.



Source: J.M. Tacnet Cemagref 16 juillet 2007

Figure 1 : Etapes de gestion du risque naturel

Nonobstant ces étapes, la gestion intégrée du risque d'inondation exige une importante coordination entre les autorités locales, les gouvernements, les ministères, les entreprises publiques y compris les compagnies de distribution d'eau et d'électricité, les services météorologiques et hydrologiques, les instituts de planification, la société civile, les organisations non gouvernementales, les établissements d'éducation et de recherche et le secteur privé (Tacnet, 2007). Les mesures de gestion doivent être exhaustives, dictées par les conditions locales, intégrées et équilibrées entre les différents secteurs concernés.

Aussi, pour faciliter la gestion des inondations, le modèle de Tacnet est réduit en 3 phases, à savoir la prévention et l'atténuation, la gestion de crise et enfin le retour d'expérience.

1.3.1.2.1. La prévention et l'atténuation

En France, Guerrin (2014) fait savoir qu'à la suite des inondations répétées sur le Rhône, les autorités administratives décident de mettre en place une stratégie globale de prévention des inondations du Rhône et de ses affluents. Du reste, les signataires du Plan Rhône déclinent une stratégie de gestion des inondations. Par ailleurs, le dimensionnement d'une digue est conseillé pour limiter la menace d'inondation potentielle qui plane sur des zones urbanisées. Mais face au risque qui persiste, les affrontements entre des acteurs individuels ou collectifs s'accroissent autour du problème.

Toujours en France, la presse relève le poids qu'ont les inondations dans la compétition entre l'État et les élus locaux : « Mme Voynet met en cause l'inertie des élus » (*Le Monde*, 16 novembre 1999) ; « Avignon : colère après le refus de l'État de rehausser la cote des digues » (*La Provence*, 4 avril 2011) ; « Prévention des crues du Rhône : État et collectivités affinent leur collaboration » (*La Gazette des communes*, 26 juillet 2004), cités par Guerrin (2014).

D'ailleurs pour Doridot et al. (1987), *"le risque d'inondation est de loin celui qui revêt la plus grande importance économique en France"*.

Aussi, les mesures de prévention sont l'interdiction des implantations humaines dans les zones les plus dangereuses où, quels que soient les aménagements, la sécurité des personnes ne peut être garantie intégralement et les limiter dans les autres zones inondables. Il s'agit avant tout de préserver des vies qui pourraient être mises en danger dans les zones où l'intensité de l'aléa est la plus forte. De préserver les capacités d'écoulement et d'expansion des crues pour ne pas aggraver les risques pour les zones situées en amont et en aval. Et de sauvegarder l'équilibre des milieux dépendant des petites crues et la qualité des paysages souvent remarquables du fait de la proximité de l'eau et du caractère encore naturel des vallées concernées (Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2010). De même en France, la gestion des risques d'inondation élaborée par le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux Ouest (2014) renseigne que la prévention des risques d'inondation repose sur quelques grands principes, à savoir : l'évaluation des risques, l'information des populations, la restriction de l'urbanisation dans les zones à risque, l'entretien des rivières, la recherche et la réalisation de solutions techniques de

protection, et enfin l'établissement de plans communs d'alerte et de secours dans les communes les plus exposées.

Sur ces points, Laigle (2013) propose de mettre en œuvre des structures de rétention de type barrage filtrants ou plages de dépôts. Toutefois, pour qu'elles conservent leur capacité, ces structures doivent être régulièrement curées. Par ailleurs, mettre des digues de dérivation pour dévier l'écoulement à proximité des zones d'habitations sensibles aide également à la prévention.

Face au risque d'inondation, des mesures de prévention sont donc prises en compte aux différents niveaux de l'aménagement et de l'urbanisation. Il existe notamment des plans de surfaces submersibles qui délimitent des servitudes d'utilité publique, des périmètres de risque où la construction est réglementée. Hostache et al (2005) rappellent effectivement le rôle prépondérant de connaître et de localiser les zones à risque dans la prévention. L'objectif tant recherché ici étant de réduire les vulnérabilités humaines et économiques. Ils insistent surtout sur l'utilité de protéger l'existant, d'informer la population ou encore de limiter l'implantation des biens et des personnes dans les zones exposées à l'aléa inondation. De plus, les modèles numériques d'altitudes, porteurs de la géomorphologie du terrain peuvent renseigner l'espace hydrographique. C'est pourquoi Saley (2005) faisant la combinaison des données satellitaires et d'un Modèle Numérique d'Altitude a pu cartographier les zones à risque d'inondation de la région semi-montagneuse de Man en Côte d'Ivoire. En outre, l'analyse du réseau de drainage a contribué au recensement des zones vulnérables à l'inondation.

À sa suite, Puech (2000) montre que sur des grandes structures (crêtes, limites de bassin, cheminement de l'eau), mais aussi sur les éléments locaux du relief (degré, convexité et courbure de la pente), l'analyse croisée des facteurs relatifs à la vulnérabilité du terrain à l'inondation et des facteurs hydro-climatiques à l'intérieur d'un SIG permet de cartographier les zones à risque d'inondation. La carte obtenue présente des intérêts socio-économiques et sécuritaires et doit servir de support à la prévention des risques d'inondation.

La prévention du risque d'inondation mobilise donc les acteurs qui ont parfois recours au SIG, mais la perception du risque par les populations déjà touchées ou exposées joue un rôle majeur pour que la prévention soit effective.

Selon Alla (2013), le souvenir que les populations ont des catastrophes qu'elles ont déjà vécues peut leur permettre non seulement de savoir qu'il y a des lieux à risques qu'elles peuvent chercher à surveiller, mais aussi de prendre des mesures appropriées pour réduire leur propre vulnérabilité et celle de leurs biens. Il affirme qu'en Côte d'Ivoire, le gouvernement a initié des études qui ont abouti au début des années 1970 à l'élaboration du plan directeur d'assainissement et de drainage pour l'horizon 1985. En matière de gestion des eaux pluviales, ce plan s'est fixé comme objectif l'amélioration du réseau de drainage dans les quartiers où les dommages dus aux inondations étaient les plus élevés, afin de leur assurer un niveau de protection suffisant contre les inondations. Aussi prévoyait-il l'équipement des principaux talwegs en canaux et la réalisation de canaux secondaires, buses, caniveaux, pour conduire par les chemins les plus courts les eaux de ruissellement en lagune.

Au Viêt-Nam par contre, la gestion des risques naturels et du risque d'inondation en particulier a été incluse dans la constitution de 1992 et la loi de lutte contre des risques des catastrophes naturelles. Cette loi renforce la lutte contre la gestion des risques naturels et régit les droits et obligations des organisations, ménages et individus engagés dans la prévention des catastrophes naturelles (Ngo, 2014).

Ce qui précède laisse penser que la prévention se justifie en amont de la gestion des catastrophes naturelles. En attendant de la confronter avec la gestion proprement dite de la crise et le retour d'expérience, des points essentiels sont à relever. Fondamentalement, connaître l'aléa et les enjeux, définir la zone à risque et estimer les pertes et dégâts possibles réduisent le risque si les mesures sont prises à temps et les consignes sont respectées. Alors en ce moment, gérer la crise lorsqu'elle survient devient moins difficile pour tous les acteurs impliqués.

1.3.1.2.2. Gestion de crise d'inondation

Une inondation est comme toutes les catastrophes naturelles un événement qui attire l'attention des populations, des autorités, des scientifiques, des services de secours et d'aide

et bien plus, celle des médias. Lorsque la crise s'achève ou même se déroule, des mesures sont immédiatement (souvent dans l'urgence) prises par les différentes parties, afin d'empêcher que les mêmes causes ne produisent les mêmes effets, mais ces décisions ne sont pas toujours respectées.

Face à cette situation, Bailly (1996) note quatre grands types de comportements que l'on distingue face aux risques naturels : la négation du risque, l'acceptation passive, la volonté de prendre des mesures et la fuite.

Les catastrophes naturelles sont parfois si brutales et subites qu'elles ne laissent pas le temps de réagir de manière coordonnée et précise malgré la volonté de mieux les gérer. Ce qui emmène Tanguy (2012) à dire que *"la phase de gestion de crise correspond à des actions en état d'urgence, et comporte donc une contrainte temporelle importante. Une des préoccupations majeures est alors de connaître dans les délais les plus brefs l'ampleur précise de l'inondation mais aussi la localisation des populations les plus vulnérables"*.

Henry (2004) insiste sur le fait que l'objectif est de déployer rapidement les moyens d'actions et de secours les plus appropriés et ainsi de réduire les conséquences humaines et matérielles du sinistre. À titre d'exemple, Ménad (2013) avance que pendant les événements hydrométéorologiques du 9 et 10 novembre 2001 dans la partie occidentale du grand Alger qui ont causé des dégâts importants, les autorités ont dû répondre rapidement à la catastrophe. Elles ont pris une série de mesures immédiates à moyen et à long terme, afin d'assurer le fonctionnement des services vitaux (circulation routière, alimentation en électricité, en gaz et aliments) dans les endroits les plus paralysés, notamment dans le quartier de Bab-el-Oued.

Pour Ahoga de l'ONG DCAM-BETHESDA, prenant la parole à l'"Initiatives locales sur la réduction des risques de catastrophe en Afrique de l'Ouest et du Centre tenue en 2006", l'inondation de Mananville au Bénin en août 2006 a touché plusieurs quartiers, forçant des familles à quitter leurs maisons. Pendant la crise, le comité communal pour la protection civile a réagi immédiatement en créant un conseil de crise. Dans le même temps, le maire de Mananville a lancé un SOS au gouvernement central et à tout le pays.

Samake (2008) affirme que les initiatives prises en 1995 pour la gestion des eaux pluviales dans la commune rurale de Sanankoroba au Mali s'étant révélées inopérantes, le

comité de Benkadi, interpellé par la population, a dû trouver une solution efficace et durable. La population s'est mobilisée et, à travers le comité de Benkadi et avec l'appui des anciens, une commission spéciale a été nommée. En outre, ce comité a mobilisé des ressources et, avec ses propres fonds et les dons reçus, a pris des mesures d'urgence.

Aussi, Alla (2013) avance que la perception des vulnérabilités par les pouvoirs publics varie en fonction des seuils d'acceptabilité des pertes. Seules les catastrophes ayant occasionné plusieurs pertes en vie humaine où de nombreux sinistrés mobilisent à la fois autorités gouvernementales, élus locaux, structures de protection civile et divers types de médias. Par contre, un ou deux décès passent généralement inaperçus. Cela est tout le contraire de la situation dans les pays développés où une seule victime provoque une vive émotion (Disasters 1995), cité par Maury et Chaline (2004). Parfois, les personnes qui ne sont pas touchées lors des catastrophes restent passives, alors que les victimes surprises par l'évènement partent précipitamment de leur maison, laissant derrière elles (Alla, 2013). Il soutient encore que : « *la réponse des victimes au moment de l'évènement c'est de "lutter". Il s'agit pour les sinistrés d'évacuer les eaux de pluie hors des maisons, à l'aide de matériels domestiques (balais, cuvettes, seaux et divers ustensiles de cuisines)* ».

En fin de compte la gestion de crise d'inondation répond à l'urgence. Les ouvrages consultés pour comprendre cet aspect de la gestion des risques naturels abordent dans le même sens, il faut d'abord sortir les pieds de l'eau sain et sauf et par tous les moyens, avant de penser à une évaluation post inondation, qui techniquement se matérialise par un retour de l'expérience vécue. Sur ce point, une inondation, qu'elle soit causée par une remontée de la nappe, par des précipitations, par la crue d'une rivière ou encore par une rupture de barrage ne déroge pas à la règle.

1.3.1.2.3. Le retour d'expérience

Tout comme la prévention et la gestion de la crise d'inondation, le retour d'expérience est un volet essentiel dans la gestion des inondations. Les informations collectées et consignées peuvent aider à l'élaboration des plans de prévention sur des situations à venir, mais également permettre de communiquer plus facilement avec les populations, afin de les sensibiliser sur le risque d'inondation. D'ailleurs, Il est de notre devoir d'informer les habitants sur les dangers qu'ils ont encouru, ceci afin de prévenir les

prochaines catastrophes qui ne manqueront pas de survenir. Pour Gueymard (1869) cité par Rouzeau et al (2010), passé le jour du danger, les populations sont moins soucieuses, comme les marins échappés au naufrage, elles oublient leurs vœux de la veille.

C'est pourquoi Tanguy (2012) note ce qui suit : « *la phase de retour d'expérience cherche à tirer des conclusions sur les conséquences de l'inondation, à en mesurer les impacts humains et économiques mais aussi à analyser la pertinence des moyens déployés lors de la phase de gestion de crise* ».

Cette phase permet de bâtir ou d'améliorer les politiques de prévention du risque et de protection des éléments vulnérables face à une inondation future, renchérissement (Hostache et al., 2009).

Principalement en France, *"les pratiques actuelles de retours d'expérience en matière de prévention des inondations sont disparates et ne font pas l'objet d'une capitalisation organisée. Après chaque événement d'importance nationale, diverses initiatives sont prises, tant localement que nationalement"* Dantec et al (2018). Toujours en France, le retour d'expérience des inondations, document du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire édité en 2019 évoque des démarches de retours d'expériences menées à la suite des inondations meurtrières de l'Aude.

Les retours d'expériences post-catastrophe ne datent pas d'aujourd'hui, le mémento du maire et des élus locaux de l'Institut des Risques Majeur de Grenoble dans son article consacré à la prévention des risques d'origine naturelle et technologique (2012) rappelle que les retours d'expérience après catastrophe sont d'une pratique fort ancienne. Ces pratiques étaient le fait des autorités politiques qui cherchaient à décharger le contribuable pour des phénomènes naturels anormaux. Les autorités cherchaient également à mettre en place des politiques de prévention pour faire face aux inondations.

Mais les Retours d'Expérience également appelés REX ou RETEX ont des objectifs précis selon Delgado (2015), à savoir faire une évaluation de l'existant par rapport à la crise. C'est encore relevé tout ce qui a aidé à éviter le pire durant l'évènement, surtout que le retour d'expérience demande de réaliser un diagnostic dans le but de définir les actions salvatrices, pour ensuite les mettre en œuvre et les communiquer (Antoine et al., 2008). C'est pourquoi Huet (2005) note qu'en termes d'objectif, le journaliste se contente d'hypothèses le plus souvent non vérifiées, dans le but d'informer le lecteur. Au contraire, les sinistrés et victimes essaient de comprendre ce qui leur arrive et de rechercher les causes.

Dans un autre ordre d'idée, le Juge a pour objectif d'apprécier le comportement de chaque acteur conformément à la réglementation en vigueur ; il sanctionne l'acteur mis en cause si nécessaire. Mais le scientifique fait progresser la connaissance aux autres acteurs dans tous les domaines physiques et socio-économiques. Pour finir, l'Etat tout comme les collectivités dans leur domaine de compétence, recherche l'amélioration des politiques publiques, leurs applications et la constitution d'une trace durable pour la mémoire collective et sa diffusion.

Les ouvrages révèlent que la gestion du risque lié aux inondations se décompose en trois volets : le volet de prévention et d'atténuation, le volet de gestion de crise et le volet de retour d'expérience. Le volet de prévention et d'atténuation prend appui sur la connaissance et la localisation des zones à risque, et vise à réduire les vulnérabilités humaines et économiques, en protégeant l'existant, en informant la population ou encore en limitant l'implantation des biens et des personnes dans les zones exposées à l'aléa inondation. Cette étape est basée, tout comme la phase de retour d'expérience, sur l'analyse des crues potentielles ou passées afin d'aider la compréhension des phénomènes physiques et de limiter le risque à long terme (Hostache et al, 2005).

1.3.1.3. Rupture de barrages et conséquences

Les barrages sont des ouvrages construits pour résister plusieurs siècles. Après la mise en eau, on est situé sur la sûreté de l'ouvrage ou non. Les accidents sur les barrages ont une probabilité infime de se produire, car le choix du site, la construction et la surveillance des barrages font l'objet de contrôles rigoureux. S'il subsiste toujours un risque, une rupture brutale et complète d'un barrage est aujourd'hui extrêmement faible. Mais en cas de rupture, il s'agirait plus probablement d'une rupture progressive liée à l'évolution d'une fissure dans l'ouvrage.

On dénombre environ 40 000 barrages dans le monde, près de 150 ont cédé depuis les années 1800, dont certaines ruptures ont fait plus de 1 000 morts.

La première grande catastrophe causée par les barrages s'est produite en Espagne, au début du 19^{ème} siècle. Construit entre 1785 et 1791 pour permettre l'irrigation de la région aride de Murcie, le barrage de Puenteles craque en 1802, lorsque les fortes pluies le remplissent pour la première fois. 600 personnes meurent dans l'accident (Chabal et Bordes,

2009). Plus d'un siècle plus tard, à Los Angeles en 1928, un autre barrage-poids, cède, tuant 420 personnes ([http://www.alertes-meteo.com/catastrophe/ htm](http://www.alertes-meteo.com/catastrophe/htm)).¹

En France, la rupture brutale du barrage de Bouzet (Vosges) en avril 1895 a fait 87 victimes (<https://www.laprovence.com/article/edition-marseille/4523576/et-si-le-barrage-de-bimont-cedait.html>²), quand la rupture du barrage de Morvi en Inde le 11 août 1979 faisait 15000 morts ; cette catastrophe compte parmi les plus grandes catastrophes de la période 1970-2001 (Perrin, 2017). La France connaît également en 1959 une rupture de barrage encore très jeune. Le 2 décembre 1959 le barrage de Malpasset se rompt, causant un grand nombre de victimes dans l'agglomération de Fréjus (Bruel 2002). La rupture de cet ouvrage (un barrage-voûte en béton) de 60 mètres de hauteur a stupéfiait la communauté de techniciens spécialisés, car ce type d'ouvrage est extrêmement sûr et aucune structure en voûte n'avait jusqu'alors causé de catastrophe comparable. Toujours selon Bruel (2002), La catastrophe de Malpasset a fait 423 victimes. Par ailleurs, 2,5 km de voies ferrées ont été arrachés, 50 fermes soufflées, 1000 moutons et 80 000 hectolitres de vin perdus.

Au Burkina Faso, des dizaines de ruptures de barrages ont été observées en 1992 et 1994 (Programme GIRE, 2001). Pour certains barrages particuliers, les causes de ruptures ont été identifiées : la submersion de la digue pour 70% des cas, l'érosion régressive dans l'évacuateur de crue pour 20% des cas, et des phénomènes de renard dans les digues pour 10 % des cas. Ces ruptures concernent davantage les petits barrages. En effet, ces petits barrages sont faits de terre compactée et sont susceptibles de se dégrader avec le temps, notamment à cause de l'érosion (Demonfaucon, 2011).

Les ouvrages parcourus sur les ruptures de barrage sont peu nombreux car le phénomène est lui-même rare. Les auteurs de ces ouvrages s'accordent sur la submersion inévitable de l'aval. Même-ci elles ne se produisent pas tous les jours, les ruptures de barrage sont des catastrophes dévastatrices où l'onde de submersion emporte tout sur son chemin. Heureusement des modèles hydrauliques permettant de prévenir ces risques peuvent être élaborés, et lorsque ces modèles sont fiables, ils aident à la prise de décision.

¹ [http://www.alertes-meteo.com/catastrophe/ htm](http://www.alertes-meteo.com/catastrophe/htm). Consulté le 13 mars 2018

² <https://www.laprovence.com/article/edition-marseille/4523576/et-si-le-barrage-de-bimont-cedait.html>. Consulté le 13 mars 2018

1.3.1.4. Modélisation hydraulique

Connaitre le comportement d'une rivière, simuler ses hausses et baisses de niveau d'eau est aujourd'hui possible à partir de logiciels. Les ingénieurs hydrauliques ont grâce à ces outils l'aisance de faire des simulations, afin de déterminer par exemple le meilleur emplacement d'un ouvrage ou de le dimensionner. Cependant faire un modèle n'est pas si simple, car les résultats attendus de la simulation dépendent aussi des données entrées que du logiciel lui-même.

Henine (2015) estime qu'au cours de ces dernières années, les efforts de la recherche pour la compréhension du cycle de l'eau dans les milieux naturels (bassins versant, rivières, nappe, etc.), associés aux développements de l'informatique, se sont concrétisés par l'apparition d'une multitude de modèles mathématiques en hydrologie :

- la modélisation comme outil de recherche : la modélisation peut être utilisée pour intercepter des données mesurées. Différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versant peuvent être confrontés aux mesures ;
- la modélisation comme outil de prévision : elle donne une anticipation des évolutions futures du débit d'un cours d'eau. Il s'agit de l'utilisation opérationnelle la plus courante des modèles hydrologiques ;
- La modélisation comme outil d'extrapolation : reconstitution de séries de débits plausibles.

La modélisation hydraulique devient donc incontournable pour l'hydrologue puisqu'elle lui *"permet de simuler numériquement et de prédire l'évolution spatio-temporelle des caractéristiques hydrauliques d'une rivière au cours d'une crue, telles que le débit, la hauteur d'eau, les surfaces inondées ou les vitesses de l'eau"* (Hostache et al., 2005). C'est un outil couramment employé dans le cadre de la gestion des inondations, aussi bien pour la prévision des inondations que dans les volets de prévention et de gestion de crise. *"Les modèles hydrauliques demeurent cependant une représentation schématique d'un système réel complexe et requièrent la compréhension et l'intégration de chaque processus du cycle de l'eau, à l'aide de données spécifiques"* (Estupina, 2004). Cela représente un volume important de données, qu'il peut parfois être difficile et coûteux

d'obtenir à cause d'un manque inéluctable de stations de mesures, aussi bien en milieu rural qu'en milieu urbain (Mason et al., 2012 ; Matgen et al., 2007). Ces modèles restent donc teintés d'une part d'incertitude. Cette incertitude, de même que le manque de données nécessaires au fonctionnement optimal de ces modèles, peuvent cependant être réduits par l'intégration de données issues de sources autres que les relevés manuels sur le terrain ou les stations de mesures automatisées.

Ainsi, la maîtrise des crues constitue le centre d'intérêt vers lequel convergent plusieurs approches : prédictions, simulations stochastiques, et surtout, la modélisation mathématique et physique des phénomènes hydrauliques. Les modèles hydrologiques se révèlent d'une importance majeure dans l'analyse des répercussions des changements climatiques et le bilan des ressources hydriques, principalement dans l'étude des processus essentiels liés à la genèse d'une crue (Henine, 2015).

Pour Wahiba (2012), la modélisation numérique est aujourd'hui indispensable. De plus en plus les modèles sont performants et rapprochent l'utilisateur de la réalité. Mais bien qu'ils soient performants et nombreux, les modèles sont utilisés en fonction de la spécialité pour un résultat précis. Ainsi, chaque modèle est appliqué à un cas spécifique comme par exemple un modèle hydraulique pour une analyse hydrologique. Aussi, la modélisation hydrologique (modèles empiriques globaux, modèles conceptuels, modèles à base physique) et, en particulier, la modélisation numérique dont les bases ont été jetées par Abbott (1991), représente une entreprise moderne qui a et qui continue à révolutionner le domaine de l'hydrologie ; grâce à elle, de nombreuses limites classiques ont pu être surmontées (Ghidaglia et Rittaud, 2004).

Les modèles numériques qui existent actuellement sont dotés d'une performance jugée acceptable et d'une utilisation conviviale (Abbott, 1991), mais sans pour autant arriver à l'objectif espéré, qui consiste à remplacer les experts par un modèle numérique facilement manipulable, dans lequel toutes les connaissances d'un expert physique sont incorporées (Harvey, 2002).

On constate que la modélisation hydrologique est une activité très répandue chez les hydrologues. Le modèle hydrologique est un outil incontournable dans la compréhension de la dynamique d'un bassin versant, dans l'utilisation rationnelle des ressources en eau de ce bassin et dans la lutte contre les catastrophes naturelles liées aux crues. En outre, la

modélisation aide à comprendre le comportement des éléments (pluie, sécheresse...), mais aussi permet d'avoir des données pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques (barrages, retenues...). D'ailleurs pour une bonne gestion des ressources en eau et un aménagement dans un bassin versant, la modélisation est nécessaire. C'est pourquoi Henine (2015) rappelle l'importance de proposer des *scénarios de crues, ou d'étiages pour l'élaboration d'un plan particulier de prévention des risques, lorsqu'il s'agit de délimiter les zones inondables ou de dimensionner les déversoirs de barrages hydroélectriques.*

Ainsi, la modélisation hydraulique est une méthode qui aide à comprendre les phénomènes hydrologiques et facilite la gestion des ressources en eau.

Pour la recherche menée sur les barrages d'Ayamé et le risque potentiel d'inondation en aval, la simulation hydraulique se révèle indispensable, puisqu'elle permet d'apprécier le comportement de l'eau dans le bassin versant de la Bia.

1.3.1.5. SIG et gestion des risques naturels

Les SIG sont des outils rapides d'exécution, flexibles et très puissants capables d'intégrer un grand nombre de facteurs et de les présenter sous une forme facilement interprétable (Zurayk *et al.*, 1999). La plupart des exemples d'application des SIG dans le domaine des risques naturels se sont intéressés aux aspects physiques des risques naturels comme la cartographie des zones inondables ou la cartographie des zones sismiques en se basant sur les mesures d'intensité des secousses, ou encore la prédiction des glissements de terrain à partir des caractéristiques géomorphologiques. Newkirk (1993) a présenté les raisons historiques derrière cette tendance.

Selon lui, plusieurs SIG commerciaux ont évolué de leurs fonctionnalités comme des outils de cartographie, et n'ont intégré des outils de modélisation et de simulation que récemment. Les exemples relatifs à la simulation intègrent généralement l'intégralité de la phase de modélisation physique du phénomène dans le SIG. Ici, les variables critiques contribuant à la définition du phénomène peuvent être dérivées du modèle numérique du terrain (pente, aspect, altitude) et d'autres données spatiales disponibles (sol, géologie, végétation). Dans cette optique, une application intéressante des SIG aux risques naturels a été la surveillance et la localisation des sites des déchets toxiques et des sites de contaminants polluants. Estes *et al.* (1987) ont fourni une discussion détaillée sur le rôle potentiel des SIG dans la surveillance des déchets. Cette discussion montre que le SIG

s'intéresse à la surveillance des facteurs physiques comme la proximité aux cours d'eau, les propriétés du sol, les sources polluantes etc. Par ailleurs, si la vulnérabilité n'a pas été abordé dans ladite discussion dirigée par Estes et al., la discussion note également le rôle des indicateurs socio-économiques pour identifier les sites dont le niveau d'acceptabilité du risque est dépassé.

Cavallin et al. (1995) ont fourni l'exemple d'un SIG appliqué à l'évaluation des risques de pollution des eaux souterraines. Le rapport de "l'U.S. Interagency Floodplain Management Review Committee" (1994) s'est intéressé par exemple aux risques potentiels associés à la localisation des installations de stockage des déchets dangereux et industriels à l'intérieur des plaines d'inondations.

Le rendu cartographique de toutes ces recherches est aujourd'hui répandu et les précisions de plus en plus bonnes. Par conséquent, les SIG deviennent utiles pour le gestionnaire de risques naturels. D'ailleurs, la modélisation de la procédure d'évacuation dans les SIG a reçu une attention particulière dans la littérature sur les risques naturels. Le besoin de disposer des plans d'évacuation pour évacuer des personnes vivant à proximité des usines nucléaires et des sites de productions chimiques est depuis une préoccupation mondiale. Les catastrophes dans les réacteurs nucléaires à Three Mile Island en 1979 et à Chernobyl en 1986, ont été les facteurs motivants dans ce domaine de recherche sur les risques.

Dans leur étude sur la modélisation de la vulnérabilité et l'évacuation des personnes en utilisant les SIG, Cova et al. (1997) ont introduit le concept de "Emergency Planning Zone" EPZ (la Zone de Planification d'Urgence). Ils notent que *"le concept EPZ était très utile pour la planification de l'évacuation, parce qu'il sert comme un accord formel entre les gestionnaires de secours sur la définition de l'évacuation possible"*. Ainsi les analystes d'une EPZ sont entièrement dirigés sur les problèmes liés à l'estimation et à la réduction du temps qu'ils peuvent passer pour la zone.

Les recherches de Cova et al. (1997) ont abouti à une approche basée sur les SIG pour la modélisation des évacuations avec la prise en compte de l'incertitude spatiale. Les incertitudes existent notamment pour les risques avec déclenchement rapide comme les fuites toxiques et les incendies urbains. De-Silva et al (1993) présentent un exemple de système d'aide à la décision pour la planification des secours. Ils ont utilisé des modèles de

simulation avec un SIG pour modéliser les routes d'évacuation dans le cas des catastrophes radiologique.

Les SIG sont si utiles pour gérer des crises que pour l'organisation des secours, les services publics de gestion des secours, comme les services d'ambulances, de police, et d'incendie les ont rapidement adoptés pour la gestion de parcs. Schwarz (1994) note que "de tels systèmes sont utilisés à trois niveaux : la géo-référenciation automatique, la cartographie automatique, la planification et l'analyse." D'autres exemples d'applications utilisent les SIG comme des outils d'inventaires pour la réhabilitation post-catastrophe, et l'évaluation des dommages et des dégâts.

En Californie, un SIG est utilisé dans les incendies d'Oaklan pour quantifier l'étendue spatiale et les dommages dans toutes les structures. Après les incendies, l'évaluation des dommages vise à fournir des informations immédiates pour l'allocation des aides fédérales aux victimes de la catastrophe ; elle vise aussi à utiliser les données pour cartographier le comportement de l'incendie pour des analyses futures de risques dans d'autres régions de l'État (Hicham, 2005).

Dans la phase d'évaluation des dommages d'Hurricane "Andrew" en Floride, Antonini et al. (1993) ont utilisé un SIG pour cartographier les navires endommagés. Le SIG est utilisé pour modéliser la relation entre les dommages et les facteurs déclenchants comme les marées, et pour classer les zones aux impacts potentiellement élevés en se basant sur la concentration des bateaux endommagés ou coulés. Les dommages structurels des bateaux sont utilisés comme un indicateur complémentaire de la valeur de l'endommagement environnemental. L'identification des navires endommagés devrait ainsi prévenir des dommages supplémentaires aux zones sensibles. Bocco et al. (1995) ont intégré des photographies aériennes, des données d'occupation du sol, et des modèles numériques de terrain pour évaluer les dommages et les dégâts des inondations du Mexique. Le système développé a été spécialement conçu pour l'évaluation des dommages, et a évolué pour être utilisé par les urbanistes, et pour être la base d'un système d'information urbain à grande échelle.

En fin de compte, les SIG sont efficaces à toutes les étapes de la gestion des risques. Bien utilisés, ils permettent avant tout aux décideurs de réduire les dommages en informant les populations sur les zones à risque.

Conclusion de la revue de littérature

La revue de littérature met en lumière le contenu de certains ouvrages traitant des questions se rapportant à l'étude en cours. Ces ouvrages prouvent la nécessité d'un barrage pour le développement, à condition que l'ouvrage hydroélectrique ou non soit pris en compte dans une politique de gestion intégrée du risque lié à sa rupture hypothétique. Sur ce point, la littérature relève plusieurs ruptures de barrages dans le monde, bien que ces accidents ne soient pas fréquents. Les auteurs montrent l'effectivité des conséquences désastreuses sur les milieux en aval de la digue.

Concernant la gestion du risque d'inondation, les auteurs l'abordent différemment et cela à juste titre, car l'inondation à elle seule peut avoir plusieurs causes. De plus, les conséquences liées à la montée des eaux diffèrent en fonction de la vulnérabilité de chaque site. Toutefois, en aval d'un barrage qui cède, les dégâts matériels et pertes humaines sont énormes. Les auteurs notent par ailleurs la nécessité des SIG grâce auxquels la modélisation de la vallée inondable est possible, ce qui facilite la prévention mais également la gestion de la crise. Malgré tout, il est difficile de connaître avec exactitude les limites de la zone inondable, tant les données entrées dans le SIG sont complexes et parfois truquées par certains opérateurs afin d'éviter des pertes économiques au moment d'une enquête. Face donc à une étude de danger généralement prospective, il est nécessaire d'avoir recours aux événements majeurs qui se sont déroulés dans la vallée même s'il ne s'agit pas de rupture de barrage. Les limites dessinées par une inondation quelconque permettent du reste de mieux apprécier les résultats de la modélisation hydraulique. En outre, l'inondation causée par une rupture de barrage ne doit pas seulement être appréciée à travers le résultat de la modélisation hydraulique en grande partie mathématique comme le font la plupart des spécialistes en étude de danger. Il faut aussi tenir compte de plusieurs aspects, notamment géographiques, historiques ou sociologiques, car de la perception du risque d'inondation auquel est exposé une population va dépendre sa compréhension des résultats du modèle hydraulique.

La plupart des études menées antérieurement sur les dangers liés à la présence d'un barrage sont axées sur les mathématiques et lorsqu'elles se rapprochent de la géographie, c'est essentiellement à travers l'hydrologie ou les SIG. En Côte d'Ivoire, si des études ont été conduites par exemple sur les inondations (ALLA, 2008 et 2013) et l'érosion côtière (ABE, 2005) il n'existe pas d'étude relative à une éventuelle rupture de barrage en Côte

d'Ivoire et aux inondations qui pourraient en résulter. Le présent travail vient pour attirer l'attention des pouvoirs publics et des populations sur ce genre de risque.

1.3.2. Définition des concepts

Il s'agit de donner avec précision, à partir des lectures faites, le sens des concepts fondamentaux qui entrent dans le cadre de l'étude menée.

1.3.2.1. Risque

Le risque est une notion composite qui peut être naturel ou industriel. À la suite de Millet (1968) qui définit le risque comme un danger possible, des géographes le définissent comme *"un danger auquel l'on est exposé individuellement ou collectivement dans certaines circonstances"* (Brunet et al. 2001) ou comme *"un danger éventuel, plus ou moins prévisible, dans une aire non précisément définie, d'une durée indéterminée"* (Bailly, 1994). Mais Tricart (1992) relève que danger et risque sont deux concepts différents et que, par abus de langage, ils sont pris l'un pour l'autre. Selon lui, *"le danger est le phénomène brut ou la situation qui peut affecter un être, animal ou plante, ou même un objet"*. En ce sens, le danger existe indépendamment de l'homme, même s'il peut lui faire courir des risques. Par contre, le risque est *"la traduction du danger en menace pour celui qui lui est soumis"*. Cette menace naît de la conjonction d'une part, du phénomène lui-même, naturel ou technologique (aléa) et, d'autre part, de la présence de l'homme (enjeu), de la manière dont cette présence est réalisée face au phénomène : groupement, concentration dans le site menacé ou dispersion des hommes.

Beaux (1998) évoque également la distinction entre danger et risque. Pour lui, il n'y a pas de risque dans un milieu inhabité. Dans ces conditions, le risque n'apparaît que s'il s'applique à une zone où existe une présence humaine significative, d'où la présence d'enjeu économique, culturel et environnemental.

De ce qui précède on peut retenir que le risque n'est pas le danger, mais il découle de la mise en relation entre la probabilité de survenue d'un événement et l'ampleur de ses conséquences éventuelles. En d'autres termes, *"on définit le risque comme les effets d'un aléa sur des biens ou des personnes vulnérables ; le danger est un état, le risque sa mesure"* (Bourrelier et al., 2000, cité par Barroca et al., 2007).

Ainsi, les définitions du risque privilégient de plus en plus le binôme aléa-vulnérabilité ou aléa-enjeu qui suppose tantôt une "indépendance" entre les termes ou qui est présenté tantôt comme une "rencontre", une "relation particulière", une "interaction", un "système de relations" (Pigeon, 2000). Pour être plus précis le risque est le résultat de l'interaction entre un aléa et la vulnérabilité des éléments exposés à son égard. Il correspond ainsi à la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un aléa et des conséquences pouvant en résulter sur les éléments vulnérables d'un milieu donné (Morin, 2008). Les pertes peuvent être estimées en termes de vies humaines, de destruction d'infrastructures ou en termes financiers (UNDRO, 1979).

Finalement le risque est un évènement catastrophique d'origine naturelle ou technologique qui survient dans un milieu vulnérable, il est doté d'une certaine probabilité. En outre, le risque résulte de la conjonction d'un aléa et d'enjeux.

Dans la présente étude, le risque naturel inondation est associé à un risque technologique à cause des barrages impliqués dans la catastrophe. De plus, les barrages emportés éventuellement par l'onde de rupture font partir des principaux enjeux économiques dans la partie aval du bassin versant.

1.3.2.2. Aléa

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

Bourrelier et al. (2000) dans l'ouvrage *Catastrophes naturelles, le grand cafouillage*, définissent l'aléa comme un événement naturel susceptible de se produire et dont on s'efforce d'évaluer la probabilité. Cette définition est renforcée par Dauphiné (2001), pour qui l'aléa désigne, au sens restreint, la probabilité d'occurrence d'un phénomène ; mais en réalité, il est plus complexe et est fonction de l'intensité du phénomène, de son occurrence, et aussi de la durée considérée et de l'espace pris en compte.

Tout bien pensé, Dauphiné (2002) définit l'aléa comme une représentation statistique du phénomène, d'origine naturelle ou anthropique et qui prend en compte l'occurrence et l'intensité du phénomène considéré.

Finalement, l'aléa se définit comme un évènement naturel ou technique qui lorsqu'il se produit provoque des dégâts matériels ou des pertes humaines si la zone où il se manifeste est marquée par une occupation humaine.

Ainsi, ce travail met en évidence l'inondation comme principal aléa. À cet aléa naturel, il faut ajouter les barrages eux-mêmes sans lesquels cette étude n'aurait pas tout son sens. Les barrages d'Ayamé deviennent par conséquent un aléa technologique qui est combiné à l'aléa naturel inondation en aval des barrages.

1.3.2.3. Enjeux et vulnérabilité

Les enjeux et la vulnérabilité sont liés à la présence humaine (personnes, habitations, activités économiques, infrastructures, ...).

Les enjeux "représentent les personnes, biens, activités, moyens, patrimoine, etc., susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel ou anthropique (Alla, 2013). Pour lui, définir les enjeux, c'est prendre en compte la vulnérabilité des populations due à leur forte concentration sur un territoire. Cette concentration dépend elle-même des revenus que ces populations ont, de ce fait, la pauvreté devient un facteur aggravant. Alla (2013) va plus loin en dissociant les enjeux matériels (bâtiments, installations et équipements agro-industriels, infrastructures routières, ferroviaires ou portuaires), liés au développement socio-économique, des enjeux environnementaux. Les enjeux environnementaux sont l'ensemble des forêts, parcs et écosystèmes. Mais le Guide général des plans de prévention des risques naturels prévisibles de 1997, propose deux catégories d'enjeux : les enjeux économiques qui traduisent généralement le degré de perte ou d'endommagement des biens et des activités exposés à l'occurrence d'un phénomène naturel d'une intensité donnée et les enjeux humains qui évaluent d'abord les préjudices potentiels aux personnes, dans leur intégrité physique et morale. Ils s'élargissent également à d'autres composantes de la société (sociales, psychologiques, culturelles, etc.) et tentent de mesurer sa capacité de réponse à des crises.

Tout compte fait, C'est l'inventaire des enjeux qui permet de hiérarchiser les priorités en matière d'actions à mettre en œuvre dans la gestion des catastrophes. Cela permet donc d'affiner les scénarios pressentis par l'étude de l'aléa.

La présente étude regroupe trois types d'enjeux, à savoir humains (populations), matériels ou économiques (habitations, équipements, industries, commerces, plantations) et environnementaux (faune, flore et sols).

La vulnérabilité est définie par Morin (2008) comme une condition résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques ou environnementaux qui prédisposent les éléments exposés à la manifestation d'un aléa à subir des préjudices ou des dommages. Il est suivi par D'Ercole et al., (1994) qui la considèrent comme étant *"la propension d'une société donnée à subir des dommages en cas de manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique"*. Et selon le Cadre d'Action de Hyogo 2005-2015 *"La vulnérabilité, ce sont les caractéristiques et les circonstances d'une communauté ou d'un système qui le rendent susceptible de subir les effets d'un danger"*.

En somme, la vulnérabilité représente la fragilité d'une société face à un aléa. Elle dépend de la préparation et de la capacité des sociétés à faire face à une catastrophe. Ainsi, face à l'aléa inondation dans ce travail de recherche, le bilan pourrait être différent selon la vulnérabilité des milieux dans le couloir inondable.

1.3.2.4. Inondation

Le Ministère français de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (2011), présente l'inondation comme étant une montée lente ou rapide de l'eau sur des terres qui en temps normal ne sont pas submergées. Par ailleurs, la montée de l'eau est temporaire pendant l'inondation et les territoires impactés sont le plus souvent occupés par l'homme. Cette définition de l'inondation est reprise par Torterotot (1993), cité par Adjakpa (2016) : *"l'inondation constitue un phénomène naturel se matérialisant par la submersion temporaire d'espace de terrain non habituellement submergé"*. En outre, l'inondation telle que définie par Cabanne et al., (1992) ; Brunet et al., 2001, cités par Danvidé (2015) est *"le débordement des eaux d'un cours d'eau sur le territoire du lit majeur ou qui sortent de leur lit"*.

Une inondation est donc une submersion, rapide ou lente, d'une zone habituellement hors d'eau. Mais l'inondation ne constitue pas un risque dans une zone inhabitée, aucun élément vulnérable n'y étant en théorie présent en termes de sécurité civile. Si au contraire elle touche une zone densément peuplée, où des infrastructures importantes sont implantées, le risque sera présent et pourra être fort (Cutter et al, 2003).

Ainsi, une inondation n'existe que par la présence d'enjeux en cas de manifestations du phénomène "hydrologique". Aussi, pour que cette définition de l'inondation soit complète, il est important de tenir compte de la présence d'un enjeu trop souvent ignoré, la "nature" elle-même. En effet, dans les espaces naturels, demeurent une flore et une faune aussi importantes pour l'humanité que les biens et matériels. De même que ces biens et matériels sont détruits, les forêts laissent également des traces du passage de l'eau. C'est pourquoi l'inondation mise en cause dans ce travail impact éventuellement les forêts en aval des barrages d'Ayamé.

1.3.2.5. Rupture de barrage

La structure imposante d'un barrage donne l'impression d'un calme apparent, mais derrière cette placidité, se cache un risque important pour l'aval. Alors quand survient la rupture, l'onde de submersion issue de cette rupture cause de graves pertes.

Selon le plan ORSEC départemental de l'Isère (2016), le phénomène de rupture de barrage dépend des caractéristiques propres du barrage et la rupture peut être progressive ou brutale, avec des conséquences humaines, économiques et environnementales. En outre, la rupture est constatée lorsque l'ouvrage est partiellement ou totalement détruit. La conséquence qui s'en suit est la formation d'une onde de submersion qui se traduit par une élévation brutale du niveau de l'eau à l'aval, voire un gigantesque torrent (Bouchehed, 2017).

Mais pour définir une rupture de barrage, on pourrait simplement faire un retour d'expérience sur les cas de Malpasset (1959) en France, Vajont (1963) en Italie et récemment au Kenya, où la rupture du barrage de Solai en mai 2018 a affecté quelques 500 familles selon la Croix-Rouge kényane. Il y a un point commun à toutes ces catastrophes, la rupture est constatée lorsque la structure cède du fait des événements naturels (séismes,

mouvements de terrain, crues, etc.) ou de défaillances humaines (mauvaise conception, négligence, sabotage, etc.).

Les ouvrages d'Ayamé concernés par ce travail ont la même configuration que la plupart des grands barrages où une zone de sécurité est nettement définie par le plan d'aménagement. Ainsi, avoir connaissance de la définition d'une "rupture de barrage" permet à chaque partie (exploitant, populations, autorités départementales) d'adopter les bons comportements et de prendre les bonnes décisions, face à l'onde de submersion dévastatrice générée par la rupture des barrages.

1.3.2.6. Onde de submersion

Selon le site internet <http://www.georisques.gouv.fr/glossaire/onde-de-submersion>³, l'onde de submersion est une élévation brutale du niveau de l'eau à la suite d'une rupture totale ou partielle d'un ouvrage qui fait obstacle à l'écoulement principale d'un cours d'eau. Cette définition est soutenue par le ministère français de l'écologie et du développement durable (2014) qui insiste sur le fait que l'onde de submersion est à l'origine d'une élévation brutale du niveau de l'eau à l'aval d'un barrage qui a cédé. En outre, l'onde de submersion s'apparente à une submersion marine (inondation temporaire de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques défavorables) des suites d'une rupture du système de protection comme une digue ou un cordon dunaire (Mercier, 2016).

Ainsi, l'onde de submersion générée par la rupture des barrages d'Ayamé se traduit par une élévation brutale et rapide du niveau de l'eau à l'aval des barrages, pouvant affecter la sécurité des personnes et des biens et avoir des conséquences néfastes sur l'environnement, notamment pollutions et impacts sur les milieux naturels.

Par ailleurs, cette onde est caractérisée par la hauteur et la vitesse de l'eau et ce en fonction des caractéristiques de la vallée inondable.

³ <http://www.georisques.gouv.fr/glossaire/onde-de-submersion>, consulté le 16 janvier 2020

1.4. PROBLEMATIQUE

Pour répondre à ses besoins en énergie, l'homme s'est servi des ressources naturelles, notamment l'eau pour produire l'électricité. L'utilisation des barrages modernes par l'homme date de plusieurs décennies. Selon le comité français des barrages et réservoirs (2013), 2900 ans avant Jésus-Christ, le pharaon MENES d'Egypte faisait déjà construire un ouvrage de 15 m de haut. Cet ouvrage avait pour but de dériver le Nil à Koseish, afin d'y construire la capitale Memphis derrière des remparts. L'intérêt d'un tel aménagement est qu'il a permis à la population et aux édifices d'être à l'abri des crues du Nil.

Mais, avec le temps et le développement, ces ouvrages ont connu diverses fonctions, notamment l'irrigation, la production d'électricité, la consommation en eau par les ménages et l'industrie, etc. Construit pour la plupart sur des cours d'eau, les grands barrages sont caractérisés, selon la Commission Internationale des Grands Barrages (2011) par une hauteur comprise entre 5 et 15 m et retiennent plus de 3 millions de mètre cube d'eau. Le déferlement d'une telle quantité d'eau n'est jamais sans conséquence pour les milieux en aval du réservoir. Le déversement d'un barrage ou plus grave la rupture d'un barrage entraîne des dommages sur les populations, des pertes économiques et la dégradation temporaire de l'environnement.

Par ailleurs, bien que la réglementation ait considérablement renforcé les dispositifs d'auscultation des ouvrages, d'alerte et d'organisation des secours, les épisodes précédents de rupture de barrages survenus dans le monde et les problèmes techniques observés sur certains grands barrages, comme celui de Kariba construit sur le Zambèze entre la Zambie et le Zimbabwe, obligent à rester toujours prudents. Cette attention particulière aux barrages a aujourd'hui fortement réduit les risques de leur rupture, surtout brusque. Cependant, l'histoire encore récente rappelle plusieurs catastrophes liées aux ruptures de barrage dans le monde.

En effet, le 19^{ème} et le 20^{ème} siècles ont connu des catastrophes liées aux ruptures de barrages hydroélectriques. En 1802, le barrage de Puentes dans le sud de l'Espagne, construit onze ans avant, cède entraînant la mort de 608 personnes (Chabal, 2009). En octobre 1963 au barrage de Vajont en Italie, plus de 260 millions de mètres cube de terre et de roche se déversent à plus de 90 km/h dans la retenue d'eau ; le glissement de terrain provoque deux énormes vagues de 25 millions de mètres cube d'eau vers l'amont et l'aval

du barrage. Les vagues générées détruisent les villes de Langarone, Pirago, Rivalta, Villanova et Faè. Cette catastrophe fait plus de 1900 morts (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents, 2010).

Le 21^{ème} siècle n'est pas épargné par les catastrophes liées aux ruptures de barrages, en dépit des mesures de prévention améliorées tirées des leçons du passé. Le risque de rupture du barrage hydroélectrique d'Oroville aux Etats Unis en 2017, la rupture d'un barrage minier au Brésil en 2015 ou encore celle d'un barrage à vocation agricole au Kenya en 2018 en sont des preuves. En outre, les pays du Sud, dotés d'un immense potentiel en ressources en eau ont bénéficié du transfert de technologie du Nord vers le Sud. Ces pays ont également vu leurs fleuves et rivières connaître de grands aménagements hydrauliques. En plus du Kenya susmentionné, il y a le cas du Ghana où est construit le barrage d'Akosombo, le plus grand barrage hydroélectrique d'Afrique de l'Ouest sur la volta.

En somme dans le monde, l'importance des barrages est une certitude, que ce soit pour de la production d'électricité, pour la protection contre les grandes crues, pour l'irrigation, pour l'adduction en eau, etc. Malgré toutes ces fonctions utiles, les barrages restent des dangers permanents pour les populations et l'environnement situés dans leur périmètre immédiat, principalement en aval des digues. Si dans le paysage d'un barrage, on peut constater un "calme apparent", c'est bien parce que le "risque est présent". Pour prévenir et gérer les catastrophes liées aux ruptures de barrages, des solutions sont proposées.

En France, EDF (Electricité de France) fait de la modélisation 3D un outil efficace de prévention et de gestion des risques, dans ses projets de développement à l'instar de l'hydroélectricité. En Algérie, l'impact d'une éventuelle rupture du barrage d'Ain Dalia alimentant la ville de Souk-Ahras et ses environs, ainsi qu'une partie des villes de Tebessa et de Oum El Baouagui, vue par Djemili et al (2010), offre aux décideurs, des moyens d'intervention en cas de désastre.

Aussi, réfléchissant sur la sécurisation de l'évacuateur des crues du barrage de Kariba et la gestion de la retenue de ce barrage situé sur le Zambèze, Clave et al (2013) montrent l'importance du suivi de ces ouvrages face au risque de submersion qu'ils peuvent générer. Au Cameroun, les conclusions tirées de la modélisation d'une rupture hypothétique du barrage de Maga réalisée par Sergio Mora-Castro et MSc. Javier Saborío-Bejarano

(2012) offrent une base de données importante. Ce sont des données physiques de la zone (hydrauliques, géotechniques, etc.), des outils de prévention et de gestions de la rupture hypothétique du barrage.

Il est évident que dans ces conditions, la sécurité de l'ouvrage lui-même et surtout la sécurité des milieux autour et en aval du barrage deviennent des enjeux majeurs pour un développement durable. Ainsi, aucune rupture de barrage ne devrait être tolérée puisque les conséquences de la rupture sont énormes (inondation, pertes en vies humaines, destruction de biens...). Toutefois, si le risque menaçait de se produire, les outils de gestion (principalement prévention et gestion de crise) se révèlent très utiles, puisqu'ils offrent aux différents acteurs des moyens d'éviter le pire.

En Côte d'Ivoire, le parc hydroélectrique est assez important. Sur les principaux fleuves de ce pays sont construits plusieurs ouvrages (Kossou, Buyo, Taabo, Soubré...). Mais on ne peut parler de ce parc sans se référer aux premiers barrages hydroélectriques construits à Ayamé. En effet, le département d'Aboisso dans le Sud-Est du pays compte à lui seul deux barrages, à savoir Ayamé 1 et Ayamé 2, respectivement mis en service en 1959 et en 1965. Ces barrages sont construits sur la Bia, avec un grand réservoir à Ayamé 1. La Bia est un fleuve côtier situé dans le sud de la Côte d'Ivoire. Il prend sa source au Ghana et se jette dans la lagune Aby dans le sud-est ivoirien. Sa longueur est de 300 km dont 120 km en Côte d'Ivoire. Sa largeur ne dépasse pas 150 m et son bassin versant couvre 9300 km² (Reizer, 1967 ; Girard *et al.*, 1970). Le fleuve coule vers la lagune Aby, en traversant plusieurs localités dont Ayamé où sont construits les barrages hydroélectriques et Aboisso la localité la plus importante du département.

Les études menées montrent que les territoires situés en aval d'un barrage sont directement exposés à un risque d'inondation, en cas de rupture de l'ouvrage, comme ce fut le cas au Kenya en 2018. Ces territoires nécessitent par conséquent une attention particulière.

En aval des barrages d'Ayamé 1 et 2, se trouvent les localités telles que Ayamé, Amoakro, Gnamienkro, Koukourandoumi, Biaka, Aboisso, Ebakro, Krindjabo, Ehouessèbo et Alliékrò. Ces localités témoignent de l'importance de l'anthropisation de la zone, donc des enjeux humains et économiques importants qui s'y trouvent.

Les crues successives que connaît la vallée de la Bia, dans une zone à pluviométrie intense, l'ancienneté des barrages d'Ayamé 1 et 2 (construits et mis en eau à la même

époque que les barrages de Fréjus en France et Vajont en Italie qui ont déjà connu de graves accidents), représentent pour l'ensemble des intervenants impliqués dans la gestion du risque d'inondation dans la vallée, un risque majeur. A tout moment, les barrages d'Ayamé peuvent rompre sous le poids de l'eau du réservoir d'Ayamé 1. En cas de rupture, quelle sera l'étendue de l'inondation et des dommages potentiels en aval des barrages d'Ayamé 1 et 2 ?

De cette préoccupation principale se dégagent les questions secondaires suivantes :
Quelles sont les caractéristiques du bassin versant de la Bia et des barrages d'Ayamé 1 et 2 ?
Quels seront les dommages potentiels d'une rupture des barrages d'Ayamé 1 et 2 ?
Quel outil peut-on élaborer pour une gestion préventive du risque d'inondation lié à la rupture des barrages d'Ayamé 1 et 2 ?

Ainsi la réflexion menée dans le cadre de ce travail s'articule autour d'objectifs opérationnels, afin de répondre aux questions posées.

1.5. OBJECTIFS

➤ Objectif général

L'objectif général de cette thèse est de déterminer l'étendue de la zone à risque d'inondation en cas de rupture des barrages d'Ayamé 1 et 2.

➤ Objectifs spécifiques

De manière spécifique, il s'agit de :

- Décrire les caractéristiques du bassin versant et des barrages d'Ayamé 1 et 2 ;
- Evaluer les dommages potentiels d'une rupture des barrages d'Ayamé 1 et 2 ;
- Elaborer un outil de gestion préventive du risque d'inondation liée à la rupture des barrages d'Ayamé 1 et 2.

CHAPITRE 2 : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE DE L'ÉTUDE

L'étude des risques naturels nécessite la manipulation de plusieurs données (topographiques, hydrologiques, géologiques, humaines, économiques...) combinées après un traitement numérique. Pour la présente étude, les données d'occupation du sol du département d'Aboisso seront combinées aux données physiques (cours d'eau et plan d'eau, relief, pente...). Le traitement de ces données se fait à partir de logiciels spécialisés.

2.1 . LES DONNEES ET MATERIELS DE TRAVAIL

2.1.1. Les données utilisées et leur collecte

Plusieurs données ont permis de mener à bien le travail : images satellites, cartes scannées, données hydrologiques, données démographiques, données de terrain, caractéristiques et données de bases des barrages.

2.1.1.1. Les données documentaires

La recherche documentaire sur le sujet s'est faite dans les bibliothèques de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), du Centre Culturel Français (CCF), de l'Institut de Géographie Tropicale (IGT) et la salle des archives d'Ayamé 1. Dans ces bibliothèques, la compilation des documents et leur exploitation ont permis d'obtenir des informations nécessaires sur les caractéristiques physiques (la topographie, le climat, le sol et la végétation) et socio-économiques (la démographie et les activités économiques) du cadre d'étude. D'autres ouvrages, thèses, rapports d'études, articles ont aidé à appréhender le sujet et la collecte des données nécessaires.

Des données ont également été collectées à la Direction de la Production de l'Energie de la CIE. Il s'agissait de faire la synthèse des travaux sur l'utilisation des barrages dans le monde et dans le cas spécifique en Côte d'Ivoire, d'apprécier par la même occasion les risques auxquels sont exposées les populations en aval de ces barrages en cas de rupture.

Par ailleurs, La consultation des données documentaires a permis de s'informer davantage sur le mode d'acquisition de toutes les autres données prise en compte dans ce travail, mais également sur les méthodes utilisées pour leur traitement.

2.1.1.2. Les données cartographiques

Ce sont les images satellites Landsat et SRTM, le fond de carte de Grand-Bassam, les fonds de cartes extraites de la monographie du District Comoé et les données de terrain pris au GPS. Toutes les données cartographiques sont projetées dans le système UTM zone 30 N, ellipsoïde de référence WGS 84.

L'image Landsat (OLI-8) de la scène 195-056, datant du 17 février 2016 a servi à la réalisation de la carte d'occupation du sol. Téléchargée sur le site internet <http://earthexplorer.usgs.gov>, l'image Landsat est de 30 m de résolution et les bandes utilisées sont 3, 4 et 5 pour leur capacité à faciliter la distinction des différentes unités d'occupation du sol. Toutefois, les images satellites de Google Earth et de SAS-Planet ont aidé à l'analyse du Landsat du 17 février 2016.

L'image Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) a permis de faire ressortir les principaux éléments physiques (altitudes, pentes, cours d'eau) du territoire. Également téléchargée sur le site internet <http://earthexplorer.usgs.gov>, l'image présente les caractéristiques suivantes : 30 m de résolution spectrale, format de fichier Tiff, capture faite en octobre 2010.

La complexité de ce travail exigeant un aperçu fiable du relief avant toute entreprise, le SRTM, s'est révélé une donnée essentielle. Ainsi le SRTM de septembre 2010 disponible au début des travaux, a aidé après traitement à valider le projet de thèse en 2015, puisqu'il ressortait les zones potentiellement inondables. Mais en 2018, une image SRTM de juin 2016 fût téléchargée et traitée afin de vérifier la conformité de l'image de 2010 à celle-ci. La topographie du département d'Aboisso ayant très peu évolué durant cette période, l'image initiale de 2010 a été retenue pour finaliser le travail. Le SRTM présente l'avantage de consigner les données topographiques et le réseau hydrographique qui sont ressorties après un traitement cartographique. Ainsi, les courbes de niveau et le bassin versant de la Bia sont générés automatiquement après le traitement cartographique de l'image SRTM.

Malgré la gamme assez large des images satellites (Sentinelle, ASTER GDEM, LIDAR), le Landsat et le SRTM ont été choisis d'abord pour leur gratuité, ensuite parce que les informations recherchées étaient perceptibles sur ces deux images.

La disponibilité des images satellites est une avancé pour la science. Lorsque ces images sont parfaitement utilisées avec des outils appropriés, le résultat de leur traitement aide à la prise de décision, puisqu'il offre un modèle numérique. Du reste, les images satellites une fois traitées et analysées ont aidé à mieux comprendre le risque d'inondation étudié dans ce travail.

Le fond de carte de Grand-Bassam à 1/200 000^{ème} qui comprend des informations physiques (cours et plans d'eaux, végétation, relief) et humaines (localités et routes) du milieu, permet d'avoir un large aperçu de la zone d'étude. Au format jpg, ce fond de carte est réalisé par le Centre de Cartographie et de Télédétection (CCT) en 2008. Les fonds de cartes de la monographie du District Comoé réalisée par le Ministère du Plan et du Développement en 2015 contiennent également des informations importantes pour ce travail, sur les milieux physiques et humains (géologie, climat, forêt, équipement, répartition de la population). Toutes ces cartes ont été scannées, puis géoréférencées dans le système WGS 1984 / ZONE 30 N, avant d'être numériser.

2.1.1.3. Les données hydro-climatiques

Elles permettent de faire l'analyse hydrologique du milieu et des barrages. Les données utilisées sont issues de deux sources et deux pas de temps. La première source est la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) pour l'étude de pluies moyennes annuelles sur trois stations, entre 1997 et 2015. Ce pas de temps où les données disponibles pour ce travail sont continues dans les stations de Bianouan, Ayamé et Aboisso, est également utilisé pour apprécier l'évolution des températures à Ayamé, avec les données prises à la SODEXAM.

La seconde source est la station du barrage d'Ayamé 1 qui conserve ses données à la Direction de la Production de l'Énergie (DPE), pour le calcul des périodes de retour des pluies extrêmes dans le bassin ivoirien de la Bia. Ces données sont comprises entre 1980 et 2013 ; il s'agit ici des données continues disponibles pendant les recherches auprès de la CIE.

2.1.1.4. Les données démographiques

Elles permettent d’apprécier les caractéristiques de la population et de comprendre son évolution dans le département d’Aboisso. Il s’agit des données collectées à Institut National de la Statistique (INS). Elles concernent le Recensement Général de la Population et de l’Habitat 2014 (RGPH) et portent sur la structure et la taille de la population.

2.1.1.5. Les données de terrain

En plus de comprendre des données cartographiques levées au GPS sur le terrain, il s’agit aussi des retours d’expériences d’inondations majeures, collectées auprès des populations, de l’administration et de l’exploitant des barrages d’Ayamé. Ces données permettent de confirmer, de compléter et d’ajuster toutes les données ci-dessus citées.

À l’entame de cette étude, le département d’Aboisso était en plein aménagement, principalement au niveau de la voirie. Outre les données statiques (cours d’eau), d’autres informations se complétaient à celles enregistrées en 2014 et 2015. Il s’agit essentiellement des infrastructures routières et ouvrages de franchissement. Cinq missions ont été effectuées en plusieurs phases, la première fut d’abord la reconnaissance des barrages d’Ayamé ; ensuite, les retours successifs sur le terrain répondaient à de nouveaux objectifs à atteindre. Ces différentes missions ont permis d’observer le fonctionnement de chaque barrage et d’identifier les milieux dans lesquels ils sont construits. Les données de terrain ont été collectées tout le long de la zone aval du lac d’Ayamé (de la ville d’Ayamé au village d’Allékro). Des entretiens avec les agents en poste aux barrages et ceux à la Direction de la Production de l’Energie à Abidjan, les habitants des villes et villages ont permis de reconstituer l’histoire des barrages et comprendre leur fonctionnement et leur impact en aval. Des témoignages des inondations passées en lien avec les barrages ont été recueillis.

Ainsi, un questionnaire a été adressé à 203 personnes situées uniquement en bordure de la Bia, entre l’usine d’Ayamé 1 et le village d’Alliédro. Il s’agit principalement des chefs de ménage présents dans le lit majeur de la Bia depuis plusieurs décennies et des agents des usines hydroélectriques d’Ayamé 1 et 2. A ces personnes enquêtées ont été ajoutées des personnes ressources, témoins d’évènements majeurs ou ayant eu récit de témoins d’évènements majeurs, en raison de leurs responsabilités administratives ou de leur

ancienneté ; elles sont au nombre de quatre (un villard d'Assouba, le Maire d'Aboisso, un enseignant à la retraite, un agent de la Direction Régionale du Ministère de l'Environnement). Le rôle joué par ces quatre cibles a été de vérifier les informations recueillies sur le site d'Aboisso. En outre, les questions ont porté sur la perception des sites occupés et des risques encourus par les populations, ainsi que sur la manifestations des inondations liées aux crues de la Bia. Un exemplaire du questionnaire est à **l'annexe 4**.

Après les observations dans les usines et le périmètre immédiat des barrages, certaines unités d'occupation du sol ont été identifiées et géo référencées en aval des barrages. Il s'agit : de forêts, de plantations, de zones d'habitation, d'infrastructures et d'équipements. Des repères d'inondations majeures historiques ont également été mesurés, photographiés et enregistrés. Les données ainsi obtenues ont aidé à la compréhension des données satellitaires, pour ensuite corriger les erreurs de leur traitement. Elles ont également permis d'évaluer l'impact des déversements en aval des barrages.

2.1.1.6. Les données de base et caractéristiques des barrages

Elles permettent de connaître les barrages, leur historique, fonctionnement et impact sur le milieu. Les données comprennent des chiffres sur les caractéristiques (débit, pente, altitude, superficie, longueur...) et des textes sur l'origine de la construction des deux barrages. Elles définissent le contexte, les objectifs, mais surtout les règles liées à l'exploitation des barrages.

Les données utilisées dans ce travail sont de sources différentes. De même, les matériels qui ont permis leur collecte et leur traitement sont aussi diversifiés. Toutefois, les données bien que traitées différemment sont au final intégrées dans un Système d'Information Géographique, afin de faciliter leur analyse.

2.1.2. Les matériels de travail

2.1.2.1. Le matériel informatique

La suite bureautique office 2013 (word, excel) a permis la rédaction du document et la conception de certains graphiques. Les logiciels de SIG : ArcGis 10.2.2, Google earth pro 2015, Envi 5 et HEC-RAS 5.0.3 ont été utilisés pour déterminer les zones à risque,

à parti de données à références spatiales. Avec ArcGis10.2.2, les différentes couches d'information relatives aux facteurs d'aléas et aux enjeux obtenues sur Envi et les données collectées sur le terrain, ont été intégrées dans le module ArcMap, pour l'élaboration de certaines cartes.

À la différence des modèles statiques pour l'étude des risques naturelles, HEC-RAS a l'avantage de simuler un modèle dynamique qui a été utilisé pour faire céder les barrages d'Ayamé et observer l'écoulement en aval. La carte d'inondation obtenue par la suite a été découpée en plus zone d'inondation.

Hyfran-plus, a permis de faire l'étude pluviométrique du bassin versant de la Bia et avec Adobe illustrator CS 4, les cartes et certaines images ont été finalisées.

2.1.2.1. Les autres matériels

Il s'agit principalement de tout ce qui a permis de collecter les données sur le terrain. Ce sont entre autre, le GPS (Garmin 64 S) pour la prise des coordonnées géographiques des points entrant dans le cadre de ce travail, le décamètre pour évaluer les niveaux d'eau au pied des constructions. A ceux-là, ont été ajouté un appareil photo numérique NIKON COOLPIX S 6300 de résolution 16 mégapixel, pour prendre des vues sur le terrain, un véhicule et par moment une pirogue pour les déplacements le long de la vallée étudiée et sur chaque rive.

2.2 METHODE DE TRAITEMENT DE DONNEES

Ces dernières années ont été marquées par l'essor de l'information géographique et un fort développement informatique, qui ont donné lieu à l'avènement de la géomatique. La géomatique s'est ensuite développée avec la vulgarisation des Systèmes d'Information Géographiques qui, en tant qu'outils d'aide à la décision, permettent une meilleure gestion des données à références spatiales de sources différentes.

Aussi, gérer les risques implique de connaître ses composantes, ce qui emmène le gestionnaire à l'utilisation des SIGs. Il s'agit pour lui de manipuler des données spatiales disponibles sous forme traditionnelle de cartes ou de base de données.

Après traitement des données, le gestionnaire propose aux décideurs et aux populations des cartes qui montrent les zones à risque pour la prévention ou des zones sinistrées après une catastrophe. Ces constats sont toujours accompagnés de plan de prévention ou de gestion.

2.2.1. Méthode de traitement de données pour l'élaboration des cartes

2.2.1.1. Traitement de l'image satellite Landsat OLI-8

Le traitement de l'image satellite s'est fait en utilisant des méthodes analytiques qui ont permis de réaliser la carte d'occupation du sol. De ce fait les logiciels ENVI 5 et ArcGIS 10.2.2 ont été utilisés. Dans cette étude, pour la réalisation de la carte d'occupation du sol, la méthode utilisée est la classification supervisée à travers l'algorithme de maximum de vraisemblance.

D'abord, une sous-scène correspondant à l'étendue et aux limites du département d'Aboisso est extraite de la scène entière téléchargée sur earthexplorer.usgs.gov. En superposant les limites de la zone d'étude à l'image satellite, une extraction par masque a été faite à partir du logiciel ArcGIS. Le procédé d'extraction est le suivant : Arctoolbox / outil spatial analyst / extraction / extraction par masque. Ensuite on effectue une composition colorée avec ENVI 5. Dans cette étude les compositions colorées sont obtenues par l'affichage à l'écran de trois bandes des canaux du capteur dans les canaux du système d'affichage (rouge-vert-bleu). Les bandes utilisées sont les bandes 3, 4 et 5 parce qu'elles sont mieux adaptées pour la cartographie de l'occupation du sol (Adou, 2015). Puis les classes sont déterminées, ce sont : les cultures, les forêts, l'eau, les zones habitées et les sols nus.

Les résultats obtenus sont intégrés dans un SIG, dans ArcGis 10.2.2. A cette image vectorisée, on procède à des vérifications à partir d'autres images satellites sur SAS - Planet et Google earth pro, ainsi qu'aux données de terrain. Les formes d'occupation du sol observées sur le terrain, celles reconnues sur les images de SAS - Planet et de Google earth pro sont comparées au résultat de la composition colorée, pour repérer les similitudes et les regrouper, en tenant compte des classes préalablement déterminées (cultures, forêts, eau, zones habitées et sols nus).

2.2.1.2. Traitement de l'image satellite SRTM

Le traitement de l'image satellite SRTM se fait sous ArcGis, avec les outils de la boîte "arctoolbox". Le traitement permet de générer les caractéristiques physiques du milieu étudié (réseau hydrographique, plan d'eau, courbes de niveau, pente, etc.), essentiel sa connaissance.

2.2.1.2.1. La topographie

Pour réaliser la carte des altitudes, l'outil 3D Analyst est d'abord sélectionné, ensuite raster surface et isoligne. Dans la fenêtre qui s'ouvre après un double clic sur isoligne, le SRTM est inséré en donnée, puis 5 m d'équidistance entre les courbes de niveau sont choisis pour que les lignes soient resserrées. Le traitement est lancé pour que le logiciel génère les courbes de niveau. Une fois le traitement terminé, le lissage des lignes qui permet d'améliorer le résultat est effectué en nettoyant les "déchets". Cette étape consiste à utiliser l'outil de cartographie "lisser des lignes", puis une modification du fichier est réalisée. Dans une session de mise à jour, et avec les outils d'édition, l'élimination des "déchets" se fait, un ajustement avec la réalité est également réalisé à ce stade. Les courbes de niveaux ainsi obtenues sont utilisées pour créer le TIN (Network Irregular Triangulation), qui permet d'avoir les altitudes et les pentes. Avec l'outil 3D analyst, on utilise les options gestion de données, puis TIN et surface triangulée.

Aussi la forme des vallées, les chevelures hydrographiques dessinées par le TIN renseignent sur les résultats du traitement du SRTM pour générer les cours d'eaux et délimiter le bassin versant de la Bia.

2.2.1.2.2. Bassin versant et réseau hydrographique

Pour délimiter le bassin versant du fleuve et ressortir le réseau hydrographique, les outils d'analyse spatiale du logiciel ArcGIS ont été utilisés. Le réseau hydrographique est d'abord créé avant de délimiter le bassin.

Dans outil d'analyse spatiale, les outils d'hydrologie sont d'abord déroulés, puis un double clic est effectué sur remplissage. Une fenêtre s'ouvre, dans laquelle le SRTM est intégré, avant de lancer le traitement. On ouvre une nouvelle fenêtre avec l'outil direction du flux, où est intégré le raster de remplissage. On ouvre encore une fenêtre avec l'outil

d'accumulation du flux, dans laquelle le raster de direction du flux est inséré. L'étape suivante consiste à utiliser l'outil "con" qui se trouve sous "conditions " dans les outils d'analyse spatiale. On renseigne la fenêtre avec le raster d'accumulation du flux. Ainsi le réseau hydrographique est généré, mais en format raster, donc difficile à modifier pour d'éventuel ajustement avec les courbes de niveau et la réalité. Aussi, transformer le raster en vecteur permet d'avoir la table attributaire du réseau avec toutes ses caractéristiques.

Pour ce faire, l'outil de conversion est utilisé, l'option raster vers polyligne est choisie. La hiérarchisation utilisée pendant le traitement est celle de Strehler.

La dernière étape consiste à délimiter le bassin versant de la Bia. Cela consiste à marquer un point en aval du fleuve au niveau de son exutoire puis avec l'outil bassin versant des outils d'hydrologie, procéder à un traitement. Deux données sont nécessaires, le point et le raster de direction du flux. Le résultat obtenu (raster) est également converti en vecteur, en faisant cette fois raster vers polygone.

Le traitement des images satellite, de cartes issues de documents et autres données de terrain pour la réalisation des cartes finales a été obligatoire pour cette étude prospective. Pour y parvenir l'utilisation des SIGs a été d'une grande importance. Par ailleurs d'autres traitements sont aussi nécessaires quand l'eau fait partir des éléments mis en cause dans une catastrophe naturelle, d'où une analyse fréquentielle.

2.2.2. Méthode d'étude fréquentielle des pluies extrêmes mensuelles

2.2.2.1. Les données hydro-climatiques

Le logiciel Excel de la suite Microsoft Office, outil informatique utilisé dans de nombreux domaines comme les mathématiques, les statistiques, les sciences environnementales et sociales. Excel est un tableur capable de gérer des données quantitatives organisées sous forme de grands tableaux croisés dynamiques appelés feuilles de calcul, qui intègrent les données et les formules en vue d'effectuer des calculs, manipuler les données et présenter les résultats sous forme de nombreux graphiques. Avec Excel, les pluies maximales sont ressorties, ainsi que les pluies moyennes, les températures, les côtes, les apports et pertes qui sont ensuite présentés sous forme de carte ou de graphique.

Le second logiciel utilisé pour le traitement des données hydrologiques est Hyfran-plus. Pour réaliser l'analyse fréquentielle avec Hyfran-plus, on entre d'abord dans le logiciel le titre du projet (Bia) qui sera le titre des graphiques produits, puis on colle les données prétraitées avec Excel. On inscrit ensuite le nom de la variable qui apparaîtra comme le titre d'un des axes des graphiques (l'abscisse ou l'ordonnée, selon le graphique demandé). Puis on inscrit l'unité de mesure des observations qui sera indiquée à la suite du nom de la variable sur les graphiques.

La suite du traitement consiste à réaliser les opérations suivantes :

- Cliquer sur l'onglet graphique, exporter le graphique,
- Cliquer sur l'onglet ajustement, choisir la loi d'ajustement (GEV, Weibull, Gumbel), cliquer sur l'onglet graphique et chaque fois exporter le graphique obtenu.

En restant sur la fenêtre graphique, on clique une fois encore sur l'onglet ajustement, puis cette fois, comparaison et critères. Cette dernière étape permet de faire la comparaison par critères en soutien à la comparaison graphique.

2.2.2.2. *Objet de l'étude fréquentielle des pluies extrêmes mensuelles*

La quantification de l'aléa pluviométrique peut se faire à partir de méthodes très différentes (analyse fréquentielle, pluie maximale probable, générateurs stochastiques), mais aussi et souvent complémentaires. L'analyse fréquentielle est l'approche statistique la plus utilisée pour quantifier l'aléa pluviométrique. En attribuant une probabilité d'occurrence à une grandeur physique telle que la pluie extrême, elle fournit un outil remarquable d'aide à la décision aux gouvernants (Meylan *et al.*, 2008).

L'analyse fréquentielle est utilisée, en particulier, pour estimer l'ampleur de l'événement temporel X_T auquel est associée une période de retour T (quantile de période de retour T ou de probabilité au dépassement ($p=1/T$)). L'estimation X_T de la valeur du quantile s'obtient en ajustant une loi de probabilité $F(x; \Theta)$ à un échantillon de n observations $x = \{x_1, \dots, x_n\}$, où Θ représente le vecteur de paramètres associé à la distribution de probabilité F . Les étapes principales de l'analyse fréquentielle sont :

- 1- La vérification des hypothèses de base. Ces hypothèses sont :
 - Homogénéité (les données proviennent d'un échantillon homogène, donc il n'y a pas de différence significative dans la moyenne de sous-échantillons).

- Stationnarité (pas de tendance à la hausse ou à la baisse dans la chronique des données).
- Indépendance (pas d'autocorrélation dans les séries).

2- L'ajustement d'une distribution statistique à l'échantillon. Cet ajustement est fait sur la base d'un échantillon ordonné pour lequel une probabilité au dépassement p ou une probabilité au non-dépassement q ($q = 1-p$) est calculée. Plusieurs formules empiriques existent pour calculer la probabilité au non-dépassement des pluies ordonnées. Celle utilisée dans cette étude est la formule de Cunnane : $q = \frac{k-q}{n-2q+1}$ où k est le rang des observations (classées de la plus faible à la plus élevée), n est la taille de l'échantillon et $q=0,4$ (constante de la formule de Cunnane)

3- À l'aide du modèle théorique fourni par la loi statistique ajustée, procéder à l'extrapolation permet d'obtenir les valeurs des quantiles (valeur de XT pour une période de retour T).

La relation entre la probabilité au non-dépassement et la période de retour est : $T = \frac{1}{1-q}$

De même, la statistique des extrêmes basée sur la méthode de Gumbel est une loi de probabilité fréquemment utilisée dans la pratique courante (Maidment, 1993). Un minimum de 20 années d'observations est en principe nécessaire pour établir une extrapolation fiable (Chow, 1953). L'étude fréquentielle de la pluie a été réalisée à l'aide du logiciel Hyfran-plus.

Le choix des différents modèles statistiques retenus pour l'ajustement des maxima annuels (MAXAN) repose sur des considérations théoriques (Soro, 2011). Et les recommandations des travaux antérieurs en la matière (Muller, 2006 ; Goula et al., 2007 ; Soro, 2011). Les modèles statistiques retenus à priori pour l'ajustement des variables des pluies extrêmes sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Modèles statistiques présélectionnés pour l'ajustement des pluies

Mode échantillonnage	Modèle statistique	Fonction de densité de probabilité	paramètres
MAXAN	GEV-EV1 (loi de Gumbel)	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[-\frac{x-u}{\alpha} - \exp \left(\frac{x-u}{\alpha} \right) \right]$	α, u
	GEV-EV2 (loi de Fréchet)	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left(1 - \frac{x-u}{\alpha} \right) \exp \left\{ -[1 - k(x-u)/\alpha]^{\frac{1}{k}} \right\}$	α, u, k
	GEV-EV3 (loi de Weibull)	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left(1 - \frac{x-u}{\alpha} \right)^{\frac{1}{k}-1} \exp \left\{ -[1 - k(x-u)/\alpha]^{\frac{1}{k}} \right\}$	α, u, k
	LN2 (loi Lognormale 2)	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\}$	σ, μ
	P3 (loi Pearson type 3)	$f(x) = \frac{\alpha^\lambda}{\Gamma(\lambda)} (x - m)^{\lambda-1} e^{-\alpha(x-m)}$	α, λ, m

Les travaux de Soro (2011) ont montré que plusieurs études comparatives tant empiriques que théoriques ont été menées afin de déterminer dans quelles circonstances une méthode d'estimation des paramètres est la plus efficace pour un modèle statistique donné.

Ainsi, l'estimateur du maximum de vraisemblance a-t-il été retenu dans le cadre de cette étude. Ce choix se justifie par le fait que l'estimateur de maximum de vraisemblance a l'avantage de produire une faible variance d'échantillonnage des paramètres estimés et par conséquent une faible variance des quantiles (Meylan et al., 2008 ; Soro, 2011). La méthode du maximum de vraisemblance consiste en effet, à trouver l'ensemble des paramètres qui, compte tenu de la loi de probabilité retenue, maximise la probabilité d'obtenir les valeurs observées de l'échantillon.

L'étude fréquentielle des pluies extrêmes mensuelles dans le bassin versant de la Bia est en définitive l'analyse statistique qui permet de connaître les caractéristiques hydrologiques nécessaire au paramétrage du modèle simulé.

2.2.3. Méthode de simulation de l'onde de rupture des barrages d'Ayamé

L'étude de rupture d'un barrage passe par plusieurs étapes (Marche, 2008 ; Chiganne, 2010). Après la collecte des données sur l'ouvrage et du bassin, la première étape consiste à choisir un scénario de rupture qui est fait en fonction des caractéristiques structurelles du barrage, des spécificités du site et du niveau du plan d'eau au moment de la rupture. Ensuite on procède à la modélisation du processus de la rupture elle-même et à la formation de l'écoulement au droit de la digue en d'autres termes estimer les paramètres de la brèche ; géométrie, temps de formation et débit maximal à l'ouvrage.

Plusieurs modèles sont aujourd'hui disponibles pour simuler une rupture de barrage avec pour conséquence l'onde de submersion en aval, il s'agit entre autres de HEC-RAS, WOLF 2D, MIKE, SOBEK (N'CHO, 2020). Dans cette étude, seul HEC-RAS est utilisé. C'est un modèle unidimensionnel hydrodynamique, mené par l'Hydrologic Engineering Centers River Analysis System de l'U.S. Army Corps of Engineers (USACE). Le choix de HEC-RAS est dû au fait qu'il soit suffisamment utilisé dans le monde pour la simulation des écoulements de fluides, transport de sédiments et par rapport à cette étude, le modèle permet de simuler la rupture de barrages. Aussi, les résultats d'une modélisation de rupture de barrage faite avec HEC-RAS se rapprochent davantage de la réalité.

La troisième phase d'une étude de rupture de barrage est la prévision des écoulements résultants en aval, pour cela plusieurs techniques sont disponibles, les plus récentes viennent de la simulation numérique des équations des écoulements en eaux peu profondes.

2.2.3.1. Choix du scénario

Le choix des scénarios de rupture est toujours difficile à définir. Un barrage est souvent inséré dans un système complexe où il peut être soumis à plusieurs risques qui peuvent causer sa rupture, ces risques peuvent être d'ordre naturel par exemple les crues, le tremblement de terre, la poussée de la vase, le vieillissement et la dégradation des structures en béton, ou bien des risques liés aux erreurs humaines dans la conception, la gestion ou dans l'entretien de l'ouvrage. L'analyse de ces risques doit permettre d'identifier les scénarios susceptibles d'être directement ou par effet domino, à l'origine de la rupture de l'ouvrage. (Marche, 2008 ; Paquier, 2002).

Dans cette étude, la simulation de la rupture du barrage d'Ayamé 1 est réalisée à partir d'un ordre naturel qui est la crue.

2.2.3.2. Modélisation du processus de rupture et écoulement

La rupture d'un barrage peut être plus ou moins brusque. C'est essentiellement la nature du barrage qui conditionne l'allure de sa rupture potentielle, plus encore que les causes de cette rupture. (Marche, 2008). Pour estimer les conséquences d'une rupture de barrage pour un scénario choisi, on doit en premier lieu modéliser le processus de la rupture elle-même et la formation de l'écoulement au droit de la digue (Paquier, 2002). Il est essentiel de connaître au droit du barrage, la géométrie de la brèche, le temps de formation de la brèche ainsi que le débit maximal à l'ouvrage.

Plusieurs formules sont disponibles dans la littérature pour estimer ces paramètres, elles ont été généralement développées sur la base de données de laboratoire et de cas réels observés de rupture de grand barrage :

Les travaux théoriques de Ritter (1892), supposant une retenue infinie et une rupture instantanée, donnent une première estimation du débit maximal à la brèche :

$$Q_{\max} = 0.92 * L * H_0^{1.5} \quad (1)$$

Avec : L = largeur constante de l'ouvrage s'effaçant, en mètres et H_0 = profondeur initiale d'eau en amont.

Les formules de Costa (2), de Molinaro (3) et de Lempérière (4) (pour des matériaux de petites dimensions et de cohésion nulle) relient la hauteur H du barrage (m) et le volume V de la retenue (m^3) au débit maximal à la brèche Q_{\max} (m^3/s).

$$Q_{\max} = 0.116 * (g * H)^{0.5} * H^2 * (V/H^3)^{0.22} \quad (2)$$

$$Q_{\max} = 0.7 * \sqrt{g * H} * H^2 * \sqrt{V/H^3} \quad (3)$$

$$Q_{\max} = 325 * (H * V/10^6)^{0.42} \quad (4)$$

Le temps nécessaire pour atteindre le débit maximal peut être estimé à l'aide de la formule

$$T = 10 V^{0.5} * g^{-0.5} * H \quad (5)$$

La formule de Hagen fait intervenir les mêmes paramètres, mais en unité impérial :

$$H' \text{ (pi)}, V' \text{ (acres-pieds)} \text{ et } Q'_{\max} \text{ (pi}^3\text{/s)} \quad (6)$$

$$Q'_{\max} = 370 * \sqrt{V' * H'^2} \quad (7)$$

Les formules de l'U.S. Bureau of Reclamation (1982) (8) et Evans (1986) (8.2), cités par Bouchehed (2017) mettent en avant l'importance des caractéristiques du réservoir dans l'évaluation du débit maximal de rupture :

$$Q_{\max} = 75 * D^{1.85} \quad (8)$$

Avec

Q_{\max} en $\text{pi}^3\text{/s}$

D : profondeur du réservoir (pi)

$$Q_{\max} = 0.072 * V^{0.53} \quad (9)$$

Avec

Q_{\max} en $\text{m}^3\text{/s}$ V : volume du réservoir (m^3)

Donald et Monopolis (1984) relie le débit maximal à la brèche

Q_{\max} ($\text{m}^3\text{/s}$), la hauteur d'eau H_w dans le réservoir au-dessus de la brèche (m) et le volume dans le réservoir V_w au moment de la rupture (m^3) :

$$Q_{\max} = 1.175 (H_w * V_w) \quad (10)$$

Singh fait intervenir les rapports H_s/H et H_s/B_m dans l'évaluation de la forme de la brèche, du débit maximal de rupture et du temps pour l'atteindre :

$$H_s = V^{0.33} \quad (11)$$

Avec

H : hauteur de l'ouvrage

B_m : largeur moyenne de la brèche

B : largeur au sommet de la brèche

d : profondeur de la brèche

il propose

$$B/d + 0.4H_s / H$$

$$Q_{\max} / (g B_m^2 H^3)^{0.5} = 0.0125 H_s / H \quad (12)$$

$$T(g/H)^{0.5} = 1.5H_s/B_m \quad (13)$$

L'étude du développement de la brèche dans les ouvrages en remblai pour différents mécanismes de rupture révèle une forme de brèche triangulaire ou trapézoïdale de largeur moyenne :

$$B = 9.5K_0(VH)^{0.25} \quad (14)$$

La brèche se développant en un temps T :

$$T = 0.59^{0.47}H^{0.9} \quad (15)$$

Avec B : largeur moyenne de la brèche (pi)

T : durée de formation de la brèche (h)

V : volume d'eau dans la retenue (acres-pieds)

H : hauteur d'eau de la retenue (pi)

K_0 : coefficient égal à 1 pour une rupture par submersion et égal à 0.7 pour une rupture par érosion interne. On obtient alors le débit maximal (pi³/s) par la formule suivante :

$$Q_{max} = 3.1 B \frac{c}{T+c\sqrt{H}} \quad (16)$$

Avec (1.6)

$$Q_{max} = 23.4 * A/B \quad (17)$$

Où A est la surface au miroir du réservoir à l'élévation du sommet du barrage (acres-pieds). Les formules de Froehlich (18), (19), (20) établies pour les barrages en remblai en étudiant 63 cas réels proposent :

$$B_m = 0.1803K_0V^{0.32}h_b^{0.19} \quad (18)$$

$$Z = 0.9$$

$$T = 0.00254V^{0.53}h_b^{-0.9} \quad (19)$$

Où

V : le volume de la retenue

K_0 : égal à 1.4 pour un déversement sur la crête et égal à 1 dans les autres cas.

Le débit maximal de l'onde de crue est donné par la formule suivante :

$$Q_p = 0.607V_w^{0.295}hw^{1.24} \quad (20)$$

La prévision de la propagation de la crue de rupture peut être abordée de multiples manières. Selon le cas, on aura recours aux approches théoriques, aux modèles numériques et aux essais en nature, compte tenu des particularités du site, des objectifs visés et des ressources disponibles. Par ailleurs, les équations fondamentales développées à partir du 19^{ème} siècle montrent toujours leur importance en hydraulique maritime ou fluviale et en particulier dans les études de propagation de crue de rupture de barrages.

Toutefois, l'importance de ces équations se voit de plus en plus réduite, puisqu'il existe aujourd'hui des solutions numériques dont l'émergence est avérée (Hervouet, 2003). Le recours à la modélisation numérique de la propagation des crues de rupture devient de plus en plus incontournable eu égard à leur capacité de prendre en compte le mode de rupture de l'ouvrage, la forme détaillée du cours d'eau principal et des affluents, les effets aux frontières ainsi que les différents phénomènes produits par les diverses singularités rencontrées le long de la vallée. Il faut surtout tenir compte des caractéristiques de la vallée, car dans une vallée très accidentée ou à forte pente, les équations fondamentales aussi appelées équations de Barré de Saint-Venant ne sont plus représentatives (Marche C. 2008).

Depuis quelques années, le démantèlement de quelques anciens barrages a permis aux groupes de recherche de faire des essais de rupture contrôlée (Projet IMPACT Breach Modelling Program, 2001-2004 en particulier) après instrumentation appropriée de l'ouvrage et de la vallée. Une technique se portant sur des cas plus représentatifs des situations réelles et donc peut apporter des données très importantes, cependant peu employée, car elle est très spécifique et orientée vers la validation des autres outils. (Marche, 2008) (Paquier, 2002). En outre, Les méthodes appliquées lors des essais de rupture contrôlée, ainsi que celles utilisées sur des barrages comme Stava en Italie ont aidé à choisir la méthode à appliquer dans ce travail de recherche.

La présence de deux barrages dans une même vallée, les élévations et la pente moyenne dans le bassin modélisé, la disponibilité des ressources sont entre autres, des critères qui ont favorisé l'utilisation du modèle numérique.

2.2.3.3. Construction du modèle

2.2.3.3.1. Géométrie de la vallée et modélisation

Cette étape consiste à préparer le modèle physique sous ArcGis. Le modèle numérique de terrain obtenu à partir d'un SRTM de 30 m de résolution, est utilisé pour extraire la partie aval du lac d'Ayamé en marquant l'exutoire à Aboisso (**figure 2**). Le modèle physique renferme les tronçons des cours d'eau dont le fleuve Bia, principal cours d'eau concerné par la simulation, les berges et les lignes d'écoulements.

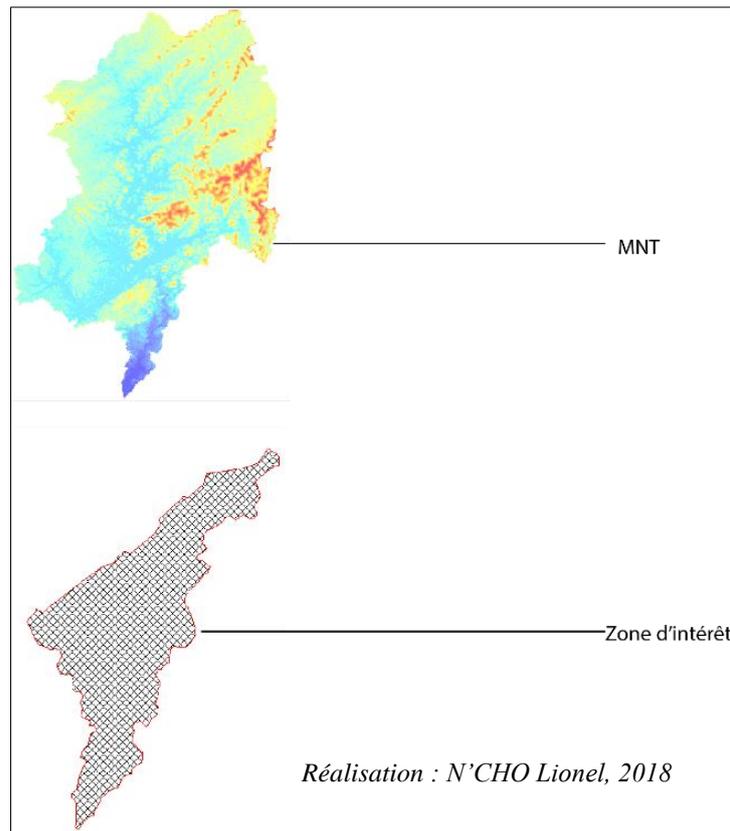


Figure 2 : Terrain extrait sous ArcGis pour la simulation hydraulique

2.2.3.3.2. Paramétrage du modèle sous HEC-RAS

Le phénomène de rupture de barrage dépend des caractéristiques propres du barrage. Ainsi, la rupture peut être :

- Progressive dans le cas des barrages en remblais, par érosion régressive, à la suite d'une submersion de l'ouvrage ou à une fuite à travers celui-ci (phénomène de " renard ")
- Brutale dans le cas des barrages en béton, par renversement ou par glissement d'un ou plusieurs plots (**ce qui concerne cette étude**)

La seconde étape consiste à simuler la rupture du barrage d'Ayamé 1 sous HEC-RAS. On importe le modèle élaboré précédemment sous HEC-RAS, ensuite on crée le terrain complété par un maillage de points. Le barrage d'Ayamé 1 étant le point d'entrée du fleuve, on le positionne en amont suivant la grille de maillage, l'exutoire est positionné à Aboisso. La suite consiste à renseigner les paramètres du modèle (données hydrologiques, caractéristiques du barrage, coefficient de Manning, pente...), puis lancer la simulation.

Le coefficient de Manning introduit dans le modèle correspond aux valeurs théoriques proposées par (Chow, 1859) une valeur de 0.05 a été adoptée dans les lits majeurs et de 0.033 dans le lit mineur.

Les crues de ruptures de barrages entraînent des variations rapides de niveaux d'eau et de débits, leur analyse nécessite donc d'ajuster le pas de temps (time step) dans les modèles numériques selon une courte durée et ce, afin d'améliorer la précision et la stabilité de l'analyse. Ainsi, le pas de temps dans les deux logiciels a été ajusté à 60 secondes.

Le type de rupture choisi est une rupture quasi instantanée (en 6 minutes) de 9 plots au centre du déversoir.

La dernière étape est de délimiter les zones inondables en se basant sur les résultats de la simulation hydraulique effectuée. Les résultats sont exportés vers ArcGis pour estimer les pertes causées par la catastrophe.

2.2.4. Description générale du Modèle HEC-RAS

Ce modèle est capable de représenter des ouvrages hydrauliques tels que les ponceaux, les déversoirs, les digues, les évacuateurs de crue et les ponts qui se trouvent dans un tronçon du cours d'eau. Il permet de réaliser des sections transversales avec un coefficient de Manning variable, de différencier les zones actives et non actives dans un canal et de créer des sections transversales interpolées (Zacharie., 2012).

2.2.4.1. Les équations utilisées par le modèle HEC-RAS

Le modèle numérique HEC-RAS utilise les équations dérivées par Barkau en 1982 pour calculer les écoulements en régime non permanent à partir du concept de la séparation de l'écoulement dans le lit mineur et dans les plaines inondables (les variables sont notées avec l'indice MC pour "Main Channel") et lit majeur (les variables sont notées avec l'indice FP pour "Flood Plain"). Ainsi les équations de Saint-Venant sont réécrites sous la forme (Finaud-Guyot. 2009) :

$$\frac{\partial Q_{MC}}{\partial t} + \frac{\partial Q_{MC}}{\partial x_{MC}} = q_{IFP}. \quad (21)$$

$$\frac{\partial Q_{FP}}{\partial t} + \frac{\partial Q_{FP}}{\partial x_{FP}} + \frac{\partial S_1}{\partial t} = M_C. \quad (22)$$

Où q_j , (FP, MC, ϕ) représentant respectivement le débit unitaire d'échange depuis le lit majeur vers le lit mineur, depuis le lit mineur vers le lit majeur et entrant dans la section. S est le volume unitaire d'eau contenu dans la section mais ne participant pas aux écoulements. Les équations de conservation de la quantité du mouvement sur chaque partie s'écrivent :

$$\frac{\partial Q_{MC}}{\partial t} + \frac{\partial(V_{MC}Q_{MC})}{\partial x_{MC}} = M_{IFP} - gS_{MC} \left(\frac{\partial z}{\partial x_{MC}} + S_{f,MC} + S_{h,MC} \right) \quad (23)$$

$$\frac{\partial Q_{rr}}{\partial t} + \frac{\partial(V_{FP}Q_{FP})}{\partial x_{FP}} = M_{I,MC} - gS_{FP} \left(\frac{\partial z}{\partial x_{FP}} + S_{f,rr} + S_{h,rr} \right) \quad (24)$$

Où : M_1 , (FP,MC) représentent respectivement le flux unitaire de quantité de mouvement d'échange latéral depuis le lit majeur vers le lit mineur et depuis le lit mineur vers le lit majeur et S_h , (FP,MC) la pente des pertes de charge singulières liées aux obstacles respectivement pour le lit majeur et le lit mineur.

Les équations (23) et (24) sont établies en faisant l'hypothèse que la surface libre z est la même sur toute la section d'écoulement. Les équations sur le lit mineur et sur le lit majeur sont ensuite sommées pour établir la conservation de la masse et de la quantité de mouvement sur l'ensemble de la section en travers :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial Q_{EQ}}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S_t}{\partial t} + \frac{\partial Q_{xFP}}{\partial x} = q_l \frac{\partial Q_{xFP}}{\partial x} \\ \frac{\partial Q_{EQ}}{\partial t} + \frac{\partial(\beta' u Q)}{\partial x} = X' \frac{\partial(u_l q_l) Q}{\partial x} - gS \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_{f,EQ} + S_{h,EQ} \right) \end{array} \right. \quad (25)$$

où,

$$S_{EQ} = S_{MC} \frac{\partial x_{MC}}{\partial x} + S_{FP} \frac{\partial x_{FP}}{\partial x} \quad (26)$$

$$Q = Q_{MC} + Q_{FP} \quad (27)$$

$$Q_{EQ} = Q_{MC} \frac{\partial x_{MC}}{\partial x} + Q_{FP} \frac{\partial x_{FP}}{\partial x} \quad (28)$$

$$S = S_{MC} + S_{FP} \quad (29)$$

$$Q_{f,EQ} = S_{f,MC} \frac{\partial x_{MC}}{\partial x} + S_{f,FP} \frac{\partial x_{FP}}{\partial x} \quad (30)$$

$$Q_{h,EQ} = S_{h,MC} \frac{\partial x_{MC}}{\partial x} + S_{h,FP} \frac{\partial x_{FP}}{\partial x} \quad (31)$$

Où, x représente l'abscisse curviligne commune à l'écoulement en lit mineur et en lit majeur et est calculée à partir de x_{MC} et x_{FP} et où : les termes q_{bFP} , q_{bMC} ont été supprimés dans la mesure où ils s'annulent deux à deux :

$$q_{l,MC} \frac{\partial x_{FP}}{\partial x} = -q_{l,FP} \frac{\partial x_{MC}}{\partial x} \text{ et } M_{l,MC} \frac{\partial x_{FP}}{\partial x} = -M_{l,FP} \frac{\partial x_{MC}}{\partial x} \quad (32)$$

Un terme d'apport latéral de quantité de mouvement $x \frac{\partial(u_l q_l)}{\partial t}$ a été ajouté pour prendre en compte les échanges de quantité de mouvement au niveau des confluences et des diffluences.

2.2.4.2. Technique de résolution numérique des équations de mouvement

La résolution numérique des équations de Saint-Venant dans le logiciel HEC-RAS utilise le schéma implicite de différence finie basé sur une technique de linéarisation développée par Preissmann (Preissman, 1961). La représentation de l'estimation des dérivées partielles dans l'espace des phases est présentée par les **figures 3 et 4**.

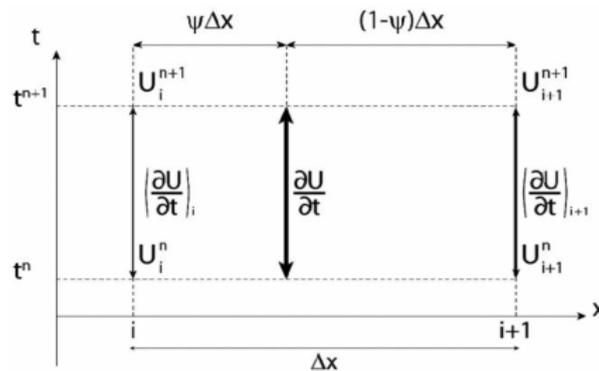


Figure 3 : Principe de la discrétisation temporelle dans HEC-RAS

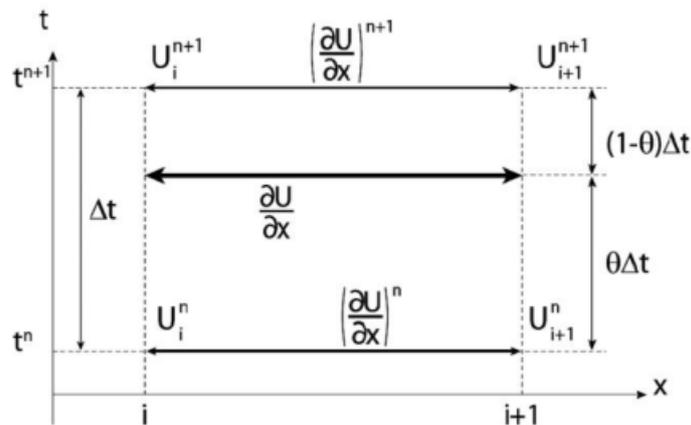


Figure 4 : Principe de la discrétisation spatiale dans HEC-RAS

L'expression pour ces dérivées est :

$$\frac{\partial U}{\partial t} \approx (1 - y) \frac{U_i^{n+1} + U_i^n}{\Delta t} + y \frac{U_{i+1}^{n+1} + U_{i+1}^n}{\Delta t} \quad (33)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} \approx (1 - q) \frac{U_{i+1}^n + U_i^n}{\Delta x} + q \frac{U_{i+1}^{n+1} + U_i^{n+1}}{\Delta x} \quad (34)$$

Le système d'équations étant non linéaire, sa résolution nécessiterait des temps de calculs relativement importants et des problèmes de convergence pourraient apparaître en cas de solutions discontinues (choc, ressaut hydraulique, etc.)

Le passage en régime torrentiel peut être à l'origine des oscillations numériques qui tendent à s'amplifier sans pour autant causer un arrêt du programme. Le manuel utilisateur du logiciel HEC-RAS (USACE, 2010) indique que si l'écoulement peut devenir torrentiel, il convient d'utiliser une méthodologie alternative.

La technique employée alors est la "Local Partial Inertia" développée par (Fread et al., 1998). Cette méthodologie consiste à réduire l'influence des termes inertiels dans l'équation de quantité de mouvement :

$$f \left[\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{b'Q^2}{S} \right)}{\partial x} \right] = -gS \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_{f.x} \right) \quad (35)$$

La fonction f de transition f étant définie par

$$f = \begin{cases} Fr - Fr^m & \text{pour } Fr \leq Fr_T \\ 0 & \text{pour } Fr > Fr_T \end{cases} \quad (36)$$

2.2.4.3. Théorie associée aux débits de brèche

La formule employée dans HEC-RAS pour le calcul du débit de brèche dans le cas d'une rupture par déversement (ouvertopping) est similaire à la formule permettant de calculer le débit par-dessus d'un déversoir à seuil trapézoïdal épais. Elle s'écrit comme suit (Zhou et al., 2005) :

$$Q_b = C_w [b_s(H_t - h_b)1.5 + 0.8z(H_t - h_b)^{2.5}] \quad (37)$$

Avec,

H_t : la charge d'énergie totale,

C_w : le coefficient de débit.

Dans le cas d'une rupture par érosion interne (piping) HEC-RAS utilise également l'équation d'un écoulement par orifice afin de calculer le débit de brèche (Gee, 2005) :

$$Q_b = C\sqrt{2g}A - \left(ZH + \frac{v^2}{2g} - Zb \right)^{0.5} \quad (38)$$

Avec :

Q_b : est le débit instantané de brèche

C : est le coefficient de débit (orifice)

A : est l'aire (orifice)

Z_H : est le niveau d'eau amont

v : est la vitesse d'approche

Z_b : est l'élévation au centre de la brèche

Les effets de submergence aval sont pris en compte par la réduction d'énergie spécifique par le niveau d'eau aval (Z_T) et par l'introduction d'un facteur de submergence critique (R_c).

L'équation (38) devient alors :

$$Q_b = \frac{C}{R_c(1-R_c)}\sqrt{2g}A\left(ZH + \frac{v^2}{2g} - ZT \right)^{0.5} \quad (39)$$

2.2.4.4. Avantages et inconvénients du logiciel HEC-RAS

Plusieurs modèles sont aujourd'hui disponibles pour simuler une rupture de barrage, avec pour conséquence, l'onde de submersion en aval. Il s'agit entre autres de HEC-RAS, WOLF 2D, MIKE, SOBEK. Dans cette étude, HEC-RAS est utilisé. C'est un modèle unidimensionnel hydrodynamique, mené par USACE (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System de l'U.S. Army Corps of Engineers).

Le modèle est simple d'utilisation et ce, principalement en raison de son interface graphique et de son menu intuitif (avec icônes). Le logiciel HEC-RAS est bien divisé et les modules sont tous clairs. De plus, les messages d'erreurs sont faciles à comprendre pour des nouveaux utilisateurs et il est facile de reprendre un modèle créé par un autre utilisateur afin de le vérifier ou de l'améliorer. Les coefficients de Manning sont simples à spécifier et le logiciel permet de définir ces coefficients de manière horizontale ou verticale ; pour laquelle les coefficients peuvent être définis en fonction de l'élévation ou du débit.

Lors d'analyse de rupture de barrage où l'écoulement est majoritairement torrentiel (sous critique) et pour lequel les niveaux d'eau sont de faible hauteur, le choix d'effectuer des simulations en utilisant le logiciel HEC-RAS devrait être soigneusement réévalué. En effet, il est démontré par Fread et Lewis (1998) que ce type de simulation entraîne souvent des solutions numériques instables et des problèmes de convergence dans la

résolution dynamique des équations de Saint Venant. Une recommandation, afin de vérifier la validité des résultats obtenus lors de simulation, est de consulter le menu « Hydraulic Property Table Plots » afin de vérifier la présence d'irrégularités dans les différents graphiques. Ces irrégularités sont parfois liées à des erreurs de géométrie de sections transversales ou aux changements de coefficient de Manning lorsque le niveau d'eau dépasse les élévations spécifiées pour la localisation des plaines de débordement.

2.2.5. Méthodes d'identification de la zone d'aléa inondation

"Le risque résultant de l'aléa (phénomène naturel menaçant) et des enjeux (éléments exposés), la véritable ambition de son évaluation est sans aucun doute l'identification des zones où des dommages seraient possibles" (Alla, 2013).

Ainsi, pour identifier la zone inondable, une simulation hydraulique est réalisée sous le logiciel HEC-RAS en plus de l'analyse du modèle numérique de terrain de la zone à risque. On utilise un modèle qui permet d'apprécier l'écoulement en aval du réservoir après la rupture des barrages. Une pluie extrême de 702 mm pour une période de retour de 200 ans est utilisée pour le modèle.

La zone inondable correspondant à la zone où l'aléa inondation pourrait se produire est définie par la zone d'emprise de l'écoulement généré par le logiciel. La configuration topographique du département donnée par le modèle numérique de terrain aide à déterminer le couloir inondable et ses limites. Il s'agit ici du fond de la vallée en aval de la retenue d'Ayamé 1, dans le bassin de la Bia. De plus, les hauteurs de submersion diffèrent en fonction de la topographie du couloir inondable. Les vitesses évoluent également en fonction des pentes. Ainsi, en fonction de la topographie de la vallée inondable, une zone peut être totalement submergée par l'onde de rupture des barrages, où partiellement inondée.

La hauteur de l'eau dans le couloir inondable à chaque niveau du risque est donnée dans **le tableau 2**.

Tableau 2 : Niveau du risque en fonction de la hauteur d'eau

Hauteur d'eau en m	Niveau du risque
10 – 15	Très fort
5 – 10	Fort
2,5 – 5	Moyen
0 - 2,5	Faible

Dans cette étude, les hauteurs d'eau sont regroupées en 4 classes allant du niveau 0 à 15 m. Chaque classe correspond à un niveau du risque d'inondation dans le couloir submersible. Ainsi, le risque est faible lorsque la hauteur d'eau est inférieure ou égale à 2,5 m. Certes à cette hauteur, il pourrait y avoir des pertes en vie humaine. Néanmoins si les populations sont mises en zone de sécurité avant la rupture des barrages, les dégâts matériels, au-delà des dommages environnementaux et agricoles, seront moindre. Par contre, les hauteurs d'eau au-dessus de 2,5 m aggravent le risque d'inondation dans la vallée. Par ailleurs, plus la hauteur de l'eau est importante, plus le niveau du risque est élevé.

2.2.6. Détermination des enjeux

Pour déterminer les enjeux dans le département d'Aboisso, on a eu recours aux facteurs population et occupation du sol. La hiérarchisation des enjeux humains vise à définir les populations exposées et à estimer le nombre potentiel de victimes ou de sans-abri face à la manifestation d'un aléa naturel destructeur. Dans cette étude, elle repose sur la densité de population et son évaluation s'appuie sur la population de 2014 (RGPH, 2014).

Les densités de population dans le département d'Aboisso sont hiérarchisées pour former quatre classes de densité de population (**tableau 3**).

Tableau 3 : Enjeux humains suivant la densité de population

Classe de densité (hab/km ²)	Niveau d'enjeux humains
Moins de 35	Faible
35-60	Moyen
60-100	Important
100 et plus	Très Important

Plus la densité de population dans le département est importante, plus le niveau d'enjeux humains est élevé.

Par ailleurs, les enjeux matériels, économiques et environnementaux sont obtenus à partir de la carte d'occupation du sol et des relevés de terrain dans le département. La carte d'occupation du sol fait ressortir les différentes zones de cultures, zones habitées et les autres couvertures végétales notamment les forêts.

2.2.7. La détermination de la zone à risque

La dernière étape de la démarche a pour objectif de déterminer dans le département d'Aboisso la zone où l'inondation serait en mesure de créer des dommages en cas de rupture des barrages d'Ayamé. Elle repose sur la superposition des cartes d'aléa et d'enjeux et s'exprime par l'équation : $\text{risque} = \text{aléa} * \text{enjeux}$.

Le processus d'élaboration de la carte de la zone à risque est présenté par la **figure 5**.

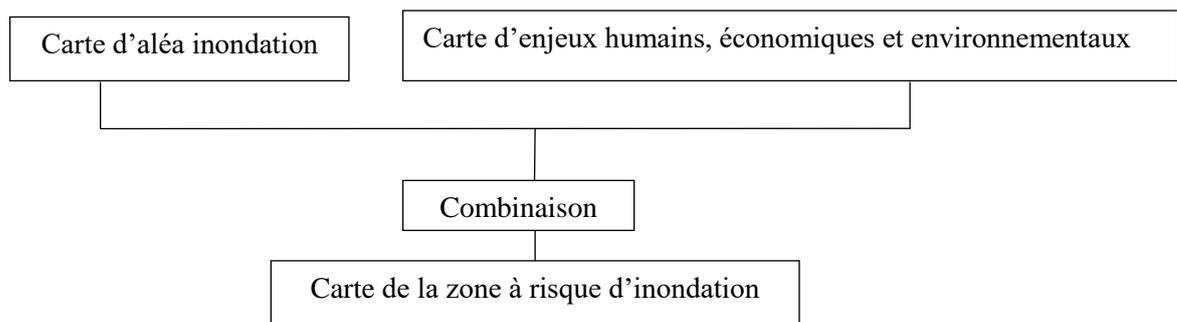


Figure 5 : Cartographie de la zone à risque

Les enjeux regroupés en différentes couches géoréférencées sont combinés avec la carte de l'aléa inondation, afin d'extraire avec exactitude la zone à risque d'inondation. La modélisation hydraulique sous HEC-RAS est un plus dans le processus, puisqu'elle vient confirmer les projections émises par le modèle numérique de terrain.

En somme, la prévention et la gestion des risques naturels exigent aujourd'hui de s'accoutumer à une méthodologie rigoureuse, faisant appel à la combinaison dans un Système d'Information Géographique, de données humaines, économiques et environnementales.

Des satellites espions de la période de la guerre froide n'ont pas cessé de tourner depuis la fin de la guerre, ils continuent de collecter des informations et des images sur notre planète. Ces données, aujourd'hui mises à la disposition de la science, lui permettent

d'avancer. En environnement, l'utilisation de données satellites est essentielle. Celles qui sont exploitées dans cette étude, couplées aux données de terrain et aux données documentaires collectées ont pu être traitées grâce à la contribution d'outils spécialisés.

2.3 . LES DIFFICULTES RENCONTREES

Elles se situent plus au niveau de la documentation et des populations du département.

La première s'explique par le fait que les ruptures de barrages sont des catastrophes rares. Ce phénomène est peu étudié au niveau académique, ce qui a contraint à utiliser plus de rapports techniques de projet de barrage, que de thèses, de mémoires ou d'articles scientifiques.

En Côte d'Ivoire, cette étude n'avait jamais été menée, il fallait donc chercher ailleurs pour l'adapter au milieu ivoirien. Des réponses trouvées en Algérie, au Cameroun, en Zambie, ont instruit sur l'Afrique. Aussi, la réglementation ivoirienne sur les catastrophes liées aux ruptures de barrages, était totalement absente. L'ONPC, chargé de la gestion des catastrophes n'était pas en mesure de fournir les documents utiles pour cette étude.

La deuxième difficulté d'ordre humaine, c'est la mauvaise compréhension des populations à qui ce travail est pourtant destiné. Les autorités locales, avec à leur tête le préfet, le gestionnaire des barrages sous l'autorité du directeur général, ont certes accordé toutes les autorisations pour mener à bien cette étude, mais le constat avec les populations sur le terrain est différent. Il convient de rappeler que l'étude s'est déroulée après que les populations de la sous-préfecture d'Ayamé aient décidé de ne plus payer leur facture d'électricité. La raison retenue est que les barrages sont sur leur terre, alors ce refus est une forme d'indemnisation pour les dommages causés. De même, derrière ce problème financier se cache un autre plus grand. La construction des barrages a non seulement déplacé des villages comme Ayamé (autrefois Diangui), mais le lac a enseveli les "racines" d'Ayamé. Les populations sont sur leur terre disent-elles, les intrus, ce sont les barrages. Dès lors, il paraissait complexe d'aller au bout des enquêtes, car le seul responsable des inondations pour les villageois, c'est la CIE. Dans la collecte des données terrain, il fallait donc agir avec beaucoup de prudence et de réalisme.

À Koukourandoumi par exemple, pour se rendre sur la rive gauche de la Bia, c'est un vieillard marchant à peine avec une canne qui se propose de conduire la traversée en pirogue, alors que son petit-fils venait de menacer l'équipe qui enquêtait, sous prétexte que les enquêtes se faisaient trop près de la résidence privée d'une ex première dame de Côte d'Ivoire.

A ces difficultés, il faut ajouter la complexité même de l'étude de rupture de barrage sous un modèle. Ce travail de recherche implique secteur privé et société publique, d'où la sensibilité des résultats pour les deux parties. Il a donc fallu à chaque fois confronter les résultats obtenus aux prévisions des ingénieurs qui ont construit les barrages.

Le **tableau 4** présente la synthèse de la méthodologie et des résultats attendus dans ce travail.

Tableau 4 : Présentation synoptique de la recherche

Constats	Problèmes	Objectifs	Méthodologie	Résultats
Les barrages d'Ayamé 1 et 2 sont construits sur le fleuve Bia dont le bassin versant est partagé par deux pays.	Le bassin versant de la Bia est un territoire dont l'occupation humaine est importante en aval	Décrire les caractéristiques du bassin versant et des barrages d'Ayamé 1 et 2.	<ul style="list-style-type: none"> - Recherches documentaires - Entretiens, questionnaires - Observation du terrain - Numérisation 	<ul style="list-style-type: none"> - La cartographie des milieux physique et humain du bassin versant de la Bia - Le retour d'expérience des inondations liées au fonctionnement des barrages d'Ayamé dans le bassin versant de la Bia.
Le volume du réservoir du lac d'Ayamé 1 est régulé à partir de lâchers d'eau périodique	Les déversements des barrages d'Ayamé 1 et 2 génèrent des dégâts matériels, des pertes économiques et même humaines.	Evaluer les dommages potentiels d'une rupture des barrages d'Ayamé 1 et 2.	<ul style="list-style-type: none"> - Recherches documentaires - Simulation de la rupture du barrage d'Ayamé 1 - Numérisation 	<ul style="list-style-type: none"> - La cartographie de l'inondation - Les impacts générés par la catastrophe
Il n'existe pas d'outil pouvant aider à la gestion de la rupture des barrages d'Ayamé	Une rupture brusque ou progressive des barrages d'Ayamé causera plus de pertes que si le risque est connu et anticipé.	Elaborer des outils de gestion préventive du risque d'inondation liée à la rupture des barrages d'Ayamé 1 et 2.	<ul style="list-style-type: none"> - Recherches documentaires - Analyse des impacts potentiels générés par la catastrophe 	<ul style="list-style-type: none"> - Elaboration d'un Plan Particulier du Risque d'Inondation

Conclusion de la première partie

Cette partie a consisté à comprendre les concepts liés à l'étude. Il ressort de l'analyse faite que le risque est la combinaison de l'aléa et de l'enjeu. Dans le cas de ce travail, le risque d'inondation fait intervenir la rupture de barrages hydroélectriques dont l'onde de submersion est fortement ressentie en aval où se situent les principaux enjeux dans la vallée (constructions, équipements et infrastructures, plantations, forêts, populations). Les barrages hydroélectriques sont des structures qui retiennent d'énormes quantités d'eau. Une fois qu'ils cèdent, toute la retenue est brutalement emportée en aval, causant des changements brusques dans les milieux de la vallée.

Cette étude a nécessité une simulation de rupture de barrage et le traitement d'une panoplie de données. Pour y parvenir, les Systèmes d'Informations Géographiques ont été l'outil idéal. Ainsi, provenant de plusieurs sources, les données ont été assemblées dans un même système de référence spatiale. Les cartes d'inondation obtenues sont le résultat des traitements effectués sous HEC-RAS et ArcGis.

En outre, cette étude étant consacrée aux impacts potentiels en aval de barrages hydroélectriques suite à leur rupture, la partie suivante de ce travail va consister à décrire les barrages et les milieux dans lesquels ils sont construits, afin d'anticiper le risque d'inondation.

DEUXIÈME PARTIE
LES BARRAGES D'AYAMÉ 1 ET 2
DANS LE BASSIN VERSANT DE LA BIA

Chapitre 3 : le bassin versant de la Bia

**Chapitre 4 : les barrages hydroélectriques d'Ayamé et les milieux
en aval face aux apports hydrologiques**

INTRODUCTION DE LA DEUXIÈME PARTIE

Le bassin versant de la Bia est un espace que se partagent deux pays, la Côte d'Ivoire et la Ghana où se trouve la plus grande partie du bassin. Mais la part qui se trouve en Côte d'Ivoire est celle qui a reçu les aménagements les plus importants. Cette zone inscrite dans le département d'Aboisso bénéficie de deux barrages hydroélectriques construits sur la Bia.

Le but recherché dans cette partie étant de connaître les barrages d'Ayamé dans le bassin versant de la Bia, le chapitre 3 décrit le bassin versant ; Il montre les caractéristiques physiques et humaines de ce milieu. Ce chapitre permet donc de connaître le site qui abrite les barrages hydroélectriques d'Ayamé, à travers un diagnostic territorial axé sur des éléments clés (relief, climat, hydrographie, population, activités économiques...).

Le chapitre 4 qui suit fait un exposé détaillé des barrages hydroélectriques d'Ayamé ainsi que des milieux situés en aval de ceux-ci. Ce chapitre présente ainsi les fiches techniques des ouvrages, leur fonctionnement et leur état après plus d'un demi-siècle de leur mise en eau. Également dans ce chapitre, un état des lieux des milieux en aval des barrages d'Ayamé est fait, afin d'apprécier les interactions entre ces milieux et les barrages.

Il ressort de l'analyse faite que les barrages d'Ayamé sont dépendants de trois sources essentielles (pluies abondantes, rivières et fleuve), à ces principales sources s'ajoute le lac d'Ayamé qui exerce un poids énorme sur les contreforts d'Ayamé 1. L'ensemble de ces éléments fait du bassin versant de la Bia une zone où la montée des eaux est constamment observée en saison humide, mettant ainsi en danger les occupants du bassin.

CHAPITRE 3 : LE BASSIN VERSANT DE LA BIA

L'ensemble du bassin versant de la Bia et la partie située dans le Sud-Comoé en Côte d'Ivoire sont présentés.

Aussi, si une catastrophe survenue à Ayamé peut impacter toute la région du Sud-Comoé, un accent est mis sur deux zones délimitées volontairement : la partie comprenant le lac d'Ayamé, les collines d'Appouasso, Ebikro-N'Dakro et la "plaine inondable" d'Aboisso ; la seconde partie sous forme de triangle comprend uniquement les milieux en aval du lac d'Ayamé, jusqu'à Aboisso.

3.1 UN BASSIN INTER-ETAT

Le bassin versant de la Bia s'étend sur 10200 km² (Plan directeur de la GIRE, 2000, cité par Konaté et Kampmann, 2010, p. 128) sur lesquels 7666 km² sont au Ghana, le reste du bassin (2534 km²) est reparti en Côte d'Ivoire dans trois régions : Indénié-Djuablin, Mé et Sud-Comoé où se trouve le département d'Aboisso qui à lui seul occupe 1940 km² du bassin ivoirien du fleuve. L'altitude moyenne dans cette zone est de l'ordre de 120 m, pour une pente moyenne de 3%. Aussi depuis son entrée en Côte-d'Ivoire par la sous-préfecture de Bianouan à son exutoire à la lagune Aby, le fleuve fait un parcours de 135 km, où ses rives sont occupées selon les contraintes du bassin et parmi ces contraintes, le lac d'Ayamé ne passe pas inaperçu.

La Bia est un fleuve côtier secondaire de la Côte d'Ivoire. Elle prend sa source au Ghana, à 300 m d'altitude environ. Après un parcours total de 320 km dont 185 au Ghana, elle se jette dans la lagune Aby (Electricité de France, 1953). La majeure partie du bassin de la Bia est située au Ghana (**figure 6**).

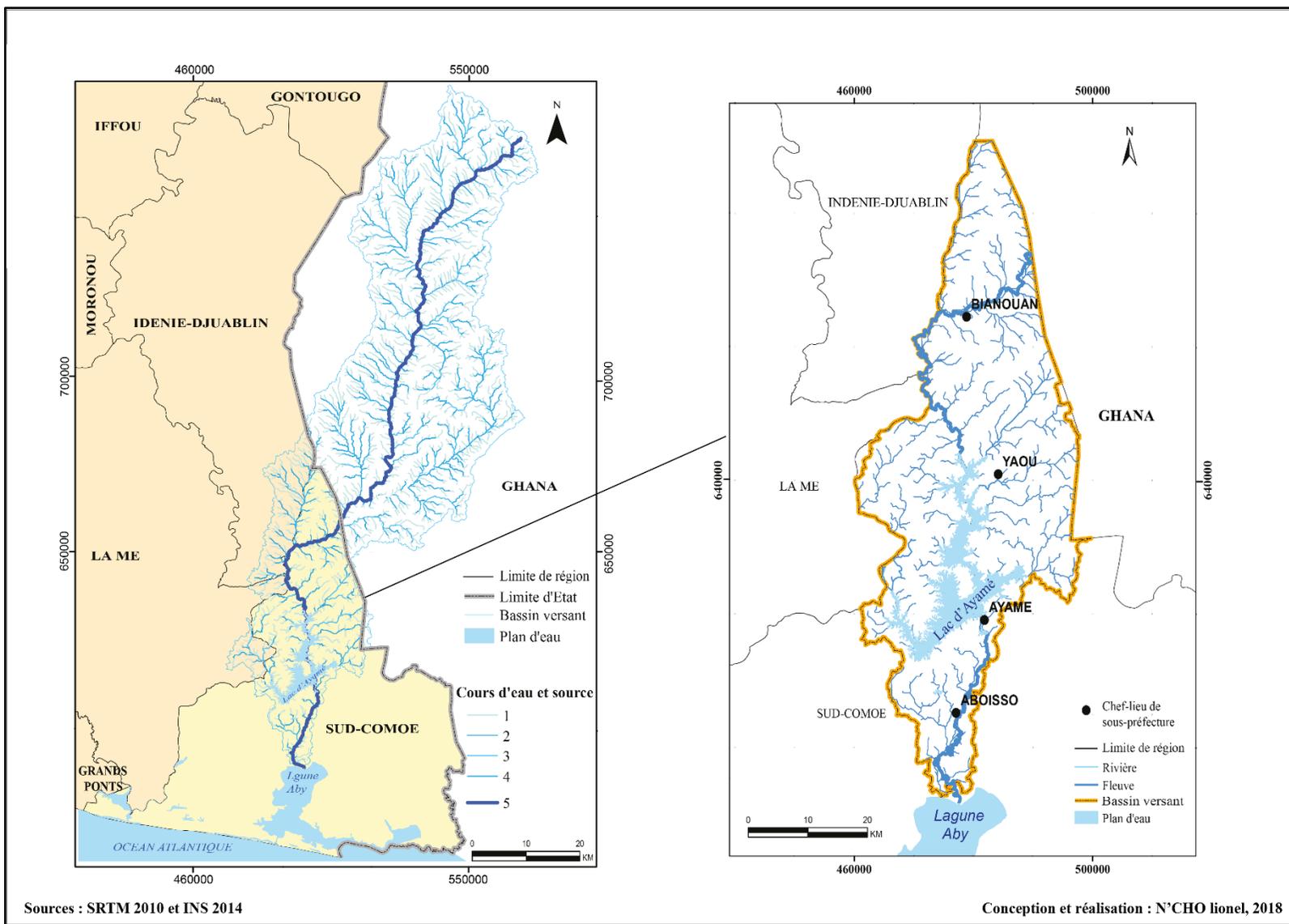


Figure 6 : Bassin versant de la Bia

Ces terrains sont fréquemment décomposés en surface, le rocher sain étant recouvert d'une couche d'argile latéritique ou d'arène granitique pouvant atteindre 20 m d'épaisseur et il n'y a pratiquement pas de cuirasses latéritiques. Ce phénomène est courant dans le centre et le sud du bassin⁴. On estime à 67 % le taux de birrimien contre 33 % pour l'antécambrien. Entre Ayamé et Aboisso se trouve la section la plus accidentée de la Bia : à 3 km à l'aval d'Ayamé une série de rapide crée, sur une distance de 1, 500 km, une dénivellation de 35 m. Puis, successivement, les rapides de Koukourandoumi donnent 0,5 m et une autre série à l'amont d'Aboisso atteint 2,5 m de dénivellation sur 300 m de distance. Les rapides totalisent 4 m de chute (Electricité de France, 1953).

Cependant, la zone à faible pente située entre Yaou et Ayamé, en tête des rapides, est particulièrement favorable à la création d'un réservoir de régularisation, d'autant plus que la pente des affluents dans cette zone, en particulier celle de Tamin, est encore beaucoup plus faible⁵ (Electricité de France, 1953).

3.2 CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA BIA DANS LE DEPARTEMENT D'ABOISSO

L'analyse du risque d'inondation dans le département d'Aboisso à la suite de la rupture des barrages d'Ayamé met en jeu plusieurs éléments de natures variées (éléments naturels et éléments humains). Ces éléments interagissent entre eux, accentuant ou minimisant le risque. Dans ce contexte, il paraît donc essentiel d'avoir une bonne connaissance des éléments physiques et humains du milieu.

Il s'agit dans un premier temps de faire une description assez détaillée des composantes physiques (reliefs, sols, eaux, climat, couvert végétal) du département. Cela permet de faire une projection sur les zones les plus exposées au risque d'inondation.

Ensuite, le peuplement et les formes d'occupation du sol par les populations permettent d'identifier les enjeux présents dans le département d'Aboisso, en particulier dans la zone en aval des barrages (**figure 7**).

⁴ Le bassin général de la Bia (Ghana-Côte d'Ivoire)

⁵ Le réservoir d'Ayamé 1 se trouve à cet endroit.

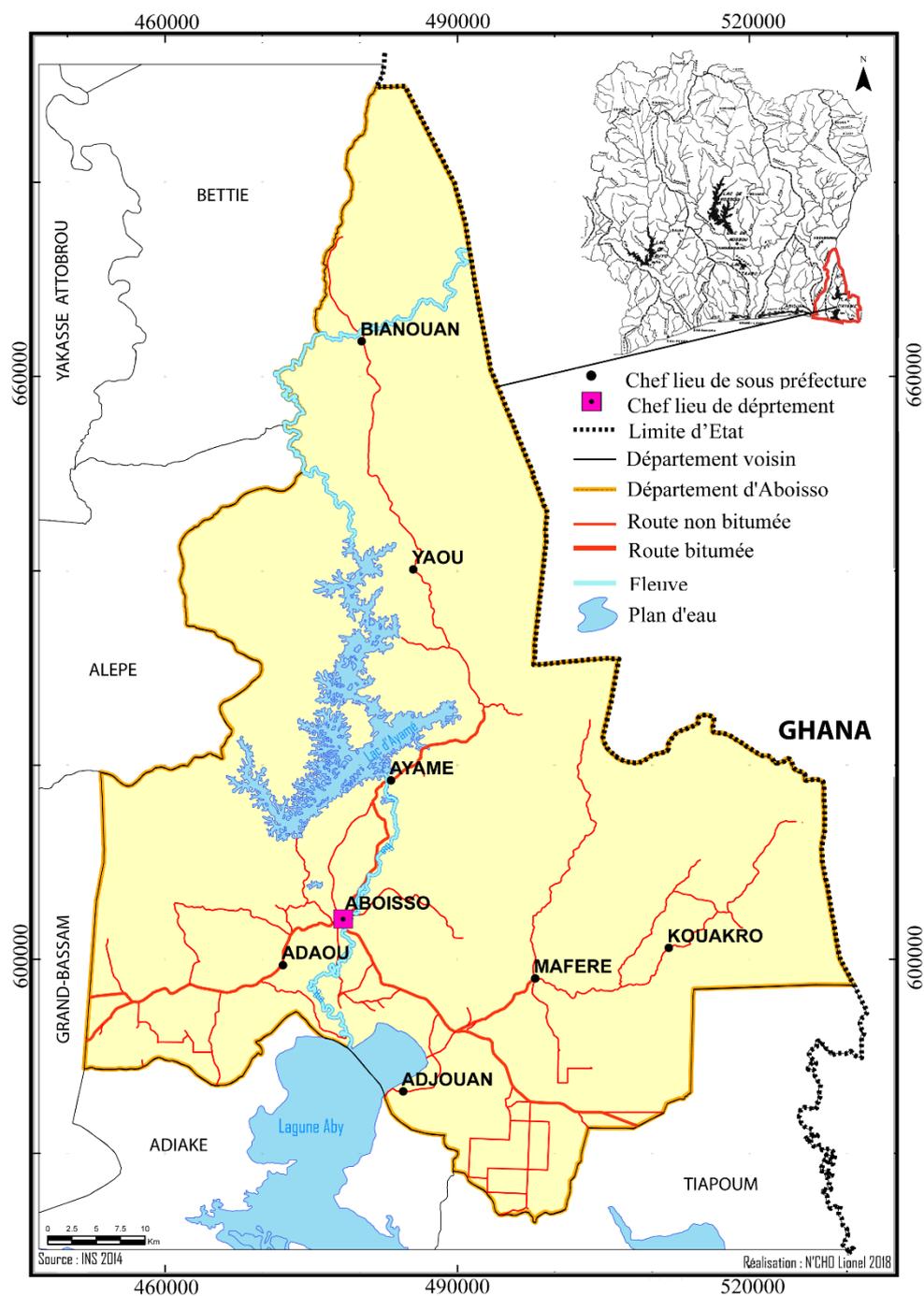


Figure 7 : Le département d'Aboisso

Les limites nationales du département sont : au nord-ouest le département de Bettié, à l'ouest les départements de Grand-Bassam et d'Alépé. La lagune Aby ainsi que les départements de Tiapoum et d'Adiaké sont les limites sud de celui d'Aboisso.

3.2.1. L'environnement physique

Le département d'Aboisso s'inscrit dans la zone forestière du sud-est de la Côte d'Ivoire. Il profite d'un ensemble naturel désirable (cours d'eaux, forêts, sols riches...). Les nombreuses vallées offrent au département un réseau hydrographique bien dessiné du nord au sud du département.

Le territoire du département est occupé par des localités aux fonctions bien distinctes (villages et villes). Dans le village d'Allié kro et à la périphérie de la ville d'Aboisso se sont développées de grandes parcelles agricoles. La ressource en eau est importante dans le milieu. Les forêts encore inexploitées sont soit le fait de leur affectation en réserves classées, soit de l'impossibilité des populations de cultiver et de s'installer dans les zones à fort risque d'inondation.

En effet, il n'y a pas que les barrages qui influencent l'occupation du territoire, d'autres obstacles naturels cette fois sont à l'œuvre. Il y a par exemple les rivières, la lagune, les collines, etc.

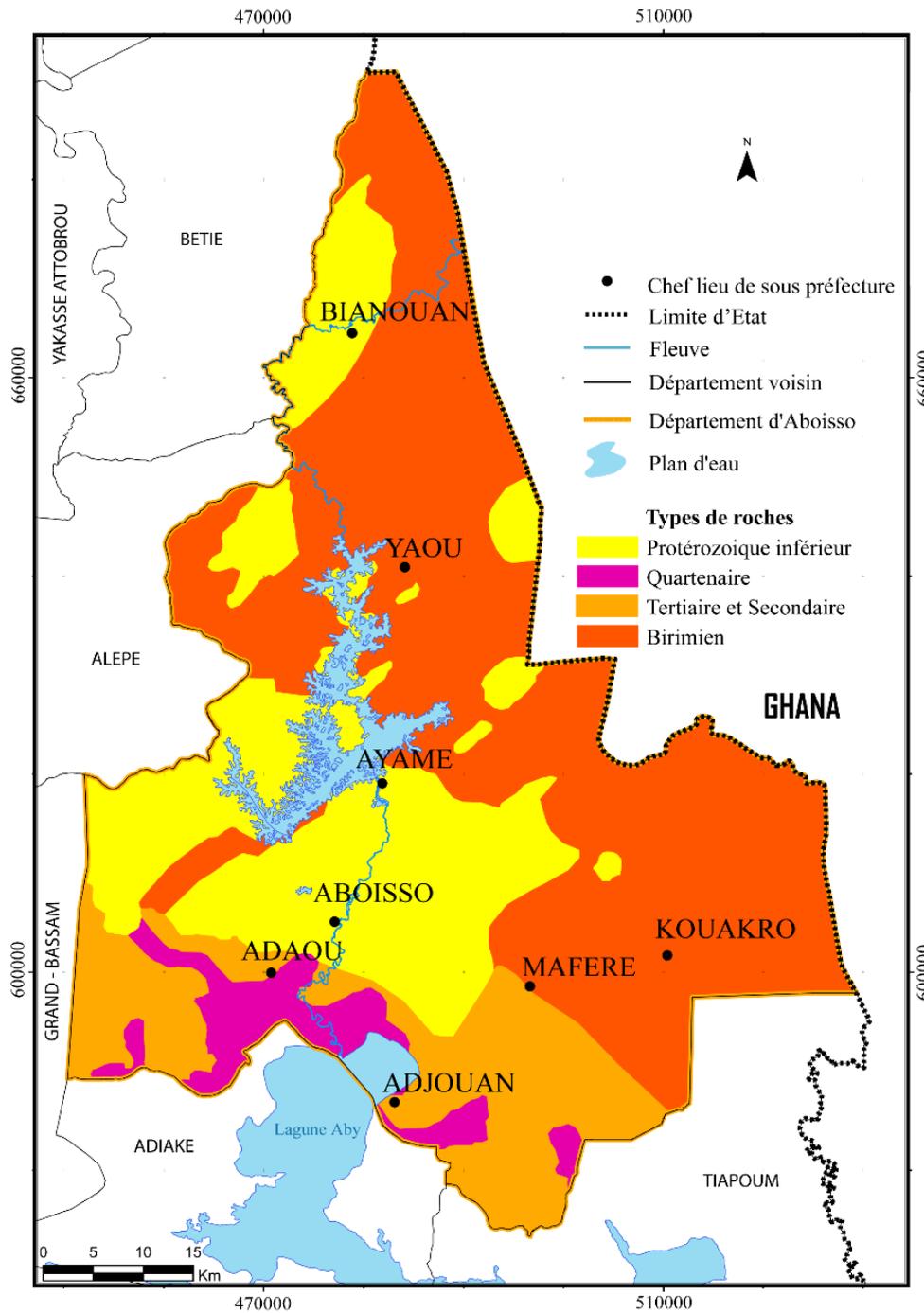
3.2.1.1. Esquisse géologique

La Côte d'Ivoire appartient à une plateforme ancienne, à la vieille plateforme africaine.

Son socle (environ 2000 millions d'années) est très rigide ; sa couverture a presque complètement disparu et n'est plus représentée que par des formations sédimentaires secondaires et tertiaires (Tagini., 1965).

Dans le département d'Aboisso, l'on trouve en général des formations constituées de roches cristallines et cristalloyennes dont la majeure partie est faite de schistes et de granites avec une couverture sédimentaire dans la partie sud.

Entre Ayamé et Aboisso, prédominent les formations datant du protérozoïque inférieur. Ces formations se rencontrent également à Bianouan au nord-est et à l'est de Yaou et d'Ayamé. Le birrimien occupe la plus grande part du territoire avec une forte concentration au nord et à l'est, il s'étend au sud-est de Maféré. Quant aux formations tertiaires, secondaires et quaternaires, elles se sont développées en bordure lagunaire (**figure 8**).



Source : ATLAS de Côte d'Ivoire, ORSTOM 1981

Conception et réalisation : N'CHO Lionel, 2018

Figure 8 : La géologie du département d'Aboisso

La géologie du site étudié est très peu contrastée, le birimien occupant la majeure partie du territoire, il impose également une topographie au site.

3.2.1.2. Un relief incliné vers le Sud du département

Le département d'Aboisso appartient au domaine schisteux à l'Est de la Côte d'Ivoire, qui s'ordonne autour d'un chevelu hydrographique dense et structuré, ce qui provoque des vallonnements.

Le socle schisteux est parsemé par des taches granitiques sur lesquelles s'étendent des plateaux aux formes adoucies, allant jusqu'à 300 m d'altitude. Sur le matériau de type éruptif d'âge birrimien se trouvent des reliefs souvent cuirassés dans les secteurs d'Ayamé et d'Aboisso. Ces reliefs s'ordonnent suivant quatre barres rocheuses parallèles orientées NE-SW, et séparent de larges couloirs à fond occupés par les schistes.

Trois niveaux d'altitudes permettent de qualifier le relief dans le département : bas, moyen et élevé (**figure 9**).

- Les altitudes basses

Dans la partie sud du département, dans l'espace péri-lagunaire et dans les fonds des vallées, les altitudes sont comprises entre 5 et 45 m. Plus on s'approche de la lagune Aby, les altitudes deviennent plus basses. Cet aplanissement est dû à la proximité du littoral marin.

- Les altitudes moyennes

Au-delà des 45 m d'altitude, on entre dans une zone de moyennes altitudes. On les trouve également dans la moitié sud du département, les altitudes varient entre 45 et 200 m.

- Les altitudes élevées

On les trouve aux alentours du lac d'Ayamé 1, principalement entre Yaou et Ayamé. Ces altitudes s'étendent un peu plus loin des barrages, tout en étant concentrées à l'Est. Les altitudes varient ici entre 200 et 300 m

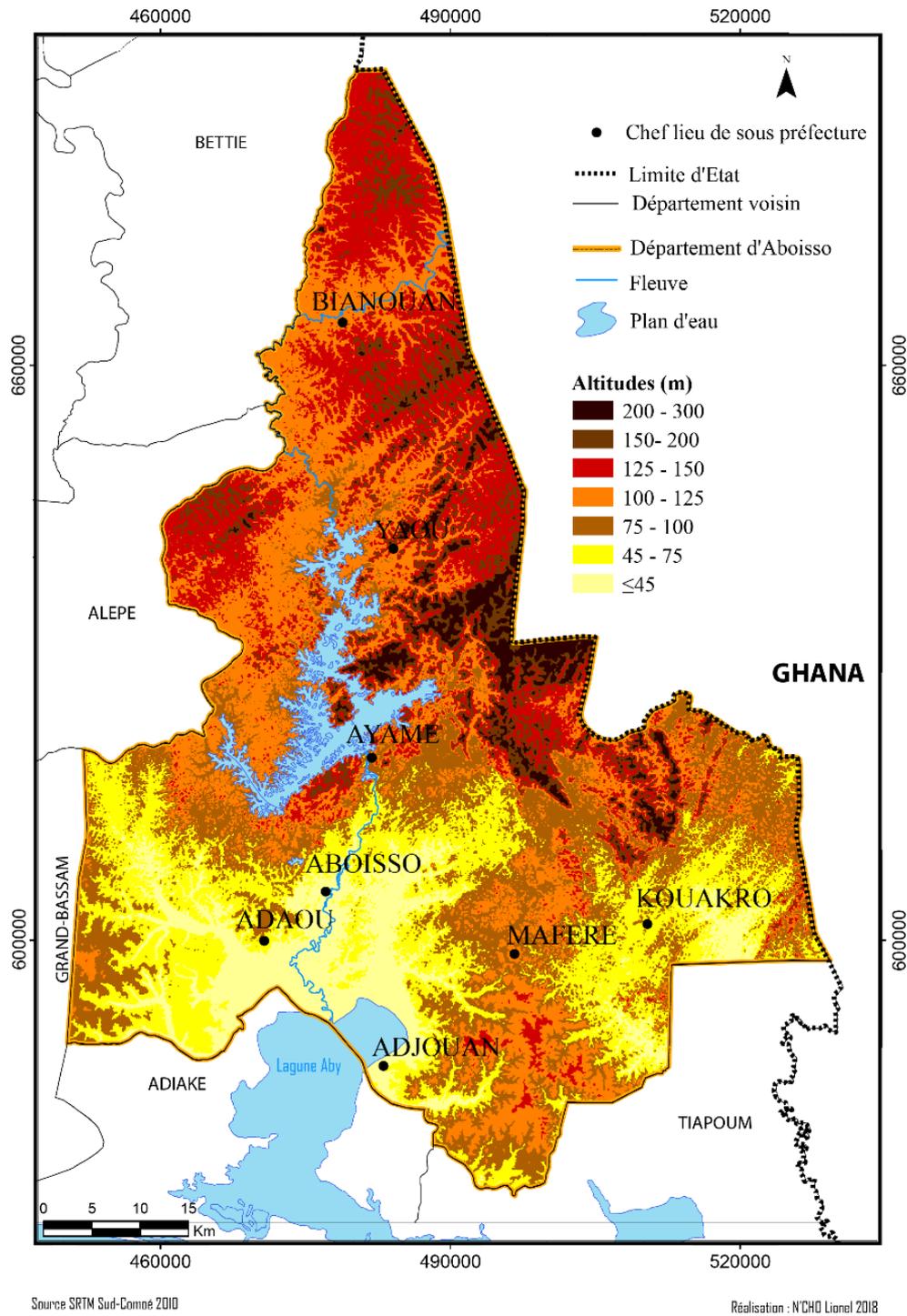


Figure 9 : La topographie du département d'Aboisso

En général, le relief est tel que les basses et moyennes altitudes se retrouvent au sud, puis les altitudes élevées dans le nord du département. Cependant au sud de Maféré on a des altitudes qui peuvent atteindre les 200 m.

Ainsi, le relief du département est incliné du nord vers le sud, avec quelques variations d'inclinaisons marquées par la présence de nombreux cours d'eau. La variation la plus importante est le fait de la Bia dont le bassin versant est constamment arrosé à cause du type de climat auquel appartient le secteur d'étude.

3.2.1.3. Un climat humide

La basse Côte d'Ivoire est soumise à un climat connu sous le nom de « régime équatorial » de transition (Eldin, 1971) qui se caractérise par :

- une première saison des pluies d'avril à juillet, toujours plus importante que la seconde ; une petite saison sèche de Juillet à Septembre ;
- une seconde saison des pluies de septembre à novembre, très irrégulière ; une grande saison sèche de décembre à mars.

Le département d'Aboisso est au sud-est de la Côte d'Ivoire, aussi, il profite d'un climat subéquatorial chaud et humide, caractérisé par des saisons de pluies et des saisons sèches qui s'alternent au cours de l'année. La zone connaît une importante saison des pluies au cours des mois de mai et de juin.

Les pluies y sont certes abondantes, mais réparties différemment sur l'ensemble du territoire. Plus on s'éloigne du littoral au sud, les précipitations baissent, mais restent tout de même importantes dans le département (elles sont supérieures à 1000 mm).

En dessous de l'isohyète 1600 mm, on a la zone la plus arrosée. Les pluies sont plus abondantes dans le secteur d'Adjouan avec des isohyètes de 1700 à 2000 mm. Contrairement à cette zone, celle de Bianouan reçoit moins de pluie (1400 à 1500 mm). La **figure 10** présente la répartition des hauteurs de précipitations enregistrées dans le département entre 1975 et 2000.

Les températures sont comprises entre 20 °C et 30 °C toute l'année, avec un écart thermique annuel faible (3°C).

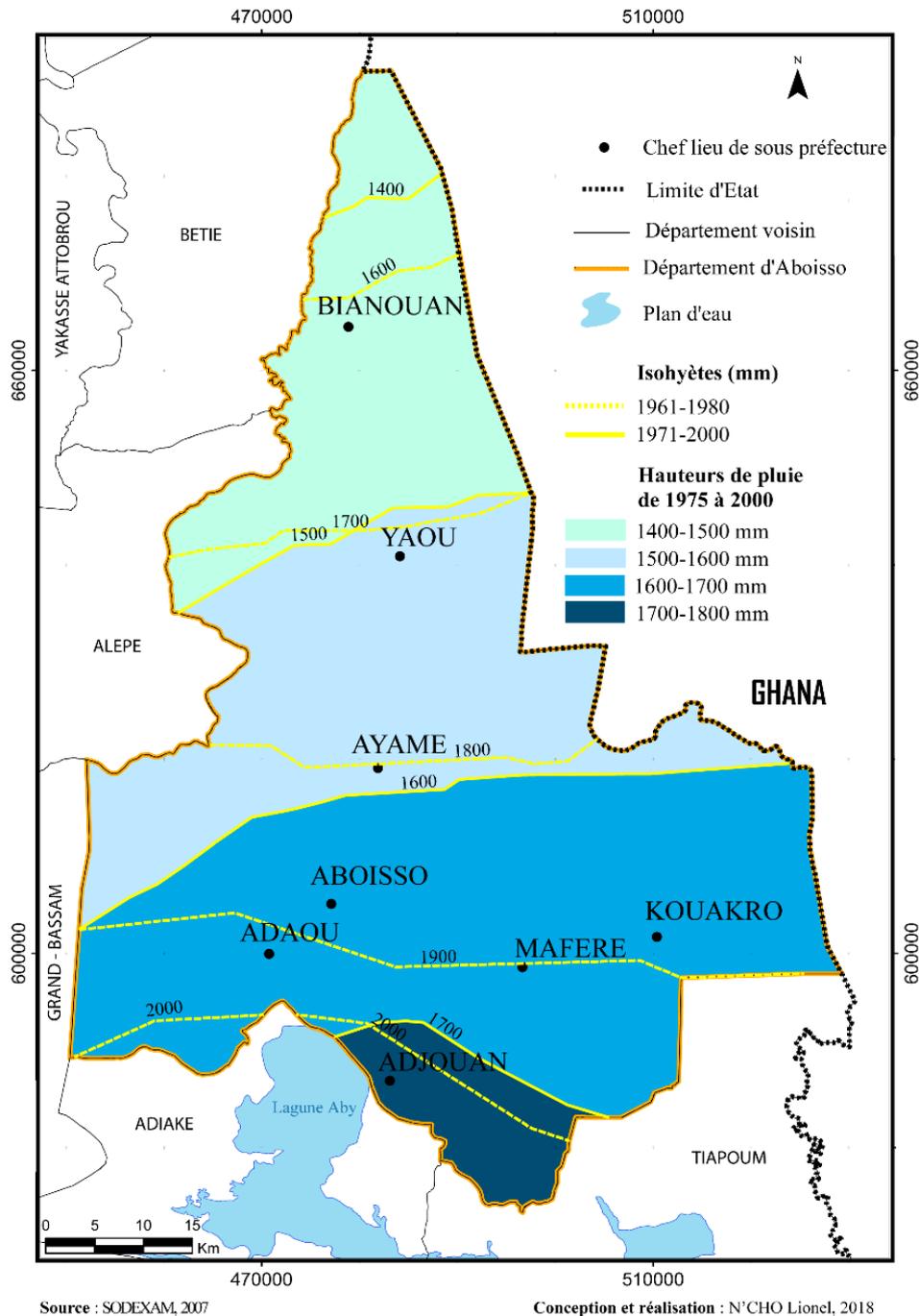


Figure 10 : Les pluies dans le département d'Aboisso

L'importance de la pluviométrie permet au département de disposer d'un dense réseau hydrographique où les rivières s'assèchent rarement.

3.2.1.4. Un réseau hydrographique dense

Le département d'Aboisso est un territoire qui bénéficie de plusieurs ressources en eau. Bien qu'il ne soit pas ouvert sur l'atlantique, le département bénéficie de trois principaux plans d'eau (lac d'Ayamé, lac de Bakro et lagune Aby). Plusieurs cours d'eau notamment le Tamin, l'Alouba, le Koun, le Soumié rejoignent la Bia, principal cours d'eau du département qui depuis le Ghana coule vers la lagune Aby au sud.

Les nombreuses vallées modelées avec le temps sont rarement sèches dans le département. Il y a sur ce territoire un réseau hydrographique très dense (**figure 11**). Les rivières qui constituent un vaste réseau d'eaux de surface communiquent entre elles dans le bassin versant de la Bia.

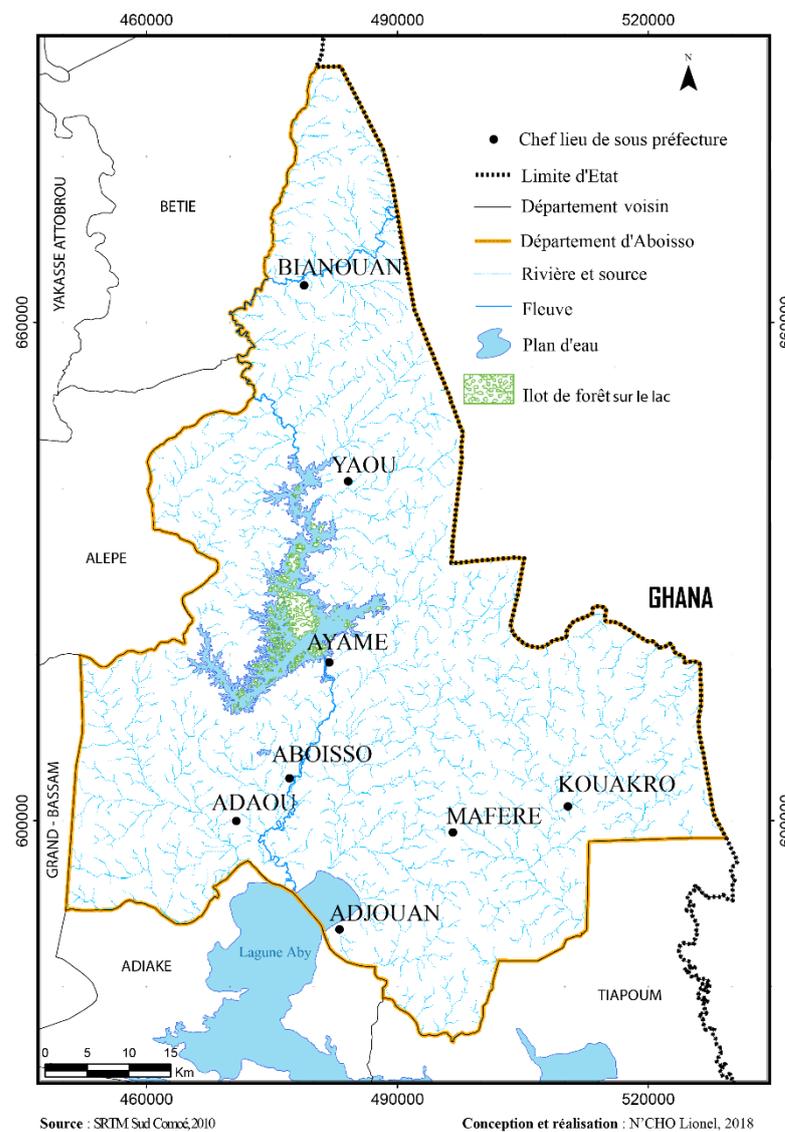


Figure 11 : Le réseau hydrographique du département d'Aboisso

Ainsi, le fleuve enregistre les apports importants comme ceux du Soumié⁶ et du Tamin. Ces apports viennent gonfler le niveau de la Bia principalement en saison humide.

Le réseau hydrographique joue un rôle important dans tout le Sud-Comoé en termes de ressources en eau, ressources halieutiques. Il a également aidé à l'essor de la région et même de la Côte d'Ivoire, à travers le commerce, la pêche, l'agriculture, l'hydroélectricité, etc.

Le réseau hydrographique est très dense sur le territoire du département d'Aboisso, aucune sous-préfecture de ce territoire n'est dépourvue de cette grâce. La densité du réseau hydrographique a eu dans certains endroits un impact sur la structure du sol marqué par une hydromorphie. C'est l'occasion de voir l'ensemble des sols de la zone d'étude.

3.2.1.5. Une variété de sols

Les sols du département d'Aboisso appartiennent au groupe des sols ferrallitiques fortement lessivés en base sous forte pluviométrie, à PH acide (PH<5,5). Ils sont composés notamment :

- de sols ferrallitiques sur roches éruptives et métamorphiques (granite, schistes et roches basiques), à bonne rétention d'eau ;
- de sols ferrallitiques sur sables tertiaires : la mauvaise qualité de ces sols se trouve compensée par leur profondeur suffisamment importante pour les rendre cultivables ;
- de sols développés sur sables quaternaires sur lesquels seule la culture de cocotier est réalisable. Ces sols sont retrouvés aux pourtours de la Lagune Aby ;
- des sols hydromorphes beaucoup moins étendus présents dans les vallées et les bas-fonds.

De ce grand ensemble ferrallitique, les sols rouges et ocres argilo-sableux gravillonnaire sur les plateaux sont les plus dominants entre le lac d'Ayamé et la ville d'Aboisso. Les sols jaunes sablo-argileux avec ou sans niveau de galet de haute terrasse sur alluvions fluviales sont les moins importants.

⁶ Sur certaines images satellites, on écrit Soumié au lieu de Bia, en parlant de la Bia.

Dans les secteurs d'Ayamé et Aboisso, le sol s'est développé sur des roches schisteuses et des roches granitiques (**figure 12**). On trouve également des sols ferrallitiques provenant de sables tertiaires.

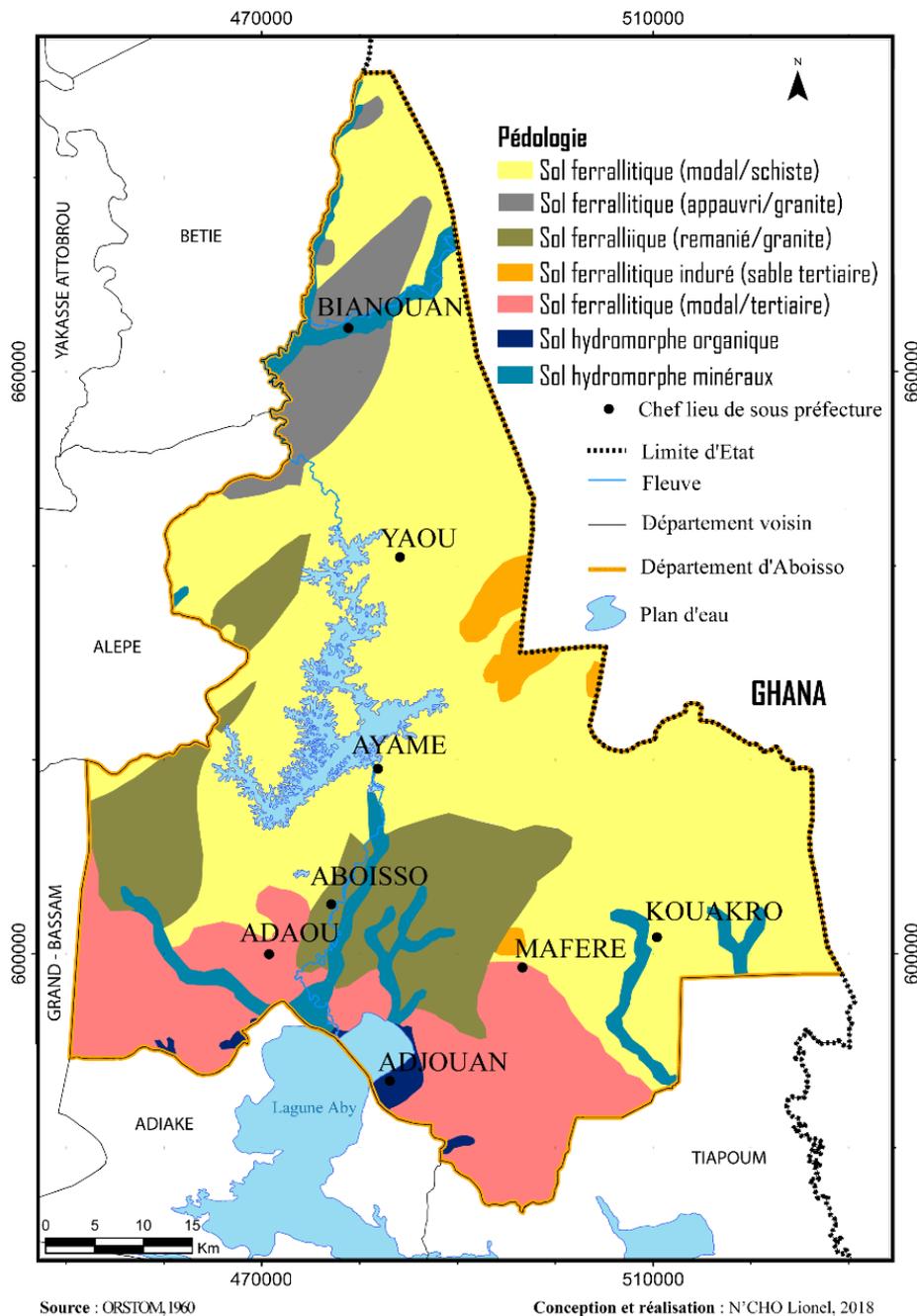


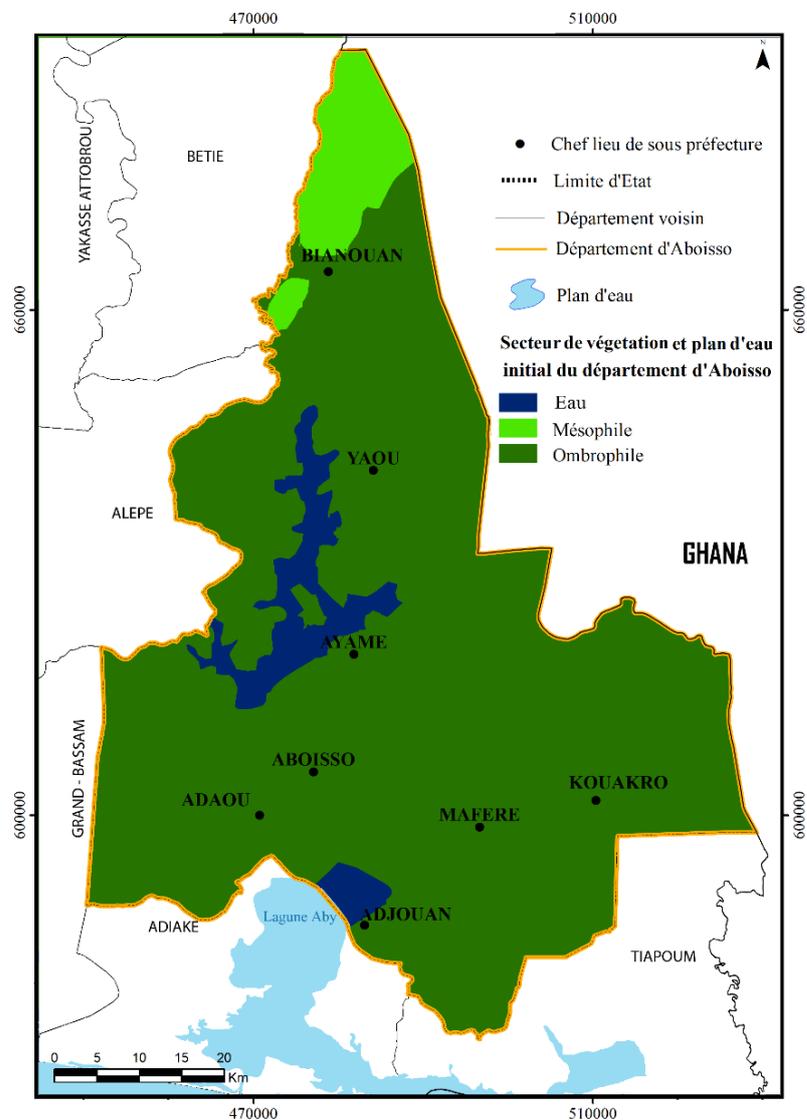
Figure 12 : Répartition des sols du département d'Aboisso

La répartition spatiale des sols rappelle celle des couches géologiques et, bien que les sols dans le département soient de deux grands types (hydromorphe et ferrallitique), ils se différencient nettement par la roche mère altérée. De toute évidence, ces sols tout

comme le climat et le réseau hydrographique ont favorisé le développement d'une végétation dans laquelle prospère une faune.

3.2.1.6. Un milieu forestier en pleine mutation

Le département d'Aboisso est à l'origine une zone de forêt dense appartenant au domaine guinéen dont deux secteurs dominant l'espace : le secteur ombrophile et le secteur mésophile. Si la forêt ombrophile a la particularité de garder ses feuilles en toutes saisons, la forêt mésophile se caractérise par la perte des feuilles des grands arbres pendant les saisons sèches (**figure 13**).



Source : INS 2014 et Ministère du Plan et du Développement 2020

Conception et réalisation : N'CHO Lionel, 2018

Figure 13 : Forêts primaires initiales du département d'Aboisso

Ces forêts qui couvraient le département d'Aboisso ont disparu pour faire place à une mosaïque de paysages agro-écologiques. Aujourd'hui, seuls quelques îlots de forêts demeurent. Sur schistes et roches vertes, et à plus de 1800 mm de pluie et saison sèche réduite, se distingue une végétation de type hyper-ombrophile, exigeant des sols finement texturés et doués d'une bonne capacité de rétention en eau. Le recouvrement herbacé sur tout le territoire est très faible, souvent inexistant, il n'y a pratiquement pas de petit chaméphytes herbacés rampants de la forêt sur terre ferme. Mais dans l'ensemble, toutes ces forêts sont en voie de disparition, parfois inexistante sur de grandes superficies. Le paysage actuel montre rarement la forêt vierge sur la plupart des versants ; les plantations occupent de grandes surfaces ; cela s'explique par la politique agricole de la région. La forêt a donc été abattue sur ces versants pour faire place aux plantations industrielles et vivrières.

Dans l'ensemble, le département d'Aboisso est doté d'un immense potentiel naturel (climat et sol propices aux activités humaines). Entre les collines du territoire se dessine un important réseau hydrographique, une richesse aussitôt mise en valeur par l'homme (construction des barrages hydroélectriques d'Ayamé, transport de la première bille de Bois). Le relief haut de 300 m est issu des périodes géologiques anciennes à récentes (secondaire, tertiaire et quaternaire). Sur ces formations géologiques, on trouve des sols ferrallitiques et des sols hydromorphes. Avec des pluies comprises entre 1300 et 1800 mm par an, le département d'Aboisso est riche en biodiversité floristique et faunistique. Mais de tout cet environnement, ce qui est remarquable, c'est le réseau hydrographique dense fait de cours d'eaux rattachés à la Bia, dont la plupart ont un écoulement permanent.

Ainsi dressé, le territoire étudié est doté d'énormes potentialités naturelles. Dès leur arrivée en Côte d'Ivoire, les colons ont entrepris de vastes projets de développement sur le site d'accueil (aménagements hydroélectriques sur la Bia, plantations agricoles dans les plaines.), car ils étaient conscients de son potentiel naturel. L'anthropisation a considérablement perturbé le milieu naturel. Comment se présente cette anthropisation dans le département ? En d'autres termes, comment se structure la population dans le département et quels sont les aspects socio-économiques qui meublent la vie sur ce territoire ? La suite de ce travail présente le cadre humain du département d'Aboisso.

3.2.2. Le contexte humain

3.2.2.1. Population et habitat

Le département d'Aboisso s'étend sur 4 201 km², il comprend 8 sous-préfectures (Aboisso, Adaou, Adjouan, Ayamé, Bianouan, Kouakro, Maféré, Yaou) et 82 villages. (INS 2015). Le département a une population totale de 307 852 habitants dont 158 597 hommes et 149 255, soit 73,3 hab/km² (INS, 2014).

Sur les huit (8) sous-préfectures du département, la sous-préfecture d'Aboisso compte le plus grand nombre d'habitants (86 115), avec une densité de 230,9 habitants/km². Elle est suivie par les sous-préfectures d'Adaou et Adjouan (60 à 100 hab/km²), puis Maféré, Kouakro à l'est et Bianouan au nord (35 à 60 hab/km²). Les sous-préfectures de Yaou et Ayamé (site des barrages) au centre du département ont une densité plus faible (moins de 35 hab/km²).

Le faible peuplement dans cette partie du département d'Aboisso peut s'expliquer par la présence du lac d'Ayamé⁷, la délimitation d'une zone de sécurité par les ingénieurs constructeurs des barrages et la présence de nombreuses collines. **La figure 14** présente la densité de population au km² sur le territoire départemental d'Aboisso.

La population du département est constituée des autochtones que sont les Agni appartenant au royaume Sanwi. À côté de cette population, il y a une population très hétérogène composée d'allochtones dont les Baoulé, les Attié, et d'allogènes : Burkinabè, Maliens, Ghanéens, Togolais, Nigériens et Nigériens qui s'adonnent à diverses activités économiques dans la région.

L'habitat est dominé par des constructions anarchiques sur des sites lotis, mais insuffisamment aménagés. Une partie de la population continue de construire avec des matériaux précaires en terre ou en tôle, aussi bien dans le chef-lieu (Aboisso) que dans les villages à proximité du fleuve.

⁷ La présence humaine aurait probablement été beaucoup plus marquée s'il n'y avait pas un grand plan d'eau dans lequel les conditions d'une vie sont difficiles.

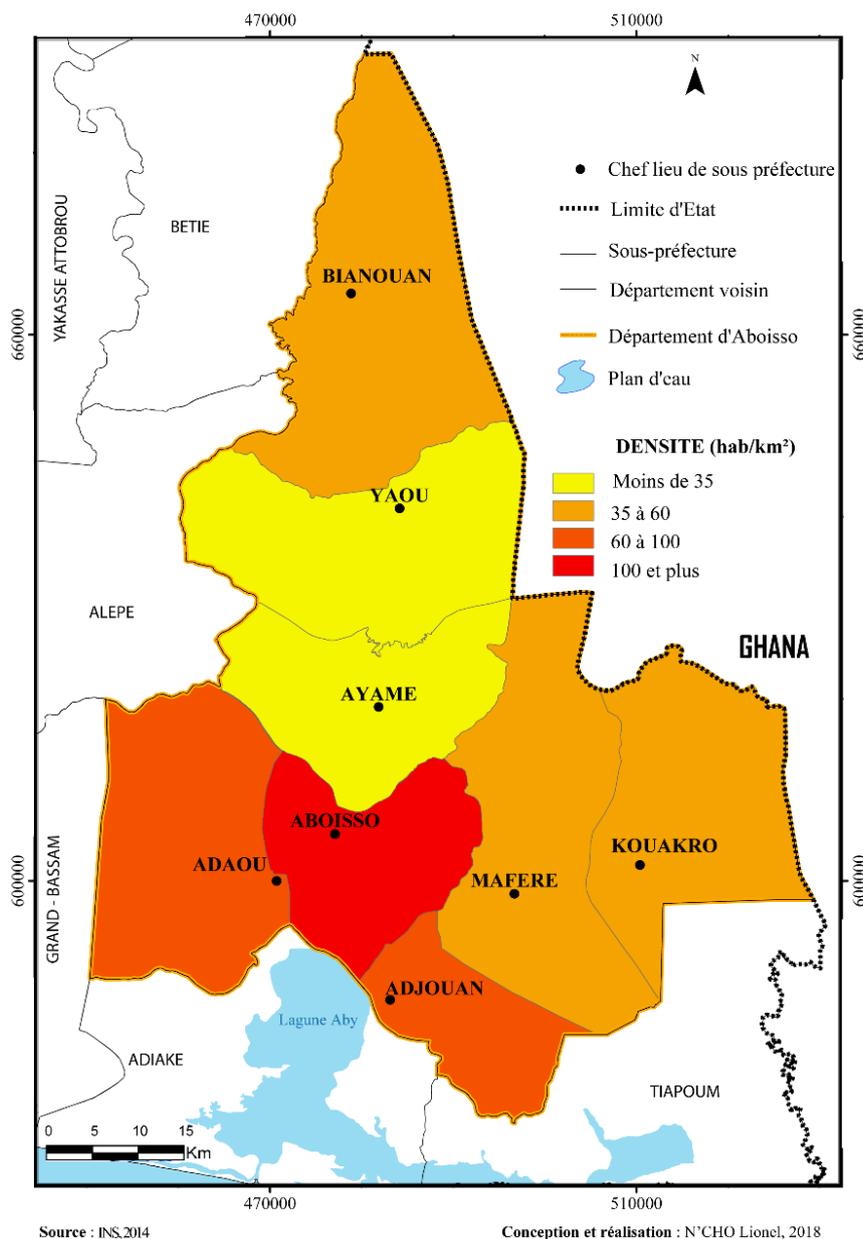


Figure 14 : Les densités de population par sous-préfecture dans le département d'Aboisso (situation en 2014)

Les rares constructions en béton près du fleuve à Koukourandoumi et Aboisso sont équipées de digue faite de roches, qui n'empêchent pourtant pas les inondations lors des crues importantes.

À proximité des deux barrages, seuls les agents de la CIE sont logés avec leurs familles. Les populations sont interdites pour leur propre sécurité de s'installer dans le périmètre immédiat de chaque barrage.

Si cette réglementation semble s'appliquer dans le périmètre des barrages, sur les rives de la Bia, ce n'est malheureusement pas le cas.

En effet, la réglementation ivoirienne proscrit toute habitation à moins de 25 m d'un cours d'eau ou d'un plan d'eau. Pourtant des habitations dans les localités en aval des barrages sont à moins de 25 m du Bia et aucune de ces constructions n'est conçue pour résister à une catastrophe telle que l'inondation.

La répartition de la population sur le territoire a fortement été influencée par la présence du lac d'Ayamé qui s'étend sur deux sous-préfectures, Yaou et Ayamé, les moins peuplées d'ailleurs. A partir de cette répartition s'est développé un réseau de communication et d'activités économiques dans tout le département.

3.2.2.2. Un paysage dominé par l'agriculture

3.2.2.2.1. Les cultures de rente

Favorisée par les politiques agricoles coloniales et postcoloniales, le département d'Aboisso a une agriculture qui a longtemps reposé sur le cacao et le café. Aujourd'hui, l'hévéa, le palmier à huile, l'ananas sont les principales cultures d'exportation du département, avec une prédominance de l'hévéa (**figure 15**).

La part toujours importante de café et cacao dans le territoire est due à la présence de vieilles plantations de ces cultures.

Il existe ici de très grandes superficies agricoles qui appartiennent à de grands groupes. Des entreprises agro-industrielles notamment PALMCI et CANAVESE ont des superficies agricoles de plus de 1000 ha.

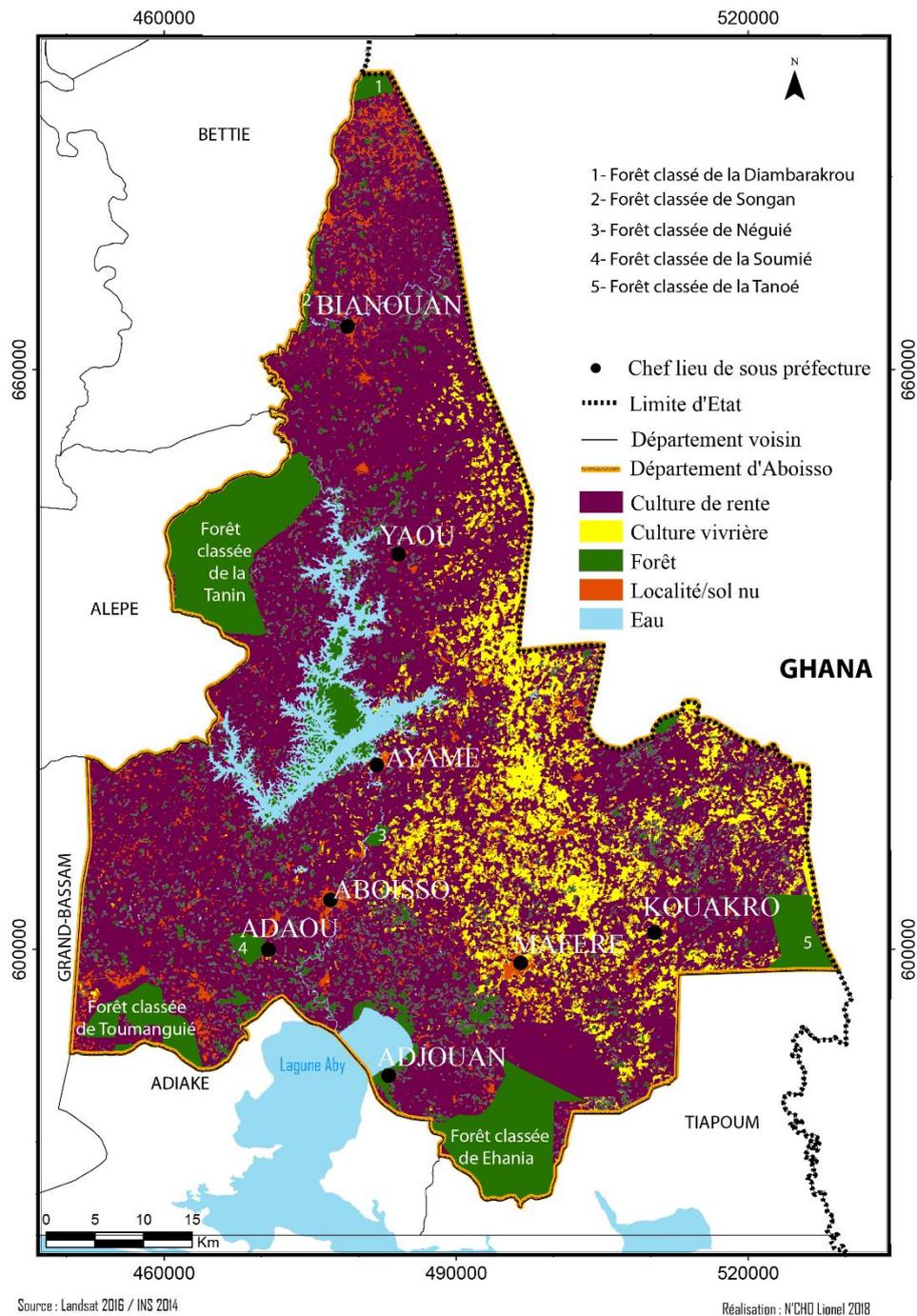


Figure 15 : L'occupation du sol dans le département d'Aboisso en 2016

Les cultures de rente composées essentiellement de café, de cacao, d'hévéa, de palmier à huile et de banane douce ne totalisent pas moins de 307 729 hectares cumulés. Ehania et Toumanguié concentrent de grandes parcelles de palmier à huile, quand le sud d'Aboisso est occupé par une importante plantation de banane douce.

Tableau 5 : Superficie de chaque type d'occupation du sol dans le département en 2016

Type d'occupation du sol	Forêt	Culture de rente	Culture vivrière	Localité et sol nu	Eau
		Palmier, hévéa, café, cacao, banane douce	Banane plantain, riz, manioc,		
Superficie (ha)	33 439	307 729	41 333	13 978	18 972

3.2.2.2. Les cultures vivrières

Elles sont destinées à la consommation familiale, le surplus étant vendu. Les cultures vivrières occupent une place de choix dans les activités agricoles. Elles sont dominées par la riziculture pratiquée dans les bas-fonds et la banane plantain sur de grandes surfaces.

Mais la culture du manioc commence à gagner une place de choix, car le manioc est très bien vendu sur le marché.

3.2.2.3 Autres activités économiques

Les autres activités économiques sont principalement la production halieutique, l'élevage et le commerce. L'exploitation minière (aurifère) est également pratiquée à Afféma par la société minière TAURUS GOLD LIMITED, quand le couvert végétal dense permet le développement de la filière bois.

Les services dans le département d'Aboisso sont principalement concentrés dans les villes. Le département possède diverses potentialités touristiques et culturelles à l'image même des deux barrages Ayamé 1 et 2 qui font partir de l'histoire de toute la Côte d'Ivoire et font la fierté d'une région entière (le sud-Comoé).

Ainsi, la principale activité de développement du territoire est l'agriculture le plus souvent pratiquée sur de grandes superficies. Mais l'agriculture de même que les autres activités comme l'exploitation minière, pour se développer d'avantage ont besoin

d'infrastructure et d'équipements, notamment les voies de communications ci-dessous présentées).

3.2.2.4. Infrastructures et équipements

Le développement des localités principalement les centres urbains dépend plus de la présence des services administratifs que d'un dynamisme économique qui pourrait contribuer à améliorer le niveau de vie des habitants.

Le département dans son ensemble dispose d'infrastructures et équipements de base pour le bien des populations (éducation, santé, sécurité, eau, électricité). La monographie du district Comoé (2015) dresse un total de 12 forages, 12 pompes villageoises. Ces infrastructures hydrauliques ne couvrent pas tout le département, de plus les localités de plus de 1500 habitants comme Eholié (1759 habitants), Aboulié (1639 habitants) sont dotées chacune d'un forage, alors que les localités comme Amoakro (650 habitants) ou Ehousebo (1015 habitants) ont chacune une pompe hydraulique. Cependant, la localité d'Affiénou avec une population de 6559 habitants a été dotée d'un forage.

Les infrastructures d'approvisionnement en eau et de fourniture d'électricité sont tout comme les routes, très importantes lors de la phase de gestion des crises d'inondation. Leur identification dans la zone d'étude est donc cruciale, car si les populations parviennent à survivre à l'inondation, leur chance de tenir longtemps jusqu'à la fin de l'alerte dépend généralement de ces besoins vitaux (eau, énergie, route...)

Le réseau de transport routier interne du département né aux heures de gloire du café et du cacao dans le sud-comoé souffre quant à lui d'un déficit d'investissements et d'entretiens. Ce déficit se matérialise par une quasi-impraticabilité des axes routiers non bitumés et la dégradation avancée des pistes villageoises et de la voirie urbaine. Cette situation rend l'accessibilité de certaines localités très difficile.⁸

Le département d'Aboisso affiche l'un des meilleurs taux de raccordement au réseau électrique du pays. Malgré tout, les ménages connectés au réseau de la CIE, les consommations professionnelles et l'éclairage publics sont limités. Dans certains villages,

⁸ L'intervention rapide des secours par voie terrestre dépend en partie de la qualité des routes empruntées

l'accès à l'eau potable est principalement assuré par l'hydraulique villageoise. La **figure 16** présente les infrastructures en eau, électricité et route dans le département.

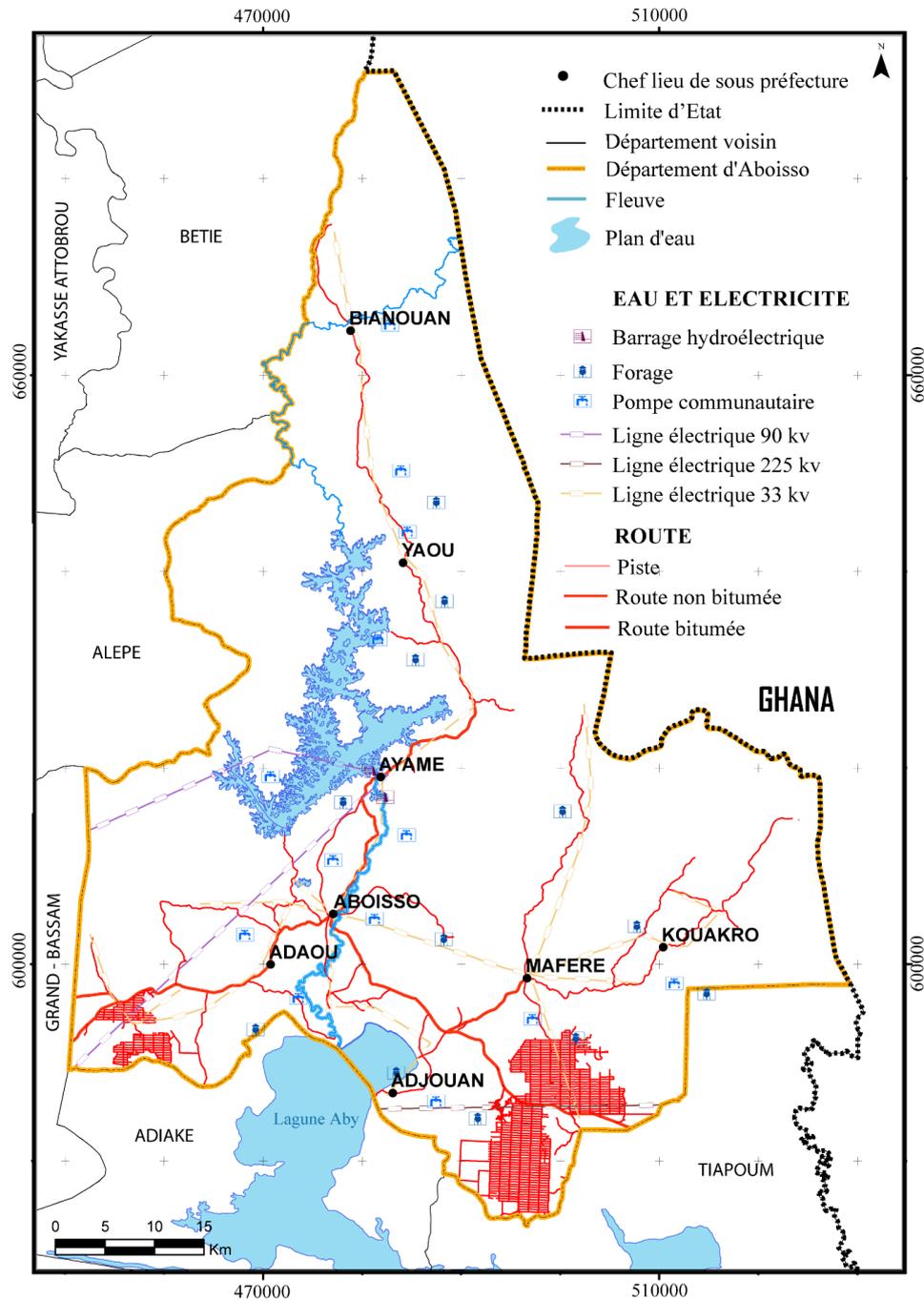


Figure 16 : Infrastructures routières et hydroélectriques dans le département d'Aboisso en 2015

Le département d'Aboisso est en partie dépendant des barrages hydroélectriques d'Ayamé, ce qui se traduit par une inégale répartition de sa population. L'autre raison de cette inégalité, c'est aussi la proximité de la lagune Aby. La population se concentre plus

autour de ce plan d'eau, franchissant parfois la limite de 25 m comme zone de sécurité pour un plan d'eau autre que la mer (100 m) en Côte d'Ivoire.

En revanche au niveau du lac d'Ayamé, la sécurité semble être respectée, car en plus de la présence du lac, le relief ne facilite pas l'installation des populations qui préfèrent se rabattre encore au sud du département où les altitudes sont beaucoup plus faibles, et ce malgré les risques de submersion qu'elles encourent. Mais à défaut de vivre sur les collines, les populations utilisent les versants pour leurs cultures.

La ville d'Aboisso est un cas isolé de la zone, du fait de son rang de chef-lieu de département et chef-lieu de région du sud-Comoé. Aboisso regroupe les principales infrastructures et les principaux équipements des huit sous-préfectures du département. De plus le département d'Aboisso a la chance d'être desservi de voies carrossables qui facilitent les activités économiques qui s'y déroulent.

3.3 CARACTERISTIQUES DU BASSIN MODELE POUR LA SIMULATION DE RUPTURE DES BARRAGES D'AYAME

Le bassin modélisé couvre une superficie de 1 192 km² et un périmètre de 229 km. Il comprend 14 localités, entièrement réparties entre les coordonnées X = 472 000 m et Y = 490 000 m. Plus large en amont du lac, le bassin se resserre entre Ayamé et Aboisso, formant un "V".

D'Appouasso à Ayamé, les localités sont situées sur la rive gauche du fleuve, au-delà du site d'accueil des barrages, les localités sont sur la rive droite. Seule la ville d'Aboisso est traversée par la Bia, profitant ainsi de trois ponts pour relier les deux rives.

3.3.1. Les altitudes

Le bassin se trouve dans un ensemble de collines. Le point le plus haut 295 m se trouve dans la zone d'Ebikro -N'Dakro, à l'est du réservoir d'Ayamé 1 (**figure 17**). Les barrages sont dans la zone comprise entre 70 et 100 m. En dessous de 70 m se situent les localités comme Aboisso, Amoakro, Koukourandoumi, etc.

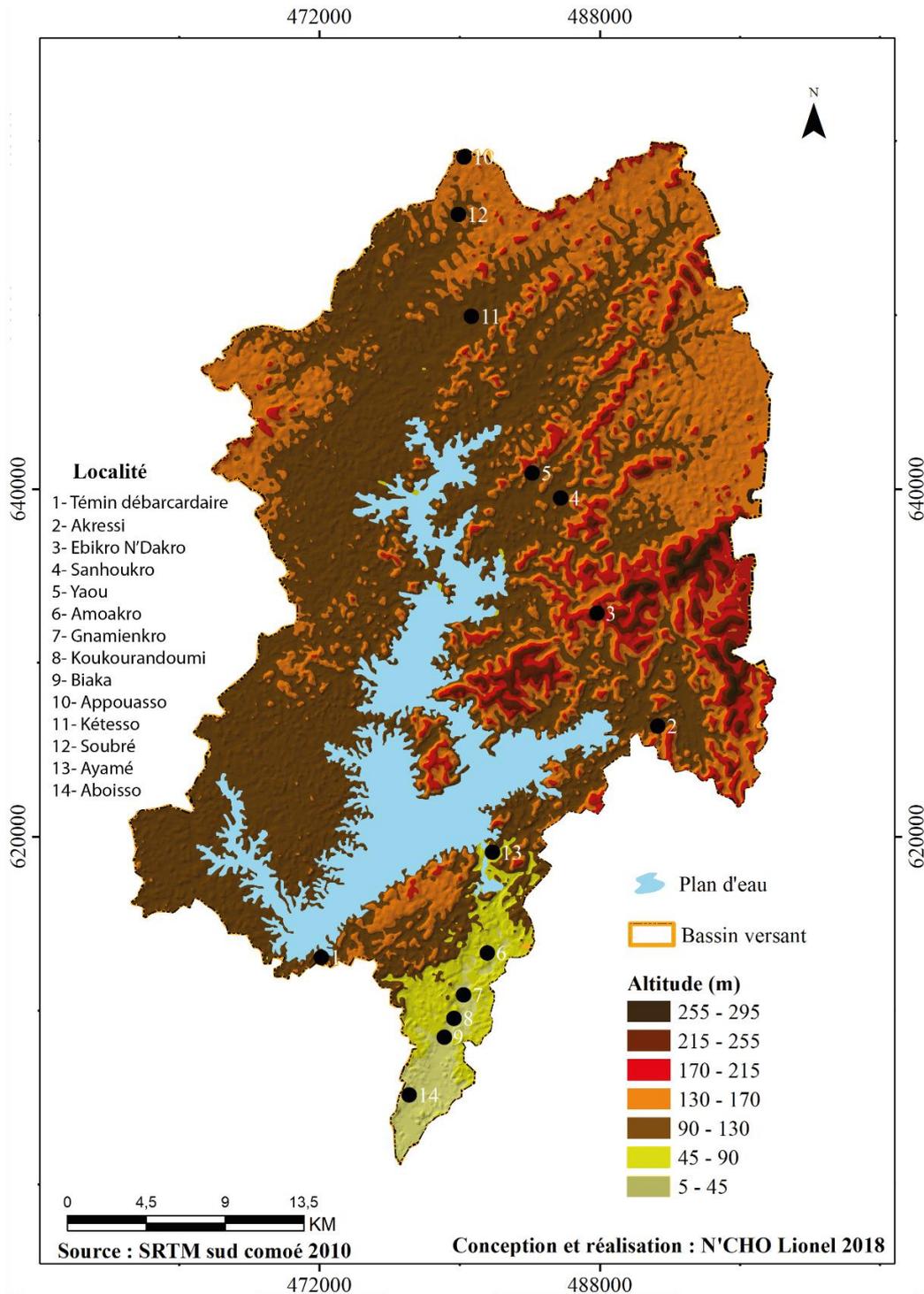


Figure 17 : La topographie du bassin modèle

La topographie du bassin modèle est marquée par la prédominance de collines, essentiellement à l'est et au nord. Dans le couloir encaissé, le passage de la Bia rappelle l'inclinaison qu'il y a chaque fois qu'une vallée est traversée. Les pentes matérialisent alors les variations d'altitudes dans le bassin. Cela est d'ailleurs plus nette au sud du bassin où les pentes sont quasi-nulles.

3.3.2. Les pentes

Le bassin est caractérisé par des pentes fortes, principalement dans l'est et le nord où on a des pentes de 10 %. Le centre du bassin où est le lac, le sud et l'ouest, elles sont comprises entre 0 et 6% (**figure 18**).

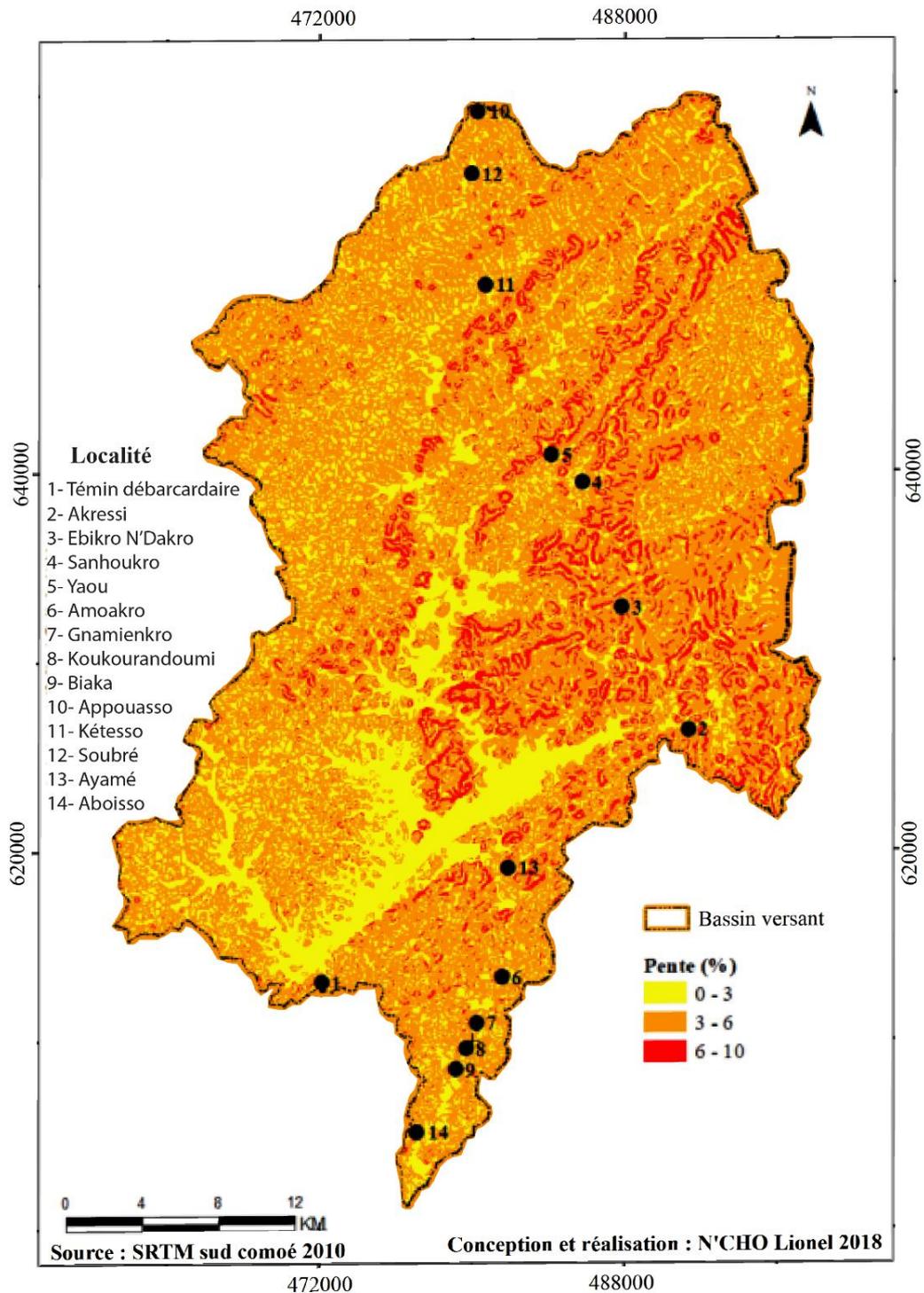


Figure 18 : Les pentes dans le bassin modèle

La pente moyenne du bassin est de l'ordre de 5 m/km.

Outres Ayamé et Amoakro, les localités en aval du réservoir d'Ayamé sont sur des pentes inférieures à 5 %, par endroit comme à Aboisso, elles sont nulles. Les faibles pentes (0-3%) réduisent ou annulent la capacité d'écoulement des fluides, ainsi l'eau stagne dans ces milieux.

Les pentes du bassin sont le reflet de la topographie. Très fortes à l'est et au nord, elles le sont moins à l'ouest et au sud. Par ailleurs, au niveau du lac les pentes sont quasi-nulles. De même les sillons tracés par les pentes de faibles attitudes révèlent la présence d'une vallée dans laquelle coule généralement une rivière.

3.3.3. Le réseau hydrographique

Le bassin présente un réseau hydrographique dense et bien ramifié, sur un cheminement maximal de 68,38 km (**figure 19**).

Le cours d'eau principale est alimenté par des rivières tributaires (Tamin, Alouba, Koun). Il arrive que la Bia soit en crue, en aval des barrages sans même que l'exploitant effectue un déversement. Ces crues se produisent pendant les saisons pluvieuses, lorsque les rivières connectées à la Bia y acheminent d'importantes quantités d'eau.

Etendu sur 1 192 km², le bassin modélisé ne manque pas d'eau de surface, avec en plus le lac d'Ayamé qui le rend plus autonome en ressource en eau. C'est surtout ce lac à travers le barrage qui le retient qui fait peser sur tout l'aval un risque permanent d'inondation d'où l'utilité de mesures hydrologiques constantes.

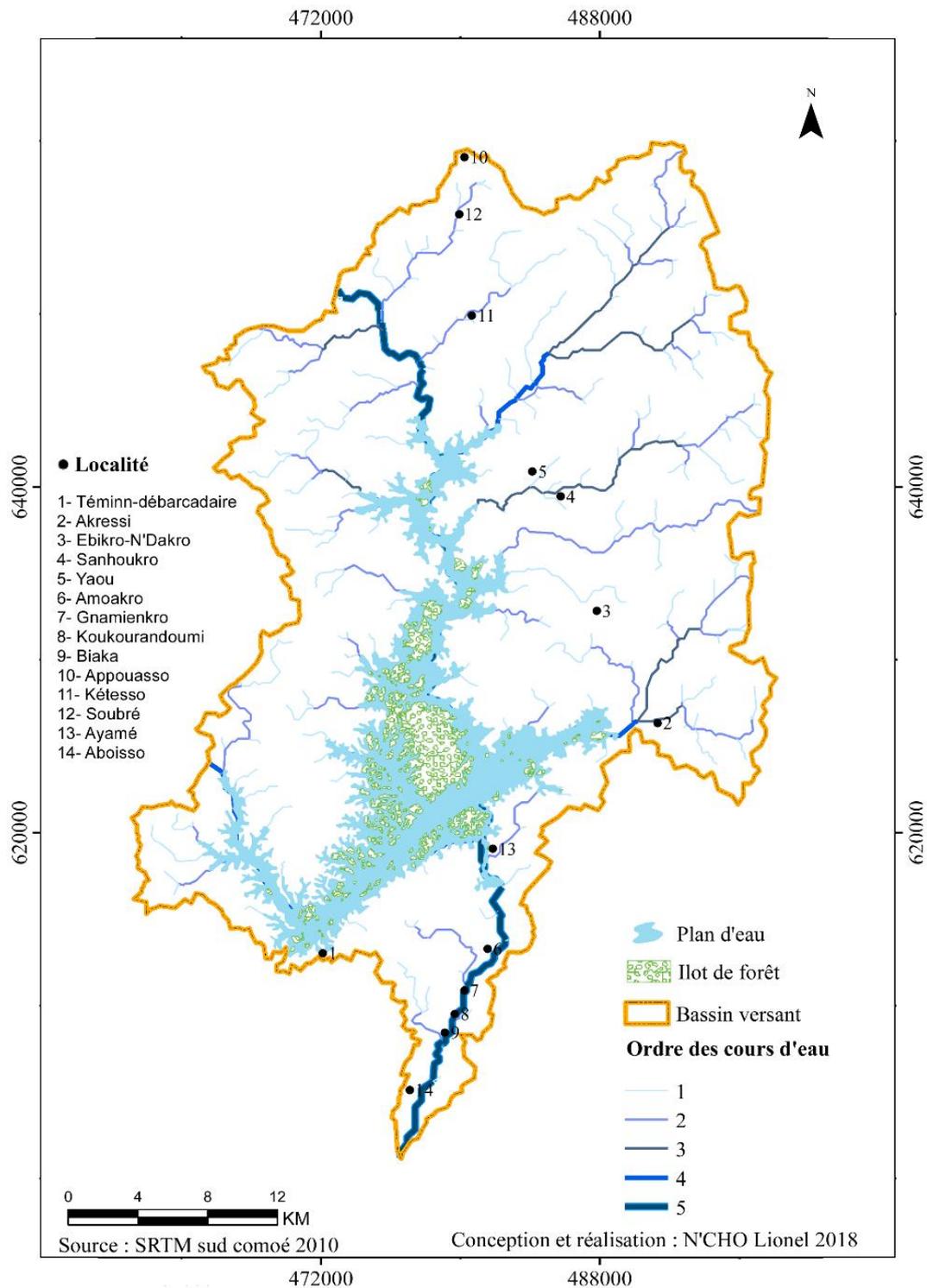


Figure 19 : Le réseau hydrographique du bassin modèle

3.3.4. Temps de Concentration de l'onde de rupture

C'est le temps que met une particule d'eau provenant du point hydrauliquement le plus éloigné du bassin pour arriver à l'exutoire considéré. Pour sa détermination, on utilise plusieurs formules.

La formule de Passini :

$$T_c = 6.48 * \frac{\sqrt[3]{S * L}}{\sqrt{P}} \quad (40)$$

T_c en heures, S en Km², L en Km, P en m/m

La formule de Sokolovsky :

$$T_c = 4 * \left(\frac{(S * L)^{0.333}}{\sqrt{P}} \right)^{0.75} \quad (41)$$

T_c en heures, S en Km², L en Km, P en m/Km

La formule de Venturra :

$$T_c = 0.1275 * \frac{\sqrt{S}}{\sqrt{P}} \quad (42)$$

T_c en heures, S en Km², L en m P en m/m

La formule de Turraza :

$$T_c = 0.108 * \frac{\sqrt[3]{S * L}}{\sqrt{P}} \quad (43)$$

T_c en heures, S en Ha, L en m P en m/m

La formule de Giandotti :

$$T_c = \frac{4\sqrt{S + 1.5L}}{\sqrt[0.8]{H_{moy} - H_{min}}} \quad (44)$$

T_c en heures, S en Ha, L en Km, H_{moy} et H_{min} en m

Avec

L : la longueur du cours d'eau principal

S : la superficie du bassin versant

P : la pente moyenne du bassin versant

H_{moy} : altitude moyenne du bassin versant

H_{min} : altitude minimale du bassin versant

Le **tableau 6** donne les différentes valeurs des temps de concentration T_c obtenues par chaque formule appliquée au cas du bassin versant de la Bia.

Tableau 6 : Calcul du temps de concentration

Formule	T_c (heure)
PASSINI	$T_c = 3.97$
SOKOLOVSKY	$T_c = 36.85$
VENTURRA	$T_c = 1.97$
TURRAZA	$T_c = 2.72$
GIANDOTTI	$T_c = 2.13$

D'Ayamé 1 à Aboisso, l'onde générée par le déversement met 4 h avant d'atteindre le territoire d'Aboisso, le temps de concentration de l'onde de rupture donné par la formule de Sokolovsky sur le même parcours est neuf fois supérieur au timing habituel d'un déversement. De plus, la formule de Sokolovsky donne un temps de concentration largement supérieur à celui donné par les autres formules. On écarte donc la formule de Sokolovsky et on fait la moyenne des autres formules dont les résultats sont rapprochés. Le temps de concentration pour le bassin modélisé est donc de 2.70 heures.

3.3.5. Équipements hydro-pluviométriques du bassin modèle

Le bassin modèle est contrôlé par trois stations pluviométriques Yaou au nord, Ayamé au centre et Aboisso au sud ; il comprend également deux barrages hydroélectriques Ayamé 1 et Ayamé 2. Ces équipements sont gérés par la SODEXAM et la CIE.

Pour gérer les barrages, l'exploitant effectue des mesures dans la station de Bianouan au nord du bassin et aux deux barrages à Ayamé. Les données collectées sont ensuite transmises à la DPE et à la SODEXAM. **La figure 20** présente les stations retenues pour l'étude.

Les équipements hydro-pluviométriques sont d'une importance capitale pour le suivi des éléments liés à l'eau dans le bassin, leur importance va même au-delà des limites définies ici. Cela est d'autant plus net, surtout que l'eau qui circule dans ce bassin, si elle

ne s'infiltrer pas ou ne s'évapore pas, va plus loin en aval et peut se retrouver dans la lagune Aby, à travers les rivières et le fleuve.

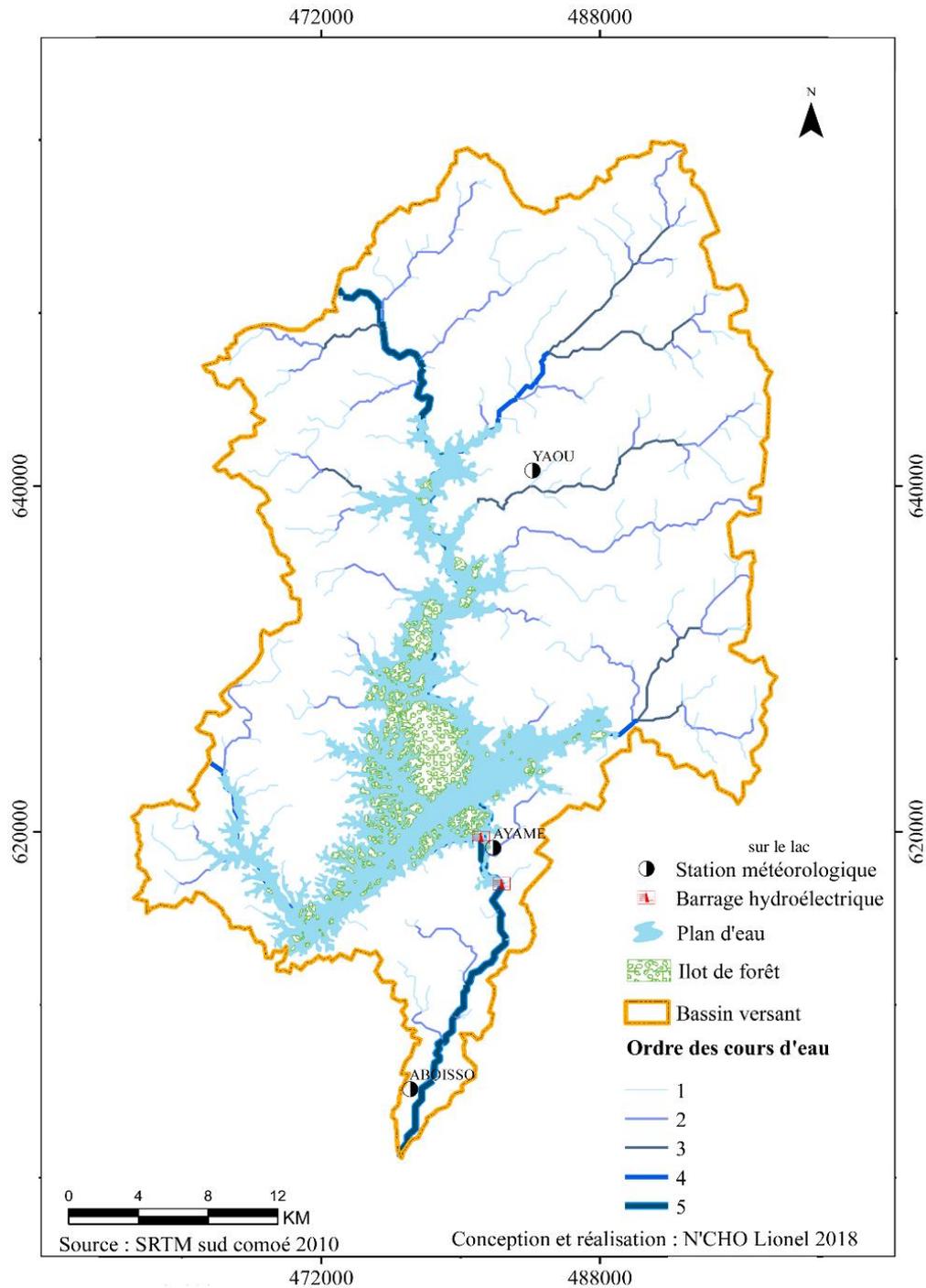


Figure 20 : Les stations d'étude dans le bassin versant modèle

Ce qui suit présente le mode d'occupation du sol du bassin, afin de ressortir clairement à partir du modèle, les enjeux qui peuvent être impactés par la manifestation des

éléments susmentionnés et dans le cas précis de cette étude, l'écoulement de l'onde de submersion générée par la rupture des barrages.

3.3.6. Le bassin modèle, un territoire fortement anthropisé

La zone à modéliser concentre la majeure partie des équipements et infrastructures de tout le bassin situé dans le Sud-Comoé, à cause des localités d'Aboisso (chef-lieu de département) et Ayamé (site des barrages). Par ailleurs, l'aval du bassin modélisé concentre une part importante de la population, due une fois encore à la ville d'Aboisso.

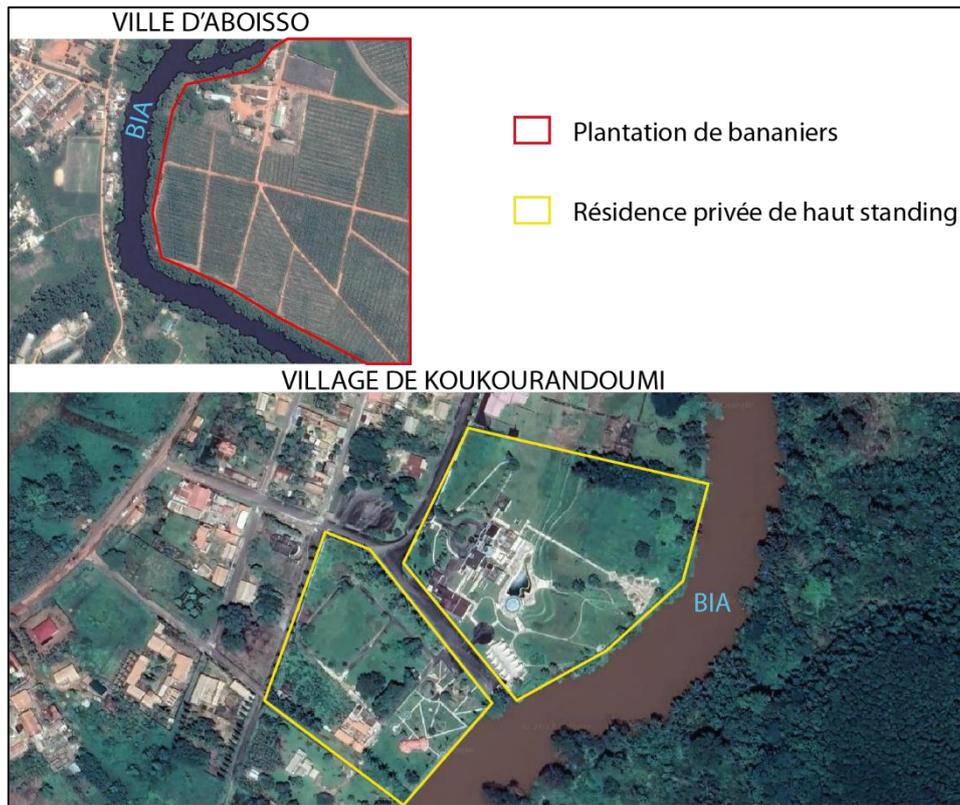
3.3.6.1. Habitats et activités menées dans le bassin modèle

Le bassin est fortement occupé par les plantations et les ligneux naturels. Les populations y pratiquent les cultures de rente et l'agriculture de subsistance. Les versants et sommets des collines sont généralement exploités à cet effet, mais certains agriculteurs préfèrent les bords de la Bia pourtant inondables. Les bords sont également occupés par les populations et leurs habitations.

La **planche 1** présente une vue aérienne des constructions et des plantations dans les localités d'Aboisso et de Koukourandoumi.

Dans le village de Koukourandoumi, on peut voir des résidences privées de haut standing au bord du fleuve. La plupart de ces biens ne résisteront pas à la rupture des barrages d'Ayamé. En outre au sud d'Aboisso, c'est l'une des plus grandes plantations du bassin versant de la Bia qui se situe en zone inondable. Il s'agit d'une plantation de banane du groupe CANAVESE qui s'étend sur une superficie de 42 ha.

Dans l'ensemble du bassin modèle, tous les standings des habitations sont représentés et les constructions en baraque, en terre recouverte de ciment (12 en bordure de la Bia entre Ayamé et Aboisso) sont celles qui ressentent le plus les effets des crues naturelles du fleuve, en saison pluvieuse et pendant les lâchers d'eau effectués par l'exploitant des barrages. En effet, ces constructions sont plus vulnérables à l'aléa inondation que les constructions de moyen et haut standing. Bien qu'elles soient construites en brique, avec quelquefois un système de protection par endiguement, les constructions de moyen et haut standing ne sont pas non plus épargnées par la montée des eaux.



Source : google earth 2017

Planche 1 : Image satellite d'Aboisso et Koukourandoumi

Le long du fleuve à Aboisso, il y a une intensification des enjeux, surtout que les deux rives de la Bia sont habitées. De plus le niveau de vie traduit par les constructions dans le couloir à l'intérieur de la ville relève une différence de la vulnérabilité au sein même du couloir inondable sur le site. Il est évident que le détachement des clôtures et des enrochements faits par certains résidents aisés, va accroître les impacts sur les constructions moins solides des populations moins nantis.

Outre le chef-lieu de département, les autres localités dans le bassin modèle ne sont pas épargnées par ce constat. Contrairement à Amoakro où les constructions les plus proches du fleuve sont à plus de 500 m, la majeure partie des localités dans le couloir potentiellement inondable ont des constructions au moins dans le lit majeur du fleuve. Des villages comme Koukourandoumi et Biaka sur la rive droite totalisent plus de 50 constructions à moins de 100 voire 50 m du fleuve. Dans le seul village de Biaka les constructions les plus éloignées ne sont qu'à 150 m.

Au-delà du bâti, les plantations sont aussi en zones inondables et sur ces enjeux, les espaces culturels d'Amoakro ne sont pas épargnés.

Il existe bien des zones submersibles en aval des barrages d'Ayamé, mais si l'occupation humaine est jusqu'ici autorisée à certains endroits du bassin, les populations peuvent toujours bénéficier d'un système d'alerte qui les prévient lors des activités extrêmes sur les barrages.

La **planche 2** montre les habitations trop près du fleuve pour ne pas être emportées par une onde de submersion importante. Lors des lâchers d'eau et des crues du fleuve, des débordements sont enregistrés au niveau de ces constructions.



Planche 2 : Habitations à proximité du fleuve

Etant donné le poids de l'eau et les bâtiments soufflés par l'onde de submersion lors des précédentes ruptures de barrages dans le monde (Stava, Malpasset...), les habitations à Aboisso qui ploient déjà sous la pression des déversements annuels seront elles aussi détruites.

Contrairement aux équipements et infrastructures, les habitations sont rarement vides de tout occupant. En plus pour une catastrophe qui survient la nuit, au moment où tout le monde est endormi, les pertes humaines sont plus grandes, puisque le temps de réponse est assez lent que lorsque l'évènement se déroule de jour.

Sur la **planche 3** (a = forêt sur rive gauche à Ayamé 2), (b = plantation de cacao sur la rive droite dans la localité d'Amoakro), (c= restaurant le Sélect de la Bia, construit près

du fleuve sur la rive droite à Aboisso), on a un ensemble d'enjeux économiques et d'enjeux environnementaux. Ces enjeux situés dans le lit du fleuve seraient impactés par l'onde de submersion si les barrages d'Ayamé venaient à céder.



Planche 3 : Forêts, plantations et activités économiques

L'agriculture qui est un élément essentiel dans l'économie du département est tout aussi fragilisée au vu de sa présence en zone inondable. Ce constat est le même pour les commerces.

Les forêts sont certes des espaces naturels, mais la biodiversité qu'elles renferment est très importante pour l'équilibre des milieux. Sur les rives le long du fleuve, certaines forêts sont assez préservées, en plus le fleuve comporte des ilots de forêts marécageuses. Ainsi, l'inondation de ces milieux après la rupture des barrages entrainerait un déséquilibre au niveau environnemental.

3.3.6.2. Equipements et infrastructures dans le bassin modèle

Les principaux enjeux en termes d'infrastructures et équipements se trouvent dans la ville d'Aboisso qui concentre la majeure partie de la population du bassin modèle. Le pont Delafosse construit en 1955 pour relier les deux rives du fleuve a été remplacé par un nouveau pont dans le cadre d'un projet d'intégration régional ouest africain. Les déversements qu'effectue l'exploitant des barrages en période de crue du fleuve ont déjà révélé les failles de cet ouvrage qui se trouve à un niveau bien trop bas (**photo 1**).



Photo 1 : Construction d'un pont sur la Bia dans la ville d'Aboisso

En outre, les infrastructures et équipements comme le lycée moderne, les bureaux des services décentralisés (préfecture, sous-préfecture), la rue des banques avec tous ses services dans les bâtiments, les ouvrages de franchissement et bien d'autres éléments garantissant le développement de la ville, montrent la particularité de la ville d'Aboisso au niveau des enjeux. En réalité, la plupart de ces enjeux n'existent pas dans les villages. Les principaux équipements qui s'y trouvent sont essentiellement les dispensaires et établissements scolaires.

Le siège du Conseil Régional du Sud-Comoé sur la rive droite, un établissement scolaire sur la rive droite et un terrain de sport de la ville sont parmi les équipements et infrastructures de la ville d'Aboisso qui ne seront pas fonctionnels après une rupture des barrages (**planche 4**).



Planche 4: Équipements et infrastructures

Aussi si une catastrophe survient pendant que les lieux cités sont occupés par les populations, il y aura forcément des pertes en vies humaines.

En effet, bien que le terrain de sport soit à l'origine un site occasionnellement occupé pour les activités sportives, ce site sert aujourd'hui d'espace de stationnement de véhicules pour la visite technique. En outre le siège du Conseil Régional est régulièrement occupé par des travailleurs et fréquenté par les populations pour des questions administratives. Il en est de même pour le collège où l'affluence est plus dense aux heures de cours, avec en plus une cible plus jeune.

En dépit de tout, les équipements exposés au risque de rupture des barrages dans le bassin sont les ouvrages d'Ayamé 1 et 2 eux même ; ce qui aura un gros impact économique. Selon l'exploitant des barrages, lorsqu'un groupe est à l'arrêt sur un barrage pour 1 heure seulement, se sont plusieurs millions de franc CFA qui sont perdus ; il en est de même lorsqu'un lâcher d'eau est réalisé. L'eau retenue qui a pour but la production de l'électricité représente en effet l'argent stocké.

3.3.7. Synthèse des caractéristiques du bassin modèle

La caractérisation du bassin est nécessaire pour le modèle hydraulique, elle permet de connaître le type du milieu et les formes d'occupation. Les principales caractéristiques du bassin sont résumées dans le **tableau 7**.

Tableau 7 : Caractéristiques du bassin

Superficie (km ²)	1192
Longueur maximale d'écoulement (km)	68.38
Pente moyenne (%)	5
Occupation du territoire	Zones résidentielles isolées
Types de sols	Ferralitique et hydromorphe
Coefficient de ruissellement	0.5
Temps de concentration	2.70Heures

Le bassin modèle vaste de 1192 km² présente des caractéristiques suffisantes pour apprécier les risques d'une inondation suite à la rupture des barrages d'Ayamé. Même s'il ne présente pas tout l'aval du lac d'Ayamé, le bassin permet de faire une projection sur les dommages éventuels entre Aboisso et la lagune Aby.

Le lac d'Ayamé, les barrages et collines sont des contraintes qui ont joué sur l'occupation humaine, ce qui fait du nord et du centre du bassin des secteurs moins peuplés. Mais des secteurs hostiles à l'homme sont occupés par les plantations.

En aval des barrages, l'occupation humaine est plus dense, principalement dans le chef-lieu de département Aboisso. Ici, l'altitude est à moins de 45 m pour des pentes de moins de 3 % ce qui est une donnée essentielle pour l'écoulement d'un fluide.

CHAPITRE 4 : LES BARRAGES HYDROÉLECTRIQUES D'AYAMÉ ET LES MILIEUX EN AVAL FACE AUX APPORTS HYDROLOGIQUES

D'est en ouest, la Côte d'Ivoire dispose d'importants cours d'eau (Bia, Bandama, Sassandra, Cavally) sur certains de ces fleuves sont construits des barrages hydroélectriques. Ces ouvrages offrent à la Côte d'Ivoire l'énergie nécessaire pour son développement. La Bia moins importante que le Bandama et le Sassandra a connu les deux premiers aménagements hydroélectriques du territoire ivoirien dans la sous-préfecture d'Ayamé. Ces ouvrages âgés de plus de 50 ans sont régulièrement suivis par des équipes d'experts et sur recommandation de ceux-ci, des lâchers d'eau sont périodiquement effectués. Lors de ces déversements le niveau de l'eau du fleuve monte brusquement en aval qui se trouve alors débordé sur les berges.

Par ailleurs, l'étude fréquentielle des pluies de la partie sud du bassin de la Bia où sont construits les barrages montre une application de la loi de Gumbel.

4.1. L'HISTORIQUE DES BARRAGES D'AYAME

Voie de communication, voie de pénétration, le pays sanwi s'est ouvert très tôt au commerce international. En 1885 la première bille d'acajou quittait le flottage de la forêt d'Aboisso, la Bia fut également le premier fleuve en Côte d'Ivoire à être utilisé à des fins énergétiques (découverte aérienne de la Côte d'Ivoire, 1974).

La première reconnaissance du bassin avait été entreprise dès 1948 et six années plus tard, la société Energie Électrique de Côte d'Ivoire (EECI) décidait de la réalisation de l'équipement hydroélectrique de la Bia. Le projet devrait sortir la région du Sud-Comoé de son sous-développement. Toutefois le territoire restera à jamais transformé, avec le déplacement des populations pour la cause nationale. Ainsi, les villageois du site d'accueil du projet pensent que le fleuve va couler à l'envers et sont inquiets. Hélas, ils sont obligés de quitter leurs villages qui seront inévitablement engloutis par les eaux du barrage. Des dédommagements leurs sont accordés et leur réinstallation sur des sites plus sécurisé, conçus selon un plan d'urbanisme rigoureux. Les villageois laissent derrière eux toute une histoire sous les eaux.

Mais la Côte d'Ivoire est encore très jeune, les populations ont besoin d'électricité et des usines peuvent être mise en marche et ainsi créer des emplois grâce à cette énergie.

Le barrage d'Ayamé 1 est donc construit et mis en service en 1959. Cette même année, la première énergie sous tension de 90 kv est transportée à Abidjan.

Deux autres barrages sont prévus dans la région, l'un dans la sous-préfecture d'Ayamé et l'autre dans la sous-préfecture d'Aboisso. Celui d'Ayamé 2 est construit en aval du premier. A Aboisso, le milieu humain a trop évolué depuis, pour que le projet soit réalisé. Ainsi, le troisième barrage sur la Bia ne verra pas le jour.

4.2. CARACTERISTIQUES DES BARRAGES HYDROELECTRIQUES D'AYAME

4.2.1. Barrage hydroélectrique d'Ayamé 1

Mis en eau en 1959, le barrage d'Ayamé 1 a une cote de 92,50 m pour une retenue maximale de 90,50 m en période de hautes crues (**photo 2**).

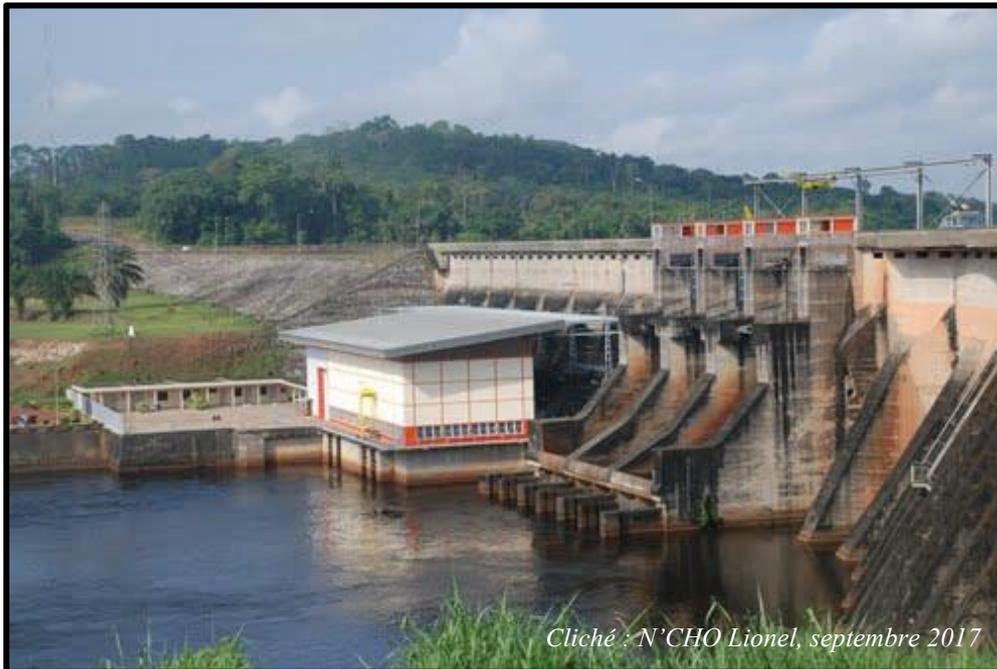


Photo 2 : Barrage hydroélectrique d'Ayamé 1

Ayamé 1 est un barrage contrefort complété d'une digue en terre à noyau argileux. Il a une retenue variant en fonction des apports d'eau et du déversement. Les données

d'exploitation sont prises par jour à l'aide d'un terminal de saisie portatif puis consignées dans un tableau (**annexe 3**).

Lorsque la cote maximale du barrage est presque atteinte (90 m), l'exploitant est obligé de déverser une partie de l'eau stockée. Pendant le déversement, des volumes dépassant les 10 000 000 m³ peuvent être libérés pour empêcher qu'un accident ne se produise sur le site du barrage. Le lâcher d'eau effectué à Ayamé 1 est réalisé après que l'exploitant à Ayamé 2 ait laissé passer l'eau que le barrage stockait. Ce procédé permet à Ayamé 2 de ne pas être débordé quand l'eau lâchée à Ayamé 1 arrive à son niveau. Il garantit ainsi la sécurité de l'ouvrage, de l'usine et des agents en poste.

Les caractéristiques techniques du barrage sont renseignées par l'exploitant (**tableau 8**). Cela lui permet d'avoir un aperçu global et rapide sur les caractéristiques de base de l'ouvrage.

Tableau 8 : Fiche technique du barrage d'Ayamé 1

Année de mise en service	1959
Puissance totale	22 MW
Nombre de groupes	2
Bassin versant	9320 Km ²
Type de barrage	Contrefort
Nombre de contrefort/plot	28
Hauteur du barrage	30 m
Volume du béton	55 000 m ³
Type de turbine	Kaplan
Fleuve	Bia
Rendement énergétique moyen	21 m ³ /kwh
Hauteur de chute brute maximale	25 m
Hauteur de chute brute minimale	17,5 m
Débit total maximal	114 m ³ /s
Apports annuels année moyenne	2240 mm ³ /an
Apports annuels année	5550 mm ³ /an
Apports annuels Sèche	1390 mm ³ /an
Retenue maximale	90,5
Volume à 90,5 m	900 000 000 m ³
Superficie à 90,5 m	180 km ²
Retenue minimale	83 m
Volume à 83 m	54 000 000 m ³
Superficie à 83 m	55 km ²
Largeur d'un plot	10 m

Source : DPE/DUH Ayamé 2012

À l'usine, il peut arriver que les deux groupes fonctionnant avec des turbines Kaplan soient au même moment à l'arrêt. Lorsque l'arrêt d'un groupe n'est pas recommandé à la suite d'une panne technique, c'est bien souvent la Direction de la Production de l'Énergie qui le souhaite, en raison de la forte production du barrage contrairement à d'autres comme Taabo ou Kossou. En effet, malgré une puissance inférieure aux deux autres (22 MW contre 210 MW pour Taabo et 175,5 pour Kossou), Ayamé produit en moyenne 21 m³/kwh d'énergie, contre 7,7 m³/kwh pour Taabo et 12 m³/kwh pour Kossou, soit une production supérieure à l'ensemble des deux barrages. L'eau étant la source de production de l'énergie au barrage, elle ne manque pas dans le reversoir.

4.2.2. Barrage hydroélectrique d'Ayamé 2

L'attention du visiteur qui arrive pour la 1^{ère} fois dans la capitale du canton Djandji est tout de suite attirée par un panneau de signalisation indiquant le barrage d'Ayamé 2, à une dizaine de km du centre-ville.

Le barrage d'Ayamé 2 d'une cote maximale de 70,50 m se trouve en aval du barrage d'Ayamé 1 et il n'a pas de réservoir. Il dépend en partie des eaux qui arrivent d'Ayamé 1. Comme la catastrophe de Tesero en Italie en 1985 où l'effondrement du barrage supérieur a fait céder le barrage en aval, le barrage d'Ayamé 2 sera inexorablement submergé en cas de rupture d'Ayamé 1. Ayamé 2 qui est un barrage poids à voutes multiples est mis en eau en 1965 (**photo 3**). Il est actionné par deux groupes. Lesquels groupes produisent, à plein régime, une puissance totale de 30 mw, un débit maximal de 104 m³/s, grâce à une hauteur de chute brute maximale de 32,5 m et un rendement énergétique de 137,7m³/kwh.



Cliché : Lionel N'CHO, septembre 2017

Photo 3 : Barrage hydroélectrique d'Ayamé 2

Tout comme à Ayamé 1, la CIE a consigné les caractéristiques techniques du barrage dans un tableau (**tableau 9**), afin de faciliter son exploitation. Ici également, les groupes peuvent être mis à l'arrêt au même moment. En outre, le choix des voûtes pour Ayamé 2 s'explique par le fait du coût très élevé des contreforts dans une vallée large (50 000 m³ de béton ici contre 55 000 m³ au premier barrage).

Tableau 9 : Fiche technique du barrage d'Ayamé 2

Année de mise en service	1965
Puissance totale	30 mw
Nombre de groupes	2
Bassin versant	9330 km ²
Type de barrage	Voûte multiple
Nombre de voûte	10
Hauteur du barrage	35 m
Volume du béton	50 000 m ³
Type de turbine	Kaplan
Fleuve	Bia
Rendement énergétique moyen	13,7 m ³ /kwh
Hauteur de chute brute maximale	32,5 m
Hauteur de chute brute minimale	24 m
Débit total maximal	104 m ³ /s
Apports annuels année moyenne	2240 mm ³ /an
Apports annuels année	5550 mm ³ /an
Apports annuels Sèche	1390 mm ³ /an
Retenue maximale	69 m
Volume à 90,5 m	69 000 000 m ³
Retenue minimale	60,5 m

Source : DPE/DUH Ayamé 2012

À Ayamé 2 encore, la production moyenne est importante, car même-ci elle est inférieure à la production cumulée de Kossou et Taabo, sa production dépasse tout de même celle du plus puissant barrage géré par la CIE, c'est-à-dire Taabo avec ses 210 MW et deux groupes. Pour faire tourner les turbines Kaplan une fois de plus, l'eau est fortement présente dans un bassin constamment arrosé.

4.2.3. Exploitation des barrages

Les barrages d'Ayamé 1 et 2 sont les propriétés de l'État de Côte d'Ivoire. Ils sont gérés par un exploitant, la Compagnie Ivoirienne d'Electricité (CIE), à partir d'un contrat de concession signé entre l'État Ivoirien et la CIE depuis 27 ans. La Direction de la Production de l'Energie (DPE) suit, depuis sa base à Abidjan, le fonctionnement et le comportement des barrages qui, eux-mêmes, communiquent sans cesse, pour la productivité, mais surtout pour la sécurité avec l'autorité concédante et les autorités administratives locales. Toutefois les données d'exploitation étant confidentielles, elles ne peuvent pas être publiées à ce stade de l'étude.

4.2.4. Sécurité des ouvrages

Les barrages d'Ayamé sont soumis à des charges permanentes (leur poids propre) et variables (la poussée des eaux retenues, les sous-pressions générées par la percolation des eaux sous les barrages), auxquelles ils doivent pouvoir résister sans dommage jusqu'à l'état limite de service. Ils sont également soumis à des charges exceptionnelles telles que les crues des cours d'eau dans le bassin-versant de la Bia, conduisant comme ce fut le cas en juillet 2018 au remplissage du réservoir d'Ayamé 1.

Si ailleurs dans le monde, le séisme, l'avalanche, le mouvement de terrain, la poussée des glaces, représentent d'autres charges exceptionnelles, le site des barrages d'Ayamé est épargné de ces charges, tant que le sol n'est pas déstabilisé par le terrassement des collines qui pourrait créer des mouvements de terrain.

Les ouvrages sont auscultés en permanence grâce à des capteurs qui mesurent leur comportement (**planche 5**).



Planche 5 : Outils de sécurité des barrages d'Ayamé

Ces dispositifs permettent de déceler les risques potentiels dus à l'évolution des digues et barrages et d'anticiper les travaux de renforcement nécessaires au cours de leur vie. Tous les ans, l'auscultant effectue des mesures à partir des bornes d'auscultations et d'un appareil de mesure topographique, afin d'étudier les mouvements des barrages.

Il transmet ensuite ses résultats à la Direction de la Production de l'Energie (DPE) pour appréciation. Les barrages sont également équipés de règles qui permettent de mesurer le niveau d'eau stocké. En cas d'alerte, le signal est émis par une corne de brume.

En plus de la sécurité des ouvrages, un Plan d'Opération Interne (POI) établi est régulièrement mis à jour pour assurer la sécurité du personnel en cas de catastrophe.

Les barrages d'Ayamé sont des équipements incontournables dans le département d'Aboisso. Ils ont non seulement permis le développement énergétique de toute la Côte d'Ivoire, mais ont aussi permis à la région du Sud-Comoé de jouer un rôle important dans l'économie du pays.

Premiers barrages hydroélectriques de la Côte d'Ivoire, leur gestion par un privé à la suite d'une concession n'entrave en rien le regard strict de l'État, puisque les barrages gérés par la CIE ont pour objectif de satisfaire les ménages et l'industrie en énergie.

Ainsi, veillez à la sécurité des ouvrages, du personnel en exercice et des populations dans le bassin versant de la Bia où les pluies sont abondantes ne doit pas être la seule tâche de l'exploitant. La CIE doit se faire aider par les services de l'État concernés par la sécurité civile et la gestion de l'environnement, c'est pourquoi les agents du barrage sont en contact avec ceux de la SODEXAM avec qui ils échangent des informations capitales pour la sécurité des ouvrages et des populations en aval.

4.3. LE BASSIN SUD-COMOE DE LA BIA, UN MILIEU A PRECIPITATIONS IMPORTANTES

La pluviométrie dans le bassin sud-Comoé de la Bia est identique à celle de tout le département. Les pluies moyennes enregistrées dans les trois stations météorologiques (Bianouan, Ayamé et Aboisso) sont comprises entre 1 269 et 1 299 mm par an. Les précipitations sont plus abondantes en dessous de l'isohyète 1 290 mm, cette zone est influencée par le littoral au sud.

Le secteur d'Ayamé où se situent les deux barrages reçoit donc des pluies importantes qui ont un effet direct sur le lac d'Ayamé.

Aussi, plus on s'éloigne du littoral, la pluviométrie baisse. La station Bianouan enregistre les précipitations les plus faibles dans le bassin, elles sont en dessous de 1 270 mm.

Les pluies moyennes annuelles étant au-dessus de l'isohyète 1000 mm, on retient que les pluies sont abondantes dans la zone (**figure 21**).

Les pluies jouent un rôle important dans l'ensemble du bassin. Elles arrosent les plantations, remplissent la nappe, les cours d'eau et les plans d'eau. Puisqu'au lac d'Ayamé sont connectées des rivières, lorsque ces dernières reçoivent les eaux du ciel, elles viennent se jeter dans le lac qui gagne ainsi en volume. Le réservoir ne désemplit presque jamais grâce à ces apports nécessaires pour faire tourner les turbines de l'usine d'Ayamé 1.

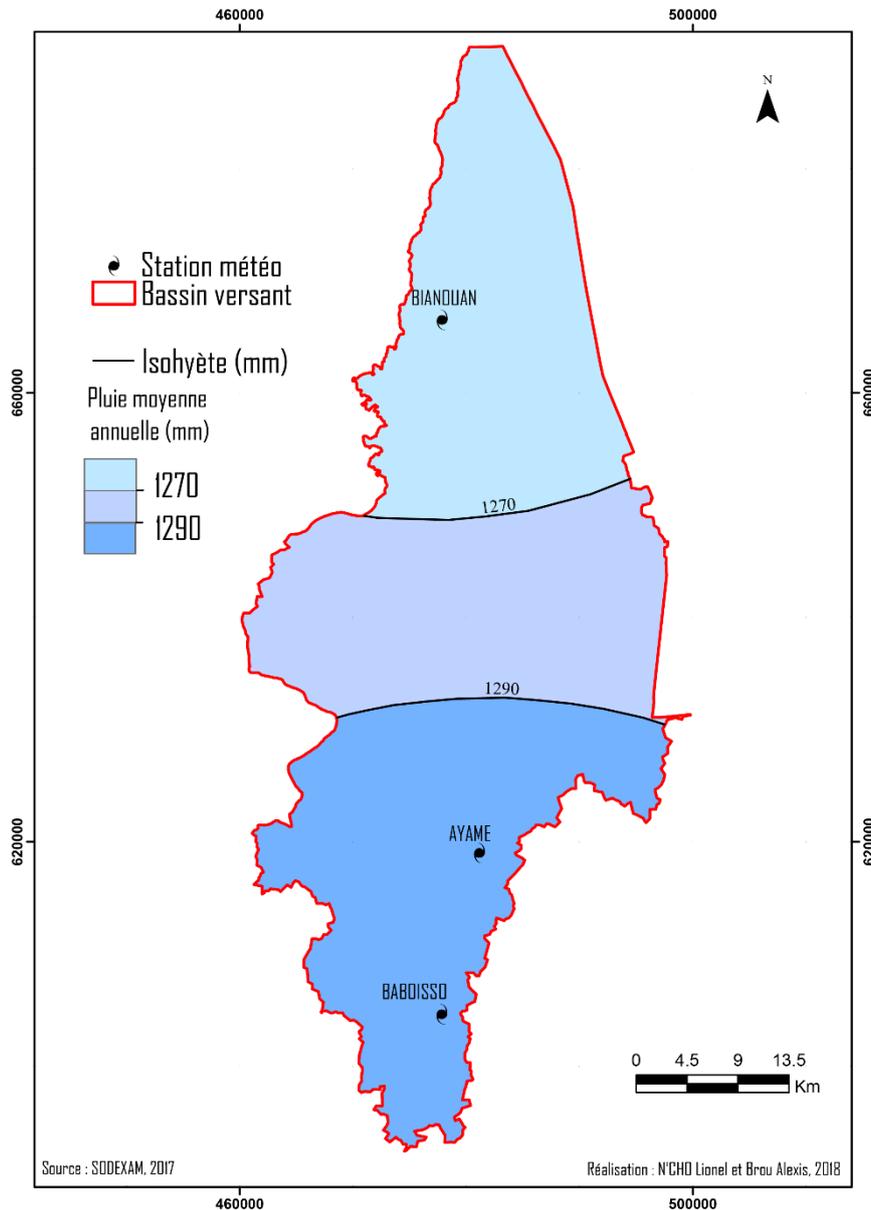
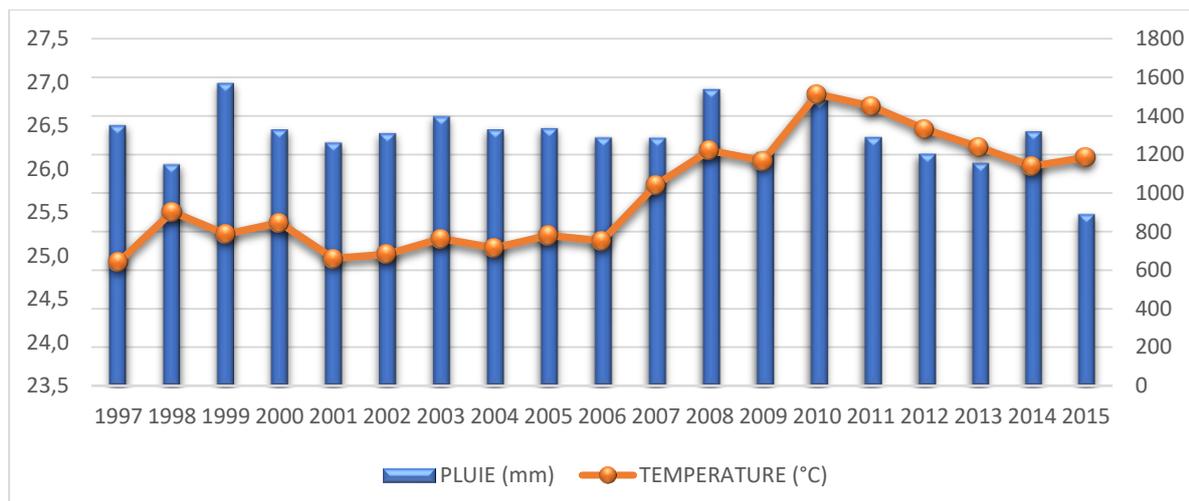


Figure 21 : Répartition des pluies moyennes annuelles dans le bassin versant de la Bia dans le département d'Aboisso

4.4. AYAME 1 et 2, DES BARRAGES HYDROELECTRIQUES DEPENDANT DES TEMPERATURES ET DES PLUIES

La ville d'Ayamé, située en zone de collines et de forêt, reçoit des pluies abondantes. La zone a reçu des précipitations supérieures à 1000 mm sur 18 années successives (1997-2015). Au cours de cette période, un maximum de pluie supérieur à 1500 mm est observé en 1999 (**figure 22**).



Source : données de la station d'Ayamé

Figure 22 : Variation des pluies et des températures de 1997 à 2015 à la station d'Ayamé

Dans la même année, la température moyenne, comprise entre 25 et 26 °C, n'a baissé que légèrement. De 2001 à 2006, les températures restent constantes, puis font une première hausse sur 2 ans (2006-2008), ce qui influence les pluies qui vont aussi augmenter. Après une baisse de la température et des précipitations en 2009, suivie d'une remontée en 2010, la période 2011-2015 s'inscrit dans une chute continue en général, tant au niveau des températures que des précipitations

Il y a donc une corrélation entre pluies et températures à Ayamé, ce qui montre que la région est bien arrosée, avec des pluies abondantes et fréquentes sur le site du lac. Ce résultat s'inscrit dans les observations faites ailleurs dans le monde. En effet, plusieurs études indiquent que le réchauffement global du climat s'accompagne d'une augmentation de la fréquence des fortes précipitations dans de nombreuses régions du globe (Frei et al, 2000 ; Trömel et Schönwiese, 2007 ; IPCC⁹, 2007) cités par Fallot et Herting (2013).

4.5. L'INFLUENCE DES APPORTS HYDROLOGIQUES SUR LES FLUCTUATIONS INTERANNUELLES DU NIVEAU LACUSTRE

La construction du barrage d'Ayamé 1 a nécessité la création du lac d'Ayamé. Le lac est alimenté par les rivières ainsi que par les précipitations, qui sont souvent fortes dans la région et font monter le niveau de l'eau dans le lac.

⁹ Intergovernmental Panel On Climate Change

À Ayamé 1, le niveau maximum a été observé en 1984 (91,20 m) et le minimum en 1983 (86,94 m), alors que le barrage a une côte maximale de 90,50 m.

La **figure 23** illustre la variation des côtes annuelles du lac d'Ayamé sur la période de 1980 à 2013. La courbe de tendance montre une évolution en dent de scie de la côte de 1980 à 2007, avec une minimale de 86,9 m en 1983 et une maximale de 91,2 m en 1984. Ce pique s'explique par la volonté de l'exploitant de laisser le réservoir se remplir par les apports hydrologiques, afin que le barrage soit toujours productif. Entre 2007 et 2011, la côte est stable (90-91 m), puis elle redescend en 2012 à 89 m.

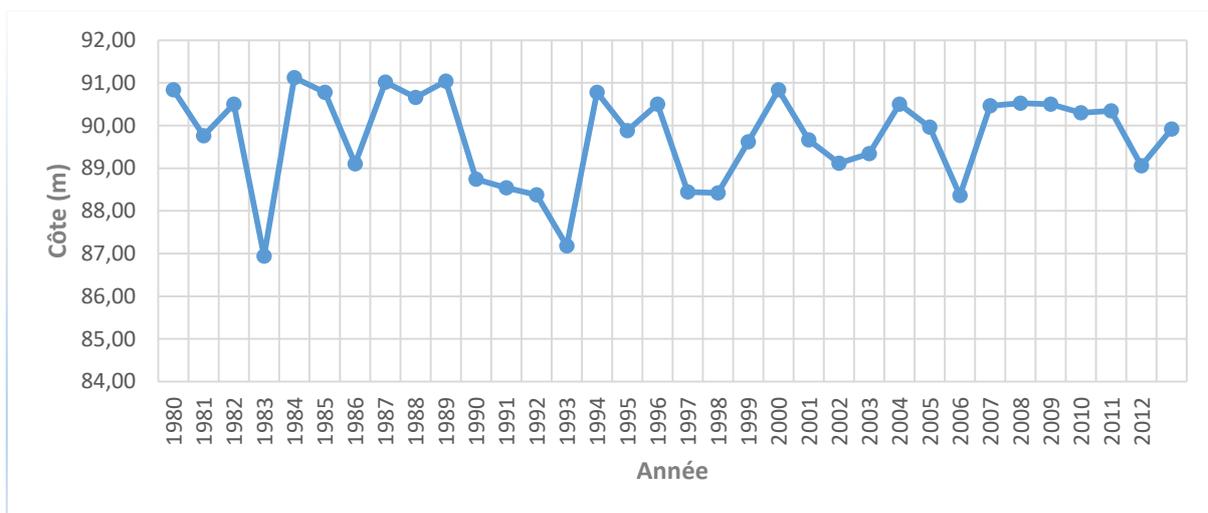


Figure 23 : Variations interannuelles des côtes moyennes du lac d'Ayamé 1 (1980-2013)

4.6. VARIATION DE LA CAPACITE DE STOCKAGE DU LAC D'AYAME 1

La **figure 24** présente les variations des entrées et des sorties d'eau de 1980 à 2013 au barrage d'Ayamé 1. Les entrées sont constituées par les précipitations directes et les apports des rivières. Les pertes d'eau sont de plusieurs sources. Parmi ces sources, on peut citer les fuites à travers la digue, les prélèvements pour la consommation des populations, l'évaporation, les volumes déversés et les volumes turbinés.

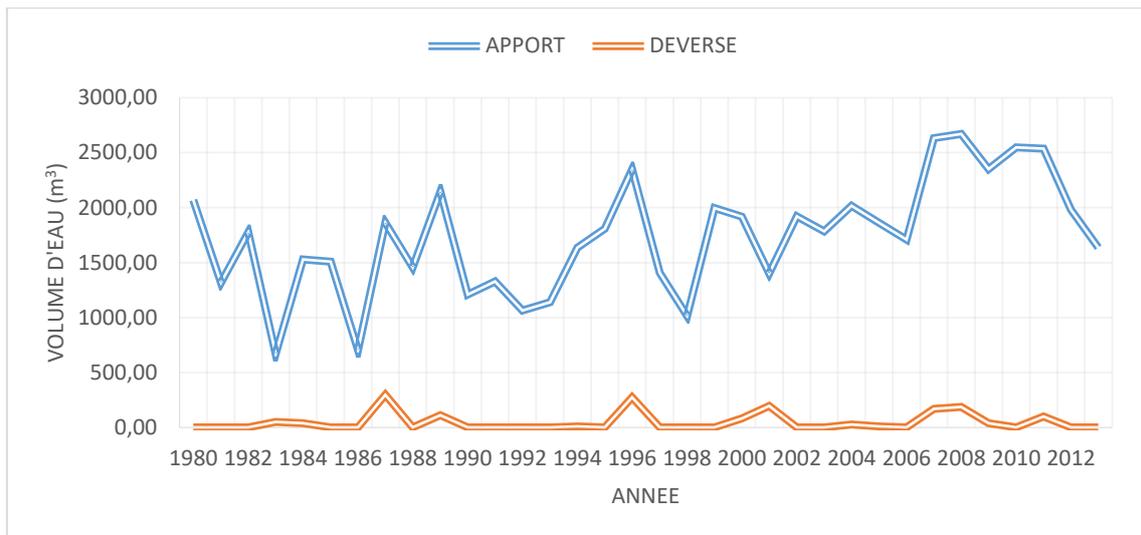


Figure 24 : Variation des entrées et des sorties d'eau de 1980 à 2013 aux barrages d'Ayamé 1

Sur un pas de temps de 33 ans, les plus grands apports ont été enregistrés entre 2007 et 2012, avec plus de 2500 m³ en 2008.

Paradoxalement, les volumes déversés sont plus importants en 1987 et 1996. Le niveau du lac (côte à 91 m en 1987 et 90,7 m en 1996) pourrait expliquer pourquoi il y a eu plus de volume déversé à ces dates, qu'en 2006 et 2012 où le niveau du lac à une côte inférieur à 90 m.

On note également un lien très étroit entre les apports et les déversements, cela s'explique par la volonté de l'exploitant de veiller à la sécurité des barrages. Dans leur étude sur l'évaluation de l'impact du barrage-réservoir Yesa sur la réduction et la saisonnalité des crues sur le bassin versant amont de l'Aragon en Espagne, Moreno et al. (2002) donne l'exemple d'un barrage dont le volume d'eau libéré est dû à la fréquence de la crue et également du niveau d'eau dans la retenue. Ainsi, lors des crues de fréquence rare, l'écrêtage est moindre par rapport aux crues fréquentes.

Les variations hydrologiques relevées à Ayamé 1 montrent que le lac à très peu de chance de se vider pour un déficit d'apport hydrologique. En effet, le bassin versant de la Bia est bien arrosé pour que l'eau vienne à manquer sur une longue durée. Cependant, le trop plein d'eau peut à un moment donné devenir une menace pour la structure du barrage et sa partie avale, si la retenue maximale de 90,50 m en période de hautes crues est atteinte. Une étude fréquentielle permet de prévenir les périodes retour des pluies exceptionnelles, afin d'anticiper cette menace.

4.7. ÉTUDE FREQUENTIELLE DES PLUIES EXTREMES MENSUELLES DE 1980 A 2013 SUR LA BIA

Les résultats de l'analyse fréquentielle des données de pluies sont présentés sous forme de graphiques et de tableaux. Les **figures 25a, 25b et 25c** présentant les modèles statistiques (a = GEV, b = Gumbel, c = Weibull) utilisés, montrent les différents ajustements graphiques des pluies extrêmes mensuelles de la Bia, à la station hydrométrique d'Ayamé (1980-2013).

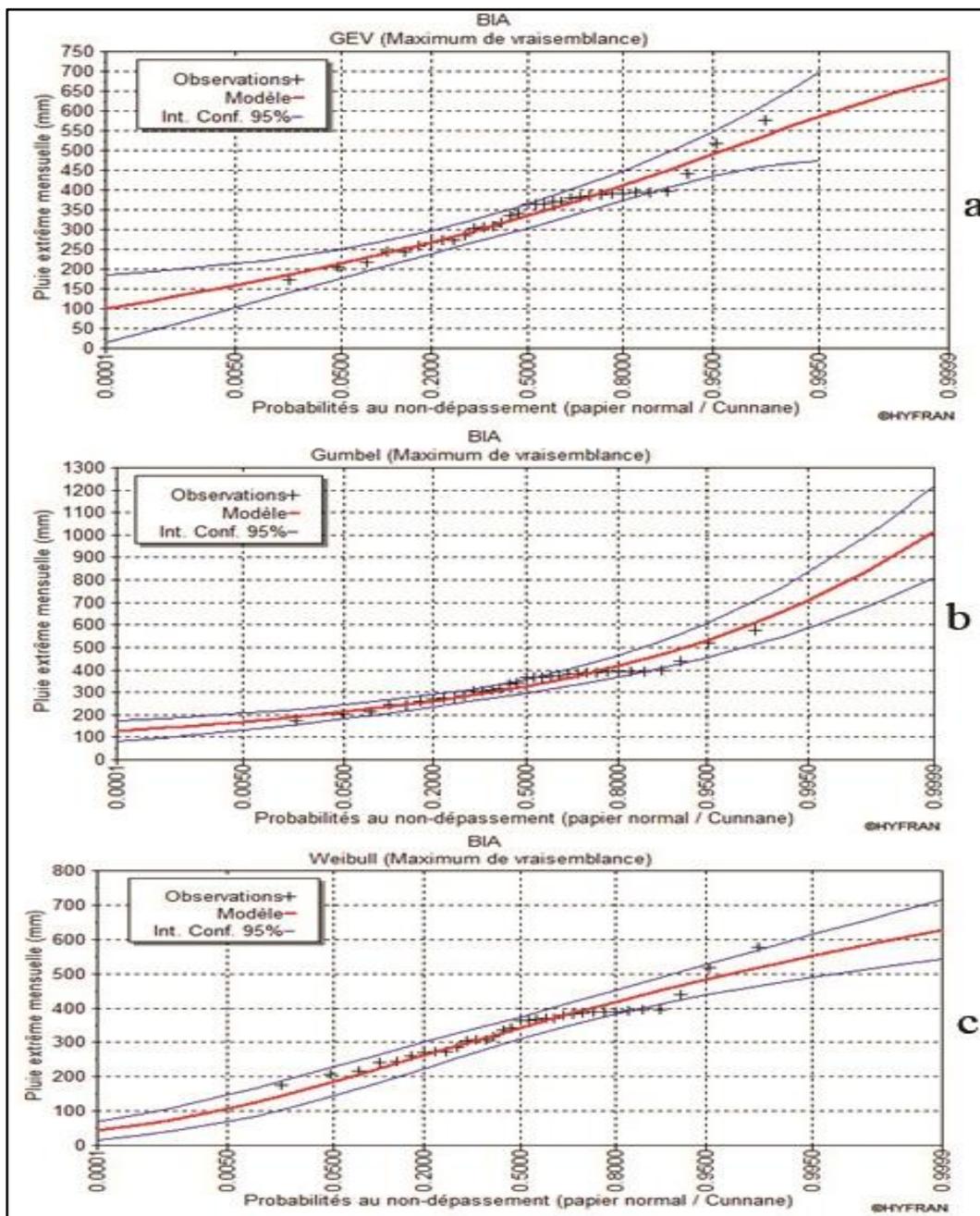


Figure 25a, 25b et 25c : Ajustement des pluies extrêmes mensuelles

Dans les trois modèles, la représentation graphique du nuage de points présente la forme d'une relation linéaire positive où les pluies extrêmes mensuelles seraient fonction de la probabilité de non-dépassement. Toutefois, la corrélation entre les deux phénomènes est plus fortement attestée par la loi de Gumbel qui s'ajuste le mieux à la Bia.

Les caractéristiques de chaque modèle sont présentées dans le **tableau 10** où on note que pour un échantillon unique, on a des moyennes différentes, avec la moyenne de Gumbel (341) qui est supérieure à celle des deux autres. Par ailleurs, ces observations confirment davantage le choix du modèle de Gumbel pour le fleuve Bia.

Tableau 10 : Caractéristiques du modèle de GEV, GUMBEL et WEIBULL

	Caractéristiques de la loi	Caractéristiques de l'échantillon	Model
Minimum	Aucun	175	GEV
Maximum	829	578	
Moyenne	338	338	
Ecart-type	84,1	84,7	
Médiane	331	353	
Coefficient de variation (Cv)	0,249	0,251	
Coefficient d'asymétrie (Cs)	0,451	0,52	
Coefficient d'aplatissement (Ck)	3,17	3,47	
Minimum	Aucun	175	GUMBEL
Maximum	Aucun	578	
Moyenne	341	338	
Ecart-type	98,1	84,7	
Médiane	325	353	
Coefficient de variation (Cv)	0,287	0,251	
Coefficient d'asymétrie (Cs)	1,14	0,52	
Coefficient d'aplatissement (Ck)	2,4	3,47	
Minimum	0	175	WEIBULL
Maximum	Aucun	578	
Moyenne	337	338	
Ecart-type	90,1	84,7	
Médiane	340	353	
Coefficient de variation (Cv)	0,268	0,251	
Coefficient d'asymétrie (Cs)	0,128	0,52	
Coefficient d'aplatissement (Ck)	2,77	3,47	

Bien que l'approche visuelle donne de bons résultats (**figures 31a, 31b et 31c**), elle a un inconvénient, car les résultats de l'observation à l'œil nu varient forcément d'un observateur à un autre. C'est pourquoi, on a recours à l'approche des critères de comparaison numérique qui permet de classer les modèles à partir de critères objectifs que sont les critères d'information Bayésien et Akaike (BIC et AIC).

Ainsi, l'ajustement est confirmé par les critères de comparaison numérique consignés dans le tableau ci-dessous pour une période de retour $T=100$ ans. En effet, ce tableau présente le classement des lois ajustées aux séries de pluies extrêmes mensuelles. D'après les critères de comparaison, c'est la loi de Gumbel qui s'ajuste bien au module du fleuve Bia, ensuite viennent la loi de GEV, puis celle de Weibull (**tableau 11**).

Tableau 11 : Comparaison des lois statistiques pour l'ajustement des modules du fleuve Bia à la station d'Ayamé sur la période 1980-2013

Loi statistique	Nombre de paramètres	Critères de comparaison		Classement
		CIA	CIB	
Gumbel	2	357.772	360.765	1
GEV	3	359.077	363.567	2
Weibull	2	360.316	363.309	3

L'estimation des quantiles de pluies extrêmes X_T de période de retour T et leurs probabilités d'occurrence sont présentées dans le **tableau 12** où il apparaît qu'une pluie mensuelle extrême de 325 mm pourrait se produire tous les 2 ans dans le bassin versant de la Bia, avec une probabilité d'occurrence de 0,50 et qu'une autre de 469 mm arriverait tous les 10 ans, avec une probabilité de non-dépassement de 0,9. La pluie extrême centenaire a une probabilité de 0,99 et attendrait 649 mm.

Tableau 12 : Estimation des pluies mensuelles extrêmes dans le bassin versant de la Bia

T	Q	X_T (mm)	Ecart-type	Intervalle de confiance (99%)
2	0,5	325	15,3	286-365
3	0,6667	366	18,9	318-415
5	0,8	412	23,8	351-473
10	0,9	469	30,6	390-548
20	0,95	524	37,6	427-621
50	0,98	596	46,9	475-716
100	0,99	649	53,9	510-788
200	0,995	702	61	545-859
1000	0,999	825	77,6	626-1030
2000	0,9995	879	84,8	660-1100

De plus, la probabilité de non-dépassement (Q), c'est-à-dire la chance d'avoir un niveau de pluie extrême donnée augmente au fur et à mesure que le temps de retour croît. Cela implique que le modèle est plus fiable dans les longues périodes et que pour les temps de retour courts (par exemple 50 % à 2 ans), la probabilité peut être dépassée. De même, si rien ne dit que les pluies extrêmes indiquées surviendront réellement tous les 2, 10 ou 100 ans, elles peuvent permettre, dans la gestion préventive du risque inondation lié aux crues de la Bia, de prendre des dispositions.

Le lac d'Ayamé est suffisamment alimenté en eau (pluie et écoulement de rivières) pour ne pas s'assécher. Ces grandes quantités d'eau obligent le gestionnaire à effectuer des lâchers d'eau pratiquement tous les ans, en dépit des pertes de devises, puisque l'eau stockée sert à produire l'énergie qui est commercialisée.

En outre, l'analyse fréquentielle de la Bia permet de déterminer les périodes de retour des pluies extrêmes, à partir de la station d'Ayamé 1. Ainsi, dans l'optique d'une gestion préventive des crues qui pourraient endommager le barrage hydroélectrique d'Ayamé 1 et éventuellement celui d'Ayamé 2, la survenue des pluies extrêmes dont le temps de retour est de cinq ans au moins, avec une probabilité de 80 % et plus, devrait interpellier les gestionnaires de ces barrages. Ces pluies extrêmes qui sont à l'origine des crues du fleuve Bia constituent une menace permanente pour les barrages et les milieux en aval. Au niveau d'Ayamé, les résultats de cette analyse permettent de montrer que la loi de Gumbel s'applique mieux au fleuve Bia.

Il importe toutefois d'apprécier l'état actuel de sécurité des barrages et de faire un retour d'expériences des inondations passées liées à la présence de ces barrages dans la vallée principale de la Bia.

4.8. ÉTAT DES BARRAGES

Malgré leur âge avancé par rapport aux autres barrages hydroélectrique en Côte d'Ivoire, les barrages d'Ayamé 1 et 2 sont apparemment en bon état.

Les mesures prises par l'auscultant ne montrent pas un grand déplacement des barrages ; ils sont stables.

Toutefois si les abords d'Ayamé 1 semblent intacts, à Ayamé 2, on note un effondrement progressif de la digue au niveau de la voute 10 où des villageois ont en effet coupé le couvert végétal initial aux abords de la voute pour faire des cultures.

Au cœur même des barrages, les pièces sont toujours contrôlées par des plongeurs et des mécaniciens. Les pièces défectueuses sont réparées quand cela est possible ou remplacées si nécessaire par de nouvelles pièces. Un parc à déchets permet de stocker les produits et pièces usagers.

L'auscultant, les agents techniques d'exploitation, les mécaniciens et tous les autres agents aux barrages travaillent de concert. Ensemble, ils collectent tous les jours des données hydrologiques, observent les barrages et vérifient les pièces avant de rendre compte au directeur des usines ou à son adjoint. Le responsable décide des conduites à tenir pour garantir la sécurité des barrages ou se refaire à la Direction de la Production de l'Energie à Abidjan.

Il arrive que les mesures hydrologiques soient trop élevées car dans la région les pluies sont abondantes. Dès lors, l'exploitant procède à des lâchers d'eau qu'il arrête lorsque la sécurité du barrage n'est plus menacée. Ainsi, en juillet 2018, les débitmètres du barrage d'Ayamé 1 révèlent un apport de plus de 25 millions de mètre cube d'eau. La sécurité du barrage d'Ayamé 1 étant menacée, l'exploitant décide d'effectuer un déversement bien plus important que le lâcher d'eau auquel les populations sont habituées. Plus de 12 millions de mètre cube d'eau sont lâchés en aval, et l'exploitant ne décide de s'arrêter que lorsque la sécurité du barrage n'est plus menacée. A l'occasion de ces déversements forcés d'eau, des dégâts sont enregistrés en aval des barrages. Ce fut le cas en 1969 et 1975.

4.9. CONSTAT D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIO-ECONOMIQUES DES DEVERSEMENTS PASSES

Le déversement est une activité importante et obligatoire pour réguler le niveau du lac d'Ayamé 1. Bien qu'il ne soit pas l'objet de cette étude, ses impacts donnent à une échelle réduite un aperçu des dégâts que pourrait causer la rupture des barrages. Ici sont transcrits les récits et constats d'impacts d'inondations majeures depuis la mise en eau des barrages.

4.9.1. Les inondations de 1969 et 1975

Selon le témoignage de BILE, professeur de lycée à la retraite, rencontré à Aboisso en octobre 2017, « *la Bia a débordé en septembre 1969. Toutes les maisons en bordure du fleuve étaient inondées, l'eau arrivait à la hauteur des fenêtres des maisons. Les pirogues passaient sur le pont DELAFOSSE inondé. L'un des ingénieurs français ayant participé à la construction des barrages, mettait en garde toute la population contre la rupture du barrage d'Ayamé 1 à cette période fortement sensible, où même le lycée moderne d'Aboisso risquait d'être emporté par l'eau* ».

BENIE Jean Paul, 2^{ème} adjoint au maire de la ville d'Aboisso fait savoir qu'en 1975, le pont DELAFOSSE construit seulement en 1955, subissait une deuxième inondation ; les populations passaient une fois encore d'une rive à une autre en pirogue. Cette année-là, l'eau arrivait au niveau de l'actuelle station totale, avec un niveau navigable. Toute la zone des plantations de bananes vers krindjabo était inondée, de même que les puits dans la ville. Le besoin d'eau potable était préoccupant pour plusieurs foyers. Heureusement, il n'y pas eu de perte en vie humaine pendant ces crises.

La ville d'Aboisso et le reste de l'aval ont enregistré d'autres inondations en plus de celles de 1969 et 1975, notamment les inondations de 1980 et 2011, mais à cause de leur importance moins grande, elles sont rarement citées par les populations.

Par contre le débordement de juillet 2018, le plus récent d'ailleurs a été d'une grande ampleur, avec comme impact par exemple des pertes de vies humaines.

4.9.2. L'inondation de 2018

4.9.2.1. Nature de la catastrophe

La région du Sud-Comoé connaît une catastrophe à deux niveaux qui a pour principales causes les pluies tombées en juillet au Ghana voisin, là où la Bia prend sa source. Au même moment, la sous-préfecture de Bianouan enregistre de fortes précipitations, la règle de mesure du niveau de l'eau au niveau du pont de Bianouan pointe à 95,8 mètres de crue. Ces données ne vont pas être sans conséquence pour le réservoir du barrage Ayamé 1 et son aval.

Le fleuve, les pluies et les rivières sont des apports importants pour le réservoir et les pluies de la première moitié de 2018 prédisposent le réservoir à un remplissage certain.

Alors que le dernier déversement avait été effectué en décembre 2017, les pluies tombées depuis février 2018 n'ont cessé d'alimenter le lac.

Deux mois avant la catastrophe, un pic de 400 mm est enregistré (**figure 26**).

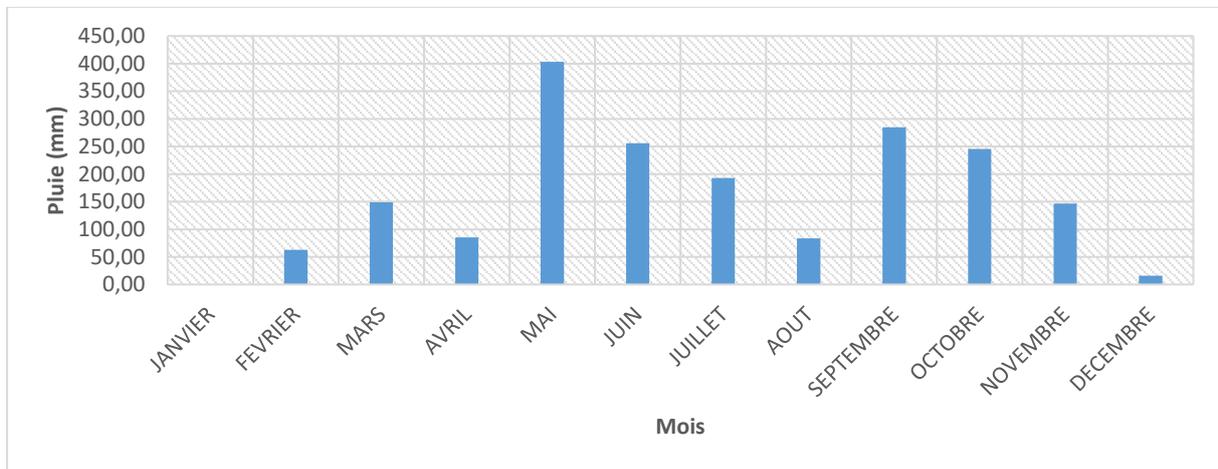


Figure 26 : Pluies mensuelles enregistrées au barrage d'Ayamé en 2018

De même, les apports du fleuve sont importants en cette période de l'année. Ils font un pic en mai avec plus de 190 000 000 de mètre cube et sont à 809 818 672 m³ en juillet où se déroule la catastrophe (**figure 27**).

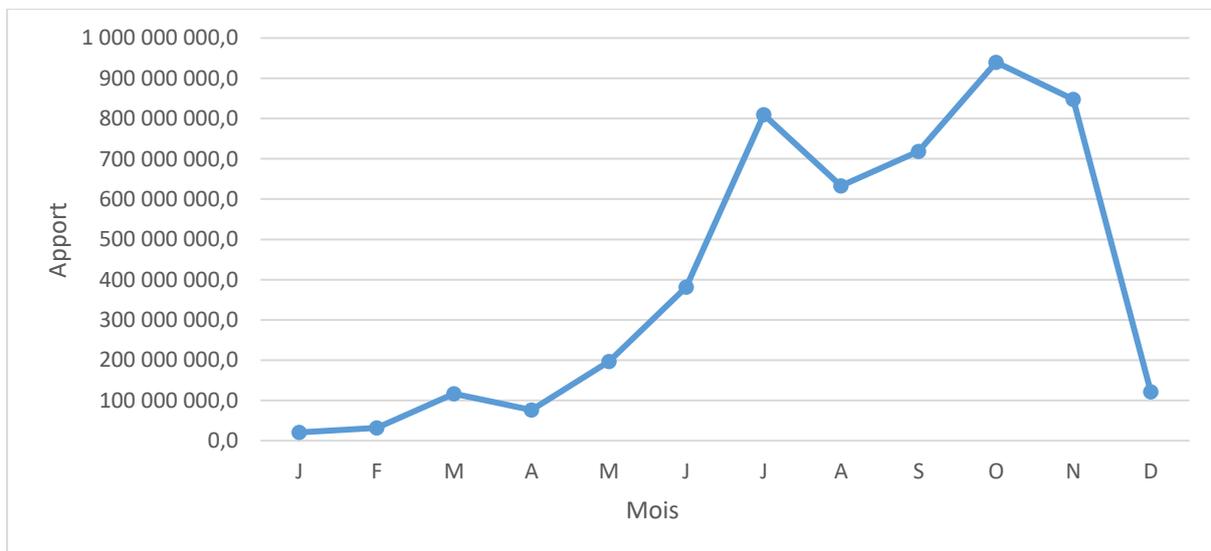


Figure 27 : Apports de la Bia en m³ en 2018

Ainsi, la côte du barrage ramenée à 88,06 m en juin 2018 passe le 1^{er} juillet à 89,56 m à 7 h. Le lendemain à la même heure, elle est à 89,66 m et continue de monter.

Le 5 juillet, la cote atteint 90 m à 19 h et cinq jours plus tard à 13 h, la cote maximale de 90,5 m est atteinte (**figure 28**), puis dépassée (90,54 m) à 18 h.

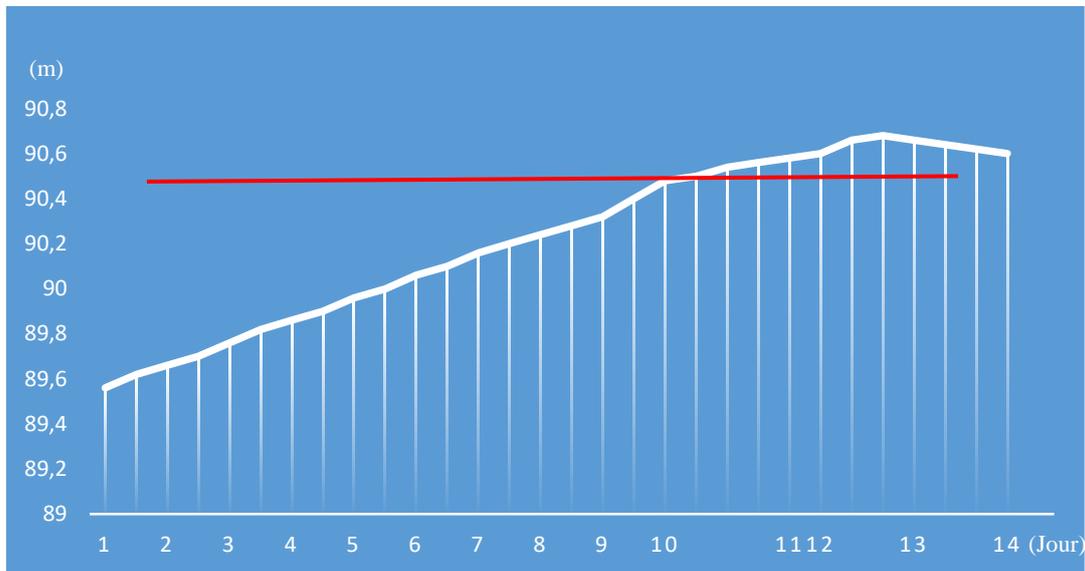


Figure 28 : Évolution de la cote du 1 au 14 juillet 2018

Un risque de rupture du barrage d'Ayamé 1 est probable et le passage de l'eau du réservoir au-dessus des contreforts est certain si la cote continue de monter. Le déversement déjà en cours depuis le 10 juillet à 13 h, avec 594000 m³ d'eau est aussitôt rehaussé le 12 juillet à 7 h. Plus de 12 000 000 de mètre cube d'eau, soit 1,28% sont déversées en aval du lac d'Ayamé.

La sécurité du barrage d'Ayamé 1 est garantie tout comme celle du barrage route d'Ayamé 2, mais l'aval des deux barrages reçoit un effet double de la crue de la Bia.

4.9.2.2. Des pertes importantes en aval après le déversement

Après le lâcher d'eau du 12 juillet 2018, les populations se retrouvent face à une situation qu'elles n'avaient pas prévu malgré l'alerte inondation. Cela s'explique par le fait que les personnes habitant une zone à risque tendent à sous-estimer ou à nier la probabilité qu'une catastrophe survienne.

En effet, bien que le préfet du département sous les conseils de l'exploitant ait averti les populations de l'ampleur de la crue à venir, la plupart des occupants du lit du fleuve n'ont pas suivi les consignes de sécurité, il s'en suit des pertes énormes sur les milieux humains et physiques.

Les populations déplorent des pertes de récoltes et l'inondation de leurs plantations. Le niveau des eaux des rivières communiquant directement avec la Bia s'étale sur 200 à 500 mètres de chaque côté des cours d'eau.

À Aboisso où la hauteur d'eau atteint parfois 50 cm, 467 sinistrés obligés de quitter leurs maisons sont enregistrés et un homme perd la vie dans le fleuve dans la soirée du 13 juillet, un autre homme meurt noyé le même jour dans le village voisin à Biaka. L'inondation touche totalement ou en partie plusieurs maisons sur les deux rives à Aboisso et n'épargne pas les commerces, les équipements (terrain de football, abattoir, conseil régional, SODECI où le radeau de pompage d'eau est remonté de plus d'un mètre pour assurer le pompage et la distribution continue de l'eau potable à la population).

Les routes sont coupées et les ouvrages de franchissement submergés ou en passe de l'être. C'est le cas du nouveau pont d'Aboisso en construction qui est à 2 m près d'être enseveli sous le fleuve. La rue des banques, reliant la voie express A100 à la préfecture d'Aboisso est progressivement prise par l'eau et l'entrée de la route principale du quartier Koliahiwa est à moitié inondée.

Au sud d'Aboisso, l'Accès à Alliékro est rompu par l'inondation sur plus de 4 km de route sur une voie qui fait en tout 13 km.

Dans ce secteur, des maisons sont inondées jusqu'à 1 m 20 de haut, environ 184 ha de plantations sont submergées avec une dominance de palmiers à huile et 535 ha de forêts inondées. Ici, les villageois ont perdu la quasi-totalité de leurs vivres et récoltes (**planche 6**).



Planche 6 : Exemples de récoltes et d'habitations inondées

L'isolement que connaît Alliékrô à cause de la route toujours inondée une semaine après la catastrophe accroît l'anxiété des populations. Le représentant des jeunes du village pense qu'il leur sera impossible d'aller en ville acheter une boîte d'allumette si les routes restent toujours coupées par l'eau (**planche 7**). De même, l'eau mettant plus de temps à se retirer dans certaines zones, le risque de maladies hydriques devenait grandissant.



Planche 7 : Routes inondées

Ainsi, en juillet 2018, le département d'Aboisso connaît une catastrophe à plusieurs impacts.

4.9.2.3 Réponses sociales face à la catastrophe de 2018

Aux premières heures de la catastrophe, la mobilisation se fait sentir à tous les niveaux. Les autorités locales décident de l'amplification de la sensibilisation auprès des riverains du fleuve Bia par des communiqués renouvelés. Un recasement des sinistrés avec assistance dans les écoles et le déguerpissement des habitations en zone d'inondation sont entrepris. L'assistance aux sinistrés s'organise tant sur le plan local que national.

Ainsi, le 15 juillet 2018 au cours de la cérémonie de remise des dons du gouvernement sur le site du groupe scolaire TP (travaux publics), la ministre de la solidarité, de la cohésion sociale et de la lutte contre la pauvreté, remet des vivres d'une valeur de 30

millions de F Cfa. Des ministres issus de la région et le maire d'Adiaké offrent une enveloppe de 4 millions de F Cfa et 3 millions F Cfa de dons en nature. Trois jours plus tard, le député de Cocody (Abidjan) s'associe à cet élan de solidarité, en offrant des vivres, des vêtements et des matelas. Puis le 20 juillet, le vice-président ivoirien et le premier ministre remettent respectivement aux victimes une somme de 3 millions de F Cfa et de 1 million de F Cfa. Ce jour, les sinistrés reçoivent également des dons en nature dont trois tonnes de riz, seize cartons de pâtes alimentaires. De leur côté, les ambassadeurs originaires de la région offrent 2 millions de F Cfa et le chef de cabinet du chef de la diplomatie ivoirienne fait don de 300 000 F Cfa aux sinistrés.

Comme on le voit, les inondations de 1969, 1975 et 2018 témoignent de la vulnérabilité du couloir en aval des barrages. Elles devraient interpeler les acteurs du département à tous les niveaux sur une inondation encore plus grande.

A l'instar des inondations précédentes, celle de juillet 2018 a considérablement perturbé les échanges dans le département et laissé de lourdes séquelles sur les populations déplacées et endeuillées. Partie du Ghana voisin, la Bia en crue a emporté et détruit des biens importants, risquant d'ailleurs de faire céder le barrage d'Ayamé¹. Pendant la catastrophe, les actes de solidarité envers les sinistrés ont été manifestes et les populations ont elles-mêmes pris conscience des dangers qui les menacent en s'installant dans les zones inondables.

Ces inondations ne semblent pas s'arrêter. Le rapprochement des crues dans le bassin versant de la Bia, en raison du rapprochement des phénomènes extrêmes dans le monde interpelle davantage. Ainsi, dans un milieu où l'occupation humaine devient de plus en plus importante, l'on gagnerait à ajuster les aménagements en tenant compte des risques auxquels sont exposées les populations.

Conclusion de la deuxième partie

Les barrages hydroélectriques d'Ayamé sont construits sur un fleuve qui coule dans deux pays voisins, le Ghana où le fleuve prend sa source et la Côte d'Ivoire où se trouve son exutoire. Le Bassin versant du fleuve est plus vaste au nord (Ghana), mais présente le même intérêt que dans sa partie sud (Côte d'Ivoire) où la présence humaine est tout aussi marquée notamment à Aboisso.

Dans la partie ivoirienne où sont construits deux barrages hydroélectriques, ces ouvrages constituent un obstacle à la circulation normale du fleuve. Un lac a été aménagé à cet effet à Ayamé. Le fonctionnement de ces barrages n'est pas sans conséquence pour les milieux aval. Les lâchers d'eau forcés dans le but de réguler le niveau du lac et ainsi assurer la sécurité du barrage d'Ayamé 1 révèlent des dommages potentiels en aval en 1969, 1975 et 2018.

Les milieux en aval des barrages d'Ayamé sont exposés à la montée des eaux à chaque déversement et, l'ampleur des inondations que ces lâchers d'eau occasionnent diffère d'une année à une autre. Toutefois, l'ampleur de ces catastrophes saisonnières est infime face à celle causée par la rupture des barrages. Si cela devrait se produire, qu'elle sera la zone inondée et quelles seront les dommages potentiels auxquels se préparer.

TROISIÈME PARTIE

DOMMAGES POTENTIELS EN CAS DE RUPTURE DES BARRAGES ET GESTION DE L'INONDATION

**Chapitre 5 : Cartographie de la zone à risque et dommages
potentiels des inondations causées par la rupture des barrages**

**Chapitre 6 : Outil de gestion de l'inondation liée à la rupture des
barrages d'Ayamé**

INTRODUCTION DE LA TROISIÈME PARTIE

Les données traitées permettent d'avoir des résultats qui renseignent sur les risques auxquelles les populations du département d'Aboisso, principalement celles situées en aval des barrages sont exposées.

Les populations en aval subissent déjà les désastres causés par des déversements effectués par l'exploitant, pour la sécurité même des barrages.

C'est pourquoi, dans le chapitre 5, on envisage d'abord la cartographie des zones à risque d'inondation d'une part et l'analyse des impacts causés par la catastrophe d'autre part. Puis dans le chapitre 6 un plan de gestion de la catastrophe est proposé aux parties impliquées dans la crise après l'analyse de leur mode de gestion des inondations liées aux barrages en situation réelle.

CHAPITRE 5 : CARTOGRAPHIE DE LA ZONE A RISQUE ET DOMMAGES POTENTIELS DES INONDATIONS CAUSEES PAR LA RUPTURE DES BARRAGES

La cartographie de la zone inondable est un outil de prévention pour toutes les parties concernées par le risque de rupture des barrages d'Ayamé. A travers les cartes d'inondation, le gestionnaire peut facilement communiquer aux populations, sous l'autorité préfectorale, les zones à risque et les mesures à prendre.

Les zones à risque d'inondation en cas de rupture des barrages une fois communiquées aux populations, celles-ci peuvent décider pour leur propre sécurité de partir ou non des zones dangereuses.

5.1. LA CARTE DE LA ZONE A RISQUE D'INONDATION LIEE A LA RUPTURE DES BARRAGES

5.1.1. Détermination de la zone d'aléa inondation

Le modèle numérique de terrain du bassin modélisé en trois dimensions, à partir de l'image SRTM sous le logiciel Arcgis permet de faire ressortir la zone d'aléa inondation où le fond est continuellement occupé par la Bia (**figure 29**). C'est ici également que s'écoule l'eau du réservoir d'Ayamé 1 un fois déversée en aval. A partir de ce modèle, les limites entre les zones élevées où naturellement l'eau ne présente aucun danger lors des déversements des barrages et le couloir inondable sont déjà perceptibles.

Toutefois, une modélisation hydrologique mettant en évidence la rupture des barrages confirme l'écoulement de l'onde de submersion issue de la rupture dans le couloir inondable. Avec HEC-RAS, la simulation est faite pour casser les barrages.

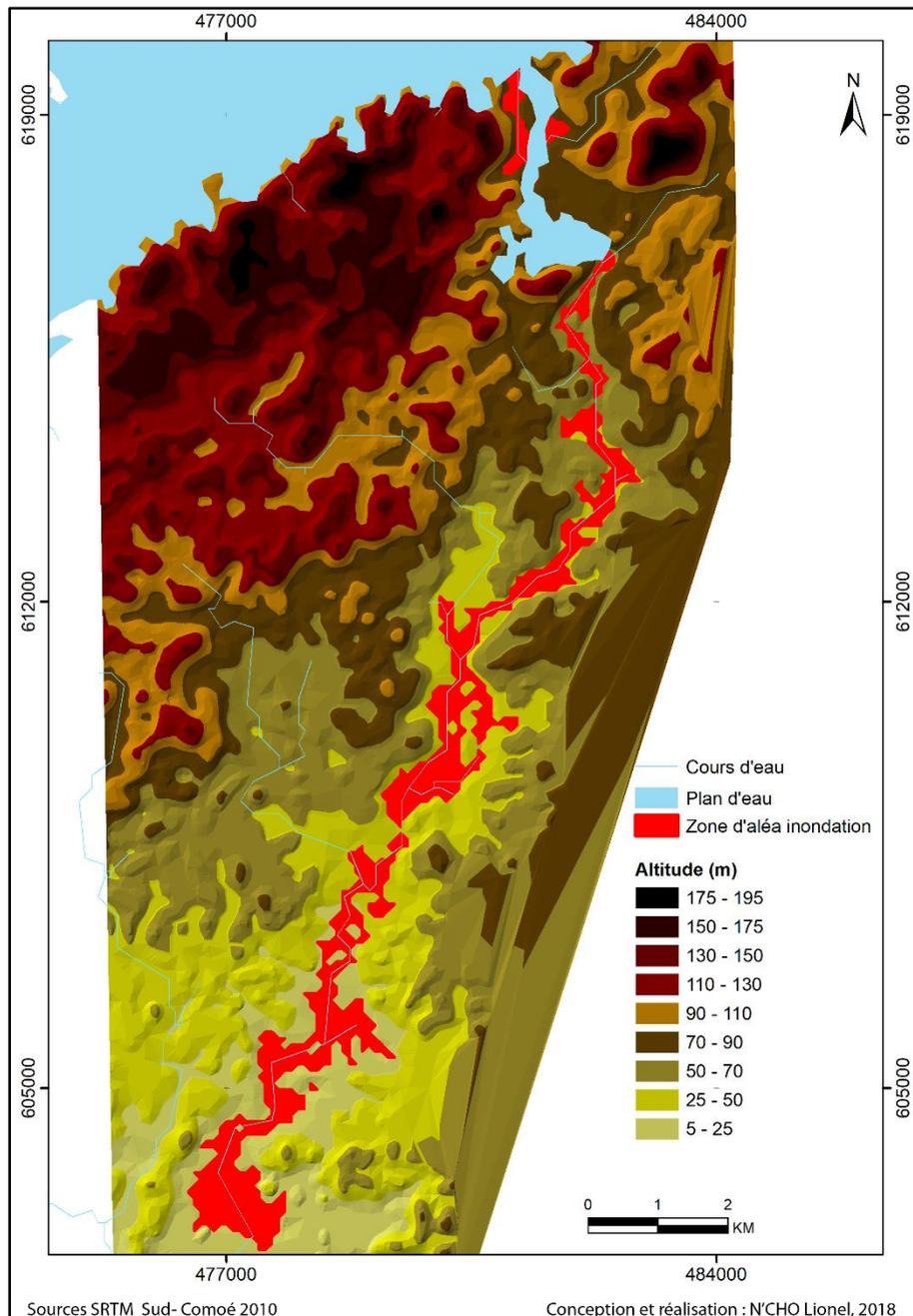


Figure 29 : Carte d'aléa inondation

Ainsi, la zone d'aléa inondation est orientée NNE-SSW, à partir du barrage d'Ayamé 1 jusqu'à l'exutoire du bassin à Aboisso. Elle présente des caractéristiques susceptibles d'aggraver le risque, puisqu'il s'agit ici des secteurs les plus bas (5 à 50 m d'élévation) dans le bassin en aval du lac d'Ayamé.

Le long de la vallée inondable, l'eau s'écoulerait jusqu'à la lagune. Mais par endroits, les pentes auraient une influence sur son étalement. Ainsi, plus on se rapprochera des pentes nulles, plus l'eau stagnerait davantage dans la zone.

5.1.2. Les enjeux et leur répartition

La carte d'occupation du sol dans le secteur aval des barrages présente un espace fait de localités rurales et urbaines au milieu de vastes terres agricoles (**figure 30**). On y trouve les cultures de café, de cacao, de palmier à huile, d'hévéa, de banane, etc. La forêt classée de Néguié, les forêts marécageuses sur les rives du fleuve et aussi les îlots forestiers sur son tracé témoignent de l'existence de nombreux enjeux environnementaux (physique et biologique) dans le bassin.

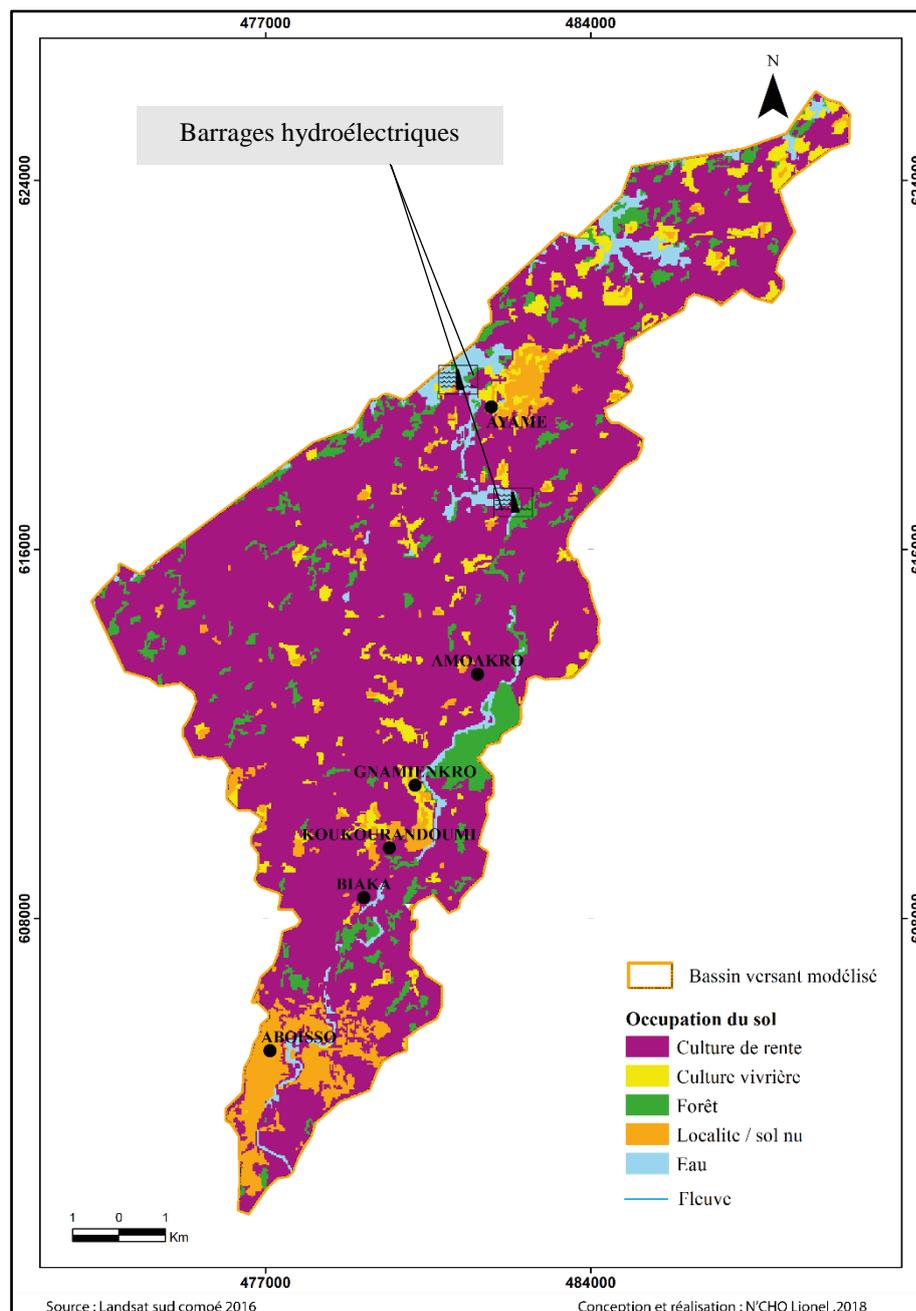


Figure 30 : Principaux enjeux dans la zone avale des barrages (situation en 2016)

On note aussi que la plupart des enjeux se trouvent dans la ville d'Aboisso où, en plus de la forte concentration humaine (63 332 habitants contre 10 239 pour les 5 autres localités dans le bassin modélisé, INS 2014), il y a plusieurs équipements, infrastructures et constructions.

5.1.3. La carte de la zone à risque d'inondation

Cette carte est obtenue à partir de la superposition de la couche de la zone l'aléa inondation à la couche des enjeux.

Dans un SIG, la carte d'occupation du sol du secteur aval des barrages est insérée. Sur cette donnée, on ajoute la zone d'aléa inondation préalablement délimitée à partir du SRTM. La combinaison de ces deux couches de données permet d'avoir une couche unique correspondant à la zone à risque d'inondation (**figure 31**).

Deux zones se distinguent dans la même vallée inondable, une zone couvrant les localités d'Ayamé, d'Amoakro et le nord de Gnamienkro où le niveau du risque est moins important pour les populations. Cette zone est caractérisée par le lac, les barrages et très peu de constructions. Les habitations à l'intérieur de la zone inondable sont celles des agents de la CIE en poste au barrage d'Ayamé 2 et quelques constructions à Gnamienkro. La deuxième zone est celle où le risque d'inondation a un niveau élevé pour les populations. Il s'agit du territoire entre Gnamienkro et le sud de la ville d'Aboisso. Cette zone fortement exposée concentre la majeure partie des constructions, notamment à Koukourandoumi, Biaka et Aboisso.

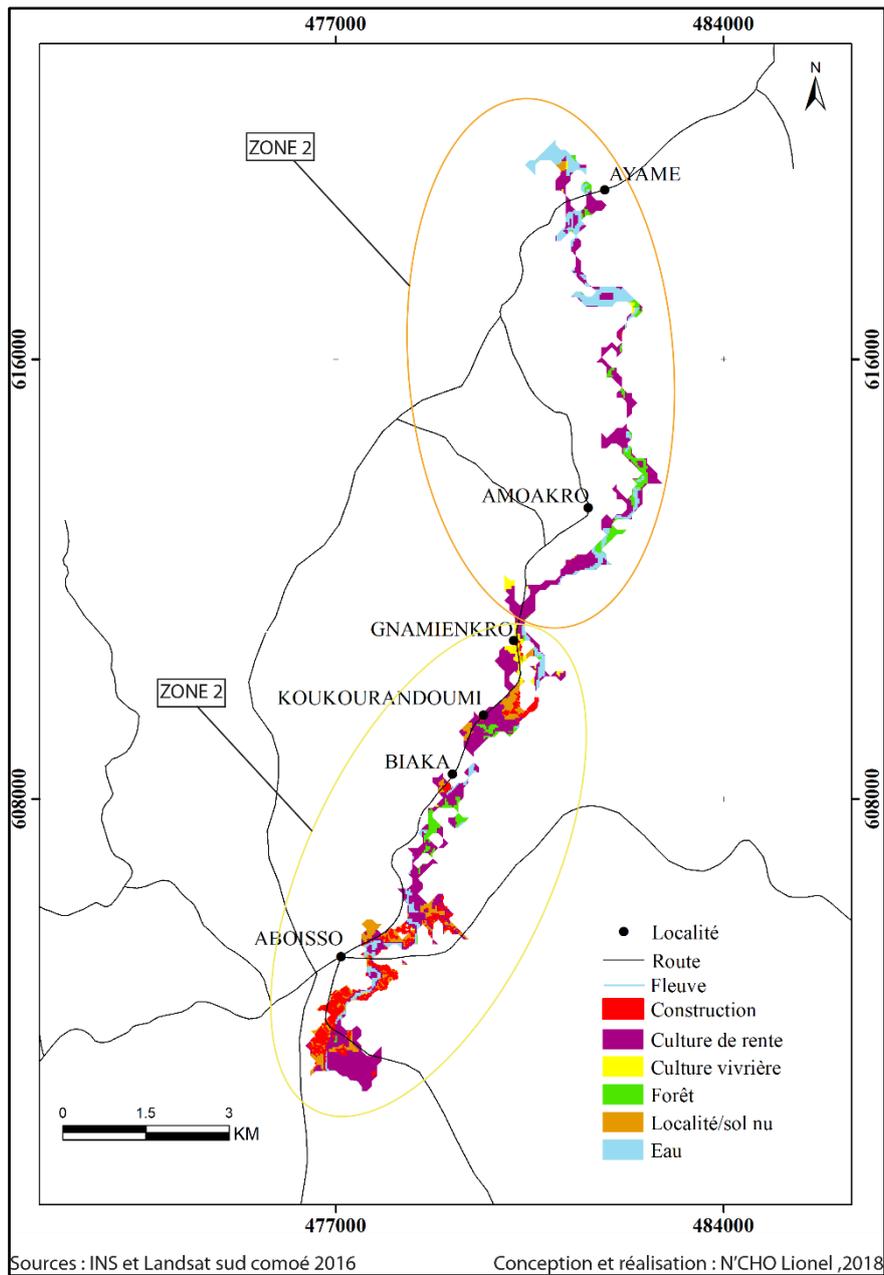


Figure 31 : La zone à risque d'inondation

5.2. LES CARACTERISTIQUES DE L'INONDATION APRES LA RUPTURE DES BARRAGES

5.2.1. Propagation de l'onde de submersion

La propagation de l'onde de submersion se fait entièrement dans la vallée traversée par le fleuve. Elle se heurte aux collines dans le couloir en les contournant et s'étale lorsqu'elle est dans les bas-fonds inondables (**figure 32**). Le réservoir se vide par la brèche du barrage

d'Ayamé 1, il s'en suit un écoulement orienté NNE – SSW qui impacte les milieux en aval (forêts, zones habitées, plantation, sols et les rivières connectées à la Bia qui débordent).

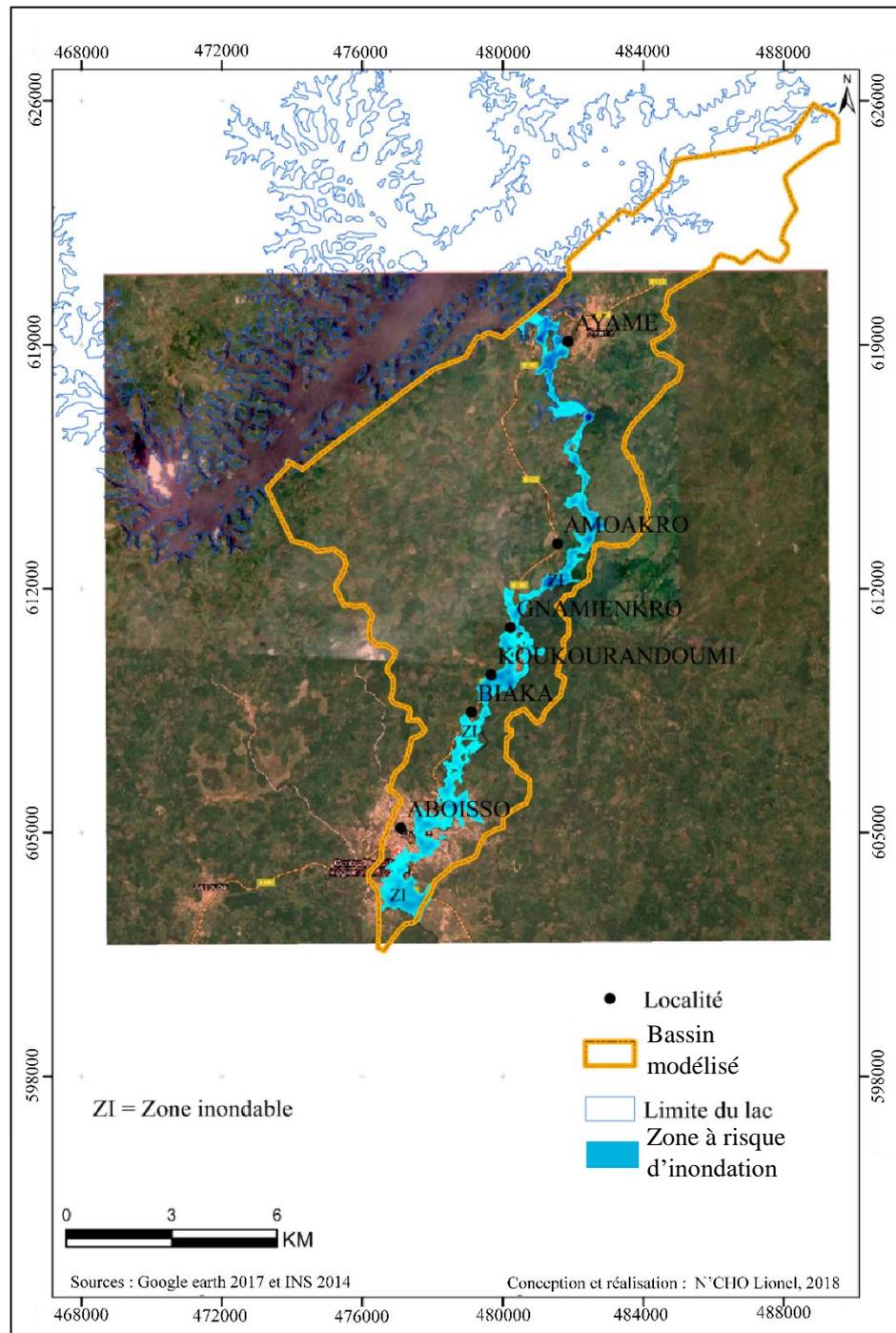


Figure 32 : Couloir de propagation de l'onde de rupture

Le site sur lequel est construite la ville d'Ayamé est suffisamment haut (70 -100 m) pour qu'Ayamé soit inondée. Toutefois, la ville peut être touchée dans ses extensions vers l'ouest où les hauteurs d'eau au sud-ouest peuvent atteindre 7,5 m. La zone résidentielle de

la CIE construite en hauteur (son point le plus bas est à 92 m d'Altitude) sera épargnée comme l'avaient pensé les ingénieurs constructeurs des barrages.

La propagation de la crue submerge toute l'usine et sa zone immédiate (entrepôts, bureau, jardin, etc.) et 90 % du pont d'Ayamé (**figure 33**).

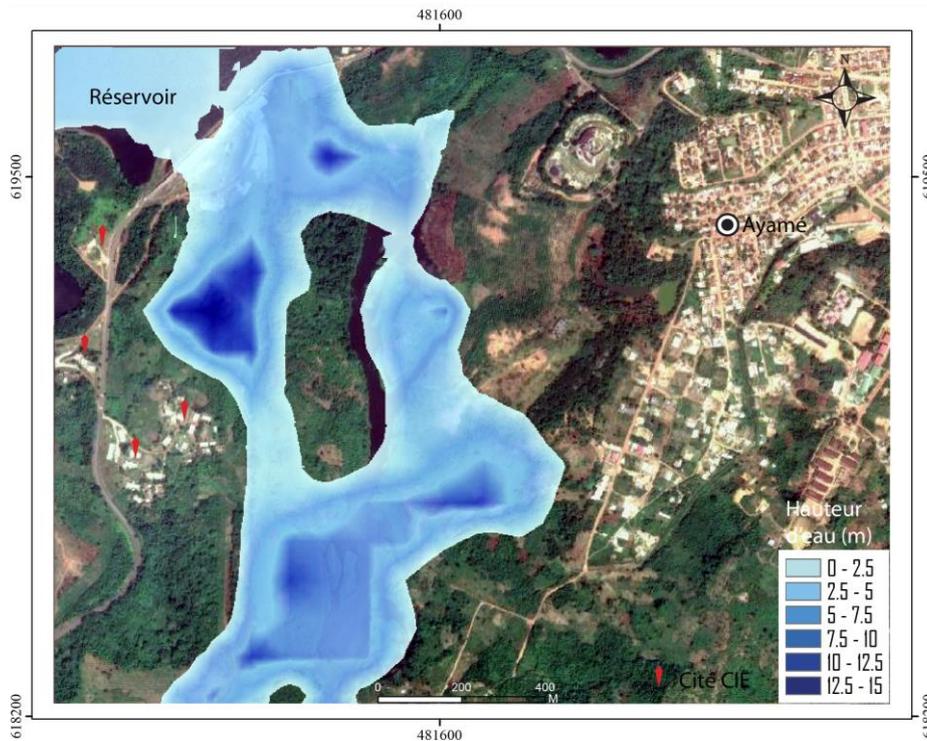


Figure 33 : La répartition de la hauteur d'eau dans la zone inondable au niveau du barrage d'Ayamé 1

Après la zone où la catastrophe s'est produite, les hauteurs de submersion diminuent progressivement (10 à 0 m) jusqu'au deuxième barrage. Une fois Ayamé 2 traversé par la crue, les parapets sur la rive gauche juste en aval du barrage font remonter les hauteurs de submersion qui ne tardent pas à atteindre un pic de 15 m.

L'absence de localités entre les deux barrages à part les cités des agents de la CIE qui travaillent sur les deux barrages indique que le risque d'inondation est pratiquement nul sur ce parcours, où seule la cité sud d'Ayamé 2 est en effet exposée à la submersion.

Aussi, la côte du barrage d'Ayamé 2 étant inférieure à celle d'Ayamé 1, Ayamé 2 est totalement inondée (**figure 34**), comme lors de la rupture des barrages de Stava (nord de l'Italie) en 1985, où la rupture du premier barrage a fait céder le deuxième.

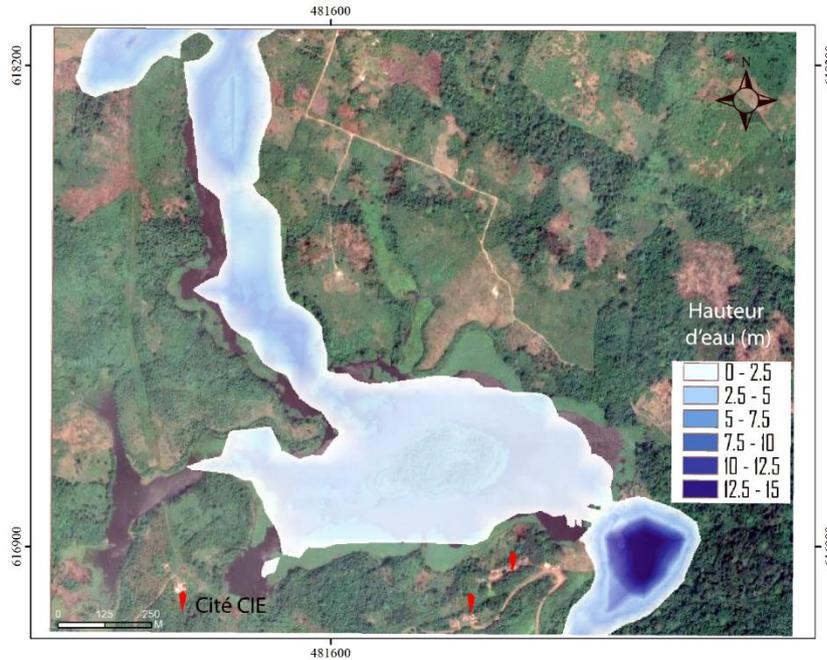


Figure 34 : Répartition de la hauteur d'eau dans la zone inondable entre les deux barrages

Le sud de la cité d'Ayamé 2 est pris par l'eau qui atteint 7,5 m de hauteur (**figure 35**). Une fois la paroi de la rive gauche au niveau du barrage franchie, les hauteurs de submersion diminuent. Elles restent constantes entre 0 et 10 m en allant vers le village d'Amoakro.

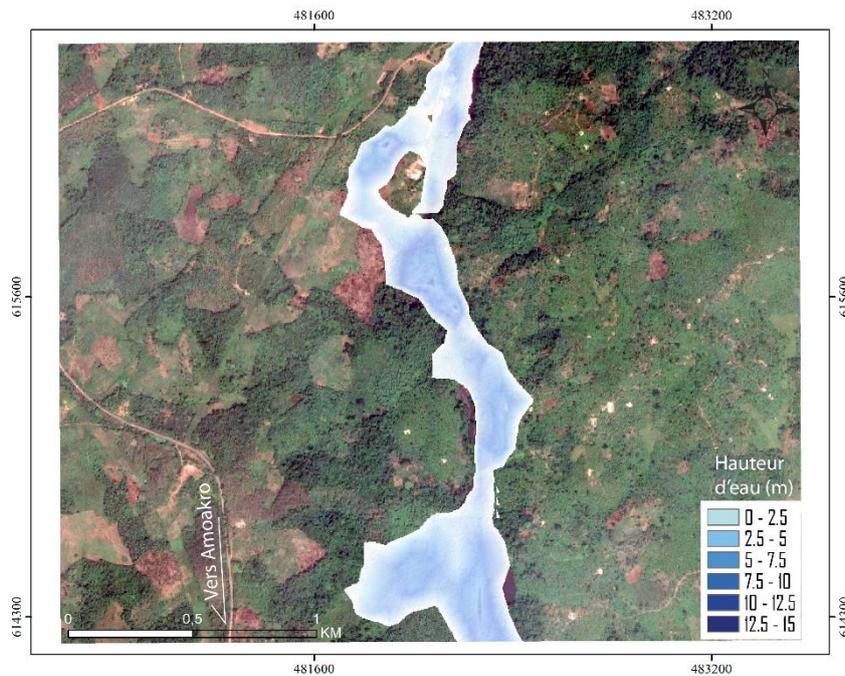


Figure 35 : Répartition de la hauteur d'eau dans la zone inondable à 800 m d'Amoakro

Au niveau d'Amoakro (**figure 36**), les hauteurs font un pic trois fois de suite. Ici, les hauteurs de submersion sont plus élevées (on atteint 15 m de haut) que sur le parcours précédent (limité à 7,5 m de haut). Le village est heureusement construit à bonne hauteur et distance du fleuve, ce qui épargne les populations de toute inondation liée à la rupture des barrages d'Ayamé.

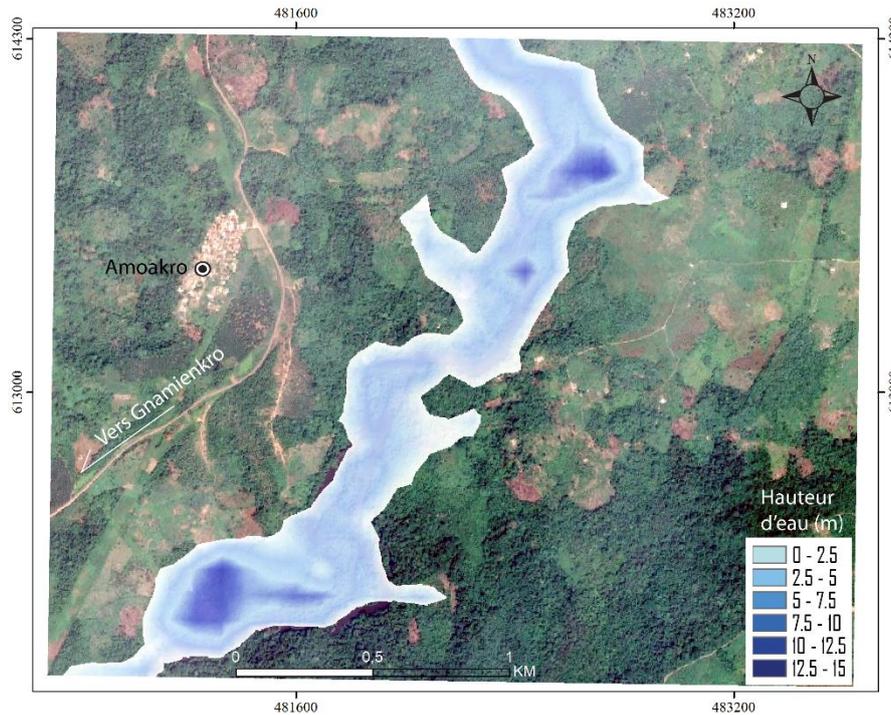


Figure 36 : Répartition de la hauteur d'eau dans la zone inondable d'Amoakro à 750 m de Gnamienkro

Si jusqu'ici les localités et infrastructures outre les barrages ont été épargnées, à partir du présent parcours, le risque devient énorme. Plus haut, la submersion a gagné les plantations et forêts sur les deux rives, pris les deux barrages et une partie de la cité d'Ayamé 2.

Après Amoakro, aucun village en direction d'Aboisso n'est épargné par l'inondation. Contrairement à Gnamienkro et Koukourandoumi partiellement inondés, Biaka plus au sud est entièrement sous les eaux.

Sur ce parcours, la voie principale qui mène à Aboisso est coupée par l'eau à hauteur de 7,5 m. Les hauteurs de submersion dépassent rarement ce niveau pour atteindre 10 m

(**figure 37**). Par ailleurs elles gardent ces niveaux jusqu'à l'exutoire du bassin au sud d'Aboisso.

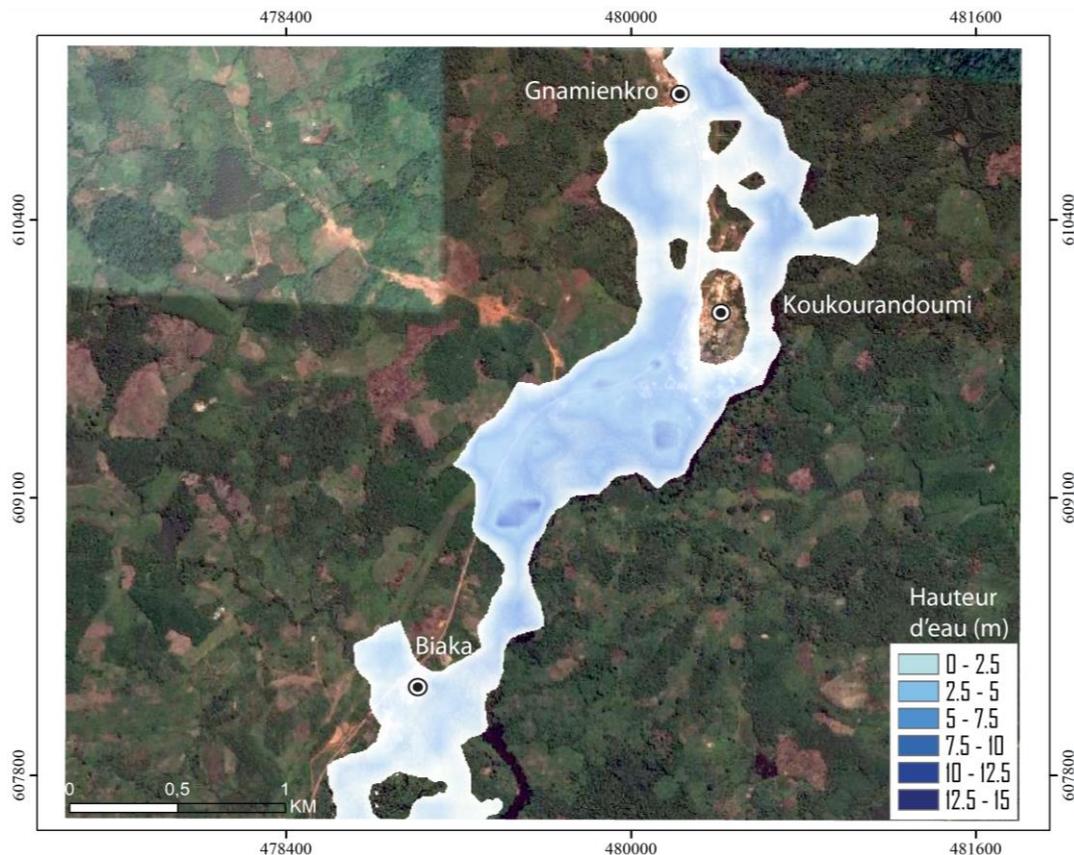


Figure 37 : Répartition de la hauteur d'eau dans la zone inondable de Gnamienkro à Biaka

Le niveau d'enjeu accentuant le niveau du risque, le chef-lieu de département qui concentre le plus d'enjeux est sérieusement touché par la catastrophe qui s'est produite à une vingtaine de km plus haut.

L'inondation du périmètre du lycée moderne au nord de la ville (**figure 38**) annonce le désastre à Aboisso. En effet, cette zone comprend le plus grand lycée de la ville, où sont logés à proximité des fonctionnaires (personnel de l'administration, enseignants) et des élèves.

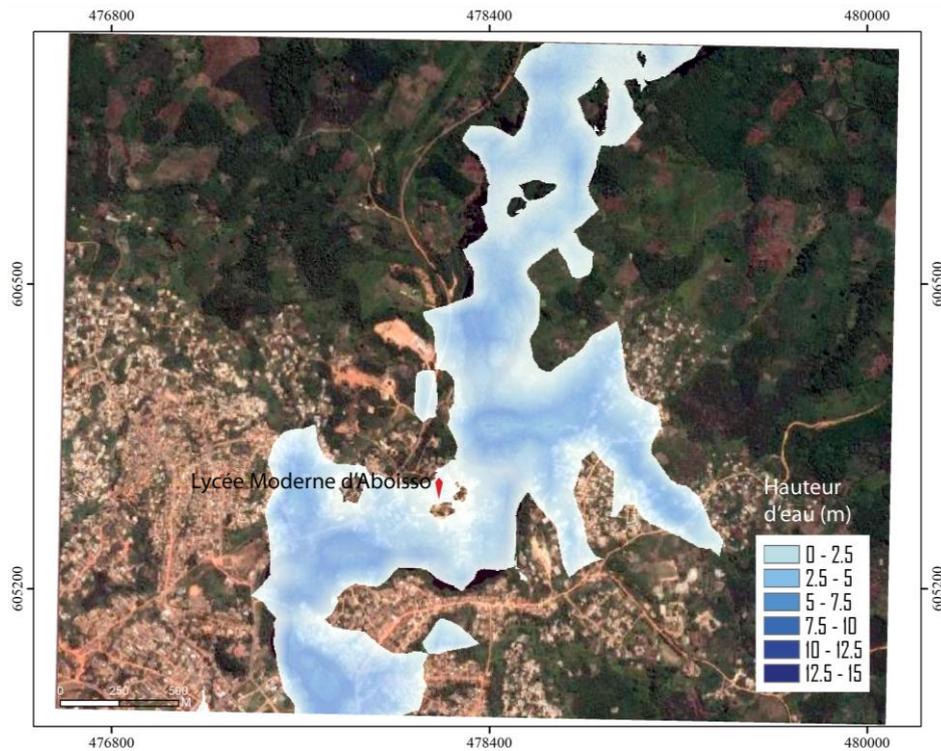


Figure 38 : Répartition de la hauteur d'eau dans la zone nord de la ville d'Aboisso

En outre, la gare routière au centre-ville et la sous-préfecture au sud (**figure 39**), témoignent de l'ampleur d'une catastrophe qui toucherait toute la ville.

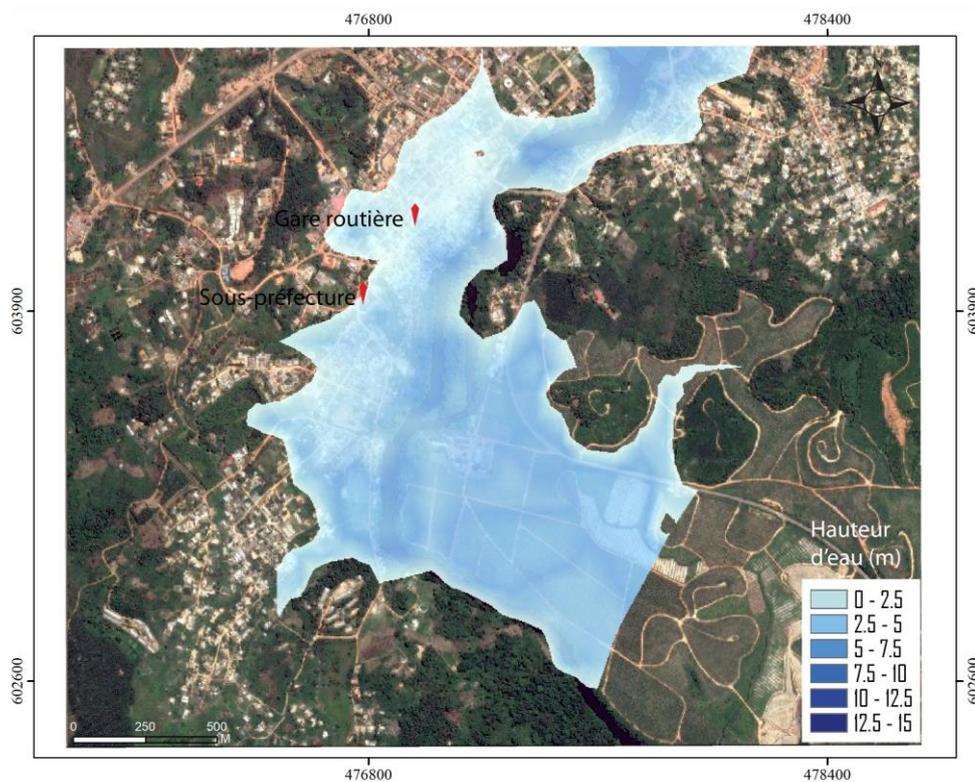


Figure 39 : Répartition de la hauteur d'eau dans la zone sud de la ville d'Aboisso

Le centre et le sud de la ville sont les zones les plus touchées. La catastrophe, en plus de scinder la ville en deux comme en septembre 1969, coupe la Côte d'Ivoire du Ghana voisin par voie terrestre au niveau d'Aboisso.

5.2.2. Temps d'arrivée de l'onde de rupture

Parmi les critères de définition de l'ensemble des mesures d'alerte et d'évacuation visant à réduire les conséquences de la catastrophe en aval des barrages, les temps de propagation de l'onde de rupture sont d'une grande importance.

La propagation présentée selon la simulation dure 12 mn. Dans le bassin, la vitesse moyenne de l'eau est de 0,55 m/s sur une distance de 21 600 m.

Il faut 1 mn 42 s pour que l'eau arrive au barrage d'Ayamé 2, après la rupture d'Ayamé 1.

Au barrage d'Ayamé 1 la forte vitesse de propagation s'explique par le fait que toute la retenue se fraie un chemin dans la brèche, puis elle diminue progressivement. Au niveau de la cité CIE, le couloir étant étroit, la vitesse de propagation augmente à nouveau jusqu'à 5 m/s, cette tendance est observée chaque fois que le couloir est étroit et la pente forte (**figure 40**).

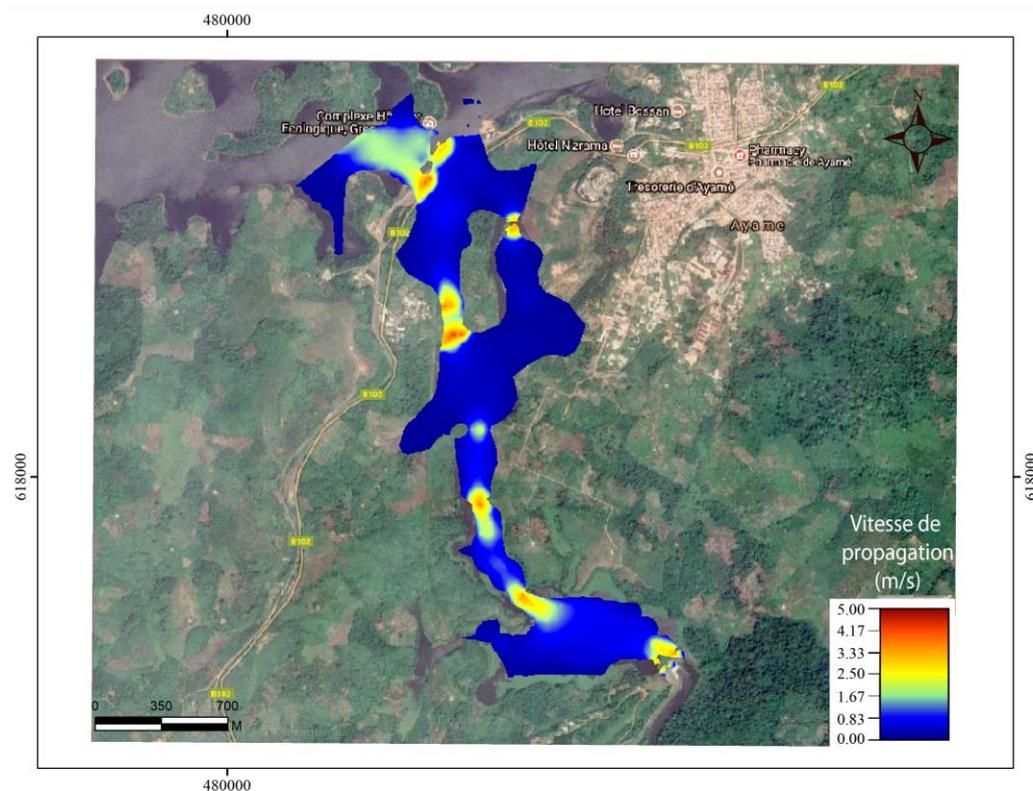


Figure 40 : Inondation prévue 1 mn 42 s après la rupture du barrage d'Ayamé 1

Au barrage d'Ayamé 2, les vitesses observées à Ayamé 1 sont répétées. Le réservoir d'Ayamé 2 est en effet débordé par l'eau qui arrive d'Ayamé 1, il force le passage au niveau du barrage, ce qui accélère la vitesse à ce stade (**figure 41**). Il faut 3 mn 10 s pour que la propagation arrive au niveau d'Amoakro à une vitesse de 5 m/s.

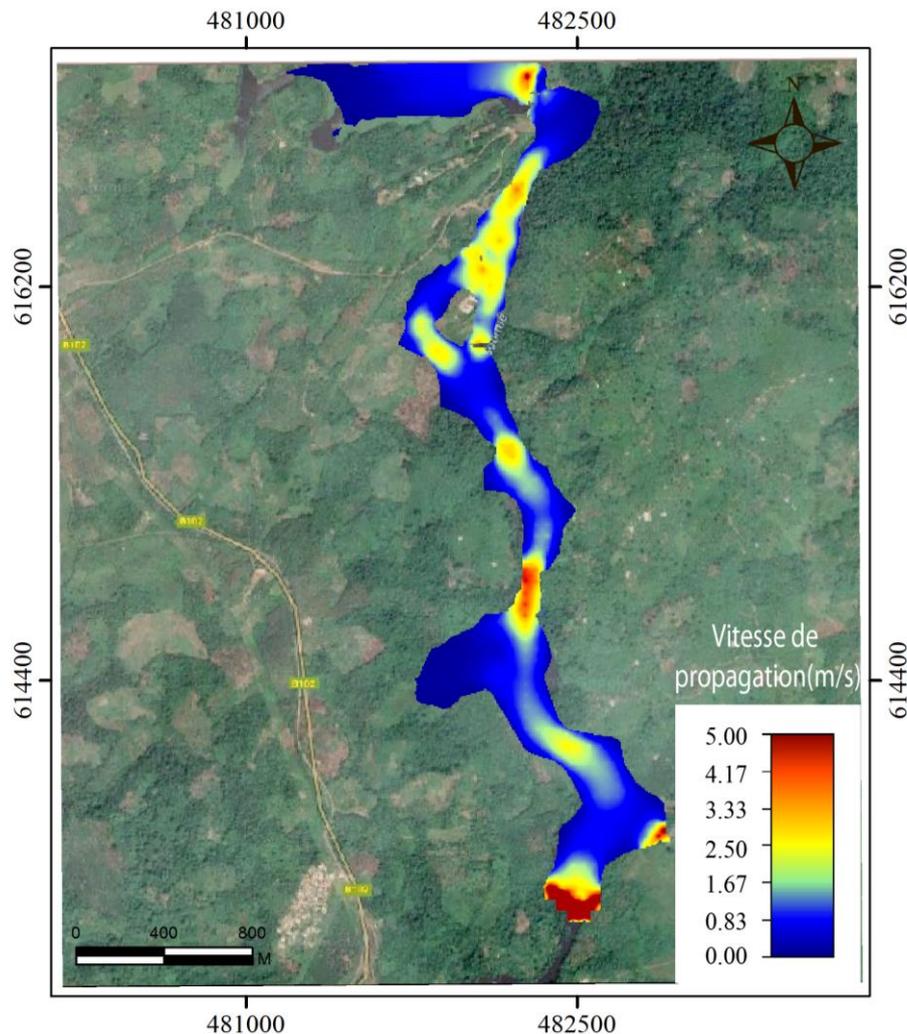


Figure 41 : Inondation prévue 3 mn 10 s après la rupture

Les villages de Gnamienkro, Koukourandoumi et Biaka sont inondés 7 mn 9 secondes après la rupture. Plus on s'éloigne des barrages, la propagation perd sa vitesse mais les dégâts matériels et pertes humaines commencent à être importants (**figure 42**).

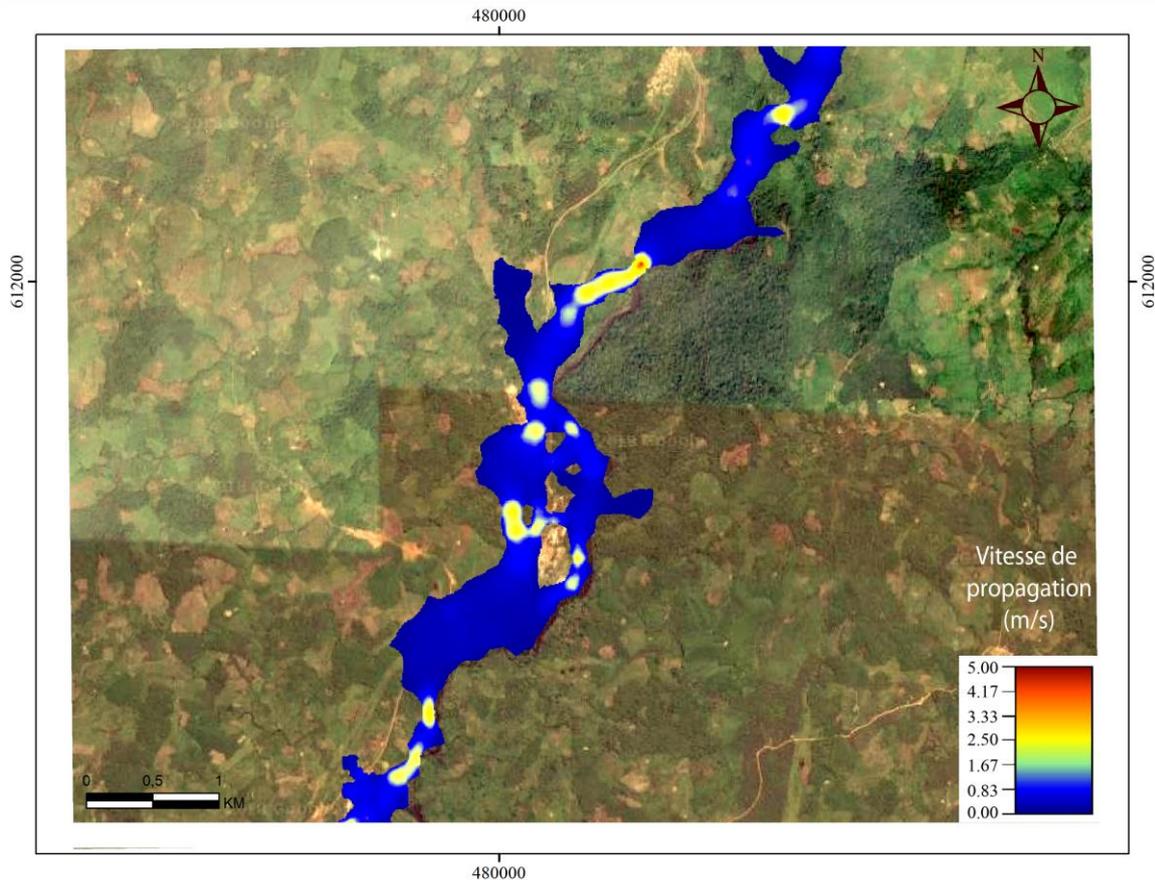


Figure 42 : Inondation prévue 7mn 9 s après la rupture

À Aboisso, la réduction de la vitesse de propagation est bien marquée. Il est difficile d'atteindre les 5 m/s dans la moitié nord de la ville (**figure 43**). En outre, le nord-est avec une inclinaison moins prononcée retient plus d'eau que le nord-ouest où la pente est plus élevée. Au centre de la ville, la vitesse nord est quasiment égale à la vitesse sud, en raison de l'élévation centrale qui force l'eau à faire un détour.

Par ailleurs, les quelques élévations rencontrées le long du fleuve sur les rives facilitent l'écoulement sur les versants concaves.

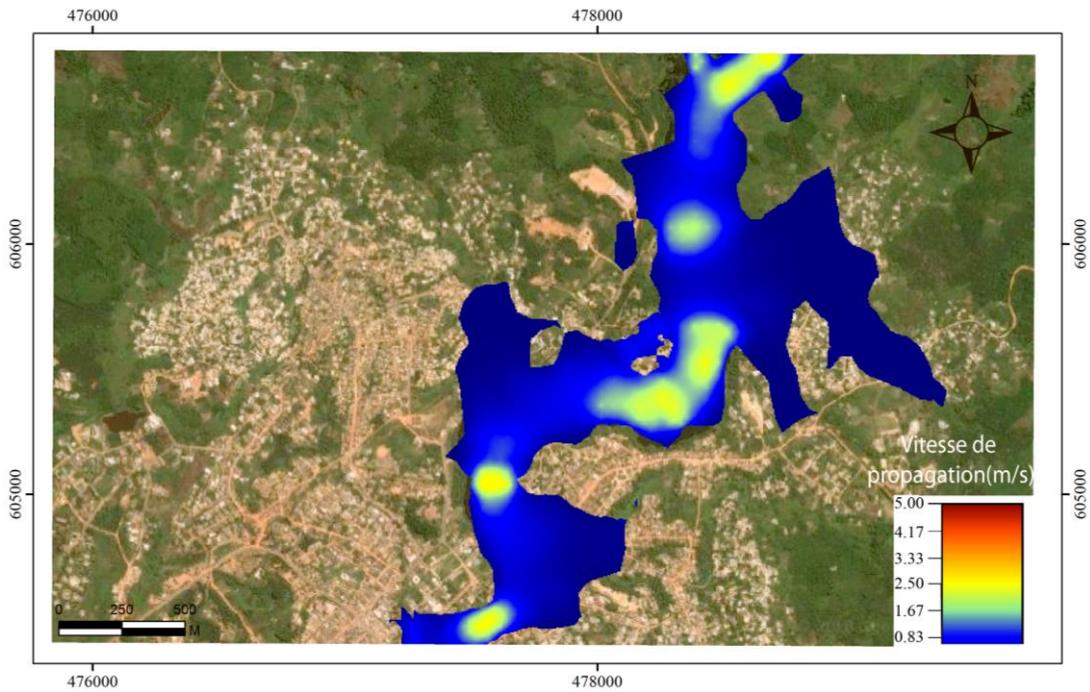


Figure 43 : Inondation prévue 9 mn 37 s après la rupture

À la sortie de la ville, la vitesse continue de baisser jusqu'à l'exutoire où elle devient nulle, comme à chaque fois que la propagation atteint les pentes les plus faibles de la zone inondable (**figure 44**).

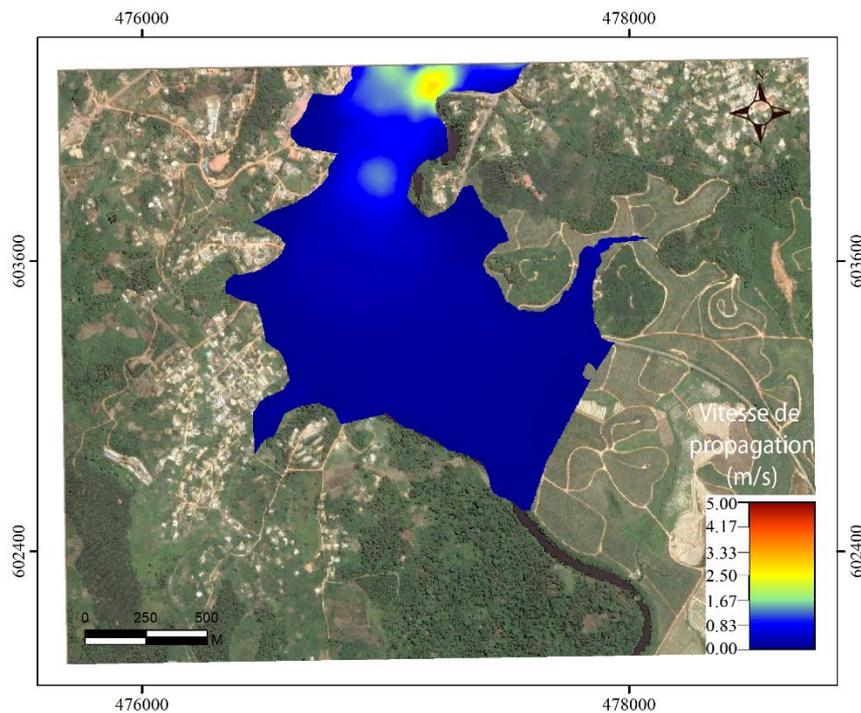


Figure 44 : Inondation prévue 12 mn 00 s après la rupture

5.2.3. Profil de l'inondation

L'inondation a une longueur de 21,6 km pour une vitesse moyenne de 0,55 m/s. À Ayamé (site des barrages), se trouvent les altitudes élevées (65 à 90 m) par rapport au reste du profil (**figure 45**). Puis en dessous du site d'Ayamé, soit 4,5 km après le premier barrage, c'est la zone de basses altitudes. Dans cette zone comprise entre 30 et 50 m se trouvent les villages d'Amoakro, de Gnamienkro, de Koukourandoumi et de Biaka.

En aval de la zone de basses altitudes, se trouve finalement le secteur d'Aboisso où les altitudes sont inférieures à 30 m.

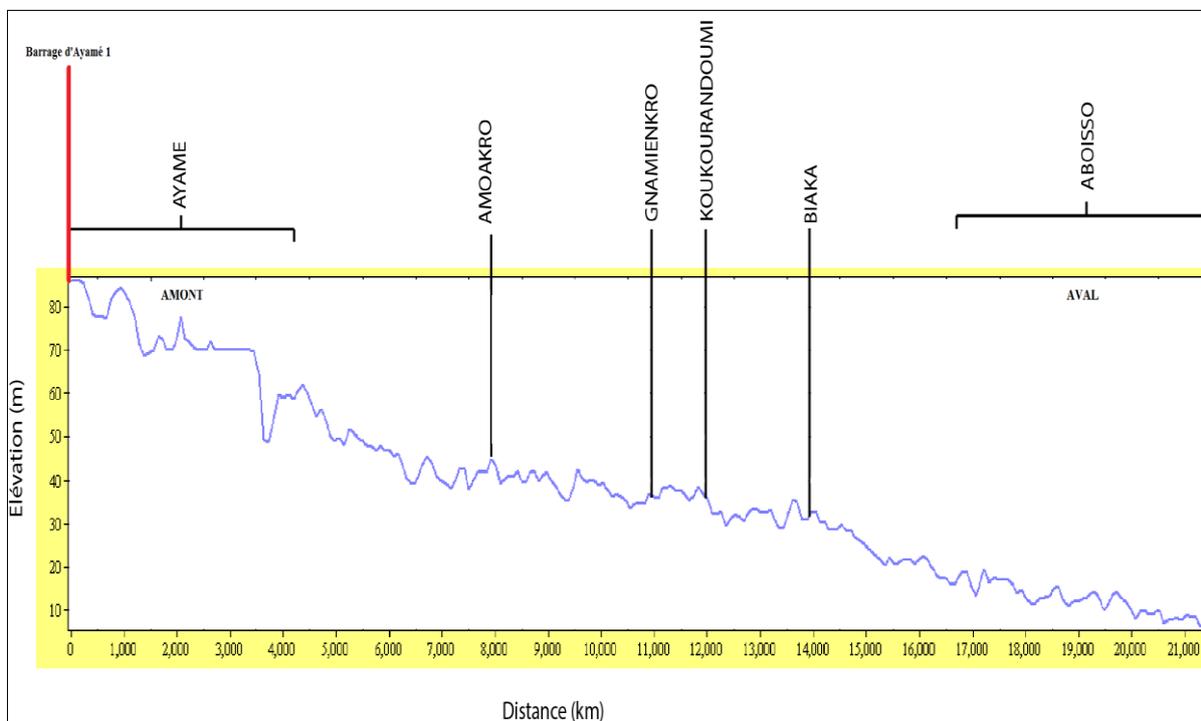


Figure 45 : Profil d'inondation

5.2.4 Le courant de l'inondation

Le courant très fort enregistré entre Ayamé et Amoakro s'explique par la manifestation de l'évènement sur le site des deux barrages. De plus, les pentes sont importantes dans cet espace. Cependant, l'affaiblissement du courant de l'inondation à Ayamé 2 est dû à l'obstacle qu'est le barrage lui-même, lorsqu'il reçoit l'eau d'Ayamé1 (**figure 46**). En outre, 3 mn après la rupture du barrage d'Ayamé 2, il y a un nouveau pic du

courant, puis après Amoakro, il devient stable jusqu'à Aboisso. Le courant de l'inondation ne s'annule pas après l'exutoire matérialisé physiquement, parce que l'embouchure avec la lagune Aby se trouve encore plus loin au sud de cet exutoire.

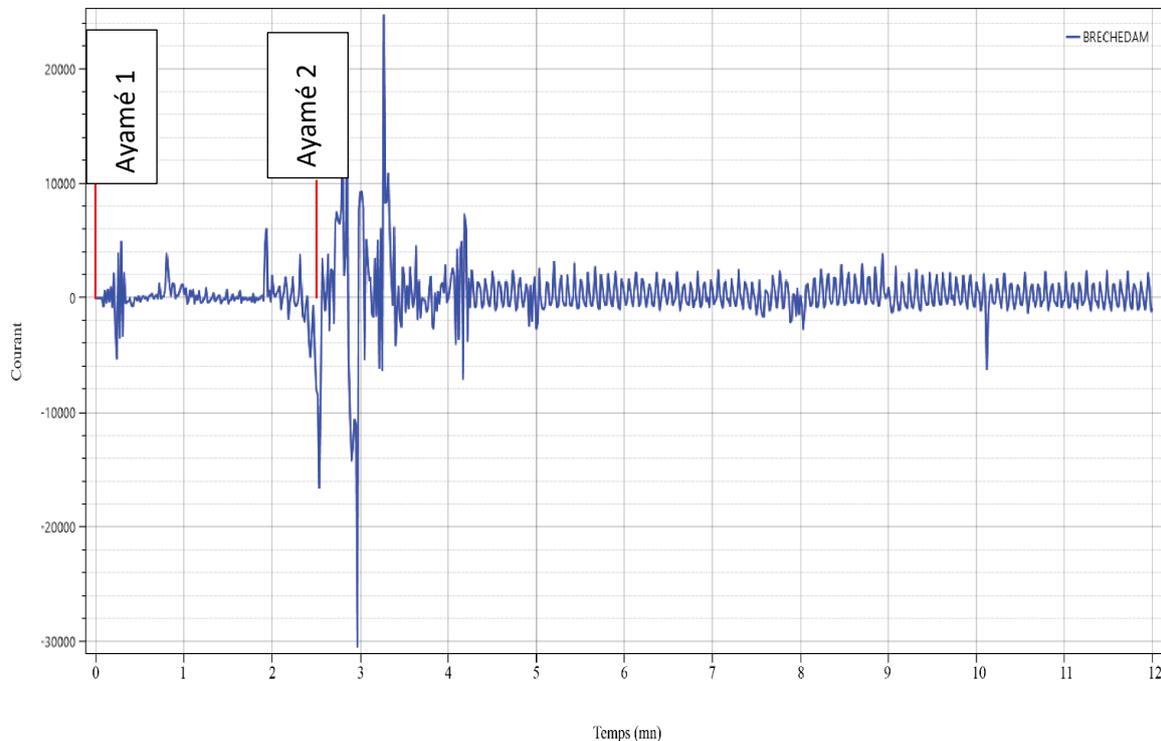


Figure 46 : Courant de l'inondation

5.2.5. Le volume d'eau de l'inondation

Dès la rupture du barrage d'Ayamé 1, le volume d'eau se fait ressentir en aval. Le volume d'eau augmente en seulement 2 mn, avant de chuter 3 mn plus tard au deuxième barrage où le volume d'eau arrivé d'Ayamé 1 est stoppé par les voutes du barrage d'Ayamé 2 (**figure 47**). Une fois de plus, le rôle d'obstacle à la propagation de l'onde de submersion que joue ce barrage est mis à l'épreuve. Mais le barrage d'Ayamé 2 ayant une côte inférieure à celui d'Ayamé 1 (*cf* **tableau 8, page 110** et **tableau 9, page 112**), il est tout de suite débordé par l'eau.

Ainsi, 3 mn après le volume de submersion entame un pic et ne s'arrête plus jusqu'à l'exutoire à Aboisso. En cas de rupture des barrages d'Ayamé 1 et 2, le volume d'eau qui s'écoule en 12 mn atteint 12 000 000 m³.

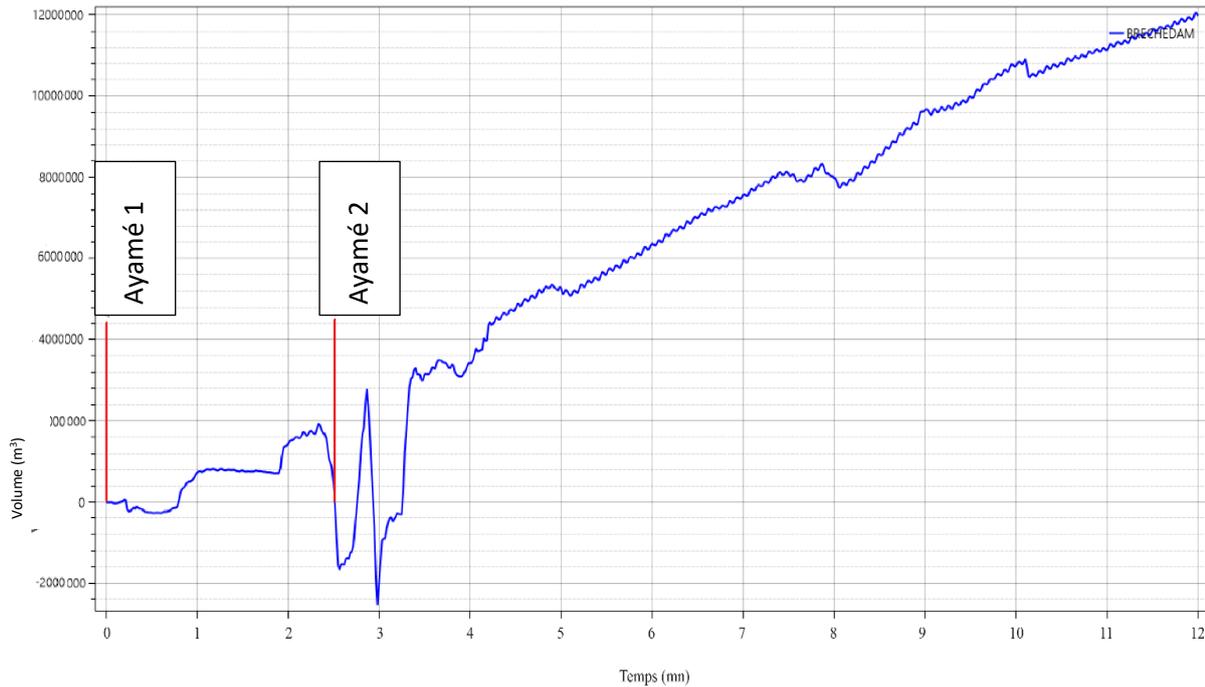


Figure 47 : Volume d'eau écoulée

L'onde de submersion sur le tronçon étudié est influencée par les versants et le barrage d'Ayamé 2 en dessous duquel plus rien n'arrête l'écoulement jusqu'à la lagune Aby.

Les niveaux d'eau sont assez élevés pour ensevelir certains endroits. Bien que le village d'Amoakro soit totalement épargné par l'onde de submersion, les cultures dans le lit du fleuve ne le sont pas. Par ailleurs, la ville d'Ayamé au sommet sur la rive gauche du fleuve ne devrait pas s'étendre vers le sud, comme c'est malheureusement le cas aujourd'hui.

Somme toute, les pertes sont énormes et diversement réparties en fonction des localités. Certes, Aboisso enregistre les plus grandes pertes, mais la ville peut encore compter sur de vastes étendues sèches où l'on peut mettre les sinistrés à l'abri. En revanche dans les villages comme Biaka et Gnamienkro, la situation est plus critique, les villages sont à plus de 80% ensevelis par l'onde de submersion.

Avant, pendant et après la catastrophe, il faudrait alerter, donner des consignes de sécurité, secourir, puis évaluer toutes les pertes causées par la rupture des barrages.

Ainsi, une analyse pré et post catastrophe est menée avant d'aborder le cadre de la gestion de l'inondation liée aux barrages dans le département d'Aboisso.

5.3. LES DOMMAGES POTENTIELS DES INONDATIONS LIEES A UNE RUPTURE DES BARRAGES

5.3.1. Situation générale

5.3.1.1. Situation pré-catastrophe

Dans la vallée, les activités (pêche, agriculture, commerce, etc.) se déroulent sans encombre et même en cas de débordement constaté, les populations, et les autorités départementales peuvent facilement contenir les inondations causées par les lâchers d'eau. Il y a bien évidemment des pertes économiques enregistrées, la destruction de biens et des pertes de vies humaines.

Les impacts de ces inondations sont importants et permettent de se projeter sur une catastrophe de grande ampleur.

Ainsi, avant la rupture, l'aval de la retenue d'Ayamé 1 est intact, le couloir inondable est identique aux situations précédentes (niveau d'eau bas, crue normale si forte précipitation ou déversement effectué). Les barrages 1 et 2 régulent les apports d'eau qu'ils enregistrent, l'eau qui passe dans les conduites forcées et les vannes a un débit contrôlé.

En cas de rupture, c'est toute la zone à risque déterminée (**figure 32, page 139**) qui sera touchée. Ainsi, l'onde de submersion va envahir toutes les formes d'occupation du sol du couloir inondé.

5.3.1.2. Situation pendant la catastrophe

Pendant la catastrophe, la situation est bien plus différente dans le bassin. L'eau qui arrive d'Ayamé 1 ne peut être contenue par les voutes d'Ayamé 2. Lorsque le deuxième barrage cède, l'inondation gagne en puissance, car l'eau est deux fois plus chargée des débris des barrages qui viennent de céder. Des localités en aval des deux barrages, seule Amoakro est épargnée par l'onde de submersion. L'eau stagne plus entre Gnamienkro et Koukourandoumi. La vitesse d'écoulement de l'onde entre Biaka et le nord de la ville d'Aboisso est le fait des rapides qu'il y a dans cette zone (ici devrait être construit le troisième barrage sur la Bia).

Aboisso est la localité la plus impactée à cause des enjeux en présence, mais aussi en raison de sa situation en aval des cinq autres localités dans le bassin modèle (**Figure 48**).

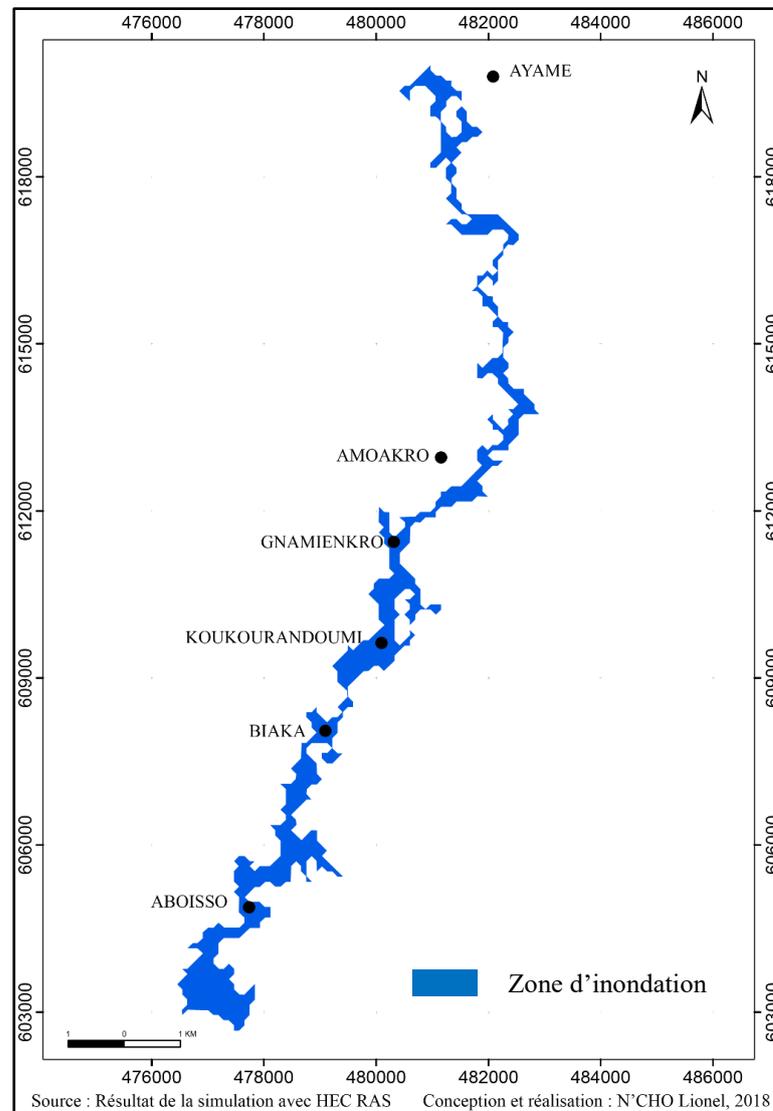


Figure 48 : Carte de la catastrophe inondation après la rupture des barrages

Dans la zone d'inondation, si une catastrophe était survenue en 2016, ce sont plus de 359 hectares de plantations de café, de cacao, de palmier à huile, d'hévéa et de banane douce qui auraient été inondées. A Aboisso, la plantation de banane au sud de la ville aurait été fortement touchée.

53 hectares de forêt seraient inondés et on aurait enregistré plus de 61 hectares de perte de culture vivrière. Finalement ce sont 125 hectares de zones d'habitations qui se seraient trouvés sous l'eau (**tableau 13**).

Tableau 13 : Superficies inondées (situation en 2016)

Type d'occupation du sol	Forêt	Culture de rente	Culture vivrière	Localité et sol nu
		Palmier, hévéa, café, cacao, banane douce	Banane plantain, riz, manioc,	
Superficie (ha)	53	359	61	125

Contrairement aux inondations habituelles que connaissent les populations en aval de la retenue, celle due à la rupture des barrages ne pourra nullement être contrôlée par l'exploitant.

Ainsi, dans le couloir inondable, toutes les formes d'occupation du sol constituant les enjeux socio-économiques et environnementaux seront touchés par toute inondation liée à une rupture des barrages d'Ayamé 1 et 2.

A l'échelle du département, l'onde de submersion qui part d'Ayamé 1 ne s'arrête qu'à l'exutoire de la Bia (Lagune Aby) où se situent Allié kro et des campements de pêcheurs. L'onde traverse les secteurs de Krindjabo, Ehouessèbo, Ebakro avant de se jeter dans la lagune.

Même si la vie des populations et leurs biens matériels dans certaines localités en aval d'Aboisso ne sont pas menacés, comme c'est le cas à Krindjabo, les plantations dans ces villages sont bien exposées au risque. Le retour d'expérience de la catastrophe de juillet 2018 rappelle les pertes de récoltes et les grandes superficies agricoles inondées en si peu de temps.

Toutefois, le niveau de l'impact diffère en fonction des enjeux et la ville d'Aboisso vient en première position, avec un impact plus important que toutes les autres localités dans le couloir inondée, après la rupture des barrages (**figure 49**).

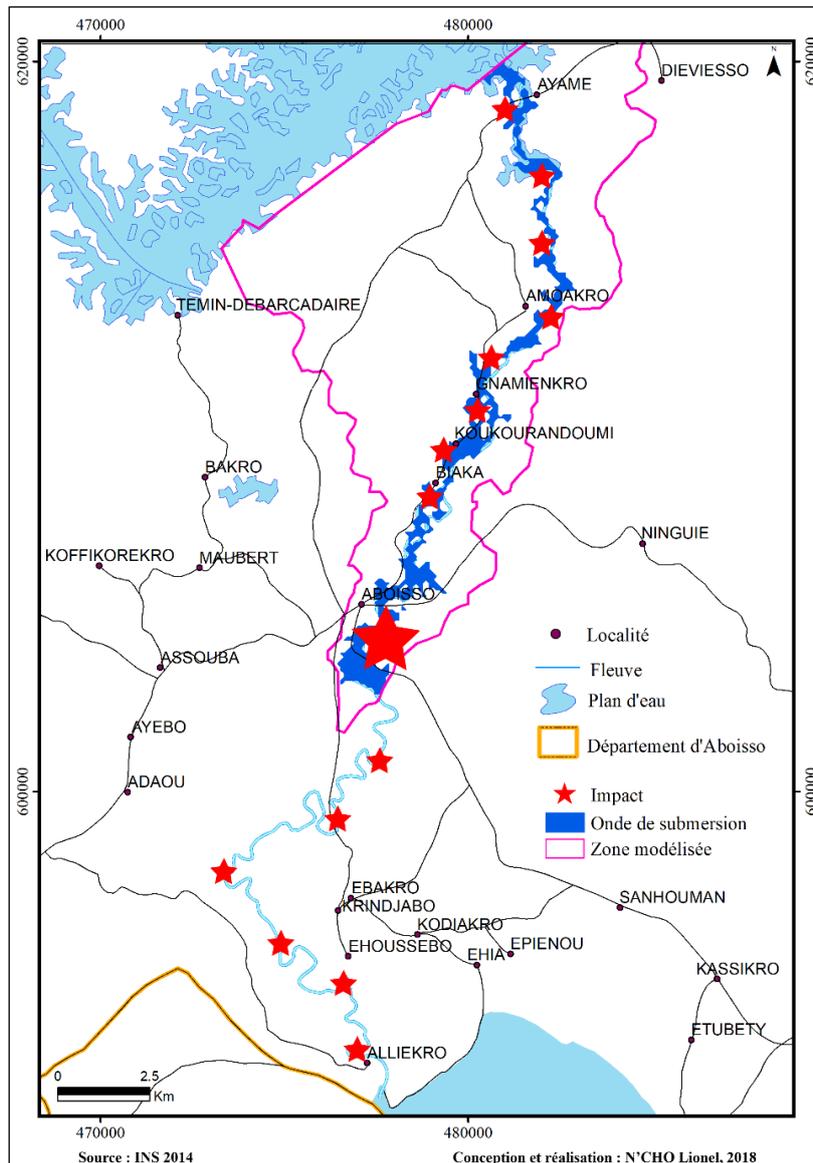


Figure 49 : Plan d'impact dans le département d'Aboisso

Aboisso au centre du parcours de la Bia entre Ayamé et l'exutoire du fleuve reçoit, sur son site densément peuplé et construit dans le couloir, l'eau et les débris du nord causant d'importants dégâts dans la ville.

En dehors de la ville chef-lieu de département, les autres localités subissent les effets de la catastrophe différemment, en fonction de leur exposition et de leur vulnérabilité à l'onde de submersion. Allié Kro totalement en aval subit au moins un effet double de la catastrophe, l'arrivée de l'onde de submersion et l'augmentation du niveau de la lagune Aby. La catastrophe se produisant en période de pluies importantes, Allié Kro pourrait

malheureusement être enseveli par cinq sources d'eau (la rivière soumié, la pluie, la lagune Aby, l'onde de submersion et la Bia).

5.3.2. Situation de l'inondation et état de la catastrophe dans la ville d'Aboisso

Avec une population estimée à 63 332 habitants, la ville d'Aboisso est sur un site de plaine intérieure où les altitudes les plus hautes sont à 75 m. La Bia dans son écoulement sinueux coupe la ville en deux rives sur un parcours de près de 7 km dans une vallée en auge. L'existence d'ouvrages de franchissement permet de relier les deux rives du fleuve qui se distinguent nettement par leur occupation. Alors que la rive droite concentre la majeure partie des constructions, infrastructures, équipement et services de la ville, la rive gauche est marquée par son espace culturel fait de palmier à huile, de banane, d'hévéa, etc.

La rupture des barrages d'Ayamé cause des pertes humaines pour les personnes situées en zone à risque et restées chez elles pendant la montée des eaux. Des maisons sont en partie ou totalement détruites. Les secteurs Sud et Est du lycée moderne ainsi que l'école TP au sud sont fortement inondés. Aussi, la destruction des bâtiments et autres biens mobiliers entraîne un fonctionnement difficile des services publics (préfecture, conseil régional, SODECI, etc.) dont les bureaux se trouvent près du fleuve.

Les secteurs préfecture, commerce, conseil régional, koliahiwa et lycée, TP sur la rive droite, quatre palmiers sur la rive gauche, touchés en juillet 2018, mais aussi le secteur lycée sont des zones à éviter dès l'alerte ; il s'agit ici des zones à proximité ou dans le lit majeur du fleuve. Par conséquent, l'étalement de l'onde de submersion dans la ville se fait d'abord dans ces endroits déjà touchés pendant les trois inondations majeures qui se sont manifestées à Aboisso. Par ailleurs, les îlots forestiers sur le fleuve sont détruits par l'eau et les débris charriés.

Certes, les populations ont souvent vu leurs sites inondés par la Bia, mais les dégâts causés par une onde de rupture de barrages seront plus importants que les pertes observées en 1969, 1975 et 2018.

Une analyse de la simulation de rupture des barrages qui est une étude préventive et une situation déjà vécue en 2018 montre la différence entre un déversement calculé par l'exploitant et un écoulement aucunement maîtrisé. La zone inondée après la rupture des

barrages est nettement plus importante et l'écoulement se fait en épousant les traces du déversement de 2018 (**figure 50**), qui lui-même est dépendant du tracé du fleuve. Il s'agit là de signaux à prendre en compte dans la politique d'aménagement de la ville, et donc de penser à une relocalisation des populations déjà installées dans le couloir inondée.

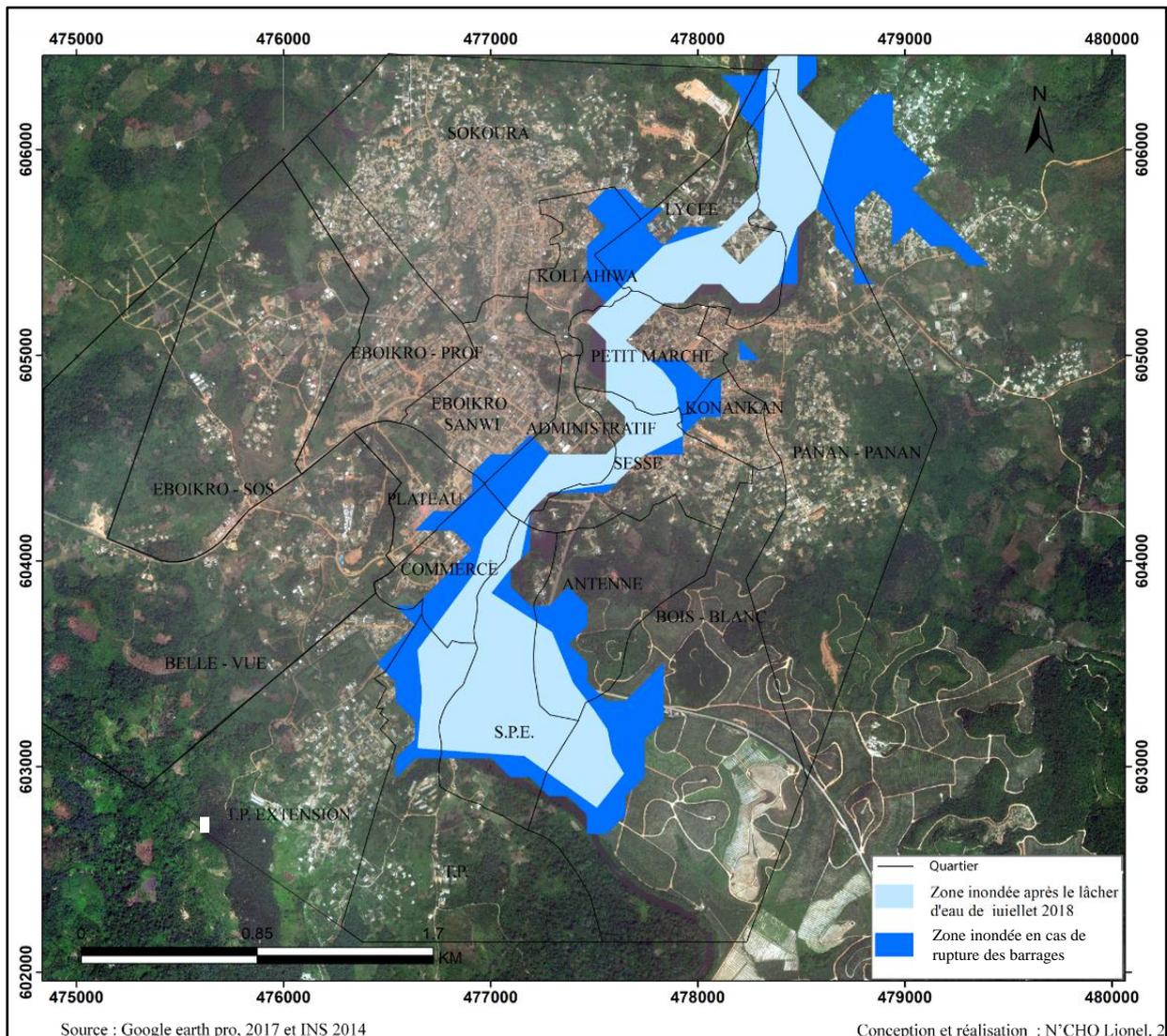


Figure 50 : Comparaison entre la zone inondée en juillet 2018 et zone inondée en cas de rupture des barrages

Sur 7 021 constructions dénombrées dans la ville en 2017, 2 390 sont immédiatement inondées après la rupture, soit 34,04 % des constructions d'Aboisso (**figure 51**), parmi lesquelles l'on trouve des habitations, des lieux de culte, des établissements scolaires, des commerces, des banques, etc. En outre, Les pertes agricoles ne sont pas négligeables. La plantation industrielle de banane au sud de la ville perd sur le coup 40,39 ha de surface agricole.

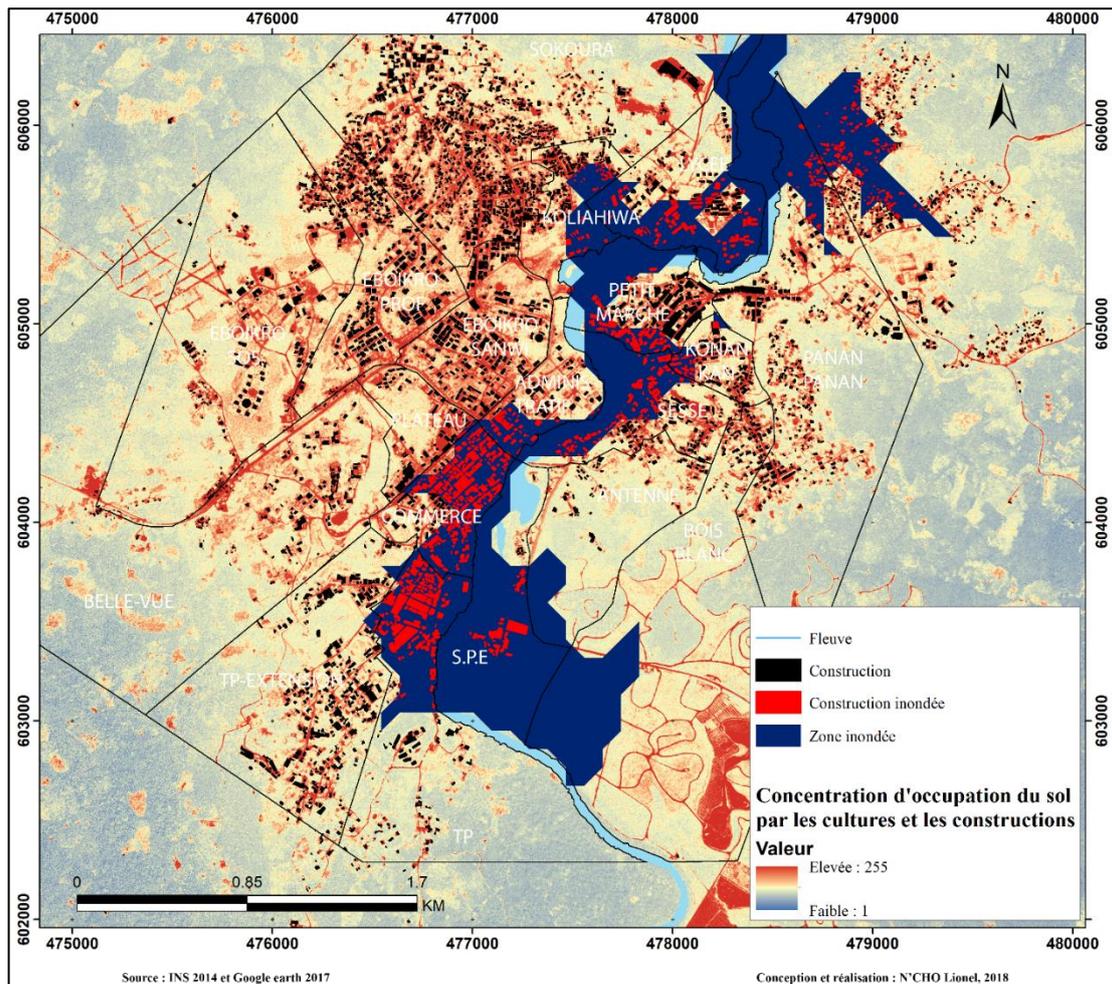


Figure 51 : Constructions inondées à Aboisso en cas de rupture de barrage

Comme dans toutes catastrophes impliquant l'eau, le relief joue un rôle important pour apprécier le niveau des eaux. À Aboisso, on trouve des zones en dessous de la hauteur maximale de l'onde de submersion (15 m). Autour de ces milieux, les collines empêchent l'onde de se propager dans toute la ville (**figure 52**), épargnant les zones au-delà de 35 m de haut de la montée des eaux

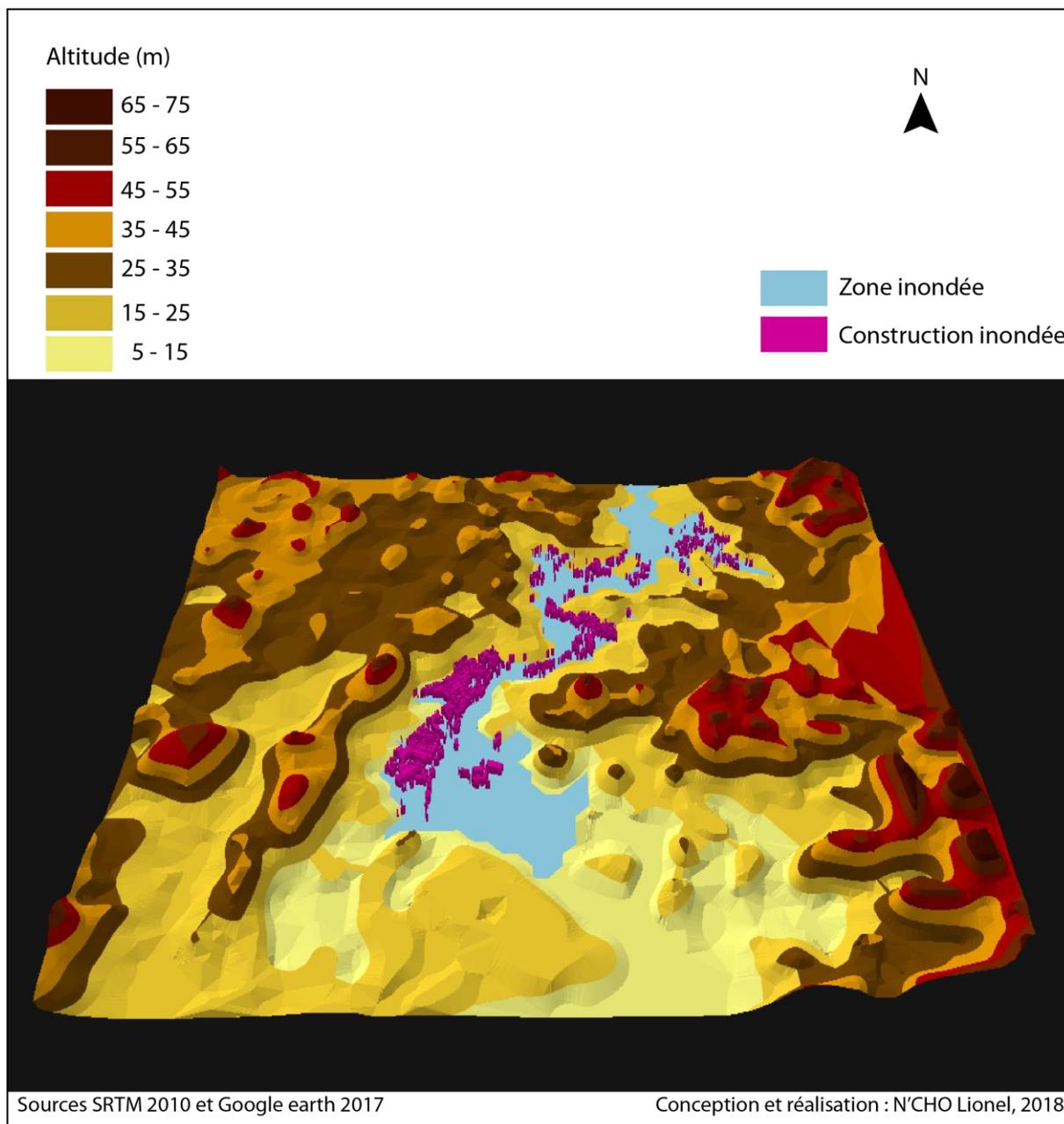


Figure 52 : Vue en 3D du site d'Aboisso après la catastrophe

La catastrophe génère des impacts sur les milieux du département d'Aboisso. Ces impacts sont pour la plupart négatif comme c'est le cas généralement lors d'une catastrophe naturelle ou technologique sur un territoire, mais la rupture des barrages d'Ayamé a aussi des effets positifs sur les milieux en aval.

5.4. IMPACTS POSITIFS

Les seuls impacts positifs de la catastrophe sont environnementaux. Dans le lit du couloir inondable, les terres sont perméables, avec déjà une possibilité de réserves souterraines. Ainsi, en termes de gestion de ressource en eau, l'onde de submersion est une plus-value, en dépit de la saturation des sols en eau. L'écoulement du réservoir d'Ayamé permettra le remplissage des nappes en aval, la fertilisation des sols (par le dépôt de sédiments) et la participation à la biodiversité des espaces alluviaux.

Ainsi, les espèces halieutiques jusqu'ici emprisonnées dans le lac d'Ayamé 1 seront libérées abondamment et serviront de protéines aux populations en aval.

Au-delà de ces effets positifs, une catastrophe naturelle est un événement qui laisse toujours des traces négatives sur l'homme et le site sur lequel se manifeste l'élément. Ainsi, les impacts négatifs plus importants et se situant quasiment à tous les niveaux du département éclipsent les impacts positifs causé par la catastrophe.

5.5. IMPACTS NEGATIFS

L'onde de submersion causera des dommages sur les populations dans le couloir inondable. Ces dommages peuvent être des cas de noyades, d'ensevelissements, d'électrocution, de blessés, des populations isolées ou déplacées.

D'après le modèle, les populations les plus touchées sont celles de Gnamienkro à Aboisso. Les populations de Biaka le seront encore plus, car leur site sera totalement inondé. Il faudra procéder dans ce village au déplacement de toute la population sur un site sécurisé jusqu'au retour à la normale.

Un événement lent et long peut entraîner des risques sanitaires liés au manque d'eau potable, au dysfonctionnement des structures de santé, etc. Ainsi, si la réponse est tardive et le retour à la normale long, la catastrophe devient plus grave et les sinistrés de plus en plus nombreux. Nombreux seront ceux qui s'adonneront au pillage si la crise perdure.

Sur les biens, il y aura la destruction et la détérioration partielle ou totale d'habitations, d'usines (CANAVESE, SODECI), d'ouvrages (ponts, routes,). L'impact se verra également sur les cultures, les plantations, les stocks de récolte et les cheptels. De même, une paralysie des services publics et privés sera constatée.

Également sur l'environnement, les impacts de la catastrophe seront l'endommagement, la destruction de la flore et de la faune, la disparition des sols cultivables. Des espèces animales pourrait disparaître du couloir inondé, et même-ci leur retour est possible, cela risque de mettre plus de temps.

Les débris charriés pourraient causer des pollutions diverses : dépôts de déchets, boues, etc. les déchets potentiellement dangereux (huile, gaz, pesticide, etc.) utilisés par les usines des barrages, les industries agricoles provoqueront une catastrophe écologique dans la vallée (produits et déchets dangereux, explosions par réaction avec l'eau, etc.).

Le patrimoine et les biens culturels (matériels ou immatériels) incarnent des valeurs universelles irremplaçables. Les inondations peuvent abîmer ou détruire le patrimoine (par l'humidité, le développement de moisissures, le dépôt de sel) et favorisent le risque de pillages.

Les Impacts sont aussi indirects : la perte de biens culturels s'avère traumatisante pour une population, car le patrimoine fait partie de l'identité culturelle de la société. Les activités économiques liées à ce patrimoine peuvent aussi pâtir de la disparition des biens culturels.

Qu'il s'agisse du département d'Aboisso, tout comme de la Côte d'Ivoire, la rupture des barrages d'Ayamé causera d'énormes dégâts qui laisseront des traces certaines.

De plus, ces dégâts pourraient être ressentis dans les pays voisins à qui la Côte d'Ivoire fournit l'électricité.

Le **tableau 14** résume les différents milieux affectés, la correspondance de l'impact, la typologie de l'effet et l'importance de l'impact.

Tableau 14 : Impacts environnementaux et sociaux de la catastrophe

COMPOSANTE DU MILIEU AFFECTE			IMPACT CORRESPONDANT	EFFET (Positif, Négatif)	EVALUATION DE L'IMPORTANCE DES IMPACTS			
PHYSIQUE	BIOLOGIQUE	HUMAIN			Intensité (Faible, Moyenne, Forte)	Portée (Locale, Zonale, Régionale)	Durée (Courte, Moyenne, Longue)	Importance de l'impact (Mineure, Moyenne, Majeure)
	Flore		Destruction d'espèces protégées	Négatif	Forte	Régionale	Longue	Majeure
	Faune		Migration des espèces	Négatif	Forte	Régionale	Moyenne	Majeure
		Populations	Déplacement des populations, accident, décès	Négatif	Forte	Régionale	Moyenne	Majeure
		Biens	Destruction de biens (Barrages, pont, route, habitation, services publics, sociétés privées, écoles, dispensaires, marchés, etc.)	Négatif	Forte	Régionale	Moyenne	Majeure

COMPOSANTE DU MILIEU AFFECTE			IMPACT CORRESPONDANT	EFFET (Positif, Négatif)	EVALUATION DE L'IMPORTANCE DES IMPACTS			
PHYSIQUE	BIOLOGIQUE	HUMAIN			Intensité (Faible, Moyenne, Forte)	Portée (Locale, Zonale, Régionale)	Durée (Courte, Moyenne, Longue)	Importance de l'impact (Mineure, Moyenne, Majeure)
Sol			Dégradation des sols	Négatif	Forte	Régionale	Longue	Majeure
			Pollution des sols	Négatif	Forte	Régionale	Longue	Majeure
			Fertilisation des sols	Positif	Moyenne	Locale	Courte	Mineure
Eau			Pollution de l'eau	Négatif	Forte	Régionale	Longue	Majeure
			Remplissage de la nappe	Positif	Forte	Régionale	Longue	Majeure

Les milieux physiques sol et eau subissent des impacts de manière différente. Les sols enregistrent une forte dégradation et une pollution négative à l'environnement, sur une longue durée et d'une importance majeure. De plus, ces impacts à portée régionale mettent en mal le développement agricole, ainsi que la sécurité alimentaire tout le long du couloir inondé.

Il y a tout de même un impact positif de la catastrophe sur les sols, mais cela reste d'importance mineure, sur une courte durée, à portée locale et d'intensité moyenne. Par contre, le remplissage de la nappe est très positif pour la ressource en eau, surtout que son intensité est forte pour toute la région. Mais là encore, les impacts sont doubles. Les hydrocarbures, les huiles usagées, et autres ordures et déchets descendant depuis Ayamé se répandent tout le long de la zone inondée, affectant parfois les puits ouverts. Malheureusement cet impact d'intensité forte à une portée régionale à cause des écoulements de surface et souterrains. Du reste, cela explique pourquoi la pollution de l'eau a une importance majeure.

Les milieux biologiques (flore et faune) n'enregistrent que des impacts négatifs, d'intensité forte et de portée régionale. Avec tous les deux une importance majeure au niveau de l'impact, néanmoins la durée de cet impact les différencie (longue pour la flore et moyenne pour la faune). En effet, les espèces ayant survécu et migré après la catastrophe peuvent revenir sur une durée moyenne, une fois leurs corridors et milieux rétablis. Par contre les ligneux détruits par la force de l'eau et certains débris mettront plus de temps à sortir de terre si certaines essences ont leurs racines encore enfouies dans le sol.

Les populations et les biens subissent également des impacts entièrement négatifs, de forte intensité et à portée régionale. Aussi, ces impacts ont tous une importance majeure pour une durée moyenne. Les populations subissent fortement les impacts de l'inondation en abandonnant leurs biens et en perdant des proches. D'un autre côté, les biens qu'ils ont abandonnés ainsi que les biens publics sont détruits sur place, inondés, ou emportés à des kilomètres de leur position initiale. Mais une fois l'état de catastrophe naturelle levé, le retour de certains déplacés sera observé.

Par ailleurs, l'objectif de ce travail de recherche étant d'élaborer des outils de gestion efficiente des risques d'inondation en cas de rupture des ouvrages hydrauliques d'Ayamé 1 et 2, le risque étant connu et circonscrit, le chapitre suivant présente un plan de gestion. Ce plan vise à faire face à tous les niveaux de la catastrophe (prévention et information, gestion de crise, puis réparation et retour d'expérience) dans le département.

CHAPITRE 6 : OUTIL DE GESTION DE L'INONDATION LIEE A LA RUPTURE DES BARRAGES D'AYAME

Dans le département, le risque d'inondation lié à l'exploitation des barrages est connu à tous les niveaux. Chaque partie met en place des mesures aux différentes étapes de gestion du risque d'inondation : la prévention, la gestion de la catastrophe en cours et le retour d'expérience après le déroulement de l'évènement.

En outre, pour les populations qui se contentent majoritairement de mesures traditionnelles pour prévenir le risque auquel elles sont exposées, le principal responsable des inondations qu'elles subissent est l'exploitant des barrages hydroélectriques qui n'est autre que la CIE.

6.1. LA PERCEPTION DU RISQUE D'INONDATION DANS LE DEPARTEMENT

6.1.1. La perception du risque par l'administration locale et l'exploitant des barrages

Le département d'Aboisso est administré par un préfet de département résidant à Aboisso le chef-lieu. Le préfet est aidé dans sa tâche par les sous-préfets d'Aboisso, d'Adjouan, d'Adaou, d'Ayamé, de Bianouan, de Kouakro, de Maféré et de Yaou qui sont les huit (8) sous-préfectures que comprend le département.

Garant de la sécurité civile des populations du département, le préfet a de facto, à travers ses services techniques, connaissance du risque d'inondation que côtoient tous les jours les

Par ailleurs, pour le risque d'inondation lié à l'exploitation des barrages d'Ayamé, le préfet peut compter sur le professionnalisme et surtout sur le sens de responsabilité de l'exploitant qui est bien consciente des impacts générés en aval de ses barrages. En exploitation, ces impacts se ressentent plus lors des lâchers d'eau forcés qui occasionnent des inondations en aval.

Toutefois, les élus locaux (maire, député, etc.) ont également une bonne connaissance des inondations liées aux barrages, puisqu'ils ont aussi accès aux retours

d'expériences établis à la demande du préfet de département. De plus, parce qu'ils sont originaires de la région d'Aboisso, bon nombre d'entre eux ont déjà été témoins des inondations passées ou ont directement reçu le récit de ces catastrophes de leurs parents et proches.

En outre, le ministère de l'environnement à travers la direction régionale du Sud-Comoé collabore avec les élus locaux et les populations sur la nécessité d'éviter des pertes importantes lors des pluies abondantes dans la région.

Les actions de la direction régionale concernent essentiellement des conseils et l'application des textes réglementaires face aux catastrophes naturelles. Il arrive par moments que la collaboration entre le ministère de l'environnement, les populations et les élus locaux s'étende à des services spécialisés. C'est le cas de la CIE qui, lors d'une alerte de crue en aval, échange avec toutes les parties sur le territoire. Ainsi, le ministère présent pendant ces échanges partage ses inquiétudes pour les populations.

6.1.2. La perception du risque d'inondation par les populations

Les populations sont conscientes du danger qu'elles courent, mais elles rejettent immédiatement les fautes sur la CIE qui gère les barrages et réalise des déversements pourtant justifiés et annoncés par courriers et médias locaux. D'ailleurs, dans la sous-préfecture d'Ayamé, les populations rencontrées par le directeur des usines des barrages sont toutes unanimes sur le fait qu'elles sont chez elles. Le site, y compris le fleuve avec lequel elles vivent paisiblement, leur appartient. Seulement depuis que "le cours d'eau coule à l'envers" d'après une expression locale, leur territoire, leurs forêts, leurs plantations et même leurs maisons sont inondées, à cause des variations hydrauliques générées par l'exploitation des barrages. Mais, une fois que le sinistre est passé, les villageois reprennent leurs activités sur le fleuve (pêche) et ses abords (agriculture, buvette...).

Par contre dans la sous-préfecture d'Aboisso, les avis sont partagés, la raison est qu'ici se trouve la ville chef-lieu du département d'Aboisso et chef-lieu de la région du Sud-Comoé, d'où la présence d'une frange de la population allochtone, le commerce ou encore les études. Pour cette frange de la population tout comme pour certains autochtones, le risque est bien réel, des activités se font effectivement en zone inondable et des bâtiments y sont construits.

Et pour la plupart des populations installées à Aboisso à vie, propriétaires des terres, il est plus difficile de s'en aller. Celles-ci partagent de près l'avis des populations de la sous-préfecture d'Ayamé.

Par contre, à Allié kro les populations n'avaient vraiment pas connaissance du risque d'ensevelissement de leur village jusqu'à la catastrophe de juillet 2018. Le village est en effet au cœur de cinq sources d'eau (les pluies, la rivière Soumié, la lagune Aby, le fleuve Bia et les déversements des barrages).

En fin de compte, si la plupart des populations dans la vallée disent être habituées aux inondations et font elles-mêmes leur propre retour d'expérience, elles partagent une pensée commune : « l'exploitation des barrages d'Ayamé joue un rôle prépondérant dans les inondations qu'elles subissent ».

Pour survivre aux inondations, administration, exploitant des barrages et populations mettent en place un certain nombre de mesures.

6.2. LA GESTION DES INONDATIONS DANS LE DEPARTEMENT

6.2.1. La gestion des inondations par les autorités départementales

En début de saison des pluies, les autorités locales du département, conscientes de leurs responsabilités administratives et juridiques vis-à-vis des populations les sensibilisent afin de les protéger des accidents qui pourraient survenir.

Cette approche d'une gestion des risques de catastrophes axée sur une prévention renforcée plutôt que sur la réponse au cas par cas nécessite un cadre institutionnel clair et une bonne coopération entre les différents organismes impliqués.

À ce jour, il y a peu de législations ayant spécifiquement traité au domaine de la gestion des risques de catastrophe en Côte d'Ivoire, à part le Plan Orsec (décret du 8 Août 1979 portant organisation du plan des secours à l'échelon national en cas de catastrophe). Le Plan d'Organisation des Secours (ORSEC) est un mécanisme de coordination des opérations de secours mis en place, 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, se sont ajoutés d'autres documents comme indiqué dans **le tableau 15**.

Tableau 15 : Lois portant organisation des secours en Côte d'Ivoire

Date	Nature
08 Décembre 1993	Instruction ministérielle relative à l'organisation des secours dans le cadre départemental et à l'échelon national en cas de sinistre important, suivie d'une circulaire datant du 12 décembre 1995 envoyée aux préfets, leur demandant l'établissement de plan de secours départementaux
13 mai 1994	Plan Orsec Sinistre Technologique, appelé plan POLLUMAR (instruction ministérielle)
03 Juin 1996	Décret organisant les transports sanitaires terrestres
06 Septembre 1998	Décret portant définition des plans de secours en cas d'accident, de sinistre ou de catastrophe
03 Juillet 2001	Plan Rouge qui organise les secours dans le cas d'une catastrophe d'une grande envergure (instruction interministérielle)

La loi ivoirienne, par une instruction ministérielle, prévoit depuis 1993 la gestion des accidents majeurs à travers l'organisation des secours. Deux ans plus tard, cette instruction ministérielle est soutenue par une circulaire à l'effet de faire établir par les préfets de département un plan de secours de leurs circonscriptions.

Mais, déjà en 1994, les textes de loi sont renforcés, une autre instruction ministérielle permet à la Côte d'Ivoire de disposer du plan POLLUMAR qui est le Plan Orsec Sinistre Technologique. Puis en 1996 et en 1998, deux décrets sont signés par le président de la république, le premier organisant les transports sanitaires terrestres, afin de limiter les impacts générés par le rejet de ces produits dans l'environnement. Le deuxième décret portant définition des plans de secours en cas d'accident, de sinistre ou de catastrophe, afin de porter secours en temps réel aux personnes sinistrées.

Enfin, en 2001, c'est encore une instruction ministérielle qui exige un plan rouge qui organise les secours dans le cas d'une catastrophe d'une grande envergure.

Ainsi, en cas de risque ou de rupture des barrages d'Ayamé, dans la mesure où un Plan Particulier d'Intervention (PPI) aura été préparé par l'autorité préfectorale, l'information des populations devra être prévue dans ce plan dès la survenance de l'évènement avec des moyens divers adaptés sans omettre l'utilisation de radios locales permettant de couvrir les zones inondées. Les actions à engager par l'exploitant avant le déclenchement du PPI devront avoir fait l'objet d'accords précis avec les pouvoirs publics (instruction interministérielle n°70-INT-PC, du 13 mai 1994).

6.2.2. La gestion des inondations par l'exploitant des barrages

Pour éviter les pertes humaines, avant le déversement, le gestionnaire informe le préfet du département par courrier (**Annexe 2**) pour que la population se tienne à très bonne distance du fleuve pour être en sécurité. Le préfet autorise ensuite la divulgation de l'information auprès de sa population, puis les sous-préfets des sous-préfectures d'Aboisso et d'Ayamé sont chargés de relayer l'information auprès des autorités traditionnelles qui continuent d'informer la population.

L'information est par la suite relayée par les radios locales (Bia FM et radio paix Sanwi), qui la passe en boucle, afin de la rendre accessible à toute la population.

Au niveau même des barrages, le gestionnaire dispose d'un Plan d'Opération Interne (POI) qui lui permet de gérer certains risques en interne, limitant ainsi le risque de rupture des barrages.

Le véritable danger lors du déversement peut être pour un planteur de voir son chemin de retour au village coupé par la montée du fleuve, et pour le pêcheur, celui d'être immédiatement emporté par l'eau. En juillet 2018, revenant d'Allié kro après une mission de constat d'impact de déversement, la route empruntée dans la matinée pour "descendre le fleuve" connaissait une montée progressive de l'eau.

La saison pluvieuse et le déversement mettent tous les acteurs du bassin versant de la Bia dans le département d'Aboisso en alerte totale. En cas de risque de rupture ou rupture de barrage, un schéma d'alerte a été établi, afin de définir les tâches et les personnes ressources pour répondre à la catastrophe (**figure 53**).

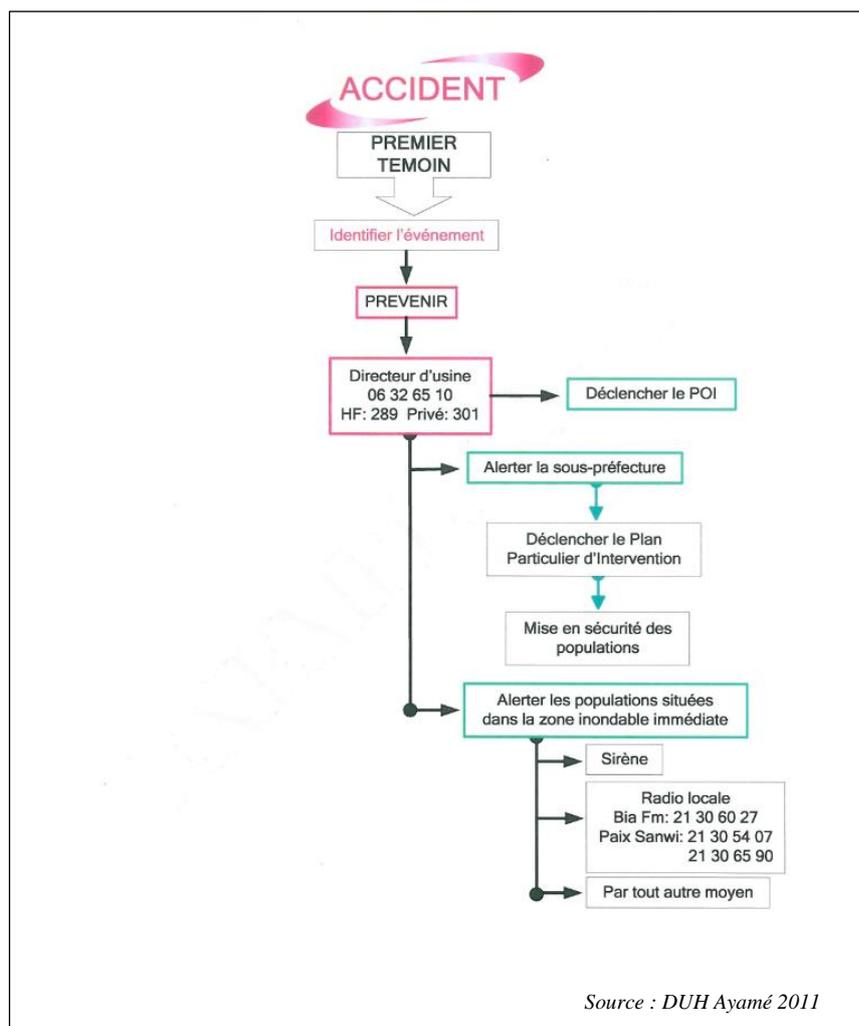


Figure 53 : Plan d'Opération Interne / rupture de barrage

L'accident déclenché sur l'un des deux barrages est rapporté par le premier témoin qui prend soin de préciser le type d'évènement (incendie, explosion, rupture...). C'est généralement un agent exploitant qui fait le premier constat. Ensuite le directeur de l'usine aussi appelé D.U ayant pris connaissance de la situation déclenche le Plan d'Opération Interne pour limiter les pertes sur son site. Le D.U prend soin d'alerter au même moment l'autorité préfectorale pour qu'elle déclenche le Plan Particulier d'Intervention et fasse mettre en sécurité les populations.

Ainsi, les populations en zone à risque sont alertées par des signaux alarmants, à savoir sirène, klaxon, communiqués répétés à la radio ou par appels téléphoniques.

L'inondation est un risque qui touche régulièrement la Côte d'Ivoire. Le département d'Aboisso en souffre directement (précipitation) ou indirectement (déversement des barrages), mais les normes et réglementations sur ce phénomène sont insuffisantes et les outils très peu disponibles.

Bien que l'exploitant et les autorités locales travaillent ensemble pour minimiser les risques sur les barrages et en aval, aucun plan d'intervention n'est malheureusement prévu en cas de rupture des ouvrages. Les seules mesures préventives qui existent sont par rapport aux déversements en aval et aux accidents qui pourraient survenir dans les usines des barrages hydroélectriques d'Ayamé 1 et 2.

Les populations sont régulièrement approchées par les autorités et le gestionnaire pour être sensibilisées sur les dangers auxquels elles s'exposent en étant dans ou trop près du lit du fleuve. Mais les populations ne suivent toujours pas ces recommandations. Pour se protéger, elles érigent pour celles qui le peuvent des digues en pierres autour de leurs habitations

6.2.3. La gestion des inondations par les populations

Les populations victimes de la montée des eaux dans la vallée de la Bia mettent en place des mesures préventives qui varient selon le niveau de vie et le site où elles se trouvent. Toutefois au nord comme au sud du bassin, les habitants ont opté pour la plupart pour en endiguement. Cet endiguement très marqué dans la ville d'Aboisso s'explique

par le manque de végétation abondante à certain endroit des rives du fleuve. Dans la ville, les endiguements sont faits de roches qui ne manquent pas dans la région du Sud-Comoé.

Ailleurs, les populations ont fait bien de conserver la végétation qui leur sert de barrières naturelles face aux crues du fleuve.

Habitué pour la plupart à voir une crue du fleuve de faible ampleur même pendant les déversements des barrages d'Ayamé, les habitants en aval des ouvrages hydroélectriques, en dehors des barrières sur quoi ils s'appuient pour contenir l'eau ne se sentaient pas vraiment menacés jusqu'en 2018. En effet, bien que des crues antérieures du fleuve et ce en rapport avec le réservoir du barrage d'Ayamé 1 avaient auparavant causé des dégâts majeurs, les populations de la ville d'Aboisso, localité la plus touchée lors de la montée des eaux ne trouvaient pas nécessaire de quitter les zones à risque. Mais depuis, les actions menées avant, pendant et après l'alerte inondation ont évolué.

Ainsi, depuis 2018, certains habitants pourtant propriétaires de terres en bordure du fleuve décident de partir pour toujours, parce que consciente du risque qu'ils encourent en demeurant dans le lit du fleuve. Pour d'autre par contre, l'action se résume juste à quitter les zones à risque pendant la crise puis revenir une fois la décrue amorcée.

Ailleurs dans les villages entre le réservoir d'Ayamé 1 et la lagune Aby ou la Bia trouve son embouchure, les efforts face au risque d'inondation ne sont pas si différents qu'en ville, car ce qui dirige toutes ces actions c'est d'abord la survie. C'est pourquoi la mise en relation entre les populations des villages inondées en 2018 et l'exploitant du barrage n'a cessé d'aider les différentes parties.

Pour ces raisons, lorsqu'en qu'en 2019 une autre catastrophe menaçait le village d'Allié kro à l'embouchure déjà sinistré un an plus tôt, la coordination entre l'exploitant des barrages, les villageois et les services de l'ONPC a permis d'éviter le pire. Contacté à Abidjan, l'un des officiers supérieurs de l'ONPC a immédiatement fait mettre en place une équipe d'intervention qui après plusieurs difficultés pour arriver sur le site, la principale route terrestre étant à nouveau coupée par la montée des eaux, a pu atteindre son objectif et aider les populations.

En outre, La catastrophe de 2018 a permis d'apprécier la solidarité envers les populations sinistrées.

Lors de cette catastrophe, les autorités ont mis tout en œuvre pour minimiser les dommages et pertes. Les sinistrés sont recasés et assistés sur des sites hors de la montée des eaux. Ils bénéficient de l'aide locale à travers les dons de ces autorités. Les déplacés reçoivent également l'aide d'élus venant des autres régions de Côte d'Ivoire et aussi l'assistance du gouvernement ivoirien. Tous ces dons sont remis aux populations en nature (vivres, vêtement, matelas...) ou en espèce.

La perception du risque d'inondation dans la vallée de la Bia a aujourd'hui évolué au sein des populations du département. Cela a un impact positif sur la gestion du risque du moment où les échanges sont plus aisés entre les populations et toutes les autres parties concernées par le risque d'inondation dans la vallée.

6.3. PROPOSITION D'UN OUTIL DE GESTION PREVENTIVE DE L'INONDATION LIEE A LA RUPTURE DES BARRAGES D'AYAME

L'hypothèse d'une rupture de barrage relève par définition d'un Plan Particulier d'Intervention (PPI) dont l'élaboration est à la charge de l'autorité préfectorale territorialement compétente.

À la suite des résultats obtenus après la modélisation sous HEC-RAS, un Plan Particulier d'Intervention, pour faire face à la rupture des barrages d'Ayamé 1 et 2 qui sont classés comme des grands barrages auxquels la réglementation impose un PPI, est élaboré. Ce plan comporte des cartes détaillées des zones inondables ainsi qu'un ensemble de mesures d'alerte et d'intervention visant à réduire les risques associés à la rupture du barrage.

6.3.1. Définition d'un plan particulier d'intervention (PPI)

Les Plans Particuliers d'Intervention (PPI) sont des plans d'urgence établis pour faire face aux risques particuliers liés à l'existence ou au fonctionnement d'ouvrages ou d'installations dont l'entreprise est localisée ou fixe. Ils concernent notamment les aménagements hydrauliques qui comportent à la fois un réservoir d'une capacité au

moins égale à 15 millions de m³ et un barrage ou digue d'au moins 20 mètres de hauteur (*voir caractéristiques d'Ayamé 1 et 2 au chapitre 4 pages 110 et 112*).

Le plan particulier d'intervention comporte entre autres : les cartes d'inondation, les temps d'arrivées de l'onde, les moyens d'alerte et de secours mobilisables et les modalités de mise en œuvre de ces moyens, le zonage, la liste des communes, les mesures d'information et de protection des populations, les mesures de diffusion de l'alerte et les mesures d'urgence en cas de danger immédiat (Marche, 2008).

6.3.1.1. Le zonage du risque

6.3.1.1.1. La Zone de Proximité Immédiate (ZPI)

Elle se trouve juste en aval des barrages (**cf. figure 33 page 140 et figure 34 page 141**). La propagation de l'onde de submersion y est rapide avec des hauteurs d'eau très importantes.

Dans cette zone, une partie de la cité d'Ayamé 2 où résident les agents de la CIE en fonction au barrage d'Ayamé 2 et leurs familles est inondée. En plus de la cité, les forêts et les plantations entre la ville d'Ayamé sur la rive gauche et le village d'Amoakro sur la rive droite de la Bia sont prises par l'onde de submersion.

Par ailleurs, la localité d'Amoakro et celle d'Ayamé sont construites à des altitudes raisonnables pour ne pas être impactés. Mais la croissance de la population et sa forte demande d'espace habitable risque de pousser les autorités à étendre ces localités vers le fleuve, ce qui augmenterait le risque d'inondation.

Si Amoakro semble être épargné par ce fait à cause de la route, ce n'est pas le cas d'Ayamé où l'extension est déjà en cours dans sa partie sud. La ville d'Ayamé étant en évolution, des aménagements se font sur des terres libres pour y construire de nouvelles habitations.

6.3.1.1.2. La Zone d'Inondation Spécifique (ZIS)

La zone d'inondation spécifique part de l'aval d'Amoakro à la ville d'Aboisso (**cf. figure 35 page 141 à figure 39 page 144**). Les hauteurs et vitesses d'inondation

sont importantes entre Amoakro et Biaka, puis elles commencent à baisser vers Aboisso où les élévations et les pentes baissent également.

Dans cette zone, qu'ils s'agissent des habitations, des infrastructures, des équipements, des forêts, des plantations etc., aucune localité n'est épargnée par l'onde de submersion qui par moment balaye toute une zone habitée.

6.3.1.1.3. La Zone d'Inondation

Le tracé s'arrêtant à Aboisso, le logiciel de simulation HEC-RAS limite la modélisation hydraulique au sud du site d'Aboisso.

La zone d'inondation se situe entièrement au niveau de la plantation de banane à la sortie sud-est d'Aboisso. À ce stade, l'inondation est comparable à une inondation normale, mais les pertes sont tout de même importantes avec une fois de plus des pertes économiques, environnementales et probablement humaines, si la population dans cette partie de la ville n'est pas mise en sécurité à temps.

6.3.1.2. La stratégie de gestion d'une crise éventuelle

6.3.1.2.1. L'alerte

En cas de rupture de barrage, la population est avertie au moyen du signal national d'alerte. Ce signal est complété par le signal d'alerte spécifique aux ouvrages hydroélectriques émis par des sirènes de type "corne de brume" (**planche 5 page 114**).

6.3.1.2.2. Le signal d'alarme pour l'état de pré-alerte

Ce signal est déclenché par l'exploitant si des préoccupations sérieuses subsistent du fait d'un problème technique ou de phénomènes naturels exceptionnels (crue extrême, glissement de terrain, etc.).

Le signal de pré-alerte consiste en cycles composés d'émission de 10 secondes d'un signal uniforme suivi de 5 secondes de pause jusqu'à une durée de 5 à 6 minutes.

6.3.1.2.3. Le signal d'alarme pour l'état d'alerte générale

En cas de péril imminent prononcé par l'exploitant, quand il estime ne plus avoir le contrôle de l'ouvrage.

En cas de rupture constatée (partielle ou totale) prononcée par l'exploitant.

En outre, le signal d'alarme pour l'alerte générale comporte un son modulé d'une fréquence supérieure à celle utilisée pour l'état de pré-alerte. L'émission de 10 secondes de ce signal est suivie de 5 secondes de pause et ce cycle se répète jusqu'à une durée de 5 à 6 minutes.

6.3.1.2.4. La fin de l'alerte

Le signal d'alarme pour la fin de l'alerte d'urgence ou de l'état d'alerte générale comporte un son continu uniforme d'une durée de 5 à 6 minutes.

L'alerte peut être émise également par l'intermédiaire de tous les médias disponibles (radio, télé), ainsi que par tout autre moyen d'émission des avertissements d'alarme, tels que les sirènes des véhicules de police, de sapeurs-pompiers, d'ambulance, le tout afin d'amplifier le signal et de le diffuser jusqu'à tous les endroits et de s'assurer ainsi que toute la population est prévenue.

Tel que défini par le POI 2011, les radios locales (Bia FM et paix sawi) auront à charge de communiquer en temps réel les événements jusqu'à la fin de la crise.

Par ailleurs, les populations dans la vallée inondable étant pour la plus part rurales, le rôle de communicateur joué par les griots lors des cérémonies traditionnelles serait un apport capital pour relayer le message d'alerte inondation dans leurs différents villages émis par l'exploitant depuis les usines.

6.3.1.2.5. L'évacuation

L'évacuation si elle se fait dans la panique devient elle-même une catastrophe, c'est pourquoi une coordination s'impose à ce stade.

Aussi, plus la réponse à la catastrophe ne tarde, l'anxiété gagne les populations et dans le cas de cette étude, des maladies liées à l'eau potentiellement contaminée ou polluée par les huiles, l'essence, les organes morts, les déchets ménagers et industriels infestent à leur tour la zone sinistrée.

Un plan d'évacuation dès les premiers signes de la rupture jusqu'à ce qu'aucune solution ne puisse éviter la catastrophe est ici proposé. Toutes les actions devront être menées en respectant les consignes de l'exploitant, des autorités et des secours. Et pour que

l'évacuation se déroule sans grand trouble dû essentiellement à l'anxiété des populations face au danger qui les menace, la solidarité devra être l'une des meilleures réponses à la catastrophe avant, pendant et après.

D'un autre côté, une fois le signal de l'état de pré-alerte déclenché, le temps de réponse sera insuffisant lorsque la rupture du barrage d'Ayamé 1 deviendra inévitable et certaine. C'est pourquoi une évacuation préventive doit immédiatement être faite en aval, car la précipitation pendant que l'onde de submersion s'écoule vers l'aval provoquera une panique générale aussi désastreuse.

De même que les populations dans la vallée inondable, les agents de la CIE restés sur les barrages pour les observations pré-catastrophe devront être en alerte maximum pour aussi être évacués vers les points hauts une fois qu'ils auront perdu tout contrôle de la situation.

Tout compte fait, les populations dans les zones menacées doivent connaître les points hauts sur lesquels se réfugier toute la durée de l'évènement. Ces points sont essentiellement les hautes collines et les étages élevés des immeubles résistants. Les populations doivent également être informées des procédés en cas d'évacuation à la suite du déclenchement du signal d'alarme.

6.3.2. Application du PPI au cas des barrages d'Ayamé après constatation de signaux inquiétants

6.3.2.1. L'anticipation, vigilance renforcée

Pendant cette étape, aucune évacuation n'est ordonnée. Les actions à mener par l'exploitant sont de : alerter le préfet, surveiller en permanence le barrage, procéder à la vidange qui consiste à libérer une quantité importante de l'eau du réservoir, de sorte à ce que le niveau du lac soit en dessous de la cote maximale recommandée et le barrage, sûr de ne pas céder.

Le préfet à son tour réunit une cellule de veille où on informe l'échelon supérieur, les services locaux de sécurité civile et militaire notamment les sapeurs-pompiers à

Assouba, la brigade de la gendarmerie d'Aboisso, la police etc., les maires, les sous-préfets les chefs de villages et d'autres représentants des populations.

6.3.2.2. L'anticipation, préoccupations sérieuses

L'évacuation de la Zone de Proximité Immédiate (ZPI) est ordonnée et l'on se prépare à évacuer la Zone d'Inondation Spécifique (ZIS).

L'exploitant des barrages tient le préfet informé, poursuit la vidange de la retenue d'Ayamé 1 jusqu'à atteindre une côte de sécurité pour l'ouvrage.

Le préfet une fois informé par le directeur des usines alerte les maires des zones de proximité immédiate et zones d'inondation spécifique, il alerte également les sous-préfets et diffuse l'information aux radios locales.

6.3.2.3. Anticipation, péril imminent

Lors de cette phase, le préfet s'assure des évacuations de la ZPI et donne l'ordre d'évacuer toute la ZIS. L'exploitant alerte le préfet sur la perte du contrôle de la situation, il alerte également les populations et prolonge la vidange de la retenue. A son tour le préfet alerte les maires et ordonne l'émission des sirènes et l'information par tout autre moyen.

En outre, un comité de gestion de crise où toutes les parties sont représentées est aussitôt mis sur le terrain.

6.3.2.4 La rupture constatée

Ici également, le préfet s'assure de l'évacuation totale des ZPI et ZIS. L'exploitant alerte le préfet et les populations de la ZPI de l'évènement qui vient de se dérouler sur le premier barrage, le deuxième ne tarde pas à céder sous l'effet du poids de l'eau et du béton emporté.

Suite à cela, le préfet alerte les maires, il ordonne une fois encore l'émission des sirènes et l'information par tout autre moyen.

Le comité de gestion de crise dans lequel toutes les parties sont représentées est fortement mis à contribution afin de répondre à l'urgence.

6.3.2.5. L'organisation des secours

L'organisation des secours doit être faite selon un plan répondant à des critères notamment les services de secours, la voirie, la logistique, les différents sites d'accueils etc. Ces éléments représentent des contraintes qui si leur prise en compte n'est pas faite plus tôt lors de l'élaboration du plan de secours, les opérations risquent d'être difficiles, voire impossibles à certains endroits, étant donné que les deux rives du fleuve sont toutes habitées. De ce fait, l'oubli d'une seule rive dans l'intervention serait suicidaire pour les populations totalement abandonnées. En outre, la route aura un rôle prépondérant comme dans toutes les opérations de secours, de l'état de la route dépendra la rapidité et la fluidité de l'intervention.

Malheureusement lors d'une inondation, plusieurs routes deviennent impraticables parce qu'elles sont prises par la montée des eaux. Les seuls recours pour aider les sinistrés dans ces conditions restent des radeaux gonflables de sauvetage et des hélicoptères qui pourront utiliser les secours. Mettre donc cette logistique à leur disposition simplifiera leur mission et les rendra plus efficace pour venir en aide à plus de sinistrés qu'avec une logistique limitée, avec lesquels les secours bien qu'aguerris prendraient des risques inutiles.

6.3.2.6. Contraintes à l'organisation des secours

Vu le positionnement de la ville d'Ayamé sur la rive gauche, les secours ne pourront pas venir de cette zone, la rupture du barrage coupant la ville du reste du bassin par la route. Toutefois, ils devraient être bien présents dans la ville d'Ayamé pour parer à toute situation critique sur son site.

Si malgré tout, les secours présents à Ayamé doivent venir en aide en aval, il faudrait qu'ils traversent le fleuve par navigation, ce qui les expose à une noyade certaine là où le débit est trop fort. Mais ils pourraient être héliportés et se positionner sur la rive droite.

Aussi, les radeaux gonflables mis à leur disposition pourront toujours servir dans les zones inondées où le débit sera moins important, il s'agira surtout des zones d'étalement de l'inondation.

En outre, la présence des secours à Amoakro dès les premiers signaux de catastrophe naturelle serait une bonne stratégie pour aider les populations entre cette localité et la ville d'Aboisso qui elle-même sera débordé, vu le nombre important d'enjeux humains et socio-économiques sur son site. De plus, en aval d'Aboisso se trouvent d'autres localités dans le couloir d'inondation (Ehouessèbo, Allié kro) qui mobiliseraient les secours.

Par ailleurs, la rivière Soumié qui habituellement sort de son lit lors des pluies abondantes, si ces précipitations coïncident avec la rupture des barrages d'Ayamé, le Soumié également en crue ne permettra pas une fois encore de prendre la principale piste qui mène au village d'Allié kro à l'embouchure de la Bia. Dans ces conditions, les populations devront au préalable être déplacées sur la rive droite, au risque de se retrouver prises par au moins quatre sources d'eau (fleuve, lagune, rivière et onde de submersion).

À Aboisso, chef-lieu de département, les secours étant entièrement basés sur la rive droite, y compris les pompiers venant d'Assouba, devraient immédiatement se déployer sur les deux rives dès la pré-alerte.

Dans la ville, certaines zones sont en hauteur, ces secteurs perchés du site d'Aboisso peuvent abriter les populations déplacées pendant toute la durée de l'état de catastrophe naturelle (**figure 54**). Cependant, il ne faudrait pas attendre de voir l'onde de submersion entrée dans la ville avant de quitter le couloir inondable.

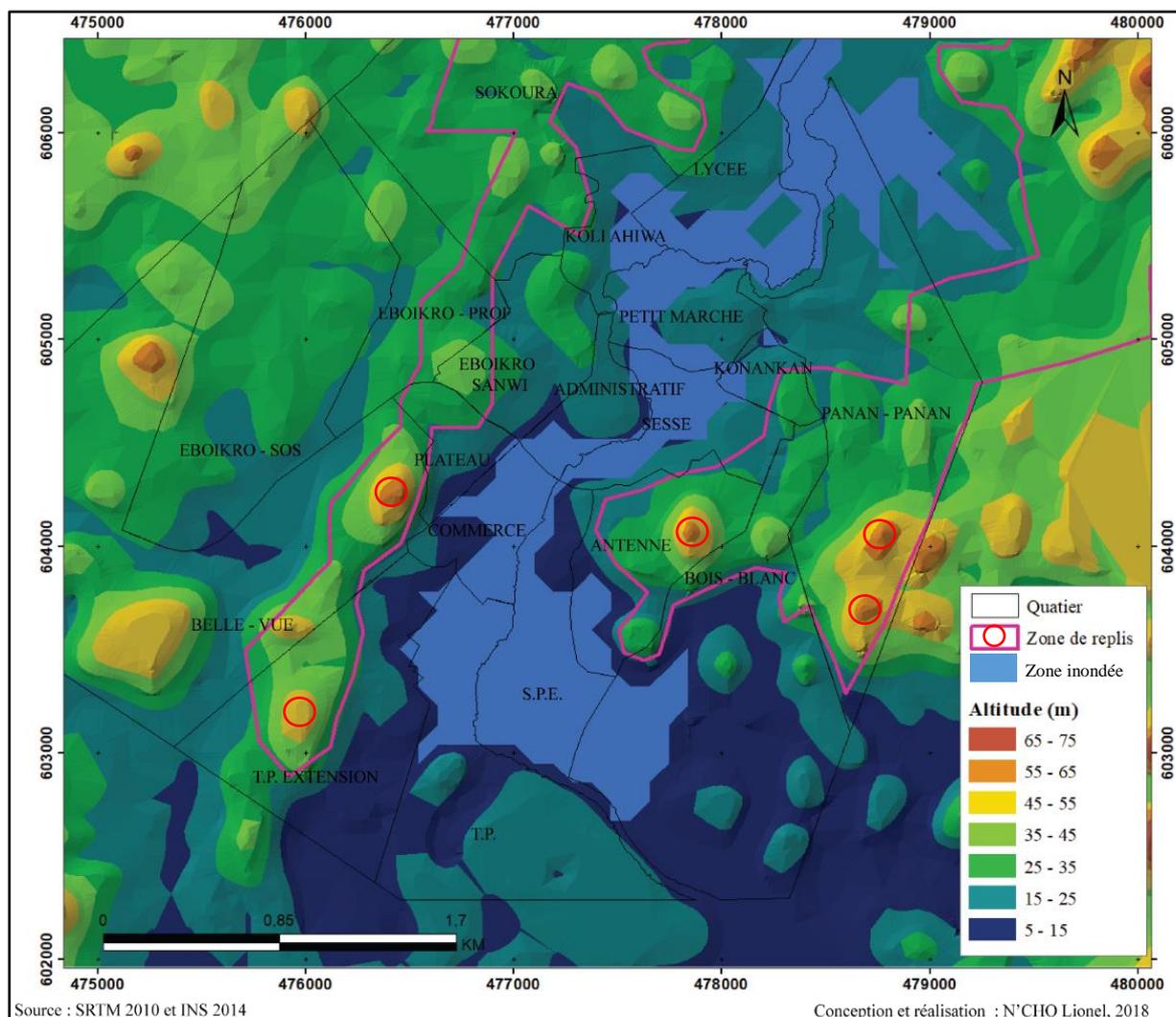


Figure 54 : Zone de repli possible en cas d'inondation à Aboisso

Dès le premier message de départ, les populations et les travailleurs dans les secteurs, TP (Travaux Publics), SPE (Société des Plantation d'Elima), commerce, administratif, petit marché, et lycée, devront s'en aller sans plus attendre. Également, les secours devront concentrer plus d'efforts dans ces zones sinistrées pour venir en aide aux personnes qui malgré tout seront restées sur place.

Ainsi, d'Ayamé à Allié kro, en passant par Aboisso, le déploiement des secours devra se faire avant la rupture des barrages. La logistique pour le transport et le repérage des populations dans l'urgence devra être constituée de véhicules, de radeaux et d'hélicoptères.

6.3.2.7 Le principe d'évacuation

Pour que l'évacuation se déroule bien, populations et secours devront collaborer aisément malgré la panique. En effet, lors d'une catastrophe naturelle, bien qu'ayant reçu des consignes de départ, il arrive que des populations s'obstinent à rester dans leurs habitations ou non loin de leurs commerces pourtant inclus dans la zone susceptible d'être impactée par le déroulement de l'évènement. C'est pourquoi les politiques et les chefs de communautés villageoises devront en amont veiller à ce que le risque d'inondation de la vallée en cas de rupture des barrages d'Ayamé soit bien perçu par les populations.

Dans la pratique, les populations et les secours doivent utiliser les grands axes autoroutiers et le réseau routier national.

Par ailleurs, les populations doivent être mises en sécurité sur les points hauts naturels, elles doivent aussi être acheminées vers des lieux d'hébergement. Ces gîtes dont le rôle serait de loger temporairement les déplacés devront être assez grands et préparer à l'avance de sorte à éviter d'autres problèmes sanitaires durant toute la durée de la crise.

Dans le même temps, pour éviter des scènes de pillages que ne voudraient pas subir les populations forcées de quitter leurs maisons pour certaines et pour d'autres leurs commerces, la police ainsi que la gendarmerie devraient absolument se charger de maintenir l'ordre dans les localités sinistrées.

6.3.2.8. L'évaluation post-catastrophe

Après une catastrophe naturelle, le retour à la normale ne se fait pas automatiquement, encore moins sans tenir compte de plusieurs aspect contraignant ; il ne s'agit pas là d'un retour classique de voyage pour les populations déplacée avant et pendant la montée des eaux. La prévention permettra certes d'éviter des pertes en vie humaines, mais les secours ne pourront rien face aux pertes économiques et environnementales dont dépendent pourtant les populations.

Ainsi, lorsque les populations seront autorisées à retourner chez elles, elles pourront découvrir l'ampleur de la catastrophe qui s'y est déroulée. Les populations constateront leurs plantations et récoltes, leurs habitations, leurs écoles, leurs dispensaires..., emportés

par l'eau ou inondés. Face à ce drame, elles ne pourront qu'être patientes car le retour à la normale demande également du temps pour reconstituer tous les éléments perdus.

De leur côté, l'État de Côte d'Ivoire propriétaire des barrages hydroélectrique d'Ayamé et la CIE qui en assure la gestion perdent coup sur coup, deux infrastructures aux valeurs historiques et financières immenses. Cette perte aura un impact sur la production et la commercialisation de l'énergie hydroélectrique en côte d'Ivoire.

En tout, il faudra patienter plusieurs mois pour que le couloir inondé soit totalement assaini de tous les débris et autres ordures générés par la catastrophe. Et pendant ce temps, si rien n'est fait, les ordures et les eaux stagnantes dans les rues et les lieux abandonnées seront à leur tour vecteur de choléra dans la zone sinistrée.

Heureusement le risque d'inondation en aval des barrages étant identifié et cartographié, une parfaite coordination entre les acteurs (civil, politique, militaire, etc.) devrait faciliter la gestion de la catastrophe à toutes les phases.

La **figure 55** présente un plan simplifié de la réponse à la catastrophe.

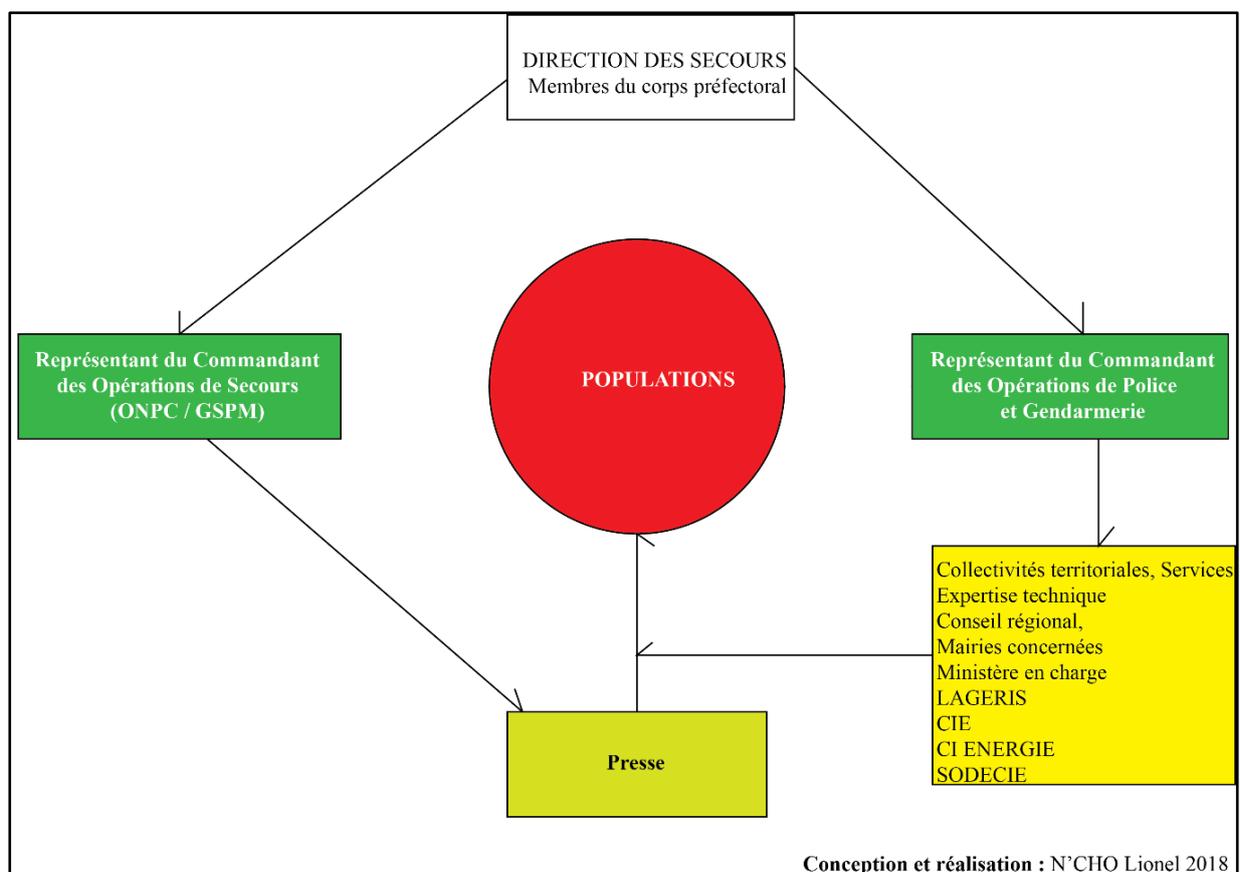


Figure 55 : Organisation des secours

La direction des secours avec à sa tête le préfet de département d'Aboisso décide après consultation de l'organisation des secours. Après avoir arrêté les décisions pour faire face à la crise, la police, la gendarmerie et les pompiers sont aussitôt mobilisés et en collaboration avec les groupements, associations, collectivités, responsables des services publics et privés et avec des experts techniques transmettent les consignes de sécurité et de départ à la presse. La presse constituée de radios locales (Bia FM et radio paix sawi) diffuse ensuite largement l'information telle que reçue aux populations. Ces dernières au cœur des secours sont la priorité de la gestion de la crise, elles concentrent donc toutes les actions menées par l'administration et l'ensemble de secours mobilisés.

Les populations, principale cible de la manifestation de l'évènement doivent de ce fait coopérer avec l'administration et les secours afin de limiter au maximum les pertes en vie humaines. Leurs biens matériels ne devraient pas être la priorité face aux consignes et à l'alerte inondation, c'est plutôt la survie qui devrait guider les populations de tous les villages dans la vallée inondable.

Par ailleurs, la direction des secours devrait insister sur la nécessité de mettre les populations en sécurité sur les points hauts du couloir inondable, à leur tour, les secours devront s'assurer que les personnes sinistrées encore en vie ne sont plus en danger. De même, l'aide aux populations et le signal d'alerte de la fin de l'état de catastrophe naturelle se fera dans le même sens, c'est-à-dire dicter par la direction des secours toujours constituée du corps préfectoral.

6.3.2.9. Les consignes aux populations

Autour de la zone d'écoulement potentielle de l'onde de rupture, la zone de faible aléa est une zone de vigilance, d'observation minutieuse. Cette zone plus élevée que les deux autres zones pourrait connaître des débordements, principalement dans ses zones les plus basses. C'est pourquoi les populations à l'intérieur de cette zone doivent respecter toutes les consignes de sécurité. Les populations dans la zone de moyen aléa et celles dans la zone de fort aléa doivent adopter quasiment les mêmes gestes. Il est vrai que les élévations sont différentes entre ces deux zones, mais la proximité qu'il y a entre elles, fait que la zone de moyen aléa, donc intermédiaire reste aussi sensible que la zone de fort aléa.

La prévention aide à réduire le risque, mais son efficacité dépend entièrement du respect des consignes par les populations. Si les populations concernées ne se conforment pas aux prescriptions reçues par l'administration et les secours, elles ne peuvent résister longtemps à la manifestation d'une catastrophe.

Le **tableau 16** propose une série de mesure à respecter en cas d'alerte rupture de barrage.

Tableau 16 : Consignes de survie en cas d'inondation

Consignes		
À emporter		À éviter
Énergie et communication	Radio	Rester à la maison
	Lampes à poche avec recharge	
Eau et nourriture	<ul style="list-style-type: none"> - Eau potable - Aliments secs - Conserves 	Rester dans les véhicules si la circulation est encombrée
Séjour et Santé	Verres et couvert élémentaires	Téléphoner (Libérer les lignes pour les secours en urgence)
	Couverture	<ul style="list-style-type: none"> - Aller chercher les enfants à l'école pour ne pas, les exposer au danger - l'évacuation des Écoles est une priorité.
	<ul style="list-style-type: none"> - Bandes adhésives - Ciseaux 	Allumer le feu
	Secours d'urgence	
Document	Pièces d'identité	

Les populations situées en zone inondable devront apporter avec elles au moment où l'alerte est donnée, de l'eau et la nourriture essentiels à leur survie ; concernant la nourriture, les populations déplacées devront privilégier les aliments dont la durée de conservation est plus longue, ainsi que des bouteilles d'eau potable. En pareil circonstance, la gestion de l'eau devient urgente, alors l'eau à boire devrait durer aussi longtemps que la durée de la crise ou la réception de l'aide des autorités.

Plus la crise dure, plus les ressources viennent à manquer, c'est pourquoi les secours recommandent lorsque l'on dispose d'une bouteille d'eau, de prendre de petites gorgées juste pour s'hydrater, plutôt que de boire toute la bouteille en une seule prise, car l'on ignore exactement quand sortir des décombres ou même de son gîte si on a pu se mettre à l'abri avant la manifestation de l'évènement.

Il faudrait également prendre soin de se mettre à l'abri avec un kit contenant à la fois des médicaments et autres soins médicaux, des appareils pouvant donner la lumière ou permettant de rester informé depuis son site de replis.

Par ailleurs, les populations qui partiront de chez elles devraient garder sur elles leurs pièces d'identité pour leur identification post-crise.

Cependant dans le couloir inondable et même dans une importante zone couverte par le réseau téléphonique, il est impératif de libérer les lignes de téléphone afin de faciliter le flux d'appels auxquels devront faire face les secours. Aller à la recherche d'un proche également ne sera pas nécessaire, on pourrait se retrouver pris au piège en revenant de sa quête. Il faudra surtout éviter de rester enfermé à la maison.

Peu de législation ont trait au domaine de la gestion des risques de catastrophe en Côte d'Ivoire, à part le Plan ORSEC. La réglementation est encore en phase d'élaboration.

Ainsi, le département d'Aboisso n'est pas véritablement outillé à la gestion du sinistre semblable à celui de la présente étude. Les populations répondent elles-mêmes par urgence aux montées d'eaux constatées.

Le gestionnaire des barrages n'ayant pas l'idée des zones submersibles, il ne pouvait établir un plan particulier d'intervention, ce qui peut être résolu à travers les résultats de ce travail qui montrent les zones submersibles dans la vallée et proposent par ailleurs les zones de sécurité.

Se faisant, les autorités, le préfet en premier devra faire appel au plan établi, mais la responsabilité du gestionnaire sera la plus importante, car c'est lui qui détiendra la toute première information pré-catastrophe. L'alerte lancée, les populations devront obligatoirement respecter le plan de secours déployé.

Dans certains pays, des digues sont construites afin d'empêcher les inondations dans les villes en bordure d'un plan ou cours d'eau. Certes, ces projets sont très coûteux, mais leur rôle en vaut le coût des investissements. N'est-il pas possible en Côte d'Ivoire de se servir de cette technique dans les zones à forts enjeux comme Aboisso ? Si cela est possible, il faudrait alors construire une digue de 8 m de haut de chaque côté du fleuve, ce qui nécessiterait un énorme financement. À défaut, l'idéal serait de draguer le fond du cours d'eau en le rendant plus profond. Mais les îlots forestiers, les roches et les espèces fluviales généreraient d'importants impacts environnementaux.

Conclusion de la troisième partie

La catastrophe simulée rappelle des situations réelles d'inondations causées par des ruptures de barrage (hydroélectrique, agricole, minier). L'une de ces catastrophes encore très récente en Afrique reste la rupture du barrage de Solai au Kenya en 2018.

La zone d'étude, un milieu agricole important pour toute la Côte d'Ivoire sort paralysée par la rupture des barrages d'Ayamé. Les immenses superficies agricoles sous les eaux ont un impact non négligeable sur la part économique régionale, quand la destruction des barrages se ressent automatiquement sur tout le territoire ivoirien, où la demande en énergie est de plus en plus forte. L'onde de submersion, occasionne d'énormes dommages en aval du premier barrage. Elle est suivie d'une inondation importante, mêlant eau et matériaux issus du barrage, puis du deuxième barrage et de l'érosion intense dans la vallée.

Ainsi, la catastrophe d'Ayamé causera plusieurs dégâts considérables en aval au vu des enjeux présents. Ces enjeux sont de trois ordres : humains, économiques et environnementaux, et les impacts peuvent être négatifs comme positifs. Dans les parties argileuses inondées, il faudrait s'attendre à des glissements de terrains et au transport de vase, en plus de transports solides, constitués essentiellement de matériaux de construction, de matériels (véhicules, meubles, etc.), de corps humains, d'animaux morts, de ligneux, etc. Les matériaux arrachés qui n'ont pu être transportés par le courant de l'inondation seront déposés dans le fleuve pour ainsi constituer la partie affouillable de son lit.

L'inondation causée par la rupture des barrages laisse ainsi un territoire sinistré dans un couloir pas aménagé pour faire face à pareille situation, les inondations causées par les déversements de 1969, 1975 et 2018 l'ont mainte fois prouvées. La priorité dans la réponse, une fois l'anticipation et l'alerte passées lors de la crise, est de secourir les survivants en zone sinistrée. Dans le département d'Aboisso, il faudrait concentrer plus d'effort dans la ville d'Aboisso, à cause des enjeux en très grand nombre par rapport aux autres localités ; mais cela n'exclut pas l'attention particulière des localités qui peuvent être totalement inondées comme Biaka. Au nord d'Aboisso, le village de Biaka pourrait avoir plusieurs pertes en vies humaines, au sud, Allié kro risque d'être enseveli par la montée du niveau de la lagune couplée à l'onde de rupture. C'est le cas des campements de pêcheurs au bord de la lagune Aby à l'intérieur des limites du bassin versant de la Bia.

DISCUSSION

L'analyse des risques d'inondation liée à la rupture des barrages d'Ayamé montre que les populations en aval des ouvrages sont exposées à l'onde de submersion. Par ailleurs, les barrages d'Ayamé en plus d'être des dangers permanents dans la vallée, sont eux-mêmes exposés au principal aléa pris en compte dans ce travail, l'aléa hydrologique capable de faire céder les barrages. Les mêmes résultats ont été obtenus en France par la DREAL (2015) sur le barrage de Pont Rolland. La DREAL souligne l'importance de l'évacuation d'une crue de temps de retour de 1000 ans par la crête déversant, afin d'amener la retenue à une cote maximale de 24,78 m, considérée comme cote des plus hautes eaux. Cette action permet d'éviter un risque majeur (la rupture du barrage) liée à un aléa naturel (l'apport hydrologique trop élevé). Les études de danger comme celle de la DREAL susmentionnée montrent également le rôle dévastateur que peuvent avoir les crues en termes d'aléa naturel sur un barrage, les barrages sont constamment sous la pression des apports hydrologiques (Lamarsaude et al., 2011). Les aléas naturels sont de surcroit des phénomènes inévitables affectant les ouvrages. Au barrage de Cheylard, la solution proposée face à l'apport hydrologique a été de dimensionner l'ouvrage. La cote susceptible de mettre l'ouvrage en danger a été fixée comme la cote atteinte lors d'une crue d'occurrence 2000 ans, cote à partir de laquelle l'écoulement sur le seuil déversant n'est plus maîtrisé par les bajoyers latéraux (Vidal et al. 2011).

Autre facteur important de ce travail mené sur les barrages d'Ayamé, le relief qui sans la simulation de la rupture des ouvrages permet de déterminer le couloir inondable. La vallée inondable décrite par un modèle numérique de terrain est naturellement le couloir où sont enregistrés les impacts générés par la montée des eaux, puisque le couloir est essentiellement la zone d'écoulement d'un cours d'eau où le passage obligatoire des eaux pluviales. Kangah et al (2015), l'ont d'ailleurs vérifié avec une modélisation statique sur le bassin versant de Bonoumin-Palmeraie. Ils soutiennent que l'analyse du MNT du bassin-versant révèle que seuls les axes naturels de concentration et de ruissellement des eaux de pluie demeurent des zones susceptibles de subir une inondation. Dès lors, le Modèle Numérique de Terrain devient utile pour identifier des zones inondables. Pris comme principale donnée d'entrée pour l'étude de danger de la rupture de barrage, il permet une fois intégré dans un SIG d'apprécier la topographie de la vallée, délimitant la zone

inondable de la zone hors risque (Videment, 2011). L'analyse de la topographie par Félix (2011) pour l'analyse fonctionnelle des ouvrages hydrauliques à grand linéaire, montre que l'inondation en se manifestant épouse la forme de la vallée, l'eau s'écoulant toujours dans les zones les plus basses, avec l'incapacité de franchir les zones parfaitement élevées.

Toutefois, les aléas naturels (crue, relief) et technologiques (barrages), même réunis ne suffisent pas pour qu'il y ait risque, à part la seule destruction des ouvrages. Car en dehors de l'arrêt de la fourniture de l'énergie, les populations si elles ne vivent pas, ne mènent pas d'activités dans la vallée, le risque est fortement réduit. Ce facteur aggravant du risque (occupation humaine de la vallée) est marqué par une nette anthropisation de l'aval des ouvrages d'Ayamé. Dans ce cas, les enjeux ne sont plus que les barrages, mais aussi les populations et leur mode d'occupation du milieu. Félix et al (2011) montrent une différenciation de l'exposition face au risque d'inondation en cas de rupture des barrages dans les hautes alpes. D'un côté, les enjeux sont en dehors des axes d'écoulements principaux en cas de rupture sur l'amont du système ; d'un autre côté, ils sont très exposés en cas de rupture dans les secteurs où l'urbanisation est en arrière immédiat des ouvrages.

Sur le barrage de Pont Rolland, la DREAL (2015) précise les enjeux exposés au risque d'inondation consécutive à la rupture du barrage. Situés tous en aval de l'ouvrage, ces enjeux sont nécessairement la centrale hydroélectrique, les routes et ponts, les activités aquacoles, les populations et les bâtiments. Cette analyse se rapproche de celle que font Balouin et al (2011), l'estimation et la gravité des conséquences d'une rupture sur les enjeux humains sont très importantes pour justifier le risque d'inondation. De même, aux enjeux humains doivent être ajoutés les enjeux économiques et environnementaux.

Comme tout ouvrage de génie civil, les barrages peuvent connaître des défaillances de sécurité. Au cours de l'histoire, de maints incidents se sont produits lors de la construction ou de l'exploitation de ces ouvrages. Certains de ces incidents ont fini même par la rupture du barrage, due à différentes raisons. Ces incidents et ruptures de barrages se sont traduits par des conséquences de différentes envergures, allant des conséquences mineures à celles catastrophiques (Marche, 2008). Or la détermination de l'aléa inondation afin de prévenir le risque est difficilement réalisable, à moins qu'un recours à la modélisation hydraulique soit fait (Renzoni et al., 2005).

Dans le cas de cette étude, l'accident est simulé comme dans la plupart des études où le but est d'élaborer des outils de gestion efficiente des risques d'inondation en cas de rupture des ouvrages. Les résultats montrent clairement les conséquences sur l'économie, l'homme et l'environnement. Cela s'explique par le fait que les milieux en aval des barrages d'Ayamé soient marqués par la présence continue de l'homme, aussi le couloir inondable présente une topographie favorable à la propagation de l'onde de submersion. Ces résultats rejoignent ceux de Vidal et Touileb (2011) sur l'étude de danger du barrage de Cheylard (France). La modélisation d'une rupture par effacement total du barrage montre 400 personnes potentiellement impactées par l'onde de submersion en aval du barrage, dans un couloir parfaitement dessiné par la topographie de la vallée.

Mais, contrairement aux accidents modélisés, il est fortement probable que les limites aval de la zone d'effets ne soient pas connues de manière précise. Dans ce cas, La gravité des conséquences ne peut être, sauf données suffisamment précises, déterminée de manière quantitative (Thibault et al., 2011).

Dans une situation réelle, les travaux de Boudou (2016) réalisant la cartographie de la catastrophe de Malpasset, révèlent que la vallée du Reyran a été submergée par la rupture du barrage. En Algérie, les ruptures de 1830 et 1927 (barrage de Fergoug) causent la perte d'environ 250 personnes (Derdous, 2015). De même, l'exploitation des barrages notamment le déversement peut occasionner des inondations en aval.

Pour Ago (2001), ces inondations causent d'énormes dégâts matériels et de nombreuses pertes en vies humaines. Souvent des milliers d'hectares de champs sont submergés tant au Togo qu'au Bénin. À la centrale hydroélectrique de Nangbéto (Togo), les responsables ont indiqué qu'après le lâché effectué le 20 septembre 2003, plusieurs habitations et champs ont été inondés. Des routes ont été endommagées rendant la circulation très difficile et des zones inaccessibles. Et depuis la construction en 1987 par le Bénin et le Togo d'un barrage pour produire de l'électricité, irriguer 43 000 hectares de terres agricoles et réguler les crues, on note que des inondations parfois dramatiques sont encore enregistrées en aval, avec une grande ampleur à en croire les populations (Hachimou, 1995 ; Coyne et al., 1998 ; Ago, 2001).

Par ailleurs, bien qu'une rupture de barrage génère une onde de submersion dévastatrice pour l'aval, des propositions de solutions pour minimiser les impacts de l'inondation sont élaborées ou en cours d'élaboration. Le retour d'expériences est un outil qui aide dans ce sens à prévenir ces catastrophes. Il existe encore des outils pouvant aider à la prise de décisions en amont dans la gestion des ruptures de barrages. Les résultats présentés par Lakhdar et al (2010) dans le cadre de l'étude de rupture du barrage Ain Dalia "Souk-Ahras- Algerie" pour l'évaluation des conditions de sécurité de l'aménagement et des dangers potentiels en aval démontrent l'importance de prévoir une rupture de barrage à travers l'identification et la simulation de l'onde de crue en aval de la digue. Ils dégagent par la suite des recommandations pouvant aider les autorités à être au courant de l'éventuel risque qui peut se produire lors d'une possible rupture du barrage. Ainsi, les dégâts causés par l'onde de rupture du barrage Ain Dalia ne peuvent être que matériels, si les autorités ordonnent et facilitent la mise en sécurité des populations de la ville de Souk-Ahras, sur les points hauts de la vallée dont la topographie offre une bonne protection.

À leur suite, Derdous (2016) présente à travers les modèles HEC-RAS et MIKE le cas hypothétique du barrage des Zardezas. En effet, les cartes d'inondation proposées à partir de la modélisation permettent de faire une évaluation détaillée des conséquences de la rupture du barrage. Aussi, en plus de délimiter avec précision le territoire affecté et d'identifier ses caractéristiques, le travail proposé par Derdous offre à l'exploitant de l'ouvrage, à l'autorité locale et aux habitants de la vallée un outil de prévision certain sur le risque d'inondation.

La délimitation des zones inondées en cas de rupture d'un barrage et la détermination des caractéristiques de l'onde de rupture dans ces zones sont des outils essentiels pour la préparation des mesures d'alerte et d'évacuation adéquates. Elles sont définies sur la base d'une étude de rupture du barrage, à laquelle sont jointes des cartes d'inondation. Cette étude consiste, par des méthodes reconnues, en une évaluation détaillée des conséquences de la rupture au moyen de la délimitation précise du territoire affecté et de l'identification des caractéristiques de ce territoire.

L'un des outils de base de la gestion des barrages lorsque l'onde de submersion est connue est le Plan Particulier d'Inondation. En France, l'accident de Malpasset est à

l'origine de la mise en place des premières législations en matière de sécurité des barrages. Celles-ci imposaient pour la première fois aux propriétaires d'ouvrages la réalisation d'études de rupture de barrage. (Marche, 2008). Par exemple, le décret du 11 décembre 2007 en France relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques prévoit la réalisation d'études de dangers. Et dans ces études, il est possible de mettre en œuvre des démarches probabilistes d'analyse de risques (Carvajal et al.).

En outre, la gestion efficiente du risque d'inondation liée à la rupture de barrage nécessite une préparation aux évènements extrêmes basée sur des plans de secours. Le Delliou (2003) souligne que ces plans établis à partir des cartes d'inondation représentent la zone potentiellement submersible par la rupture d'un barrage. Les plans de secours montrant également les temps d'arrivée de l'onde de submersion définissent d'un autre côté les rôles et responsabilités de chaque acteur, entre autres l'exploitant, l'administration les services spécialisés et les populations.

Essentiellement, la présente étude ressort d'abord les causes et les impacts de l'inondation due à la rupture des barrages d'Ayamé. Puis une fois ces éléments connus, des outils de gestion intégrée pour une éventuelle catastrophe sont proposés.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif général de cette thèse est de déterminer l'étendue de la zone à risque d'inondation en cas de rupture des barrages d'Ayamé 1 et 2.

Au terme de la réflexion faite autour de cet objectif, il apparaît important de dresser le bilan et de dégager les axes pour les recherches futures.

Au commencement de ce travail, trois objectifs spécifiques à atteindre ont été définis. D'abord décrire les caractéristiques du bassin versant et des barrages d'Ayamé 1 et 2, ensuite évaluer les dommages potentiels d'une rupture des barrages d'Ayamé 1 et 2, puis élaborer un outil de gestion préventive du risque d'inondation liée à la rupture des barrages d'Ayamé 1 et 2.

Cette thèse contribue en premier lieu à une meilleure connaissance du bassin versant de la Bia et principalement de la partie aval qui se trouve en Côte d'Ivoire, l'autre partie étant essentiellement au Ghana. Le chapitre 3 présente les caractéristiques physiques et socio-économiques du bassin versant, puis le chapitre 4 insiste sur la présence des barrages d'Ayamé sur le fleuve et les impacts générés par l'exploitation des ouvrages dans un milieu où les pluies sont abondantes. Les barrages et le territoire qu'ils occupent jouent énormément sur la répartition de la population dans le bassin (le centre est moins peuplé que le nord et le sud). Dans le lit majeur ou sur les versants des deux rives de la Bia, les populations installées pratiquent plusieurs activités économiques, ce qui présente un risque d'inondation lorsque les éléments (lac, fleuve, barrages) se déchainent. En outre les collines les plus élevées du bassin concentrent plus de forêts et de plantations que d'habitants dans un milieu hydrologique dense en eau de surface et fortement arrosé par les pluies. Ainsi les barrages vieux de plus de 50 ans sont sous les menaces constantes des apports hydrologiques élevés et d'une défaillance technique. Cela oblige l'exploitant à effectuer des déversements presque tous les ans, contrairement à d'autres barrages en Côte d'Ivoire comme Kossou (aucun lâcher d'eau depuis sa mise en eau) et Taabo (les déversements ne sont pas fréquents). Les déversements ne sont jamais sans conséquences pour l'aval qui ne cesse d'enregistrer des pertes et dégâts matériels, sans compter les impacts sur l'environnement qui à ce stade ne sont pas toujours négatif à cause de la plus-value hydrologique pour la nappe par exemple. Les fortes précipitations qu'enregistre le

département d'Aboisso font que les apports sont ici élevés au niveau du Lac d'Ayamé qui enregistre également les apports des rivières qui coulent vers lui ; ce qui augmente par moment le risque de rupture du barrage d'Ayamé 1.

Par exemple, la simulation hydraulique avec une pluie exceptionnelle de 702 mm fait céder le tout premier barrage hydroélectrique construit en Côte d'Ivoire, qui emporte également le second en aval. Vu le mode d'occupation des territoires en aval (localités et plantations), les milieux en présence ne sortiront pas indemnes de la rupture d'Ayamé 1 et 2. La rupture de ces deux barrages causera l'inondation des territoires situés en aval.

Par ailleurs, une analyse prospective de la rupture des barrages a permis d'établir la cartographie des zones à risque et d'évaluer les impacts potentiels des inondations causées par la rupture des barrages. Cette analyse montre que le barrage d'Ayamé 1 qui cède libère le lac, l'eau qui s'écoule ne tarde pas à emporter le deuxième barrage en aval. Avant d'arriver à la lagune Aby, l'onde de submersion se propage suivant les pentes imposées par la topographie de la vallée, détruisant ou emportant bâtiments, biens matériels, routes, ponts, plantations, etc. Mais les pertes ne sont pas que matérielles, économiques et environnementales. L'inondation cause également des pertes en vies humaines, pour les populations restées volontairement dans les bâtiments en zone inondable et celles n'ayant pas pu se mettre à l'abri au moment de l'arrivée de l'onde de submersion.

Finalement, dans son parcours, l'onde de submersion est orientée selon la forme de la vallée. Les collines qui font obstacle à son écoulement pourront servir de refuge pour les populations déplacées. Par contre, au bord de la Bia sur plus de 500 m sur chaque rive, des milieux sont sous les eaux. L'onde générée par la catastrophe inonde ou emporte jusqu'à la lagune tout ce qu'elle trouve sur son chemin. En outre, la mutation d'une société rurale à une société urbaine, accroît le risque pour les populations et le milieu dans son ensemble. Ainsi, les populations en s'installant massivement dans la vallée augmentent le niveau de risque en aval des barrages, à travers l'enregistrement de plus de pertes en vie humaine et dégâts matériels.

Le couloir inondable et les impacts potentiels connus, un plan particulier de gestion a été proposé pour répondre à la catastrophe. Ce plan vient soutenir le mode de gestion du risque d'inondation liée à l'exploitation même des barrages d'Ayamé dans le département d'Aboisso. Aucun acteur, aucune ressource n'est à négliger dans la gestion de la crise.

Cependant, toutes les actions à mener une fois l'alerte donnée par l'exploitant sont ordonnées par le préfet du département qui déclenche le plan de secours ORSEC.

En d'autres termes, la connaissance de l'aléa inondation, la connaissance des enjeux en aval des barrages et surtout la disponibilité des cartes d'inondation des suites de la rupture des barrages permettent au préfet de département, à la protection civile, à l'exploitant ainsi qu'aux populations d'être dans les meilleures dispositions dès les premiers signaux d'alerte de rupture de barrage. Les populations sont aussitôt mises à l'abri dans une zone de sécurité nettement en hauteur des eaux. Pendant l'évènement, les secours s'activent en tenant compte du niveau du risque par rapport à la hauteur des eaux. Puis une fois l'évènement terminé, le retour à la normale dans le département se fait progressivement. Les sinistrés prennent soin d'éviter ou de traiter tous les milieux insalubres, voir pollués, notamment l'eau et les sols.

Ainsi, les moyens de prévention et de gestion de catastrophe se verront nécessaires et incontournables, avant, pendant et après la catastrophe, car rien ne devra être négligé pour limiter les dégâts causés par le sinistre. La ville d'Aboisso se verra certes privée de plusieurs équipements, mais des villages comme Biaka, Gnamienkro avec plus de constructions vulnérables pourraient perdre plus de vies humaines si l'alerte n'est pas respectée et la réponse tardive

Tout compte fait, la construction et la mise en eau des barrages d'Ayamé en 1959 et 1965 a contraint les populations à se déplacer pour certaines et à s'installer hors des zones à risque d'inondation pour d'autres. De nos jours, le constat est que les limites des zones à risque ne sont pas respectées. Tout le long du fleuve en dessous des barrages et ce jusqu'à l'embouchure avec la lagune Aby, l'anthropisation est bien marquée. Les populations se préoccupent plus des conséquences du déversement que par la manifestation d'une catastrophe qui pour elles a très peu de chance d'arriver. Les collines sont pour la plupart occupées par les cultures et, les milieux les moins inaccessibles ou très proches du fleuve, donc hydromorphes sont laissées à l'état naturel.

L'âge avancé des barrages fait qu'aujourd'hui les agents en poste n'arrêtent presque jamais de travailler. Les barrages sont en permanence visités par les agents en présence, mais aussi par des spécialistes venus d'ailleurs. En 2013, une maintenance générale avait

été menée, faisant appel aux anciens ayant participé aux montages des pièces pendant la construction.

Finalement cette étude présente une vision d'ensemble de la catastrophe étudiée dans le département d'Aboisso. Les barrages qui perturbent l'écoulement normal de la Bia, étant en Côte d'Ivoire, il importe à l'exploitant de veiller à leur bon fonctionnement afin d'éviter une catastrophe sans précédent. Mais une gestion inter-Etat serait judicieuse pour prévenir les crues en amont qui menaceraient les ouvrages et forceraient le gestionnaire à libérer en quantité importante le trop plein d'eau.

En outre, cette étude permet de relever certains points à développer et de dégager des perspectives.

Au niveau national

La Côte d'Ivoire est un pays où la réglementation en matière de catastrophe naturelle est peu existante. L'étude des catastrophes naturelles en Côte d'Ivoire dans un but préventif est récente.

Au niveau local

Le département d'Aboisso ne dispose pas d'un plan ORSEC défini, où sont répertoriées toutes les catastrophes naturelles et technologiques susceptibles de toucher le territoire. Dans le département, les zones inondables qu'importe la cause sont mal connues, il s'agit plus d'observations directes après que le sinistre soit constaté.

Responsabilité de l'exploitant des barrages

Avant cette étude, l'exploitant ignorait réellement les zones submersibles en aval de la retenue d'Ayamé. Il ne disposait pas d'un PPI pour le département d'Aboisso.

Responsabilité des populations

La croissance démographique de la ville d'Aboisso pousse certains opérateurs à aménager les espaces proches du fleuve, pour permettre aux populations de s'y loger. N'ayant pas véritablement conscience du risque de rupture de barrage, les populations s'installent dans ces zones à risque. Pourtant les récits de montées d'eaux au déversement devraient les interpeler.

Les niveaux d'échelles vus ici montrent l'absence d'intérêt particulier au risque de rupture de barrage. Les responsabilités sont bien connues contrairement au risque lui-même, ce qui laisse chacun dans sa position initiale.

Plusieurs études ont été menées en Côte d'Ivoire sur les inondations survenues ou celles pouvant se produire sur des sites du territoire, mais aucune étude n'a été dirigée sur les ruptures de barrage. Cette recherche n'est que le début d'une série d'études qui doivent être menées, où la CIE et l'État de Côte d'Ivoire devraient s'y impliquer entièrement ; cela est important pour la sécurité des populations en aval des barrages sur tout le territoire, mais aussi pour la réduction des risques économiques et environnementaux.

Depuis le début des travaux du troisième pont de la ville d'Aboisso, l'on a pu constater les montées de l'eau au niveau de l'ouvrage. Un pont est prévu sur le Bandama entre Tiébiéssou et Grand-Lahou, et sur ce fleuve sont construits deux barrages (Kossou et Taabo) avec des réservoirs de rétention. Qu'en sera-t-il si ces barrages (Ayamé, Kossou, Taabo) venaient à céder pendant ou après les travaux de construction de ces ouvrages ?

Dans le contexte du barrage d'Ayamé, le risque est pris en compte au moment et après la catastrophe, les plans de prévention n'existent pas et le développement se trouve fragilisé.

Récemment le barrage de Soubré d'une productivité de 1 170 GWh avec ces 3 groupes, dernier né des barrages hydroélectriques en Côte d'Ivoire a été mis en service en aval du barrage de Buyo sur le fleuve Sassandra. Un autre est en projet à Singrobo sur le Bandama. Le pays ne compte pas s'arrêter là, pourtant rien n'est fait pour prévenir les catastrophes liées à ces barrages.

Sur la Bia, un troisième barrage était prévu entre les rapides de Biaka et Aboisso, mais l'extension de la ville d'Aboisso a fait avorter le projet. Cela est-il suffisant, que font les différents acteurs cités plus haut pour prévenir les catastrophes ?

Ne pas profiter des richesses naturelles du territoire est un véritable manque à gagner pour l'économie ivoirienne et enferme les régions dans le sous-développement, car malgré tout, tous profitent de la construction des barrages hydroélectriques.

Les perspectives de recherche

Ce travail s'est strictement penché sur l'inondation en aval par suite d'une catastrophe aux barrages d'Ayamé. Mais une catastrophe peut en cacher une autre.

Les usines d'Ayamé stockent des produits et déchets (principalement les huiles) susceptibles de créer des catastrophes écologiques. Il paraîtrait urgent d'étudier à la suite de ces travaux, ces catastrophes dans une gestion préventive.

Au-delà des préoccupations émises ici, la gestion des risques doit interpeller plus d'un chercheur. La Côte d'Ivoire compte plus de 5 barrages hydroélectriques et la plupart de ces barrages ne disposent pas d'une cartographie des zones submersibles. Plus encore, les régions d'accueil ne disposent pas de plan de secours pour les catastrophes majeures.

Cette étude révèle l'urgence en la matière. Toutes les installations hydroélectriques sur le territoire ivoirien doivent réaliser ces études qui devront être contenues dans un rapport final ORSEC établi pour tous les départements en Côte d'Ivoire. Ce document doit ensuite être connu par tous les acteurs de ces départements, il doit surtout être mis à la disposition des populations pour qu'elles ne s'installent pas n'importe où et n'importe comment.

BIBLIOGRAPHIE

ABBOTT (M-B.,) 1991: Hydroinformatics – Information Technology and the Aquatic Environment. Avebury Technical, Aldershot, U.K. XIX, 6, 17. 192p.

ABE (J.,) 2005 : Contribution à la connaissance de la morphologie et de la dynamique sédimentaire du littoral ivoirien (cas du littoral d'Abidjan). Essais de modélisation en vue d'une gestion rationnelle. Thèse d'Etat, Université d'Abidjan-Cocody, 337p.

ABHAS (J.) BLOCH (R.) LAMOND (J.,) 2012 : villes et inondations, guide de gestion intégrée du risque d'inondation en zone urbaine pour le XXI siècle, résumé à l'intention des décideurs, Banque mondiale, Washington, 63p.

ADJAKPA (T.,) 2016 : Gestion des Risques Hydro-pluviométriques dans la Vallée du Niger au Bénin : Cas des Inondations des Années 2010, 2012 et 2013 dans les Communes de Manlanville et de Karimama. Thèse de doctorat de l'Université d'Abomey-Calavi. 288p.

ADOU (A.,) 2015 : Dynamiques, mutations spatiales et gestion des milieux naturels sur le littoral Alladjan (sud-est ivoirien) de 1990 à 2008. Abidjan, IGT, thèse de doctorat unique 313p.

AGO (E,) PETIT (F) et OZER (P.,) 2001 : Analyse des inondations en aval du barrage de Nangbeto sur le fleuve Mono (Togo et Bénin) Geo-Eco-Trop, 2005, 29 pp1-14.

AGO (E.,) 2005 : Analyse des risques d'inondation en aval du barrage de Nangbéto au Togo et au Bénin. Mémoire inédit. Université de Liège / Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Belgique. 40p.

ALLA (D.,) 2008 : « Les inondations à Grand Bassam : un risque permanent » in Géographie du littoral de Côte d'Ivoire. Eléments de réflexions pour une politique de gestion intégrée. La Clonerie, Saint-Nazaire, pp 221-236.

ALLA (D.,) 2013 : Les risques naturels dans l'agglomération d'Abidjan (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat d'Etat ès - sciences humaines, Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, 385p.

ANCEY (C.,) 2018 : Hydraulique à surface libre, Crues, vagues, et ruptures de barrage
Phénomènes de propagation, outils de simulations, applications, école polytechnique de
Lausanne, Suisse, 234p.

**ANTOINE (J-M,) DESAILLY (B,) GALTIE (J-F,) GAZELLE (F,) PELTIER A et
VALETTE (P.,) 2008** : Les mots des risques naturels, Presses Universitaires du Mirail,
Toulouse, 128p.

ANTONINI et RAHN., 1993 : Location and assessment of Hurricane Andrew damaged
vessels on Biscayne Bay and adjoining shore areas, National Sea Grant Library, Gainesville,
University of Florida, 58p.

ATA (R.,) 2007 : développement de méthodes particulières pour la résolution des
écoulements à surface libre. Thèse de doctorat, école de technologie supérieure Montréal,
198p.

AVAHOUNLIN (R,) LAWIN (A,) ALAMOU (E,) CHABI (A) et AFOUDA (A.,) 2013 :
« Analyse fréquentielle des séries de pluies et débits maximaux de l’Ouémé et estimation
des débits de pointe », European journal of scientific research, vol.107, N° 3, july, pp.355-
369.

BAILLY (A.,) 1996 : Environnement, risques naturels, risques de sociétés, in Risques
naturels, risques de sociétés. Paris, Economica, pp 1-5.

BALOUIN (T) et LAHOZA (A.), 2011 : conséquences d’accidents majeurs de barrages :
état des réflexions de l’INERIS pour l’évaluation de la gravité, 15p.

BARROCA (B,) HUBERT (G,) DIAB (Y.,) 2007 : Vulnérabilité : une clé de lecture du
risque inondation, HAL Id: hal-00180315, 8p.

BENHATTAB (K,) BOUVIER (C,) MEDDI (M.,) 2014 : Analyse fréquentielle
régionale des précipitations journalières maximales annuelles dans le bassin 1
hydrographique - Chélif, Algérie, revue des sciences de l’eau, volume 27, numéro 3 pp.
189-203.

BOCCO (G,) SANCHEZ (R,) et RIEMANN (H.,) 1995 : GIS affects good planning
efforts, GIS World vol. 8, n°. 2, pp. 58-60.

BONNIFAIT (L.,) 2005 : Développement de courbes submersion-dommages pour l'habitat résidentiel québécois. Thèse de Doctorat Es-Sciences. Université du Québec INRS-ETE. 117p.

BOUCHEHED (A.,) 2017 : Evaluation des risques d'inondations associées à la rupture du barrage à l'aide du modèle telemac_2d et système d'information géographique : cas du barrage keddara à boumerdese, 158p.

BOUDOU (M.,) 2015 : Monographie de la rupture du barrage de Malpasset, 2 décembre 1959, 47p.

BOURRELIER (P,) DENEUFBOURG (G,) DE VANSSAY (B.,) 2000 : Les catastrophes naturelles : le grand cafouillage. Paris, Col. Osman Eyrolles, 262 p.

BRUEL (F.,) 2012 : La catastrophe de Malpasset en 1959, Sigma, "Catastrophes naturelles et techniques", n°1/2002, 5p.**BRUNET (R,) FERRAS (R.) et THÉRY (H.,) 2001** : Les mots de la géographie, dictionnaire critique. Montpellier-Paris, RECLUS, La documentation française, 3^{ème} édition, 502p.

BRUNNER (G.,) 2016 : 2D Modeling and Mapping with HEC-RAS 5.0, 107p.

CABANNE (C.,) 1992 : Lexique de géographie humaine et économique. Paris, Dalloz, 2^{ème} édition, 449 p.

CARVAJAL (C,) PHILIP (G,) BECUE (J-P,) PEYRAS (L,) FELIX (H) et ROYET (P.,) 2011 : Apport des méthodes de la sûreté de fonctionnement et de la fiabilité dans le cadre des études de dangers exemple d'application sur le barrage du xoldocogaina, Colloque organisé par le CFBR et l'AFEID, Pratique des études de danger, Thème 1 – Méthodologie – une méthode d'estimation de la probabilité des accidents majeurs de barrage – le nœud papillon , pp41-52.

CAVALLIN (A.) et FLORIS (B.,) 1995 : GIS potential for regional and local scale ground water hazard assessment, In A. Carrara; F. Guzzetti, Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards, Kluwer Academic , Netherlands, 1995 pp. 259-272.

CHABAL (J-P) et BORDES (J-L.,) 2009 : Puentes, 1802 : la rupture du plus grand barrage du monde, ou le double échec d'Antonio de Robles le rapport Betancourt, volume x, pp151-167.

CHARLIER (J-B.,) 2007 : Fonctionnement et modélisation hydrologique d'un petit bassin versant cultivé en milieu volcanique tropical, Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier II, 247p.

CHIGANNE (F.,) 2010 : Prévission de l'hydrogramme de rupture par submersion d'un barrage en enrochement avec masque amont de béton. Mémoire de maîtrise école polytechnique de Montréal, 175p.

CHOW (V.,) 1953: Frequency analysis of hydrologic data with special application to rainfall intensities. University of Illinois. Engineering Experiment Station. Bulletin ; no. 414. 80p.

CLAVE (O) et ROSIN-CORRE (N.,) 2013 : Sécurisation de l'évacuation des crues au barrage de Kariba et gestion de la retenue. Colloque du Comité Français des Barrages Réservoirs, Modernisation des barrages, 4-5 décembre 2013, Chambéry, pp253-256.

CŒUR (D.,) 2008 : La plaine de Grenoble face aux inondations. Genèse d'une politique publique du XVIIème au XXème siècle » Versailles, éditions Quare, 310p.

Comité Français des Barrages et Réservoirs Association Française pour l'Eau, l'Irrigation et le Drainage., 2011 : Pratiques des Etudes De Dangers des barrages, colloque organisé par le CFBR et l'AFEID, Lyon, 326p.

Comité Français des Barrages et Réservoirs., 2013 : Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages, 166p.

Commission Internationale des Grands Barrages 2011 : constitution statuts, 21p.

Conseil Economique, Social et Environnemental., 2016 : Les territoires face aux catastrophes naturelles : quels outils pour prévenir les risques, les études de CESE, France, 112p.

CORON (L.,) 2013 : Les modèles hydrologiques conceptuels sont-ils robustes face à un climat en évolution ? Diagnostic sur un échantillon de bassins versants français et australiens, thèse de Doctorat, Paris Tech, 365p.

COVA (T) et CHURCH (R.,) 1997: Modelling community vulnerability using Gis, in International Journal of Geographical Information Systems, vol. 11, pp. 763–784.

COYNE et BELLIER., 1998 : Aménagement hydroélectrique d'Adjarala : étude d'impact sur l'environnement. 3 tomes *critiques*. Montpellier-Paris, RECLUS, La documentation française, 3^{ème} édition, 502p.

CUTTER (SL,) BORUFF (B) et SHIRLEY (W.,) 2003: Social Vulnerability to Environmental Hazards. Social Science Quarterly 84(2), pp242-261.

D'ERCOLE (R) THOURET (J-C), ATSE (J-P,) DOLLFUS (O) et GUPTA (A.,) 1994 : Croissance urbaine et risque naturels : présentation introductive, In bulletin de l'association des géographes français, 72^{ème} année, 1995-4 (septembre), pp 311-338.

DA COSTA (K.S.) et KONAN (K.F.,) 2005 : Lac Kossou : Potentiel halieutique et Modalités d'un développement durable de la pêche. FAO/PMEDP, Projet Pilote Pêche Kossou GCP/INT/735/UK, Rapp. Expertise, 200p.

DANTEC (G,) GALIBERT (T) et PIPIEN (G.,) 2018 : Retours d'expérience des inondations, Propositions d'un dispositif d'organisation et d'un guide méthodologique, ministère de la transition écologique et solidaire, France, 154p.

DANVIDE (T.,) 2015 : gouvernance des politiques de planification urbaine et gestion des inondations à Cotonou (bénin), Thèse Unique de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Université Paris 8 262p.

DAUPHINÉ (A,) 2001 : Risques et catastrophes. Observer, Spatialiser, Comprendre, Gérer. Paris, Armand Colin, Coll. U, 264 p.

DE SILVA, PIDD (M) et EGGLESE (R.,) 1993 : Spatial decision support systems for emergency planning : An operational research geographic information systems approach to evacuation planning, in International Emergency Management And Engineering Conference, March 29-April 1, 1993, Key Bridge Marriott, Arlington, Virginia, 1993, pp. 130-133.

DELGADO (J-L.,) 2015 : Un retour d'expérience « global » suite aux inondations en Languedoc-Roussillon à l'automne 2014, Journée technique du 06 octobre 2015 : Le retour d'expérience post-catastrophe pour améliorer la résilience des territoires, 21p.

DEMONFAUCON (A.,) 2011 : Les périmètres irrigués au Burkina Faso et leur vulnérabilité aux risques d'inondations 30p.

DERDOUS (O.,) 2016 : Conditions d'écoulement à l'aval d'un barrage en cas de rupture de la digue-Application aux cas Algériens, Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba Algérie, 144p.

DEROO (L,) JIMENEZ (B.,) 2011 : Notes sur l'accidentologie des barrage-poids Colloque CFBR-AFEID : Études de dangers, 18p.

DEWALS (B,) ERPICUM (S,) ARCHAMBEAU (P,) PIROTTON (M.,) 2009 : Modélisation numérique 2d unifiée des écoulements dans une retenue, sur l'évacuateur de crue et en aval, 8p.

DIALLO (D.,) 2010 : Modélisation mathématique et simulation numérique de l'hydrodynamique : cas des inondations en aval du barrage de Diama. Thèse de Doctorat, Université Gaston Berger Saint-Louis du Sénégal, 167p.

Direction générale de l'Urbanisme de l'Habitat et de la Construction (France). 2005 : Inondations guide d'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments vis-à-vis de l'inondation, 37p.

Direction Régional de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement. 2014 : Rapport de présentation de la cartographie des surfaces inondables et des risques d'inondation sur le Territoire à Risque important d'Inondation de l'agglomération Mulhousienne, France), 39p.

Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (France), 2015 :Le Plan de Gestion des Risques d'Inondation (PGRI) Adour Garonne projet 2016-2021, 4p.

Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement., (2015) : Barrage de pont Rolland, étude de dangers France Bretagne (France), 146p.

Diren Rhône-Alpes., 2004 : Les risques inondations en Rhône-Alpes : de la connaissance à la prévention, 36p.

DJEMILI (L.) BENABELKADER (S.) REZGUI (N) et CHIBLAK (M.), 2010 : Etude de rupture du barrage Ain Dalia Souk-Ahras Algérie pour l'évaluation des conditions de sécurité de l'aménagement et des dangers potentiels en aval, journal international network environmental management conflits (1)1 pp275-282.

DONALD (M) et LANGRIDGE-MONOPOLIS (J.), 1984 : "Breaching Characteristics of Dam Failures, "Journal of Hydraulic Engineering, vol. 110, no. 5, p. 567-586.

DORIDOT (M.), GARRY (G.), 1987 : Application de la télédétection à l'évaluation du risque d'inondation. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, 1987, vol. . Risques Naturels, N° 150-151, pp169-184.

DROUIN (A.), 2008 : « Élaboration d'un modèle de simulation des niveaux d'inondation à partir d'un SIG et application à un site : rivière Saint-François à Sherbrooke ». Environnement Urbain / Urban Environment, 2 : p33-49.

DUBOIS-MAURY (J) et CHALINE (C.), 2004 : *Les risques urbains*. SEJER/Armand Colin, Coll. U, 208p.

DURVILLE (J-L,) MAKALA (A,) MARBOUTY (D,) DORISON (A,) MAGRUM (M,) 2014 : Audit de la mise en œuvre de la politique de prévention des **risques naturels** et technologiques dans la région Nord - Pas-de-Calais, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie : Ministère de l'économie, de l'industrie et du numérique : Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, France, 99p.

ELDIN (M.), 1971 : Le climat. In : Le milieu naturel de la Côte-d'Ivoire. Paris, Mém. ORSTOM, n°50, pp73-1 08.

FALLOT (J-M) et HERTIG (J-A,) 2013 : « Détermination des précipitations extrêmes en Suisse à l'aide d'analyses statistiques et augmentation des valeurs extrêmes durant le 20^{ème} siècle », Mém. Soc.vaud. Sc. nat. 25, pp. 23-34.

Fédération Internationale des Sociétés de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge., 2009 : Cinq ans après le tsunami-Rapport 2004 – 2009, 40p

FELIX (H.), BEULLAC (B.), TOURMENT (R.), MERIAUX (P.), PEYRAS (L.,) 2011 : Méthodologie pour l'analyse fonctionnelle des ouvrages hydrauliques à grand linéaire. Colloque, pratique des études de dangers des grands barrages. Thème 1 – Méthodologie – Modélisation des conséquences des événements retenus dans les études de dangers et expression des gravités, pp71-89.

FREAD (D.L.), LEWIS (J.M.,) 1998: NWS FLDWAV Theoretical Description and User Documentation, Hydrology Research Laboratory - Office of Hydrology National Weather Service (NWS), NOAA, 335p.

GAILLARD (S.), HARTER (H.), PECH (P.,) 2010 : Catastrophes et risques urbains. Nouveaux concepts, nouvelles réponses, Lavoisier, Paris, 273p.

GEE (D.M) et BRUNNER (G.W.,) 2005: Dam break flood routing using HEC-RAS and NWS FLDWAV. In Anonym, 2005 World Water and Environmental Resources Congress, May 15- 19 Anchorage, AK, United States, American Society of Civil Engineers, p 401.

GEOS INGENIEURS CONSEILS., 2015 : Étude de l'onde de rupture barrage de pont Rolland, 26p.

GHIDAGLIA (J-M) et RITTAUD (B.), 2004 : La simulation numérique, La recherche, n°380, pp 73-76.

GIODA (A.), SERRANO (C.), FORENZA (A.,) 2002 : Les ruptures de barrages dans le monde : un nouveau bilan de Potosi (1626, Bolivie), La houille blanche /n°4/5, p165-170.

GIRARD (G.), SIRCOULON (J) et TOUCHEBEUF De (L P.,) 1970 : Aperçu sur les régimes hydrologique de Côte d'Ivoire, ORSTOM, 91p.

GODONOU (J.,) 2013 : Évaluation des risques environnementaux des inondations de 2010 au Bénin : cas des communes de Lalo, Dogbo, Lokossa, 12p.

GOULA (B.T.), KONAN (B.), BROU (Y.T.), SAVANÉ (I), FADIKA (V) et SROHOUROU (B.,) 2007 : « Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale : cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois Log normale et de Gumbel », Journal des Sciences Hydrologiques, 52(2), pp. 49-67.

GUERRIN (J.,) 2014 : Une inondation négociée ? Politique d'un risque naturel sur le Rhône. Thèse de doctorat, Université Montpellier 1, 557p.

HACHIMOU (I.,) 1995 : Evolution de la Boca del Rio depuis la construction du barrage de Nangbéto et son impact sur le fonctionnement du système lagunaire du sud-ouest béninois, Rapport inédit, 26 p.

HANGNON (H,) DE LONGUEVILLE (F) et OZER (P,) 2015, « Précipitations extrêmes et inondations à Ouagadougou : quand le développement urbain est mal maîtrisé », XXVII^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège, pp. 497-502.

HARIDI (F-Z.,) 2013 : Évaluation de l'impact social, économique et environnemental des risques majeurs d'inondation : cas des villes algériennes, 14p.

HARVEY (D.P.,) 2002: A Generic Modelling Framework Component for Hydro in formatics Systems. PhD thesis, University of Bridtol, Bristol, U.K. xix, 193 p.

Haut Conseil de la coopération internationale et Croix-Rouge française
La prévention des catastrophes naturelles juin 2004, 59 p.

HENINE (H.,) 2015 : Interfaçage entre un modèle hydrologique / modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluent les SIG, Mémoire de magister en hydraulique, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 114p

HENRY (J-B) 2004 : Systèmes d'information spatiaux pour la gestion du risque de plaine, Thèse de Doctorat, Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université Louis Pasteur - Strasbourg I. 238 pages, 268 pp.

HERAGMI (A.,) 2009 : Choix et conception de l'organe de l'étanchéité des barrages en terre barrage El-agrem jijel. Diplôme de magister. Annaba, 94p.

HERVOUET (J-M.,) 2003 : Hydrodynamique des écoulements à surface libre. Modélisation numérique avec la méthode des éléments finis. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées. 311p.

HICHAM (H.,) 2005 : Gestion des risques naturels : Une approche fondée sur l'intégration des données, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, INSA-Lyon. 180p.

HOSTACHE (R.), MATGEN (P.), SCHUMANN (G.), PUECH (C.), HOFFMANN (L) et PFISTER (L.) 2009: Water level estimation and reduction of hydraulic model calibration uncertainties using satellite SAR images of floods. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 47(2): pp 431-441.

HOSTACHE (R.), PUECH (C) et RACLOT (D.,) 2005 : Caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellites RADAR. *Cybergeo: European Journal of Geography*, 13p.

IGOUZAL (M) et MAHLOUHI (A.,) 2003 : Contribution à la gestion de la retenue d'un barrage réservoir sur la rivière Sebou (Maroc) à l'aide d'un modèle hydraulique, *Revue des sciences de l'eau*, p443-458.

JACOD (A) et SOLTERMANN (Y.,) 2015 : Utilisation du SIG pour une analyse de la vulnérabilité au risque inondation, 11p.

JAEGGI (M.,) 2003 : Etude du fonctionnement physique du lit du fleuve Var, Syndicat mixte d'études de la basse vallée du Var, rapport d'étude, 118p.

JAMES (B.), PAPA (H,) et TOVMASYAN (K.,) 2008 : La prévention des catastrophes : le rôle de l'UNESCO, 50p.

KANGAH (A) et ALLA (D.,) 2015 : 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) *Geo-Eco-Trop.*, p. 297-308.

KAO (C.,) 2008 : Une hydrologie des versants à nappes superficielles drainées : approches multiprocessus et multi-échelles, Mémoire établi pour l'Université Pierre et Marie Curie UFR Sciences de la Terre et Évolution des Milieux Naturels, 169p.

KERT (C.,) 2008 : Rapport sur l'amélioration de la sécurité des barrages et ouvrages hydrauliques. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 201p.

KONAN (K.,) 2008 : Conservation de la diversité végétale et activités humaines dans les aires protégées du sud-forestier ivoirien : exemple du parc national d'Azagny. Abidjan, IGT, thèse 270p.

KONATE (S) et KAMPMANN (D.,) 2010 : Atlas de la Biodiversité de l'Afrique de l'Ouest, Côte d'Ivoire. Tome 3, volume3, 560p.

KOUAKOU (A.,) 2014 : pression humaine sur le parc d'Azagny de 2000-2012. Abidjan, IGT, master 100p.

KOUASSI (K,) DEME (M,) KONAN (K,) YAHIRI (B,) KONÉ (D,) SANCHEZ (M) et KOUAME (A.,) 2016 : Modélisation du fonctionnement hydrodynamique de l'embouchure du fleuve Bandama, Grand-Lahou, Côte d'Ivoire, 10p.

La Commission mondiale des barrages., (2000) : Barrages et développement : un nouveau cadre pour la prise de décision. Chapitre 1 : Eau, développement et grands barrages, 36p.

LAHSAINI M et TABYAOUI (H.,) 2018 : Modélisation Hydraulique Mono Dimensionnel Par HEC RAS, application sur L'oued Aggay (Ville De Sefrou), European Scientific Journal June Vol.14, No.18, pp1857- 7431.

LAIGLE (D.,) 2013 : Risque d'obstruction des cours d'eau et débâcles brutales, 21p.

LAMARSAUDE (P) et LE DELLIUO (P.), 2011 : L'utilisation par les services de contrôle des études de dangers dans le contrôle des barrages. Colloque, pratique des études de dangers des grands barrages. Thème 4 – Apports et bilans des EDD, pp 259-263.

LANG (M.,) 2008 : Méthodes de prédétermination des pluies et crues extrêmes, 3ème Rencontres Météo/Math Appli, Toulouse, 48 p.

LASSAILLY -JACOB (V.,) 2009 : Des « réfugiés » environnementaux en lien avec les grands barrages (Afrique de l'Ouest, Egypte), Canaux et barrages, Université de Savoie-Chambéry, p21.

LASSAILLY-JACOB (V.,) 1980 : Espace utile et transfert de population en amont du barrage de Kossou (Côte d'Ivoire), CNRS éditions, 212 p.

LASSAILLY-JACOB (V.) 1983 : « Grands barrages africains et prise en compte des populations locales », *L'Espace Géographique*, Paris, n°1, pp. 46-57.

LAVENU (G.) 2015 : La 3D dans la plateforme ArcGIS, Atelier Technique SIG 7 et 8 octobre Versailles, ESRI France, 34p.

LE DELLIOU (P.) 2003 : L'analyse des risques appliquée aux barrages, 14p.

LOPEZ (M.) BEGUERIA (S) et GARCIA-RUIZ (J) 2002, « Influence of the Yesa reservoir on floods of the Aragón River, central Spanish Pyrenees », *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(4), pp. 753–762.

LUONG (A.) 2012 : Évaluation des risques d'inondations dans le bassin du fleuve huong, province de Thua thien hue, centre du Vietnam, université du Québec à Montréal, 325p.

MAIDMENT D., 1993: Handbook of hydrology. New York, USA: McGraw-Hill Inc. 1424 p.

MANCHE (Y.) 2000 : Analyse spatiale et mise en place de systèmes d'information pour l'évaluation de la vulnérabilité des territoires de montagne face aux risques naturels. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble I, France, 106p.

MANCHE, (Y.) 1997 : Propositions pour la prise en compte de la vulnérabilité dans la cartographie des risques naturels prévisibles, *revue de géographie alpine*, 85-2, pp49-62.

MARCHE (C.) 2008 : Barrage : crues de rupture et protection civil. Presses internationales polytechniques. Canada, 388p.

MARTELLI (K.) 2011, Vulnérabilité des milieux urbanisés face aux impacts physiques des écoulements volcaniques, des lahars et des crues associées : le cas de la ville d'Arequipa (sud du Pérou) Rapport d'étude, 65p.

MATHLOUTHI (M.) GHALI (A) et LEBDI (F.) 2011 : « Impact des pluies extrêmes sur la genèse et l'amplification des glissements de terrain dans le nord de la Tunisie », *Revue scientifique et technique LJEE*, N°19, décembre 2011, p p. 76-89.

MCGWIRE (K.) ESTES (J.) et FORESMAN (T.), 1987: Coordinating hazardous waste management activities using geographical information systems, in *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. 1, 1987, pp. 359–377.

MELEDJE (N.), 2016 : Modélisation de la dynamique hydrologique et du flux des sédiments dans le lac du barrage hydroélectrique d'Ayamé 1. Thèse, Université Nanguy Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire, 267 p.

Memento du maire et des élus locaux, prévention des risques d'origines naturelle et technologique., 2012 : Retour d'expérience, 6p.

MERCIER (Y.), 2016 : Phénomène vague-submersion marine, Météo France ; 53p.

MEYBECK (M.) MARSILY (G.D.) et FUSTEC (E.), 1998 : La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé. Programme PIREN-Seine, Université Paris VI, 749 p.

MEYLAN (P.) FAVRE (A-C) et MUSY (A.), 2008 : Hydrologie fréquentielle, une science prédictive, 1ère Edition, Presse Polytechniques et Universitaires Romandes, col. Science et ingénierie de l'environnement, 174 p.

MILLET (L.), 1968 : Panorama des sciences humaines. Paris, Bordas/Mouton, 176p.

MILOGRANA (J.) BAPTISTA (M.) BARRAUD (S) et CAMPANA (N.), 2010 : Choix de mesures permettant le contrôle des inondations en zones urbaines – un outil d'aide à la décision, 10p.

Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie., 2011 : Première évaluation nationale des risques d'inondation, République Française, 9p.

Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie., 2010 : Plan de prévention des risques prévisibles Provence-Alpes-Côte d'Azur, 90p.

Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (France), 2013 : Plans de Gestion des Risques d'Inondation à l'échelle du district : des TRI aux stratégies locales, 45p.

Ministère français de l'écologie et du développement durable (2014), Les ruptures de barrages Décembre 2004, 24p.

Mise en place d'un cadre de dialogue national, multi-acteurs sur les barrages et le développement durable au Togo., 2007, 84p.

MONNIER (Y.,) 1974 : Découverte aérienne de la Côte d'Ivoire, Edition photo Ivoire, Université d'Abidjan, 220p.

MORA-CASTRO (S et SABORÍO-BEJARANO J., 2012 : Évaluation de l'état du barrage, des digues, du réservoir et des structures hydrauliques du système de Maga-logone-vrick, rapport technique, république du Cameroun, 45p.

MORIN (M.,) 2008 : Concept de base en sécurité civile. Québec, Ministère de la Sécurité publique, 48p.

MOULIN (L.,) 2003 : Prise en compte des barrages-réservoirs dans un modèle pluie-débit global, DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie, Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Sud, École des Mines de Paris et École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 58p.

MULLER (A.,) 2006 : Comportement asymptotique de la distribution des pluies extrêmes en France. (Thèse de doctorat ès Science). Université de Montpellier II, France, 247 p.

N'CHO (L,) ALLA (D,) BROU (L.,) 2018 : Analyse fréquentielle du fleuve Bia pour une gestion préventive des crues en aval du barrage d'Ayamé 1. Baluki, 2018, n°4, Vol. II, p 1-16.

N'CHO (L,) ALLA (D,) N'KPOME (S,) BROU (L.,) 2020 : Rupture des barrages hydroélectriques d'Ayamé et impacts potentiels en aval : cas de la ville d'Aboisso en Côte d'Ivoire, Revue Ivoirienne de Géographie des Savanes, Numéro Spécial Janvier 2020, ISSN 2521-2125, pp. 25-40.

NEWKIRK (R.-T.,) 1993: Simulation for risk analysis: A challenge for GIS, in International Emergency Management and Engineering Conference, March 29-April 1, 1993, Key Bridge Marriott, Arlington, Virginia, pp. 62-65.

NEYRON (P.,) 1961 : Le Drame de Malpasset, Éditions du Scorpion, Paris, 222p.

NGO (A-T.,) 2014 : Évaluation environnementale du risque d'inondation dans le delta du fleuve Ha Thanh (Centre Viêt-Nam), THÈSE de doctorat, UNIVERSITÉ D'ORLÉANS, 429p.

NYALETASSI (K.,) 2014 : Exposé de Procédés Généraux de Construction, 42p.

Observatoire régional eaux et milieux aquatiques en Provence-alpes côte d'azur (2014) : Les bassins versants topographiques des cours d'eau de surface en région paca, qu'est ce qu'un bassin versant, 1p.

ONIBON (H,) OUARDA (T,) BARBET (M,) BOBEE (B,) BRUNEAU (P,) ST HILAIRE (A.,) 2004 : « Analyse fréquentielle régionale des précipitations journalières maximales annuelles au Québec », Canada, Hydrological Sciences-Journal des Sciences Hydrologiques, 49(4) août 2004, pp. 717-735.

OZER (P,) HOUNTONDI (Y,) GASSANI (J,) DJABY (B,) DE LONGUEVILLE (F.,) 2014 : « Évolution récente des extrêmes pluviométriques en Mauritanie (1933-2010) », XXVII^{ème} colloque de l'association internationale de climatologie, 2-5 juillet 2014, Dijon (France), pp. 394-400.

PANTHOU (G.,) 2014 : Analyse des extrêmes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et de leurs évolutions au cours des 60 dernières années, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 283p.

PAQUIER (A.,) 2002 : Modélisation des écoulements en rivière en crue : pour une utilisation adaptée des équations de Saint-Venant. Document de synthèse en vue de l'obtention d'une habilitation à diriger des recherches ; université de Claude Bernard Lyon 1, 44p.

PARENT E., 1991 : Élaboration des consignes de gestion des barrages – réservoirs, Mémoire de dissertation doctorale présenté pour l'obtention du diplôme de Docteur de l'école nationale des ponts et chaussées, Université de Paris-Créteil, 216p.

PERRIN (F.), SAUZEY (P.), MENORET (B) et ROCHE (P-A.,) 2017 : Inondations de mai et juin 2016 dans les bassins moyens de la Seine et de la Loire, Rapport CGEDD n° 010743-01 et IGA n° 16080-R, 101p.

PIGEON (P.,) 2000 : De l'intérêt de la démarche phénoménologique en géographie des risques, in la géographie des risques dits naturels entre géographie fondamentale et géographie appliquée, cahiers savoisiens de géographie, p 11.

POUPART (M.), CASTANIER (G.,) 1990 : Plan particulier d'intervention « barrage » synthèse des études de danger à EDF, 12p.

Programme GIRE., 2001 : État des lieux des ressources en eau du Burkina Faso et de leur cadre de gestion, 252p.

PROVITOLLO (D.,) 2003 : Modélisation et simulation de catastrophe urbaine : le couplage de l'aléa et de la vulnérabilité, SIRNAT-JPRN Orléans, 10p.

PUECH (C.,) 2000 : Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes. Mémoire d'habilitation à diriger la recherche, ENGREF/CEMAGREF, Montpellier, 100 p.

PULVIRENTI (L.), PIERDICCA (N.), CHINI (M.), GUERRIERO (L.,) 2011: An algorithm for operational flood mapping from Synthetic Aperture Radar (SAR) data using fuzzy logic. Natural Hazards and Earth System Science, 11(2), pp 529-540.

REIZER (C.,) 1967 : Aménagement piscicole du lac artificiel d'Ayamé. Centre Techniques Forestières. Publication n°30, 107 p.

RENZONI (J), PAQUIER (A) et COGOLUEGNES (A.,) 2005 : Un outil d'estimation rapide du risque d'inondation à l'aval d'une digue -Méthode et premières étapes de validation. Ingénieries - N° Spécial – pp47-53.

Report of the Interagency Floodplain Management Review Committee., 1994 : Sharing the challenge: floodplain management into the 21st century. Washington D.C, 272p.

RITTER (A.,) 1892 : "Die Fortpflanzung der Wasserwellen." Vereine Deutscher Ingenieure Zeitschrift, Vol. 36, No. 2, 33, 13 Aug., pp. 947-954.

ROCHE (L.,) 2010 : la perception du risque d'inondation par les habitants des zones inondables, Projet de fin d'étude, École polytechnique de l'université de Tours, 63p.

ROUZEAU (M,) MARTIN (X) et PAUC (J-C.,) 2010 : Retour d'expérience des inondations survenues dans le département du var les 15 et 16 juin 2010, 94p.

ROYET (P.,) CHAUVET (R.,) 2001 : Établissement du plan particulier d'intervention du barrage de Bimont et information de la population, 12p.

SALEY (M,) BIÉMI (J,) KOUAMÉ (F) et KOUADIO (H.,) 2005 : cartographie des zones à risque d'inondation dans la région semi-montagneuse à l'ouest de la côte d'ivoire : apports des MNA et de l'imagerie satellitaire, Télédétection, 2005, Vol. 5, n (1-2-3), p 53-67.

SAMAKE (F.,) 2008 : Gestion des eaux pluviales dans la commune rurale de Sanankoroba (Mali). Environnement Africain, cahiers d'étude du milieu et d'aménagement du territoire, pp62-64.

SARR (B) et CAMARA (M.,) 2017 : « Evolution des Indices pluviométriques extrêmes par l'analyse de Modèles climatiques régionaux du programme CORDEX: les projections climatiques sur le Sénégal », European Scientific Journal, June 2017, Vol.13, n° 17, pp. 206-222.

SARR (B) et LONA (I.,) 2007 : les fortes pluies enregistrées au Sahel au cours de l'hivernage 2007 : variabilité et/ou changement climatique, 9 p.

Schéma d'aménagement et de gestion des eaux ouest (2014) : gestion des risques d'inondation, Elaboration du SAGE OUEST – Phase 1 « Etat des lieux », pp120-123.

SENE (S) et OZER (P.,) 2002 : Évolution pluviométrique et relation inondations - évènements pluvieux au Sénégal. Bulletin de la Société géographique de Liège, 42 : p27-33.

SINGH (V.,) 1996 : Dam breach modeling technology. Kluwer Academy Publishers, 244p.

SIRABAHENDA (Z.,) 2012 : modélisation numérique du transport des sédiments en suspension dans une rivière en aménagement : cas de la rivière-aux-sables au Québec
Mémoire de maîtrise école polytechnique de Montréal, 104p.

SORO (G.,) 2011 : Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire, Thèse de doctorat, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire, 193 p.

SROHOUROU (B.,) 2007 : Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale : cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois Log normale et de Gumbel.
Journal des Sciences Hydrologiques 52(2), p49-67.

Syndicat du bassin du Lez., 2015 : L'entretien régulier d'un cours d'eau et de ses berges.
Manuel du riverain et des usagers, 13p.

TACNET (J-M.,) 2007 : Risques naturels Organisation de la gestion et de la prévention en France : Éléments pour une comparaison transfrontalière Version 1.3 [en ligne]. PRINAT-Action n°2-Panorama de l'organisation de la gestion des risques naturels en France, 55 p.

TAGINI B., 1965 : Esquisse géotectonique de la Côte d'ivoire. Rapport no 107 de la SODEMI, Abidjan, 94 p.

TALATIZI Akli Ing., 2014 : Étude des infiltrations à travers une digue de barrage en terre : cas d'un barrage algérien, Mémoire de magistère, Université Mouloud Mammeri, 190p.

TANGUY M., 2012 : Cartographie du risque d'inondation en milieu urbain adaptée à la gestion de crise analyse préliminaire, 103p.

TETRA TECH QE INC., 2016, Étude de rupture du barrage du lac Beaulne, 34p.

TORTEROTOT (J-P.,) 1993 : Le coût des dommages dus aux inondations : estimations et analyse des incertitudes. Vol 1. 1, Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 283p.

TRAMBLAY (Y.,) 2012 : Modélisation des crues dans le bassin du barrage Makhazine, Maroc, Institut de Recherche pour le Développement Hydrosociétés-Montpellier France, 34p.

TRICART (J.) 1992 : Dangers et risques naturels et technologiques. Annales de géographie, n° 565, pp 257-287.

United Nations Disaster Relief Organisation (UNDRO), 1979 : Natural Disasters and Vulnerability Analysis, Report of Expert Group Meeting (9-12 July 1979), Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator, Genève, 49p.

US. ARMY CORPS OF ENGINEERING., 2010 : Hec-Ras 4.1.0, User manual, 377p.

VALENTI (V) et BERTINI (A.), 2003 : Barrage de Malpasset : de sa conception à sa rupture, Publications de la Société d'Histoire de Fréjus et de sa Région : Hors-série, Éd. du Lau, Fréjus, 224p.

VANNIER (O.), 2013 : Apport de la modélisation hydrologique régionale à la compréhension des processus de crue en zone méditerranéenne. Thèse, Université de Grenoble, 283p.

VARADO (N.), 2004 : Contribution au développement d'une modélisation hydrologique distribuée. Application au bassin versant de la Donga, au Bénin. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble., 320p.

VERSINI (P.), GAUME, (E.), 2010: Application of a distributed hydrological model to the design of a road inundation warning system for flash flood prone areas. Natural Hazards and Earth System Science, 10(4), p805-817.

VIDAL L, TOULEB B, CHRISTINE L, MARINO (M.), 2011 : Etude de dangers du barrage du cheylard (ardeche), colloque technique, étude de danger du barrage de Cheylard Thème 3 – Etudes de cas, pp181-188.

VIDEMENT (B,) GOUTAL (N,) DUVIVIER (G,) 2011 : Modélisation des conséquences des événements retenus dans les études de dangers et expression des gravités, pp91-105.

WAHIBA (M,) 2012 : Risques de crue et de ruissellement superficiel en métropole méditerranéenne : cas de la partie ouest du Grand Alger thèse de doctorat, Université Paris Diderot - Paris 7, 330p.

WALLEZ (L.,) 2010 : inondations dans les villes d'Afrique de l'ouest : diagnostic et éléments de renforcement des capacités d'adaptation dans le grand Cotonou, maîtrise en environnement, Université de Sherbrooke, 90p.

ZACHARIE (S.,) 2012 : Modélisation numérique du transport des sédiments en suspension dans une rivière en aménagement : cas de la rivière-aux-sables au Québec ; Mémoire de maîtrise école polytechnique de Montréal, 104p.

ZEHE (E,) PLATE (E.,) 2001: Modeling water flow and mass transport in a loess catchment. Physics and Chemistry of the Earth Part B - Hydrology, Oceans and Atmosphere, 26(7-8): pp487-507.

ZEKOUA (N.,) 2011 : Modélisation des crues de l'Oued Ouahrane pour la gestion intégrée des risques d'inondation, 9p.

ZHOU (R.D.,) ENG (P.,) DONNELLY (C.R.,) 2005 : Comparison of HEC-RAS with FLDWAV and DAMBRK models for dam break analysis. CDA Annual Conference. Calgary, Alberta, Canada, pp 1–12.

ZUANON (J-P) et GILBERT (C.,) 1991 : Situations de crise et risques majeurs : vers une redistribution des pouvoirs ? Politiques et management public, pp 59-79

ZUFFEREY (B.,) 2012 : Tourisme et barrages le cas d'Emosson. Enoncé théorique du projet de master, 103p.

ZURAYK (R,) SAYEGH (C,) HAMADEH (S.) et CHEBAB (A.) 1999 : A GIS based methodology for soil degradation evaluation. 10th International soil conservation organization meeting, Purdue University and the USDA-ARS National soil erosion research laboratory pp 1082-1089.

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	v
AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS	vi
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	viii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PREMIÈRE PARTIE	4
CADRE THEORIQUE ET METHODOLOGIQUE	4
CHAPITRE 1 : CADRE THÉORIQUE	6
1.1. JUSTIFICATION DU CHOIX DU SUJET	6
1.2. LES MOTIVATIONS DE L'ETUDE	7
1.3. REVUE DE LITTERATURE ET DEFINITION DES CONCEPTS	8
1.3.1. Revue de littérature	8
1.3.2. Définition des concepts	29
1.4. PROBLEMATIQUE	35
1.5. OBJECTIFS	38
CHAPITRE 2 : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE DE L'ÉTUDE	39
2.1 . LES DONNEES ET MATERIELS DE TRAVAIL	39
2.1.1. Les données utilisées et leur collecte	39
2.1.2. Les matériels de travail	43
2.2 METHODE DE TRAITEMENT DE DONNEES	44
2.2.1. Méthode de traitement de données pour l'élaboration des cartes	45
2.2.1.2.1. La topographie	46
2.2.1.2.2. Bassin versant et réseau hydrographique	46
2.2.2. Méthode d'étude fréquentielle des pluies extrêmes mensuelles	47
2.2.3. Méthode de simulation de l'onde de rupture des barrages d'Ayamé.....	51
2.2.4. Description générale du Modèle HEC-RAS	57
2.2.5. Méthodes d'identification de la zone d'aléa inondation	62
2.2.6. Détermination des enjeux	63
2.2.7. La détermination de la zone à risque.....	64
2.3 . LES DIFFICULTES RENCONTREES	65
DEUXIÈME PARTIE	69

LES BARRAGE D'AYAME 1 ET 2 DANS LE BASSIN VERSANT DE LA BIA	69
CHAPITRE 3 : LE BASSIN VERSANT DE LA BIA	71
3.1 UN BASSIN INTER-ETAT	71
3.2 CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA BIA DANS LE DEPARTEMENT D'ABOISSO	73
3.2.1. L'environnement physique	75
3.2.2. Le contexte humain.....	86
3.3 CARACTERISTIQUES DU BASSIN MODELE POUR LA SIMULATION DE RUPTURE DES BARRAGES D'AYAME.....	93
3.3.1. Les altitudes	93
3.3.2. Les pentes.....	95
3.3.3. Le réseau hydrographique.....	96
3.3.4. Temps de Concentration de l'onde de rupture	97
3.3.5. Équipements hydro-pluviométriques du bassin modèle	99
3.3.6. Le bassin modèle, un territoire fortement anthropisé	101
3.3.7. Synthèse des caractéristiques du bassin modèle	106
CHAPITRE 4 : LES BARRAGES HYDROÉLECTRIQUES D'AYAMÉ ET LES MILIEUX EN AVAL FACE AUX APPORTS HYDROLOGIQUES.....	108
4.1. L'HISTORIQUE DES BARRAGES D'AYAME	108
4.2. CARACTERISTIQUES DES BARRAGES HYDROELECTRIQUES D'AYAME.....	109
4.2.1. Barrage hydroélectrique d'Ayamé 1	109
4.2.2. Barrage hydroélectrique d'Ayamé 2	111
4.2.3. Exploitation des barrages	113
4.2.4. Sécurité des ouvrages.....	113
4.3. LE BASSIN SUD-COMOE DE LA BIA, UN MILIEU A PRECIPITATIONS IMPORTANTES	115
4.4. AYAME 1 et 2, DES BARRAGES HYDROELECTRIQUES DEPENDANT DES TEMPERATURES ET DES PLUIES	116
4.5. L'INFLUENCE DES APPORTS HYDROLOGIQUES SUR LES FLUCTUATIONS INTERANNUELLES DU NIVEAU LACUSTRE.....	117
4.6. VARIATION DE LA CAPACITE DE STOCKAGE DU LAC D'AYAME 1.....	118

4.7. ÉTUDE FREQUENTIELLE DES PLUIES EXTREMES MENSUELLES DE 1980 A 2013 SUR LA BIA.....	120
4.8. ÉTAT DES BARRAGES	123
4.9. CONSTAT D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIO-ECONOMIQUES DES DEVERSEMENTS PASSES.....	124
4.9.1. Les inondations de 1969 et 1975.....	125
4.9.2. L'inondation de 2018	125
TROISIÈME PARTIE.....	132
DOMMAGES POTENTIELS EN CAS DE RUPTURE DES BARRAGES ET GESTION DE L'INONDATION.....	132
CHAPITRE 5 : CARTOGRAPHIE DE LA ZONE A RISQUE ET DOMMAGES POTENTIELS DES INONDATIONS CAUSEES PAR LA RUPTURE DES BARRAGES.....	134
5.1. LA CARTE DE LA ZONE A RISQUE D'INONDATION LIEE A LA RUPTURE DES BARRAGES	134
5.1.1. Détermination de la zone d'aléa inondation.....	134
5.1.2. Les enjeux et leur répartition	136
5.1.3. La carte de la zone à risque d'inondation	137
5.2. LES CARACTERISTIQUES DE L'INONDATION APRES LA RUPTURE DES BARRAGES.....	138
5.2.1. Propagation de l'onde de submersion.....	138
5.2.2. Temps d'arrivée de l'onde de rupture.....	145
5.2.3. Profil de l'inondation.....	149
5.2.4 Le courant de l'inondation.....	149
5.2.5. Le volume de l'inondation	150
5.3. LES DOMMAGES POTENTIELS DES INONDATIONS LIEES A UNE RUPTURE DES BARRAGES.....	152
5.3.1. Situation générale	152
5.3.2. Situation de l'inondation et état de la catastrophe dans la ville d'Aboisso	156
5.4. IMPACTS POSITIFS.....	160

5.5. IMPACTS NEGATIFS	160
CHAPITRE 6 : OUTIL DE GESTION DE L'INONDATION LIEE A LA RUPTURE DES BARRAGES D'AYAME.....	165
6.1. LA PERCEPTION DU RISQUE D'INONDATION DANS LE DEPARTEMENT.....	165
6.1.1. La perception du risque par l'administration locale et l'exploitant des barrages .	165
6.1.2. La perception du risque d'inondation par les populations	166
6.2. LA GESTION DES INONDATIONS DANS LE DEPARTEMENT.....	167
6.2.1. La gestion des inondations par les autorités départementales	167
6.2.2. La gestion des inondations par l'exploitant des barrages.....	169
6.2.3. La gestion des inondations par les populations	171
6.3. PROPOSITION D'UN OUTIL DE GESTION PREVENTIVE DE L'INONDATION LIEE A LA RUPTURE DES BARRAGES D'AYAME.....	173
6.3.1. Définition d'un plan particulier d'intervention (PPI).....	173
6.3.1.1. Le zonage du risque	174
6.3.1.2. La stratégie de gestion d'une crise éventuelle	175
6.3.2. Application du PPI au cas des barrages d'AYAM& après constatation de signaux inquiétants	177
6.3.2.1. L'anticipation, vigilance renforcée	177
6.3.2.2. L'anticipation, préoccupation sérieuse	178
6.3.2.3. Anticipation, péril imminent	178
6.3.2.4. La rupture constatée	178
6.3.2.5. L'organisation des secours	179
6.3.2.6. Contrainte à l'organisation des secours	179
6.3.2.7. Le principe d'évacuation	182
6.3.2.8. L'évaluation post-catastrophe	182
6.3.2.9. Les consignes aux populations	184

DISCUSSIONS.....	189
CONCLUSION GENERALE	194
BIBLIOGRAPHIE	200
TABLE DES MATIERES	i
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
TABLE DES PHOTOS.....	ixx
TABLE DES PLANCHES.....	x
ANNEXES.....	xi
ANNEXE 1 : ZONE D’INTERVENTION POI AYAMÉ.....	xii
ANNEXE 2 : COURRIER DE DÉVERSEMENT	xiii
ANNEXE 3 : DONNÉES D’EXPLOITATION 2017	xivv
ANNEXE 4 : QUESTIONNAIRE.....	xv
ANNEXE 5 : MARGE D’ERREUR HEC-RAS	xviii
ANNEXE 6 : AUTORISATIONS DE RECHERCHE.....	xix
ANNEXE 7 : COURANT DE L’INONDATION	xxi
ANNEXE 8 : RUPTURE DE BARRAGE DANS LE MONDE DEPUIS LE 19^{ème} SIÈCLE..	xxii

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Etapes de gestion du risque naturel.....	14
Figure 2 : Terrain extrait sous ArcGis pour la simulation hydraulique.....	56
Figure 3 : Principe de la discrétisation temporelle dans HEC-RAS.....	59
Figure 4 : Principe de la discrétisation spatiale dans HEC-RAS	59
Figure 5 : Cartographie de la zone à risque	64
Figure 6 : Bassin versant de la Bia	72
Figure 7 : Le département d'Aboisso	74
Figure 8 : La géologie du département d'Aboisso	76
Figure 9 : La topographie du département d'Aboisso	78
Figure 10 : Les pluies dans le département d'Aboisso.....	80
Figure 11 : Le réseau hydrographique du département d'Aboisso	81
Figure 12 : Répartition des sols du département d'Aboisso.....	83
Figure 13 : Forêts primaires initiales du département d'Aboisso	84
Figure 14 : Les densités de population par sous-préfecture dans le département d'Aboisso (situation en 2014).....	87
Figure 15 : L'occupation du sol dans le département d'Aboisso en 2016	89
Figure 16 : Infrastructures routières et hydroélectriques dans le département d'Aboisso en 2015	92
Figure 17 : La topographie du bassin modèle	94
Figure 18 : Les pentes dans le bassin modèle	95
Figure 19 : Le réseau hydrographique du bassin modèle.....	97
Figure 20 : Les stations d'étude dans le bassin versant modèle.....	100
Figure 21 : Répartition des pluies moyennes annuelles dans le bassin versant de la Bia dans le département d'Aboisso.....	116
Figure 22 : Variation des pluies et des températures de 1997 à 2015 à la station d'Ayamé. 117	
Figure 23 : Variations interannuelles des côtes moyennes du lac d'Ayamé 1 (1980-2013). 118	
Figure 24 : Variation des entrées et des sorties d'eau de 1980 à 2013 aux barrages d'Ayamé 1	119
Figure 25a, 25b et 25c : Ajustement des pluies extrêmes mensuelles.....	120
Figure 26 : Pluies mensuelles enregistrées au barrage d'Ayamé en 2018	126
Figure 27 : Apports de la Bia en m ³ en 2018.....	126
Figure 28 : Évolution de la côte du 1 au 14 juillet 2018	127
Figure 29 : Carte d'aléa inondation.....	135
Figure 30 : Principaux enjeux dans la zone avale des barrages (situation en 2016)	136
Figure 31 : La zone à risque d'inondation.....	138
Figure 32 : Couloir de propagation de l'onde de rupture	139
Figure 33 : La répartition de la hauteur d'eau dans la zone inondable au niveau du barrage d'Ayamé 1	140
Figure 34 : Répartition de la hauteur d'eau dans la zone inondable entre les deux barrages 141	
Figure 35 : Répartition de la hauteur d'eau dans la zone inondable à 800 m d'Amoakro 141	
Figure 36 : Répartition de la hauteur d'eau dans la zone inondable d'Amoakro à 750 m de Gnamienkro.....	142
Figure 37 : Répartition de la hauteur d'eau dans la zone inondable de Gnamienkro à Biaka	143
Figure 38 : Répartition de la hauteur d'eau dans la zone nord de la ville d'Aboisso.....	144

Figure 39 : Répartition de la hauteur d'eau dans la zone sud de la ville d'Aboisso	144
Figure 40 : Inondation prévue 1 mn 42 s après la rupture du barrage d'Ayamé 1	145
Figure 41 : Inondation prévue 3 mn 10 s après la rupture.....	146
Figure 42 : Inondation prévue 7mn 9 s après la rupture.....	147
Figure 43 : Inondation prévue 9 mn 37 s après la rupture.....	148
Figure 44 : Inondation prévue 12 mn 00 s après la rupture.....	148
Figure 45 : Profil d'inondation	149
Figure 46 : Courant de l'inondation.....	150
Figure 47 : Volume d'eau écoulée	151
Figure 48 : Carte de la catastrophe inondation après la rupture des barrages	153
Figure 49 : Plan d'impact dans le département d'Aboisso.....	155
Figure 50 : Comparaison entre la zone inondée en juillet 2018 et zone inondée en cas de rupture des barrages	157
Figure 51 : Constructions inondées à Aboisso en cas de rupture de barrage	158
Figure 52 : Vue en 3D du site d'Aboisso après la catastrophe.....	159
Figure 53 : Plan d'Opération Interne / rupture de barrage.....	170
Figure 54 : Zone de repli possible en cas d'inondation à Aboisso.....	181
Figure 55 : Organisation des secours	183

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Modèles statistiques présélectionnées pour l’ajustement des pluies.....	50
Tableau 2 : Niveau du risque en fonction de la hauteur d'eau	63
Tableau 3 : Enjeux humains suivant la densité de population	63
Tableau 4 : Présentation synoptique de la recherche	67
Tableau 5 : Superficie de chaque type d’occupation du sol dans le département en 2016	90
Tableau 6 : Calcul du temps de concentration	99
Tableau 7 : Caractéristiques du bassin	106
Tableau 8 : Fiche technique du barrage d’Ayamé 1	110
Tableau 9 : Fiche technique du barrage d’Ayamé 2	112
Tableau 10 : Caractéristiques du modèle de GEV, GUMBEL et WEIBULL	121
Tableau 11 : Comparaison des lois statistiques pour l’ajustement des modules du fleuve Bia à la station d’Ayamé sur la période 1980-2013	122
Tableau 12 : Estimation des pluies mensuelles extrêmes dans le bassin versant de la Bia ..	122
Tableau 13 : Superficies inondées (situation en 2016)	154
Tableau 14 : Impacts environnementaux et sociaux de la catastrophe	162
Tableau 15 : Lois portant organisation des secours en Côte d’Ivoire.....	168
Tableau 16 : Consignes de survie en cas d’inondation.....	185

TABLE DES PHOTOS

Photo 1 : Construction d'un pont sur la Bia dans la ville d'Aboisso.....	105
Photo 2 : Barrage hydroélectrique d'Ayamé 1	109
Photo 3 : Barrage hydroélectrique d'Ayamé 2	112

TABLE DES PLANCHES

Planche 1 : Image satellite d'Aboisso et Koukourandoumi.....	102
Planche 2 : Habitations à proximité du fleuve	103
Planche 3 : Forêts, plantations et activités économiques	104
Planche 4 : Équipements et infrastructures	105
Planche 5 : Outils de sécurité des barrages d'Ayamé	114
Planche 6 : Exemples de récoltes et d'habitations inondées	128
Planche 7 : Routes inondées	129

ANNEXES

ANNEXE 1 : ZONE D'INTERVENTION POI AYAMÉ



Echelle 1 / 800 000

PA Point d'accueil

PRe Point de repli

ANNEXE 2 : COURRIER DE DÉVERSEMENT

DIRECTION DE LA PRODUCTION D'ELECTRICITE
DIRECTION DES USINES HYDROELECTRIQUES D'AYAME

Ayamé le, 20 Octobre 2017

Émetteur : MANIVOULE EHUIE

Objet : Consigne de crues / État de veille

N/Réf : M31/MEA/N°01/2017

V/Réf :

A

Monsieur le Préfet d'Aboisso

Monsieur,

Nous portons à votre connaissance que compte tenu des apports d'eau de la Bia enregistrés ces dernières semaines sur le barrage, nous sommes en état de veille. Cet état présente des risques pour la population aussi bien en amont qu'en aval des barrages.

Afin de garantir la sécurité des deux barrages, des lâchures pourraient survenir dans les prochains jours. Ces lâchures constituent un débit important déversé et peuvent occasionner une élévation importante du niveau de l'eau en aval des barrages dans les localités traversées par le fleuve.

Nous prions de bien vouloir prendre toutes les dispositions nécessaires afin d'informer toutes les populations riveraines.

Paramètre du jour (20/10/2017 à 07heures)

Côte amont Ayamé1 : 89.54m/ niveau de mer

Débit actuel BIA : 153.72m³/ s

Nous nous tenons à votre disposition pour toute information complémentaire.

Nous vous en souhaitons bonne réception.

ANNEXE 3 : DONNÉES D'EXPLOITATION 2017

CIE/DPE/DUH-AYAME		RESULTATS D'EXPLOITATION											EXERCICE 2017
	DONNEES HYDROLOGIQUES												
PERIODES	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	DEC	CUMUL
COTE(m) Ayamé1	88,98	88,04	87,00	86,64	86,16	86,06	87,40	88,92	88,54	88,44	90,32	90,50	89,66
PLUIE(mm)	41,50	34,50	256,50	144,50	230,00	403,00	142,50	62,00	162,50	322,50	279,50	28,00	2 107,00
VOL.TURB.AY1(m3)	126 607 484,1	133 350 610,8	48 617 248,9	102 486 646,3	109 085 311,0	117 620 696,0	143 838 695,8	145 246 055,4	121 406 334,5	120 791 282,5	195 304 150,5	228 785 998,4	1 593 140 514,2
VOL.TURB.AY2(m3)	110 872 080,0	119 593 320,0	44 436 480,0	94 980 600,0	108 401 040,0	115 155 480,0	132 885 720,0	128 788 440,0	109 945 440,0	111 312 960,0	128 682 840,0	154 407 000,0	1 359 461 400,0
APPORTS BIA(m3)	19 175 393,9	20 369 615,0	23 456 336,1	55 887 694,5	96 582 842,0	261 625 696,0	344 838 695,8	92 993 863,4	118 178 784,9	404 791 282,5	399 048 315,3	91 452 785,4	1 928 401 304,8
Evac+vidan..Ay1(m3)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	169 808 280	3 888 000	173 696 280
Evac+vidan.Ay2(m3)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	171 948 678	46 139 628	218 088 306

ANNEXE 4 : QUESTIONNAIRE

1- A votre connaissance, votre site a-t-il déjà subi des inondations après une crue de la Bia ?

Oui

Non

2- Précisez-nous les dates de ces inondations.

Mois

Année

Mois

Année

Mois

Année

Mois

Année

Mois

Année

3- Un état de sinistre ou de catastrophe naturelle a-t-il été déclaré par le préfet de département ?

Oui

Non

4- Qu'est ce qui a été à la base de la crue de la Bia

La pluie / Les déversements effectués à aux barrages d'Ayamé 1 et 2 / Les deux

Oui

Oui

Oui

Non

Non

Non

5- Quelle inondation a occasionné le plus de dégâts, lesquels ?

.....
.....

6- Avez-vous reçu de l'aide des autorités, à quel niveau ?

.....
.....
.....

7- Le site sur lequel se trouve votre maison, votre magasin, vos bureaux est-il selon vous en zone inondable ?

Oui

Non

8- Pourquoi êtes-vous installés sur ce site ?

.....
.....

9-Savez-vous que vous êtes en danger à chaque crue de la Bia ?

Oui

Non

10- Avez-vous déjà vu le lac d'Ayamé 1 ?

Oui

Non

11- Savez-vous que les barrages d'Ayamé 1 et 2 peuvent libérer plus d'eau que d'habitude ?

Oui

Non

12- Savez-vous qu'une rupture des barrages peut se produire et provoquer une grande inondation ?

Oui

Non

13- Comment faites-vous face aux crues de la Bia qui inondent votre site

Je vis avec / je me déplace à chaque inondation / je prévois quitter le quartier

14- Etes-vous propriétaire de ce site ?

Oui

Non

15- Etes-vous prêt à le quitter définitivement si l'on vous propose un autre site ?

Oui

Non

ANNEXE 5 : MARGE D'ERREUR HEC-RAS

External Boundary Flux of Water

US Inflow	Lat Hydro	DS Outflow	SA Hydro	Groundwater	2D Inflow	2D Outflow	Divisions
*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
					30326.		

River Reaches, Storage Areas, and 2D Areas

Start 1D Reach	Starting SA's	Starting 2D	Final 1D Reach	Final SA's	Final 2D Areas
*****	*****	*****	*****	*****	*****
					30326.

Error	Percent Error
****	*****
0.08898	0.000293

Volume Accounting for 2D Flow Area in 1000 m³

2D Area	Starting Vol	Ending Vol	Cum Inflow	Cum Outflow	Error	Percent Error
*****	*****	*****	*****	*****	****	*****
BASSIN		30326.	30326.		0.08898	0.000293

ANNEXE 6 : AUTORISATIONS DE RECHERCHE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Félix Houphouët Boigny



REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE
UNION-DISCIPLINE - TRAVAIL

Institut de Géographie Tropicale



Abidjan, le 01 août 2017

A

Monsieur le Préfet de Région du Sud-
Comoé, Préfet du département d'Aboisso

Objet : Autorisation d'enquête

Monsieur le Préfet de Région ;

Monsieur N'CHO Ohoueu Kikou Lionel Arnaud, étudiant à l'institut de Géographie Tropicale (Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY), entreprend des travaux de recherche sur le sujet : « *Analyse des risques d'inondation en cas de rupture des barrages d'Ayamé 1 et 2 dans le département d'Aboisso* ». Cette recherche qui s'inscrit dans la gestion préventive des risques naturels en Côte d'Ivoire a pour objectif d'évaluer les dégâts qu'une rupture des digues sous la pression de l'eau provoquerait en aval de ces barrages.

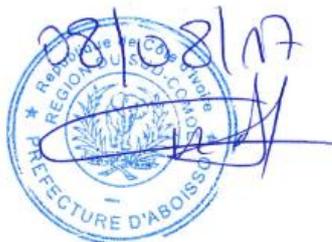
A cet effet, je vous prie de l'autoriser à collecter toutes les informations utiles dans les localités du département d'Aboisso, afin de les intégrer dans une base de données sur les dommages potentiels, en cas de catastrophe liée à la rupture des barrages d'Ayamé 1 et 2.

Dans l'espoir d'une suite favorable, je vous prie d'agréer, Monsieur le Préfet de Région, l'expression de mes sentiments distingués.

Le Directeur de recherche

ALLA Della André

Maitre de Conférences



ALLA DELLA ANDRE
Maître de Conférences
Université F. Houphouët Boigny
Abidjan - Cocody

MINISTERE DE L'INTERIEUR
ET DE LA SECURITE

REGION DU SUD-COMOE

DEPARTEMENT D'ABOISSO

PREFECTURE D'ABOISSO

N° 18 /P.ABO/CAB

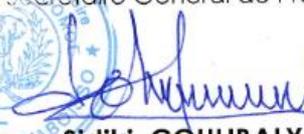
REPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE
Union – Discipline – Travail

Aboisso, le 11 août 2017

AUTORISATION DE RECHERCHE

Le Préfet de la Région du Sud-Comoé, Préfet du Département d'Aboisso, Soussigné, autorise Monsieur N'CHO Ohoueu Kikou Lionel Arnaud, étudiant à l'Institut de Géographie Tropicale à Université Félix Houphouët-Boigny, à effectuer ses recherches universitaires sur le sujet: **« Analyse des risques d'inondation en cas de système des barrages d'Ayamé I et II dans le Département d'Aboisso ».**

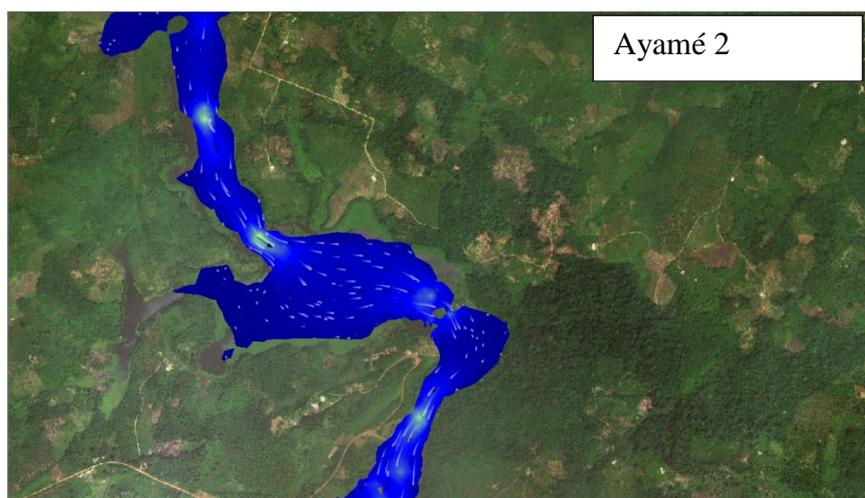
P/Préfet & P.D
Le Secrétaire Général de Préfecture



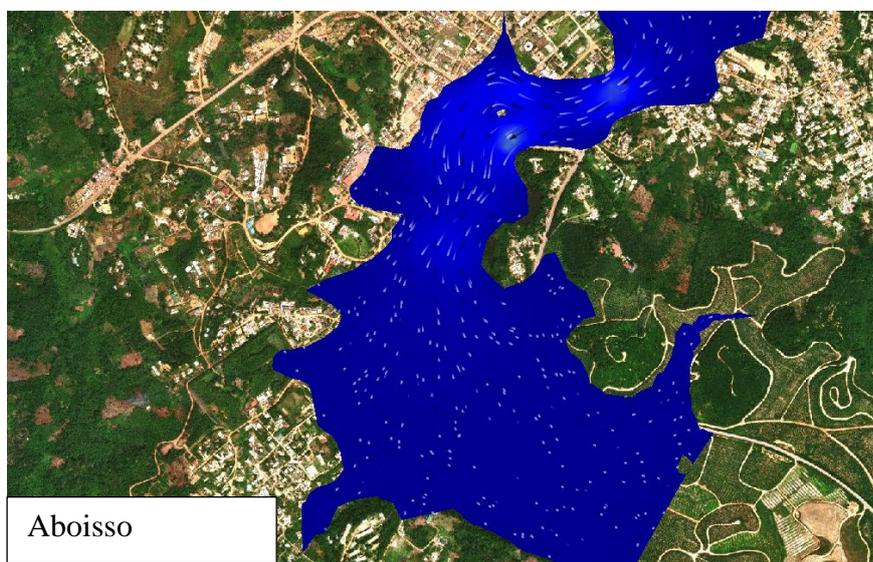
Sidiki COULIBALY
Grade I



ANNEXE 7 : COURANT DE L'INONDATION



Le courant est fort dans les couloirs rétrécis et les zones de fortes pentes.



ANNEXE 8 : RUPTURE DE BARRAGE DANS LE MONDE DEPUIS LE 19^{ème} SIÈCLE

BARRAGE	PROVINCE, PAYS	DATE	NOMBRE DE DÉCÈS	PERTES, COMMENTAIRES
Pantano de Puentes	Lorca (Espagne)	1802	608 morts	1800 maisons et 40000 arbres détruits ¹
Dale Dike Reservoir	Yorkshire du Sud (Angleterre, Royaume-Uni)	1864	240 morts	100 maisons et 15 ponts détruits. Le barrage aurait cédé à cause de vices de construction, mais le rapport officiel indique que la cause réelle de la rupture reste inconnue.
Barrage de Iruka	Inuyama (Préfecture d'Aichi, Japon)	1868	941 (confirmation officielle)	Sous l'influence des fortes pluies de la fin avril, le barrage du sol va s'effondrer le 13 mai, l'eau accumulée dans les débordements pleins Lac Iruka en aval, les dégâts ont commencé à Inuyama, Iwakura, Kasugai, Tsushima, Yatomi, à Komaki Il a également été atteint. Rapport a été officiellement confirmée lavage de maisons 807, inondé des maisons est 11709.
Barrage de South Fork	États-Unis	1889	2 200	La rupture est due à des modifications inconsidérées faites sur l'ouvrage sans la moindre précaution, l'absence de surveillance, et une crue très importante ; la justice a retenu la fatalité ; l'événement est resté dans la mémoire collective américaine sous le nom de Johnstown Flood.

BARRAGE	PROVINCE, PAYS	DATE	NOMBRE DE DÉCÈS	PERTES, COMMENTAIRES
Walnut Grove Dam	Wickenburg (Arizona, États-Unis)	1890		Importantes chutes de neige suivies de fortes pluies
Barrage de Bouzey	Vosges (France)	1895, avril	87	Barrage-poids, il rompt après un premier grave accident et des déformations dues à des sous-pressions, inconnues à cette époque. Reconstitué, il est toujours en service.
McDonald Dam	Texas (États-Unis)	1900		Surcharge hydraulique.
Hauser Dam	Helena (Montana) (États-Unis)	1908	0	Inondations, fondations de mauvaise qualité.
en:Tom Miller Dam	Austin (Texas, États-Unis)	1900, 1911, 1940		Mauvaise conception, utilisation de dynamite pour contrecarrer des problèmes structurels, 3 destructions de barrage.
Přehrada Desná (cs)	Desná (Autriche-Hongrie – maintenant en République tchèque)	1916	62	Défauts de construction.
Lake Toxaway Dam	Comté de Transylvania (Caroline du Nord, États-Unis)	1916	0	Fortes pluies, a été reconstruit dans les années 1960
Sweetwater Dam	Comté de San Diego (Californie, États-Unis)	1916		Barrage noyé par les inondations.

BARRAGE	PROVINCE, PAYS	DATE	NOMBRE DE DÉCÈS	PERTES, COMMENTAIRES
Lower Otay Dam	Comté de San Diego (Californie, États-Unis)	1916	40	Barrage noyé par les inondations.
Barrage du Gleno	Province de Bergame, Italie	1923	356	Barrage-poids à contreforts, il se rompit lors de la mise en eau ; très mal conçu en raison d'une mauvaise prise en compte des sous-pressions (poussée d'Archimède) qui ont soulevé sa fondation ; n'a pas été reconstruit.
Llyn Eigiau et le Coedty réservoir.	Dolgarrog (Galles du Nord, Royaume-Uni)	1925		L'entrepreneur rejeta la faute sur des économies pendant la construction, mais plus de 600 mm d'eau étaient tombés pendant les 5 derniers jours. C'est la dernière rupture de barrage à causer des morts en date au Royaume-Uni.
Barrage de St. Francis	Valencia (Californie, États-Unis)	1928	600	Instabilité géologique du canyon non détectée avec la technologie de l'époque, erreurs humaines sachant que de petites fissures étaient "normales" pour ce type de barrage.
Barrage de Horonai	Ōmu (Hokkaidō, Japon)	1941	60 (confirmation officielle)	Le bassin Horonai pluie torrentielle a frappé. Ceci est l'effondrement du barrage dans la possibilité, rapport qui a officiellement confirmé les victimes est de 220, emporté maisons 32 ³ .

BARRAGE	PROVINCE, PAYS	DATE	NOMBRE DE DÉCÈS	PERTES, COMMENTAIRES
Nant-y-Gro Reservoir	Nant-y-Gro Valley (Pays de Galles, Royaume-Uni)	1942		Détruit au cours de tests préparatifs de l'Opération Chastise pendant la seconde guerre mondiale.
Eder	Vallée de l'Eder (Ruhr, Allemagne)	1943		Bombardé au cours de l'Opération Chastise pendant la seconde guerre mondiale.
Möhne	Vallée de la Möhne et de la Heve (Ruhr, Allemagne)	1943	1 200 à 1 600 dont 749 prisonniers de guerre ukrainiens	Bombardé au cours de l'Opération Chastise pendant la seconde guerre mondiale.
Barrage de Heiwa	Kameoka (Préfecture de Kyoto, Japon)	1951	117 (confirmation officielle)	Dans de fortes pluies, a avalé le ruisseau boueux du village de la partie aval et l'effondrement de l'étang de la paix des étangs d'irrigation, la confirmation officielle a été signalé des dommages de 80 maisons endommagées à Kameoka et la région environnante ⁴ .
Barrage de Taisho	Ide (Kyoto), Japon	1953	108 (confirmation officielle)	Sous l'influence de fortes pluies, explosion d'un "deuxième bassin de la Ninotani" ⁴ .
Vega de Tera / Catástrofe de Ribadelago (es)	Ribadelago (Espagne)	1959	144	Mauvaise construction du barrage. Défauts de cimentation des contreforts et pierres de mauvaise qualité pour deux d'entre eux. Infiltrations ayant abouti à des sous-pressions qui ont probablement entraîné la rupture de deux contreforts, puis, par effet domino, des contreforts suivants de part et d'autre. Le village de

BARRAGE	PROVINCE, PAYS	DATE	NOMBRE DE DÉCÈS	PERTES, COMMENTAIRES
				Ribadelago entièrement rasé a été reconstruit une dizaine de kilomètres plus loin. Le barrage n'a pas été reconstruit et ses ruines sont toujours visibles.
Barrage de Malpasset (Fréjus)	France	1959	423	Bien que correctement construit, il était cependant établi sur une mauvaise fondation en rive gauche et celle-ci a cédé ; 50 millions de mètres cubes d'eau se déversent sur Fréjus qu'ils ravagent en grande partie ; la vague transporte des morceaux du barrage allant jusqu'à 600 tonnes et rase un viaduc autoroutier ; n'a pas été reconstruit
Baldwin Hills dam	Californie, États-Unis	1963	3	Barrage en terre, rupture par érosion interne
Spaulding Pond Dam (Mohegan Park)	Norwich (Connecticut, États-Unis)	1963	6	Plus de 6 millions \$ de dégâts.
Barrage de Vajont (Longarone)	Province de Belluno, Italie	1963	1 900	La présence du lac artificiel favorise le glissement de 260 millions de mètres cubes de matériaux brutalement descendus du Mont Toc, et qui remplissent la retenue et provoquent deux vagues géantes, l'une vers l'amont, l'autre vers l'aval. Celle-ci a une hauteur estimée à 150 m et un volume de 25 millions de mètres cubes et sera suivie par la deuxième

BARRAGE	PROVINCE, PAYS	DATE	NOMBRE DE DÉCÈS	PERTES, COMMENTAIRES
				vague revenant de son expansion vers le haut de la vallée. Le barrage résiste mais la vallée plus bas est ravagée. Le barrage est resté désaffecté depuis lors.
Mina Plakalnitsa (Vratsa)	Vratsa (Bulgarie)	1966		Une retenue de déchet dans la mine de cuivre de Plakalnitsa près de Vratsa s'est effondrée. Une grande quantité de boue a inondé Vratsa et le village de Zgorigrad, qui a beaucoup souffert. Le chiffre officiel est de 107, mais les sources non officielles parlent de 500 tués.
Buffalo Creek Flood	Virginie-Occidentale (États-Unis)	1972	125	Construction instable par des compagnies locales de mine, s'est rompu lors de fortes pluies
Canyon Lake Dam	Dakota du Sud (États-Unis)	1972		Barrage noyé par les inondations et des débris.
Barrage de Banqiao	Henan (Chine)	1975	De 26 000 à 100 000	Destruction de 62 barrages en série. Peut-être la pire des catastrophes de ce type.
Barrage Teton (Idaho)	États-Unis	1976	11 personnes et 13 000 têtes de bétail	Barrage en terre, a rompu lors de la mise en eau, n'a pas été reconstruit
Laurel Run Dam	Johnstown (Pennsylvanie, États-Unis)	1977		Fortes Pluies et inondation qui surmontent le barrage.

BARRAGE	PROVINCE, PAYS	DATE	NOMBRE DE DÉCÈS	PERTES, COMMENTAIRES
Kelly Barnes Dam	Géorgie (États-Unis)	1977	39	Cause inconnue peut-être une erreur de conception, le barrage a été rehaussé plusieurs fois pour augmenter les capacités de production d'énergie.
Machchu-2 Dam	Morvi (Gujarat, Inde)	1979		Fortes pluies au-delà des capacités de dispersion.
Wadi Qattara Dam	Benghazi (Libye)	1979		Des inondations en amont et une capacité de stockage endommagée, le barrage secondaire a été détruit.
Lawn Lake Dam	Parc national des Montagnes Rocheuses (États-Unis)	1982	3	Érosion de tuyauteries de sortie ; barrage en location et mal entretenu
Presa de Tous / Pantanada de Tous (es)	Province de Valence (Espagne)	1982	20 ou plus	
Catastrophe du barrage du Val de Stava	Italie	1985		Mauvais entretien, faible coefficient d'erreur dans les calculs de conception ; les tuyaux extérieurs ont cédé ce qui a conduit à une pression élevée dans le barrage.
Upriver Dam	État de Washington (États-Unis)	1986		La foudre a frappé le système électrique, arrêtant les turbines. Le niveau d'eau monta pendant les essais de redémarrage. Les systèmes de secours, inopérants, ne purent pas actionner les déversoirs à temps. Le barrage fut submergé puis reconstruit.

BARRAGE	PROVINCE, PAYS	DATE	NOMBRE DE DÉCÈS	PERTES, COMMENTAIRES
Brana Peruća (hr)	Croatie	1993		Pas vraiment une rupture de barrage puisqu'il y a eu une explosion faite par des forces serbes en retraite.
Déluge du Saguenay	Québec (Canada)	1996	10	Après deux semaines de pluies constant les sols étaient imbibés et les ennuis ont commencé. Après l'inondation il s'est avéré que les digues et les installations étaient mal entretenues.
Meadow Pond Dam	New Hampshire (États-Unis)	1996	1	Conception et construction défectueuses ce qui causa la rupture avec un apport de glace important
Opuha Dam	Nouvelle-Zélande	1997	0	Pluies importantes pendant la construction, le barrage a pu être terminé
Aznalcollar Mine Tailings Dam / Désastre de Doñana / Desastre de Aznalcóllar (es)	Espagne	1998	0	
Vodní nádrž Soběnov	Soběnov (République tchèque)	2002		Très fortes pluies en 2002
Zeyzoun Dam	Zeyzoun (Syrie)	2002	22 avec 10 000 personnes concernées ^{9,10} .	

BARRAGE	PROVINCE, PAYS	DATE	NOMBRE DE DÉCÈS	PERTES, COMMENTAIRES
nl:Kadebreuk Wilnis 2003	Wilnis (Pays-Bas)	2003	0	De la tourbe desséchée est devenue très légère s'est mise à flotter après les inondations et a été emportée, 1500 personnes évacuées.
Hope Mills Dam	Caroline du Nord (États-Unis)	2003		Fortes pluies ont détruit le barrage fait de terre
Big Bay Dam	Mississippi (États-Unis)	2004		Un petit trou s'est agrandi et a fini par provoquer la rupture du barrage.
Barrage de Camará (pt)	Brésil	2004		
Shakidor Dam	Pakistan	2005	70	Pluies soudaines anormalement violentes
Taum Sauk réservoir	Lesterville (États-Unis)	2005		Erreur d'ordinateur et d'opérateur ; les jauges indiquant le remplissage n'étaient pas respectées ; le barrage continuait de se remplir. De petites fuites avaient affaibli le parement amont par érosion interne.
Campos Novos Dam	Campos Novos (Brésil)	2006		Écroulement d'un tunnel
Gusau Dam	Gusau (Nigeria)	2006	40	Fortes inondations faisant un millier de sans-abris
Ka Loko Réservoir	Kauai (Hawaii, États-Unis)	2006	7	Pluies importantes et inondations. Plusieurs causes possibles, mauvais entretien, manque d'inspection et modifications illégales.
Lake Delton (en)	Lake Delton (Wisconsin, États-Unis)	2008		Rupture à cause de l'inondation de juin 2008 dans le <i>Midwest</i> .

BARRAGE	PROVINCE, PAYS	DATE	NOMBRE DE DÉCÈS	PERTES, COMMENTAIRES
Koshi Barrage (en)	Koshi (Népal)	2008		Fortes pluies
Algodões Dam	Piau (Brésil)	2009		Fortes pluies
Situ Gintung Dam	Tangerang (Indonésie)	2009		Mauvais entretien lié avec de fortes pluies de mousson
Kyzyl-Agash Dam	Kazakhstan	2010		Fortes pluies et fonte de neige
Hope Mills Dam	Caroline du Nord (États-Unis)	2010		Doline causée par une rupture du barrage
Delhi Dam	Iowa (États-Unis)	2010	0	Pluies fortes, inondations.
Niedow	Voïvodie de Basse-Silésie (Pologne)	2010		Fortes pluies, submergé par l'inondation
Accident de l'usine d'aluminium d'Ajka	Hongrie	2010	10	Rupture du béton sur une retenue de résidus dans une usine d'aluminium.
Kenmare Resources retenue de résidus	Mozambique	2010		Rupture d'une retenue de résidus dans une mine de titane.
Barrage Fujinuma, Sukagawa	Fukushima, Japon	2011	4 ou 8 disparus	À la suite du tremblement de terre de Tōhoku
Barrage de Campos dos Goytacazes (Brésil)	État de Rio de Janeiro (Brésil)	2012		Rupture après une période d'inondation
Barrage Ivanovo	Biser (Bulgarie)	2012	8 plusieurs communautés noyées	Après une période de forte neige, des fissures étant restées sans réparation plusieurs années.

BARRAGE	PROVINCE, PAYS	DATE	NOMBRE DE DÉCÈS	PERTES, COMMENTAIRES
Köprü Dam (de)	Adana (Turquie)	2012	10 travailleurs	Un batardeau dans un tunnel de diversion s'est rompu après une période de fortes pluies pendant le premier remplissage du bassin.
Tokwe Mukorsi Dam (de)	Masvingo, Zimbabwe	2014	0	
Bento Rodrigues	Mariana (Minas Gerais)	2015	1 confirmé, une quarantaine de disparus	2 barrages se sont effondrés
Barrage de Guajataca	Porto Rico	2017	0	Barrage fissuré à cause de fortes pluies, ville inondée
Barrage de Solai	Kenya	2018	Au moins 41 morts	Les dégâts sont très lourds. D'après une estimation de la Croix-Rouge kényane, quelque 500 familles ont été affectées par la catastrophe.