UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

FACULTE DES LETTRES, ARTS ET SCIENCES HUMAINES (FLASH)

Ecole Doctorale Pluridisciplinaire ''Espaces, Cultures et Développement'' (EDP)

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUE (FAST)

Chaire Unesco « Sciences, Technologie et Environnement » (CUSTE)

Thèse de Doctorat Unique

Présentée par :

Sotelle HOUESSOU

pour l'obtention de grade de Docteur de l'Université d'Abomey-Calavi

Filière : Géographie et Gestion de l'Environnement

Spécialité : Dynamique des écosystèmes et aménagement du territoire

N° d'enregistrement: **376 -16** / UAC / FLASH / EDP

LES INONDATIONS ET LES RISQUES PREVISIONNELS LIES AUX BARRAGES HYDROELECTRIQUES DANS LA BASSE VALLEE DU MONO




Sous la direction de **:**

Michel BOKO

Professeur Titulaire des Universités du CAMES

Soutenu publiquement le 11/10/2016 devant le jury composé de :

Président	**M. Constant HOUNDENOU**	Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)
Rapporteur	**M. Michel BOKO**	Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)
Examinateurs	**M. Adoté B. BLIVI**	Professeur Titulaire, Université de Lomé (Togo)
	M. Euloge K. AGBOSSOU	Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)
	M. Bamory KAMAGATE	Maître de Conférences, Université de Mangui Abrogoua (Côte d'Ivoire)

Sommaire

	Titres	Pages
	Sommaire	2
	Dédicace	4
	Sigles et acronymes	5
	Remerciements	6
	Résumé	9
	Abstract	10
	Introduction générale	**11**
	Chapitre 1 : Caractéristiques du milieu d'étude et historiques des barrages de Nangbéto et d'Adjarala	**17**
	Introduction	17
1.1.	Localisation géographique du bassin du Mono	17
1.2.	Caractéristiques physiques du bassin-versant du fleuve Mono	19
1.3.	Environnements humains du bassin	41
1.4.	Historique des barrages hydroélectriques sur le fleuve Mono	44
	Conclusion partielle	55
	Chapitre 2 : Point des connaissances, données et méthodes d'évaluation des risques d'inondation	**56**
	Introduction	56
2.1.	Point des connaissances	56
2.2.	Nature des données et techniques de collecte	64
2.3.	Méthodes de traitement des données	73
2.4.	Modèle d'analyse des résultats	90
	Conclusion partielle	91
	Chapitre 3 : Contexte hydroclimatique et dynamique de l'occupation du sol dans le fonctionnement des écoulements de surface	**93**
	Introduction	93
3.1.	Variabilité hydroclimatique dans le bassin	93
3.2.	Occupation du sol: un des moteurs de la dynamique des lames d'eau ruisselée et infiltrée dans le bassin	109
	Conclusion partielle	113
	Chapitre 4 : Niveau du risque d'inondation et vulnérabilité des systèmes de la basse vallée du Mono	**114**
	Introduction	114
4.1.	Aléas d'inondation et niveau de risque	114
4.2.	Analyse de la vulnérabilité du bassin-versant du fleuve Mono à l'inondation	131
4.3.	Analyse des risques : un composé d'aléa et de vulnérabilité	135
	Conclusion partielle	139
	Chapitre 5 : Conséquences d'inondation et stratégies de gestion dans la basse vallée du fleuve Mono	**141**
	Introduction	141
5.1.	Conséquences humaines, environnementales et matérielles des	141

risques d'inondation dans le bassin du Mono
5.2. Stratégies de gestion intégrée des risques d'inondation 150
5.3. Prévisibilité des risques d'inondation dans le bassin 158
Conclusion partielle 168
Conclusion générale **170**
Bibliographie **173**
Annexes 191
Liste des figures 191
Liste des photos 194
Liste des tableaux 195
Table de matières 196

Dédicace

A

Ma mère Tohouétindé AÏKPIN et en mémoire de mon feu père Etienne HOUESSOU DONOU, ce travail et ses dérivés sont la récompense de vos efforts et sacrifices consentis.

Sigles et acronymes

ASECNA : Agence pour la Sécurité, de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar
CEB : Communauté électrique du Bénin
CEG : Collège d'Enseignement Général
CENATEL : Centre National de la Télédétection et de Surveillance du Couvert Forestier
CERPA : Centre Régional de la Production Agricole
CHN : Centrale Hydroélectrique de Nangbéto
DMN : Direction de la Météorologie Nationale
EDP : Ecole Doctorale Pluridisciplinaire
FLASH : Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines
GIEC : Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GR4J : Génie Rural Journalier à quatre paramètres
GRP : Génie Rural pour la Prévision des crues
IGN : Institut Géographique National
IPCC Intergouvernemental Panel on Climate Change
MNT : Méthode Numérique de Terrain
ONG : Organisation Non Gouvernementale
ORSEC : Organisation de la Réponse de la Sécurité Civile
ORTB : Office de Radio et Télévision du Bénin
RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitation
SFI : Indice d'écoulement normalisé
SPI : Indices de précipitation normalisée
UAC : Université d'Abomey-Calavi

Remerciements

Cette thèse est le résultat de nombreux échanges scientifiques et de collaboration avec des personnes, auxquelles j'aimerais ici exprimer toute ma reconnaissance sachant que ces quelques lignes sont insuffisantes pour résumer le rôle précieux qu'elles ont eu à jouer.

Je tiens à présenter d'abord ma gratitude à mon Directeur de thèse, Monsieur le Professeur Michel BOKO, pour sa contribution et son entière disponibilité à diriger ce travail et à m'accompagner dans mes efforts malgré ses multiples occupations et mes absentéismes répétés. Professeur BOKO, tout cela est la preuve tangible de l'estime que vous avez pour moi depuis 1976 quand j'étais encore en classe de j'étais en classe de 1ère C au Collège d'Enseignement Général de Lokossa et qui visiblement ne s'est point estompée jusqu'à ce moment ultime de travaux de thèse. Je vous dois tout car vos encouragements et vos exhortations constants à terminer la thèse ont créé en moi une impulsion extraordinaire pour l'achèvement des travaux de cette thèse. Je vous resterai profondément reconnaissant, Monsieur le Professeur, pour avoir accepté de vous engager sur un sujet très évocateur du siècle.

Que Messieurs les Docteurs Ernest AMOUSSOU et Henri S. TOTIN VODOUNON acceptent mes mots de reconnaissance pour leurs contributions combien inestimables. Messieurs les Docteurs, toute ma gratitude pour tout ce que j'ai appris par vous sur les notions de risque d'aléas et de risque d'inondation en général et notamment dans le bassin du Mono en particulier où vous avez passé le clair de votre temps à approfondir les recherches. Je n'oublie pas l'appui et l'encadrement constants dont j'ai bénéficié de vous et surtout vos propos répétitifs d'encouragement à finir le document et de façon plus insistante depuis la tenue des audiences publiques d'août 2014 sur les études d'environnement du barrage d'Adjarala.

J'exprime ma gratitude à Monsieur Expédit W. VISSIN, Maître de Conférences des Universités du CAMES, pour la première évaluation de ce travail. Les remarques ont été d'une grande utilité pour la clarté du document.

A Monsieur Djibril SALIFOU, Directeur Général de la Communauté électrique du Bénin (CEB), toujours préoccupé de rendre plus concret le concept du

développement durable dans la production et le transport de l'électricité au Togo et au Bénin, je vous adresse toute mon admiration, ma reconnaissance et mes vifs remerciements pour avoir ordonné et soutenu l'idée d'approfondir les connaissances sur la question des inondations dans la basse vallée du Mono attribuées à tort ou à raison à l'exploitation de la centrale hydroélectrique de Nangbéto et pour avoir autorisé l'accès aux données. Infiniment merci pour nous avoir inculqués la rigueur du travail bien fait.

A Monsieur Ferdinand SESSOU, Directeur de la Centrale Hydroélectrique de Nangbéto (CHN) je reste très reconnaissant pour les discussions le plus souvent fructueuses au plan scientifique et pour les contributions à l'approfondissement des connaissances sur les inondations dans le bassin du Mono. Vos observations et vos réflexions sur l'évolution des données hydroclimatiques en amont de Nangbéto ont été d'un grand recours.

J'adresse toute mon amitié sincère à tous les collègues et amis à qui je dis infiniment merci.

Je suis également très reconnaissant envers Monsieur Euloge AGBOSSOU, Professeur Titulaire des universités du CAMES et Directeur de l'Institut National de l'Eau, d'avoir accepté de rapporter cette thèse. Vos remarques ont beaucoup contribué à l'amélioration du document.

Je suis aussi très reconnaissant à Monsieur Adoté B. BLIVI, Professeur Titulaire des universités du CAMES et Monsieur Bamory KAMAGATE, Maître de Conférences des Universités du CAMES, pour avoir consacré une partie de leurs précieux temps pour examiner ma thèse et participer au jury.

Un grand merci également aux examinateurs pour leur implication dans le jury de thèse et pour leurs très nombreuses remarques et pistes de réflexion pour la suite de nos travaux de recherche.

Une pensée à tous mes frères et sœurs, cousins, cousines, neveux, nièces pour leur amour fraternel et soutien indéfectible. Que ce travail les galvanise davantage.

Enfin, je remercie toutes les personnes que j'ai eu la chance de rencontrer pendant mes activités ou en dehors, pour le temps et les connaissances qu'elles ont bien voulus m'accorder.

A Ma famille et mes enfants et progéniture, que ce travail soit l'exemple à suivre puisqu'en matière d'acquisition de connaissances, il n'y a pas de fin en soi.

J'espère n'avoir oublié personne. Certains se reconnaîtront, d'autres non, pourtant ils y sont…

Résumé

Ces dernières années, les catastrophes hydroclimatiques sont de plus en plus récurrentes et fragilisent les systèmes environnementaux et humains. Ainsi, cette étude vise à évaluer les risques d'inondation dus aux effets conjugués de la variabilité climatique, de l'occupation du sol et du fonctionnement des barrages hydroélectriques. Elle a été menée sur la période 1961-2010 à l'aide des méthodes de statistique descriptive, de modélisation et de la cartographie numérique et thématique. Les aléas pluviométriques et hydrométriques (1961 à 2010) et de hauteur d'eau dans la retenue de Nangbéto de 1988 à 2010 ont été déterminés à partir des indices de précipitation/écoulement normalisé (SPI/SFI). La caractérisation des risques (limité à critique) a été faite à l'aide de la matrice de criticité sur la base de probabilité d'occurrence et d'échelle de gravité des impacts. Le modèle conceptuel Génie Rural pour la Prévision des crues (GRP) a été utilisé pour les prévisions en amont et aval du barrage de Nangbéto. L'évaluation des risques dans le bassin du Mono a été faite à travers un processus analytique fondée sur les données quantitatives et qualitatives.

Les seuils d'aléas pluviométriques (2,6 à 240,6 mm), hydrométriques (99 à 1440 m^3/s) et de niveau d'eau dans la retenue (137,4 à 144,5 m) ont permis de catégoriser les risques d'inondation acceptables (limité et modéré) et inacceptables (significatif et critique). Les périodes de retour déterminées pour les aléas pluviohydrologiques sont de 25 à 50 ans pour les évènements rares et catastrophiques, et de 2 à 10 ans voire 20 ans pour les évènements normaux et anomaux et à conséquence peu grave. Cependant, l'évaluation de l'ampleur des aléas dépend de la position géographique des enjeux dans le bassin. Ainsi, les systèmes humains, environnementaux et matériels sont inégalement vulnérables dans le bassin et le seront à un degré très élevé en cas de rupture de barrage.

Les stratégies de gestion intégrée des risques d'inondation dans le bassin passent par une surveillance et une alerte à trois niveaux de vigilance (jaune, orange et rouge). Ceci permet de mieux maîtriser les aléas pour mieux agir, s'adapter avec le risque pour une réduction des effets des catastrophes. Le modèle conceptuel Génie Rural pour la Prévision des crues (GRP) a montré son efficacité à prédire les débits de crues en amont comme en aval du barrage de Nangbéto, avec un Nash > 85 % en calage et en validation. Son utilisation pour la prévision pourrait être bénéfique aux gestionnaires des barrages pour la sauvegarde des différentes composantes du bassin. Le plan ORSEC, un dispositif opérationnel de maîtrise de la crise pourrait permettre aux gestionnaires du bassin une meilleure planification et un contrôle rigoureux et rapide des aléas. Ce plan aidera les autorités et les populations locales en temps réel à mieux conduire les opérations pour gérer rationnellement les crises d'inondations.

Mots clés : Fleuve Mono, barrages de Nangbéto et d'Adjarala, risques d'inondation, matrice de criticité, modèle GRP, plan ORSEC.

Abstract

This last years, hydroclimatic disaster become more and more frequent and affecte environmental and human systems. Thus, this study aims to assess floods risk due to combined effects of climate variability, land use and hydropower dam. Data covering the period 1961-2010 were using for descriptive statistical methods, modeling and numerical and thematic mapping. Rainfall and hydrological hazards (1961-2010) and Nangbéto dam water height over 1988-2010 were determined from standardized precipitation / flow index (SPI / IFC). Risk characterization (limited to critical) was made using criticality matrix based on probability occurrence and impact severity scale. The conceptual model for Rural Engineering Flood forecasting (GRP) was used for forecasting on the upstream and downstream of Nangbéto dam. Analytical process based on quantitative and qualitative data was helpful for risk assessment in the Mono River Basin.

Thresholds of rains (2.6 to 240.6 mm), flow (99-1440 m^3/s) and dam lake water level (137.4 to 144.5 m) hazards allowed to categorize acceptable (limited and moderate) and unacceptable (significant and critical) flood risk. Calculed return periods of hydroclimatic hazards are 25 - 50 years for rare and catastrophic events, and 2 - 10 years or even 20 years for normal and anomalous events with less consequence. However, hazards magnitude appreciation depends on geographical position of exposed agents on the basin. Also, human systems, environmental and materials are unequally vulnerable and will be at a very high level in case of dam failures.

Integrated management strategies of flood risk on the Basin mean monitoring and early warning at the three levels of care (yellow, orange and red). This is helpful to control hazards for acting better, live better know with the risk for disasters effects reduction. Conceptual model for Rural Engineering Flood forecasting (GRP) has proven it better capacity to predicate flood on Nangbéto dam upstream and downstream, with a Nash superior to 85% in verification and validation. Its use for prediction could be benefits to managers of dams and different watershed systems. The ORSEC plan, operational tools of crisis control, could help basin managers to better plan and have a rigorous and rapid control of hazards. This plan could be useful to warn public authorities and local people in real time for better control and rationally manage flood crisis.

Key words: Mono River, Nangbéto and Adjarala dams, flood risk, criticality matrix, GRP model, ORSEC

Introduction générale

Le climat global de la terre et en particulier les climats régionaux sont aujourd'hui confrontés à une modification durable (de la décennie aux millions d'années) de leurs paramètres statistiques : paramètres moyens, variabilité (GIEC, 2007). Ces modifications peuvent être dues à des processus intrinsèques à la terre, à des forces extérieures ou, plus récemment, aux activités humaines (Diallo, 2013) comme la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les conséquences des changements climatiques et des extrêmes hydrométéorologiques sur les ressources en eau sont importantes dans la mesure où ils peuvent avoir un impact très négatif sur les systèmes de production, la conservation de la biodiversité qui constituent les maillons fondamentaux de l'économie rurale surtout dans les bassins aménagés.

Avec le temps, l'homme a appris à composer avec les cours d'eau et leurs caractéristiques hydrologiques en nourrissant toujours l'ambition de les aménager pour adapter leur environnement à leurs besoins : conserver l'eau, permettre l'irrigation, se protéger contre les crues, produire de l'énergie, faciliter la navigation, évacuer leur déchets, etc. De ce fait, les barrages sont construits pour retenir les eaux de débordement principalement au profit du bien être de la population. Ainsi, la mise en place des barrages sur les cours d'eau a constitué une part importante de la civilisation humaine depuis le début de son histoire (Jansen *et al.*, 2013). Les barrages et réservoirs sont construits essentiellement pour de multiples fonctions dont la maîtrise des inondations, de l'eau de consommation, de l'eau agricole, la production d'électricité, la récréation et autres (Braga *et al.*, 1998; Verghese, 2001; Vyas, 2001).

Ainsi, stocker l'eau en excédent pendant les périodes humides pour pouvoir l'utiliser pendant les périodes sèches semble donc une idée logique. Ceci est d'autant plus vrai que lors des crues une partie importante des précipitations ruisselle très vite et rejoint la mer ou l'océan en quelques jours sans avoir pu contribuer à reconstituer les réserves naturelles que constituent les nappes d'eau souterraines. Intercepter ces volumes d'eau excédentaires permet donc en théorie d'augmenter les ressources mobilisables dans le bassin-versant.

Par ailleurs, Jiang (1998), Ataie et Ashtiani (2008) et Diman et Tahir (2012) soutiennent que le risque d'inondation de barrage pendant les évènements extrêmes est devenu un souci primordial pour les ingénieurs, les planificateurs de secours et les ingénieurs hydrauliciens. Ces dernières années, l'analyse des inondations dans des bassins aménagés a révélé que les écoulements révisés ont souvent excédé les écoulements prévus au cours de la conception. En conséquence, l'élaboration des nouvelles normes de gestion des ouvrages hydrauliques paraît nécessaire.

En outre, un nouveau type de problème d'inondation est également la prolongation temporelle de l'événement (Diman et Tahir, 2012a) en tant qu'eau stagnante ou la submersion (Cuc *et al.,* 2012 ; Diman et Tahir, 2012b). L'inondation prolongée est associée à la menace de santé publique ou le danger environnemental majeur dû à l'accumulation des eaux d'égouts, les odeurs fétides, les moustiques, et la croissance de la jacinthe de l'eau (Rasid et Mllsk, 1999).

Or, le barrage hydroélectrique exige typiquement que le niveau d'eau soit maintenu à une hauteur minimale de conception pour empêcher le débordement. Cependant, la perte du volume de stockage de réservoir s'observe et est attribuée à la sédimentation de la retenue. Dans cette condition, le rendement d'énergie est affecté. Les possibilités de perte graduelle de réservoir pour contenir de grands apports d'inondation et le déversement d'eau par lâcher pour la maîtrise de l'inondation sont inévitables (Abrishamchi *et al*., 2011; Shafiée *et al.*, 2012) comme c'est le cas dans le bassin-versant du fleuve Mono partagé entre le Togo et le Bénin.

L'hydrologie de ce bassin abritant les barrages hydroélectriques de Nangbéto et d'Adjarala (en construction) est caractérisée par l'abondance et l'irrégularité des précipitations. En conséquence, chaque année, des terres, au demeurant fertiles, sont inondées par les pluies et les débordements du fleuve et les rivières des collines environnantes. Ainsi, la basse vallée du Mono comme pour la plupart des cours d'eau est le théâtre de crues importantes, le plus souvent catastrophiques avec d'énormes pertes matérielles et parfois en vies humaines (Klassou, 1996 ; Roche International, 1999 ; Amoussou, 2003). A l'état naturel, ce bassin est soumis à un rythme naturel d'inondation, responsable d'importants dépôts alluviaux. Les populations avaient su exploiter ce comportement hydrologique pour élaborer un

système de mise en valeur qui alternait et associait une agriculture pluviale et une agriculture de décrue.

Le barrage de Nangbéto construit en 1985 et mis en eau en septembre 1987 sur le fleuve Mono et dont les objectifs étaient de produire de l'électricité, contribue à la régulation du régime hydrologique du fleuve (Rossi, 1996 ; Klassou, 1996 ; Amoussou, 2010) favorisant ainsi la promotion d'activités agricoles par le système d'irrigation. Les crues annuelles représentaient une sérieuse entrave pour la production agricole dans la basse vallée,

Pour Souchon et Nicolas (2011), la modification du régime hydrologique due au barrage entraîne des transformations qui peuvent générer des altérations dont l'importance est fonction de l'intensité de distorsion des cycles hydro-sédimentaires et thermiques, de l'effet barrière vis-à-vis des différents habitats nécessaires à l'accomplissement des cycles vitaux des organismes aquatiques. Mais, tout est reliée à la nature et à la taille des ouvrages (hauteur du barrage, configuration de la retenue, des prises d'eau et de restitution, des modalités d'exploitation) ainsi qu'à leur localisation.

Ainsi, des milliers d'hectares de champs ont été submergés tant au Togo qu'au Bénin, avec des pertes de récolte et d'habitations, le tout conjugué parfois avec des pertes de vies humaines. Ces crues ont occasionné également la montée soudaine des eaux du fleuve Mono dans la basse vallée. Elles apparaissent cycliques, mais elles deviennent de plus en plus fréquentes pour ne pas dire annuelles quand on se réfère à celles des années 1999, 2007, 2009 et 2010 (Amoussou *et al*., 2012).

Les causes des récurrentes inondations ont toujours fait l'objet de polémique. Pour les populations, le barrage de Nangbéto en est certainement la cause. Pour d'autres, notamment les nombreux auteurs géographes, sociologues et consultants comme Coyne et Bellier (1998) ou le gestionnaire du barrage (la Communauté Electrique du Bénin, CEB), c'est le fait des variabilités climatiques. D'autres auteurs comme Séne et Ozer (2002), Houanyé (2003), Mahé *et al*. (2003) et Tarhule (2005), confirment que la composante majeure des récentes inondations en Afrique de l'Ouest résiderait dans l'aggravation de la vulnérabilité.

L'absence d'analyse des risques d'inondation liés aux barrages constitue dans une certaine mesure un vide à combler dans un contexte où bientôt vont démarrer la mise en eau du barrage hydroélectrique d'Adjarala situé à 100 km en aval du premier. Il est donc nécessaire d'établir une approche d'évaluation des risques d'inondation dans un bassin hautement anthropisé.

Les multiples travaux réalisés dans le bassin par d'imminents chercheurs et experts ne permettent pas de mieux répondre à un certain nombre de questions qui continuent de préoccuper :

✓ quels sont les facteurs de risques d'inondation dans le bassin-versant du Mono ?
✓ quels sont les seuils (pluviométriques et hydrologiques) et les niveaux de risques correspondant dans le bassin du Mono sous l'action conjugué des barrages Nangbéto-Adjarala ?
✓ comment gérer les risques d'inondation dans le bassin et surtout en aval des barrages ?

C'est autant de raisons justificatives de cette recherche intitulée : « ***Les inondations et les risques prévisionnels liés aux barrages hydroélectriques dans la basse vallée du Mono*** ». Ce sujet a pour objectif de caractériser les inondations afin de mesurer leur importance et les effets qui en découlent sur les systèmes écologiques et de production.

Cette étude vise à déterminer les aléas et les niveaux de risque d'inondation. Elle permet également d'évaluer les risques liés aux effets des barrages (avec et sans rupture) et de proposer les stratégies pour une meilleure gestion des crises d'inondation. Pour répondre au mieux aux interrogations ci-dessus, les hypothèses suivantes ont été élaborées.

Hypothèses de travail

✓ L'évolution hydroclimatique, la dynamique de l'occupation du sol et le mode de fonctionnement des barrages de Nangbéto et d'Adjarala (en construction) sont facteurs de risques d'inondation dans le bassin du fleuve Mono.

✓ Les seuils (pluviométriques et hydrologiques) et les niveaux de risques dans le bassin du Mono dépendent de la variabilité spatio-temporelles des évènements inhérents et des lâchers d'eau des barrages

✓ L'évaluation de l'influence de ces déterminants dans la survenance des inondations dans la basse vallée permet d'élaborer des outils de gestion durable des risques.

Objectifs du travail

De façon générale, il s'agit d'élaborer les indicateurs de gestion durable des risques d'inondation dus aux effets conjugués de la variabilité hydroclimatique, de l'occupation du sol et du fonctionnement des barrages hydroélectriques de Nangbéto et Adjarala (en construction).

Spécifiquement :

✓ analyser l'évolution hydroclimatique et la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin du fleuve Mono ;

✓ évaluer les aléas d'inondation et les niveaux de risques en aval des barrages;

✓ déterminer les effets des aléas d'inondation sur les systèmes humains, matériels et environnementaux du bassin ;

✓ proposer un plan de gestion durable des risques d'inondation dans le bassin.

Outre l'introduction et la conclusion générale, ce travail est structuré en cinq chapitres :

Dans le premier, il est présenté les caractéristiques du milieu d'étude et l'histoire des barrages de Nangbéto et d'Adjarala

Dans le second, il a été développé les concepts, données et méthodes d'évaluation des risques d'inondation dans le bassin.

Dans le troisième, il a été abordé le contexte hydroclimatique et la dynamique de l'occupation du sol dans le fonctionnement des écoulements de surface du fleuve Mono.

Dans le quatrième, l'évaluation du risque d'inondation dans le bassin versant a été présentée.

Dans le dernier, il a abordé les conséquences des risques d'inondation et les stratégies de gestion dans le bassin-versant du fleuve Mono.

CHAPITRE 1

CARACTERISTIQUES DU MILIEU D'ETUDE ET HISTORIQUE DES BARRAGES DE NANGBETO ET D'ADJARALA

Introduction

L'installation d'un barrage hydroélectrique dépend avant tout des caractéristiques physiques et humaines du milieu. De même, son installation affecte la dynamique biophysique de l'environnement où est construite l'infrastructure. A cet effet, l'objectif de ce chapitre est de présenter les fondements physiques et humains liés au fonctionnement des barrages. Il décrit également les ouvrages et l'historique du choix du fleuve Mono pour la construction des barrages hydroélectriques partagés entre le Bénin et le Togo. Mais, avant tout cela, la présentation du secteur d'étude est indispensable pour mieux situer l'hydrosystème.

1.1. Localisation géographique du bassin du Mono

Le bassin-versant du fleuve Mono, est situé dans la région du golfe de Guinée. Il est partagé entre le Bénin et le Togo dont la plus grande partie du bassin se situe sur le territoire togolais. Il s'étend entre 06°16' et 09°20' de latitude Nord et 0°42' et 01°40' de longitude Est (figure 1.1). Il couvre une superficie de 21 475 km² (Le Barbé *et al.*, 1993). Le bassin est drainé par le fleuve Mono sur environ 560 km et aboutit à l'océan Atlantique par le biais d'un système lagunaire. Il rejoint ensuite l'embouchure qu'est la « Bouche du Roi », mais dont la plus grande partie est sur le territoire togolais. Il prend sa source à Alédjo au Nord du Bénin (Amoussou, 2010). Il accueille les eaux de ses principaux affluents en rive droite que sont de l'amont vers l'aval l'Anié (161 km), l'Amou (114 km) grossi de l'Amoutchou (62 km), le Kra (69 km) et en rive gauche l'Ogou (207 km) qui est le plus important. Son cours inférieur sur les 100 derniers kilomètres constitue la frontière entre le Togo et le Bénin. Le Mono a un régime hydrologique pluvial tropical mais subit au sud l'influence du climat subéquatorial. Ce régime est commandé par la pluviosité car aux années extrêmes de sécheresse correspond un débit très faible et aux années de forte pluviosité, un fort débit d'écoulement. Le système hydrographique du bassin du Mono est assez

conforme au schéma classique que l'on trouve dans la plupart des pays côtiers de l'Afrique de l'Ouest.

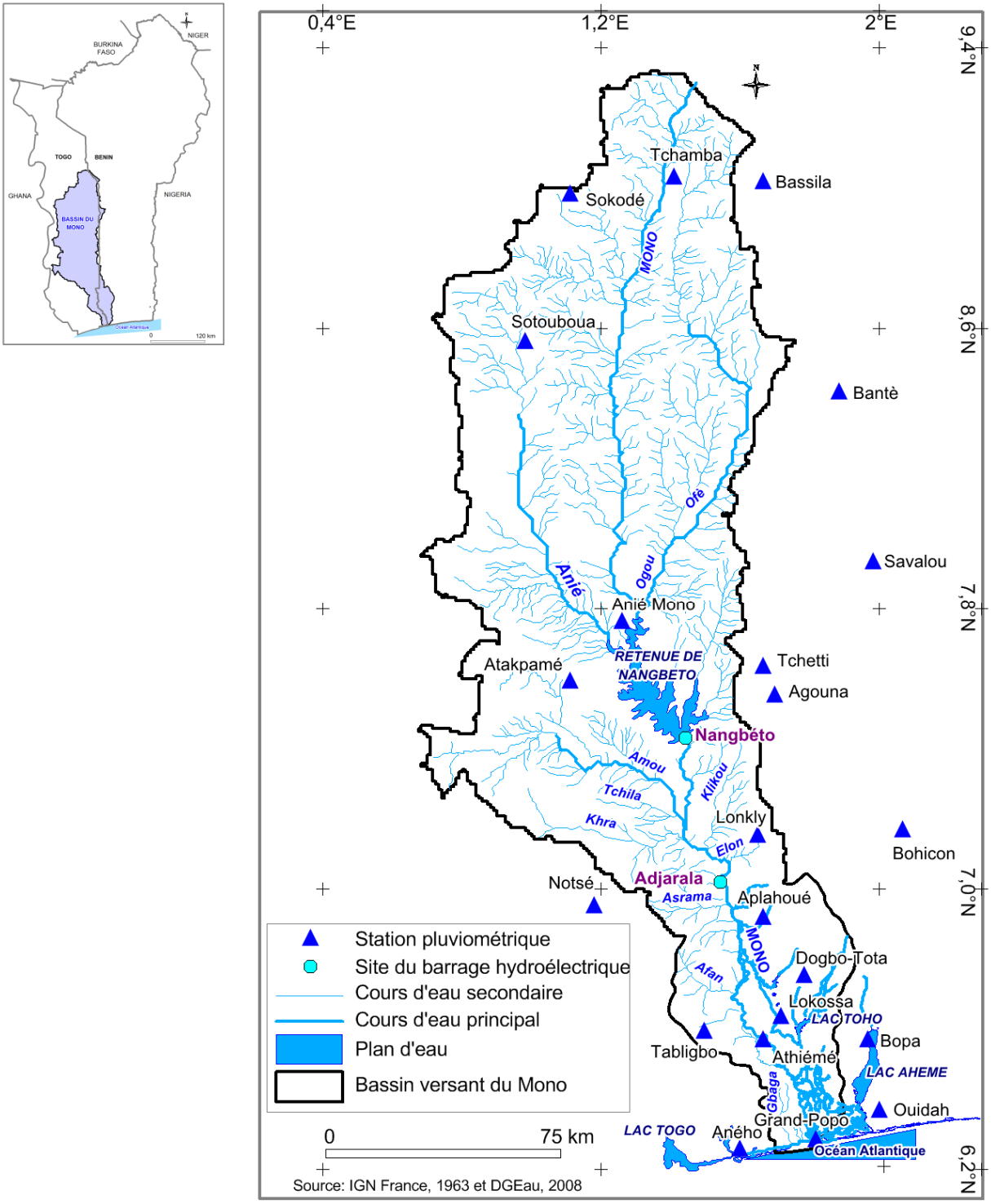


Figure 1.1 : Carte de localisation du bassin-versant du Mono

Les conditions climatiques spécifiques et la présence d'un relief au nord du bassin, lui confèrent une originalité particulière du fait que sa source est partagée aussi bien entre les unités internes des Dahoméyides et la chaîne de l'Atacora/monts du Togo.

1.2. Caractéristiques physiques du bassin-versant du fleuve Mono

1.2.1. Topographie et morphologie du milieu

Le bassin-versant comporte un bassin sédimentaire côtier au sud, modelé en plaine littorale et plateaux et des plus hauts reliefs au nord comprenant les monts Atacora et leurs prolongements méridionaux, les monts du Togo (Amoussou, 2010). Leurs crêtes sont orientées SSW-NNE, culminant entre 600 et 941 m à Atilakoutsé, constituent un véritable château d'eau. Celui-ci alimente plusieurs cours d'eau à écoulement sub-méridien à méridien (Klassou, 1996 ; Amoussou, 2010) notamment le fleuve Mono grâce à l'humidité de son climat et à l'imperméabilité de son substratum schisto-quartzitique.

Cependant, la plus grande partie du bassin-versant, est à basse altitude (30 à 300 m) comme l'illustre les figures 1.2, 1.3 et 1.4. Le relief le plus élevé s'observe sur sa partie centrale et septentrionale et plus précisément au centre- ouest (Atakpamè et Sotouboua) et au nord-ouest du bassin (Sokodé).

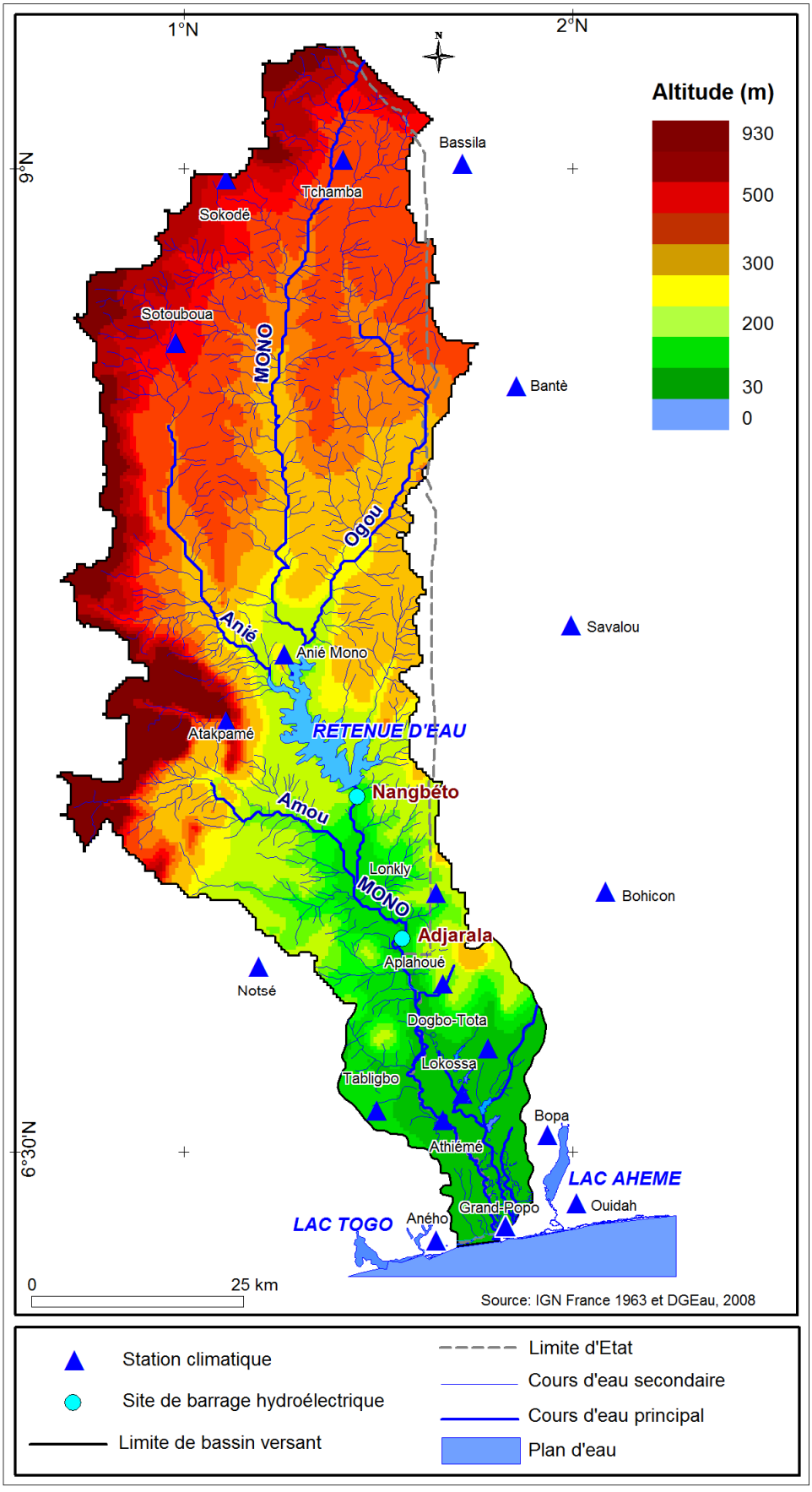


Figure 1.2 : Topographie du secteur d'étude

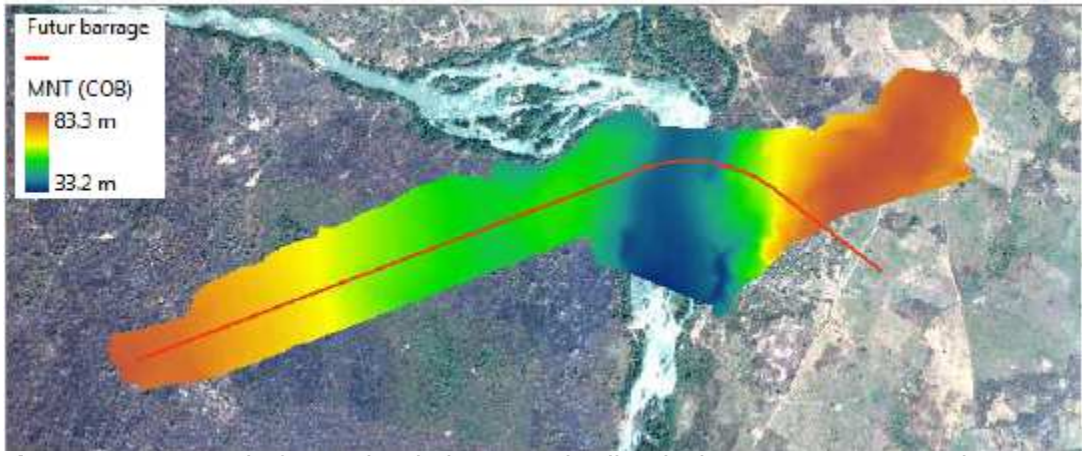


Figure 1.3 : MNT du futur site du barrage d'Adjarala (Source : CEB, 2013)

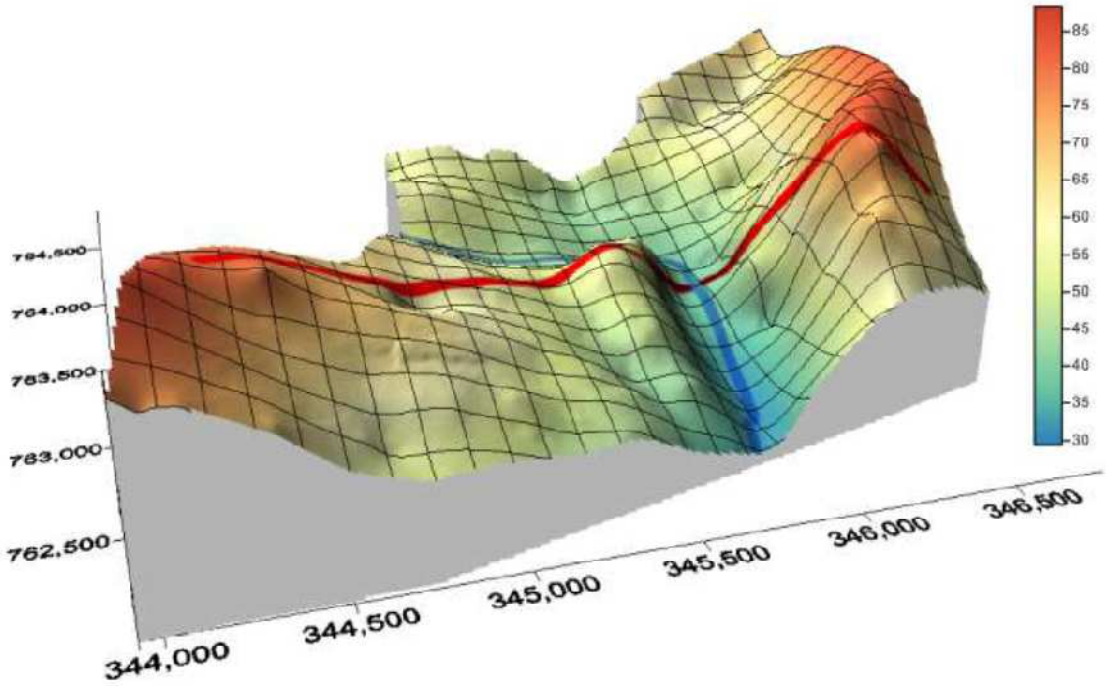


Figure 1.4 : Représentation 3D de la zone du futur barrage (Vue du Sud) (Source : CEB, 2013)

La hauteur de chute de la retenue du barrage de Nangbéto (30 m) est à une hauteur inférieure à celle d'Adjarala qui est de 50 m. Ainsi, la chute d'eau à Adjarala est plus forte qu'à Nangbéto. Ceci montre que l'énergie hydraulique que doit fournir cette chute serait plus élevée à Adjarala qu'à Nangbéto (figure 1.5).

A la latitude de Lonkly (07° N) au sud du bassin, une régression marquée de la pente, variant de 6 à 0,06 m/km, montre que c'est le secteur d'accumulation d'eau et de sédiments drainé par l'écoulement. Ce secteur constitue ainsi le réceptacle de tout ce qui est drainé de l'amont vers l'aval. Du fait de la faible pente de la partie sud

du bassin (plaine inondable et système lagunaire), on y observe une récurrence des inondations.

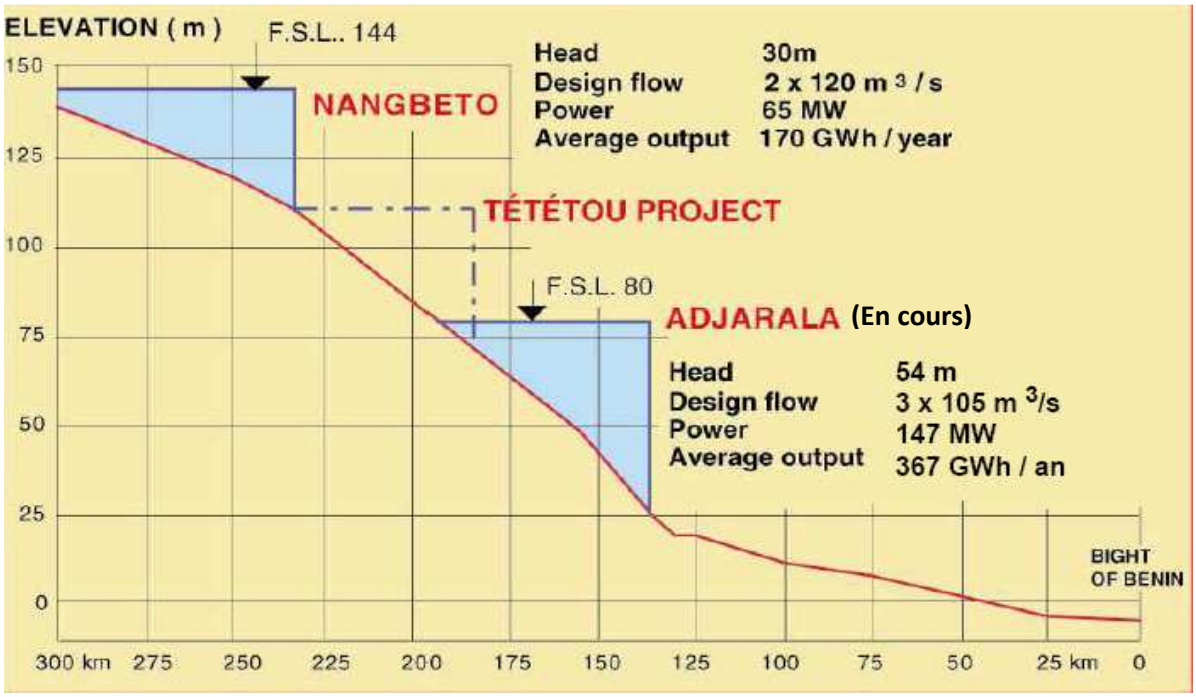


Figure 1.5 : Schématisation de la topographie des sites des barrages sur le bassin du fleuve Mono (Source : CEB, 2014)

De plus, du fait des lâchers d'eau quasi-permanente du barrage Nangbéto, la partie aval du bassin est toujours humide car le débit d'étiage est élevé (37 m^3/s) (Amoussou, 2010). C'est ce qui justifie cette fertilité des terres de la basse vallée du fait des apports alluvionnaires à la suite des inondations.

1.2.2. Contexte géologique et pédologique

Le bassin-versant du fleuve Mono est étalé globalement sur deux grandes unités géologiques comme l'ont déjà signalé Klassou (1996) et Amoussou (2010). Il s'agit des formations du socle cristallin au nord (photo 1.1a) et sédimentaires et de Terre de barre au sud (photo 1.1b).

a   b

Prise de vue : Houessou S., mars 2016

Photo 1.1 : Aspects du substratum géologique contrasté du bassin du Mono à Adjarala (a) et à Athiémé (b).

Les formations de socle cristallin dominantes affleurent sur plus des deux tiers du bassin-versant et jouent sur les dépôts alluvionnaires (Amoussou, 2010). Elles sont constituées d'un mélange de roches métamorphiques et éruptives de l'Atacorien et du Dahoméyen qui rendent lente l'infiltration et le ruissellement plus rapide. Par contre sur les formations sédimentaires composées des faciès-sableux et marneux, une meilleure infiltration prévaut en diminuant le taux de ruissellement. C'est ce qui facilite la recharge des nappes et par conséquent la vidange pendant les périodes d'étiage.

Le nord-ouest du bassin repose sur les roches sédimentaires et métamorphiques des périodes cambro-ordovicienne (voltaien) et précambrienne (le Buem et la série de Kandé-Boukoumbé. Mais, l'extrême nord-ouest est occupé par une pénéplaine découpée en socle cristallin de l'époque précambrienne (Affaton, 1975).

Le centre du bassin se compose d'une vaste pénéplaine au relief ondulé sur un socle précambrien. Les roches rencontrées sont principalement le gneiss, les quartzites et des migmatites (Amoussou, 2010) sur lesquelles sont implantées les barrages. La monotonie de la pénéplaine est sporadiquement rompue par la présence de toute une série de collines formées généralement de granites, de gneiss, de quartzites ou encore de microgranites sur lequel est installé le barrage de Nangbéto.

Le substratum géologique sur lequel sera installé le barrage d'Adjarala fait partie des unités internes de la plaine bénino-togolaise qui couvrent une grande partie du Togo

et du Bénin, et correspond à la pénéplaine granito-gneissique (figure 1.6) et regroupe plusieurs groupes de formations à savoir :

- ✓ le groupe gneissique d'Agbelouvé, constitué d'orthogneiss qui affleurent en dalles à l'ouest d'Agbélouvé;
- ✓ le groupe des migmatites de Kpédomé et de Wahala;
- ✓ le groupe des paragneiss à deux micas d'Agbandi;
- ✓ le groupe des quartzites d'Amakpapé.

La bande côtière méridionale du bassin, en pente douce et de faible altitude est composée de sédiments et de roches sédimentaires allant de l'époque mésozoïque à l'époque récente et est traversée par des affluents qui s'écoulent dans de larges lits alluviaux. L'inondation des terres adjacentes aux affluents, étangs, lacs et marais est un fait fréquent dans le bassin fluvial du fleuve Mono.

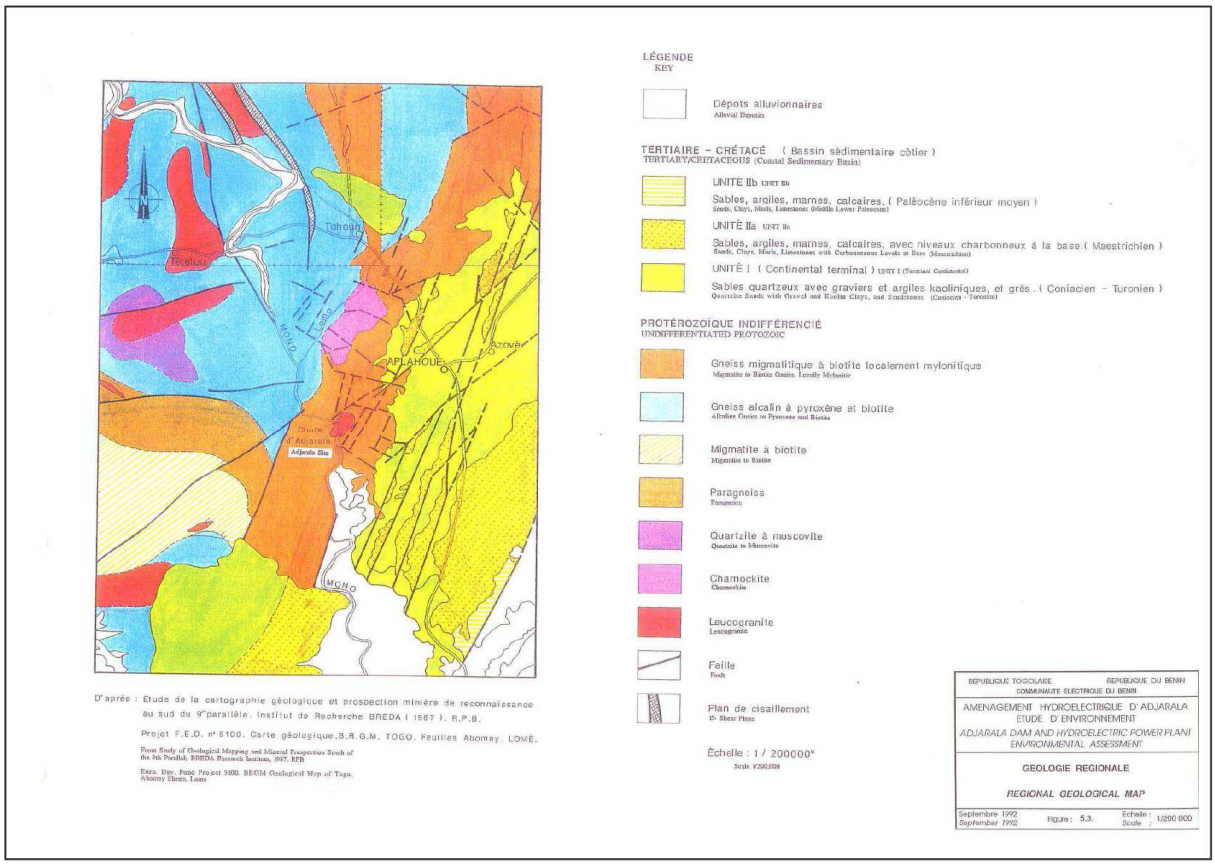


Figure 1.6 : Faciès géologique du site du barrage d'Adjarala (CEB, 2014)

Ces formations géologiques ont une différente sensibilité à l'érosion, marquée par les caractères du climat et de l'occupation du sol (Amoussou, 2010). Ainsi les roches

métamorphiques peu transformées telles que les schistes sont plus sensibles à l'érosion que les roches métamorphiques très transformées (gneiss) du bassin.

De ces formations géologiques est issue une grande diversité de sols comme l'illustre la figure 1.7. Les sols ferrugineux tropicaux lessivés (Pisoplinthique Plintosols) sont les plus dominants, occupant la plus grande partie du bassin, sont issus de l'altération du socle précambrien, caractérisé par un lessivage intense. Sur les montagnes (Atacora /monts Togo) et les reliefs reliques du socle dominent les lithosols sur grès (Lithique leptosols) qui proviennent des roches métamorphiques rigides comme le gneiss, les quartzites (Klassou, 1996). Ces sols sont souvent squelettiques et peu utilisés en agriculture, mais très sensibles à l'érosion du fait de la forte pente.

Quant aux sols ferrallitiques (Dystrique Nitisols), ils apparaissent au sud du bassin et sont issus des sédiments meubles argilo-sableux du Continental terminal et des grès sur sédiments du crétacé (Azontondé, 1991). Très riches en fer et perméables, ils sont utilisés en agriculture, mais portent aussi des formations naturelles denses. Selon Amoussou (2010), ces sols offrent une faible résistance aux agents érosifs surtout en quasi-absence du couvert végétal et ont une bonne propriété physique et hydraulique. Les vertisols (Haptique vertisols) et les sols hydromorphes (Eutrique gleysols) issus du bassin sédimentaire couvrent de façon générale les fonds des vallées. Ils sont issus de l'accumulation et de la transformation en milieu inondé des matières organiques et minérales. Ils sont assez fertiles et occupent la majeure partie de la basse vallée du Mono et subissent un lessivage intense surtout en bas de pente (Amoussou, 2010). Les sols modaux littoraux issus des sables marins ont une faible capacité d'échange cationique et sont faibles en matières organiques. Ils couvrent le cordon littoral à Grand-Popo et Anèho.

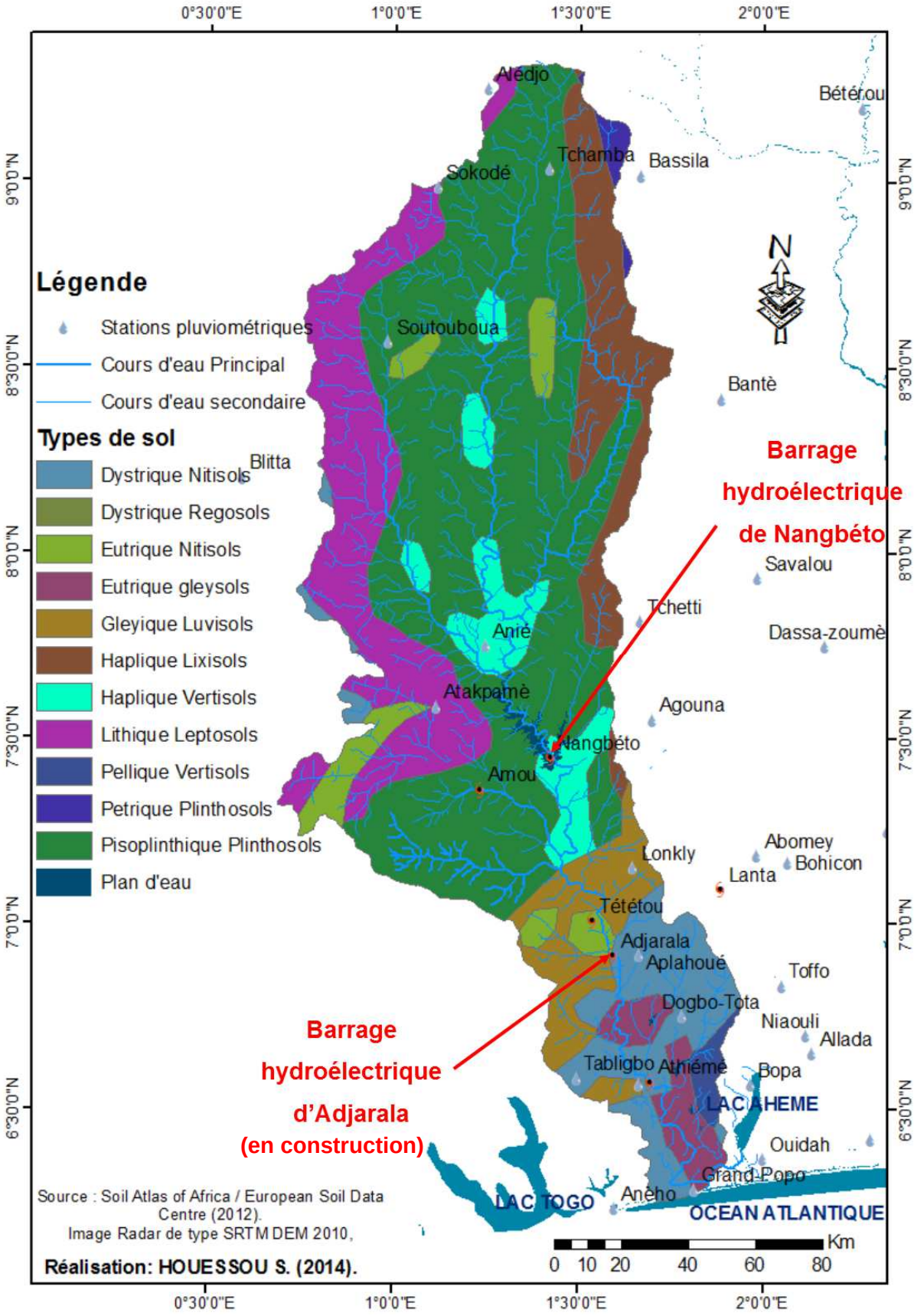


Figure 1.7 : Différents types de sols du bassin

Le principal problème des sols du bassin-versant est celui de l'engorgement dans les structures géologiques sédimentaires. Mais, l'ensemble des sols de la plaine alluviale du fleuve Mono présente une potentialité importante pour une gamme étendue de cultures irriguées ou non irriguées. Néanmoins, l'érosion sur les versants et plateaux (photo 1.2) menace le développement agricole de l'environnement immédiat de la plaine alluviale du Mono et amplifie la sédimentation du lit comme l'illustre la figure 1.8 et la photo 1.2.



Photo 1.2 : Berges du Mono fortement érodées à Athiémé (***Clichés,*** DGEau, 2009 et Houessou S., mars 2016)

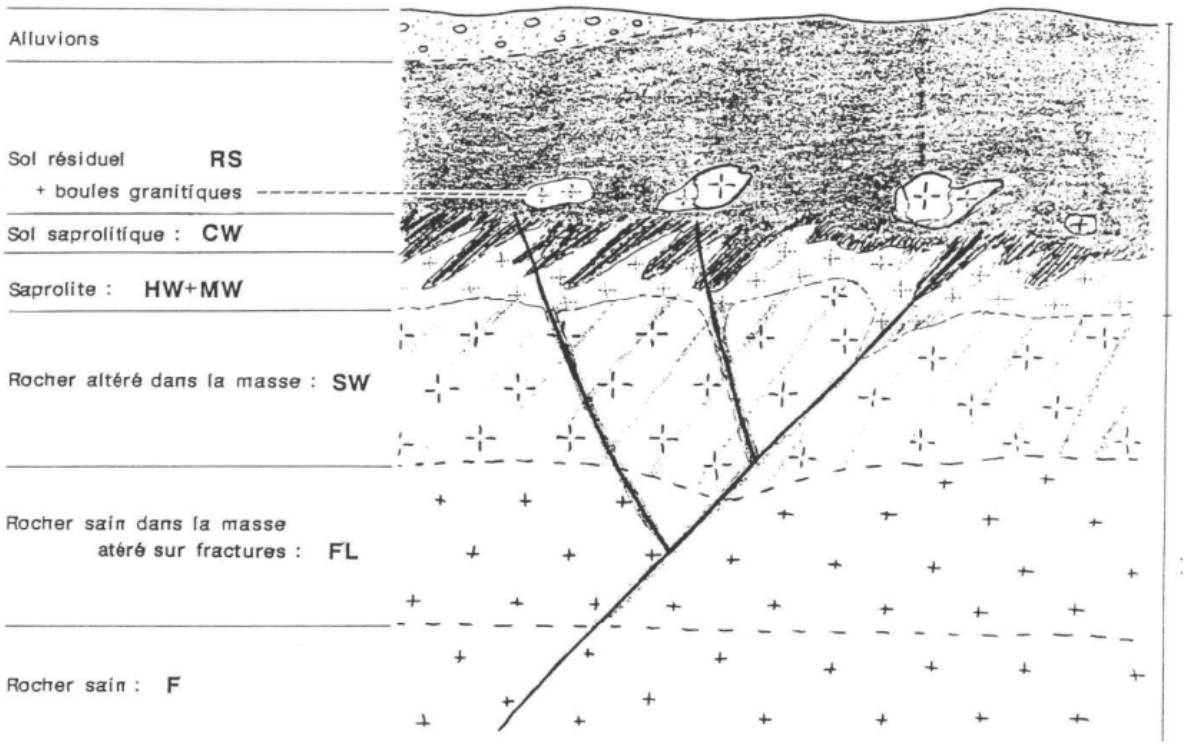


Figure 1.8 : Profil type d'altération des gneiss et granites. (Source : CEB, 2013)

Ces sols déterminent la dynamique morphologique du bassin par leur capacité de rétention en eau précipitée et l'expansion du surplus à la surface donnant lieu à des inondations.

1.2.3. Climat et hydrographie

1.2.3.1. Environnement climatique

Les précipitations du bassin-versant du fleuve Mono dépendent de plusieurs échelles spatiales (Amoussou, 2010). Pour mieux appréhender la répartition spatiale et la variation temporelle des précipitations du bassin-versant du fleuve Mono partagé entre Togo-Bénin, il est avant tout nécessaire de raisonner à l'échelle régionale plutôt qu'à l'échelle locale.

Dans le bassin du Mono, les migrations saisonnières du Front Intertropical (FIT) permettent la mise en place quatre grandes « zones de temps » différentes (figure 1.9). Dans la zone A, au nord, le tracé au sol du FIT, indique la grande saison sèche du bassin, avec la quasi absence des précipitations.

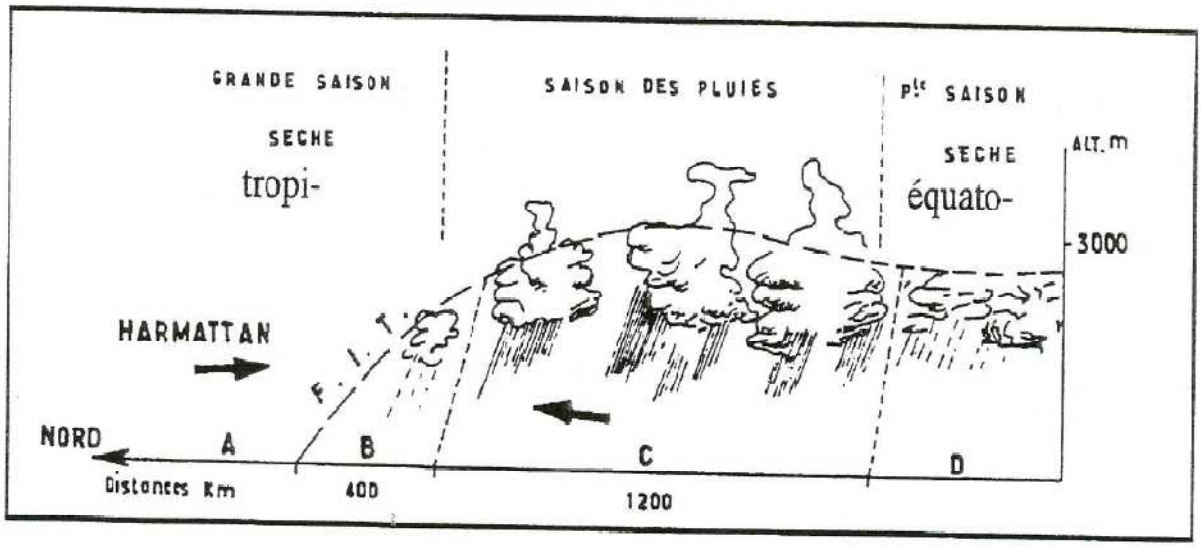


Figure 1.9 : Schéma des types de temps saisonniers en fonction de leur position par rapport au front intertropical (FIT). ***Source*** *: Casenave* et al*., 1989 repris par Amoussou, 2010*

Au sud, le tracé au sol du FIT indique que l'épaisseur de la mousson varie dans l'espace et dans le temps. Sur une distance de 300 à 400 km (figure 8, zone B), elle n'est pas suffisamment importante pour qu'il ait un développement convectif puissant (Laporte, 1990 ; Amoussou, 2010). Mais, quelques formations nuageuses se développent favorisant une humidité assez élevée au sol. Cette zone B se situe au

sud du bassin-versant du Mono vers mars-avril. Plus au sud (figure 1.9, zone C), les pluies sont beaucoup plus intenses et durables au fur et à mesure que l'épaisseur de la mousson devient importante (1 500 voire 2 000 m ou plus). Cette zone couvre la plus grande partie du bassin vers mai-juin. Ainsi, les perturbations majeures donnant l'essentiel des pluies interviennent au sein de la zone C (Amoussou, 2010) et accroissent les risques d'inondations.

Les conditions climatiques à l'échelle du bassin-versant du Mono se présentent du nord au sud en deux domaines climatiques (figure 1.10) à savoir : le domaine climatique subéquatorial de la côte à la latitude 7°30 caractérisé par un régime bimodal et le domaine climatique tropical humide sur le reste du bassin caractérisé par un régime unimodal. Mais, le domaine subéquatorial est subdivisé en deux selon Amoussou (2010) : domaine subéquatorial maritime (de la côte à 6°35' : classe 1) et domaine subéquatorial intérieur (6°35' à 7° 30' : classe 2). Ce qui donne trois classes de pluie (figure 1.11) dans le bassin du fleuve Mono.

La figure 1.12 présente le régime pluviométrique des trois classes de pluie dans le bassin représentée par les six stations pluviométriques à raison de deux par classe. Il ressort de cette figure 1.12 que les deux stations (Atakpamè et Sokodé) de la classe 3 présentent un régime unimodal avec un pic en août. Les quatre autres stations présentent un régime bimodal. L'optimum le plus marqué s'observe en juin avec les stations du domaine maritime (Anèho et Grand-Popo). A l'inverse, l'optimum le plus marqué de la seconde saison des pluies s'observe en octobre avec les stations de l'intérieur du continent (Tabligbo et Dogbo-Tota).

De l'analyse de la figure 1.12, il ressort que dans le domaine subéquatorial, les mois pluvieux (grande saison des pluies) sont mai, juin et juillet dont l'optimum est enregistré en juin (280 mm) et de septembre à octobre pour la petite saison des pluies avec un maximum en octobre (130 mm) qui coïncident avec les périodes de hautes eaux et par conséquent la survenance des risques d'inondation dans la basse vallée.

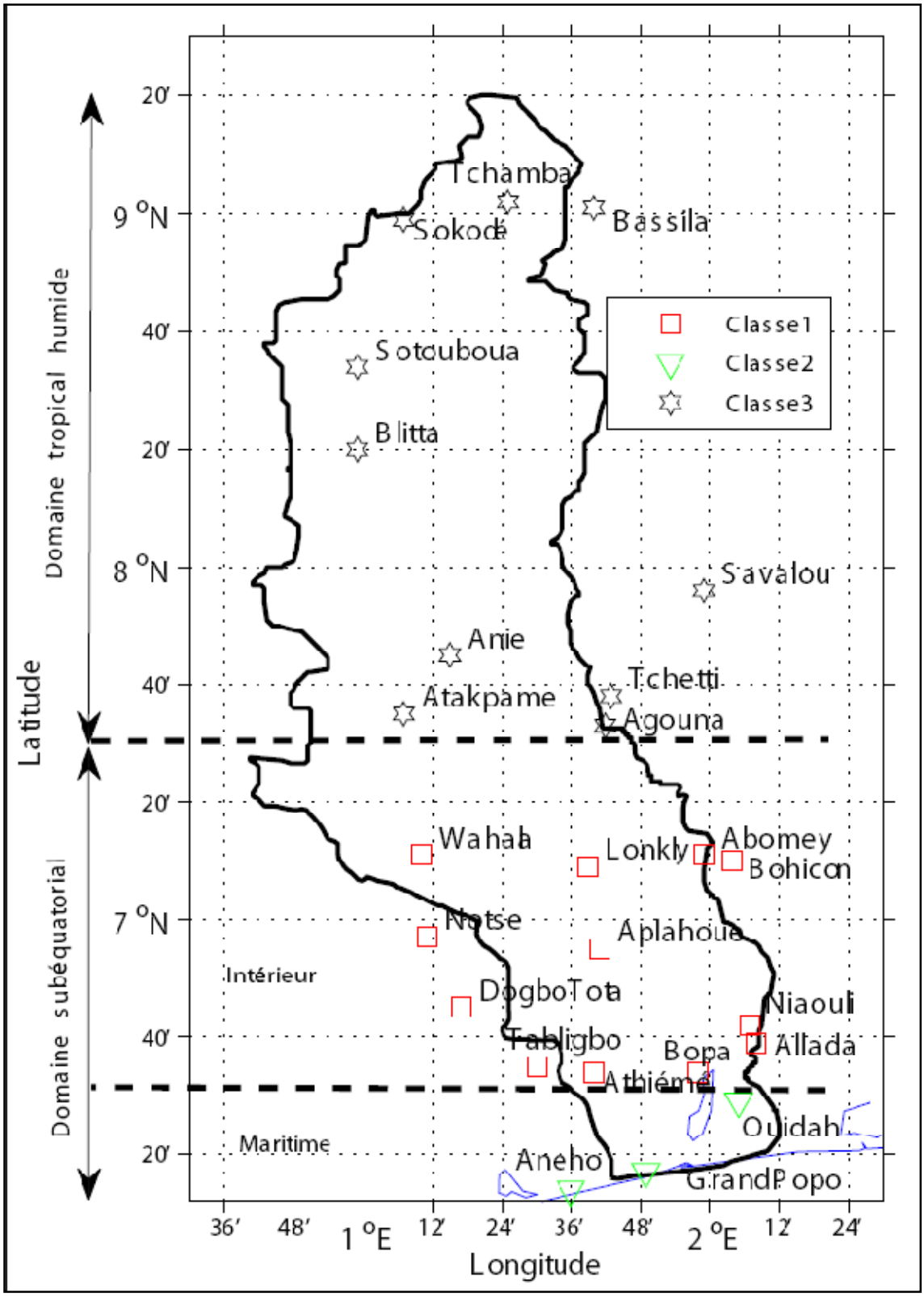


Figure 1.10 : Cartographie des différents domaines climatiques du bassin
Source : Amoussou, 2010

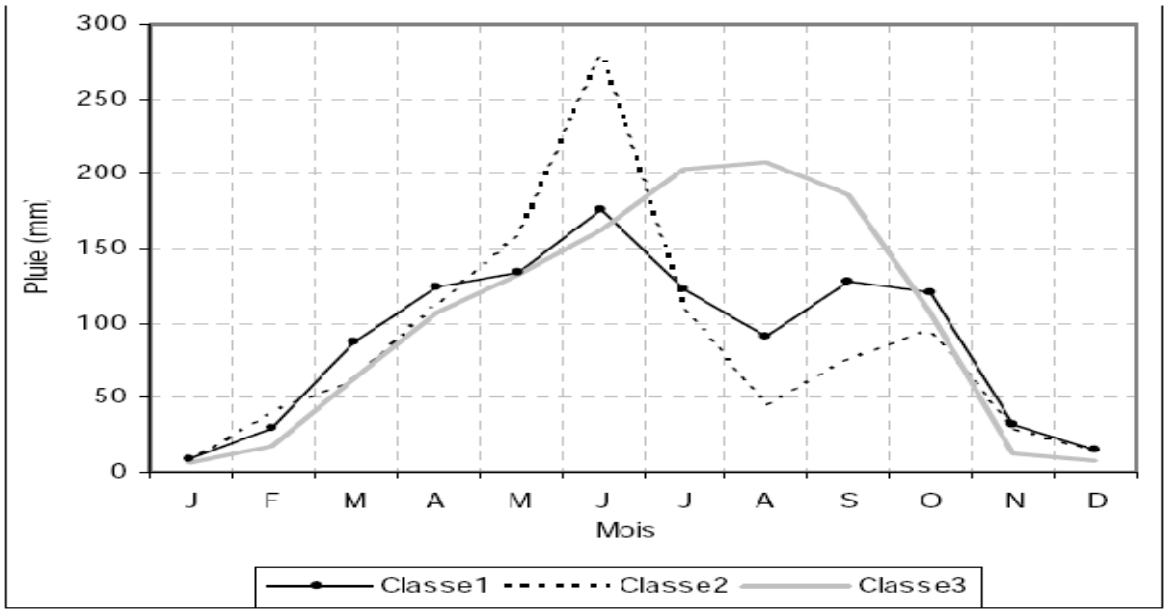


Figure 1.11 : Evolution mensuelle des précipitations de 1961-2000 en trois types de classes (***Source*** : Amoussou, 2010)

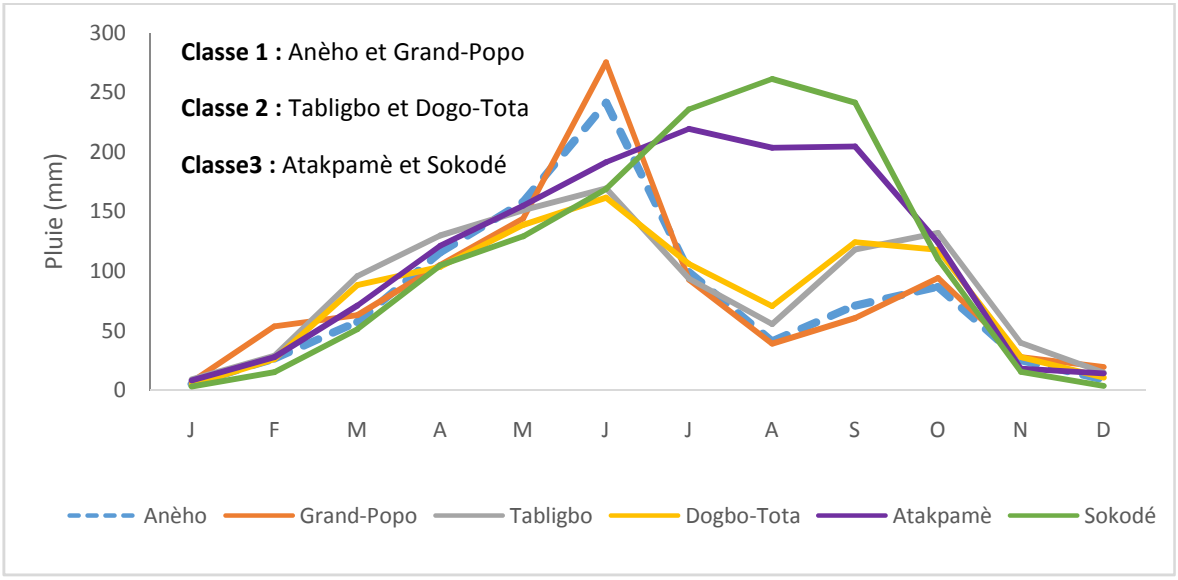


Figure 1.12 : Régime des précipitations dans le bassin de 1961 à 2010

Au cours de la petite saison sèche, le domaine subéquatorial intérieur enregistrent plus de pluie en août (60 mm) que celles du domaine subéquatorial maritime (40 mm). Par contre dans le domaine tropical humide, la période de pluie est de juin à septembre dont l'optimum est atteint en août (250 mm). Ces résultats corroborent avec ceux de Amoussou (2010) illustrés par la figure 1.11.

La température dans le bassin varie de 23,2°C à 33,6°C du Nord au Sud. Annuellement, elle est en moyenne de 28°C. Ce fort écart entre la température

maximale et minimale confirme l'augmentation de la température moyenne et par conséquent une forte demande évaporatoire, ce qui entrainerait inévitablement une baisse très marquée du niveau d'eau dans le bassin.

1.2.3.2. Caractéristiques hydrographiques et hydrologiques du bassin

Le système hydrographique du bassin du Mono est assez conforme au schéma classique que l'on trouve dans la plupart des pays côtiers de l'Afrique de l'Ouest. Les conditions climatiques spécifiques et la présence d'un relief élevé au nord du bassin, lui confèrent un réseau hydrographique dense (figure 1.13).

Le fleuve Mono, long de 560 km, prend sa source à Alédjo au Nord du Bénin dans les monts Koura et suit une direction E-W jusqu'au 8ème parallèle avant de prendre un cours NNW-SSE qui oblique un peu vers l'est jusqu'à son embouchure (Le Barbé *et al.*, 1993). De régime très irrégulier, le fleuve Mono sert de frontière entre le Bénin et le Togo sur près de 148 km (Le Barbé *et al*., 1993).

Avec une profondeur variant de 3 à 8 m suivant les sections et les périodes, il draine un bassin-versant de 21 475 km² à l'exutoire de Kouéta (près de Grand-Popo). Plusieurs rapides jalonnent son cours : il s'agit des rapides de Bélia, Katong, Bègba, Adjarala (site d'un futur barrage à 97 km en aval de Nangbéto), Arandoulé, Agbako et Drékpon (figure 1.14).

Les principaux affluents du Mono de la rive droite sont :

- L'Aou long de 55 km
- L'Anié long de 161 km
- L'Amou long de 114 km
- Le Kra long de 69 km

Ceux de la rive gauche sont :

- L'Ogou long de 207 km
- Le Nonkpoué long de 60 km
- Le Klikou long de 41 km

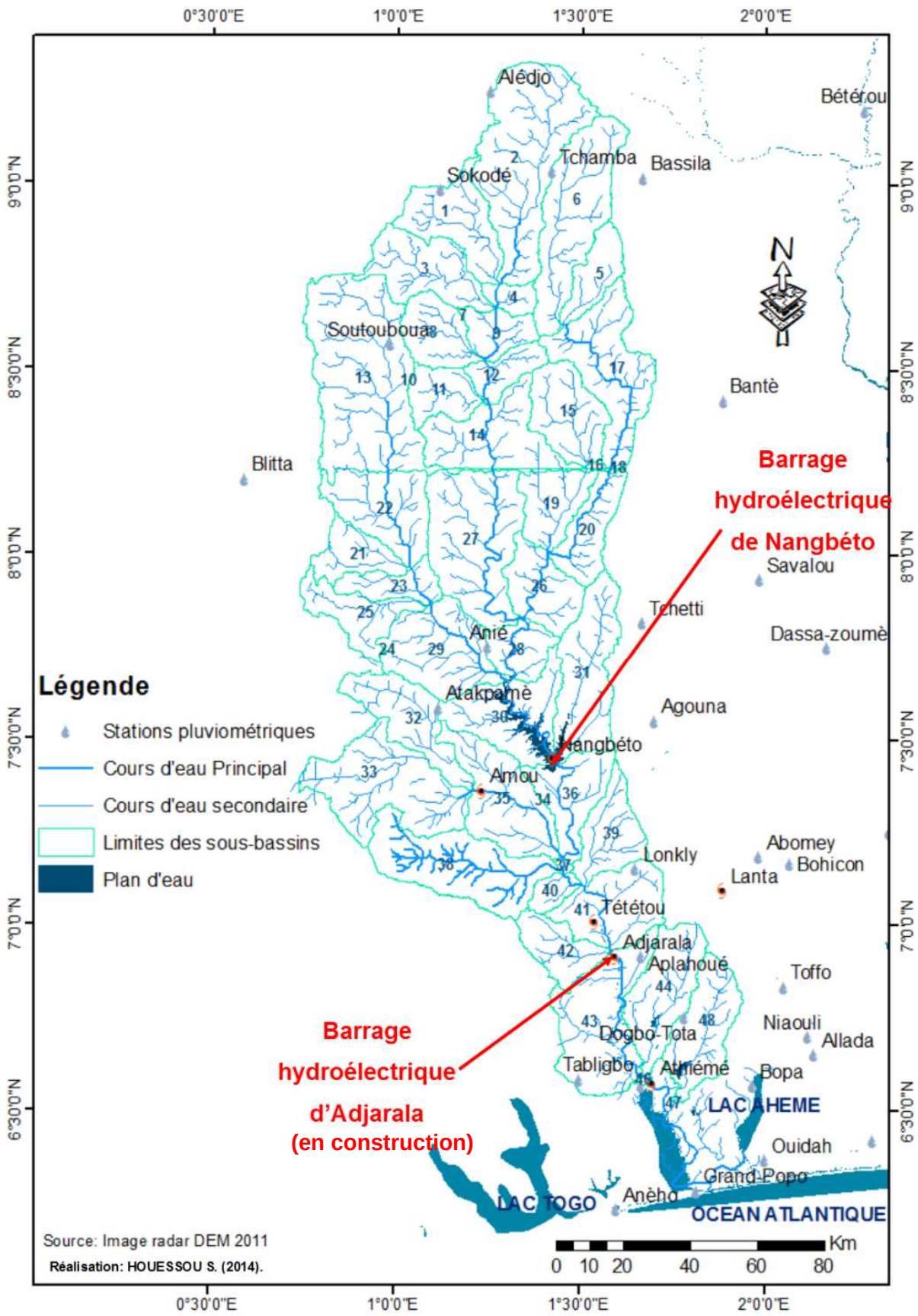


Figure 1.13 : Réseau hydrographique du bassin

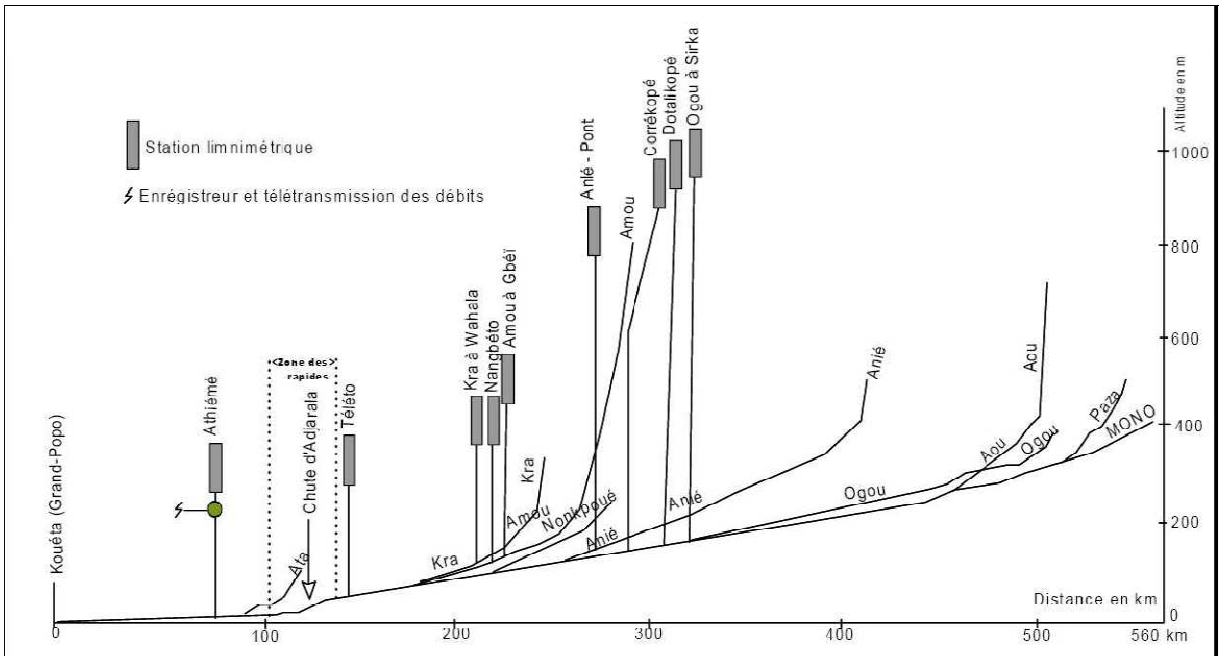


Figure 1.14 : Profil du fleuve Mono (***Source** : Le Barbé* et al*., 1993*)

Tous les cours d'eau du bassin, à l'exception de l'Amou, ont:

- un débit très variable au cours de l'année et d'une année à l'autre ;
- un rapport «débit de crue/débit d'étiage» toujours très élevé ;
- une longue durée des basses eaux, caractéristique des bassins à alimentation exclusivement pluviale.

Les caractéristiques hydrologiques des principaux éléments d'appréciation du projet de construction du barrage d'Adjarala se résument comme suit (Coyne-et-Bellier, 1997 et 2013) :

- superficie du bassin versant 20 600 km²;
- débit moyen au site 122 m³/s;
- débit de pointe de la crue cinquantennale (Crue de chantier en Saison humide) 2400 m³/s;
- débit de protection de la crue de chantier en Saison Sèche soit 500 m³/s;
- débit de pointe de la crue millénale 3450 m³/s;
- débit de pointe de la crue décamillénale (Crue de projet) 4220 m³/s;
- débit de pointe de la crue maximale probable (CMP) 4780 m³/s.

Quant à la basse vallée du fleuve Mono, elle présente un réseau hydrographique très développé, avec présence de mares et de lacs à la périphérie dont les plus

importants sont le lac Ahémé et le lac Togo (figure 12 supra). En plus du Mono, il existe un autre axe de drainage bien marqué ; celui de la Sazué (63 km), avec une pente très faible, qui reçoit les rivières Dévédo (22 km) et Savédo (40 km) sur la rive gauche du Mono (Amoussou, 2010). Le fleuve Mono communique avec ces deux lacs surtout en période de crues. Mais, de nos jours, cet équilibre est presque rompu avec la mise en eau du barrage Nangbéto.

Le Mono a un régime hydrologique pluvial tropical mais subit aussi l'influence du climat subéquatorial de la côte à la latitude 7°30' N. Ce régime est commandé par la pluviosité car aux années extrêmes de sécheresse correspond un débit très faible (17,68 m^3/s en 1983) et aux années de forte pluviosité un débit fort (292,71 m^3/ en 1968). En année moyenne, selon Le Barbe *et al* (1993), le débit moyen annuel du fleuve Mono est de l'ordre de 100 m^3/s à la station d'Athiémé. Mais, depuis 1988 où le barrage de Nangbéto est en exploitation, le régime hydrologique du Mono a connu une grande modification (débit moyen : 187 m^3/s) avec un étiage soutenu par un débit moyen de 37 m^3/s (Amoussou, 2010) et une crue amortie. A cet effet, avec la construction du barrage d'Adjarala, les étiages seront plus soutenus et les crues plus amorties en aval. Cependant, les forts lâchers d'eau contribuent aux gonflements des eaux qui inondent la basse vallée (photo 1.3).



Cliché : Amoussou et al., octobre 2010

Photo 1.3 : Inondation dans les agglomérations de la basse vallée du fleuve Mono

La hauteur de chute créée par le barrage permet la production d'électricité pour les deux pays gérée par la Communauté Electrique du Bénin (CEB), un organisme conjoint des deux pays. Les eaux turbinées et rejetées dans le lit du Mono devraient permettre d'assurer un débit suffisant pour maintenir le fonctionnement écologique

du fleuve et satisfaire aux besoins de l'irrigation et l'approvisionnement en eau potable des populations riveraines.

Système lagunaire et côtier du bassin

Le Mono, principal apport d'eau douce, débouche sur un ensemble de plans d'eau étroits et parallèles à la côte (au Togo, la lagune d'Aného et le chenal M'Baga ; au Bénin, la lagune côtière). Ces unités hydrographiques communiquent avec la mer par les passes d'Aného (Togo) et de la Bouche du Roi (Bénin).

Les plans d'eau côtiers sont en relation aux deux extrémités du système lagunaire, avec d'importants lacs saumâtres : le lac Togo et le lac Ahémé. Ces lacs peu profonds, ne présentent pas de variation verticale marquée de température et de salinité (Coyne-et-Bellier, 1993).

La forte productivité des lagunes côtières en zone tropicale est due aux températures élevées et aux apports minéraux et nutritifs importants provenant du fleuve et de la mer (Basson *et al*. 1977). En situation d'ouverture le cycle hydrodynamique de ce type de lagune comporte quatre phases : une phase d'isolement au cours de la saison sèche, qui se caractérise par une augmentation de la température et de la salinité des eaux sous l'effet de l'évaporation; une phase de remplissage au cours de la première saison des pluies, marquée par des températures plus basses et une gamme de salinité très faible, le niveau des eaux monte considérablement (2 m) et la production organique primaire augmente; une phase de vidange rapide des eaux continentales de crue marquée par une baisse de la production organique; une phase d'échange avec la mer jusqu'à la fermeture du cordon littoral sous l'effet des vagues et des courants côtiers. Ces ouvertures quasi-permanentes font que ces inondations ne durent pas, ce qui constitue un problème de renouvellement de la faune aquatique dans le bassin.

1.2.4. Importance de la formation végétale et faunique

Les formations végétales interviennent dans le cycle de l'eau et par conséquent dans la dynamique des écoulements de surface. Les travaux de Maître et Jenni (2006), Vissin (2007), Amoussou (2010) et Totin (2010) ont montré que les formations naturelles telles que les forêts favorisent l'infiltration de l'eau dans les sols et

réduisent les écoulements superficiels. Ainsi, la capacité d'infiltration du sol d'une région dépend de l'état du couvert forestier. Bharati *et al.* (2002) ont montré que les capacités d'infiltration sont nettement plus élevées sous forêt que sous prairie ou cultures. En absence de cette formation, le ruissellement devient abondant engendrant le plus souvent des inondations.

Le milieu récepteur du bassin du fleuve Mono est caractérisé par la présence de plusieurs types de formations végétales naturelles telles que la forêt dense, la forêt galerie (photo 1.4), la forêt claire, la savane arborée et arbustives d'une part et les formations anthropiques telles que les mosaïques de cultures et jachères d'autre part.



Prise de vue Houessou S., février 2015

Photo 1.4 : Forêt galerie le long du bassin du Mono à Nangbéto et à Adjarala

Dans les environs immédiats de Nangbéto et du site du barrage d'Adjarala, le couvert végétal est en dégradation laissant une dominance du ruissellement sur l'infiltration susceptible d'engendrer le plus rapidement possible un débordement de la lame d'eau écoulée. Cette dégradation de la formation végétale (photo 1.5) entraîne un fort ruissellement surtout en présence de forte pente (photo 1.6) et par conséquent une surabondance d'eau dans la plaine d'inondation.



Prise de vue Houessou S., février 2015

Photo 1.5 : Dégradation du couvert végétal dans le bassin du Mono à Asrama



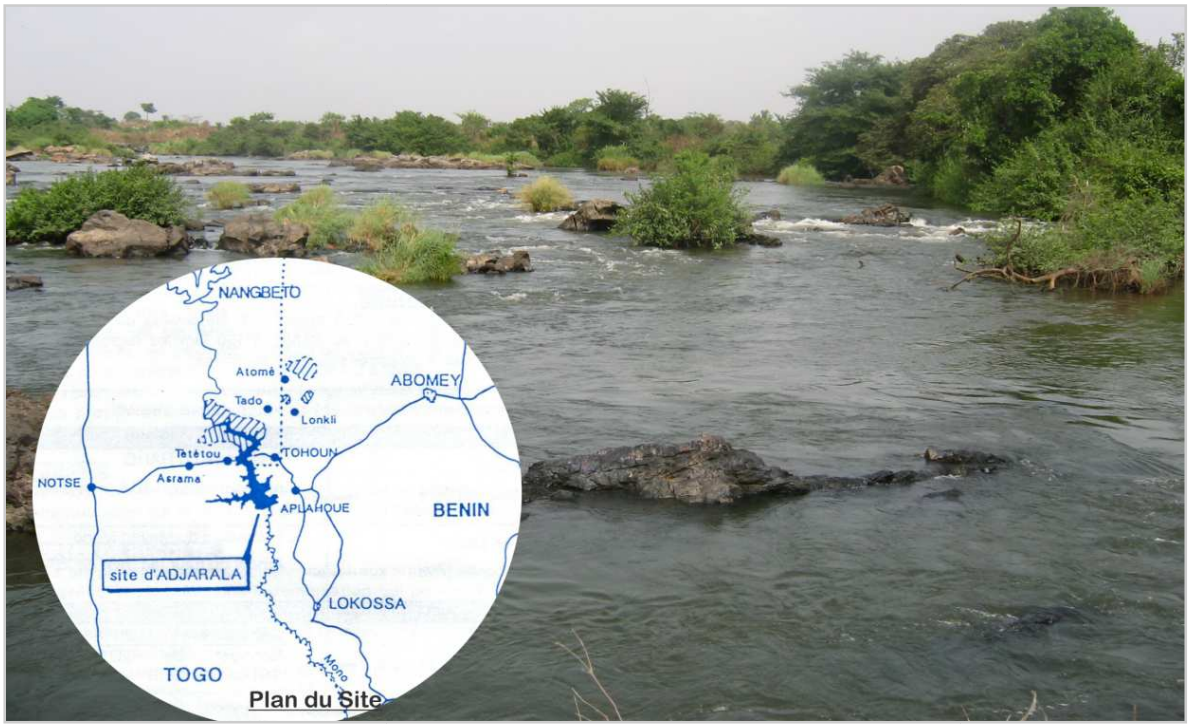
Prise de vue : Houessou S., février 2015

Photo 1.6 : Tracé du ruissellement des eaux pluviales vers le lit du fleuve Mono à Asrama

Les différents écosystèmes dans la zone d'influence directe du projet d'Adjarala (photo 1.7) sont composés de formations forestières, savanicoles et/ou des plantations forestières et mosaïques de jachère-cultures qui pourraient atténuer les risques potentiels d'inondation.

Au terme des investigations de terrain et des analyses des cartes thématiques, les forêts semi-décidues à faciès secs ont été observées dans les aires protégées de Togodo Nord et Sud. Ces formations sont moyennement dégradées. La strate herbacée est dominée par *Eupatorium*. En ce qui concerne la strate arbustive, elle est composée de *Chaetacmea ristata, Erythroxylumem arginatum, Fagara zanthoxyloides, quant à* la strate arborée, elle est formée de *Drypetes floribunda,*

*Drypetes parviflora, Dialium guineese, Hildegar dia*barteri, *Diospyros mespiliformis*, *Ricinodendr onbeudelotii* (Mondjannagni, 1977; Gayibor, 1986; Tchamié, 1988).



Prise de vue : CEB, mai 2014

Photo 1.7 : La forêt galerie sur le site du projet de construction du barrage d'Adjarala

Quelques formes linéaires de forêts galeries bordent le fleuve Mono et ses affluents Asrama, Hali, Kliku, Elon, Avou, Blado, etc. Du point de vue floristique, ces formations sont constituées d'espèces reliques de forêts semi-décidus à facies secs qui, jadis, recouvraient la zone du projet (Kokou, 1998) comme *Afzelia africana, Albizia adianthifolia, Albizia ferruginea, Albizia glaberrima, Albizia zygia, Anogeissus leiocarpus, Antiaris africana, Celtis philippensis, , Cola gigantea var. glabre, Fagara zanthoxyloides, Milici aexcelsa, Milletti athonningii, , Schrebera arborea, Triplochiton scleroxylon* etc. Elles abritent aussi des espèces qui ne s'éloignent pas des berges des cours d'eau comme *Berlini agrandiflora, Cola laurifolia, Cynometram egalophylla, Parinari bcongensis, Pterocarpus santalinoides, Uapaca heudelotii,* etc.

Dans le système lagunaire, cette zone présente un aspect très intéressant dans la mesure où c'est un milieu généralement conquis par des végétaux aquatiques qui ne subissent pas d'influence climatique. Les peuplements reconnus selon Akpagana *et al*. (1990) et Afidégnon, (1998) sont les mangroves des eaux saumâtres le long de la

Gbaga et de ses affluents. Elles sont essentiellement constituées d'arbres : *Rhyzophora racemosa et Avicenia africana*. A part cette mangrove dite "haute mangrove", on trouve aussi la "basse mangrove", caractérisée par l'absence d'arbres. Elle est dominée par les *Cyperaceae* et les *Poaceae* parmi lesquelles il faut citer *Cyperus articulatus et Paspalum distichum*. Le rideau de palétuviers est précédé par les peuplements de *Nymphea lotus* dans les anses de la Gbaga. Les mangroves qui sont inféodées au système lagunaire sont des formations édaphiques halophiles, typiquement tropicales et exclusivement littorales, dont la principale caractéristique est leur composition floristique dominée par les palétuviers. Les mangroves togolaises sont localisées dans l'extrême sud-est du pays autour du chenal de Gbaga et de ses rivières affluentes. Elles couvrent aujourd'hui moins de 1 000 hectares avec deux espèces de palétuviers : *Rhizophora racemosa* et *Avicennia germinans*, auxquels sont associées *Drepanocarpus lunatus, Pterocarpus santalinoides et Acrostichum aureum*. Les mangroves togolaises sont aujourd'hui réduites, alors qu'elles ont occupé dans le passé tout le pourtour du système lagunaire côtier. La coupe des mangroves est une des causes de cette déforestation ajoutée aux possibles effets des modifications hydrologiques entrainées par le barrage de Nangbéto.

Du point de vue faunique, le bassin-versant du Mono hébergeait de nombreuses espèces de l'amont vers l'aval. Mais, avec la mise en eau du barrage de Nangbéto, qui a précipité l'installation humaine dans le bassin, les espèces se font de plus en plus rares, surtout en aval, en ce qui concerne les espèces halieutiques. Par contre, elles prolifèrent en amont immédiat du barrage où la pêche est interdite.

L'écosystème Mono abrite d'énormes espèces d'amphibiens en disparition de nos jours. Celles recensées sont pour la plupart des espèces de savanes présentant une large distribution dans le bassin, mais plus au Togo qu'au Bénin (Land Ressources, 2014). Les reptiles sont représentés par les Ophidiens (Serpents), les Sauriens (Lézards), les Chéloniens (Tortues) et les Crocodiliens (Crocodiles). Bien que les reptiles semblent s'être adaptés aux modifications de leurs habitats naturels et même capables de vivre dans des habitations humaines, ils constituent l'un des groupes sur lesquels, la pression humaine est la plus importante. En effet, les serpents qu'ils soient venimeux ou non sont systématiquement tués par les populations rurales.

Parmi les Crocodiliens, seul *Crocodylus niloticus* est présent dans les mares à l'extrême sud de la réserve de Togodo. Il est également présent le long du Mono et dans l'ensemble de sa vallée. On le trouve également dans les mares et les affluents du Mono. Bien que son exploitation commerciale soit totalement interdite depuis une dizaine d'année au Togo, l'espèce est aujourd'hui très menacée en raison de la destruction de son habitat par l'agriculture lié à la transformation des mares en terres agricoles (Land Ressources, 2014).

Du point de vue zoogéographique, la plupart des reptiles échantillonnés sont des taxons caractéristiques des savanes (*Kinixys bellianangueyi, Tachylepsis perrotetii, Hemidactylus spp, Psammophis spp, Crotaphopeltis hotambeia*, *Lamprophis fuliginosus,…*) et sont présentes partout dans le bassin, mais plus au Togo qu'au Bénin. Par contre les autres, même si elles se rencontrent ailleurs au bassin, n'habitent que les formations très boisées et sont beaucoup plus rare. Il s'agit de : *Crotaphopeltis hippocrepis, Hapsidophrys smaragdina et Mochlus guineensis*.

La population d'hippopotame dans le bassin du Mono est assez mal connue. C'est une population très fragmentée en petits groupes le long du fleuve et dans les plans d'eau adjacents. A en croire les enquêtes menées auprès des populations locales des différents sites, la population totale avoisinerait les 300 individus (Guedou, 1999 ; Segniagbeto 2005, Afiademanyo 2006). Cependant, ces derniers s'accordent à reconnaître que les chiffres sont largement surestimés. Coté togolais, les plus grandes concentrations d'individus sont signalées dans les mares situées au sud du parc de Togodo (Lotoé, Afito, Avli et Lagoè). Au Bénin, les sites d'hippopotames les plus connus sont : les rapides d'Adjarala, les marais de Djiffri, d'Adjamé, de Zoko, de Dohoun, de Tovlo, de Langoui ainsi que le fleuve Mono dans la localité de Médéhounta.

De nos jours, toutes ces espèces sont en disparition même dans les zones dites protégées et ceci du fait des activités socio-économiques.

1.3. Environnements humains du bassin

La portion sud du bassin partagé entre le Bénin et du Togo a été très tôt des pôles d'attraction des populations et ceci du fait des conditions physiques très favorables

pour le développement agricole (Amoussou, 2010). Une analyse est réalisée sur les caractéristiques des habitats et des populations qui sont impactés d'une part par le barrage de Nangbéto et qui seront impactés d'autre part par le barrage d'Adjarala.

1.3.1. Peuplement et habitat

Le bassin du Mono est occupé par les populations de la civilisation Tado, berceau des peuples Adja-Ewé, l'ethnie qui a peuplé le sud du Togo et du Benin. Mais, cette population est inégalement répartie dans le bassin.

Du côté togolais, trois préfectures s'installent en grande partie dans le bassin. Il s'agit du Moyen-Mono, de Haho et de Yoto, divisées en quatre cantons. Ce sont les préfectures qui seront les plus touchées par l'aménagement du barrage d'Adjarala et la mise en eau de son réservoir. Une superficie totale de 59,8 km² sera inondée (soit entre 2,6 et 13,7 % de la superficie totale des cantons touchés).

Au Bénin, les populations des départements du Mono et du Couffo qui occupent le bassin et plus précisément les communes d'Aplahoué, de Lokossa, de Dogbo-Tota, d'Athiémé et de Grand-Popo seront les plus touchées. Mais, dans le cadre du projet Adjarala, la commune d'Aplahoué qui est une localité cosmopolite est dominée par l'ethnie Adja (environ 93,3 % de l'ensemble de la population dans le secteur du projet). Les autres ethnies Fon, Yoruba, Ibo, etc., ne représentent que 6,7 %. Environ 22 % de la population totale du département du Couffo (524 524 habitants) occupent le bassin du Mono. Dans la commune d'Aplahoué, la population rurale est évaluée à 95 605 habitants soit 18,22 % de l'effectif total de la Commune (INSAE, 2006), sera la plus touchée par l'aménagement du barrage d'Adjarala et la mise en eau de son réservoir. Environ 22,8 km² (soit 2,4% de la superficie de la commune) sera inondée. Cette surface constitue 27,6 % de la surface totale du réservoir et susceptible d'être exposé aux aléas d'inondation liés au fonctionnement du barrage.

Selon les statistiques nationales du Bénin et du Togo, la densité de la population dans le bassin est inégalement répartie (moyenne 50 à 100 hbts/km²); ceci du fait d'un plus grand enclavement de la zone, limitant l'accessibilité des terres et rendant difficile le transport et la commercialisation des productions. Mais, d'après Amoussou (2010), la population est très dense dans la région côtière (230 hbts/km²) et, assez

forte sur les plateaux (105 à 120 hbts/km²), alors qu'elle est plus faible sur les monts Togo/Atacora, c'est-à-dire dans le haut bassin (5 à 15 hbts/km²). Ceci est lié à la présence des montagnes n'offrant pas de grands espaces culturaux.

Dans le bassin, la population est d'environ deux millions (UEMOA, 2006), avec un accroissement annuel de 2,9 % au Togo (2004) contre 2,82 % au Bénin (2005). Cette croissance de la population, est caractéristique de l'Afrique de l'ouest (Amoussou, 2010), ce qui montre l'importance de son exposition aux aléas d'inondation dans le bassin.

1.3.2. Activités socio-économiques

1.3.2.1. Agriculture

Au Bénin comme au Togo, l'agriculture pluviale reste la principale activité dans le bassin. Elle occupe plus de ménages au Bénin (77 %) qu'au Togo (60 %). Le bassin est occupé à 90 % par les activités agricoles, principales sources de revenus des ménages. Elle occupe également une bonne partie de la population active dont la tranche d'âge se situe entre 15 et 55 ans. Les principales cultures pratiquées dans le bassin sont : le maïs, le manioc, l'arachide, le niébé et le coton. A tout cela s'ajoutent aussi les cultures maraîchères et la culture du riz surtout développées au sud du bassin.

Mais, toutes ces productions sont menacées par les aléas d'inondation qui sont dévastateurs des cultures dans le bassin comme l'ont signalé Amoussou *et al.* (2011).

1.3.2.2. Pêche

L'activité de pêche n'est pas développée et très peu pratiquée dans le bassin en amont et aval du barrage de Nangbéto. Mais, depuis la mise en eau du barrage, cette activité a connu un déclin en aval. Les eaux salées ne remontent plus dans le bassin du fait des lâchers quasi-permanents du barrage. C'est ce qui explique la présence quasi-permanente d'eau douce dans le bassin et par conséquent la disparition progressive des espèces d'eau salée dans la basse vallée. L'installation du barrage d'Adjarala va amplifier cette présence d'eau douce et par conséquent une régression très marquée des espèces d'eau salée dans le bassin.

Sur les 85 espèces potentielles (Adité et Fiogbé, 2013), une quinzaine d'espèces seulement, de par leur abondance et leur constance dans les prises, participent de façon effective au processus de production halieutique. Ceci ne représente qu'environ 20 % de la richesse spécifique de la faune ichtyologique du Mono (Adité et Fiogbé, 2013). Plusieurs raisons ont été évoquées pour expliquer cette situation :

- impact du barrage de Nangbéto ;
- surpêche (nombre de pêcheurs excessifs) ;
- utilisation de palangres par des pêcheurs « braconniers » venus de Lomé.

La photo 1.8 illustre l'espèce la plus régulièrement capturée.

a   b

Photo 1.8 : *Brycinus macrolepidotus* (a) et *Tilapia* (b), espèces de poisson la plus représentée dans les captures dans la zone d'Adjarala (***Source* :** Kokou**,** décembre 2013**)**

Hormis la pêche qui se fait directement en aval des rapides d'Adjarala, aucune autre information n'est disponible sur la pêche pouvant se pratiquer de l'aval des rapides jusqu'à l'estuaire, aire de forte pression de pêche. Cependant, les travaux menés par Land Ressources (2013) dans le cadre de la construction du barrage d'Adjarala ont permis d'estimer à plus de 1500 pêcheurs qui produiraient environ 1500 tonnes de poissons annuellement.

1.4. Historique des barrages hydroélectriques sur le fleuve Mono

Les données hydrologiques sur le Mono remontent à 1951. Mais, les premières échelles de mesure de débit auraient été installées sur le fleuve en 1944 d'après un document de l'ORSTOM intitulé : « *Possibilité d'aménagement hydro-agricole dans le bassin du Mono, 1962* ».

Bien avant leur accession à l'indépendance en 1960 et plus précisément en 1959 les deux pays, le Togo et le Bénin, ont décidé d'utiliser les eaux du fleuve Mono pour promouvoir l'irrigation des terres dans la basse vallée pour les cultures de contre saison et pour la diversification agricole. Pour y parvenir, il leur fallait réaliser des aménagements hydro- agricoles pour réguler les eaux du cours d'eau aux fins de son utilisation maîtrisée.

De nouvelles études ont été faites en 1970 pour déterminer les possibilités d'aménagement hydro-agricole dans le bassin du Mono. À cette époque, une note préliminaire sur les possibilités agro-pédologiques de la basse vallée du Mono a été rédigée. Ainsi, l'étude détaillée du projet d'aménagement hydro-agricole avait été réalisée en 1982. Elle a prévu sur chacun des territoires une mise en œuvre progressive de l'aménagement. L'étude a également défini des périmètres pilotes de 500 ha, des périmètres prioritaires de 2000 ha puis ensuite la mise en œuvre du périmètre du projet.

Très rapidement, les préoccupations des deux Etats en matière d'énergie électrique pour satisfaire les besoins des populations en croissance galopante les avaient contraints à prioriser pour l'ouvrage à construire l'objectif de la production électrique et en second plan l'aménagement hydro-agricole. A cet effet, les études ont été commanditées et trois sites (figure 3 supra) ont été envisagés à savoir : Nangbéto, Tététou et Adjarala.

1.4.1. Historique et description de l'aménagement hydroélectrique de Nangbéto

- **Historique**

La satisfaction des besoins en énergie électrique de la République du Togo et de la République du Bénin était assurée jusqu'en 1987 par :

- l'importation d'énergie en provenance du Ghana par la ligne d'interconnexion 161 kV Akossombo-Lomé-Cotonou ;
- des unités thermiques, essentiellement diesel, dont les coûts de fonctionnement sont élevés. La Communauté Electrique du Bénin (CEB) - Etablissement public international créé en 1968 par les deux pays qui lui ont confié la mission de produire et de transporter de l'électricité ainsi que des attributions de

réglementation et de planification dans ce domaine, a décidé d'utiliser l'important potentiel hydro-électrique des fleuves Mono et Ouémé pour compléter les sources de production.

A ces débuts, la CEB satisfaisait 90 à 95% des besoins des deux pays par la ligne Haute-tension Ghana-Togo-Bénin. Le reste des besoins (10 à 5%) était complété par les sociétés nationales de distribution CEET au Togo et SBEE au Bénin à partir de moyens propres (centrale thermiques à groupes diésel). Avec une demande d'énergie électrique caractérisée par un taux élevé de croissance, il fallait pour les deux pays disposer d'autres sources propres afin de diminuer leur dépendance vis-à-vis de l'extérieur. C'est ce qui justifie pour une grande part la construction du barrage hydroélectrique de Nangbéto, patrimoine de la Communauté Electrique du Benin (CEB) situé au Togo sur le fleuve Mono à environ 40 km à l'Est de la ville d'Atakpamé (Land ressources, 2014).

Le site du barrage a été découvert en 1947 par MASS, un ingénieur hydraulicien français et ex-Directeur de l'Afrique Occidentale Française (AOF). Celui-ci de passage sur le fleuve Mono, trouva à Nangbéto que le fleuve Mono chutait entre deux collines. Compte tenu de cette situation topographique, la création du barrage à cet endroit est donc possible pour produire de l'électricité et dans le même temps réguler le lit du fleuve à l'aval pour éviter les débordements qui constituaient un grand problème aux populations riveraines. Les études de faisabilité commencées en 1979 ont été bonnes pour susciter la construction de l'ouvrage qui débuta en 1984 pour s'achever en 1987 (Coyne-et-Bellier, 1992)

Cet aménagement hydro-électrique de Nangbéto sur le Mono représente la première étape de la gestion du fleuve puisqu'il n'utilise qu'une partie du potentiel énergétique. Ce fleuve contrôle une superficie de 15 700 km^2 du bassin versant, soit environ 76 % de la partie du bassin du Mono exploitable par des aménagements hydro-électriques qui est de 20 600 km^2 (CEB, 2013).

L'exploitation a commencé en septembre 1987 mais l'ouvrage a été inauguré le 5 mai 1988 par les feux présidents Eyadema GNASSINGBE de la République du Togo et Mathieu KEREKOU de la République du Bénin. D'une capacité de

production moyenne annuelle de 170 GWh, elle couvre environ les 12 % d'énergie électrique vendue par la Communauté Electrique du Bénin (CEB).

Description de l'aménagement

L'aménagement hydroélectrique de Nangbéto est situé à 150 km au Nord de Lomé au Togo, sur le fleuve Mono et à environ 50 km à l'Ouest de la frontière Togo-Bénin. La figure 1.15 montre la structure de base d'un barrage hydroélectrique.

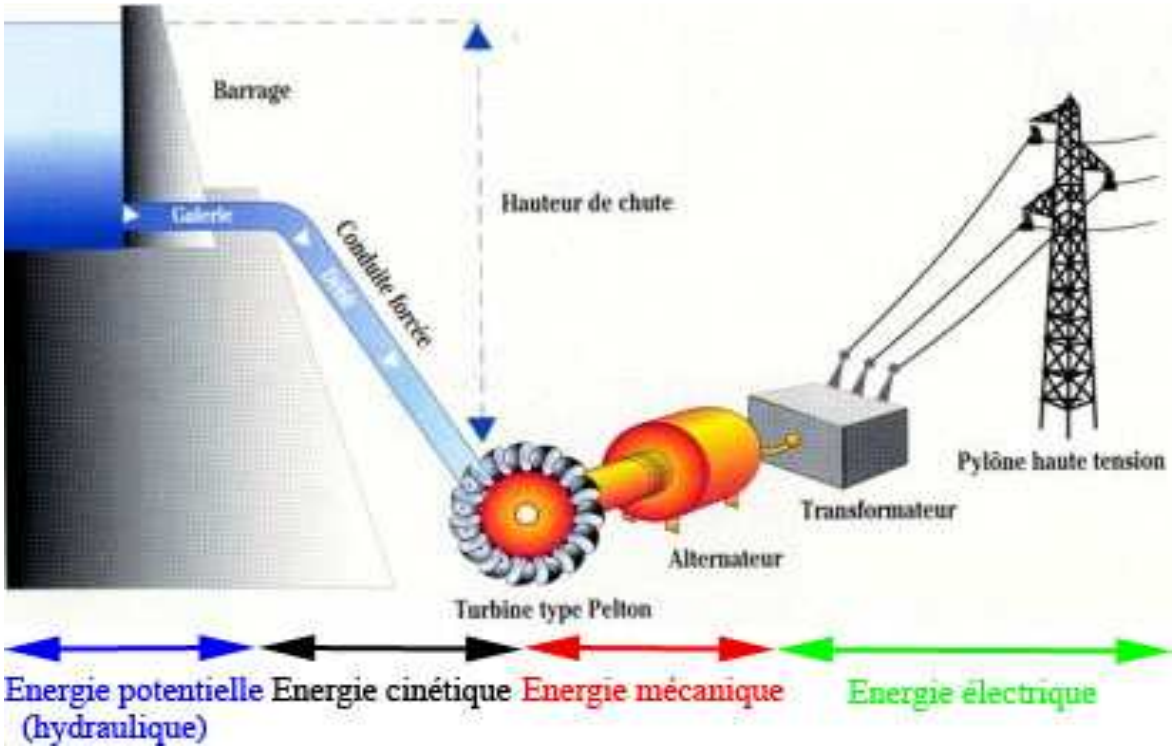
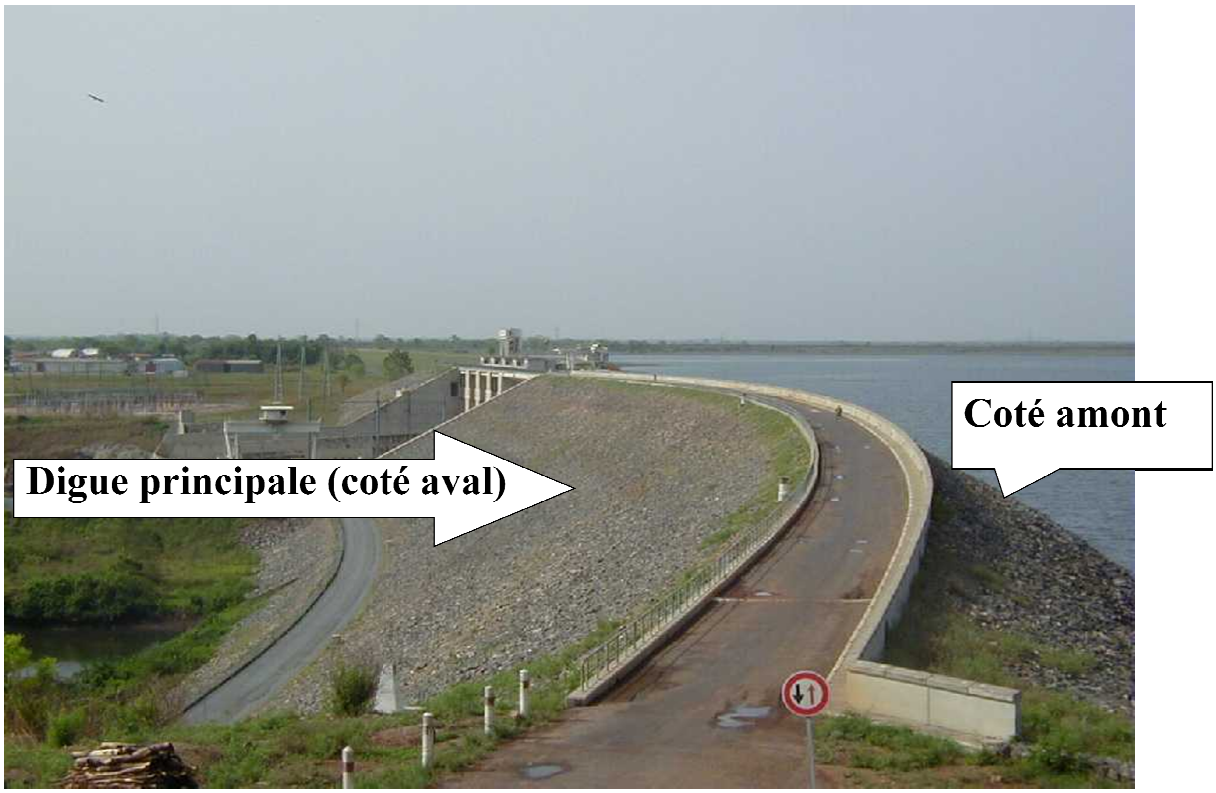


Figure 1.15 : Schéma de fonctionnement type d'un barrage hydroélectrique

L'ouvrage génie civil

L'ouvrage génie civil est composé essentiellement de la cuvette d'eau et des digues (photo 1.9). Cet ouvrage principal est constitué d'un barrage en béton (barrage poids) et d'une digue attenante, dite principale, en terre à noyau central. Il est complété par des digues latérales, également en terre à noyau central, de part et d'autre des deux collines qui encadrent l'ouvrage principal. L'ensemble de ces trois digues constituent le périmètre du barrage. Il existe quatre vannes d'évacuateurs (photo 1.10) de crues installées sur la digue principale qui permettent de déverser le trop plein d'eau en période de crues.



Prise de vue : Houessou S., Juillet, 2016

Photo1.9 : Vue d'ensemble du barrage de Nangbéto



Prise de vue : Houessou S., juillet, 2010

Photo 1.10 : Schéma des évacuateurs de crue dans le bassin du Mono à Nangbéto

Le barrage en béton comprend l'ouvrage de prises d'eau usinières et la vidange de fond, situées en pied (longueur 45 m et hauteur sur TN 38 m) et l'évacuateur de crues d'une longueur de 56 m et de hauteur maximale 22 m équipé de 4 passes vannées comme l'illustre la photo 1.10 supra.

Lorsque les vannes sont ouvertes l'eau passe sur le coursier à grande vitesse. Cette vitesse de l'eau est amortie par les sauts de ski avant d'être déversée dans le bassin de dissipation. Des batardeaux stockés en amont des vannes d'évacuateurs de crues permettent de sécuriser l'amont de celles-ci pour des entretiens éventuels.

Il est constitué de :

- la digue principale a une longueur de 430 m et une hauteur maximale de 50 m ;
- la digue latérale de la rive droite a une longueur de 2 780 m et une hauteur maximale de 12 m ;
- la digue latérale de la rive gauche a une longueur de 1 660 m et une hauteur maximale de 21 m.

Cuvette

Encore appelée retenue, elle a une capacité de stockage maximale de 1715 millions de m^3 à la côte 144 msm. A cette côte elle couvre une superficie de 180 km^2.

Existence de crues actuelles malgré l'aménagement du fleuve Mono

Les objectifs poursuivis par la construction du barrage hydroélectrique de Nangbéto en 1987, outre la production de l'électricité, étaient l'irrigation des terres agricoles et la régulation des crues. Alors que les objectifs de production d'électricité ont été réalisés, des inondations sont encore constatées en aval (à développer dans le chapitre 3).

Présentation des projets d'irrigation suite à l'aménagement du fleuve Mono

Suite à la construction du barrage de Nangbéto en 1987, le Bénin et le Togo ont mis en exécution un plan de valorisation du potentiel hydro-agricole d'environ 41 000 hectares de terres irrigables de la vallée du fleuve Mono. L'approvisionnement en eau de ces périmètres irrigués serait assuré à partir du fleuve Mono grâce à des stations de pompage équipées d'électropompes.

Ce projet consiste en l'aménagement progressif de 27 000 hectares du côté béninois et de 14 000 hectares du côté togolais. Le projet dotera les populations bénéficiaires d'infrastructures techniques notamment des réseaux d'irrigation et de drainage, des prises d'eau sur le fleuve Mono avec des stations de pompage et des infrastructures

d'appui à la production. Pour garantir le succès du projet, il est de plus envisagé l'encadrement et la formation des producteurs en vue d'une gestion rationnelle des installations et une maîtrise des techniques d'irrigation.

C'est ainsi qu'une première étape intermédiaire de 4 000 ha (2000 ha du côté béninois et 2000 ha du côté togolais) a été retenue. Mais, du fait des contraintes financières très importantes, c'est seulement deux projets pilotes (PAHV-Mono et PBVM) d'environ 500 ha qui ont été choisis au Bénin.

1.4.2. Historique et description de l'aménagement hydroélectrique d'Adjarala

1.4.2.1. Historique

La première étude réalisée sur l'aménagement hydroélectrique d'Adjarala date de 1987. Elle consistait en un inventaire des sites potentiels en aval de Nangbéto. À l'époque, la construction d'un second barrage hydroélectrique répondait à un défi d'aménagement du fleuve Mono et Adjarala était considéré comme le site le plus propice.

Les principaux objectifs étaient de construire un barrage en vue de produire de l'électricité, mais aussi d'irriguer les 41 000 hectares de terres agricoles en aval et de réguler les crues de la Mono.

La figure 1.16 présente le schéma de fonctionnement du barrage d'Adjarala à trois turbines à axe vertical.

Fonctions de l'ouvrage

L'aménagement du barrage d'Adjarala a pour objectif principal la production d'électricité. La puissance installée serait de 147 MW (3 groupes de 49 MW). L'énergie moyenne produite, calculée sur la base de l'hydrologie actualisée en 2013 et des simulations de productivité présentées dans l'avant-Projet Détaillé, serait de 461 GWh par an.

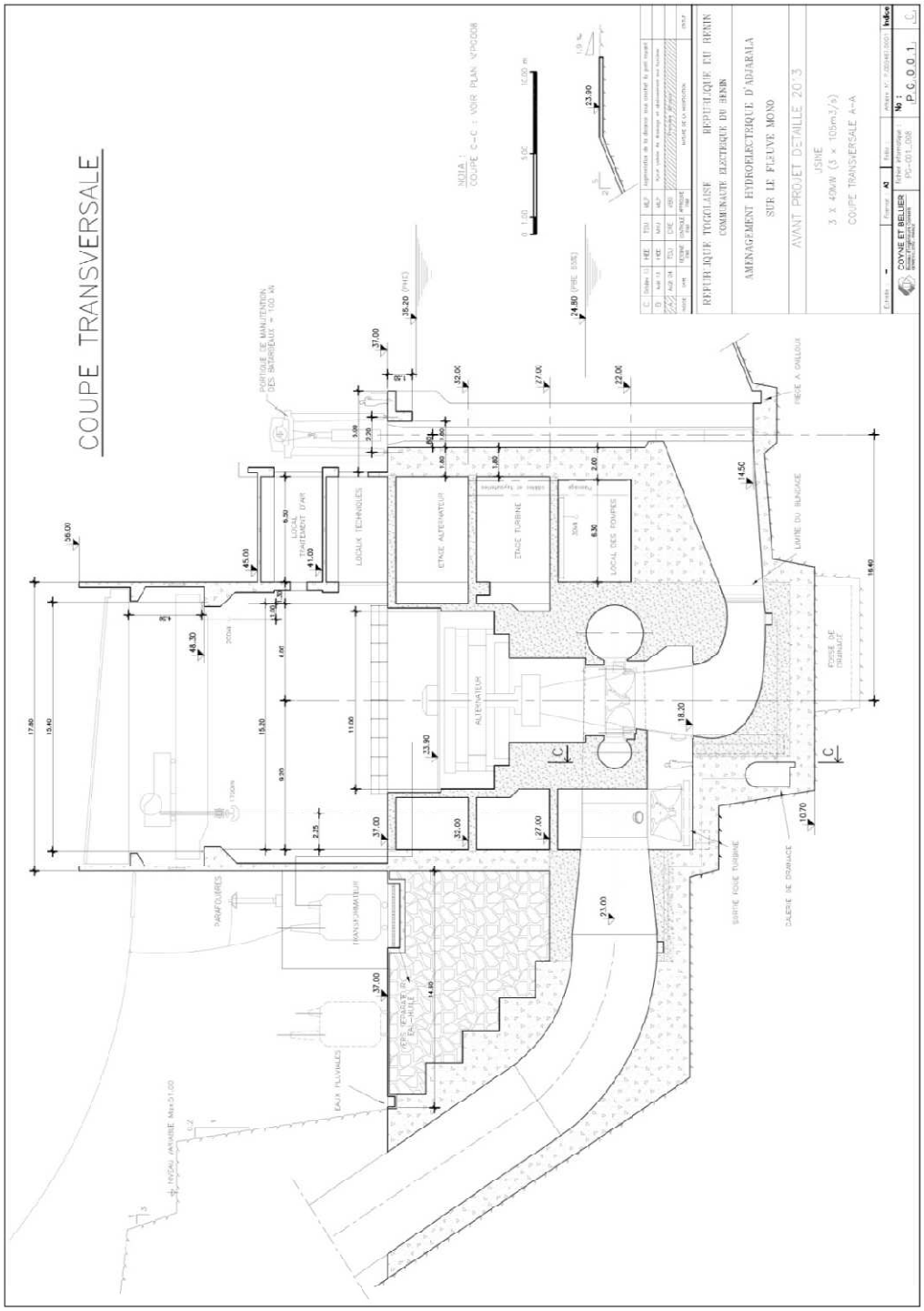


Figure 1.16 : Schéma de fonctionnement type du barrage d'Adjarala

Les différents ouvrages constituant l'ensemble du barrage doivent assurer les fonctions principales suivantes :

- permettre le passage de la crue de Projet évaluée à 4 220 m3/s (T=10 000 ans) avec une vanne de surface non-opérationnelle ;
- assurer le passage du débit réservé ;

- assurer le prélèvement et la régulation des débits appelés par l'usine de pied, composée de 3 groupes de puissance unitaire de 49 MW ;
- limiter la cote des PHE à 80.2 msm et des PHEE à 81.5 msm par l'installation de vannes sur l'évacuateur de crues du barrage afin de limiter l'impact environnemental et social du projet.

1.4.2.2. Description sommaire

Le site d'Adjarala sur le fleuve Mono, situé à 97 km en aval de l'aménagement de Nangbéto, se trouve juste à l'amont des chutes d'Adjarala, à l'endroit où le fleuve effectue un virage de l'Est vers le Sud.

Le bas de la rive droite forme une avancée rocheuse, une sorte d'éperon que contourne le fleuve. La rive gauche se caractérise par sa pente relativement raide pour la vallée du Mono.

♦ Barrage

L'axe du barrage est rectiligne en rive droite ; il passe tout naturellement sur l'éperon de cette rive où est placée la transition remblais/béton, puis décrit une courbe vers l'aval pour venir aborder la rive gauche presque à angle droit. Le barrage suit ensuite la crête de la rive gauche jusqu'à l'extrémité où il se raccorde à la route d'accès.

Le projet se compose de :

- ✓ un barrage en béton (BCR) dans le lit du Mono et en rive gauche, d'une longueur d'environ 1050 m,
- ✓ une digue en terre longue de 1 430 m en rive droite,
- ✓ une digue de col en terre de 1 300 m de long en rive droite, soit une longueur totale d'environ 3 800 m.

♦ Evacuateur de crues

Il est implanté en partie de centrale du barrage en BCR au milieu de la rivière. C'est un évacuateur de surface comportant 4 pertuis vannés de 12 m de largeur et 12,8 m de hauteur. Son coursier en Béton Compacté Vibré (BCV) ancré sur le corps même

du barrage en Béton Compacté au rouleau (BCR) se termine par une cuillère en saut de ski.

La lame d'eau évacuée s'amortit sur le matelas d'eau de la fosse d'amortissement.

Les caractéristiques de tous ces ouvrages sont présentées dans la fiche synoptique (tableau 1.I).

1.4.3. Opportunités des barrages hydro-électriques

L'objectif fondamental du projet de barrage d'Adjarala est de réduire pour les deux pays la facture énergétique (achat d'énergie électrique dans les pays voisins tels que le Ghana, le Nigéria, la Côte d'Ivoire et recours aux producteurs privés indépendants). De ce fait, le projet d'Adjarala revêt une importance capitale pour le Bénin et le Togo. Actuellement, les pointes de consommation atteignent 350 Mégawatts. Le barrage de Nangbéto produit environ 60 Mégawatts et la production d'Adjarala est estimée aux alentours de 147 Mégawatts. Ces deux installations hydroélectriques couvriront de ce fait 60 % de la consommation actuelle en période de pointe. Le nouveau barrage augmenterait la capacité de la régulation des crues dévastatrices, et le potentiel de développement de l'agriculture irriguée en aval.

Les différents ouvrages constituant l'ensemble du barrage doivent assurer un fonctionnement sécurisé des installations et permettre de faire face aux situations extrêmes liées à des conditions climatiques ou techniques exceptionnelles, tout en respectant les normes de sauvegarde environnementale et sociale tant dans sa préparation, sa réalisation que son fonctionnement. Ces barrages ne représentent pas seulement des opportunités, mais aussi des risques potentiels d'inondation qui font d'ailleurs l'objet de cette étude.

Tableau 1.I : Récapitulatif hydrologique de la retenue d'Adjarala

Hydrologie	**Grandeurs**	**Unités**
Superficie du bassin versant	20 600	km²
Débit moyen au site	122	m^3/s
Débit de pointe de la crue cinquantennale (Crue de chantier en Saison humide)	2 400	m^3/s
Débit de protection de la crue de chantier en Saison Sèche	500	m^3/s
Débit de pointe de la crue millénale	3450	m^3/s
Débit de pointe de la crue décamillénale (Crue de projet)	4 220	m^3/s
Débit de pointe de la crue maximale probable (CMP)	4 780	m^3/s
RETENUE		
Retenue Normale (RN)	80	msm
Plus Hautes Eaux (PHE)	80.2	msm
Plus Hautes Eaux Exceptionnelles (PHEE)	81.5	msm
Niveau Minimum d'Exploitation (NME)	63	msm
Superficie de la retenue à RN	95	km²
Capacité totale sous RN	630	hm^3
Tranche morte sous NME	5	hm^3
Capacité utile	625	hm^3
BARRAGE		
Type : Barrage mixte avec section centrale en BCR et ailes en remblai		
Cote de la crête	82.5	msm
Longueur totale en crête	2 480	m
Hauteur maximum sur fond de fouille	49.5	m
Volume total BCR / BCV	669 300	m^3
Volume total remblais	3 126 000	m^3
Barrage en BCR		
Largeur en crête	7.00	m

***Source** : Coyne-et-Bellier, 2013*

Conclusion partielle

Les facteurs physiques et humains déterminent le fonctionnement hydrologique du bassin du Mono. Cette potentialité des eaux de surface dans le bassin a suscité l'installation des barrages hydroélectriques. Ces aménagements couplés avec la dégradation anthropiques des formations végétales et la variabilité des lames d'eau précipitées amplifient les risques d'inondation dans la basse vallée du fleuve Mono.

CHAPITRE 2

POINT DES CONNAISSANCES, DONNEES ET METHODES D'EVALUATION DES RISQUES D'INONDATION

Introduction

Ce chapitre présente les données climatologiques, hydrologiques, morphologiques, planimétriques, d'occupation du sol, démographiques et socio-économiques pour évaluer les effets des risques d'inondation dans la basse vallée du Mono. Il définit également les sources et la qualité des données. Ces dernières permettent d'analyser la variabilité pluviohydrologique afin d'en déduire l'influence des barrages dans la fréquence des inondations. Ce chapitre expose aussi les méthodes et outils retenus pour caractériser les risques d'inondation dans un contexte d'implantation de nouveau barrage (Projet Adjarala) dans le bassin.

2.1. Point des connaissances

2.1.1. Clarification des concepts

Enjeux :

Les enjeux ou Eléments vulnérables ou Cibles sont l'ensemble des éléments exposés au danger (population, bâtiments, infrastructures, patrimoine environnemental, activités et organisations). Les enjeux sont donc susceptibles de subir des dommages ou des préjudices. Pour définir les enjeux de manière complète, il convient d'en estimer la valeur et la vulnérabilité. C'est une phase de l'évaluation des risques.

Vulnérabilité :

La vulnérabilité est la conséquence potentielle de l'impact d'un aléa sur des enjeux (populations, bâtiments, infrastructures, etc.) ; notion indispensable en gestion de crise déterminant les réactions probables des populations, leurs capacités à faire face à la crise, les nécessités d'évacuation, etc.

Elle dépend des éléments exposés, de leurs résistances et de leurs comportements. Elle est caractéristique d'un site à un moment donné (t) et modulable, évolutive en fonction des activités humaines. Elle traduit aussi la fragilité d'un système dans son ensemble et sa capacité à surmonter la crise provoquée par l'aléa.

Aléas :

On entend par aléa la qualification de tout événement, phénomène ou activité qui peut provoquer la perte de vies humaines, des blessures, des dommages aux biens, des perturbations sociales ou économiques ou la dégradation de l'environnement. Cf. « Basic Terms of Disaster Risk Reduction, Annex 1 », Office des Nations Unies pour la réduction des risques naturels, ISDR, 2004, http://www.unisdr.org/eng/library/lib-terminology-eng%20home.htm .

L'aléa qualifie le phénomène dangereux, existant ou potentiel, à l'origine des risques. Il est souvent accompagné d'une quantification : fréquence ou probabilité d'un aléa d'une nature et d'une intensité donnée, dans une zone géographique donnée et sur une durée de référence. Les aléas couramment distingués sont d'origine naturels (géologique, hydrométéorologique et biologique) et d'origine anthropique (dégradation environnementale et aléas technologiques).

Selon Georges et Verger (1970), l'aléa est un phénomène entrant dans le domaine des possibilités, donc des prévisions sans que le moment, des formes ou la fréquence en soit déterminables à l'avance. Pour Arki (2008), aléa est aussi défini comme étant la probabilité qu'un (ou plusieurs) phénomène(s) dangereux produise(nt), en un point donné du territoire, des effets d'une intensité physique définie.

Aléa = P (Probabilité) x I (Intensité).

La loi l'impose pour les phénomènes dangereux à cinétique rapide (Aki, 2008) comme l'inondation dans le cas de cette étude. A cet effet, dans le cas du bassin du fleuve Mono, l'aléa est la probabilité de survenance d'un évènement dont le paramètre le mieux connu est la hauteur d'eau, car le temps de submersion est un paramètre important pour apprécier l'intensité des faits.

Dans cette étude, l'aléa inondation est caractérisé par le débordement du fleuve Mono dû à des pluviométries et débits extrêmes répétés, à l'augmentation du niveau d'eau dans la retenue du barrage qui nécessite l'ouverture forcée de la vanne.

Risque

Georges et Verger (1970) définissent le risque comme la fréquence des accidents et des catastrophes provoquant la perte de vies humaines et des dommages matériels graves. Avec le temps, cette définition a évolué en la combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences » (ISO/CEI 73) ou d'un dommage et de sa gravité » (ISO/CEI 51). Il peut se définir aussi comme :

- la possibilité de survenance d'un dommage résultant d'une exposition aux effets d'un phénomène dangereux.
- l'espérance mathématique de pertes en vies humaines, blessés, dommages aux biens et atteinte à l'activité économique au cours d'une période de référence et dans une région donnée, pour un aléa particulier. Le risque est le produit de l'aléa par la vulnérabilité [ISO/CEI Guide 51].

Pour Ozer (2004), le risque est défini ainsi comme le produit de l'aléa et de la vulnérabilité illustré par la figure 2.1.

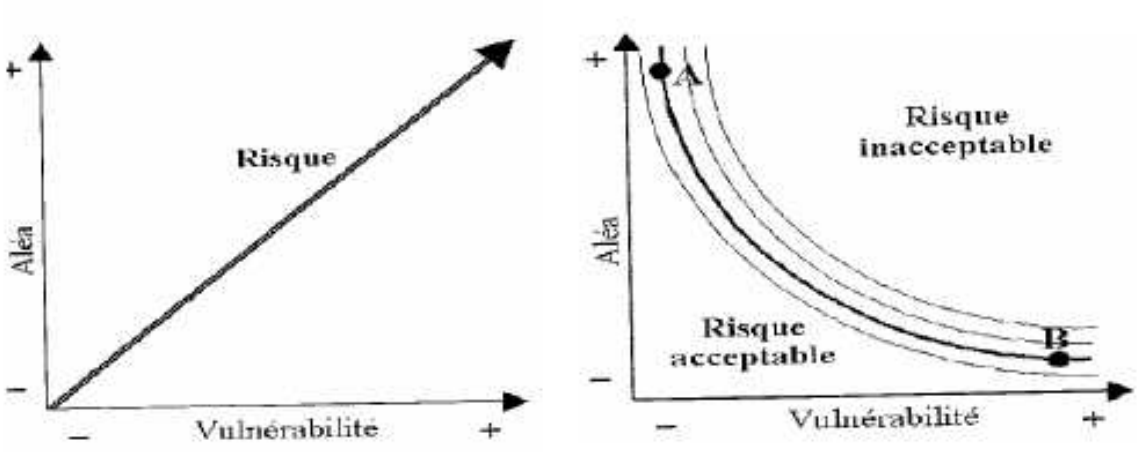


Figure 2.1. Représentation du risque en fonction de l'aléa et de la vulnérabilité, courbes isorisques (*Ozer, 2004)*

Cette représentation permet de déterminer les risques acceptables et inacceptables à partir des facteurs d'aléa et de vulnérabilité. Il est donné par la formule :
Risque = Aléa (enjeux) x Vulnérabilité ou Risque = f(aléa, vulnérabilité)**.**

La genèse des risques d'inondation est fonction des aléas et des facteurs de vulnérabilité identifiés qui sont d'ordre naturel (précipitation, pente, morphologie, écoulement, …) et anthropique (dégradation des terres, lâchers d'eau du barrage, …) comme dans le bassin du fleuve Mono. A cet effet, les faibles aléas engendrent des risques faibles et probablement les forts risques sont induits par les forts aléas. Mais, dans une analyse systémique, pluridisciplinaire et complexe, le risque est fonction de l'aléa, de l'enjeu, de la vulnérabilité, du temps, de l'espace et de la résilience.

Dans le cas de cette étude, le risque est considéré comme la probabilité de survenance des inondations pouvant engendrer des conséquences désastreuses aux populations caractérisées par une certaine vulnérabilité.

Inondation

C'est la submersion d'un territoire par les eaux, généralement due à une crue inondante. Par débordement, les eaux de la rivière envahissent le lit majeur où elles déposent, en se décantant, des alluvions généralement fines : les limons de débordement (Georges et Verger, 1970). L'inondation est une submersion, rapide ou lente, d'une zone habituellement hors d'eau, d'origine naturelle, mais dont les conditions de survenance (ampleur spatiale, fréquence…) peuvent être influencées par l'action humaine (MEDE-France, 2011) comme le cas du barrage de Nangbéto dans le bassin du Mono. Une zone inondable est donc une zone qui peut être submergée, quelle que soit l'origine du phénomène.

Selon MEDE-France (2011), on peut distinguer 5 grands types d'inondations dont 4 ont fait l'objet de cette étude:

✓ les débordements de cours d'eau, qui peuvent provoquer des inondations à dynamique lente (typique en milieu de plaine) ou rapide (pour les situations les plus pénalisantes, on parle de crues torrentielles) ;

✓ la remontée de nappe phréatique. Une nappe dépasse le niveau du sol à la suite d'une succession d'années dont la pluviométrie est excédentaire, ou à minima une période très pluvieuse sur plusieurs mois ;

✓ la submersion marine, qui est une propagation de la mer à l'intérieur des terres lors de la conjugaison d'une marée haute à fort coefficient, d'une surcote d'origine météorologique (pression atmosphérique), et d'une forte houle. Dans les estuaires, ce phénomène peut se conjuguer avec la crue du fleuve, on parle alors d'inondation fluvio-maritime ;

✓ le ruissellement sur les versants en dehors du réseau hydrographique, lors d'un évènement pluvieux d'intensité suffisante, phénomène qui s'observe en général sur l'amont des bassins ...

A ces phénomènes naturels, susceptibles d'être influencés plus ou moins fortement par les activités humaines, il convient d'ajouter la rupture de barrage, phénomène qui aggrave, souvent dramatiquement, les conditions de survenance des inondations.

Par ailleurs, la fréquence des inondations provoque également l'élargissement du lit du fait de l'érosion et de la modification morphologique des berges, la dégradation des cultures maraîchères et des unités piscicoles le long de la plaine côtière, la réduction des espaces salicoles comme c'est le cas dans le bassin du fleuve Mono.

Le risque d'inondation est la combinaison de la probabilité d'une inondation [aléa] et des conséquences négatives potentielles pour l'environnement, la santé humaine, le patrimoine culturel et l'activité économique [enjeux] associées à une inondation (Source: directive européenne relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation n°2007/60/CE).

Pour cette thèse, le risque d'inondation peut être défini comme **l**a fréquence du débordement d'eau dans les cours d'eau lié aux facteurs naturels et anthropiques. Il peut être pluviohydrologique et/ou peut être lié aux lâchers d'eau du barrage de Nangbéto et potentiellement d'Adjarala en période de hautes eaux. Un cas très rare d'inondation catastrophique peut être aussi observé dans le contexte de la rupture d'un barrage.

2.1.2. Etat des connaissances

Plusieurs auteurs ont consacré leurs travaux de recherche à la problématique des événements hydroclimatiques en termes de variabilité et des extrêmes et leur importance dans l'occurrence des hydrocatastrophes. Les inondations sont souvent

mises au premier rang au regard des dégâts inhérents et de la vulnérabilité des populations, occupant les bassins-versants. De plus, l'implantation des barrages hydroélectriques dans ces bassins constitue une source de préoccupations scientifiques en ce sens qu'ils occasionnent des inondations liées à leur fonctionnement.

2.1.2.1. Evénements hydroclimatiques et inondation

Les études de base sur les inondations ont été portées sur les relations événements climatiques et hydrologiques dans les bassins-versants et la science développée à cette fin est l'hydroclimatologie. Elle est selon Hirschboeck (1988) une approche d'étude des événements hydrologiques dans leur contexte climatologique. De ce fait, un certain nombre d'études ont été mené sur les variations régionales et saisonnières, la fréquence des précipitations (Robinson et Henderson, 1992 ; Changnon, 1994; Henderson et Vega, 1996), les événements de forte pluie (Keim, 1996 et Konrad, 1994), l'occurrence de la pluie (Totin, 2005). Boko *et al*. (2007) ont montré qu'en Afrique, les précipitations varient actuellement de façon considérable. Ainsi, les fortes précipitations ont augmenté ces trois dernières décennies dans un grand nombre de pays africains au sud du Sahara dont le Bénin et le Togo qui partagent le bassin du Mono.

Les études hydroclimatiques s'intéressent aussi au bilan de l'eau et à sa variabilité spatiale et ou temporelle, étudiés dans les contextes continental (Legates et Mather, 1992), régional (Wolock et McCabe, 1999), et à l'échelle des bassins (McCabe et Wolock, 1992 ; Shelton, 1998). Or, en terme de bilan de l'eau et notamment hydrologique, les événements climatiques, selon leur ampleur, sont à l'origine des inondations, notamment dans les bassins à caractère torrentiel. Aguilar *et al*. (1982) ont expliqué que le phénomène météorologique se manifeste le plus fréquemment et avec plus de violence, produisant de grandes inondations, de graves dégâts aux infrastructures et des pertes en vies humaines. Le GIEC (2007), dans son quatrième rapport d'évaluation, a fait état d'une multiplication des phénomènes météorologiques extrêmes depuis cinquante ans. C'est dans ce contexte que l'OMM (2009) a aussi montré que de nombreuses régions du monde ont connu des extrêmes météorologiques et climatologiques. En conséquence, en Afrique de

l'ouest, des précipitations intenses et abondantes ont entraîné en 2009 et 2010, des inondations qui ont touché beaucoup de populations des différents pays.

Ces inondations sont pluviales et hydrologiques dans la mesure où selon Donou (2015) la variation des extrêmes climatiques influe sur le fonctionnement hydrologique des bassins-versants. A l'influence du climat sur l'écoulement des bassins, Vissin (2007), Amoussou (2005 et 2010) ajoutent la dynamique des états de surface. Ago *et al.* (2005) confirment que outre l'amélioration de la pluviométrie dès la fin des années 80, les pressions anthropiques et la poussée démographique expliquent l'essentiel de l'ampleur et de la fréquence élevée du risque d'inondation en aval du barrage de Nangbéto dans le bassin du Mono.

Ainsi, les risques d'inondation ou l'occurrence des inondations dépend des facteurs autres que la pluviométrie même si cette dernière tient une place des plus importantes. Totin *et al*. (2016) ont même mis en évidence l'influence d'un domaine climatique azonal (par exemple climat soudanien du haut bassin de l'Ouémé) dans les processus hydrologiques d'une basse vallée, située dans un autre domaine climatique (par exemple domaine du climat subéquatorial). De plus, Houndénou *et al.* (2008), à partir de la détermination d'indice de précipitation, la spatialisation des champs de précipitations et la corrélation pluie/débit à la station d'Athiémé et d'une méthode numérique de terrain (MNT) de SRTM 30, ont pu cartographier les secteurs de risques hydrologiques et d'inondation dans le bassin du fleuve Mono. Pour Kodja (2013), les zones prédisposées à l'inondation sont celles des secteurs de faible perméabilité et à pente faible, en contrebas des reliefs, où le réseau de drainage est dense (infiltration faible, concentration rapide des eaux). Au nombre de ces facteurs additionnels, figurent le fonctionnement des barrages hydroélectriques.

La plupart des études sur les inondations et surtout les plus récentes ont caractérisé les seuils des aléas d'inondation à partir de la méthode de Mackee *et al.* (1993). Cette méthode, fondée sur la détermination des indices standardisés des variables retenues pour cette étude, a été adoptée du fait de la facilité de son application à l'analyse des aléas de risque hydrométéorologique.

2.1.2.2. Barrages et risques d'inondation

Les relations établies entre les barrages hydroélectriques et les risques d'inondation sont basées soit sur le fonctionnement de ces infrastructures soit sur leur rupture. Au regard du fonctionnement des barrages, un contraste existe entre le fait que les ouvrages hydroélectriques accentuent les inondations ou qu'ils régulent et réduisent ces risques.

Pour Kirsch *et al*. (2012) cité par Diman et Tahir (2012b), indépendamment d'assurer la demande en eau, le barrage joue également un rôle important dans le mécanisme de défense contre les inondations. Ainsi, il apparaît évident que les barrages aident à réguler les flux hydrologiques et permettent de gérer les risques d'inondation spontanée et imprévisible. Selon Roche International (1999) et Amoussou (2010), le barrage de Nangbéto dans le bassin du Mono, a diminué l'amplitude et la durée des inondations dans le système lagunaire. Mais, Diman et Tahir (2012b) évoquent l'idée d'une inondation prolongée causée par les inondations de barrage. La prolongation de l'inondation dans le cas d'espèce est liée à la longue durée de stagnation de l'eau dans le bassin.

Les inondations de barrages surviennent la plupart du temps au cours des lâchers d'eau de barrage et en cas de rupture de barrage. Amoussou (2010) a montré que l'augmentation du coefficient d'écoulement dans le bassin du Mono de 1988 à 2000 est en rapport avec les lâchers d'eau du barrage de Nangbéto. Il explique aussi que l'évolution récente du régime hydrologique dans la basse vallée du complexe est tributaire des lâchers d'eau de ce barrage qui, ont contribué à une augmentation du débit de l'ordre de 30 %. Cette augmentation des écoulements s'observe même pendant la période d'étiage. Ainsi, en fonction de la structure initiale du régime hydrologique, les lâchers d'eau des barrages peuvent accroître les risques d'inondation dans les bassins-versants les abritant.

Le second risque d'inondation est celui lié à la rupture de barrage. Cette destruction partielle ou totale d'un barrage est liée à des causes techniques, naturelles et ou humaines. Dans ce cas et selon Dimenc (2012), une inondation catastrophique peut être générée en aval de l'ouvrage, laquelle inondation est précédée par le déferlement d'une onde de submersion plus ou moins importante selon le type de

barrage et la nature de la rupture. Dans le cas de rupture de barrage et d'inondation, Diman et Tahir (2012b) font cas de la notion d'onde de submersion certainement des unités géographiques en aval de l'ouvrage.

Au delà de simples méthodes statistiques, Diallo (2010), à travers la modélisation mathématique et la simulation numérique de l'hydrodynamique, a mis l'accent sur la dynamique du lit et de son champ d'inondation pour mieux cerner le risque d'inondation. Il fait cas dans ses analyses du Logiciel CASTOR (CAlcul Simplifié pour le Traitement de l'Onde de Rupture de barrage), un outil d'estimation rapide du risque d'inondation à l'aval d'une digue (IRD, 2001), et qui donne les caractéristiques de l'onde de rupture du barrage en un point d'une vallée.

Cet état de l'art, non exhaustif, montre que les risques d'inondation et ses facteurs constituent depuis une préoccupation scientifique. Il a permis de fixer les données d'étude et de définir les méthodes appropriées à l'analyse des risques d'inondation dans le bassin du fleuve Mono.

2.2. Nature des données et techniques de collecte

Les données utilisées sont d'abord les statistiques climatologiques, hydrologiques, d'occupation du sol, démographiques et socio-économiques. Ces données ont été complétées par celles des observations directes sur le terrain et d'enquêtes socio-anthropologiques. Elles ont permis d'apprécier les risques d'inondation dans le bassin-versant du fleuve Mono.

2.2.1. Données climatologiques et hydrologiques

Le réseau climatologique (figure 2.2) est constitué de quatre stations synoptiques (Bohicon, Tabligbo, Sokodé et Atakpamè), de vingt-cinq postes pluviométriques (Abomey, Agouna, Allada, Aplahoué, Athiémé, Bassila, Bopa, Dogbo-Tota, Grand-Popo, Lonkly, Niaouli, Ouidah, Savalou, Tchetti, Toffo, Zagnanado, Kouma-Konda, Notse, Anié, Anèho, Niamtougou, Pagouda, Kara ville Sotouboua, Tchamba). Les données couvrent la période 1961-2010 et sont extraites de la base de données de l'ASECNA/DMN à Cotonou au Bénin et Service de la Navigation du Nord-Est/DMN de Lomé au Togo. Malgré l'état critique de certaines stations, les données utilisées présentent des lacunes de moins de 5 %.

Le réseau hydrographique (figure 2.2) est représentatif du bassin avec ces quatre stations hydrométriques (Athiémé, Tététou, Nangbéto (entrant et sortant) et Corrékopé). Les stations de Tététou et Corrékopé dont les données ne sont disponibles qu'avant le barrage ont permis seulement d'analyser le fonctionnement hydrologique du bassin avant la mise en eau de Nangbéto. Les données hydrométriques de la station de Nangbéto concernent les débits entrant et sortant et les cotes de retenue sur la période 1988-2010 ont servi à analyser les risques d'inondation après la construction du premier barrage et d'en déduire ceux que pourrait engendrer le second barrage d'Adjarala. La station d'Athiémé (1961-2005) renseigne sur tout le bassin avant et après le barrage et sur son fonctionnement. Les données hydrométriques ont été extraites de la base de données de la Communauté Electrique du Bénin (CEB).

2.2.2. Données topographiques : création d'un MNT

Les données topographiques utilisées ont été fournies par les Services de la Navigation du Nord-Est (SNNE) sous forme de points cotés et de lignes de structures 3D, générés par la photogrammétrie à partir de photographies aériennes. Chaque ligne ou chaque point est connu par les coordonnées géographiques (X, Y) en projection UTM, et en altitude Z. La densité spatiale des points et lignes est irrégulière.

Elle est d'autant plus importante que les variations d'altitude sont fortes (la plus petite distance entre deux points est de l'ordre de 60 cm). Les lignes représentent des courbes de niveaux et des « structures topographiques » de la plaine (c'est-à-dire : talus, gravières, routes, voies ferrées, etc.). La précision altimétrique moyenne des données brutes est de ± 30 cm. A partir des données topographiques brutes, est généré un modèle numérique de terrain en réseau de triangles irréguliers (TIN). Le TIN correspond à une interpolation linéaire entre les points et lignes cotés sur des facettes triangulaires construites suivant les critères de Delaunay. Le TIN a ensuite été converti au format « RASTER » (image) avec une résolution spatiale de 8 mètres pour pouvoir être superposé aux données images. Cette résolution du MNT a par ailleurs été définie conformément au théorème de Shannon, inférieure à la moitié des

dimensions spatiales des plus petites structures topographiques représentées par les données brutes (~15-20m). Nous nommons dans la suite MNT les données topographiques interpolées au format RASTER.

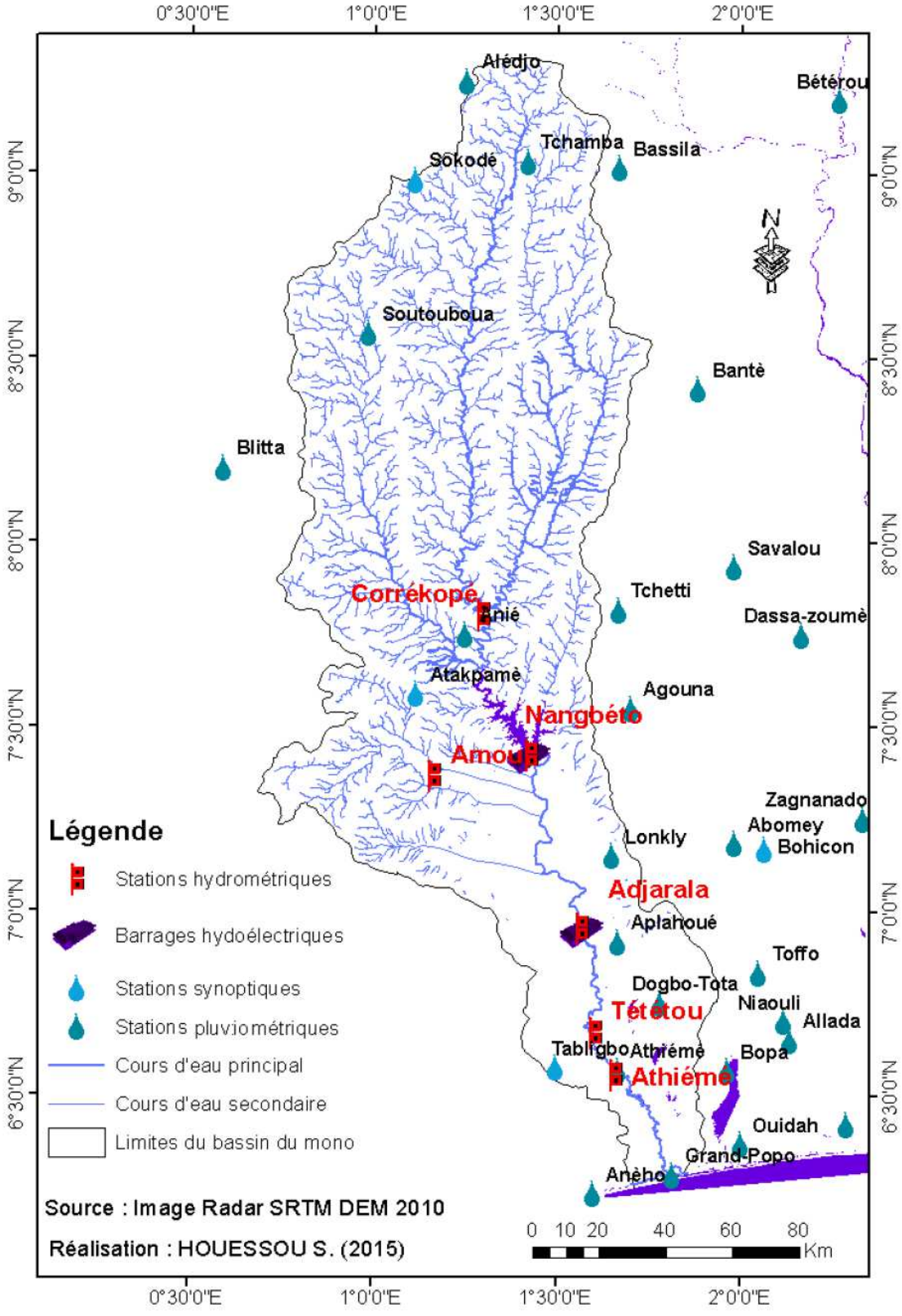


Figure 2.2 : Réseau hydrographique et points de mesures hydroclimatologiques

2.2.3. Données d'occupation du sol et planimétriques

Ce sont des données relatives à l'occupation du sol des années 1985, 2000 et 2014, obtenues après traitement des sources satellitaires (Landsat TM 1985, 2000 et 2014 de résolution 30 m). Ces images proviennent du CENATEL (Centre National de Télédétection) et de l'IGN (Institut Géographique National) au Bénin. L'appréciation de l'évolution des unités paysagiques est fondée sur la comparaison des surfaces occupées par les différentes formations végétales telles que les forêts, les savanes, les jachères, les cultures et les plans d'eau pour les années 1985, 2000 et 2014.

Les cartes d'occupation du sol visent à montrer l'évolution de l'anthropisation du bassin-versant et à identifier les secteurs les plus vulnérables au fort ruissellement et les zones vulnérables à l'inondation.

En outre, quelques documents planimétriques sont également utilisés à savoir:

- ✓ la carte géologique du Bénin 1989 - feuille Abomey au 1/200 000e ;
- ✓ la carte pédologique de reconnaissance du Dahomey, 1969, feuille Abomey, Volkoff,
- ✓ la carte ORSTOM au 1/200 000e ;
- ✓ la carte hydrogéologique du Bénin, échelle 1/500 000e, géohydraulique, Maisons-Alfort, France, Hainque-Perin, Paris, France, 1985.

Les caractéristiques géométriques principales du bassin versant considéré (superficie, pentes, compacité, etc.) ont été utilisées.

L'analyse géo-spatiale est basée sur les documents planimétriques existants illustrés par les figures 2.3 et 2.4 permettant une meilleure compréhension de l'influence des barrages sur les risques d'inondation dans la basse vallée.

2.2.4. Données hydrogéologiques

Les chroniques journalières des piézomètres A2R, B13N, B14F, B14R et B6N situés autour du barrage de Nangbéto, relevées par un service de suivi, ainsi que les paramètres hydrodynamiques du système aquifère du bassin constituent essentiellement les données hydrogéologiques. Les fluctuations des niveaux piézométriques couvrant la période 1988-2010 ont principalement aidé à comprendre

d'une part l'influence de l'évolution climatique sur l'hydrodynamique de l'aquifère et d'autre part à quel cote les gestionnaires sont obligés d'ouvrir les vannes du barrage de Nangbéto. Les données auxiliaires utilisées sont géologiques, lithologiques et topographiques dans la mesure où elles conditionnent la fonction de transfert hydrique atmosphère-sol-aquifère et celle de stockage des réservoirs souterrains (Totin, 2010).

2.2.5. Données démographiques et socio-économiques

Les données démographiques et socioéconomiques concernent l'effectif de la population et les activités (agricoles et industrielles) organisées dans le bassin-versant du fleuve Mono et dans son voisinage immédiat. Elles ont été utilisées pour analyser la répartition de la population et des infrastructures comme éléments de vulnérabilité. Ces données sont issues des Recensements Généraux de la Population et de l'Habitation (RGPH) de 1979, 1992, 2002 et 2013 de la République du Bénin. Celles du Togo (2010, date du dernier recensement) à l'échelle communale. Les données de population plus récentes du Togo ont été estimées à partir du taux d'accroissement naturel qui était de 2,04 % entre 1981 et 2010.

Les données socio-économiques, quant à elles concernent les pertes des superficies des étangs et des terres fermes, la production halieutique, la mortalité des animaux domestiques, les pertes des productions et superficies agricoles de 2001 à 2010. Les données d'évaluation d'impact des inondations sont également constituées du nombre d'habitants permanents, du nombre d'emplois et des bâtiments remarquables potentiellement exposés.

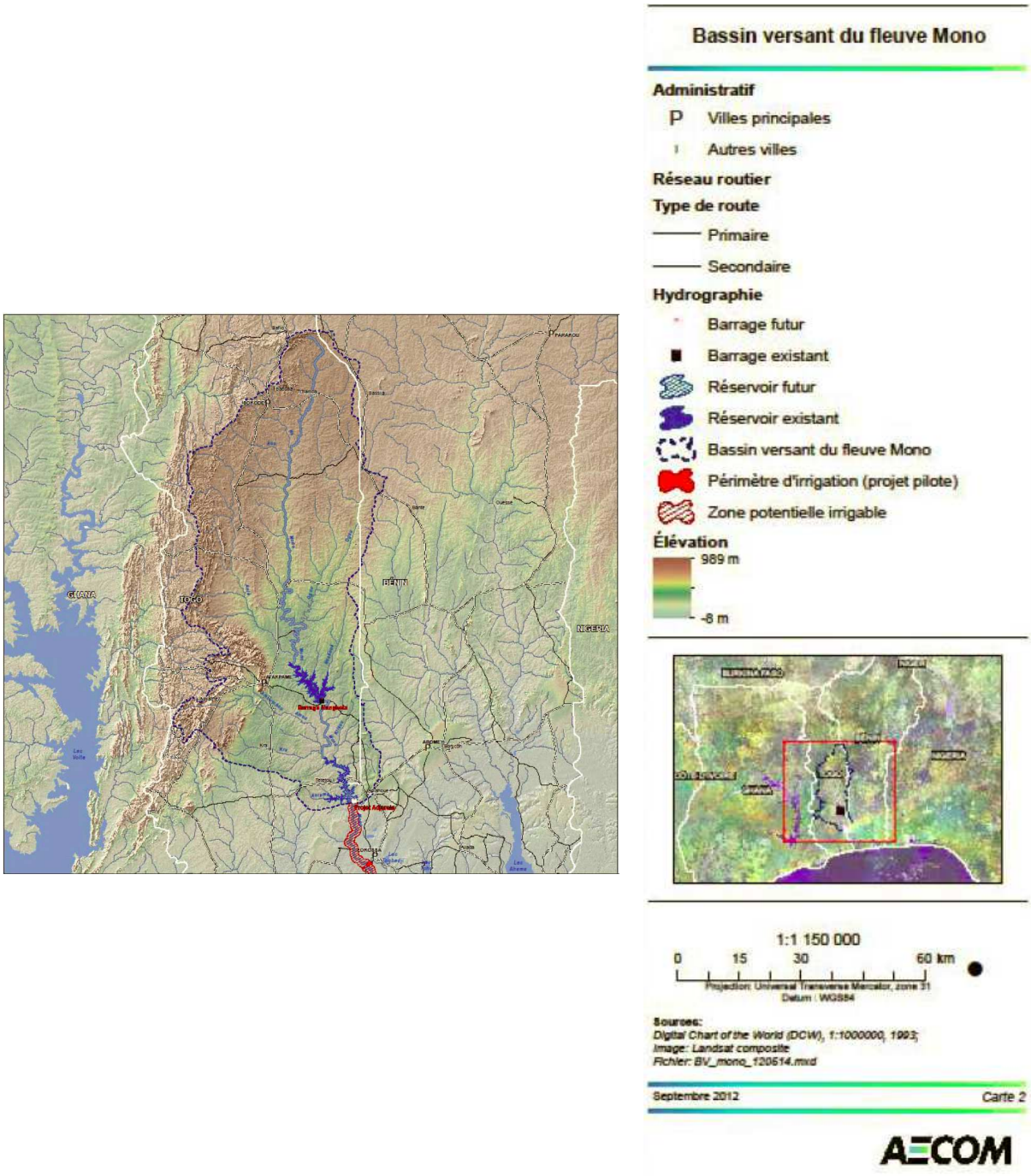


Figure 2.3 : Positionnement des barrages hydroélectriques dans le bassin du Mono (***Source*** *: CEB, 2014)*

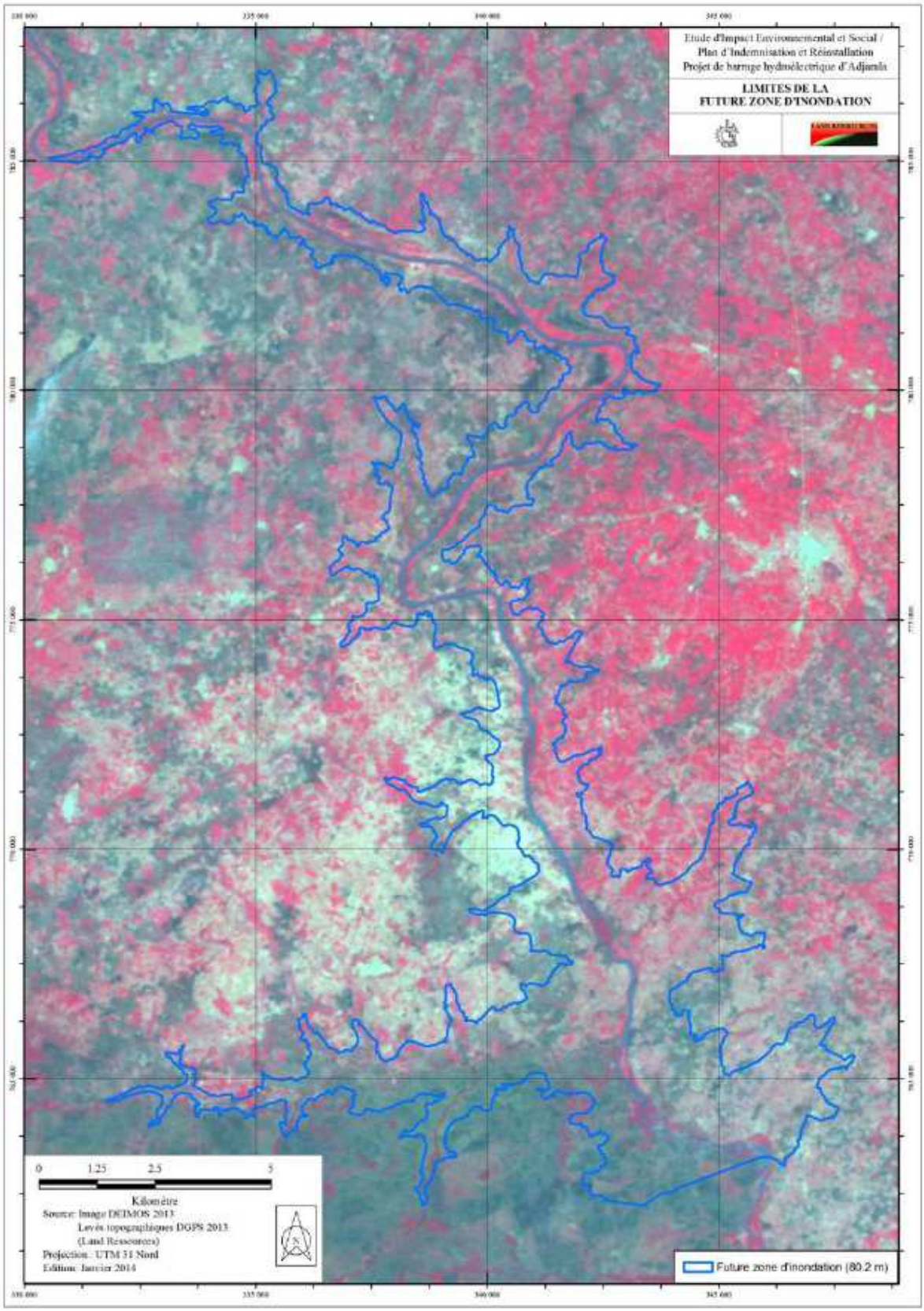


Figure 2.4: Zone inondable sous l'effet du barrage d'Adjarala

*(**Source** : CEB, 2014)*

2.2.6. Données d'observation et d'enquêtes socio-anthropologiques

Elles concernent les informations issues des enquêtes de terrain pour compléter les données quantitatives collectées afin de mieux cerner le degré de vulnérabilité des populations au risque d'inondation. Les investigations réalisées comportent les entretiens semi-directifs et des interviews.

En plus des observations directes (identification des enjeux, les infrastructures du barrage Nangbéto, le paysage en amont et en aval des barrages, la position des agglomérations du lit du cours d'eau, …) et des investigations des sites de Nangbéto et d'Adjarala, un questionnaire est orienté vers les utilisateurs quotidiens du bassin (les pêcheurs, les paysans, les jardiniers, les saliculteurs, …), vers les organismes non gouvernementaux (ONG), les personnes-ressources (chefs de quartier ou de village, maires des communes, notables, sages et chefs religieux, et agents du développement rural) et les agents travaillant à Nangbéto, a été mis au point. Ces personnes-ressources sont ciblées en raison de la nature des informations détenues et de leur savoir endogène sur la vulnérabilité des écosystèmes du bassin. Les enquêtes se sont déroulées du Nord au Sud du bassin. Selon un choix raisonné, deux cent neuf personnes, soit deux par village dans la partie Est du bassin (Bénin) et deux cent vingt-cinq personnes dans la partie Ouest du bassin (Togo) ont été interrogés (soit un total de quatre cent trente-quatre personnes).

2.3.7. Critique des données hydrométéorologiques manquantes et reconstitution des débits à Adjarala

Les stations qui ont des données très lacunaires (plusieurs mois ou années de manque de données, > 5 %) ont été simplement supprimées. Par contre, celles qui ont des données manquantes < 5 % ont été utilisées sans comblement du fait qu'elles sont au pas de temps journalier. De façon générale, très peu de données lacunaires ont été enregistrées dans notre base de données.

La station hydrométrique d'Adjarala ne dispose pas de données de débit. Mais, elles sont reconstituées à partir des données des autres stations hydrométriques du bassin.

La reconstitution des débits d'Adjarala à partir des apports d'Athiémé est plus adéquate que la transposition des débits de Nangbéto, dont les valeurs ne couvrent pas la période 1961-1987. Cette reconstitution permet de prendre en compte la variabilité interannuelle des apports du bassin-versant intermédiaire, les données de Nangbéto ou de Tététou prises seules ne peuvent pas renseigner le fonctionnement hydrologique à Adjarala dans le temps. Dans cette approche, la station de Tététou est écartée de l'analyse car ses écoulements ne sont pas bien corrélés avec ceux des deux autres stations hydrométriques sur le Mono comme l'ont déjà fait Coyne-et-Bellier (2013).

La relation établie entre les apports de Nangbéto et ceux d'Athiémé pour reconstituer les débits d'Athiémé sur les années non observées ou comportant des lacunes et pour corriger les années douteuses est inspirée de celle de Coyne-et-Bellier (2013) donnée par la formule :

$Q\ Athiémé\ (mm) = 0{,}732 * Q\ Nangbéto\ (mm) + 28{,}47\ avec\ r^2 = 0{,}81$; (la constante représente à priori les apports du bassin-versant intermédiaire entre les deux stations).

La reconstitution des débits à Adjarala avec ceux d'Athiémé, a été faite en lame d'eau écoulée, en pondérant les débits d'Athiémé par la racine carré du rapport des surfaces entre les deux bassins-versants. Elle est donnée par la formule :

$Q\ Adjarala = \text{Q Athiémé} * \sqrt{\frac{\text{S Adjarala}}{\text{S Athiémé}}}$, avec Q, le débit et S la superficie du bassin.

Une autre méthode d'estimation des débits à Adjarala issue de celle de Coyne-et-Bellier (2013) est établie. Elle permet de valider les nouvelles estimations à partir de la simple transposition des débits d'Athiémé à Adjarala. Elle s'exprime par la relation :

$$Q\ Adjarala = Q\ Nangbéto + (Q\ Athiémé - Q\ Nangbéto) * (S\ Adjarala - S\ Nangbéto)/(S\ Athiémé - S\ Nangbéto)$$

En synthèse, les débits d'Adjarala sont estimés à partir de débits des stations de Nangbéto et d'Athiémé.

Ces deux méthodes de reconstitution de séries à Adjarala donnent des résultats similaires comme l'illustre figure 2.5. Néanmoins, il a été constaté que pour certaines années humides, la série issue de la transposition des débits d'Athiémé à Adjarala propose des débits moyens annuels légèrement supérieurs.

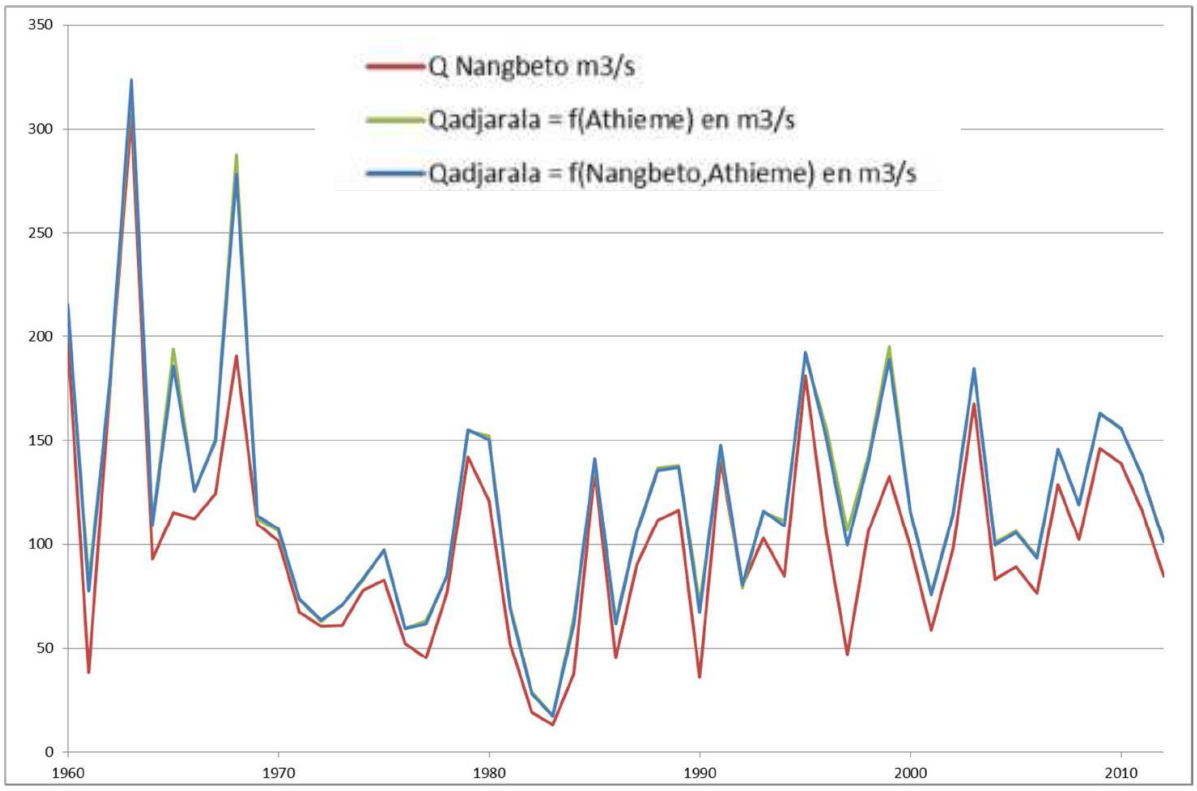


Figure 2.5 : Reconstitution des débits annuels au droit d'Adjarala au moyen de deux relations débit-débit.

2.3. Méthodes de traitement des données

2.3.1. Spatialisation des données pluviométriques

Pour cette étude de régionalisation des données pluviométriques, c'est le krigeage ordinaire par bloc qui a été utilisé du fait de sa robustesse. Cette méthode repose sur un semis de points réguliers à 5 km généré sur le bassin du fleuve Mono à chaque station hydrométrique (Baillargeon, 2005 ; Amoussou, 2010). Elle permet l'estimation directe de la lame d'eau précipitée du bassin à partir des hauteurs de pluies journalières des vingt neuf stations de l'amont d'Athiémé ainsi que la variance de l'estimation. Il est aussi nécessaire de calculer un variogramme. L'avantage de cette méthode est qu'il a pris en compte lors de l'interpolation les distances entre les stations et le point amont des stations d'Athiémé, de Nangbéto, d'Adjarala et la structure spatiale du bassin (grâce à l'analyse variographique).

Dans la théorie de régionalisation spatiale, le bassin amont d'Athiémé est appelée «champ», notée D. La variable régionalisée que l'on étudie est vue comme une réalisation d'une fonction aléatoire $\{Z(s), s \in D\}$ (s : le vecteur des coordonnées) et toute valeur régionalisée $z(si)$ est considérée comme une réalisation d'une variable aléatoire $Z(si)$.

Pour mieux appliquer ce type d'interpolation par krigeage, une analyse variographique est faite afin d'explorer la structure spatiale des données et de vérifier si celles-ci sont bien auto-corrélées (Baillargeon, 2005). Ainsi, le semi-variogragramme qui décrit la semi-variance en fonction de la distance entre les stations de mesures et permet de lier spatialement les données, est défini de la manière suivante : $\gamma(h) = \frac{1}{2} Var\left(Z(s+h) - Z(s)\right) \quad \forall s \in D$ où $Z(.)$ est la variable régionalisée étudiée, s est le vecteur des coordonnées, h est le vecteur distance et D est le domaine géographique étudié (21 500 km²).

En pratique, l'analyse variographique s'est déroulée en deux étapes :

- **Estimation du variogramme**

Avec, la diversité des stations pluviométriques du bassin, l'estimation du variogramme est faite par la méthode des moments qui a consisté à estimer l'espérance par la moyenne empirique (Baillargeon, 2005). Cet estimateur est défini par la formule : $\hat{\gamma} = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{N(h)} [z(si) - z(sj)]^2$ (Baillargeon, 2005), avec :

h :vecteur distance, $z(si)$: la valeur de la variable régionalisée au point si, $N(h) = \{(i, j) tel\ que\ si - sj = h\}$ et $|N(h)|$ est le nombre de paires distinctes de l'ensemble $N(h)$.

- **Modélisation du variogramme**

Il convient de le modéliser par une fonction de référence (modèle exponentiel, sphérique...) une fois le variogramme estimé (Hennequi, 2010). Ce modèle prend ainsi toutes les propriétés requises pour effectuer un krigeage sur nos données journalières de pluie de 1988 à 2010.

Pour cela, le modèle le plus couramment utilisé est le modèle Sphérique défini par : $\gamma(r) = \begin{cases} C_0 + c\left(\frac{3r}{2a} - \frac{1}{2}\frac{r^3}{a^3}\right) \; pour \; 0 \le r \le a \\ C_0 + c \qquad\qquad pour \; r > a \end{cases}$ où : C_0 correspond à l'effet pépite, $C_0 + c$ correspond au palier et a correspond à la portée (Baillargeon, 2005 ; Hennequi, 2010)

Le modèle de base du krigeage est de la même forme que le modèle de régression classique qui a permis d'effectuer une interpolation spatiale aux valeurs régionalisées observées. C'est une méthode stochastique qui définit la variable régionalisée comme une fonction aléatoire (Wackernagel, 2003) décomposée comme suit : $Z(s) = \mu(s) + \delta(s), \quad s \in D$, où $\gamma(.)$est la structure déterministe pour l'espérance fonction de la localisation des stations utilisées et $\delta(.)$est une fonction aléatoire normale d'espérance nulle, de variance homogène et ne présentant pas de structure de dépendance spatiale. A cet effet $\delta(.)$est un processus gaussien de bruit blanc représentant des erreurs de mesures indépendantes (Baillargeon, 2005). La tendance $\gamma(s)$peut prendre plusieurs formes dont celle utilisée est un polygône de degré d des coordonnées de formule : $\mu(s) = \mu(n, y) = \sum_{\ell + k \le d} \beta_{\ell k} . x^{\ell} y^{k}$ (Baillargeon, 2005 ; Amoussou, 2010).

En interpolation spatiale, le modèle de régression est appelé « surface de tendance » (Ripley, 1981). Les coefficients du modèle sont ajustés pour la prévision de la variable régionalisée z en point non échantillonné sodans le bassin par une combinaison linéaire des données ponctuelles adjacentes. Ainsi, l'estimation non biaisée de la variance minimale des données est définie par : $\hat{Z}(S_0) = a + \sum_{i \in v(so)} \lambda_i Z(S_i)$ où $S_i (i = 1...n)$ sont les stations pluviométriques utilisées pour l'estimation, la constante a et les poids λ_i sont les inconnus du problème.

Au total, le krigeage est une méthode d'interpolation exacte qui a permis de restituer les valeurs régionalisées mesurées aux stations pluviométriques d'observation. Cependant, même si les résidus du modèle sont nuls, une validation croisée permet

de mieux valider le modèle c'est-à-dire de comparer néanmoins les données observées à celles estimées.

La validation croisée dite «leave-one-out» est une pratique recommandée pour valider l'estimation et le choix des échantillons de voisinage pour l'interpolation. Cette dernière consiste à effectuer une validation croisée afin de comparer la qualité prédictive des modèles sur la base d'un critère d'erreur (Baillargeon, 2005 ; Amoussou, 2010). Le principe consiste à séparer la base initiale (l'ensemble des stations pluviométriques utilisées) en douze sous-ensembles. La procédure consiste dans chaque échantillon à retirer une des observations *i* (une station), notée $Z(si)$ pour ensuite la prévoir (selon la méthodologie ci-dessus, c'est-à-dire régression classique puis interpolation) à partir des autres données *i*, notée $\hat{Z}_{[i]}(si)$. Cette opération est donc répétée douze fois. Pour chaque station, on obtient ainsi une vraie valeur que l'on compare à une valeur estimée pour vérifier si le modèle fournit des estimations plausibles.

Une fois la validation croisée effectuée, le calcul des différents critères permet de comparer deux modèles entre eux. A cet effet, les critères utilisés dans la validation croisée sont :

- ✓ Biais moyen : $BM = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(Z_{[i]}(si) - Z(si)\right)$
- ✓ Moyenne des résidus issus de la validation : $MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(Z_{[i]}(si) - Z(si)\right)^2$
- ✓ Critère d'adéquation : $CA = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{Z_{[i]}(si) - Z(si)}{\sigma_{[i]}(si)}\right)^2$ où $\sigma^2{}_{[i]}(si) = Var\left(\hat{Z}_{[i]}(si) - Z(si)\right)$ correspond à la variance de krigeage.
- ✓ Somme des résidus : $PRESS = \sum_{i=1}^{N}\left(Z_{[i]}(si) - Z(si)\right)^2$

Pour ces quatre critères, le «meilleur» modèle est celui qui a le plus petit critère étudié. Un modèle serait d'autant plus performant si ces critères sont proches de 0 (Baillargeon, 2005 ; Hennequi, 2010).

2.3.2. Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

Plusieurs méthodes sont utilisées pour calculer l'ETP. La méthode adoptée est celle de Oudin *et al.* (2005), déjà testée par plusieurs d'autres chercheurs (Kay et Davies, 2008 ; Amoussou *et al.*, 2014). Elle consiste à l'estimation de l'ETP journalière pour la modélisation hydrologique. Elle est issue des modèles de Jensen-Haise et de McGuinness. Ces modèles généralement utilisés en climatologie prennent en compte seulement la température moyenne journalière de l'air et le rayonnement solaire qui dépend de la latitude et des 365 jours de l'année. Ils prennent généralement la forme suivante :

$$PE = \frac{R_e}{\gamma_\rho}\frac{T_a + K_2}{K_1}, \text{ si } T_a + K_2 > 0,$$
$$PE = 0$$

Où PE : Evapotranspiration potentielle journalière (mm.j^{-1}) ; R_e : Rayonnement solaire (MJ.m^{-2}.j^{-1}) ; T_a : Température moyenne journalière (°C) ; γ : le flux de chaleur latente (pris égal à 2,45 MJ. Kg^{-1}) ; ρ : la masse volumique de l'eau (kg.m^{-3}). K_1 (°C) et K_2 (°C) sont des paramètres fixes du modèle car ils sont ajustés au cours de l'échantillon de l'ensemble du bassin et ne sont pas spécifiquement calibré pour chaque bassin-versant (Oudin *et al.,* 2005).

2.3.3. Estimation du coefficient de ruissellement

La détermination du coefficient de ruissellement permet d'apprécier le rôle du substratum et du couvert végétal dans les apports d'eau continentaux vers le cours d'eau. Le ruissellement est un facteur de risque d'inondation qui permet de mesurer la capacité des apports du bassin. Ce coefficient de ruissellement est donné par la formule de Colin Riden qui s'exprime de la façon suivante :

$$Coefficient\ de\ ruissellement = \frac{Lame\ d'eau\ ruisselée}{\text{Pr}écipitation} \quad \text{or,}$$

$$Lame\ d'eau\ ruisselée\ (mm) = \frac{[(superficie * pluie) - (Ecoulement * temps\ en\ seconde)}{superficie}$$

Il a permis aussi d'apprécier l'importance de la lame d'eau ruisselée par secteur dans le bassin.

2.3.4. Simulation des crues avec le modèle GRP (Génie Rural pour la Prévision des crues)

Pour mieux cerner cette étude, l'utilisation du modèle de prévision de crue GRP (Génie Rural pour la Prévision de crues, issu du modèle hydrologique générique GR4J (Génie Rural Journalier à quatre paramètres) a été choisi pour prédire les débits de crue à partir des données de pluies et d'ETP projetées. La version du modèle utilisé est celle de Tangara (2005) et mis à jour conformément au bassin du Mono en mai 2013 (Amoussou *et al.,* 2014). Ce modèle est illustré par la figure 2.6. L'utilité de ce modèle est de prédire les débits de crue (Amoussou *et al.*, 2015), aléas d'inondation à partir de la pluie et de l'ETP afin d'alerter les communautés de la basse vallée du Mono. Ainsi, il a servi à la modélisation des crues dans le bassin du Mono à Athiémé et à Nangbéto.

L'utilisation de ce modèle se justifie par sa facilité d'application, intégrant très peu de données. Il est l'aboutissement d'une démarche de développement empirique, basée sur une grande quantité de bassins versants de superficies variées et de conditions climatiques et hydrologiques très diverses.

Désigné par O(j), le débit observé le jour j et par Q(j) le débit prévu la veille de ce même jour en utilisant la procédure décrite précédemment. Ceci permet de vérifier si l'erreur relative effectuée le jour précédent (j-1) se maintient en partie pour le jour j.

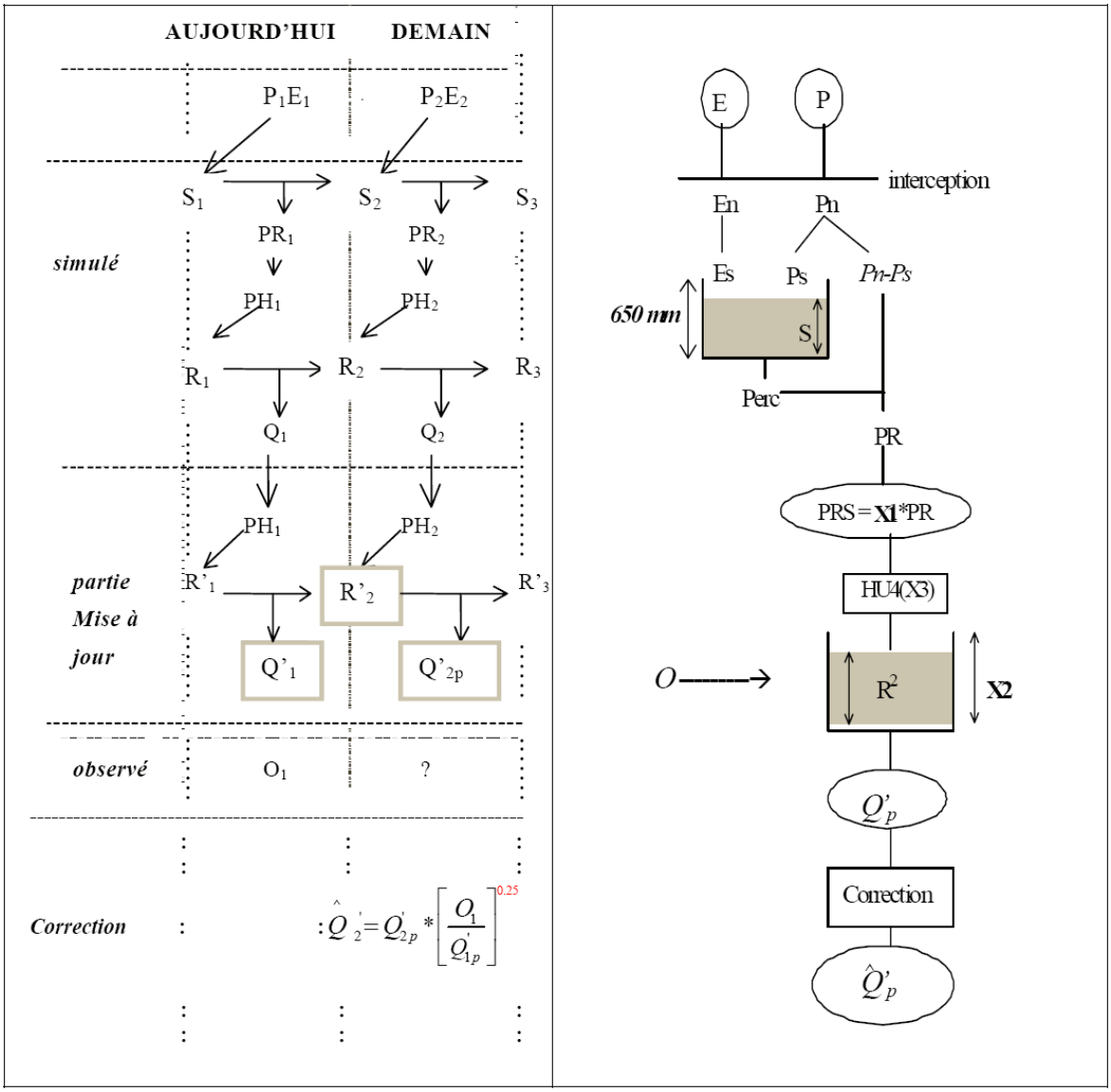


Figure 2.6 : Schéma de fonctionnement du modèle GRP (Tangara, 2005)

On propose ainsi de corriger la prévision ' ( ) *p Q j* pour fournir la valeur ^*Q*(*j*) par la relation suivante :

$$\hat{Q}(j) = Q'_p(j) * \left(\frac{O(j-1)}{Q(j-1)} \right)^{\beta}$$

L'exposant **β** peut être, dans une première étape, considéré comme un paramètre supplémentaire.

Selon Tangara (2005), cette nouvelle procédure a permis d'obtenir un gain net supplémentaire de +2.1 % (31.0 % au lieu de 28.9 %). En prenant une valeur fixe de

0.25 pour cet exposant β (toujours dans le but de nous ramener à seulement trois variables optimisables), nous n'avons qu'une perte de - 0.4 % sur le résultat précédent (30.6 % au lieu de 31.0 %)

Pour cette étude, le modèle a été utilisé comme outil de prévision des crues et de gestion des risques d'inondation. Son efficacité réside dans sa capacité à reproduire les crues en simulation et en prévision en calage comme en validation. Les données utilisées pour cette modélisation sont : les sorties de pluies krigées, l'ETP calculée (méthode de Oudin *et al*., 2005) et les débits des stations hydrométriques d' Athiémé, Nangbéto et Adjarala.

Ce modèle est composé de :

➔ trois paramètres variables (X1, X2, X3) calés directement en mode prévision :

* le paramètre X1 est le coefficient d'échanges ;
* le paramètre X2 est la capacité à un jour du réservoir de transfert R ;
* le paramètre X3 est la caractéristique de l'hydrogramme unitaire HU4 dérivable en son sommet.

➔ une fonction d'échanges non conservative ;

➔ une correction des débits en sortie ;

➔ la capacité de son réservoir sol S est fixe et égale à 650 mm ;

➔ son réservoir de transfert R est du type quadratique ;

➔ un report partiel (exposant 0,25) de l'erreur de prévision constatée au pas de temps précédent.

2.3.5. Dépendance statistique entre pluie et écoulement dans le bassin

La relation pluie/débit a été utilisée pour mesurer le degré de liaison qui existe entre les précipitations et les écoulements de surface dans le bassin-versant du fleuve Mono pour mieux prédire les crues dans le temps et dans l'espace. Elle s'écrit de la manière suivante :

$r = \frac{\frac{1}{N}\Sigma(xi-\bar{x})(yi-\bar{y})}{\delta(x).\delta(y)}$, où N : effectif total d'individus ; xi et yi : les valeurs des séries, $\bar{x}$ et $\bar{y}$: moyennes des variables ; $\delta(x)$ et $\delta(y)$: les écarts types.

2.3.6. Détermination des seuils des aléas d'inondation

L'analyse statistique dans le contexte de résolution de problème hydrologique (Viessman *et al.*, 2002) permet d'évaluer l'Indice de précipitations normalisé (SPI) dans le bassin du Mono. L'Indice de précipitations normalisé (McKee *et al.*, 1993) est un indice largement utilisé pour la surveillance de la sécheresse (Lloyd-Hughes et Saunders, 2002; Vicente-Serrano et López-Moreno, 2005; Patel *et al.,* 2007; Cancelliere et Bonaccorso, 2009; Vicente-Serrano *et al.,* 2010;. Karavitis *et al.*, 2011;. Dutra *et al.*, 2013;. Xie *et al.*, 2013;. Trenbert *et al.*, 2014), mais aussi de l'évaluation des inondations (Seiler *et al.*, 2002 ; Guerreiro *et al.*, 2008;. Du *et al.*, 2013) comme c'est le cas pour cette étude. A cet effet, il peut être utilisé comme un outil pour surveiller les évènements pluvieux extrêmes à la normale (Seiler *et al.*, 2002).

Ces indices standardisés (WMO, 2012) sont calculés sur la base des pluies, débits et hauteur d'eau journalières pour des échelles de temps multiples. Selon Cancelliere & Bonaccorso (2009), l'indice standardisé est basé sur l'équiprobabilité de transformation des valeurs de pluie, agrégées à *k*-mois en valeurs standard normales, avec *k* généralement fixé en fonction des objectifs de l'analyse (exemple : *k* = 1, 3, 6, 9, 12, 24, 36 mois).

A l'origine, McKee *et al.* (1993) proposent pour le calcul de l'indice SPI une transformation Gamma. Cet indice est utilisé aux pas de temps mensuels ou pluri-mensuels. Mais, pour ce travail, l'indice standardisé classique (noté Z) a été utilisé avec un changement de pas de temps à l'échelle journalière. A l'aide des données de précipitations et de débit, il est calculé par la formule :

$$Z = \frac{Y - \mu}{\sigma}$$

Où Y est la valeur unitaire du paramètre considéré, $\mu et \sigma$ sont respectivement la moyenne et l'écart type de la variable.

Le calcul de l'indice de précipitation normalisé (SPI) dont la correspondance en hydrologie est l'indice de débit normalisé (SFI) évoqué par Bordi *et al.* (2001), Lloyd-Hughes et Saunders (2002) et Khadr *et al.* (2009) s'écrit de la manière suivante:

$$SPI/SFI = \begin{cases} -\left(t - \dfrac{c0 + c1t + c2t^2}{1 + d1t + d2t^2 + d3t^3}\right), 0 < H(x) \leq 0{,}5 \\ +\left(t - \dfrac{c0 + c1t + c2t^2}{1 + d1t + d2t^2 + d3t^3}\right), 0{,}5 < H(x) \leq 1{,}0 \end{cases}$$

où t est déterminé par : $t = \begin{cases} \sqrt{ln\dfrac{1}{(H(x))^2}}, \ 0 < H(x) \leq 0{,}5 \\ \sqrt{ln\dfrac{1}{(1-H(x))^2}}, \ 0{,}5 < H(x) \leq 1{,}0 \end{cases}$

et c0, c1, c2, d1, d2 et d3 sont des coefficients dont les valeurs sont : c0=2,515517 ; c1=0,80285 ; c2=0,010328 ; d1=1,432788 ; d2=0,189269 ; d3=0,001308.

Le SPI est utilisé pour définir les seuils des événements pluvieux, hydrologiques et des hauteurs d'eau, caractéristiques des aléas d'inondation (normal, très humide et extrêmement humide) en utilisant le tableau 2.I où McKee *et al*. (1993) classent les valeurs des seuils d'intensité des inondations.

Tableau 2.I: Classification des valeurs SPI et catégorie de sécheresse / inondations

Valeurs seuils de SPI	**Catégorie de Sécheresse / inondation**
2.0+	Extrêmement humide
1.5 à 1.99	Très humide
1 à 1.49	Modérement humide
-0.99 à 0.99	Proche de la normale
-1 à -1.49	Modérement sec
-1.5 à -1.99	Très sec
-2.0 à moins	Extrêmement sec

Source : Aghrab (2003) et Mckee *et al.,* (1993)

NB : Dans le cas de la présente thèse, l'exploitation du tableau 2.1 est faite sur les valeurs allant de 0 à 2 et plus pour caractériser les seuils d'aléas de risque.

2.3.7. Période de retour selon la méthode de Gumbel

L'analyse fréquentielle a permis de déterminer la récurrence des événements hydroclimatiques et d'estimer leur temps de retour (Gabriele, 1984 ; Slimani, 1985 ; Masson et Lubès, 1991 ; Hubert et Bendjoudi, 1998 ; Bois *et al.*, 2007 ; Goula *et al.*,

2007). Le modèle fréquentiel de cette prédiction est une équation décrivant le comportement statistique du processus.

Le modèle décrit la probabilité d'apparition d'un événement pluvieux ou hydrologique donné. Un modèle fréquentiel très souvent utilisé pour décrire le comportement statistique des valeurs extrêmes (OMM, 1983) est la distribution statistique de Gumbel (loi double exponentielle ou loi de Gumbel).

La fonction de répartition de la loi de Gumbel F(x) s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp[-\exp((-x-a)/b)]$$

avec la variable réduite u = (x-a)/b où a et b sont les paramètres du modèle de Gumbel.

La distribution s'écrit alors :

$$F(x) = \exp[-\exp(-u)]$$

et

$$u = -\ln[-\ln(F(x))]$$

Il s'agit à cet effet d'estimer la probabilité de non dépassement F(xi) qu'il convient d'attribuer à chaque valeur xi des séries pluviométriques et hydrologiques comme l'avaient fait Mimikou *et al.* (1994) ; Bonaccorso *et al.* (2005) et Totin *et al*. (2009) pour la détermination des périodes de retour des évènements hydroclimatiques normaux, anormaux, exceptionnels (rares) ou très exceptionnels (très rares). Pour ce faire la fréquence empirique de Hazen est utilisée:

$$F(x_{[r]}) = \frac{r-0,5}{n}$$

où r est le rang dans la série des données classées par valeurs croissantes, n la taille de l'échantillon et x[r] la valeur de rang r.

Le temps de retour T d'un événement pluvieux ou hydrologique est défini comme l'inverse de la fréquence d'apparition de l'événement. Soit :

$$T = [1/(1-F(xi)]$$

2.3.8. Caractérisation des niveaux de risques d'inondation et matrice de criticité

Les différents seuils de risque ont été définis à partir des indices standardisés de précipitation, d'écoulement de surface et de hauteur d'eau de la retenue de Nangbéto. Ainsi, quatre classes ont catégorisées comme l'illustre le tableau 2.II

Tableau 2.II: Correspondance entre valeurs d'indices standardisés et niveaux de risques d'inondation

Valeurs d'indices standardisés	Niveau de risques	Niveau d'alerte
2.0+	Critique	Rouge
1.5 à 1.99	Significatif	Orange
1 à 1.49	Modéré	Jaune
0 à 0.99	Limité	Vert

Source : Aghrab (2003) et Mckee *et al*., (1993)

Ces niveaux ont été classés en terme de risques acceptables (risques mineurs) et inacceptables (risques majeurs) selon leur situation par rapport à la courbe de Farmer (figure 2.7 et tableau 2.III).

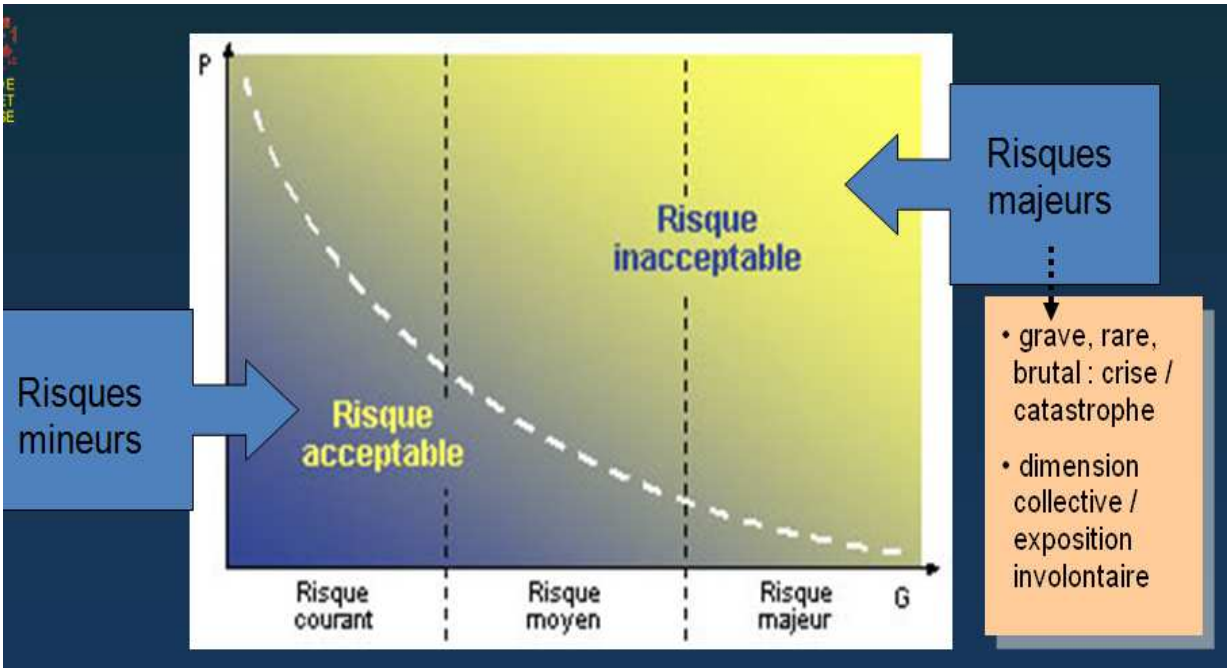


Figure 2.7: Catégorisation des risques suivant la courbe de Farmer

Source : http://old.previnfo.net/

Tableau 2.III: Modèle de matrice de criticité des aléas d'inondation, utilisé dans le bassin du Mono (*Source : Inspiré Mérad, 2004*)

Probabilité							
Hautement probable	1,00						
Très probable	0,83						
Assez fréquent	0,66						
Possible	0,50			**15,0**			
Peu probable	0,33						
Impossible	0,16						
Cotes d'aléas d'inondation et Gravité		2,50	12,00	30,00	112,00	188,00	241,00
		Sans effet	*Négligeable*	*Notable*	*Grave*	*Très grave*	*Catastrophique*

Risque limité
Risque modéré
Risque significatif
Risque critique
15,00 *Seuil de criticité*
Courbe de Farmer

Les données pluviométriques, hydrométriques et de hauteur d'eau dans le bassin ont été utilisées pour calculer les indices de criticité sur la base du modèle de la matrice comme le montre le tableau 2.III. Cette matrice a permis de classer les risques en fonction de la gravité des impacts et de la probabilité d'occurrence des cotes d'aléas d'inondation dans le bassin du Mono.

Ces données ont servi ensuite à spatialiser les types de risques d'inondation dans le bassin afin de déterminer les secteurs les plus exposés.

2.3.9. Evaluation de la vulnérabilité aux aléas d'inondation

L'approche utilisée dans cette étude se fonde sur la représentation de Ozer (2007), reprise par Houndénou *et al.,* (2008) comme l'illustre la figure 2.1 supra.

La vulnérabilité d'un système aux évènements hydroclimatiques extrêmes désigne la mesure dans laquelle un tel système est sensible ou incapable de faire face aux effets défavorables des changements climatiques et des évènements extrêmes. Elle est fonction de la nature, de l'ampleur et du rythme de la variation hydroclimatique à laquelle le système considéré est exposé, de la sensibilité de ce système et de sa capacité d'adaptation (Kodja *et al.*, 2014).

La technique de la matrice de sensibilité a été utilisée pour déterminer les indicateurs d'exposition (sans et avec rupture de barrages), les indicateurs d'impact afin d'évaluer le degré de vulnérabilité (CCNU-CC, 2008).

Le tableau 2.IV présente le barème d'évaluation de l'ampleur des risques d'inondation dans la basse vallée du fleuve Mono.

Tableau 2.IV : Barème d'évaluation des risques d'inondation

Echelle de grandeur du degré de vulnérabilité	**Ampleur du risque**
1	Faible
2	Assez faible
3	Moyen
4	Assez fort
5	Fort

Source : Badolo, 2009

L'application de la matrice produit trois indicateurs :

- ✓ l'indice d'exposition ;
- ✓ le rang en termes d'exposition des unités d'exposition aux risques climatiques ;
- ✓ l'indice d'impact des risques climatiques.

Selon Badolo (2009), la valeur de l'indice d'exposition pour une unité d'exposition est donnée par la somme des colonnes pour chaque ligne de la matrice. La valeur de l'indice d'impact pour un risque donné est la somme des lignes pour chaque risque. Les indices déterminés sont aussi utilisés pour établir une hiérarchisation des risques dans le secteur d'étude par rapport aux unités d'exposition considérées.

2.3.10. Détermination de la dynamique de l'occupation du sol

La prise en compte de l'influence des changements des états de surface dans la survenance des événements d'inondation est nécessaire pour la gestion optimale des risques.

Les unités d'occupation du sol sont supposées connaître une évolution de leur superficie entre 1985 et 2000 d'une part et entre 2000 et 2014 d'autre part. Les

unités d'occupation du sol des trois années ont permis d'apprécier la variation de la pression humaine sur l'hydrosystème Mono. Trois cartes sont réalisées à partir des images LANDSAT ETM7+ 1985, 2000 et 2014 de résolution 30 m à l'échelle de 1/1 000 000e.

2.3.10.1. Traitement numérique de l'image satellitaire

Cette étape principale est basée sur l'analyse par télédétection satellitaire des modes d'occupation des sols sur les images aux trois années (1985, 2000, 2014). La seconde étape est l'intégration des résultats à l'étape de la télédétection à un SIG en vue de leur interprétation. Le SIG est alors utilisé comme outil de synthèse (Bonn, 1996).

Composition colorée

Après amélioration du contraste, une composition colorée des bandes spectrales Proche Infrarouge (PIR), Rouge et Vert a été réalisé. Les compositions colorées sont obtenues par combinaison de trois bandes spectrales affichées dans l'ordre colorimétrique rouge, vert et bleu. De la sorte, on obtient une image synthétique enrichie de l'apport spécifique de chacune des trois bandes spectrales. Le choix des bandes spectrales affichées est fait en fonction des propriétés spectrales des éléments d'occupation du sol de la zone d'étude.

Amélioration de contraste

Il s'agit d'une technique très simple utilisée pour faciliter l'interprétation des images. Elle consiste à appliquer une transformation, linéaire ou non, a l'amplitude du signal de chacun des pixels d'une image pour que l'ensemble des amplitudes occupe plus efficacement l'échelle des gris disponibles.

Interprétation visuelle

Lors de l'utilisation de la méthode de classification supervisée, on identifie des échantillons assez homogènes de l'image qui sont représentatifs de différents types de surfaces (classes d'information). Ces échantillons forment un ensemble de données-tests. La sélection de ces données-tests est basée sur les connaissances de l'analyste, sa familiarité avec les régions géographiques et les types de surface présents dans l'image.

La classification supervisée nécessite au préalable un bref aperçu visuel. En effet, l'analyse d'imagerie de télédétection nécessite l'identification d'un certain nombre de cibles sur une image. Ces cibles peuvent être des objets naturels ou artificiels ; ils peuvent être ponctuels, linéaires, ou surfaciques. Elles peuvent être repérées en fonction de leur degré de diffusion du rayonnement. L'intensité du rayonnement est mesurée et enregistrée par un capteur pour être ensuite transformée en produit utilisable comme une image satellitaire.

Classification supervisée

Le principe de la classification est d'identifier un certain nombre d'objets géographiques à partir de leurs valeurs de luminance. Celle des pixels environnants permettant de saisir les caractéristiques de l'objet dans son espace (texture et topologie) ne sont pas prises en compte.

La classification supervisée opère à partir d'un ensemble d'échantillons connus au sol (zones tests), représentatifs d'une classe (un thème) et repérés sur l'image. Ces échantillons servent de référence pour assigner chaque pixel de l'image à une catégorie.

Cette classification donne un fichier IMAGINE (.img) composé d'une seule couche. Une table d'attributs est associée à cette image thématique. Cette table reprend, pour toutes les classes, les pixels de l'image originale qui ont été regroupés dans la classe correspondante. Il est également possible d'ajouter une colonne pour spécifier un nom ou un type d'occupation à chacune des classes. Des opérations de lissage permettent de rendre homogènes les différentes classes ainsi définies.

Après toutes ces opérations, il faut passer du fichier Raster au fichier Vecteur. C'est une conversion qui aboutit à la segmentation de l'image. Les unités s'individualisent et chacune d'elle peut être modifiée sans affecter les autres. C'est après cette étape que le fichier est exporté en « shapefile » pour être utilisable dans le logiciel Arc View. Le fichier ainsi obtenu est alors édité pour la cartographie.

2.3.10.2. Méthodes d'évaluation spatiale de l'état des unités paysagiques

Les cartes d'occupation du sol de 1985, 2000 et 2014 issues des images Landsat ont permis d'apprécier l'état de l'évolution des unités paysagiques. Les cartes de synthèse ont ensuite été réalisées et mises à contribution pour mettre en évidence les liens potentiels entre la dynamique des unités paysagiques et le degré de vulnérabilité des populations aux inondations.

La dynamique évolutive des unités spatiales est caractérisée de la façon suivante :

- ✓ β1, c'est l'écart entre la superficie des différentes unités paysagiques de 1985 et 2000 ;
- ✓ β2, c'est l'écart entre la superficie des différentes unités paysagiques de 2000 et 2014 ;
- ✓ si β1 ou β2 = 0, la superficie de l'unité est donc stable dans le temps et dans l'espace ;
- ✓ si β1 ou β2 > 0, la superficie de l'unité concernée est en progression ;
- ✓ si β1 ou β2 < 0, la superficie de l'unité concernée est dite en régression.

2.3.11. Cartographie de l'aléa et de la vulnérabilité à l'inondation

Trois paramètres sont retenus pour cartographier l'aléa : les précipitations, les débits et la hauteur d'eau dans le barrage. Quatre classes d'aléa ont été définis: limité, modéré, significatif et critique.

Par contre pour la détermination des zones de vulnérabilité à l'inondation dans le bassin, la couverture du sol qui retient une proportion variable de la pluie a été utilisée. Car, en prenant en compte le rôle des différentes classes d'occupation dans la production des écoulements de surface, une classification est réalisée et a permis de retenir trois classes: rôle faible (forêt dense et plantation), rôle fort (champs et jachères) et rôle très fort (agglomération et plan d'eau). Cette approche a permis le croisement avec les données pluviométriques et hydrométriques afin de cartographier l'étendue spatiale et les zones potentiellement exposées aux aléas d'inondation

Le traitement des données relatives à la vulnérabilité du bassin à l'inondation a permis de dresser des cartes thématiques :

✓ la première est celle des pentes, réalisée sur la base du MNT ASTER V2. Le MNT utilisé est extrait du modèle numérique de terrain global de (http://www.gdem.aster.jp). La résolution de ce MNT est de 30 m.

✓ la seconde est celle de densité de drainage. Ainsi, trois classes de densité sont définies. Il s'agit de faible, fort et très fort.

Les deux dernières cartes sont celles de la zone d'influence des principaux cours d'eau du bassin et celle des ensembles géologiques. La combinaison de ces facteurs dans le SIG permet l'élaboration de la carte de vulnérabilité du bassin. Le regroupement des pentes en trois classes (faible : <5% ; forte : entre 5 % et 10 % ; très forte : > 10%) a permis de mieux cerner les secteurs favorables au ruissellement de surface et les zones de stagnation donc inondables.

2.4. Modèle d'analyse des résultats

L'étude des risques d'inondation dans le bassin du Mono repose essentiellement sur une approche systémique comme l'illustre la figure 2.8, intégrant les informations quantitatives et qualitatives recueillies lors des investigations et de la collecte des données statistiques. Le processus d'identification et d'évaluation (analyse) des risques d'inondation est fondée sur la question « Que se passe-t-il et pourquoi ? ». Ceci a conduit à l'identification des sources de dangers et à l'estimation du risque à travers les aléas (la probabilité d'occurrence) et le degré de vulnérabilité des systèmes exposés (conséquences).

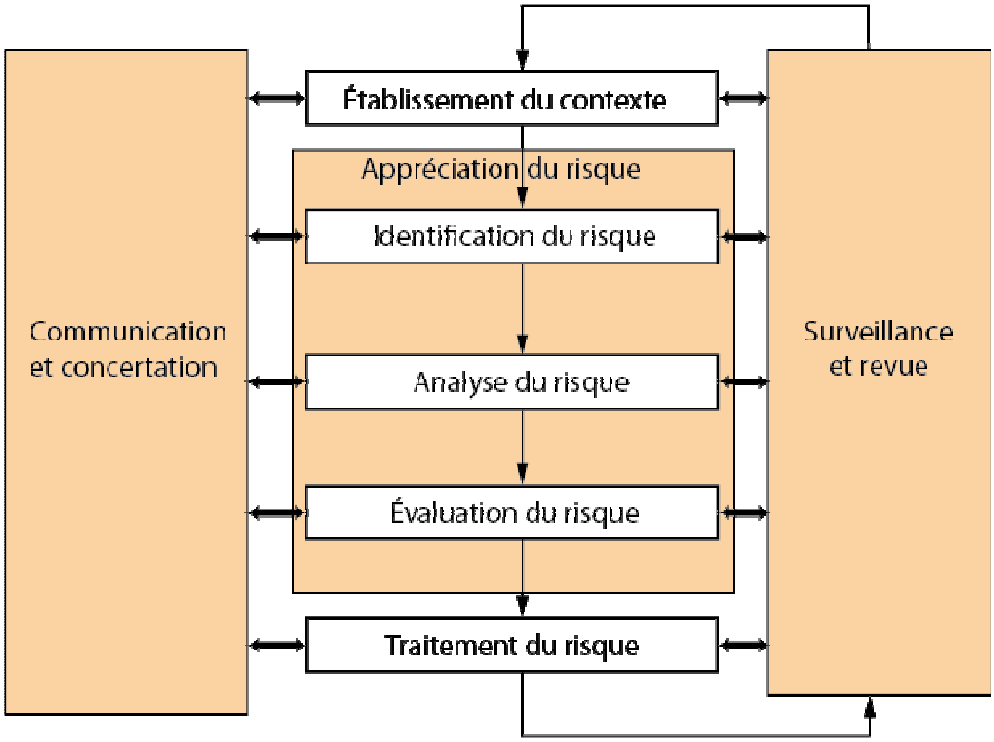


Figure 2.8: Processus global d'appréciation et de traitement des risques (***Source*** *: Norme ISO 31000 :2009*)

L'évaluation du risque (risques acceptable ou inacceptable) a débouché sur les stratégies de traitement et du contrôle résultant des mesures de limitation des conséquences ou de réduction de la probabilité d'occurrence. Tel est globalement le processus de gestion de risque d'inondation mis en évidence dans le bassin-versant du Mono dans le contexte de la mise en eau du barrage de Nangbéto et celui d'Adjarala (en construction)

Conclusion partielle

Pour cette étude, l'accent a été mis sur la description des données collectées et les méthodes de traitement statistiques relatives aux études pluviométriques, hydrologiques des années 1961-2010 et d'occupation du sol (1985, 2000 et 2014). Les données pluviohydrologiques sont décrites à partir d'un réseau de vingt-neuf stations de pluie et de cinq stations hydrométriques. Les données de précipitation ont servi à déterminer le champ de pluie du bassin à partir de la méthode de krigeage par bloc et validé à l'aide d'une analyse variographique. Les données pluvio-hydrologiques ont servi ensuite à la caractérisation des seuils de risques d'inondation

à partir d'un traitement statistique d'indice de précipitation/écoulement normalisé (SPI/SFI). Ces données couplées avec celles d'occupation du sol, géologiques, topographiques et pédologiques, ont servi également à la cartographie des risques d'inondation dans le bassin.

La modélisation des crues avec le modèle GRP en est un outil fonctionnel pour anticiper les conséquences hydrométéorologiques observées ces dernières années. Il a permis de prédire les crues dans la perspective d'une gestion des crises hydro-catastrophes. L'opérationnalisation du processus d'identification et d'évaluation des risques d'inondation a nécessité l'adoption d'une méthode de probabilité d'occurrence et de limitation des conséquences que pourraient engendrer ces risques dans le temps et dans l'espace dans la basse vallée du fleuve Mono.

CHAPITRE 3

CONTEXTE HYDROCLIMATIQUE ET DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL DANS LE FONCTIONNEMENT DES ECOULEMENTS DE SURFACE

Introduction

Le fonctionnement hydrodynamique de base du bassin-versant du Mono est étudié à travers les fluctuations hydroclimatiques, la dynamique de l'occupation des terres et les lâchers d'eau du barrage de Nangbéto avec les données climatologiques, hydrologiques et d'unités paysagiques. L'étude du bilan hydrologique déjà réalisée par Amoussou (2010) a servi de base complémentaire pour la caractérisation des seuils et l'appréciation des niveaux de risques d'inondation.

3.1. Variabilité hydroclimatique dans le bassin

3.1.1. Evolution des précipitations dans le bassin

La régionalisation des champs mensuels de pluie par méthode de krigeage a permis d'établir les cartes mensuelles de pluie du bassin-versant du Mono de 1961 à 2010 comme l'avait réalisé Amoussou (2010) dans le bassin, mais de 1961 à 2000.

Les cartes des moyennes mensuelles de précipitations (figure 3.1a & b) calculées sur cinquante ans (1961-2010) montrent que la pluviométrie est inégalement répartie et que ce sont les mois de novembre (23 ± 9,5 mm) à février (22 ± 6,6 mm) voire mars qui enregistrent de faibles quantités de pluie.

Les mois d'avril, de septembre et d'octobre reçoivent une quantité moyenne de pluie, tandis que les fortes quantités de précipitations sont enregistrées de mai (134 ± 9,3 mm) à août (176 ± 60 mm) dans le bassin. Mais, les pluies sont plus abondantes au centre ouest et un peu au sud qu'au nord du bassin sauf au mois d'août où le bassin est plus arrosé en amont.

La descente de ces eaux pluviales et les lâchers d'eau du barrage coïncident le plus souvent avec la petite saison des pluies en aval engendrant ainsi le débordement d'eau du lit dans la basse vallée du fleuve du Mono.

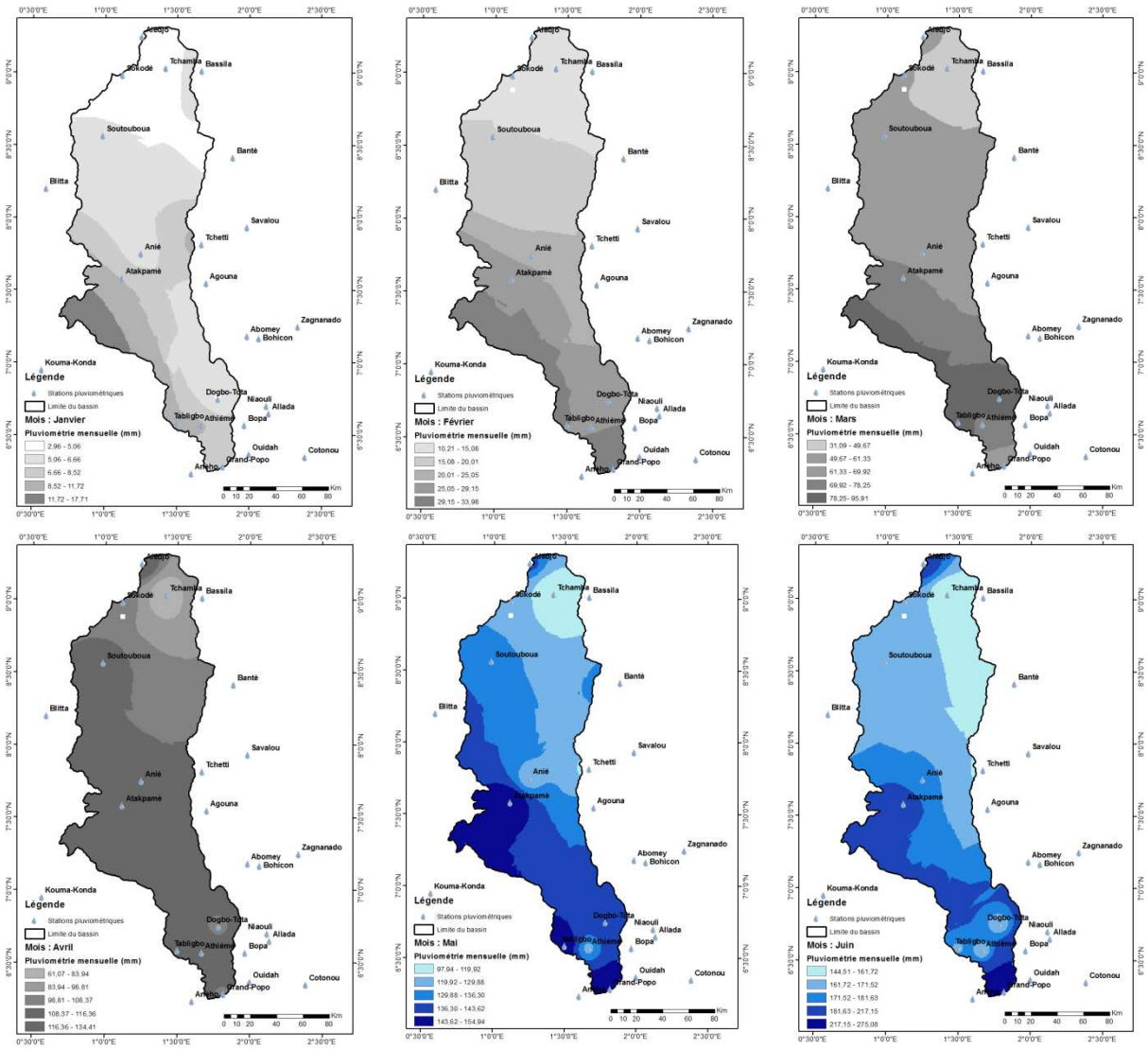


Figure 3.1a : Variation spatiale mensuelle (janvier à juin) des précipitations dans le bassin du Mono de 1961-2010

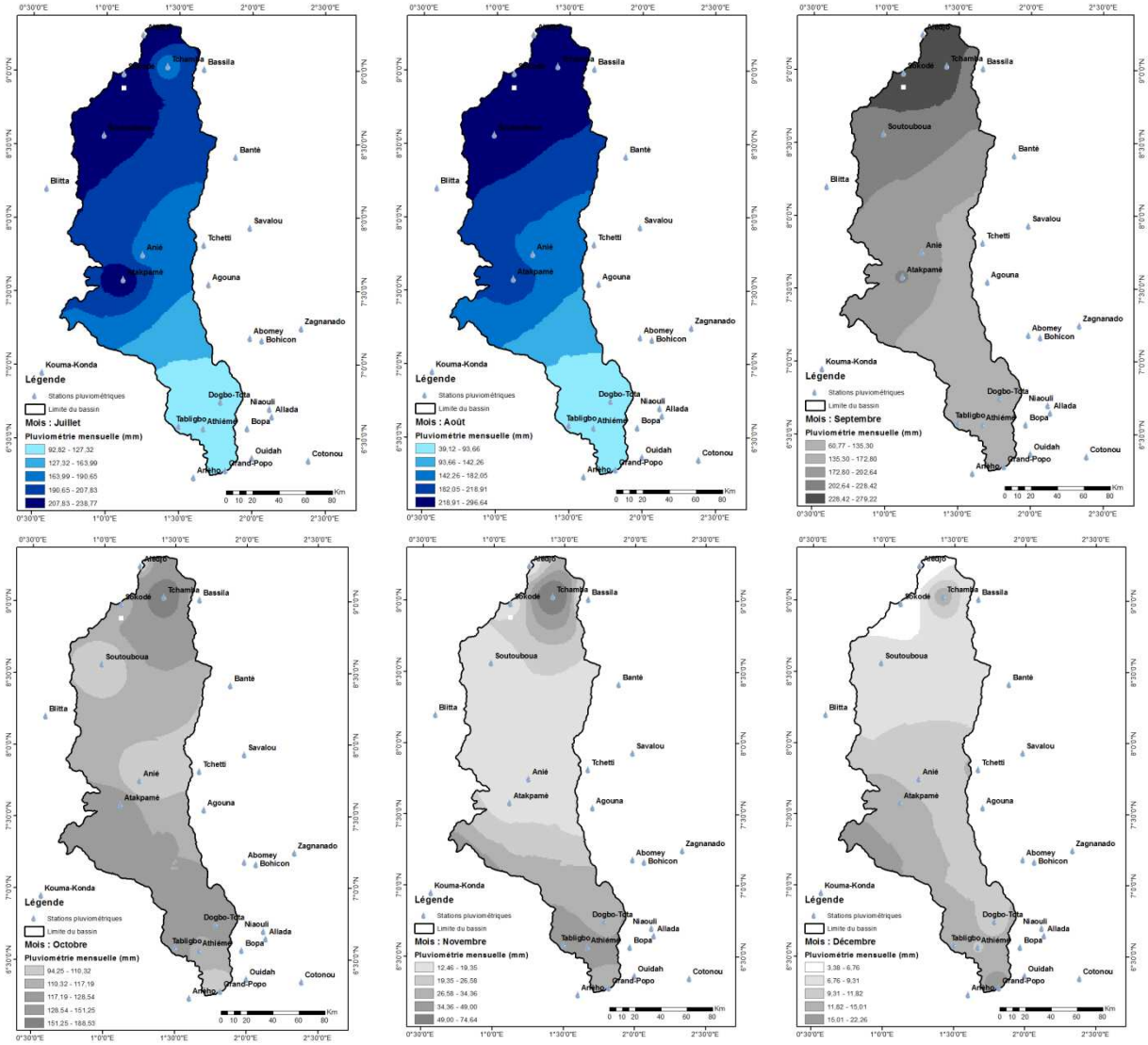


Figure 3.1b : Variation spatiale mensuelle (juillet à décembre) des précipitations dans le bassin du Mono de 1961-2010

La figure 3.2 présente la variation interannuelle du champ de pluie dans le bassin de 1961 à 2010. De l'analyse de cette figure 3.2., il ressort que la pluviométrie se repartit suivant deux gradients : un gradient pluviométrique décroisant ouest-est (1500 à 1100 mm) et un gradient nord-sud (1200 à 950 mm).

Le centre et le nord ouest du bassin enregistrent les plus fortes pluies qui s'expliquent par la présence d'une chaîne de montagne comme l'ont signalé Klassou (1996) et Amoussou (2010). Ce relief joue un rôle amplificateur dans la pluviogenèse du bassin et les transferts d'eau amont-aval par le système de pente et la structure géologique (cristalline) des roches.

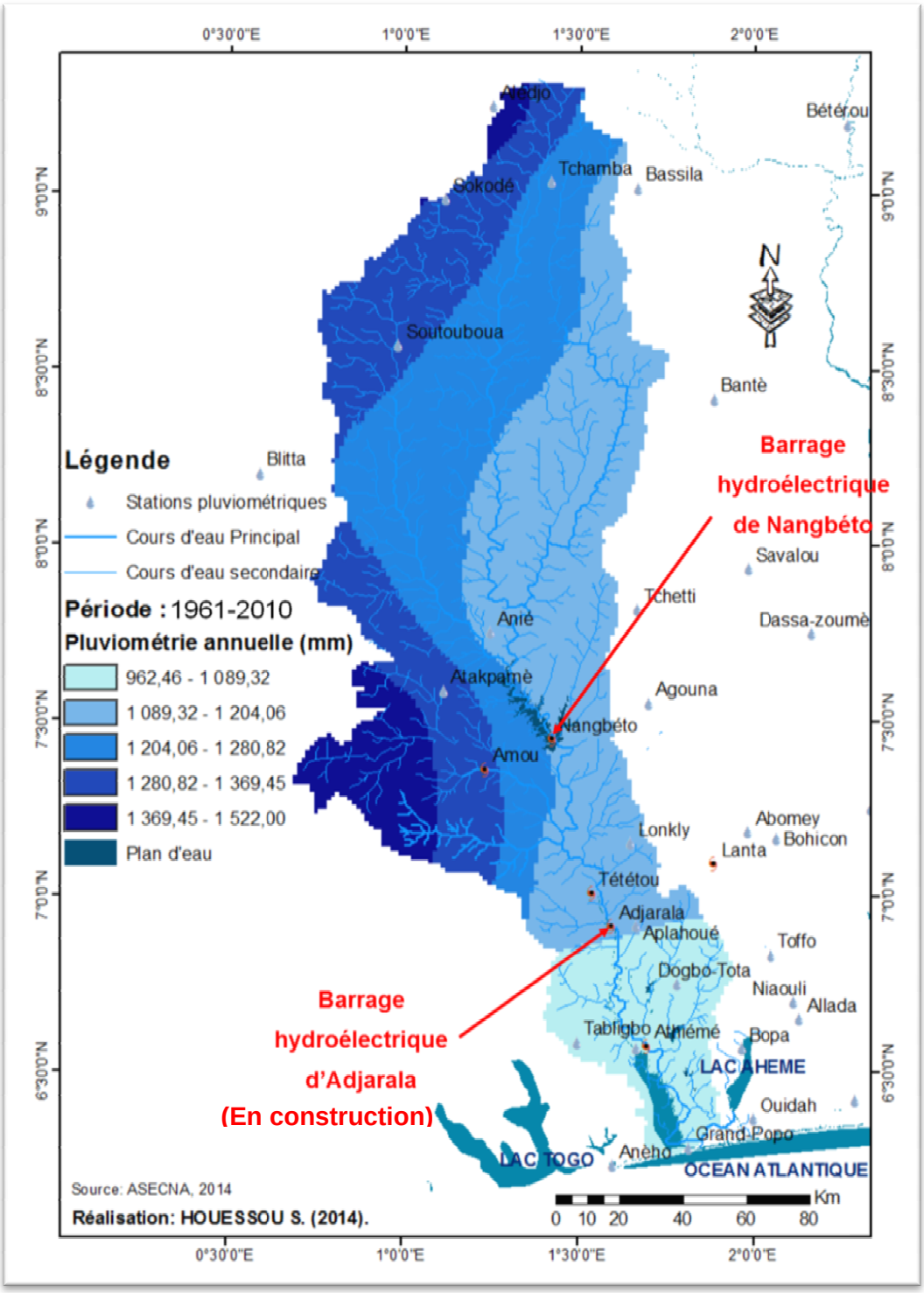


Figure 3.2 : Variation spatiale des précipitations moyennes annuelles (1961-2010) sur le bassin-versant du Mono

Au sud du bassin, la pluviométrie est en diminution. Il appartient selon Boko (1975 et 1988), Bokonon-Ganta (1987), Houndénou (1992 et 1999), Amoussou (2010) à la *diagonale de sécheresse* qui s'étend du Ghana au Bénin du fait de la remontée d'eau froide. Toutefois, cette partie du bassin reçoit une grande quantité des lames

d'eau précipitées et même celles lâchées par le barrage de Nangbéto. C'est ce qui favorise l'immersion rapide des terres et des infrastructures socio-économiques dans le secteur.

La figure 3.3 montre la variabilité journalière des précipitations dans le bassin de 1961 à 2010. Il ressort de l'analyse de cette figure 3.3 une baisse des maximums de précipitations vers la fin des années 1980, qui coïncidait avec la mise en eau du barrage de Nangbéto. Cette baisse est consécutive aux deux grandes décennies sèches notées en Afrique de l'Ouest en général (Boko, 1988 ; Houndénou, 1999). Ainsi, la fréquence des anomalies négatives entre 1970 et 1990 traduit la péjoration climatique qui a alors affecté la disponibilité des ressources en eau dans la région (Houndénou, 1999).

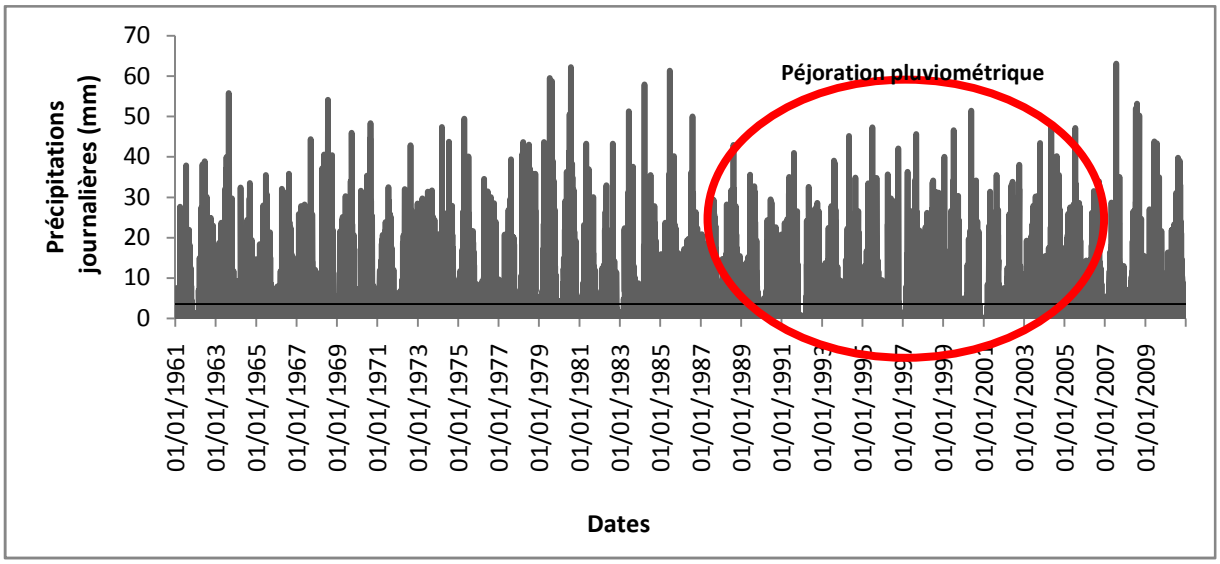


Figure 3.3 : Régimes des précipitations journalières moyennes du bassin versant du Mono de 1961 à 2010

Par contre au cours au cours de la dernière décennie (2000-2010), le maximum journalier annuel des lames d'eau précipitées a connu une légère augmentation due à l'amélioration des conditions météorologiques en Afrique comme l'ont mis en évidence Vizy et Cook (2012) et Sylla *et al. (*2012). Cela amplifie par ailleurs l'abondance d'eau avec débordement dans le bassin. C'est d'ailleurs ce qui justifie les récurrentes inondations observées ces dernières années.

3.1.2. Evolution des écoulements dans le bassin

L'évolution des écoulements de surface dans le bassin-versant du Mono dépend avant tout de la variation climatique notamment pluviométrique. L'interprétation des écoulements de surface sur la période 1961-2010 permet d'apprécier l'évolution de la disponibilité des ressources en eau superficielle et l'influence des précipitations. Il s'agit également d'apprécier les effets des barrages de Nangbéto et d'Adjarala dans la dynamique hydrologique du bassin. Or, les chroniques de débit du bassin sont souvent lacunaires, discontinues, de courte durée, et donc difficilement exploitables pour une analyse hydrologique fiable. Néanmoins, ces données vont être utilisées pour une appréciation de son évolution dans le temps et dans l'espace.

3.1.2.1. Régimes hydrologiques journaliers moyens du bassin

Le fonctionnement hydrologique du bassin du Mono dépend de la dynamique des régimes pluviométriques des domaines subéquatorial et tropical couplée au substratum géologique en place et à l'état du couvert végétal. Mais, seuls les rythmes pluviométriques saisonniers prédominent dans la variation des écoulements du fleuve Mono, dépendant du régime unimodal du climat tropical.

La partie méridionale du bassin est arrosé par le climat subéquatorial à régimes bimodaux, qui n'influencent que la partie aval. Plusieurs sous bassins sont distingués : le sous bassin de Corrékopé, le sous bassin de Nangbéto, le sous bassin d'Adjarala et le sous bassin d'Athiémé. Pour la station d'Adjarala, c'est les données de débits mensuels reconstitués qui ont fait l'objet d'analyse. Ces sous bassins n'ont pas les données couvrant toute la période d'étude à l'exception de la station d'Athiémé

Les figures 3.4, 3.5, 3.6 et 3.7 présentent le régime d'écoulement des eaux de surface dans les stations de Corrékopé de 1961-1992, de Nangbéto (entrant et sortant) de 1988-2010, d'Athiémé de 1961-2005 et d'Adjarala de 1961-2010. Il ressort de l'analyse de ces figures, une succession de basses eaux (étiage) et de hautes eaux (crues). Le même constat est fait dans la mesure où les écoulements de surface sont en baisse certaines années par rapport à d'autres.

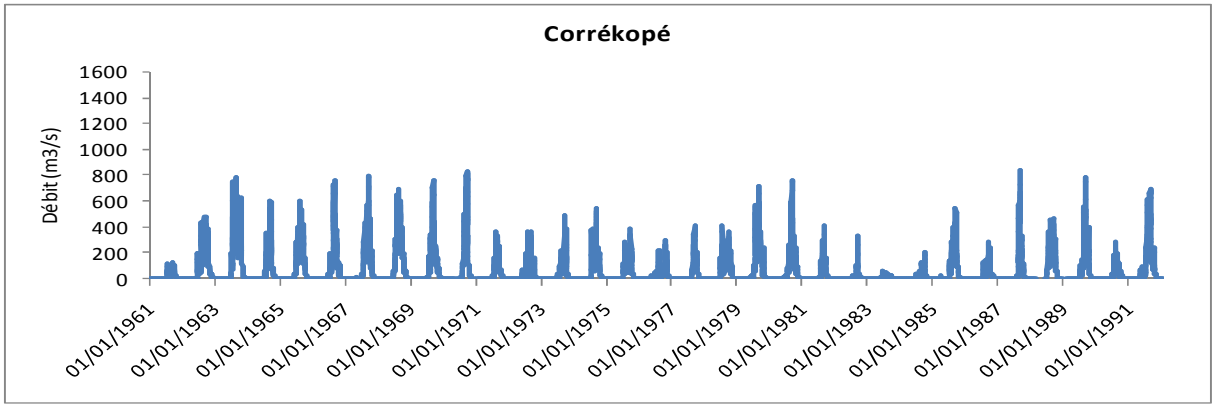


Figure 3.4 : Régime des écoulements dans le bassin versant du Mono à Corrékopé en amont du barrage de Nangbéto de 1961à 1991

A Corrékopé, où le régime hydrologique est de type ‘*’naturel’’*, les périodes de basses eaux sont bien distinctes des périodes de hautes eaux. Les crues sont régulières et moins dévastatrices que celles d’aujourd’hui. Ceci se justifie par rapport à la distance qui sépare ce point de la basse vallée et du rôle que jouait le couvert végétal dans le bilan hydrologique du bassin.

A Nangbéto à régime ‘’naturel’’ (débit entrant) et à régime ‘’influencé’’ (débit sortant), les écarts entre les deux varient de -822 à 1160 m^3/s soit en moyenne 8 m^3/s. Ceci montre que le réservoir-barrage de Nangbéto est de petite taille (180 km^2) et donc stocke très peu d’eau (1 175 millions de m^3) comparativement à des barrages de plus de 5 000 millions de m^3 (exemple du barrage d’Akossombo sur la Volta au Ghana). C’est d’ailleurs ce qui justifie les ouvertures des vannes une fois que le niveau critique (144 m) d’eau est atteint dans le barrage. Ces eaux lâchées s’ajoutent à celles précipitées dans le domaine subéquatorial du bassin pour inonder de façon récurrente la basse vallée.

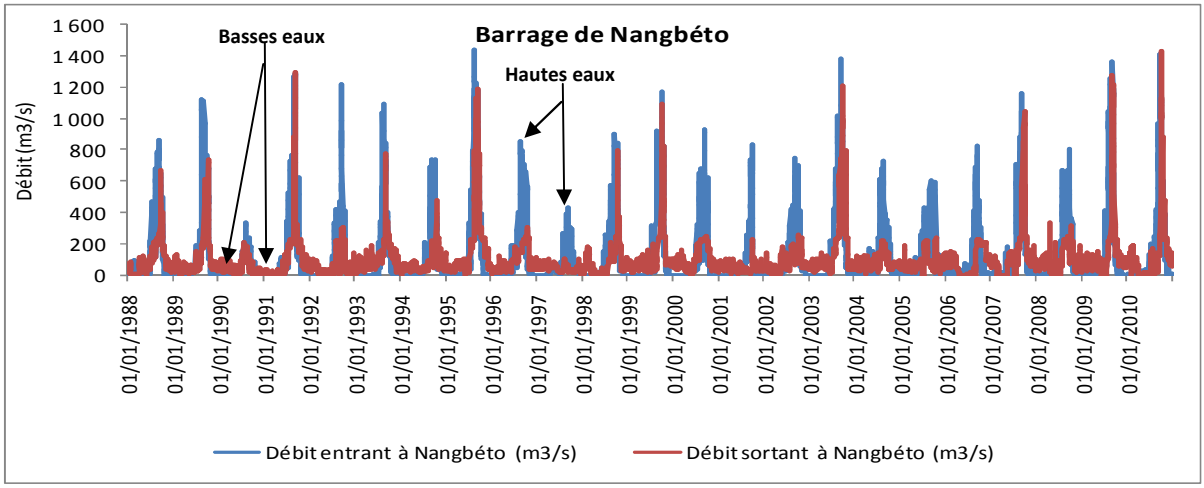


Figure 3.5 : Régime des écoulements dans le bassin versant du Mono Nangbéto (entrant et sortant) en amont du projet de barrage d'Adjarala de 1988 à 2010

L'évolution du débit à Athiéme renseigne sur le fonctionnement de tout le bassin, car c'est la station aval du bassin. Il ressort de l'analyse de cette figure 3.6 une nuance dans l'évolution des débits après l'année 1987. Les débits d'étiage sont plus remarquables de nos jours en période de basses eaux après la mise en eau du barrage qu'avant. Ceci corrobore les résultats de Amoussou (2010) en ce sens qu'il a montré l'augmentation des débits d'étiage de 97 % après la mise en eau du barrage de Nangbéto. Ces lâchers d'eau du barrage coïncident avec la légère reprise des précipitations de 2 % signalée par Amoussou *et al.* (2012) dans un environnement où les formations végétales sont en dégradation. A cet effet, les écoulements de surface prennent le pas sur l'infiltration, et par conséquent conduisent à des inondations récurrentes dans la basse vallée.

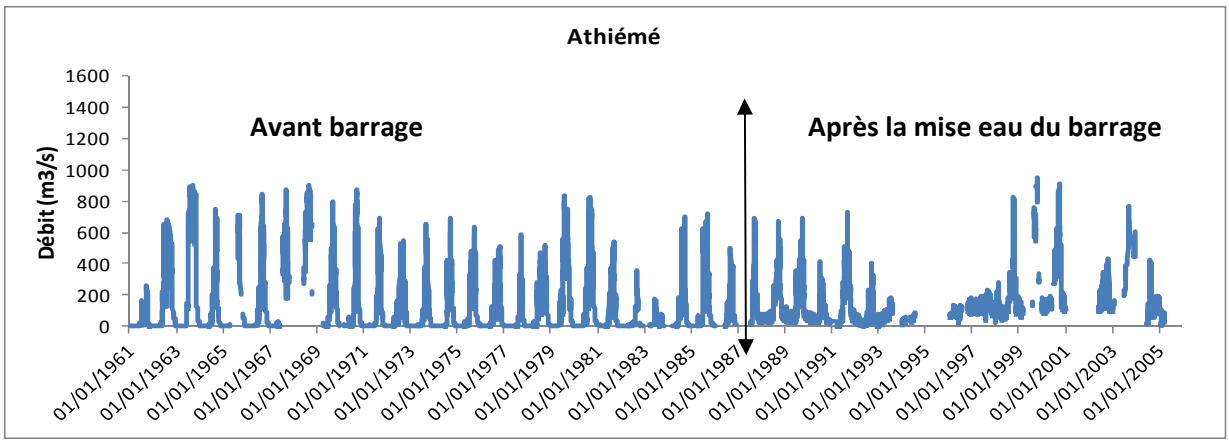


Figure 3.6 : Régime des écoulements dans le bassin versant du Mono à Athiémé (données non reconstituées) en aval des barrages de Nangbéto et du projet d'Adjarala de 1961 à 2005

De l'analyse de la figure 3.7, il ressort l'écrêtage des crues, ce qui montre le rôle régulateur des barrages et confirme aussi déjà le rôle joué par le barrage Nangbéto sur les crues, car il a écrêté les crues du bassin du fleuve Mono de 3 % (Amoussou, 2003). Ceci montre que le projet de construction du barrage d'Adjarala va également contribuer à l'écrêtage des crues dans la partie aval, mais à l'augmentation des débits d'étiage, renforçant ainsi, la vie écologique du milieu. Toutefois, les ouvertures des vannes vont toujours amplifier les risques d'inondation dans la basse vallée.

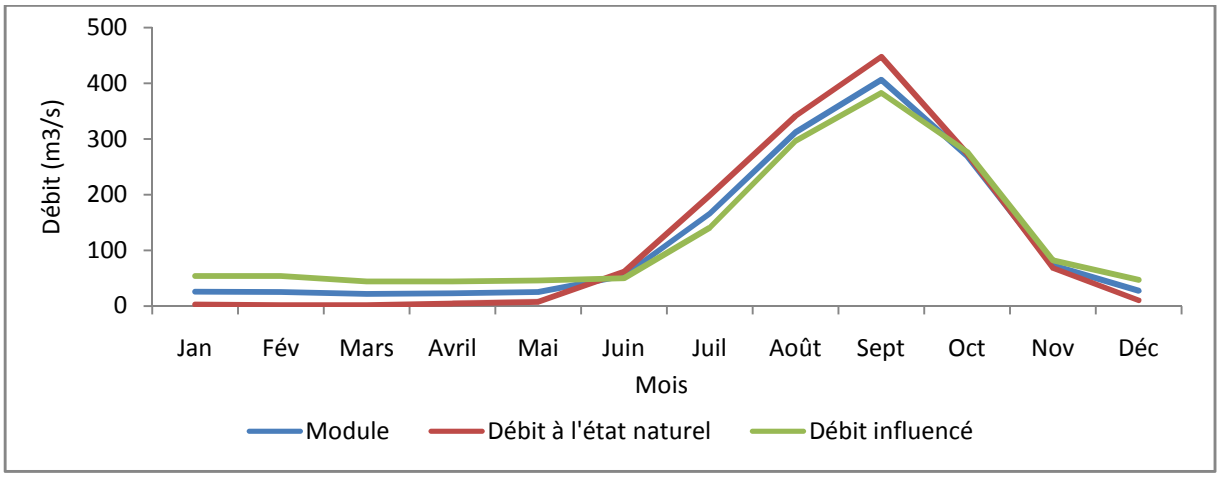


Figure 3.7 : Régime des écoulements dans le bassin versant du Mono à Adjarala (données reconstituées à partir de Nangbéto et d'Athiémé) de 1961 à 2010

3.1.2.2. Analyse du niveau d'eau dans la retenue de Nangbéto

La figure 3.8 illustre l'évolution de la hauteur d'eau dans la retenue du barrage de 1988 à 2010.

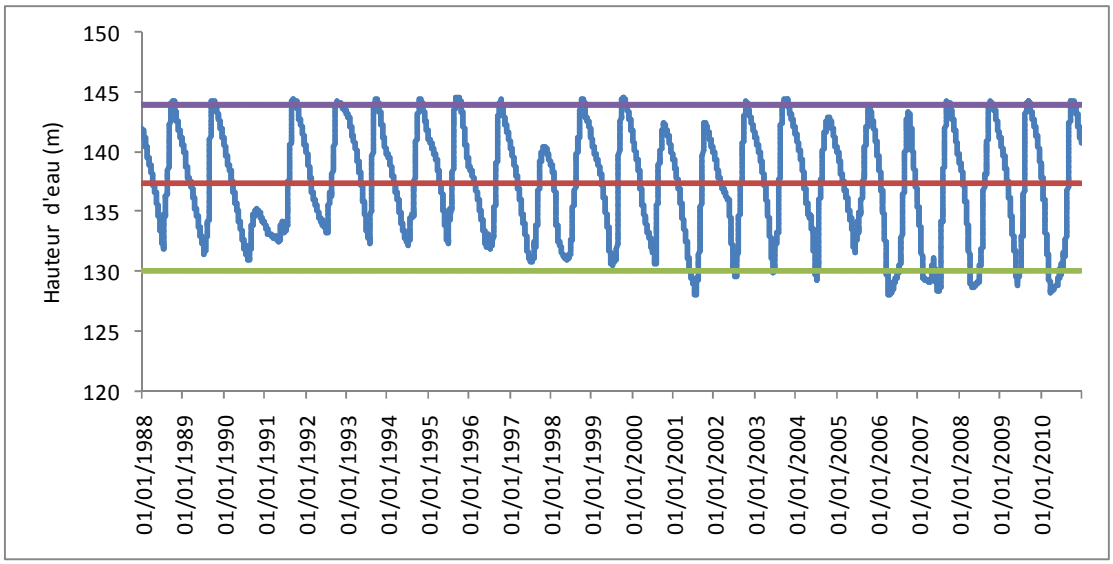


Figure 3.8 : Variation journalière de la hauteur d'eau dans le bassin du fleuve Mono à Nangbéto de 1988 à 2010 en amont du barrage d'Ajarala (en construction).

De l'analyse de cette figure 3.8 couplée avec les informations de terrain, il ressort que la hauteur minimale d'eau du lac est de 130 m. Par contre à 144 m d'altitude (correspondant à la hauteur d'eau), les exploitants de l'usine de Nangbéto procèdent à l'ouverture des vannes pour éviter la submersion des machines. Ces apports ajoutés à ceux existant en aval créent le débordement d'eau dans le lit du fleuve. Ce phénomène est de plus en plus régulier d'autant que depuis la mise en eau du barrage c'est seulement sept années sur les vingt-trois (soit 30 %) qu'il n'y a pas d'ouverture de vanne et pas de déversement. Ceci confirme le non déversement des eaux en aval du barrage de Nangbéto au cours des années 1990, 1997, 2000, 2001, 2004, 2005 et 2006.

La fréquence d'ouverture des vannes à Nangbéto (70 %) ajoutée éventuellement à celle d'Adjarala (barrage en construction) pourrait influencer les apports d'eau dans la basse vallée du Mono. A cet effet, les risques d'inondation seraient potentiellement élevés si ces eaux ne sont pas utilisées dans les périmètres irrigués en aval comme par exemple à Dévé au Bénin et à Agonmèglozou au Togo.

En outre, au-delà des 144 m d'altitude, si rien n'est fait, la probabilité de dégradation des infrastructures de l'usine pourrait conduire à un risque d'inondation de tout le bassin lié soit à la cassure du barrage ou sa submersion avec une hauteur d'eau d'environ 14 m.

Les apports des deux barrages (figure 3.9) sont en augmentation ces dernières années et pourraient être liées à la légère reprise des précipitations. L'augmentation de ces apports n'est pas sans conséquence sur l'hydrosystème.

Les inondations récurrentes dans le bassin au cours des années 2007, 2009, 2010 confirment l'importance des actions conjuguées de la reprise des précipitations, des apports du barrage de Nangbéto et certainement de l'état d'occupation des terres.

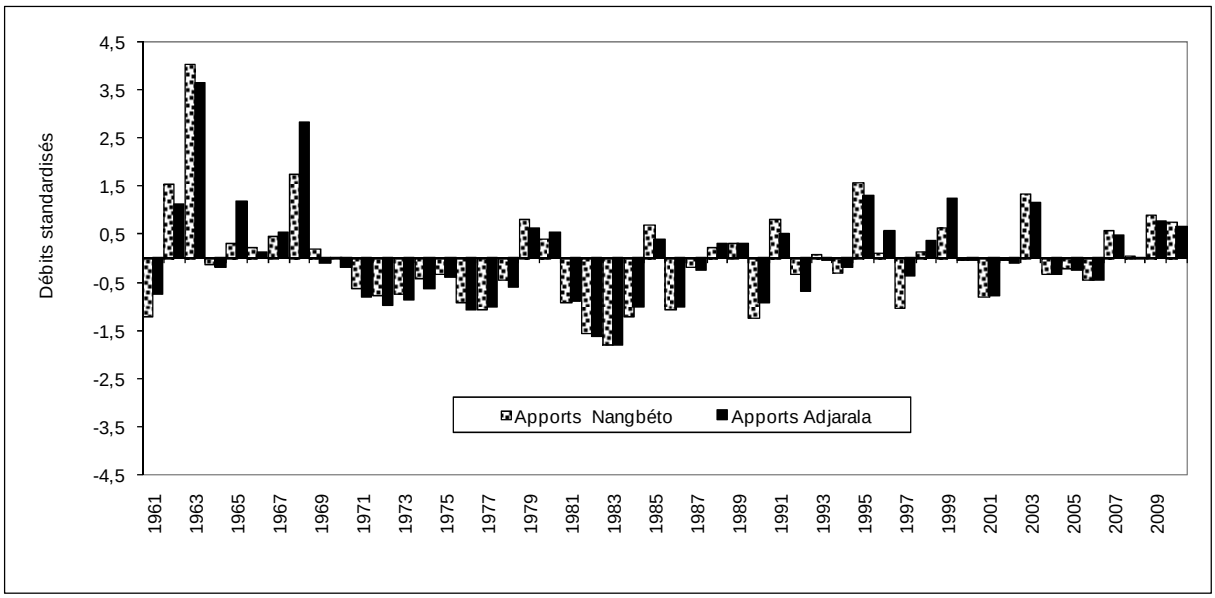


Figure 3.9 : Evolution des apports d'eau reconstitués des barrages de Nangbéto (1961-1987) et Adjarala (1961-2010)

3.1.2.3. Analyse de la relation pluie-débit

Les figures 3.10 et 3.11 présentent respectivement les relations pluie-débit au pas de temps journalier et mensuel. Il ressort de l'analyse de la figure 3.10 que la hausse des débits succède à l'augmentation des précipitations. Ainsi, les plus forts débits sont enregistrés avec un décalage des fortes pluies. Plus, les pluies sont abondantes, plus les écoulements vont augmenter pour engendrer des inondations récurrentes dans un contexte de dégradation du couvert végétal et de la mise en eau des barrages.

La figure 3.10b confirme l'influence du barrage en ce sens que les débits d'étiage sont en augmentation depuis la mise en eau du barrage en présence de faible précipitation. Ainsi, le régime du fleuve Mono est « artificiel » depuis septembre 1987 comme l'avaient signalé Rossi et Blivi (1995), Klassou (1996), Blivi (2000) et Amoussou (2010).

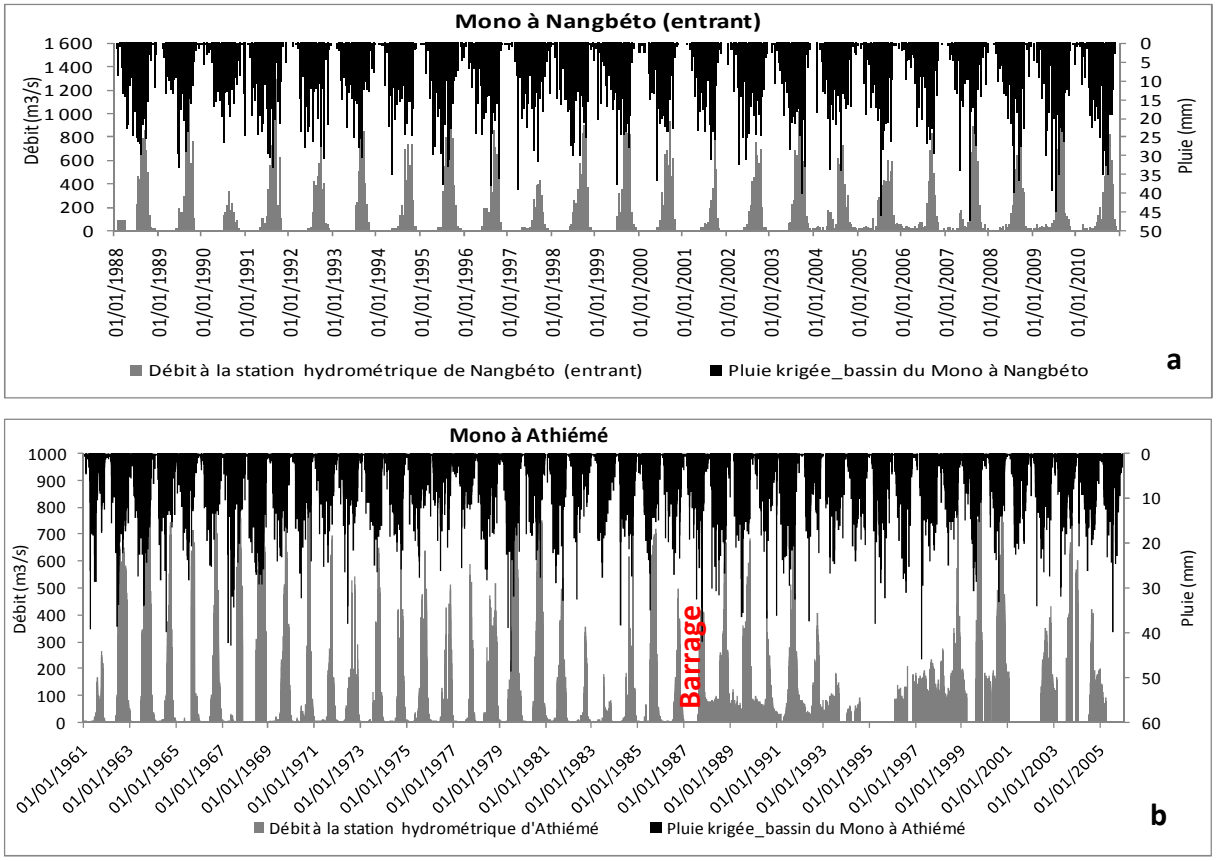


Figure 3.10 : Relation entre pluie-débit dans le bassin du Mono au pas de temps journalier

Faute de données journalières, la figure 3.11 présente la relation pluie / débit en régimes naturel et influencé dans le bassin du Mono à Adjarala.

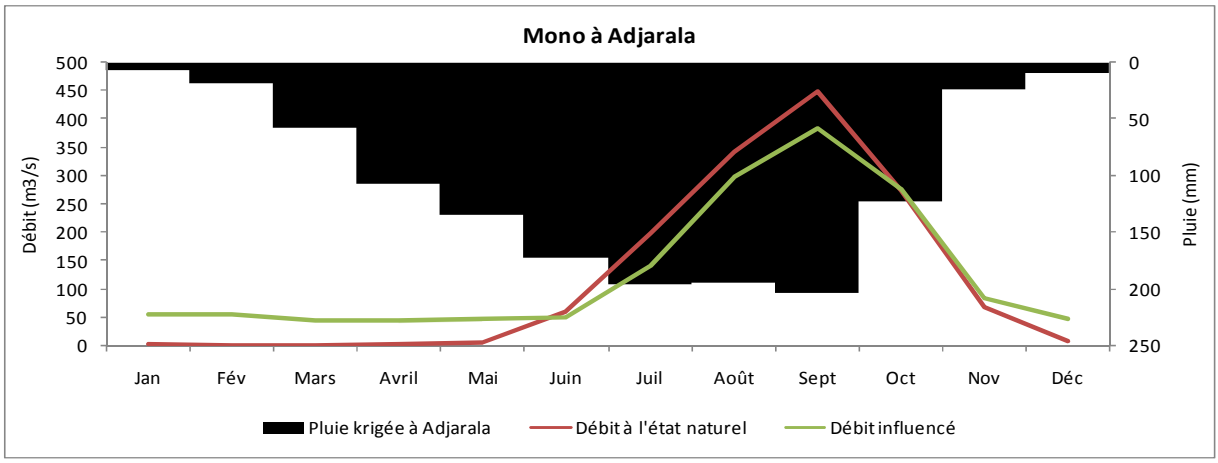


Figure 3.11 : Relation entre pluie-débit (naturel et influencé) dans le bassin du Mono au pas de temps mensuel de 1961 à 2010

De l'analyse, il ressort que les forts débits succèdent aux fortes pluies avec un décalage d'un mois quel que soit le régime de débit. Ceci montre que les

précipitations sont avant tout le facteur primordial déclencheur des écoulements de surface et par conséquent des inondations. Ceci est conforme aux résultats de Kodja (2013) et Totin *et al.* (2016) sur le fleuve Ouémé à Bonou et de Bodian *et al.* (2016) sur le fleuve Sénégal.

Les débits d'étiage sont soutenus par les lâchers d'eau du barrage de Nangbéto, ce qui se traduit par la hausse des débits d'étiage de décembre à mai.

3.1.3 Ruissellement : facteur de risque d'inondation dans le bassin

Le coefficient de ruissellement illustré par la figure 3.12 traduit la capacité du ruissellement dans le bassin. Cette capacité s'exprime suivant la quantité des lames d'eau précipitées, écoulées, la taille du bassin, mais aussi l'état du couvert végétal. Ainsi, pour apprécier les effets de la couverture végétale des années 1986, 2000 et 2010 dans le ruissellement, une analyse des périodes respectives 1961-1986, 1987-2000 et 2001-2010 ont été choisies pour calculer le coefficient de ruissellement.

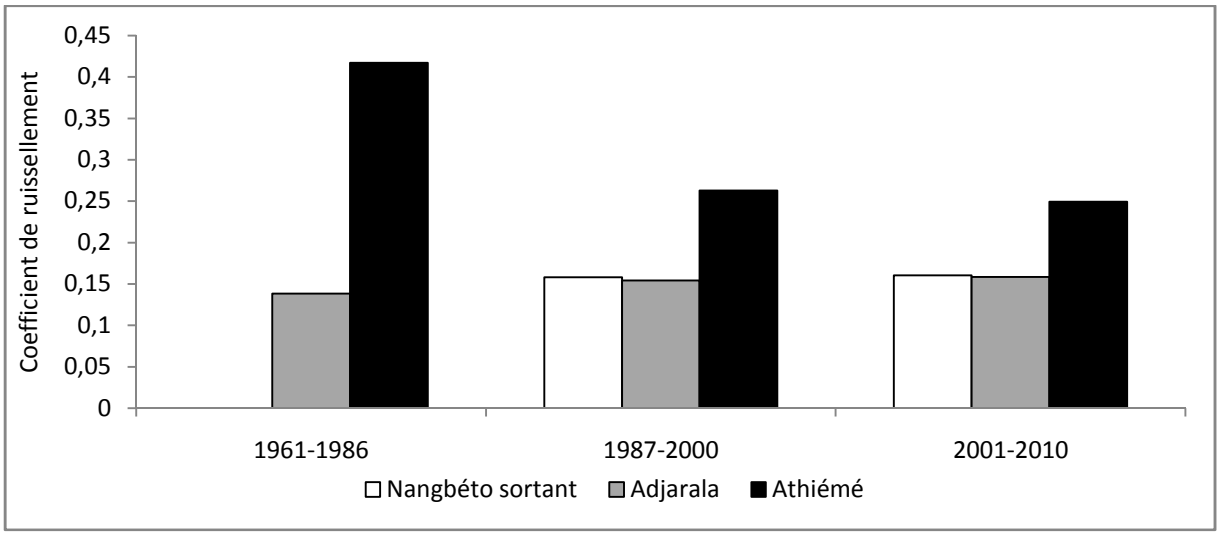


Figure 3.12 : Variation du coefficient de ruissellement dans le bassin-versant du Mono suivant les périodes d'occupation du sol

Il en ressort de cette analyse une augmentation du ruissellement en aval du barrage. Selon Diallo (2010), suite à des précipitations longues, continues et intenses, le sol se sature et de grands volumes d'eau ruissellent. Ceci est observé dans la basse vallée du Mono, à faible pente et à sol constamment gorgé d'eau et qui subit une forte pression anthropique. Mais, depuis la construction du barrage de Nangbéto,

cette quantité importante d'eau ruisselée a été atténuée par son effet régulateur. La pression anthropique dans le bassin couplée aux apports ruisselés du Mono à Nangbéto ont engendré une légère augmentation du coefficient de ruissellement au cours de la période 2001-2010 par rapport à la période 1987-2000 où on assiste à une baisse des précipitations. Au même la dynamique d'occupation des terres accentue les phénomènes de ruissellement et par conséquent aggrave les inondations (Lang, 2008) en ce sens que les déforestations, les remembrements agricoles, etc. entraînent l'imperméabilisation des sols.

Ces apports de débits liquides drainés de l'amont vers l'aval, ajoutés aux lames d'eau précipitées du domaine subéquatorial ne font que monter le niveau d'eau dans la basse vallée mais moins catastrophique que par le passé (Avant barrage). Environ 85 % des enquêtés confirment ce résultat. La perception des riverains de l'utilisation du bassin, de l'eau et leur faible perception du danger, les a amenés à occuper le milieu inondable au mépris des risques.

L'accentuation de l'anthropisation du bassin couplée avec les évènements pluvieux intenses ne font qu'augmenter le volume des lames d'eau ruisselée et des charges solides charriées. De plus, les lâchers d'eau participent à l'érosivité des berges en aval, amplifiant le taux des flux terrigènes. Ces différentes charges solides dans le lit du fleuve Mono provoquent aussi des pertes de matières par érosion, mais participent à une mutation de la dynamique sédimentaire du bassin-versant comme l'avait déjà signalé Amoussou (2010). Ainsi, avec la mise en eau du barrage d'Adjarala, le piéage des sédiments se fera à la fois par les deux barrages, rendra déficitaire les charges solides à la côte. Cependant, les sédiments que pourront charrier les eaux lâchées du barrage d'Adjarala vont augmenter et ne seront plus déposer dans le secteur Athiémé-Agonmèglozou (comme le cas actuel), mais beaucoup plus loin vers Agbanankin. Cela va entrainer un comblement du lit de la basse vallée du cours d'eau et engendrer une réduction de la capacité de rétention et un étalement plus important des eaux pendant les inondations.

3.1.4. Niveau piézométrique comme indicateur de risques dans le bassin à Nangbéto

La variation des niveaux piézométriques des nappes suivis dans le champ du barrage de Nangbéto peut être utilisée comme indicateur du risque hydrologique. L'analyse des figures 3.13 et 3.14 montrent que les niveaux piézométriques dans les environs du barrage de Nangbéto en années d'ouverture de vanne (2010) et non d'ouverture (2000) fluctuent en similitude avec les hauteurs de pluie journalière et les niveaux d'eau dans le réservoir du barrage. Il en est de même pour les débits entrant que sortant du barrage surtout en année de non ouverture des vannes (année 2000 par exemple).

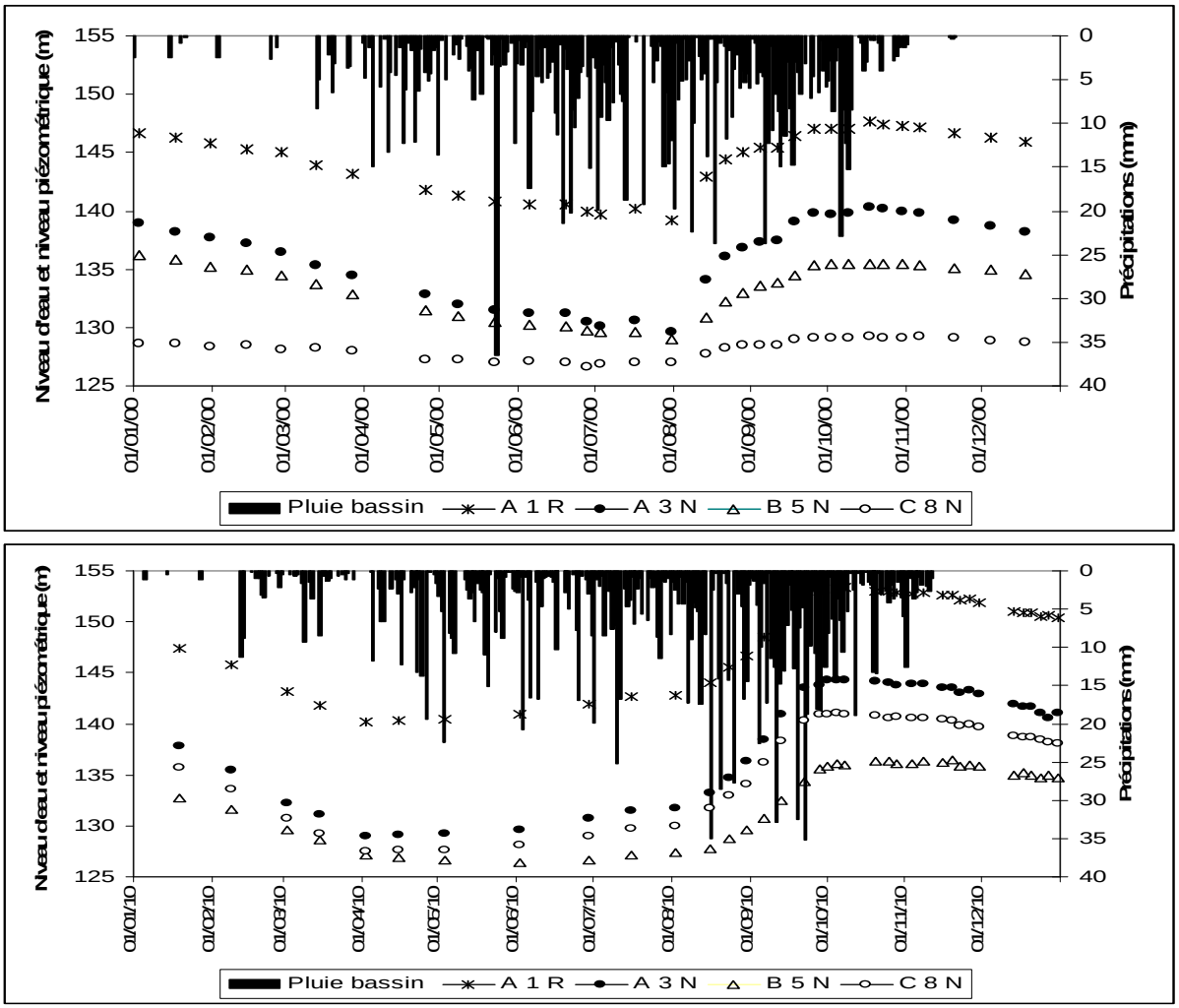


Figure 3.13 : Variation de niveau piézométrique autour du barrage de Nangbéto en fonction de la pluviométrie en 2000 et 2010.

L'analyse en terme de facteur de risque est que, pour un risque limité à modéré, les niveaux piézométriques sont plus faibles que pour un risque significatif à critique.

Dans ce dernier cas, un relèvement brutal du niveau piézométrique peut être le signal d'un apport important d'eau provenant de l'amont du bassin après remplissage du réservoir. Selon Bonelli *et al.* (2005), une piézométrie élevée ou en augmentation dans le corps du barrage est toujours inquiétante. Cet aspect de l'hydrologie souterraine aiderait aussi à situer le risque dans une échelle de niveau limité à critique.

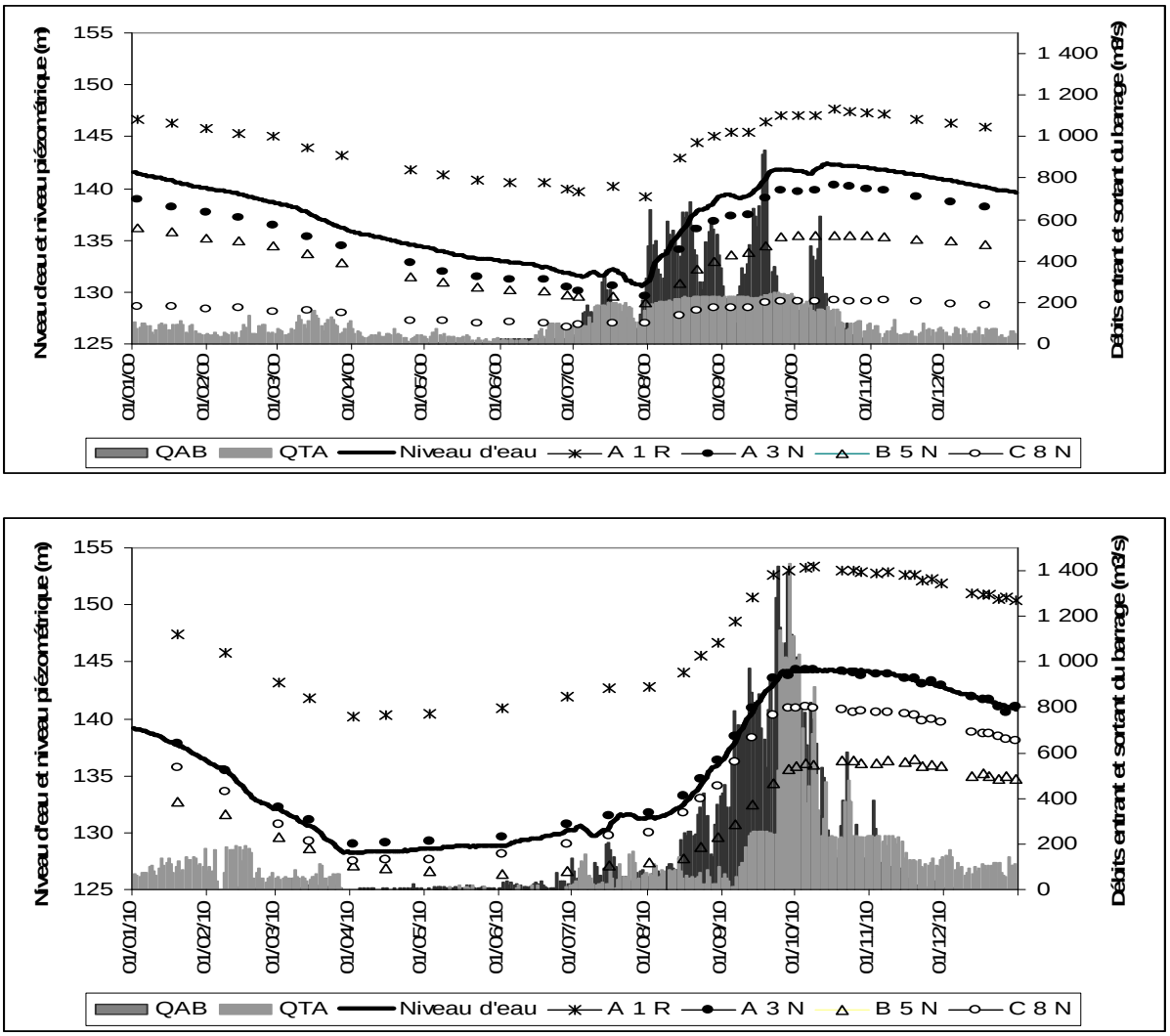


Figure 3.14 : Variation de niveau piézométrique en fonction des débits entrant et sortant et du niveau d'eau de la retenue en 2000 et 2010 dans le bassin du barrage de Nangbéto.

Dans le cas de cette étude sur le barrage de Nangbéto, le piézomètre A3N sert de référentiel à l'analyse des risques d'inondation dans le bassin du Mono dans la mesure où le niveau de la nappe qui est suivi est à la même limite que le niveau d'eau dans le réservoir de Nangbéto. Par exemple, en année pluviométrique déficitaire comme en 2000, pour un relèvement du niveau d'eau de 11,5 m, les

niveaux piézométriques ont augmenté de 10,7 m pour la nappe A3N, de 8,4 m pour la nappe A1R, de 6,6 m pour la nappe B5N et de 2,15 m pour la nappe C8N. Par contre, en 2010, année excédentaire et de grande inondation dans les bassins hydrologiques du Bénin, 13 m de hausse du niveau d'eau dans le réservoir correspond à une charge hydraulique souterraine de 13 m pour la A3N, 11 m pour la A1R et la C8N puis 9 m pour la B5N.

Dans le même contexte, Diop (2002) et Totin (2010) affirment que les anomalies pluviométriques positives coïncident avec le relèvement du toit de la nappe et celles négatives avec l'abaissement des niveaux piézométriques. Boukari (1998), Taylor & Alley (2001), Faye *et al*. (2008), expliquent que l'importance des fluctuations des niveaux d'eau peut considérablement varier d'une saison à une autre et d'année en année en réponse à la modification des conditions climatiques.

De tout ce qui précède, la variation des niveaux piézométriques dans les environs du barrage de Nangbéto est un indicateur de risque hydrologique, notamment d'inondation dans la basse vallée du Mono qui pourrait être amplifiée avec la mise en eau du barrage d'Adjarala (en construction).

En synthèse, la lecture des piézomètres pourrait renseigner sur la montée des eaux dans le bassin et par conséquent sur la survenance des crues, aléa d'inondation.

3.2. Occupation du sol: un des moteurs de la dynamique des lames d'eau ruisselée et infiltrée dans le bassin

L'occupation des terres est décrite à partir de l'observation de terrain et de l'analyse de l'évolution des unités paysagiques des années 1986, 2000 et 2014 dans le bassin-versant. Les états de l'occupation du sol en ces trois années ont permis d'évaluer la variation de la pression humaine sur les écosystèmes du bassin et les conséquences qui en découlent sur les processus hydrolgiques.

Les caractéristiques pédologiques, topo-morphologiques et la dynamique de l'occupation des terres influent sur les processus de ruissellement et d'infiltration dans les bassins-versants (Totin, 2010). A cet effet, la dégradation du couvert végétal associée à la pente et aux précipitations pourraient engendrer un fort

ruissellement, facteur d'inondation dans les secteurs à faible pente comme la basse vallée du Mono.

Dans le cadre de cette étude, les travaux de terrain ont permis de constater que les champs de culture sont développés autour des agglomérations. A cet effet, dans la catégorisation des unités paysagiques, les champs et jachères sont inclus dans les agglomérations, unité les plus vulnérables à l'inondation.

La figure 3.15 présente l'état de l'occupation des terres dans le bassin du Mono. Il en ressort une dégradation des formations naturelles au profit des formations anthropisées (agglomérations, champs et jachères et plantations), corroborant les résultats de Vissin (2007) et Amoussou (2010). Mais, cette dégradation, inégalement répartie dans le temps (figure 3.15) et dans l'espace, est plus accentuée autour du barrage de Nangbéto que dans les autres secteurs. Ceci pourrait se justifier par le rôle régulateur du barrage et l'attraction des populations vers l'écosystème pour le développement des activités socio-économiques.

Dans cette même logique, l'installation du barrage d'Adjarala, pourrait créer un autre pôle de concentration humaine dans le secteur, l'exposant à une forte dégradation du couvert végétal. Ceci s'explique par une régression des formations naturelles et une progression des formations anthropiques (figures 3.16 et 3.17).

En conséquence à tout cela et à la dégradation du couvert végétal en amont des barrages comme l'illustre la figure 3.15, le ruissellement va s'intensifier avec un apport important de débit liquide et solide de l'amont vers l'aval amplifiant ainsi les inondations dans la basse vallée. Cela met le rôle indirect conjugué des barrages et de l'occupation du sol dans la gravité des risques d'inondation dans le bassin du fleuve Mono.

Il a été observé aussi une occupation systématique des lits mineurs du fleuve Mono après l'installation du barrage de Nangbéto. Le non respect des espaces *none aedificandi*, la promiscuité du lit du fleuve…, sont autant des traits signalétiques d'une forte pression spatiale. Cette pression pourrait s'amplifier avec l'installation du barrage d'Adjarala.

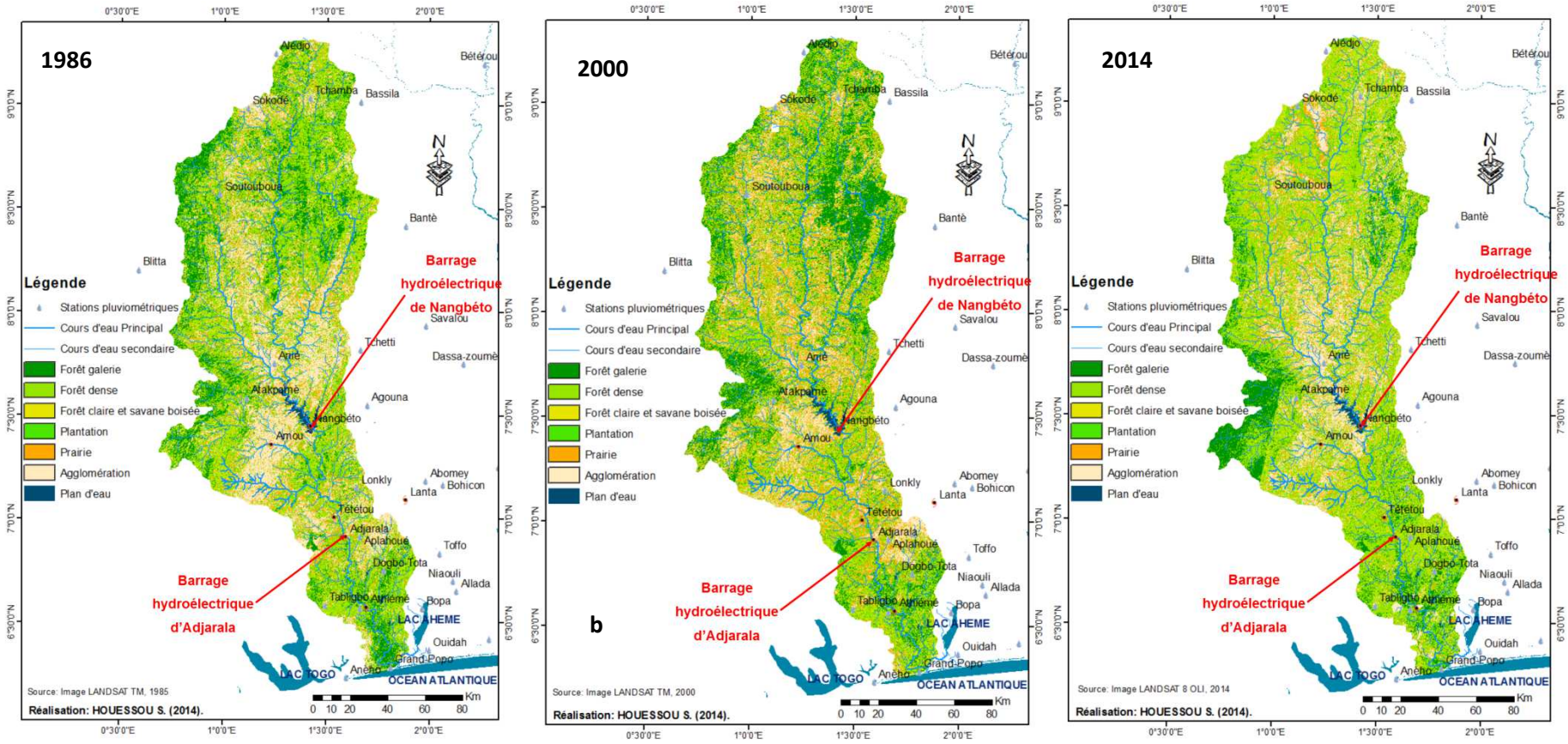


Figure 3.15 : Etat de l'occupation des terres dans le bassin-versant du fleuve Mono des années 1986, 2000 et 2014

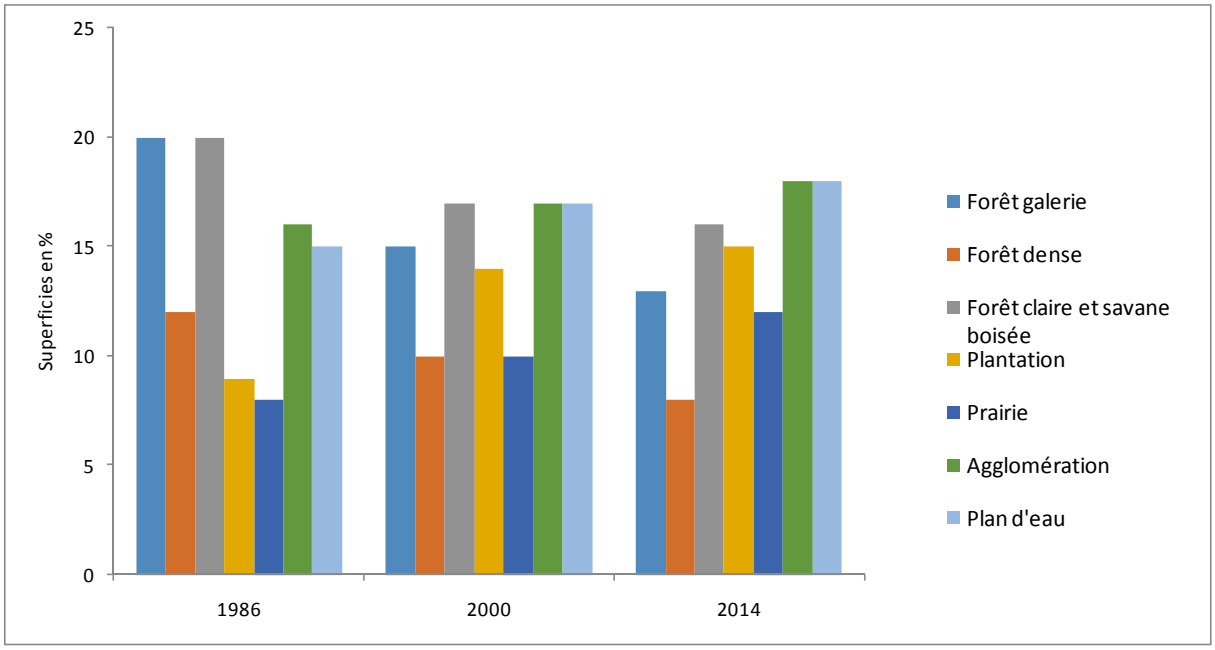


Figure 3.16 : Evolution des unités paysagiques des années 1986, 2000 et 2014 dans le bassin-versant du Mono

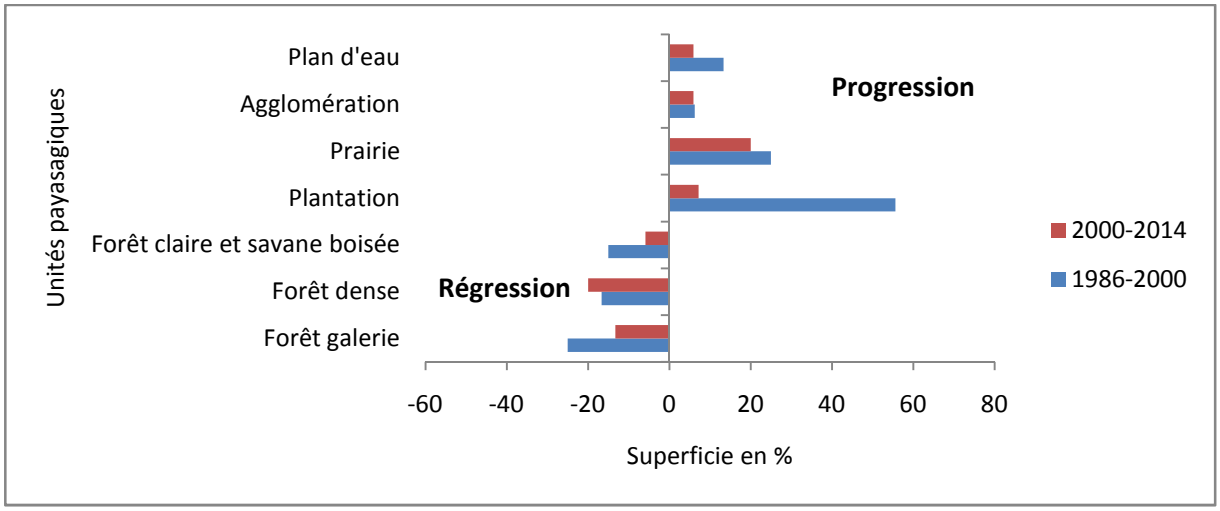


Figure 3.17 : Dynamique des unités d'occupation du sol dans le bassin du Mono

La réduction considérable des surfaces perméables (forêt galerie, forêt dense, forêt claire et savane) comme l'illustre la figure 3.17 du fait des habitations définitives et de l'encombrement des cours d'eau en l'absence d'un système d'assainissement contribuent énormément à la permanence du risque d'inondation (Meva'a Abomo *et al.*, 2010). En définitive, les formes d'occupation de l'espace croisées aux modes d'habitations (comportement et pratiques spatiales), expliquent la vulnérabilité des aménagements humains au risque d'inondation dans le bassin.

Conclusion partielle

Les caractéristiques hydroclimatiques et la dynamique d'occupation du sol sont les deux facteurs importants dans la survenance des risques d'inondation. L'évaluation a permis de comprendre que l'inégale répartition des précipitations dans le bassin entre 1961-2010 est plus marquée au centre ouest, attribuée aux effets orographiques.

L'écoulement du bassin est de type tropical, caractéristique de la dynamique des précipitations de l'amont. Les fortes relations pluie-débit dans les différentes stations hydrométriques du bassin témoignent de la dynamique des précipitations. Cependant, quelques dysfonctionnements sont observés en ce sens qu'on enregistre de forts débits en période d'étiage. Cela qui s'explique par les lâchers d'eau qui rythment le fonctionnement hydrologique des eaux de surface en aval.

La récurrence des inondations dans le bassin est expliquée aussi par le fort ruissellement des eaux surface de l'amont vers l'aval et de la dégradation des formations naturelles au profit des formations anthropiques. L'apport des eaux souterraines n'est pas aussi négligeable dans l'identification et la gestion des risques d'inondation.

CHAPITRE 4

NIVEAU DU RISQUE D'INONDATION ET VULNERABILITE DES SYSTEMES DE LA BASSE VALLEE DU MONO

Introduction

L'évaluation des risques d'inondation dans le bassin-versant du fleuve Mono a été faite à partir de l'identification et de l'analyse des données quantitatives et qualitatives permettant de catégoriser le degré de risques et les conséquences qui en découlent. Ce chapitre est aussi consacré à l'analyse de la vulnérabilité liée à l'aléa et de la vulnérabilité liée à la gestion de crises en aval des barrages hydroélectriques. Il permet aussi d'identifier les indicateurs de vulnérabilité à l'inondation.

4.1. Aléas d'inondation et niveau de risque

Les aléas d'inondation caractérisés dans le bassin sont pluviométriques, hydrométriques et de hauteur d'eau dans la retenue du barrage de Nangbéto.

4.1.1. Seuils pluviométriques et niveau de risque d'inondation

Les études sur la variabilité climatique au Bénin et dans le bassin-versant du fleuve Mono ont révélé une légère reprise des précipitations (Amoussou *et al.*, 2012 ; Houessou *et al.*, 2015). Les épisodes pluvieux extrêmes sont-ils de nos jours les facteurs favorisant l'inondation dans le bassin du Mono ? ou les inondations sont-elles dues à une mauvaise occupation du sol ?

La catégorisation des seuils pluviométriques de risque d'inondation est déterminée à partir des indices de précipitation standardisés de 0 à +2, correspondant aux classes des aléas limités (normale) à critiques (extrêmement humide) d'inondation. Les précipitations journalières évènementielles correspondantes varient globalement de 2,6 à 16,1 mm pour les risques limités, de 11,6 à 21,9 mm pour les risques modérés, de 16,3 à 27,7 mm pour les risques significatifs et de 20,8 à 240,6 mm pour les risques critiques dans le bassin. Le chevauchement des seuils de risques

d'inondation dans le bassin est lié non seulement à la fréquence des précipitations, mais surtout à leur inégalement répartition.

Les différents seuils de risque d'inondation ont été déterminés à partir de l'application de la classification de Macke *et al.* (1993) transposée au pas de temps journalier.

Le tableau 4.1 et figure 4.I présentent les seuils pluviométriques à l'échelle stationnelle et spatiale selon les différentes catégories de risques d'inondation que sont : les risques acceptables (limité et modéré) et les risques inacceptables (significatif et critique).

Il ressort de l'analyse de ce tableau, qu'à l'échelle stationnelle, de l'amont vers l'aval, les seuils pluviométriques varient de 21 à 240 mm (critique) et de 16 à 24 mm (significatif) contre respectivement 16,5 à 63 mm et 13,3 à 16,5 mm pour l'ensemble du bassin. Ces deux seuils sont les plus représentatifs des aléas d'inondation dans le bassin-versant du fleuve Mono.

Tableau 4.I : Seuils pluviométriques journaliers des risques d'inondation dans la période 1961-2010 dans le bassin du Mono

Stations	**Seuils pluviométriques (mm) des risques d'inondation**			
	Critique	**Significatif**	**Modéré**	**Limité**
Bassin-versant du fleuve Mono				
Champ de pluie	16,5 - 63	13,3 - 16,5	10,02 - 13,3	3,5 - 10
En amont du barrage de Nangbéto				
Anié	22,5 - 149,5	17,6 - 22,4	12,8 - 17,5	3,2 - 12,7
Atakpamè	24,6 - 156,6	19,4 - 24,5	14,2 - 19,3	3,8 - 14,1
Agouna	24,1 - 148,5	18,9 - 24	13,7 - 17,2	3,3 - 13,6
Kara ville	22,6 - 163,9	17,9 - 22,5	13,1 - 17,8	3,6 - 13
Niamtougou	23,4 - 112,8	18,5 - 23,3	13,6 - 18,4	3,9 - 13,5
Pagouda	23,4 - 122,4	18,5 - 23,3	13,5 - 18,4	3,6 - 13,4
Sokodé	22,8 - 117,4	18,1 - 22,7	13,3 - 18	3,7 - 13,2
Sotouboua	25 - 145,2	19,7 - 24,9	14,4 - 19,6	3,8 - 14,3
Tchamba	22,7 - 160,5	17,8 - 22,6	13 - 17,7	3,2 - 12,9
Bassila	22,2 - 129,1	17,5 - 22,1	12,8 - 17,5	3,3 - 12,7
Savalou	22,8 - 177,1	17,9 - 22,7	13 - 17,8	3,2 - 12,9
Tchetti	23,6 - 188	18,5 - 23,5	13,4 - 18,4	3,2 - 13,3
Entre le barrage de Nangbéto et le barrage d'Adjarala (en construction)				
Notsé	23 - 152	18,1 - 22,8	13,1 - 18	3,2 - 13
Kouma-Konda	27,8 - 167,3	22 - 27,7	16,2 - 21,9	4,6 - 16,1
Aplahoué	22,1 - 129,8	17,4 - 22	12,6 - 17,2	3,1 - 12,5
Bohicon	22,5 - 128,5	17,6 - 22,4	12,8 - 17,5	3,1 - 12,7
Lonkly	23 - 145,8	18 - 22,9	13,1 - 17,9	3,2 - 13
Abomey	22 - 150	17,3 - 21,9	12,5 - 17,2	3 - 12,4
Zagnanado	22,2 - 131	17,4 - 22,1	12,6 - 17,3	3 - 12,5
En aval du barrage d'Adjarala (en construction)				
Allada	21,35 - 167,9	16,8 - 21,3	12,1 - 16,6	2,9 - 12
Athiémé	21,7 - 123,7	16,9 - 21,5	12,3 - 16,6	2,9 - 12,2
Tabligbo	21,2 - 117,4	16,6 - 21,1	12 - 16,5	2,9 - 11,9
Bopa	21,4 - 192	16,7 - 21,3	12 - 16,6	2,6 - 11,9
Dogbo-tota	20,8 - 140,2	16,3 - 20,7	11,8 - 16,2	2,9 - 11,7
Grand-Popo	23,5 - 210,5	18,3 - 23,4	13,1 - 18,2	2,7 - 13
Niaouli	23,4 - 240,6	18,4 - 23,3	13,3 - 18,3	3,2 - 13,2
Ouidah	26,1 - 211,6	20,4 - 26	14,7 - 20,3	3,3 - 14,6
Toffo	22,2 - 219,5	17,4 - 22,1	12,6 - 17,3	3,1 - 12,5
Aneho	22,8 - 175,2	17,7 - 22,6	12,7 - 17,6	2,6 - 12,6

Source : *Résultats de traitement des données pluviométriques de l'ASECNA-Cotonou (Bénin) et DMN-Lomé (Togo), 2013*

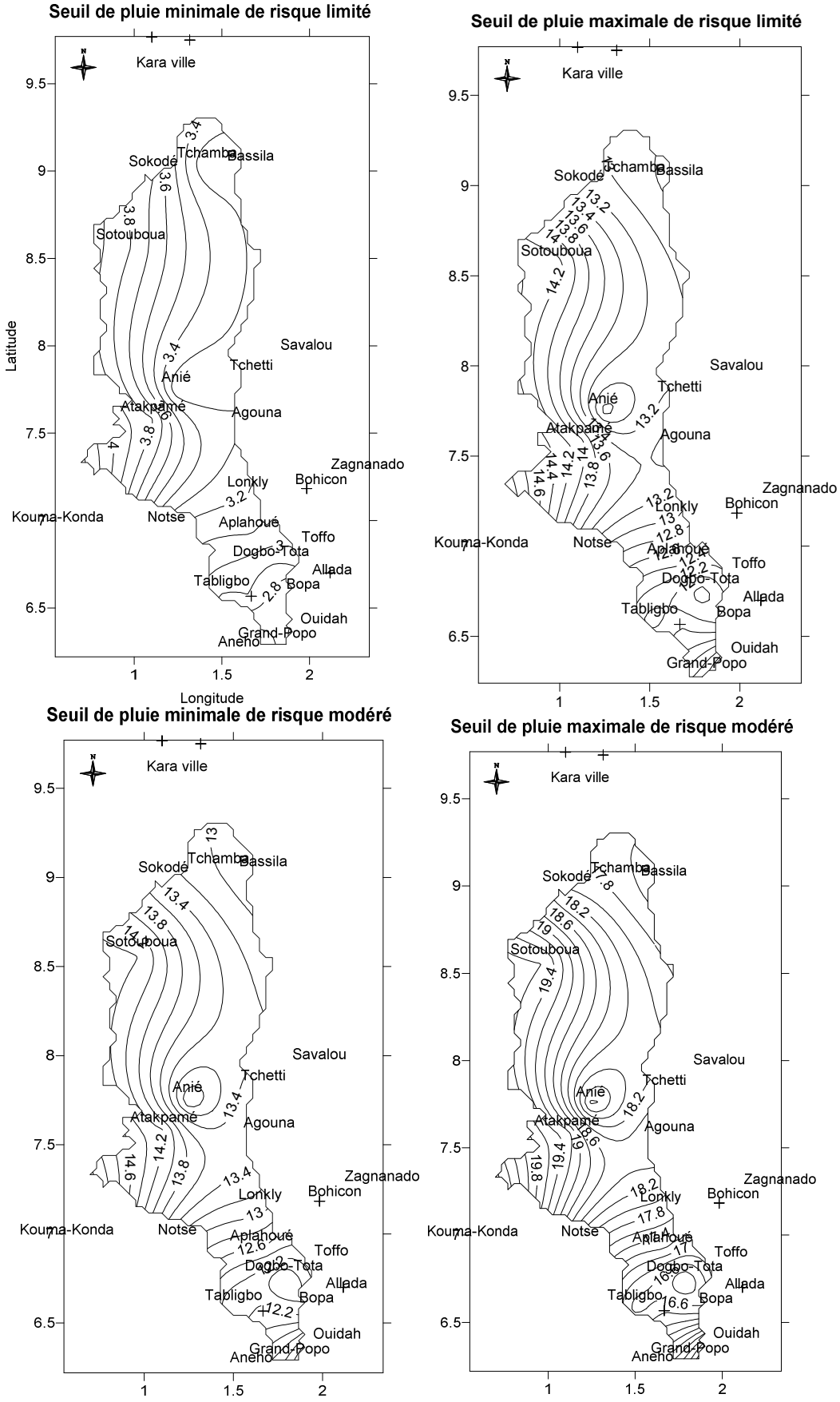


Figure 4.1a : Répartition spatiales des seuils pluviométriques de risques acceptables (limités et modérés) dans le bassin du Mono

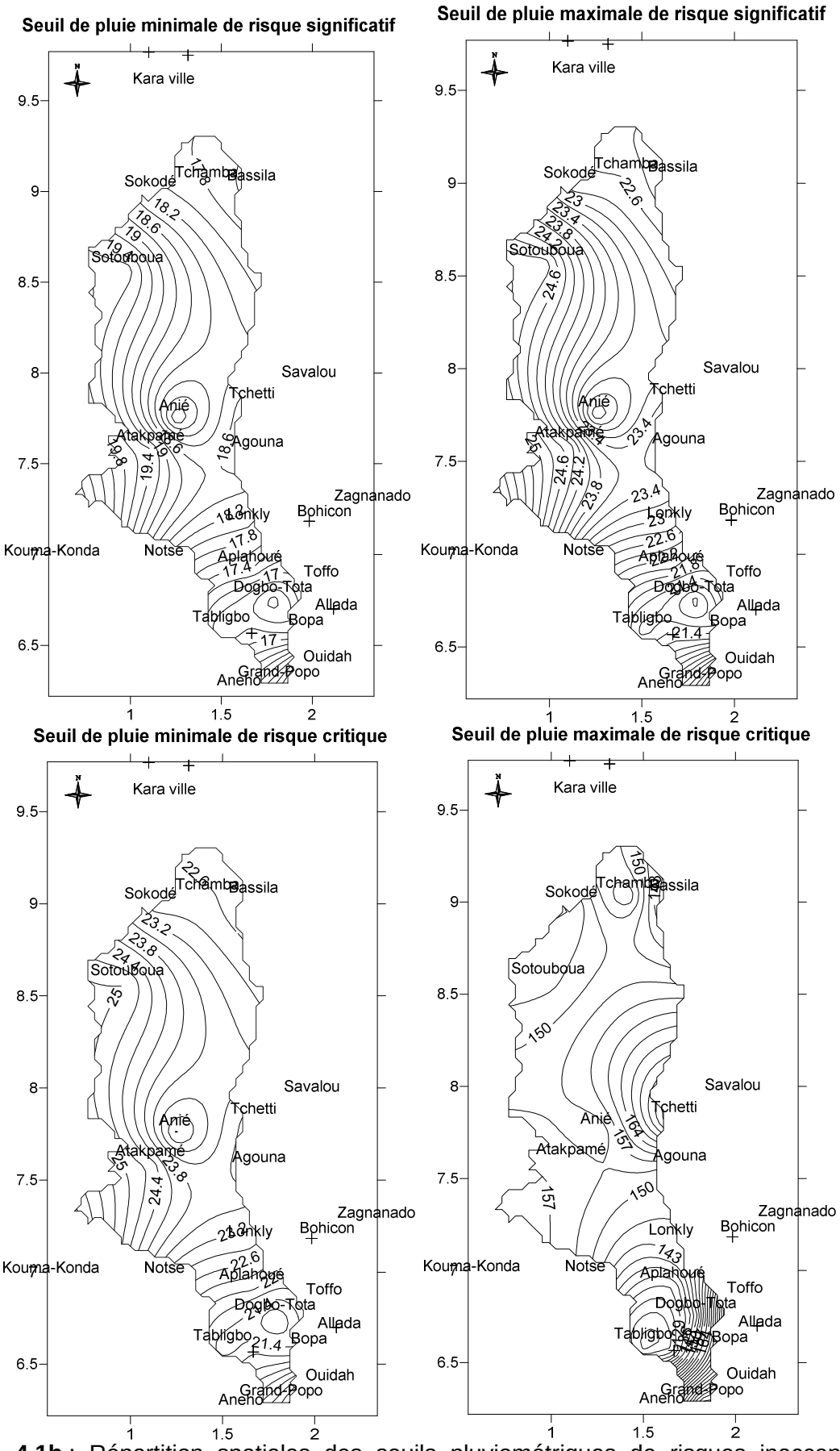


Figure 4.1b : Répartition spatiales des seuils pluviométriques de risques inacceptables (significatifs et critiques) dans le bassin du Mono

Par contre les seuils de risques acceptables varient de 12 à 21 mm (modéré) et de 3 à 16,1 mm (limité) contre respectivement 10,02 à 13,3 et 3,5 à 10 mm.

A l'échelle stationnelle, les seuils pluviométriques des risques inacceptables sont plus marqués (22 à 188 mm : critique ; 17 à 24 mm : significatif) en amont du barrage de Nangbéto, sous climat soudanien, qu'entre les deux barrages (22 à 167,3 mm : critique ; 17 à 23 mm : significatif) dominé par un climat de transition. C'est ce qui explique l'abondance d'eau dans ce secteur et son transfert rapide vers la basse vallée.

Par ailleurs, les figures 4.2 et 4.3 illustrent la variation temporelle et stationnelle des aléas pluviométriques des risques d'inondation dans les domaines de climat soudanien et de transition.

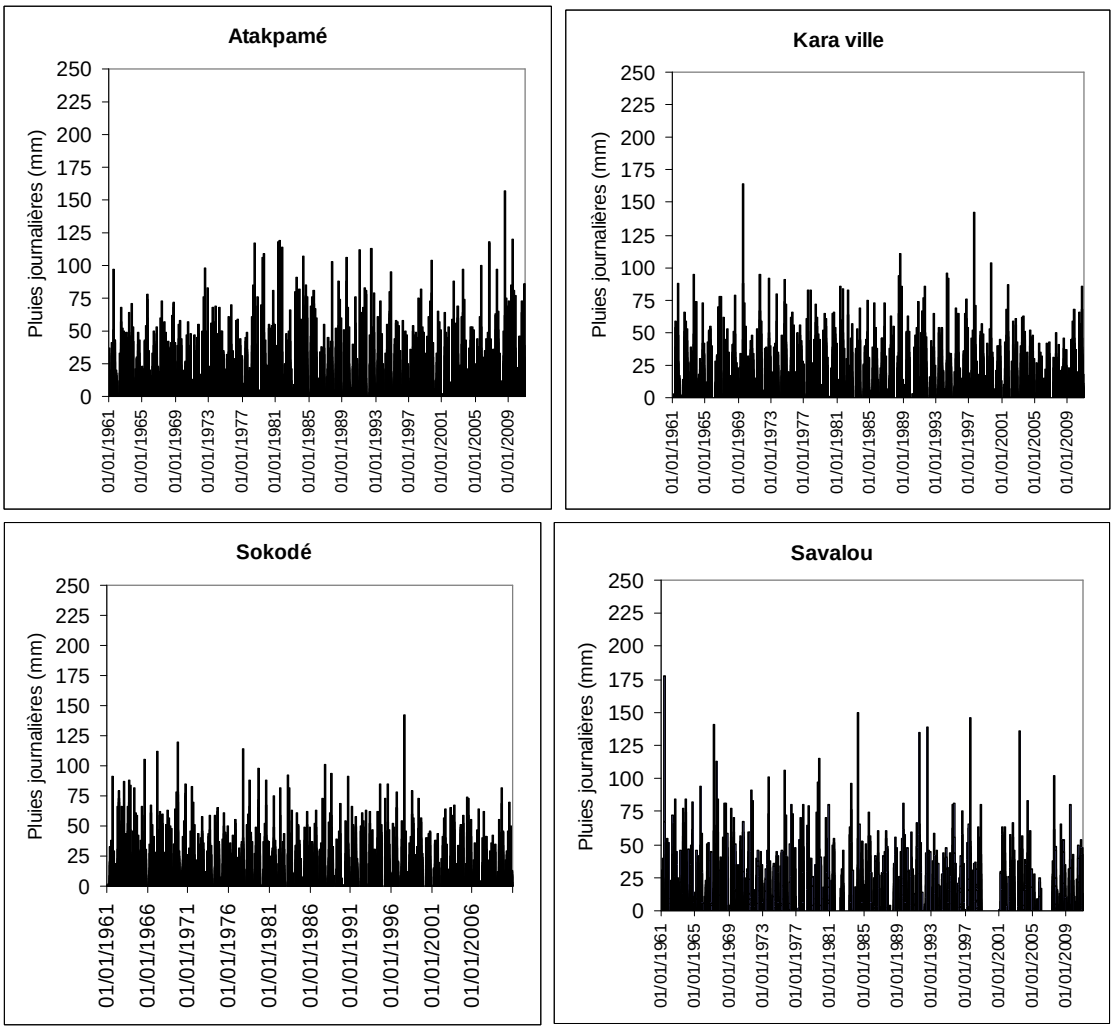


Figure 4.2 : Variation des évènements pluvieux journaliers caractéristiques des risques d'inondation dans le secteur amont du barrage de Nangbéto de 1961 à 2010

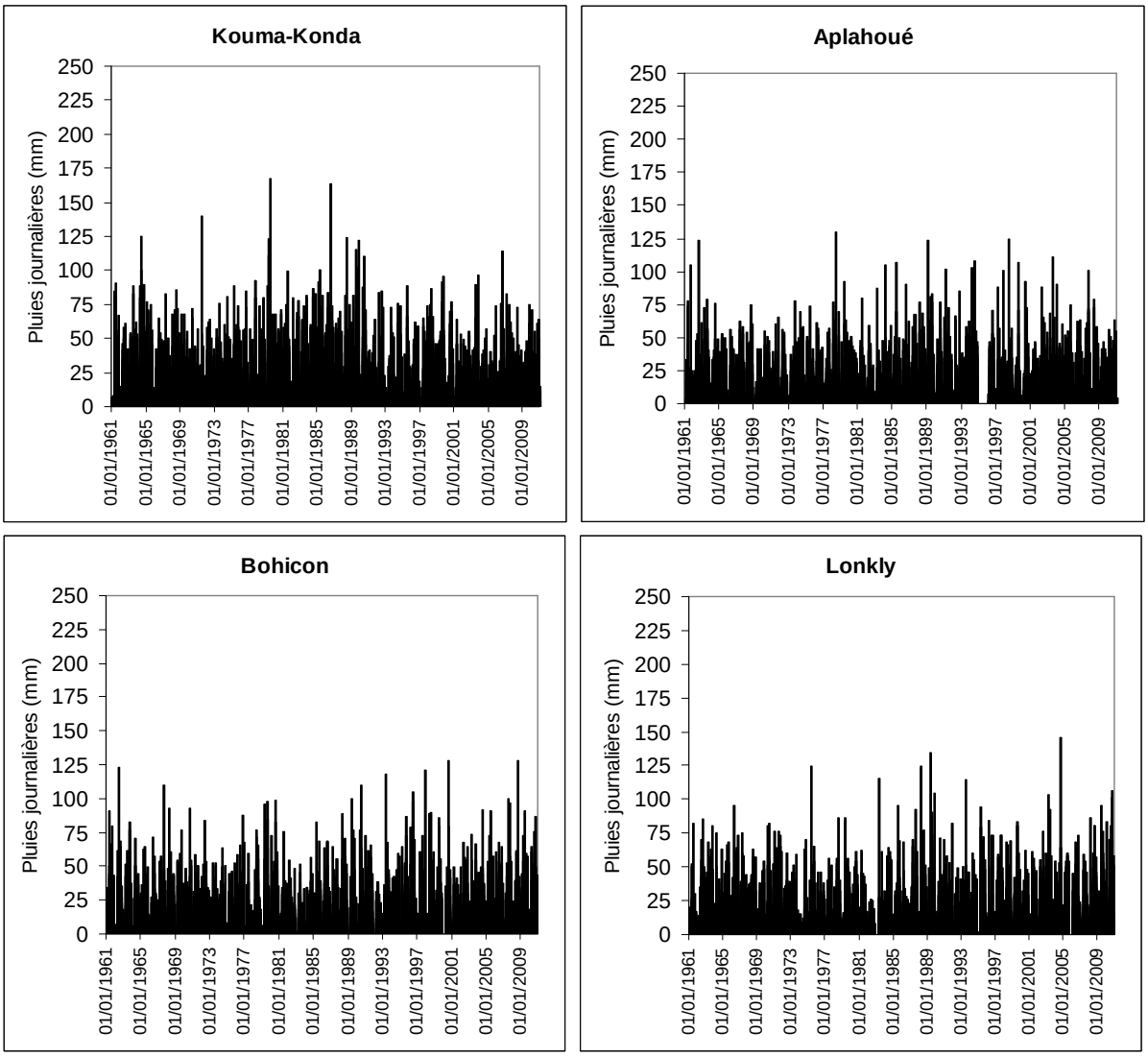


Figure 4.3 : Variation des évènements pluvieux journaliers caractéristiques des risques d'inondation dans le secteur entre deux barrages de 1961 à 2010

Les figures 4.2 et 4.3 confirment l'importance des évènements pluvieux journaliers dans le bassin. Ils sont facteurs de risques des inondations. La récurrence d'évènements pluvieux justifie également les ouvertures récurrentes des vannes (70 %) du barrage de Nangbéto au cœur de la saison des pluies.

En aval du site du barrage d'Adjarala (en construction), dans le domaine du climat subéquatorial (figure 4.4), les risques d'inondation peuvent être qualifiés d'inacceptables (21 à 240,6 mm : critique ; 16 à 23 mm : significatif) et très sévères comparativement aux deux secteurs précédents. En outre, les risques d'inondation acceptables (12 à 20 mm : modéré ; 3 à 15 mm : limité) sont moins marqués que

ceux entre les deux barrages. Néanmoins, ceci montre, combien ce secteur d'accumulation d'eau (figure 4.5), est inondé sous l'effet cumulé des évènements pluviométriques des différents domaines climatiques. La figure 4.5 indique également que les évènements pluvieux journaliers en aval du bassin seraient plus accentués du fait de la faible pente et de l'intensité de l'accumulation des eaux drainées.

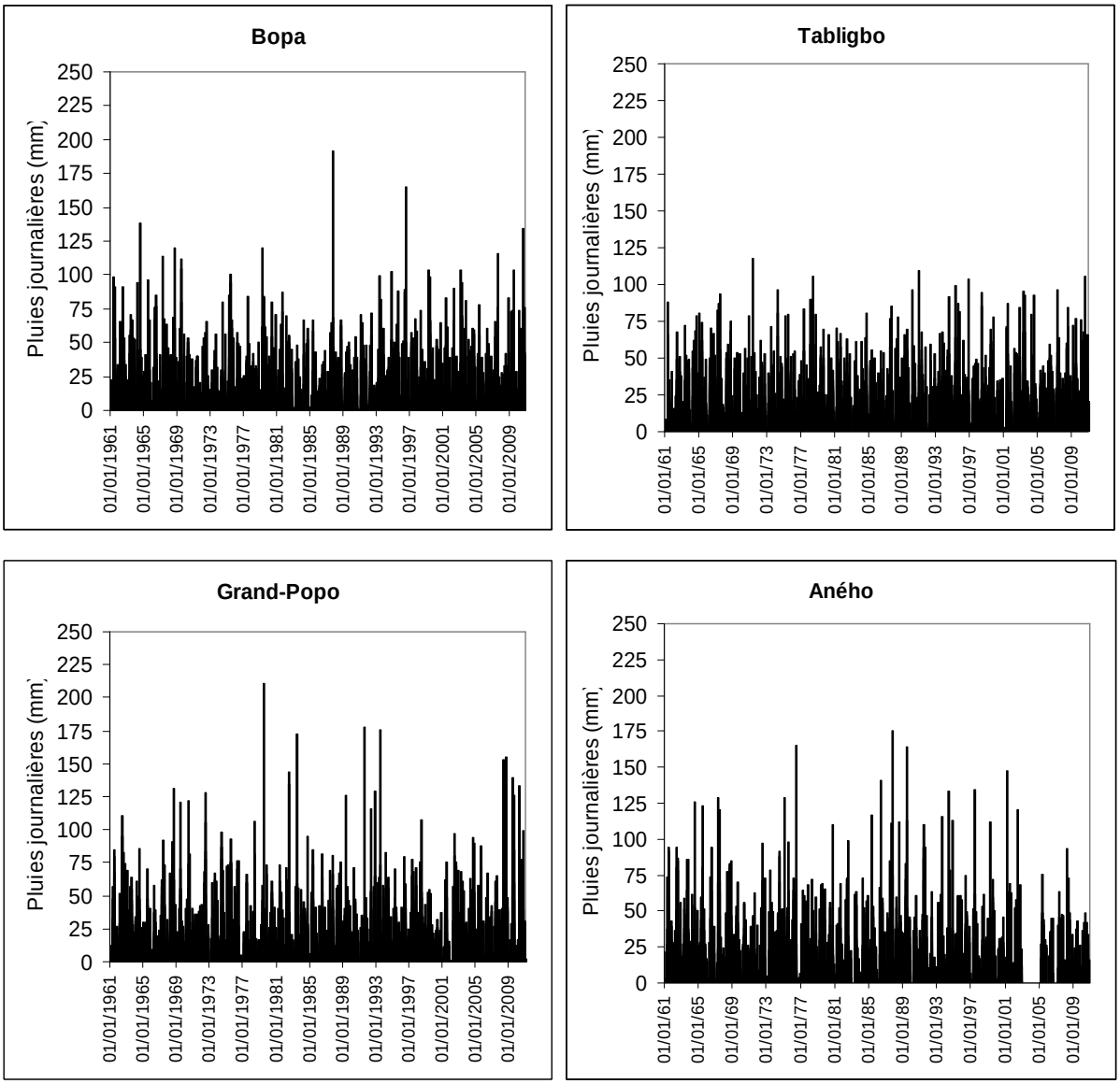


Figure 4.4 : Variation des évènements pluvieux journaliers caractéristiques des risques d'inondation dans le secteur aval du barrage d'Adjarala (en construction) de 1961 à 2010

De tout ce qui précède, il ressort qu'un seul évènement dans une seule station ne saurait produire des inondations, mais, plutôt un cumul temporel et spatial découlant d'une suite d'évènements pluviométriques et de la capacité d'accumulation d'eau

dans chaque secteur du bassin. Il est à noter également que les forts seuils pluviométriques sont enregistrés dans le secteur centre-nord ouest. Ceci pourrait se justifier par l'abondance des précipitations liées à l'effet orographique du secteur.

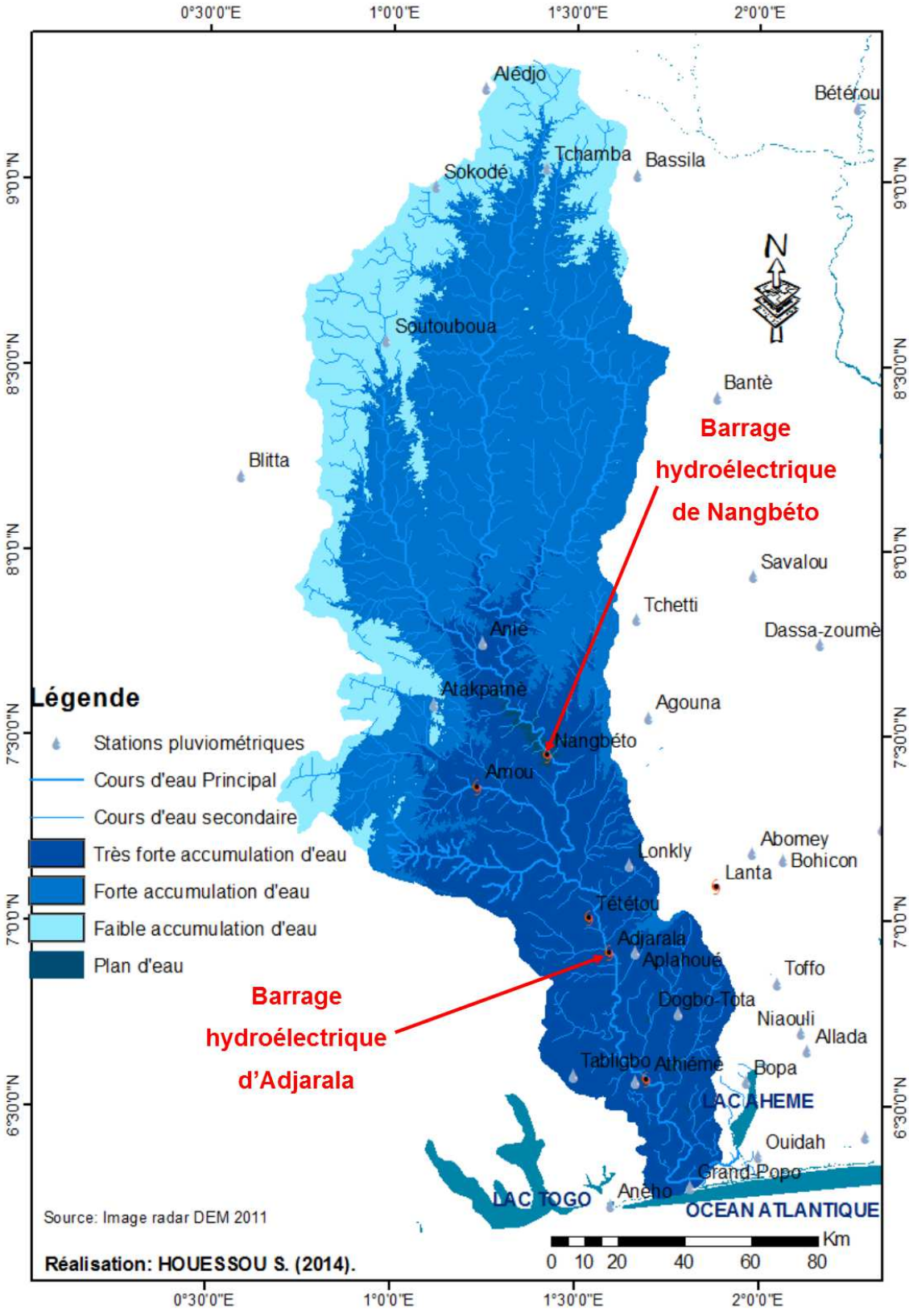


Figure 4.5 : Potentialité d'accumulation d'eau dans le bassin du fleuve Mono

La comparaison de ces différents seuils aux précipitations ayant conduit aux inondations révèle qu'excepté les inondations de 1968, 1979 et 2010 qualifiées d'événements très exceptionnels et exceptionnels, celles des autres années étaient causées soit par des pluies très anormales (1962, 1995), anormales (1999), voire normales (2007) comme l'avaient signalé Amoussou *et al.* (2013). De même dans le bassin-versant de l'Ouémé à Bonou, les risques probables d'inondation sont causés par évènements ''anormaux'' extrêmes (cumuls des pluies des mois humides sont exceptionnels : 1116 mm en trois mois) (Totin *et al.*, 2016). Selon Crétat et al. (2013), la forte intensité de ces évènements très exceptionnels est la cause des récurrentes inondations observées en Afrique de l'Ouest.

4.1.2. Périodes de retour des aléas pluviométriques extrêmes des risques d'inondation

La figure 4.6 et le tableau 4.II présentent les périodes de retour des évènements pluvieux journaliers extrêmes caractéristiques des risques d'inondation dans le bassin et dans les domaines climatiques soudanien (en amont du barrage de Nangbéto), subéquatorial (en aval du site barrage d'Adjarala en construction) et de transition (entre les deux barrages) comme l'a déjà démontré Amoussou (2010).

Les séries des maximums annuels journaliers des précipitations dans le bassin ont été ajustés par la loi de Gumbel. Il en ressort que les maximums annuels journaliers de pluie varient de 66 à 84 mm pour les périodes de retour de 2 ans, de 86 à 132 mm pour 5ans et de 91 à 152 mm pour 10 ans. Ces évènements pluvieux journaliers peuvent être qualifiés d'anormaux. Par contre, les évènements pluvieux journaliers variant entre 100 à 171 mm pour 20 ans, 103 à 177 mm pour 25 ans et de 112 à 194 mm pour 50 ans sont qualifiés d'exceptionnels et très exceptionnels. Ils sont plus accentués autour des deux barrages. Il est à noter également une incertitude sur les périodes de retour des évènements pluvieux journaliers extrêmes. Les évènements très exceptionnels (ou très rares) et exceptionnels (rares) sont incertains et ont une période de retour allant de 20 à 50 ans et plus accentués en aval du barrage d'Adjarala que dans les autres secteurs du bassin. Ces maximums pluvieux journaliers, au cœur de la saison des pluies, ne font que gonfler les eaux et par conséquent les risques d'inondation dans le bassin.

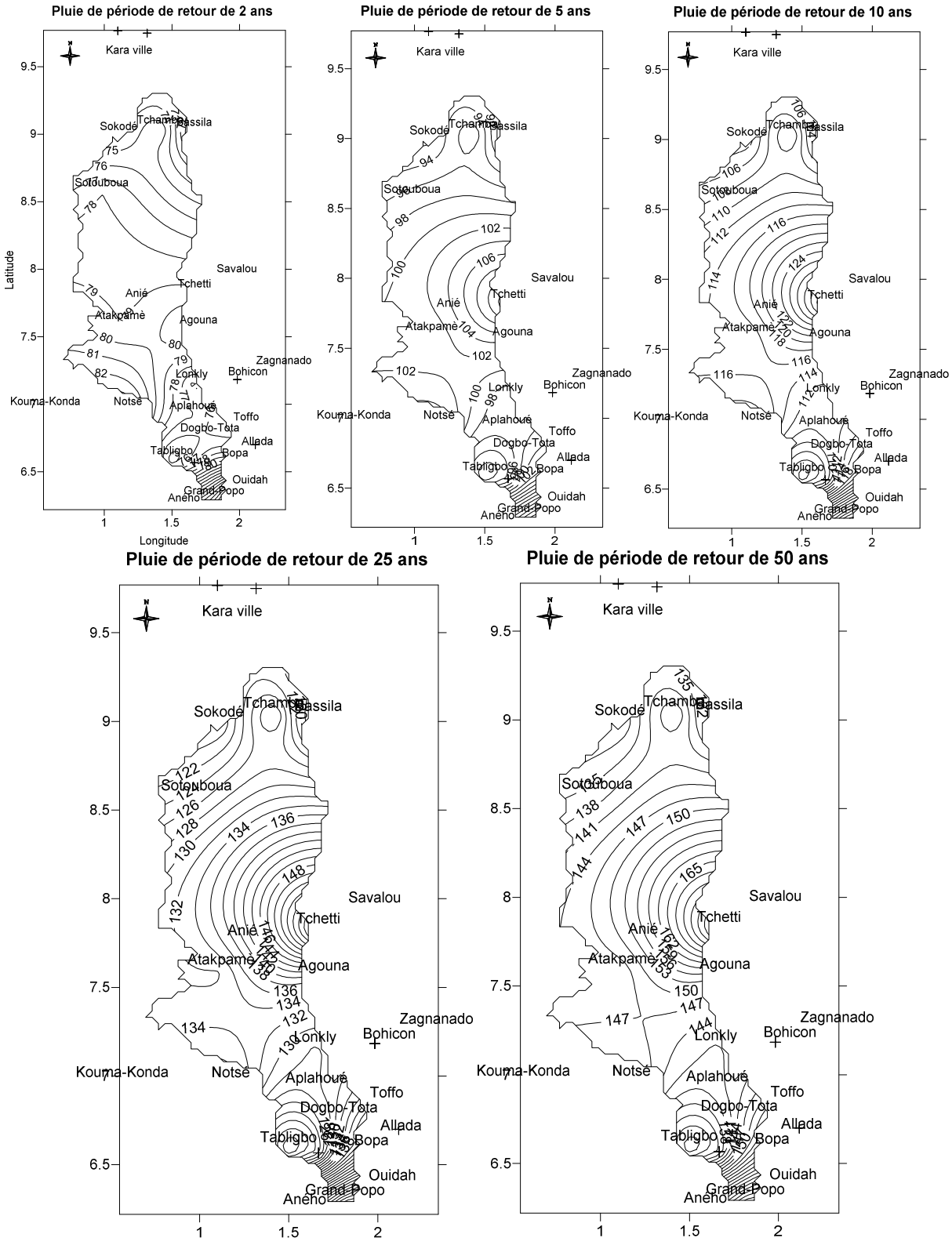


Figure 4.6 : Répartition des précipitations journalières maximales en fonction des périodes de retour de 2 ans à 50 ans

Tableau 4.II : Périodes de retour des aléas pluviométrique journalier extrêmes des risques d'inondation dans le bassin du Mono

Stations	**Périodes de retour (ans) des précipitations (mm) prédites**					
	2 ans	**5 ans**	**10 ans**	**20 ans**	**25 ans**	**50 ans**
Bassin-versant du fleuve Mono						
Champ de pluie	81,2	87,2	91,0	95,0	96,0	100,1
En amont du barrage de Nangbéto						
Anié	79,0	103,4	119,5	135,0	139,8	155,0
Atakpamè	79,0	100	114,0	127,6	131,8	144,9
Agouna	82,0	103,5	118,0	132,2	136,0	150,0
Kara ville	70,6	90,9	104,0	117,2	121,3	134,0
Niamtougou	65,6	80,6	90,5	100,0	103,0	112,4
Pagouda	76,8	92,8	103,1	113,5	116,7	126,7
Sokodé	74,0	91,6	103,0	114,5	118,0	129,0
Sotouboua	78,0	97,1	109,0	121,4	125,1	136,8
Tchamba	76,0	98,0	112,7	126,7	131,0	144,7
Bassila	69,0	86,0	97,6	108,6	112,0	123,1
Savalou	78,6	107,0	125,8	144,1	149,5	167,1
Tchetti	79,3	114,1	137,0	159,0	166,0	187,6
Entre le barrage de Nangbéto et le barrage d'Adjarala (en construction)						
Notsé	84,4	106,0	120,3	134,0	138,0	152,0
Kouma-Konda	83,0	104,3	118,6	132,3	136,6	149,9
Aplahoué	77,1	97,0	111,0	124,0	127,7	140,1
Bohicon	78,4	97,8	110,7	123,0	127,0	139,0
Lonkly	75,8	96,6	110,1	123,5	127,7	140,6
Abomey	77,6	99,1	113,0	127,0	131,0	144,4
Zagnanado	74,7	94,6	104,6	116,0	120,1	131,0
En aval du barrage d'Adjarala (en construction)						
Allada	66,2	90,0	106,2	121,0	126,0	141,0
Athiémé	77,0	94,4	106,0	117,2	121,0	132,0
Tabligbo	74,3	90,1	100,5	110,5	113,7	123,4
Bopa	80,4	107,4	125,3	142,4	147,8	164,6
Dogbo-tota	76,1	98,4	113,2	127,1	131,5	145,3
Grand-Popo	91,2	124,2	146,1	167,0	173,7	194,2
Niaouli	81,6	113,7	135,0	155,1	162,1	181,7
Ouidah	102,0	132,1	152,0	171,0	177,0	196,0
Toffo	73,7	99,8	117,2	133,8	139,0	155,3
Anèho	88,6	119,0	139,0	158,0	164,2	182,0

Source : *Résultats de traitement des données pluviométriques de l'ASECNA-Cotonou (Bénin) et DMN-Lomé (Togo), 2013*

4.1.3. Seuils hydrologiques et niveau de risque d'inondation

Les seuils hydrométriques de risque d'inondation sont évalués à partir des indices de débits standardisés (SFI) variant de 0 à +2 et correspondent aux mêmes classes d'aléas que les seuils pluviométriques.

Le tableau 4.III présente les seuils de débits de risques dans le bassin. Il en ressort que les débits journaliers évènementiels correspondants varient de 99 à 479 m^3/s pour les risques limités, de 162 à 585 m^3/s pour les risques modérés, de 217 à 690 m^3/s pour les risques significatifs et de 272 à 1440 m^3/s pour les risques critiques dans le bassin. Mais, quant au niveau d'eau à Nangbéto, le SHI varie de 0 à 1,99 et ceci du fait de l'absence de risque critique lié à l'ouverture des vannes lorsque la hauteur d'eau avoisine les 144,5 m. Le niveau d'eau à l'entrée du barrage varie très peu : de 137,4 à 141,9 m pour les risques limités, de 141 à 144,2 m pour les risques modérés et de 144,2 à 144,5 m pour les risques significatifs.

Tableau 4.III : Seuils hydrométriques journaliers des risques d'inondation dans le bassin du Mono

Stations	**Seuils hydrométriques (m^3/s) des risques d'inondation**			
	Critique	**Significatif**	**Modéré**	**Limité**
Corrokopé	272 - 844	217 - 271	162 - 216	50,9 - 161
Nangbéto entrant	525 - 1 440	420 - 522	316 - 419	107 - 315
Nangbéto sortant	354 - 1429	290 - 351	226 - 287	99 - 225
Adjarala*	458,4 – 1223,5	376,7 – 454,0	291,4 – 366,5	122,6 – 282,7
Athiémé	692 - 951	585 - 690	480 - 585	268 - 479
	Seuils du niveau d'eau (m) des risques d'inondation			
Niveau d'eau de la retenue à Nangbéto	-	144,2 - 144,5	141,9 - 144,2	137,4 - 141,9

Source : *Résultats de traitement des données hydrométriques de la DG-Eau Bénin et CEB, 2012*

* A la station d'Adjarala, ce sont les données de débits mensuels qui ont été utilisées.

A l'échelle stationnelle, les seuils hydrométriques journaliers des risques d'inondation croissent de l'amont (Corrékopé) vers l'aval (Nangbéto entrant). Pour les risques acceptables, les seuils varient de 50,9 à 161 m^3/s (risque limité), de 162 à 216 m^3/s (risque modéré) pour la station hydrométrique de Corrékopé d'une part ; de 107 à 315 m^3/s (risque limité) et de 316 à 419 m^3/s (risque modéré) à l'entrée du barrage de Nangbéto d'autre part. Quant aux risques inacceptables, les seuils

hydrométriques sont plus prononcés et varient de 217 à 271 m^3/s (risque significatif) et de 272 à 844 m^3/s (risque critique) pour la station de Corrékopé ; de 420 à 522 m^3/s (risque significatif) et de 525 à 1440 m^3/s (risque critique) à l'entrée de Nangbéto.

De la sortie du barrage à la station d'Athiémé, les seuils hydrométriques inacceptables décroissent avec les maximums journaliers qui varient de 951 à 1429 m^3/s pour les risques critiques et de 351 à 690 m^3/s pour les risques significatifs. Ces évènements très exceptionnels et exceptionnels sont facteurs hydrologiques des risques d'inondation dans le bassin. C'est le cas des années 1995, 2009 et 2010 (pluvieuses) où les maximums de débits journaliers sont respectivement de 1095 m^3/s, 1279 m^3/s et 1429 m^3/s à la sortie du barrage de Nangbéto. Ce lien entre les évènements pluvieux et hydrologiques est confirmé par Totin *et al.* (2016) sur le bassin de l'Ouémé à Bonou en ce sens que les maxima de débits hydrologiques succèdent aux maxima pluviométriques.

La figure 4.7 montre l'importance des débits journaliers dans le bassin. Il en ressort que les maximums de débits journaliers à l'entrée et à la sortie du barrage sont plus importants que sur les autres stations. C'est ce qui justifie les apports d'eau du barrage dans la basse vallée du Mono, un milieu de forte rétention d'eau comme l'illustre la figure 4.8. Cette variation très marquée des débits à Nangbéto ont des répercussions sur l'écoulement en aval. Ainsi, avec la construction du barrage d'Adjarala, les débits de sortie seront très élevés comme c'est le cas à Nangbéto et produirait certainement plus d'effets en aval, car plus proche de la basse vallée. Le barrage d'Adjarala amplifierait les inondations beaucoup plus vers l'exutoire du fleuve.

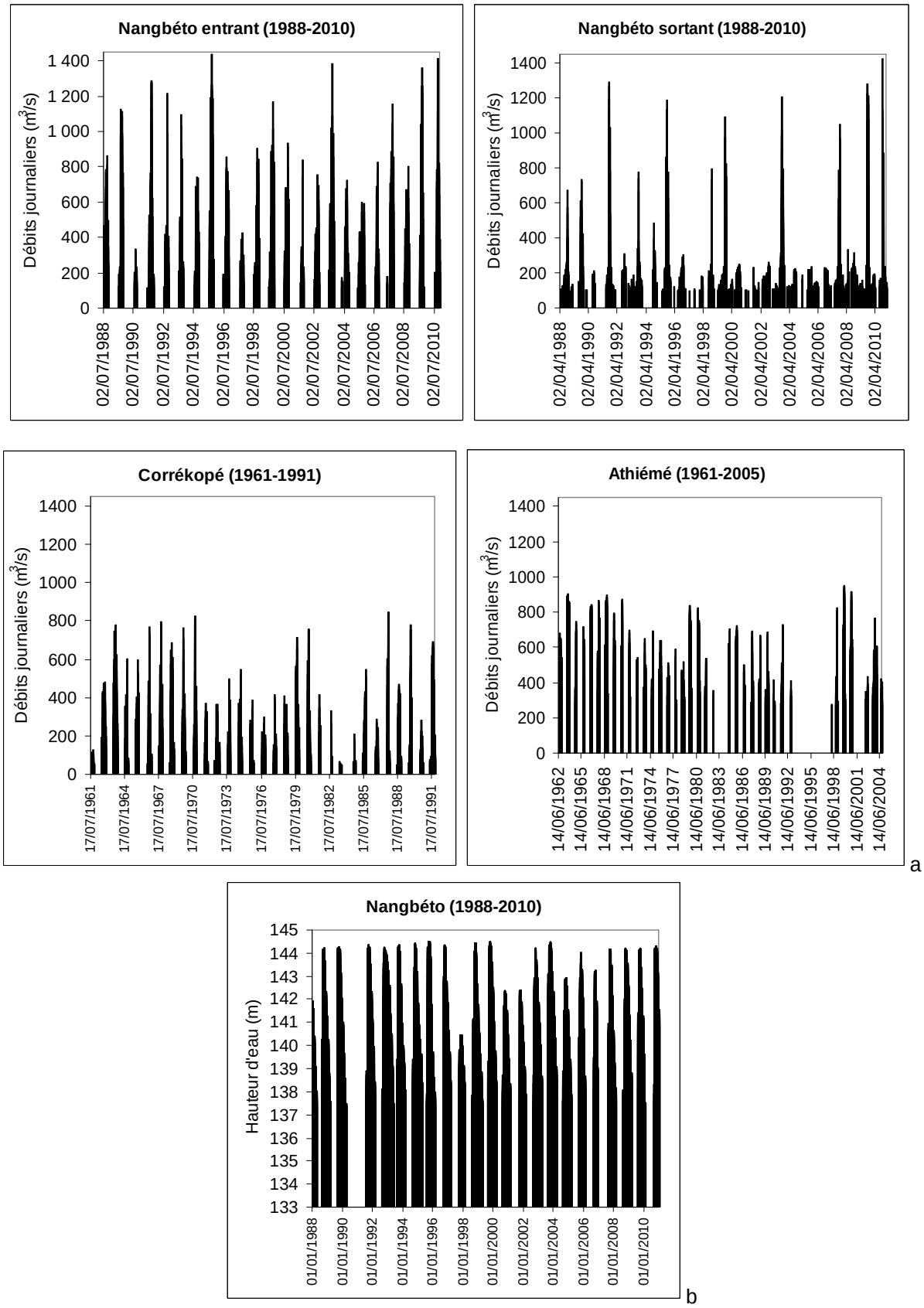


Figure 4.7 : Variation des évènements hydrométriques (a) et de hauteur d'eau (b) journalières caractéristiques des risques d'inondation dans le bassin-versant du fleuve Mono

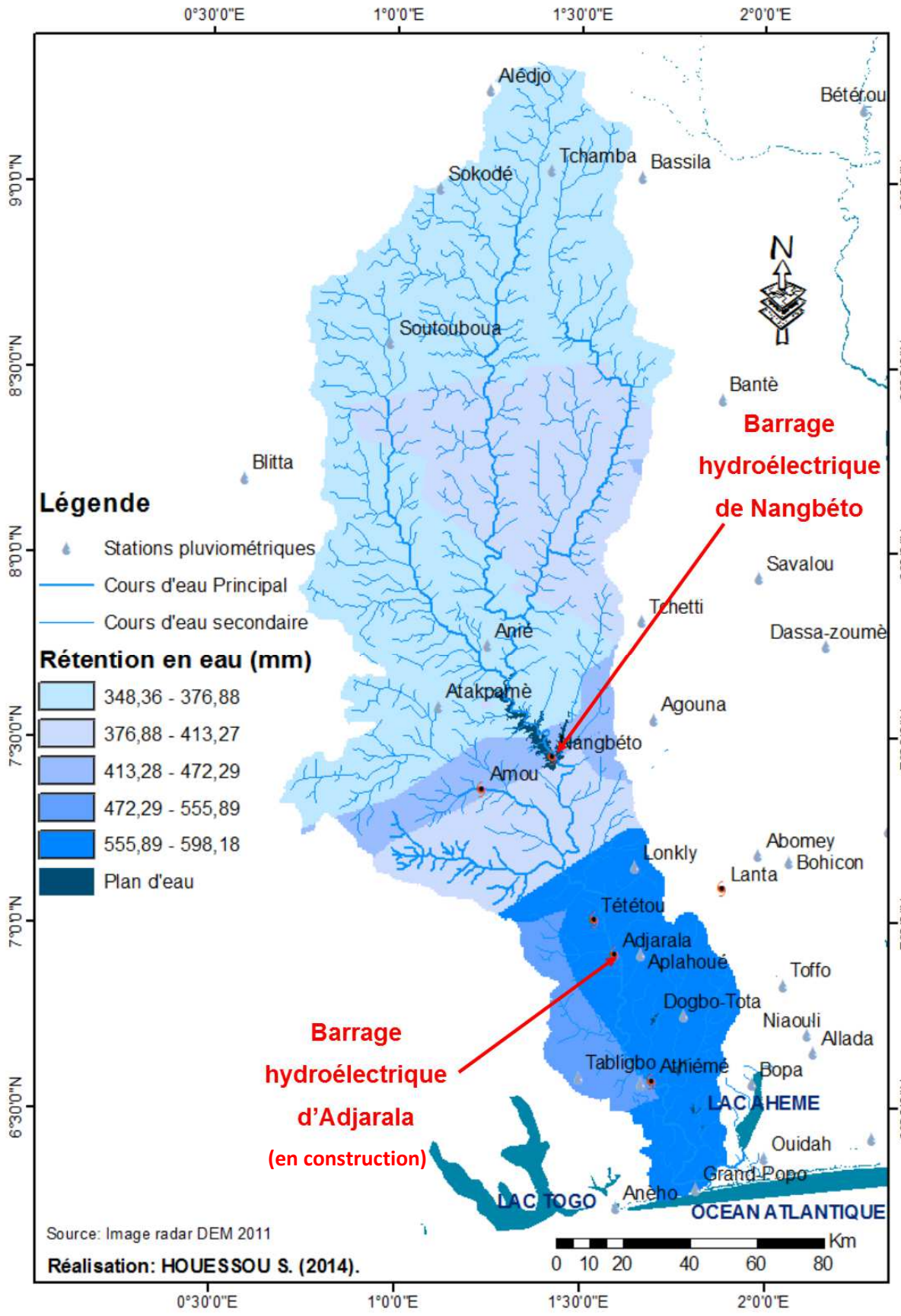


Figure 4.8 : Capacité de rétention en eau du bassin

4.1.4. Périodes de retour des aléas hydrométriques extrêmes des risques d'inondation

Les débits maximums annuels journaliers des sous-bassins de Corrékopé, de Nangbéto (débits entrants et sortant ; hauteur d'eau), d'Athiémé et des débits moyens annuels d'Ajarala selon leur fréquence d'apparition sont présentés dans le tableau 4.IV.

Tableau 4.IV: Périodes de retour évènements hydrométriques journaliers extrêmes dans le bassin du Mono

Stations	**Périodes de retour (ans) des débits (m^3/s) prédits**					
	2 ans	**5 ans**	**10 ans**	**20 ans**	**25 ans**	**50 ans**
Corrokopé	483,9	678,5	807,2	930,7	969,9	1090,6
Nangbéto entrant	920,2	1193,1	1373,8	1547,1	1602,1	1771,5
Nangbéto sortant	566,7	956,8	1215,2	1463,0	1541,6	1783,7
Adjarala	372,7	554,2	674,4	789,7	826,3	939,0
Athiémé	561,7	773,0	912,8	1047,0	1089,6	1220,7
	Périodes de retour du niveau d'eau (m) prédits					
Niveau d'eau à Nangbéto	143,6	144,5	145,2	145,8	146,0	146,6

Source : *Résultats de traitement des données hydrométriques de la DG-Eau Bénin et CEB, 2012*

Les débits de rares fréquences (≥ 25 ans ou = 50 ans) pour des récurrences humides et très humides calculées sur différentes périodes dans le bassin varient respectivement de 826,3 à 1602,1 m^3/s et de 939 m^3/s à 1783,7 m^3/s dans le bassin. Pour les évènements normaux ou extrêmes de fréquence ≥ 2 ans ou 5 ans, ou 10 ans ou 20 ans, les débits varient respectivement de 372,3 à 920,2 m^3/s ; de 554,2 à 1193,1 m^3/s ; de 674,4 à 1373,8 m^3/s et de 789,7 à 1547,1 m^3/s.

En outre, aux valeurs d'aléas pluviométriques et hydrométriques correspondent des valeurs de hauteur d'eau de fréquence normale à celle très rare (143,6 m pour 2 ans, 144,5 m pour 5 ans, 145,2 m pour 10 ans, 145,8 m pour 20 ans, 146,0 m pour 25 ans et 146,6 ans pour 50 ans). Mais, les valeurs de fréquences rares et très rares ne pourraient pas être obtenues, car le niveau d'eau n'excède pas les 144,5 m avant l'ouverture des vannes.

En condition climatique soudanienne où le bassin reçoit tous les apports d'eau drainés par le fleuve depuis le haut bassin dominé par le mont Atacora/ monts du Togo (nord-ouest) et les collines de Kouma-Konda, de Kpalimè et de Niamtougou (Klassou, 1996, Amoussou, 2010), les débits enregistrés sont de 483,9 m^3/s et 920,2 m^3/s pour la période de retour de 2 ans, de

678,5 m^3/s et 1193,3 m^3/s pour 5 ans, de 807,25 m^3/s à 1373,85 m^3/s pour 10 ans, 930,75 m^3/s à 1547,15 m^3/s pour 20 ans pour les stations de Corrékopé et Nangbéto entrant.

En climat de transition (Nangbéto sortant et Adjarala), les débits enregistrés sont respectivement de 566,7 5 m^3/s et 372,7 5 m^3/s pour 2 ans, de 956,8 5 m^3/s et 554,2 5 m^3/s pour 5 ans, 1215,2 5 m^3/s et 674,4 5 m^3/s pour 10 ans et de 1463,0 5 m^3/s et 789,7 5 m^3/s pour 20 ans pour les stations de Nangbéto sortant et d'Adjarala (barrage en construction). Ici, pour les évènements exceptionnels et très exceptionnels de fréquences rares (≥ 25 ans ou ≥ 50 ans), les débits enregistrés sont respectivement de 1541,6 m^3/s et 826,3 m^3/s et de 1783,7 m^3/s et 939,0 m^3/s. En couplant les évènements dans le bassin, on constate que ceux de 2010 sont comparables à ceux de 1968, mais moins intenses. C'est ce qui confirme d'une manière ou d'une autre la certitude des périodes de retour des évènements hydrométriques exceptionnels dans le bassin.

Dans le bassin à Athiémé, les débits enregistrés en 1968 (899 m^3/s) sont encore enregistrés et plus en 1999 (951 m^3/s), en 2000 (915 m^3/s), en 2009 (956,4 m^3/s) et en 2010 (960,3 m^3/s). Ces fréquents évènements hydrocastrophiques pourraient être dus non seulement à la légère augmentation des précipitations (Crétat *et al*., 2013), mais certainement à l'effet conjugué des lâchers d'eau du barrage de Nangbéto et de la dégradation du couvert végétal dans le bassin (Amoussou, 2010).

4.2. Analyse de la vulnérabilité du bassin-versant du fleuve Mono à l'inondation

La vulnérabilité est le second volet du risque. Elle a été l'objet de très nombreuses définitions, regroupées en deux grandes catégories : analytique et synthétique et ne sont pas des mesures simples (Dauphine, 2005).

L'intensité croissante des inondations observées ces dernières décennies dans le bassin peut être attribuée à l'action conjuguée des facteurs physiques et humains. Et, si des mesures ne sont pas prises pour réduire cette vulnérabilité des populations et des systèmes de production, l'expansion des zones sujettes aux catastrophes aggravera l'exposition des populations (Bechler-Carmaux *et al.*, 2000 ; Kodja, 2013), essentiellement pauvres, et de leurs biens économiques surtout dans la basse vallée du Mono.

Cette vulnérabilité est accentuée par des facteurs socioéconomiques et environnementaux, en particulier la grande dépendance de l'agriculture aux précipitations. L'analyse de la vulnérabilité du secteur d'étude est basée essentiellement sur la relation existant entre la vulnérabilité socio-économique et les difficultés d'accès des populations aux ressources nécessaires à la satisfaction de leurs besoins fondamentaux suite aux inondations comme l'avaient déjà démontré Kodja *et al.* (2014) dans la basse vallée de l'Ouémé et Bechler-Carmaux *et al.* (2000) à Niamey (Niger). Cette analyse s'intéresse donc à la vulnérabilité environnementale, humaine et matérielle, analysée sans et avec rupture de barrages comme l'illustre les figures 4.9, 4.10 et 4.11.

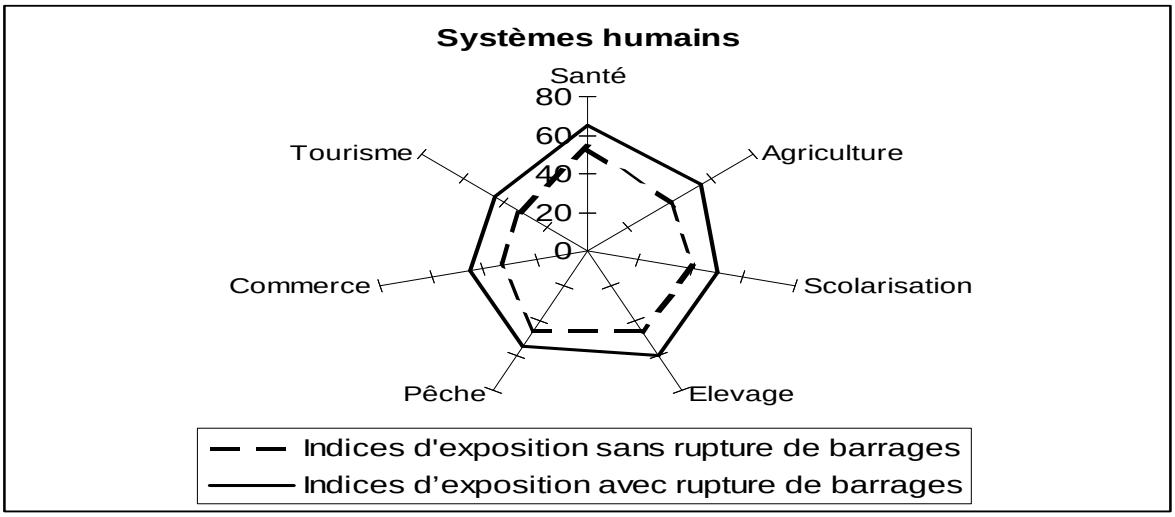


Figure 4.9 : Diagramme de vulnérabilité socio-économique relatif aux systèmes humains dans la basse vallée du Mono *(**Source** : Enquête de Terrain, septembre 2013 et octobre 2014)*

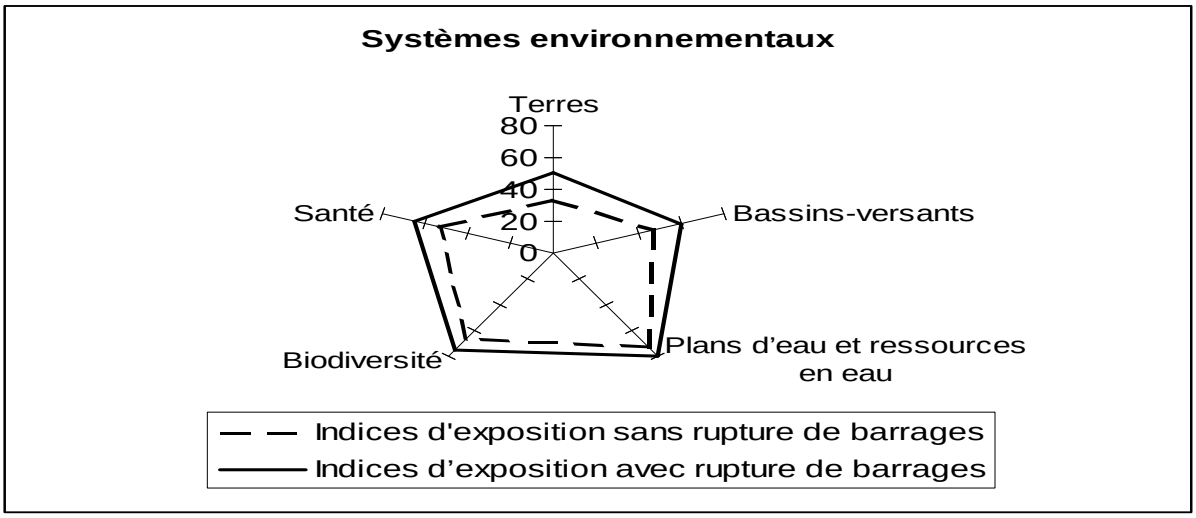


Figure 4.10 : Diagramme de vulnérabilité socio-économique relatif aux systèmes environnementaux dans la basse vallée du Mono *(**Source** : Enquête de Terrain, septembre 2013 et octobre 2014)*

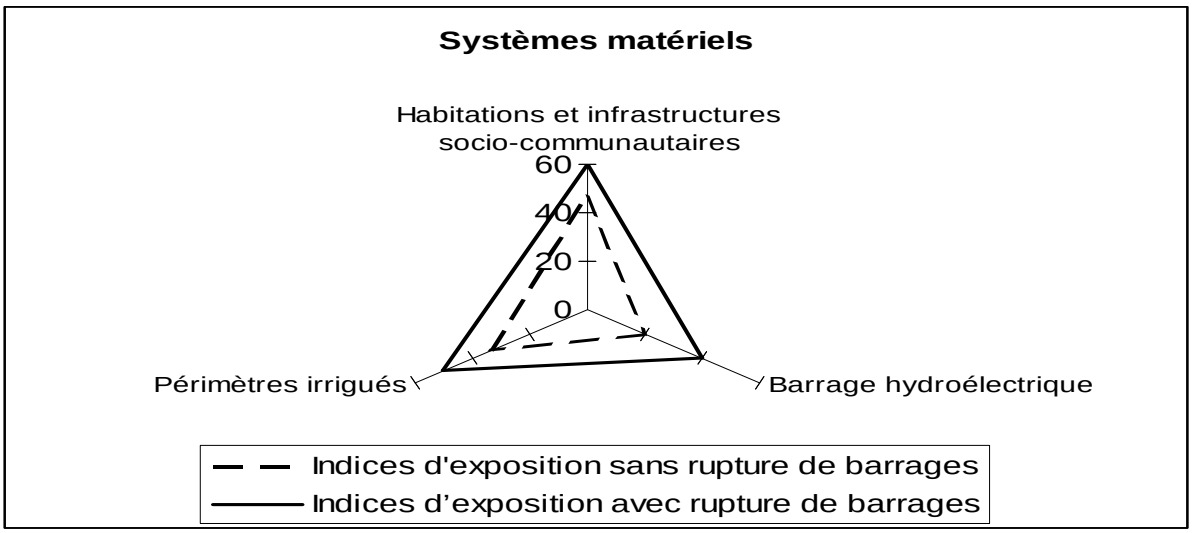


Figure 4.11 : Diagramme de vulnérabilité socio-économique relatif aux systèmes matériels dans la basse vallée du Mono *(**Source** : Enquête de Terrain, septembre 2013 et octobre 2014)*

De l'analyse de la figure 4.9, il ressort que l'indice d'exposition sans ou avec barrages est de plus de 50 % pour la santé des populations dans le bassin. Viennent ensuite l'élevage (47 %) et la pêche (47 %) qui sont plus vulnérables aux aléas d'inondation contrairement à la scolarisation (40 %), à l'agriculture (40 %), au commerce (33 %) et au tourisme (33 %). Ces différents systèmes étant des secteurs pourvoyeurs de ressources pour le développement local, cette recherche a permis de comprendre qu'ils sont très éprouvés par les aléas d'inondation.

La biodiversité, les plans d'eau et ressources en eau du bassin sont plus vulnérables avec un indice d'exposition de plus de 65 % (figure 4.10) sans et avec rupture de barrages contre en moyenne 40 % pour les terres et bassins-versants sans rupture de barrages. Avec la rupture de barrages, tous les éléments des systèmes environnementaux sont vulnérables à plus de 50 % aux risques d'inondation. Les systèmes environnementaux ne sont pas à l'abri des effets pervers des inondations dans la basse vallée du Mono, tout comme les systèmes humains. Ces résultats corroborent à ceux obtenus par Kodja *et al.* (2014) et Donou (2015) dans la vallée de l'Ouémé.

Les indices d'exposition de chaque système matériel varient de 20 à 47 % sans rupture de barrages contre 40 à 60 % avec rupture de barrages (figure 4.11). Dans ce système, ce sont les habitations et infrastructures sociocommunautaires qui sont

les plus exposées comparativement au périmètre irrigué (33 %) et au barrage hydroélectrique (20 %).

D'une manière générale, la manifestation des inondations n'épargne aucun système dans le secteur d'étude. En plus de l'analyse des diagrammes de vulnérabilité socio-économique aux aléas d'inondation s'ajoute, l'analyse des indicateurs d'impacts comme l'illustre la figure 4.12.

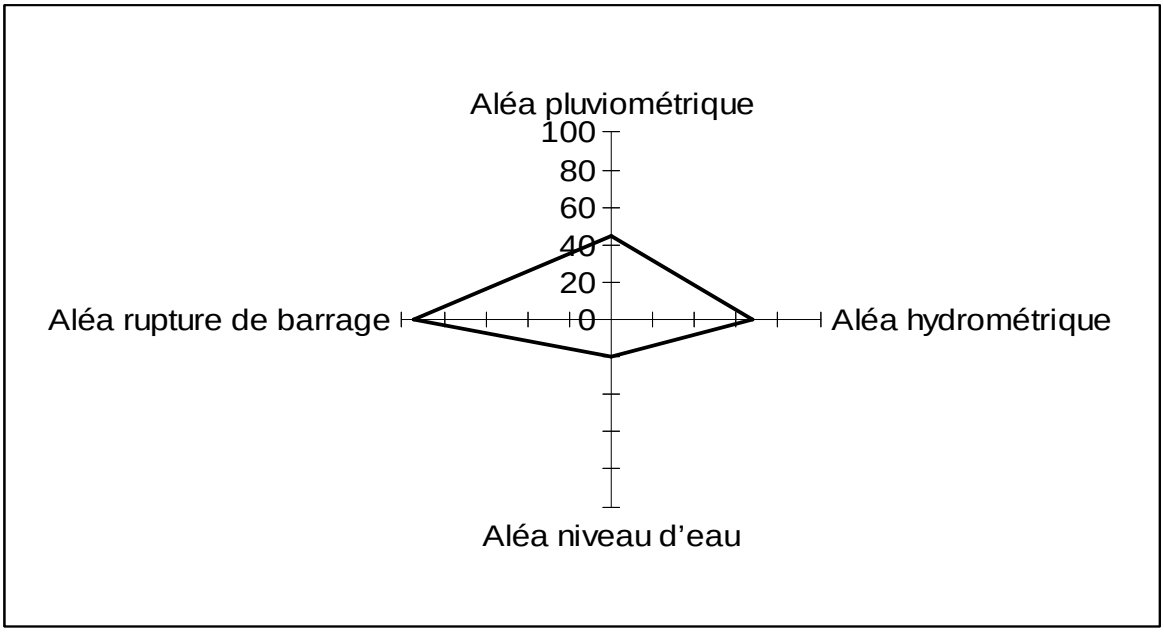


Figure 4.12 : Diagramme d'indicateurs d'impacts des aléas d'inondations sur chaque système dans la basse vallée du Mono *(**Source** : Enquête de Terrain, septembre 2013 et octobre 2014)*

Il ressort de l'analyse de la figure 4.12 que les aléas d'inondation majeurs sont les ruptures de barrages (94 %), les débits liquides (67 %) et la pluie (44 %). Ces aléas d'inondation impacteraient beaucoup plus la santé des populations riveraines, les ressources en eau, les plans d'eau, la biodiversité, les habitations (planche 4.1) et les systèmes de production, comme l'a confirmé Kodja *et al*. (2013) sur le bassin de l'Ouémé à Bonou.

La hauteur d'eau à l'entrée du barrage est également un indicateur de gestion des risques d'inondation, car elle permet de contrôler les lâchers d'eau du barrage. Or,

ces lâchers impactent surtout la biodiversité et la pêche du fait de leur rôle dans la sédimentation du fleuve suite l'érosion des berges.



Photo 4.1 : Inclinaison des chambres due à l'humidité des sols suite à l'inondation dans le secteur du barrage d'Adjarala (***Source*** *: Travaux de terrain, CEB, 2014*)

Il est à noter que tous les groupes socioculturels et les systèmes de production du bassin sont vulnérables aux risques d'inondation. Ces derniers constituent un handicap pour le développement local dans la basse vallée du Mono, en ce sens que cela empêche parfois les rentrées scolaires, détruisent des hectares de cultures dans ces secteurs.

4.3. Analyse des risques : un composé d'aléa et de vulnérabilité

La plupart des experts proposent l'équation suivante : Risque = aléa * vulnérabilité. D'après cette formule, un même risque peut être le produit d'un aléa fort avec une vulnérabilité faible, d'un aléa moyen et une vulnérabilité moyenne ou d'un aléa faible et vulnérabilité forte (Dauphine, 2005). Cette équation se vérifie à travers les matrices de criticité ou de risque (tableaux 4.V, 4.VI et 4.VII) où ont été mis en évidence les différentes combinaisons possibles des seuils variés d'aléas et de probabilité.

Tableau 4.V : Matrice de criticité des aléas pluviométriques journaliers de risques d'inondation dans le bassin du Mono

Probabilité							
Hautement probable	1,00	2,50	12,00	30,00	112,00	188,00	241,00
Très probable	0,83	2,08	9,96	24,90	92,96	156,04	200,03
Assez fréquent	0,66	1,65	7,92	19,80	73,92	124,08	159,06
Possible	0,50	1,25	6,00	**15,00**	56,00	94,00	120,50
Peu probable	0,33	0,83	3,96	9,90	36,96	62,04	79,53
Impossible	0,16	0,40	1,92	4,80	17,92	30,08	38,56
Cotes pluviométriques (mm) et Gravité		2,50	12,00	30,00	112,00	188,00	241,00
		Sans effet	*Négligeable*	*Notable*	*Grave*	*Très grave*	*Catastrophique*

Risque limité
Risque modéré
Risque significatif
Risque critique
15,00 *Seuil de criticité*
Courbe de Farmer

Tableau 4.VI : Matrice de criticité des aléas hydrométriques journaliers de risques d'inondation dans le bassin du Mono

Probabilité							
Hautement probable	1,00	51,00	99,00	226,00	522,00	844,00	1440,00
Très probable	0,83	42,33	82,17	187,58	433,26	700,52	1195,20
Assez fréquent	0,66	33,66	65,34	149,16	344,52	557,04	950,40
Possible	0,50	25,50	49,50	**113,00**	261,00	422,00	720,00
Peu probable	0,33	16,83	32,67	74,58	172,26	278,52	475,20
Impossible	0,16	8,16	15,84	36,16	83,52	135,04	230,40
Cotes hydrométriques (m^3/s) et Gravité		2,50	12,00	30,00	112,00	188,00	241,00
		Sans effet	*Négligeable*	*Notable*	*Grave*	*Très grave*	*Catastrophique*

Risque limité
Risque modéré
Risque significatif
Risque critique
113,00 *Seuil de criticité*
Courbe de Farmer

Tableau 4.VII: Matrice de criticité des hauteurs d'eau journalières du barrage de Nangbéto en relation avec les risques d'inondation dans le bassin du Mono

Probabilité						
Hautement probable	1,00	135,00	137,40	141,90	144,20	144,50
Très probable	0,80	108,00	109,92	113,52	115,36	115,60
Assez fréquent	0,60	81,00	82,44	**85,14**	86,52	86,70
Possible	0,40	54,00	54,96	56,76	57,68	57,80
Peu probable	0,20	27,00	27,48	28,38	28,84	28,90
Cotes de hauteur d'eau (m) et Gravité		135,00	137,40	141,90	144,20	144,50
		Sans effet	*Négligeable*	*Notable*	*Grave*	*Très grave*

Risque limité
Risque modéré
Risque significatif
Risque critique
85,14 *Seuil de criticité*
Courbe de Farmer

Il ressort de l'analyse des tableaux 4.V, 4.VI et 4.VII que les indices de criticité, d'après leur grandeur permettent de définir les risques (limité à critique). Ainsi, la gravité des risques d'inondation dans le bassin du Mono dépend des cotes pluviométriques, hydrométriques, de hauteur d'eau dans le barrage de Nangbéto et éventuellement d'Adjarala (en construction). Par exemple, plus ces cotes sont élevés plus les risques d'inondation sont significatifs à critiques (se classant dans la catégorie au dessus de la courbe de Farmer) dès que l'occurrence est assez fréquente à hautement probable avec des conséquences notables à très graves.

Le positionnement des habitations par rapport au lit du fleuve Mono (figure 3.15, p111) montre le degré de vulnérabilité (faible, moyen et élevé) des communautés dans le bassin. Cette vulnérabilité est fonction de la distance qui sépare les systèmes humains du cours d'eau et de la gravité des inondations. Ainsi, les populations de la basse vallée, secteur de rétention et d'accumulation en eau sont plus vulnérables (figure 4.13) comme l'illustre le niveau de submersion en période de crues exceptionnelles (photo 4.2a). De même, la nature des infrastructures (photo 4.2b) détermine également le degré de vulnérabilité des ménages.

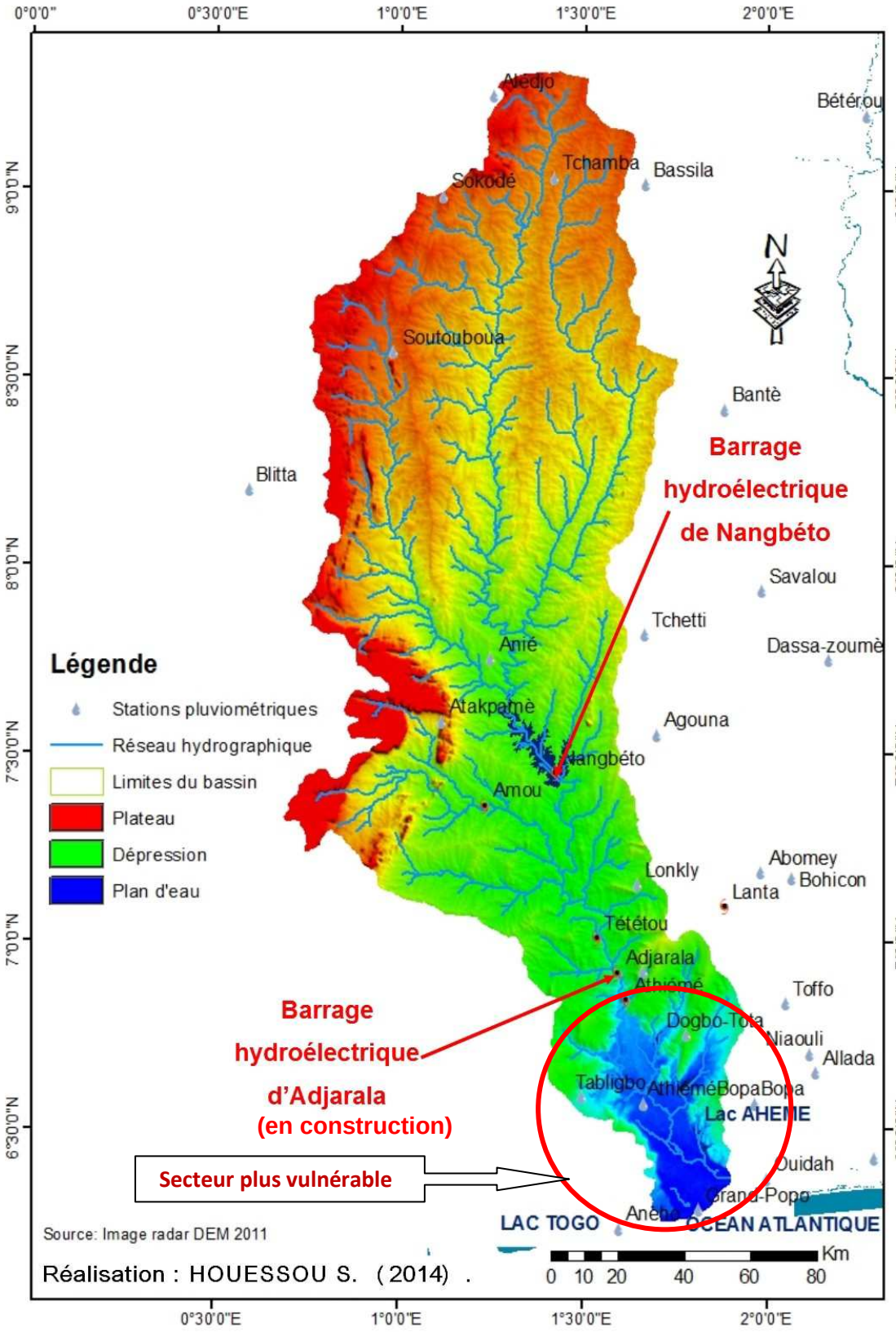


Figure 4.13 : Carte de relief montrant le secteur le plus vulnérable à l'inondation dans le bassin du fleuve Mono



a b

Photo 4.2 : Indicateurs de vulnérabilité des établissements humains aux inondations dans la basse vallée

En synthèse, la vulnérabilité des établissements humains dépend de leur nature et leur exposition aux eaux. L'inégalement positionnement des habitations dans le secteur d'étude justifie le degré de vulnérabilité (faible, moyen et fort) des communautés.

Par ailleurs, la destruction partielle ou totale d'un ou des barrages peut (ou peuvent) être due à différents facteurs que sont : techniques (vices de conception ou de réalisation, défaut de fonctionnement des organes permettant l'évacuation des eaux particulièrement lors de crues), naturels (tremblement de terre, crues exceptionnelles, dépassant la crue dite de projet, glissements de terrain) et humains (insuffisance du contrôle, de surveillance et d'entretien, erreurs d'exploitation, malveillance) pouvant engendrer des énormes dégâts sur le plan environnemental, humain et matériel dans le bassin du Mono.

Conclusion partielle

La caractérisation des aléas d'inondation dans le bassin du fleuve Mono est déterminée à partir de la catégorisation des seuils pluviométriques, hydrométriques et de hauteur d'eau dans le barrage. Ainsi, les seuils déterminés sont classées de limité à critiques. Concernant les périodes de retour, ces évènements classés suivant les seuils, il ressort que les évènements rares (≥ 25 ans) et très rares (≥ 50 ans) sont incertains, mais plus catastrophiques que les évènements normaux et anomaux (≥ 2 ans, 5ans, 10 ans et 20 ans) qui n'en sont pas moins aussi.

Les aléas d'inondation sont appréciés selon la position des acteurs dans le bassin. Ainsi, les risques modérés d'inondation sont considérés comme des risques majeurs (significatifs) pour les acteurs installés dans le lit mineur du fleuve.

Les différents systèmes (humains, environnementaux et matériels) du bassin sont vulnérables en fonction de leur degré d'exposition. Ainsi, la santé des populations, les plans d'eau, ressources en eau la biodiversité et les habitations sociocommunautaires sont les plus exposés aux aléas d'inondation dans le bassin. Mais, en cas de ruptures de barrages de Nangbéto ou d'Adjarala ou bien les deux, les inondations engendreraient des conséquences catastrophiques et dévastatrices auxquelles les populations ne se sont certainement pas préparées.

La matrice de criticité a été utilisée et a permis de classer les risques d'inondation dans le bassin du fleuve Mono suivant la courbe de Farmer. Ainsi, les risques significatifs à critiques d'inondation se situent au dessus de cette courbe et ceux limité à modéré en dessous. La gravité des risques d'inondation est fonctions des cotes pluviométriques, hydrométriques et de niveau d'eau dans le bassin avec une probabilité d'occurrence allant d'assez fréquente à hautement probable.

Outre les facteurs pluviohydrologiques, les pratiques humaines susceptibles d'aggraver les risques d'inondation et de causer des dommages sont entres autres l'urbanisation progressive, le déboisement des berges, l'extraction de sable (carrières), la modification des cours d'eau et de leurs abords (endiguement, remblai en zone inondable), occupation des berges et des bas versants, etc.

A chaque niveau de risques, les conséquences qui en découlent induisent des catégories de prises de décision.

CHAPITRE 5

CONSEQUENCES D'INONDATION ET STRATEGIES DE GESTION DANS LA BASSE VALLEE DU FLEUVE MONO

Introduction

Lors des inondations, il peut y avoir des dégâts très importants qui ont de très lourdes conséquences sur la population et sur les systèmes de production. Ces conséquences sont analysées dans le cadre de cette étude selon les trois classes de systèmes identifiés et affectées par les aléas d'inondation. Ces conséquences sont analysées en termes de dégâts humains, environnementaux et matériels. Face à ces conséquences, des stratégies de gestion durable sont développées pour minimiser et gérer les risques d'inondation dans le bassin-versant du fleuve Mono. Le barrage hydroélectrique de Nangbéto et le projet de construction du barrage d'Adjarala jouent un rôle primordial dans la régulation et par conséquent dans la survenance des inondations.

5.1. Conséquences humaines, environnementales et matérielles des risques d'inondation dans le bassin du Mono

5.1.1. Conséquences humaines des inondations

Au cours des évènements hydroclimatiques exceptionnels, de nombreux dégâts humains sont enregistrés. Il s'agit des pertes en vies humaines, la prolifération des maladies hydriques et de vecteurs de maladie, l'insécurité alimentaire, le manque d'eau potable, les problèmes d'hygiène et d'assainissement favorisant la propagation des épidémies.

Dans le bassin-versant du fleuve Mono, l'incidence sur les infrastructures sanitaires et sur l'ensemble des systèmes vitaux d'approvisionnement peut être considérable. Les crues ou les inondations saisonnières peuvent provoquer l'insécurité alimentaire comme le montrent les figures 5.1 et 5.2, et l'interruption des services essentiels de santé publique (eau, etc.) (Becuwe, 2005) comme c'est

le cas dans la commune d'Athiémé (Bénin) et d'Avévé (Togo) en 1999, 2009 et 2010.

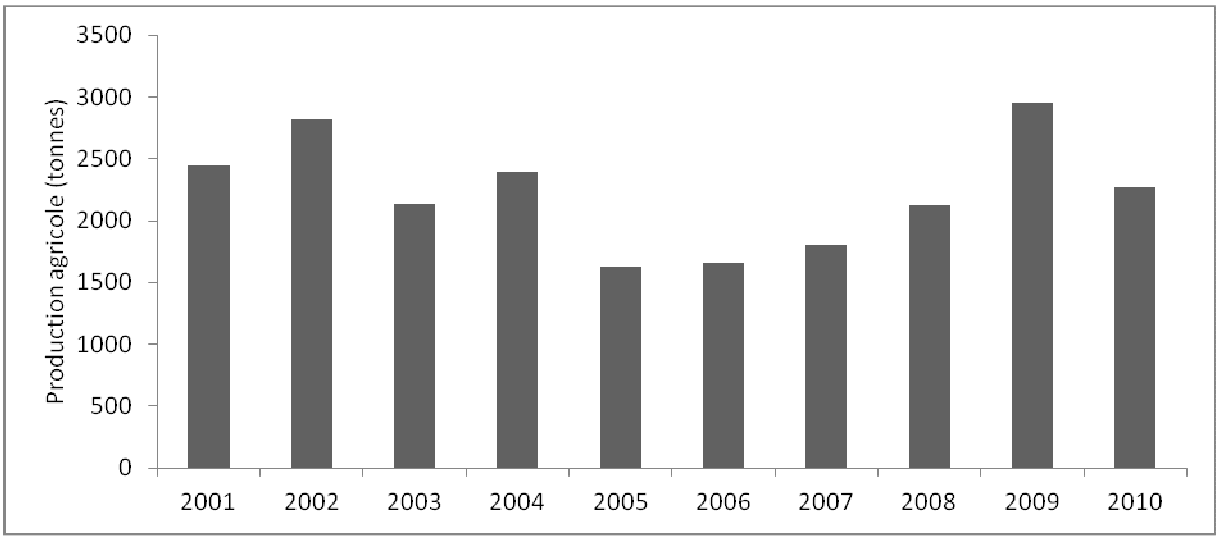


Figure 5.1 : Pertes de production agricoles dans la basse vallée du Mono de 2001 à 2010
***Source** : CERPA, Mono/Couffo*

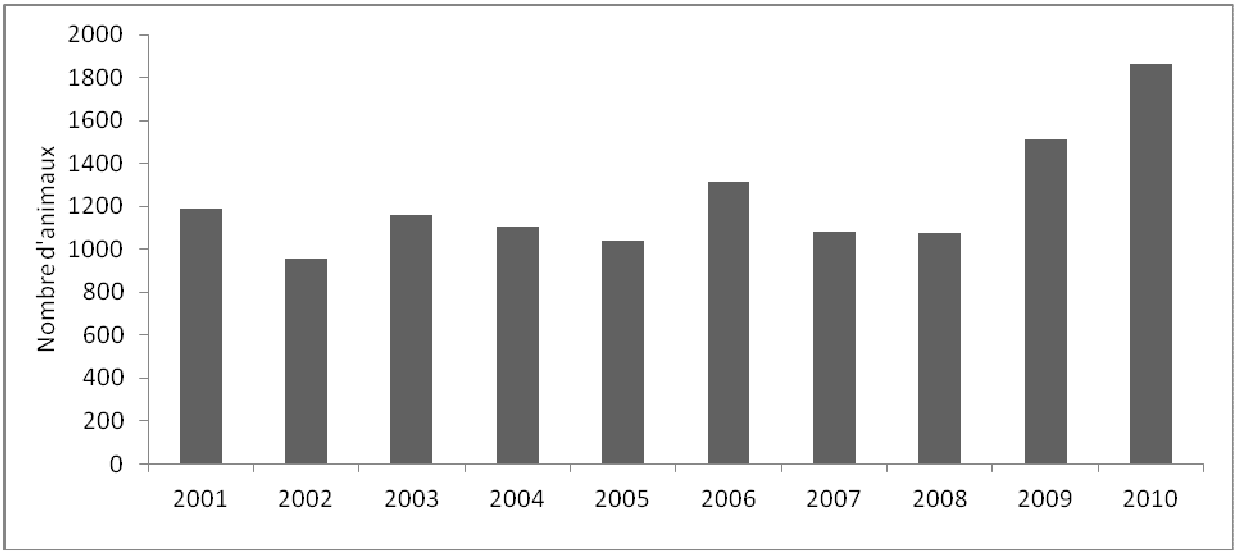


Figure 5.2 : Pertes d'animaux domestiques dans la basse vallée du Mono de 2001 à 2010
***Source** : CERPA, Mono/Couffo*

Il ressort de l'analyse de ces deux figures 5.1 et 5.2 les fortes pertes en production agricoles et en volailles sont enregistrées en années de fortes inondations. Ceci confirme l'importance des dégâts causés par les aléas d'inondation. Néanmoins, d'autres facteurs comme les pestes animales, les ravageurs, les sécheresses peuvent également à l'origine de ces pertes.

Quant à la figure 5.3 qui présente l'évolution de la production halieutique et des superficies d'étangs au cours des inondations de 2001 à 2010, il ressort que les pertes des espèces halieutiques sont proportionnelles à la superficie des étangs perdus. Ces pertes sont plus marquées au cours des années d'inondation exceptionnelle, car les pertes en espèces halieutiques ont augmenté de 6,3 % en 2010 par rapport à 2002. Ceci confirme la gravité des aléas de 2010 par rapport à celle de 2002.

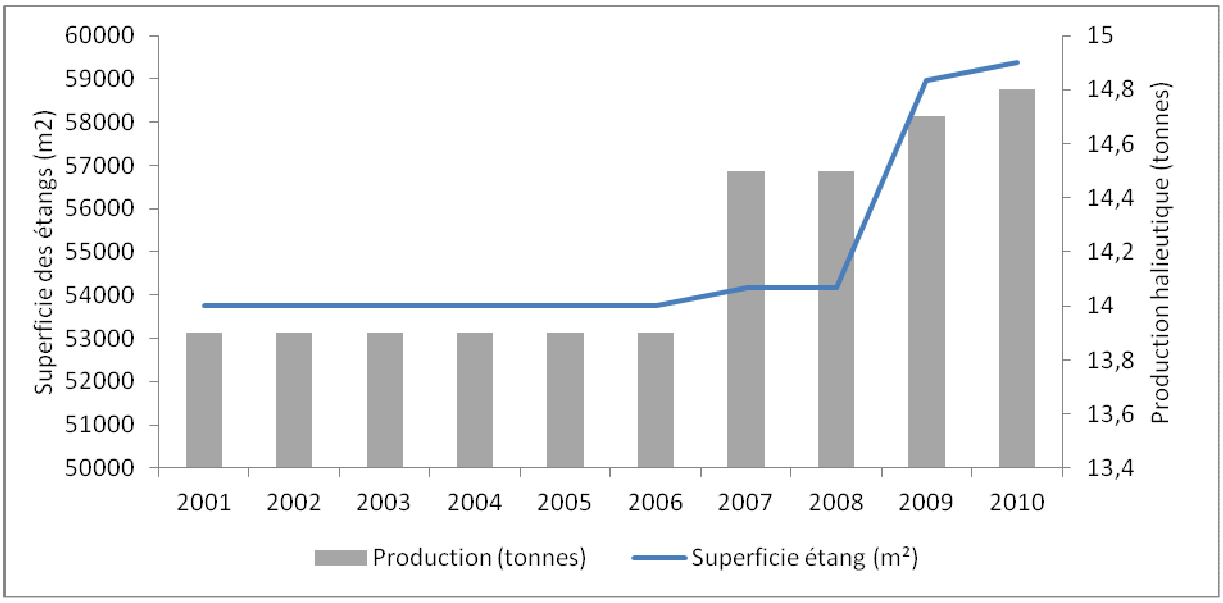


Figure 5.3 : Evolution des pertes de superficies d'étangs et de production halieutique dans la basse vallée du Mono de 2001 à 2010

***Source** : CERPA, Mono/Couffo, 2015*

A tout cela s'ajoutent les cas de noyade, principale cause de décès surtout dans le rang des enfants et des personnes âgées en cas de crues et d'inondation. Des traumatismes mortels se produisent également dus à la démolition des habitations. 67 % des personnes enquêtées affirment également des traumatismes psychologiques liés à la perte de biens de valeurs.

La figure 5.4 présente la variation de nombre de cas de maladies diarrhéiques et du paludisme dans la partie est du bassin du Mono en 1995 et en 1999 (deux années pluviométriques extrêmes dans le bassin). Il ressort de l'analyse que le nombre de cas de maladies les plus élevés sont enregistrés en 1995, une année humide sur le plan pluviométrique, marquée par l'abondance d'eau et ouverture de vannes du

barrage de Nangbéto et débordements des eaux du lit du fleuve dans la partie aval du bassin. Le nombre de cas de maladies diarrhéiques sont marquées que le paludisme en 1995. Le nombre de cas de paludisme est plus enregistré dans les mois de juin à octobre avec une variation de 14 à 46 %, période des hautes eaux dans le bassin, de crue, de submersion totale des terres fermes des lits mineurs et parfois majeurs. Ceci est conforme aux résultats des chercheurs (Boko, 1988 ; Houssou, 1998 ; Boko *et al*., 2015) dans différentes communes du Bénin.

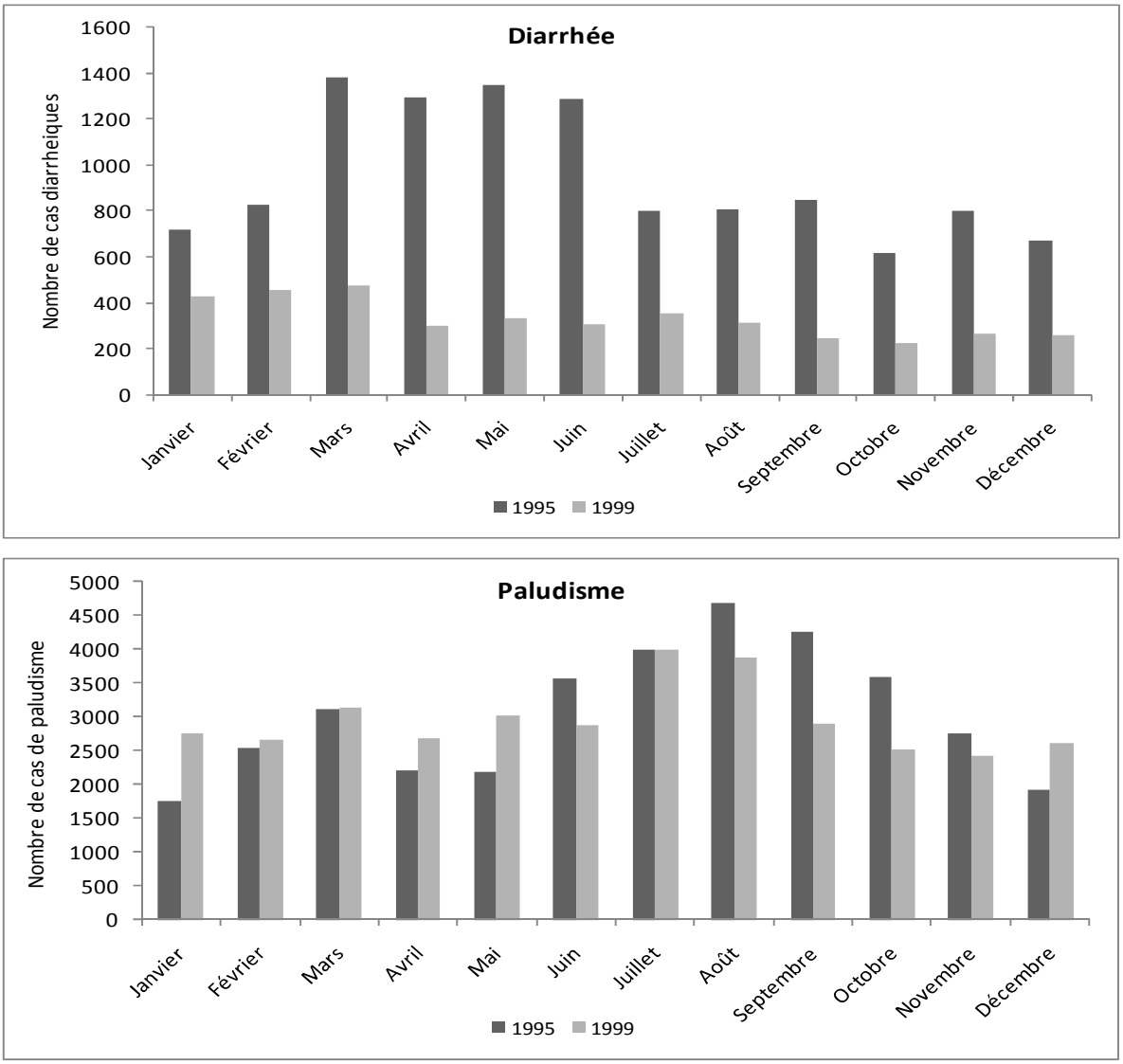


Figure 5.4 : Variation mensuelle de nombres de cas de maladies diarrhéique et du paludisme en 1995 et 1999 dans la partie Est du bassin du fleuve Mono

***Source** : Hôpital de Zone de Lokossa, 2000*

En outre, les inondations obligent certaines personnes à la délocalisation et au délogement. Elles peuvent être aussi très douloureuses, suite à la destruction ou aux pertes d'objets très importants pour une personne et donc entraîner des traumatismes importants chez certaines de ces personnes.

Les inondations à caractères dommageables enregistrées dans la basse vallée du Mono du fait de l'anthropisation poussée affectent le bien-être des populations riveraines du fleuve, car elles provoquent : des dommages sur l'habitation (photo 5.1a) selon 77 % des personnes enquêtées, la dissimulation des valeurs touristiques par l'envahissement des plans d'eau par la jacinthe d'eau (photo 5.1b).



a



b

Photo 5.1 : Conséquences socio-économique des inondations dans l'écosystème Mono
(Source : Résultats d'enquête, 2010)

Les inondations ont également des impacts importants sur le commerce en ce sens qu'elles provoquent une perturbation des circuits d'échanges entre les marchés du Bénin (Azové, Comé et Grand-Popo) et ceux du Togo (en particulier Djoda). Les contrecoups des inondations se traduisent par l'absentéisme des employés, la baisse d'achalandage et la perte de revenus et de productivité confirmant les enquêtés.

Plusieurs magasins, restaurants, ainsi que des professionnels ont vu leurs activités péricliter du fait du ralentissement des flux migratoires en les deux pays. Elles engendrent également un bouleversement du calendrier scolaire dans les localités où les salles de classe sont inondées et la baisse d'achalandage (clientèle), la perte de revenus et de productivité.

En outre, en cas de rupture de barrages, les dégâts ci-dessus énumérés vont s'amplifier et engendreraient des inondations catastrophiques.

5.1.2. Conséquences environnementales

La figure 5.5 présente les proportions de dégâts par événement et par biens touchés ; les chiffres portés représentent pour chaque bien endommagé, le pourcentage des biens touchés par la crue (Canal Eau, 2011).

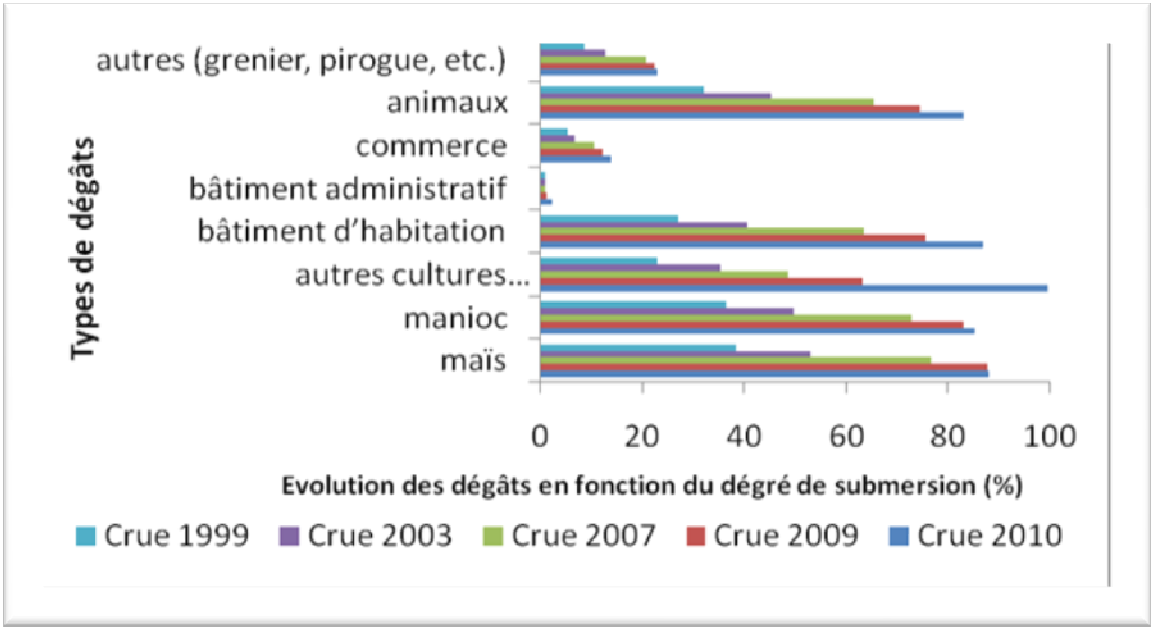


Figure 5.5 : Types de dégâts et degré de submersion en rapport avec la crue du Mono
(Source : Canal Eau ; UNDAC ; SNU, 2011, Résultats d'enquête, 2011)

Il ressort de l'analyse de la figure 5.5 que tous les types de dégâts sont en constante évolution. Cela signifie qu'aucune lutte significative de nos jours n'est encore parvenue à atténuer l'ampleur du risque d'inondation. Ainsi, le débordement du fleuve Mono, révèle pour les années à venir un handicap socio économique majeur et donc une prévention des risques afin de mieux gérer les catastrophes.

On observe également par effet de réciprocité un déséquilibre environnemental de nature écologique basé sur la destruction de la flore et des espèces sylvicoles expliqué par un défaut d'approvisionnement en sédiments.

Les inondations ont un impact sur la faune et la flore dans la basse vallée du fleuve Mono. Il est à noter une perturbation des aires protégées (AP) de Togodo Nord au

Togo avec une migration des espèces végétales (exemple la végétation riparienne) et des espèces animales inféodées aux végétations riveraines/galeries avec la perte de leurs habitats (exemple *Cercopithecus erythrogaster)*.

Les végétations des plaines d'inondation du Mono qui en terme de surface, occupent toute la vallée et constituent un terrain de parcours de prédilection pour les troupeaux de bovins de la zone, sont inaccessibles pendant les périodes de hautes eaux réduisant ainsi la possibilité de pâturage. Ces espèces indicatrices sont *Mitragyna inermis*, *Andropogon gayanus* var. *bisqua mulatus*, et *Phoenix reclinata.* Plusieurs espèces présentes dans le sol sont asphyxiées suite aux inondations.

Certaines espèces se développent surtout dans les conditions de plus d'eau (les champignons, les bactéries, et les protozoaires). Par contre, la durée des inondations a un effet direct sur la vie des micro-organismes du sol. Ainsi, elles contribuent à diminuer l'abondance des organismes qui sont normalement présents dans le sol et par conséquent une diminution de la biomasse pour tous les groupes » (Beauchamp, 2001).

Les inondations provoquent également l'endommagement et la destruction de la flore (notamment la strate herbacée non adaptée à une abondance d'eau) et de la faune (noyade et migration forcée des animaux telles que les familles des *Pulmonata/Basommatophora*, *Lymnaeidae*, *Planorbidae*, *Pulmonata/Stylomatophora*) (Guelly, 1994; Kokou *et al*., 1999). La dégradation des sols cultivables par recouvrement de boues et les pollutions diverses (dépôts de déchets, débris, …) sont autant de conséquences des inondations dans la basse vallée du Mono. Cependant, l'inondation constitue un atout non négligeable d'enrichissement des terres suite aux apports terrigènes et de nutriments.

La biodiversité joue un rôle tout particulier dans cet écosystème du Mono qui supporte les activités de pêche indispensables à la survie de différentes communautés en période de basses ou hautes eaux. Mais, cette activité a diminué avec les lâchers d'eau du barrage de Nangbéto, du fait de la non remontée du front salin dans le bassin. Ceci se justifie par l'abondance d'eau douce dans la basse vallée. Selon Paugy et *al.* (1988), malgré la superficie assez faible de son bassin

versant et un débit annuel moyen relativement bas, le Mono est une zone de biodiversité assez riche, où se rencontrent 62 espèces piscicoles locales strictement continentales. Les études postérieures à celle de Paugy *et al*. (1988) ont recensé un nombre encore plus important d'espèces fréquentant le bassin versant du Mono. Cette diminution pourrait aussi être liée à l'effet conjugué du barrage et des inondations courtes (un mois et demi au lieu de trois mois). Plus, les régimes artificiels du fleuve Mono engendrent de fortes fluctuations du régime hydrologique des habitats, des peuplements de poissons, plus le bassin s'appauvrit en espèces halieutiques (Horwitz, 1978).

La croissance tardive / la disparition des espèces halieutiques et l'absence de cristaux de sel pour la saliculture autrefois activités principales dans la basse vallée sont autant de conséquences engendrées par les inondations courtes et la mise en eau du barrage de Nangbéto et qui sera amplifié avec la mise en eau du barrage d'Adjarala (en construction).

Cependant, la survie des alevins est corrélée à la durée et au niveau atteint par les eaux durant les périodes de crue (Welcomme, 1979, 1985). Les années où il y a moins d'eau, et donc moins de zones inondées, les alevins qui trouvent peu de refuges sont, de ce fait, plus vulnérables à la prédation et ont moins accès à la nourriture. Ils retrouvent moins d'attributs fauniques nécessaires à leur survie (Dansokou, 1976). Il est à noter également qu'avec la construction d'un second barrage (Adjarala), les modifications pourraient amplifier ce phénomène, modifiant du même coup la biodiversité de cette faune relativement riche du fait des apports abondants de débit liquides en aval.

Avec l'utilisation des pesticides dans le bassin pour la production du coton, il est possible qu'une partie de ces résidus qui n'est pas biodégradée soit remise en solution liquide à cause de l'inondation. Ceci peut provoquer une contamination des poissons, des sédiments et de l'eau mais moins grave que dans le bassin de l'Ouémé.

Les inondations du fleuve Mono participent à la fragilisation des cordons littoraux (Rossi et Antoine, 1990). Ces courants du fleuve Mono couplés par ceux de l'océan,

pendant les périodes de hautes eaux, engendrent l'engloutissement de plages et la destruction d'innombrables cocotiers, la dulcification des plans d'eau lagunaires (Amoussou, 2010) et la submersion complète ou partielle des zones humides. Ils entraînent le retrait du trait de côte (Rossi et Blivi, 1995) et par conséquent la migration de la ''Bouche du Roi''. En outre, elles entraînent aussi la naissance des flèches sableuses le long de la lagune côtière à l'Est de Grand Popo (Djondji-Grand-Popo). L'agressivité des courants du Mono dans la lagune côtière, les plages préexistantes sont littéralement érodées par suite du dédoublement du chenal lagunaire. Avec ce fonctionnement, à long terme si rien n'est fait, on assistera à l'élargissement du chenal lagunaire par suite de l'ennoiement complet des zones humides bordières de l'estuaire et de l'érosion des hauts-fonds et levées de bancs sableux périphériques. Les dommages à l'environnement ne feront donc que s'accentuer surtout si rien n'est fait avec la mise en eau du barrage d'Adjarala (en construction).

5.1.3. Conséquences matérielles

Les conséquences d'une inondation touchent généralement les infrastructures de transport et de logement telles que les ponts et les bâtiments. Les routes sont aussi momentanément coupées (route d'Asrama) occasionnant un enclavement temporel des localités, le temps de réparer les dégâts et de permettre aux eaux de baisser. C'est de la rupture en 2010 au Togo du pont d'Amakpakpé détruit par les inondations. Ceci a engendré des désagréments et des pertes économiques énormes aux usagers de la Route Inter Etat n°2 (Lomé-Atakpamè).

Les inondations engendrent très souvent aussi des pannes d'électricité dans la mesure où pour éviter les risques d'électrocution, la distribution de l'énergie est suspendue. Aussi, à la suite des inondations, de très nombreux foyers situées dans la zone de l'inondation se retrouvent généralement sans électricité suite à l'endommagement du réseau électrique (pylônes électriques, lignes à haute tension, etc.). Les appareils électriques de la maison (électroménagers, appareils de communication,…) sont alors trempés et se retrouvent défectueux ou hors circuit. Par ailleurs, à la suite des inondations, l'accès à l'eau potable devient très difficile ou très laborieux, comme c'est le cas souvent à Athiémé et à Agonmèglozou.

Les aléas d'inondation tels que les débits liquides (crues) occasionnent d'énormes dégâts dans le secteur d'étude : destruction d'habitations et autres infrastructures sociocommunautaires (écoles, routes,…), pertes des terres et des cultures (salicultures, cultures agraires, aquacultures, …), déplacements de population, exhumation des tombes.

La rupture d'un ou des barrages hydroélectriques de Nangbéto et d'Adjarala (en construction) engendrerait des risques majeurs pouvant entraîner la submersion subite et violente de la vallée en aval et mettre en péril les systèmes humains, environnementaux et matériels. A cet effet, les barrages intéressent la sécurité publique dès lors qu'ils sont susceptibles, en cas de rupture, de causer des répercussions graves sur les personnes et les biens. C'est le cas, actuellement pour tous les barrages de plus de 20 m de hauteur (***http://www.prim.net*).**

Face à ces dégâts énormes, des mesures de mitigation et de prévention s'avèrent nécessaire pour une gestion rationnelle des systèmes humains, environnementaux et matériels du milieu.

5.2. Stratégies de gestion intégrée des risques d'inondation

L'objectif de cette section est d'élaborer des mesures de gestion des aléas d'inondation afin de réduire les risques pour les systèmes humains, environnementaux et matériels sur les territoires du Bénin et du Togo.

5.2.1. Surveillance et alerte

5.2.1.1. Surveillance

La surveillance permanente des barrages hydroélectriques de Nangbéto et d'Adjarala (en construction) et des aléas d'inondation dans le bassin du fleuve Mono s'effectue aussi bien pendant la période de mise en eau qu'au cours de la période des hautes eaux. Elle est fondée sur de fréquentes inspections visuelles et des mesures du niveau d'eau dans la retenue, dans les piézomètres et dans les stations météorologiques et hydrométriques. Ces informations recueillies permettent une analyse et une synthèse des faits successibles d'être exploitées à des fins de produire d'informations d'alertes à la population.

En fonction de l'importance des lâchers d'eau des barrages et des évènements hydrocatastrophes, un certain nombre d'études approfondies sont à réaliser périodiquement. Ainsi, les études sur les barrages hydroélectriques de Nangbéto et d'Adjarala (en construction) doivent être réalisées en permanence par l'intermédiaire d'une surveillance de la variation du niveau d'eau à Nangbéto et de la première mise en eau d'Adjarala (en construction) suivie d'une maintenance des infrastructures d'exploitation. Les contrôles des mouvements, les déformations internes et tassements éventuels, les mesures hydrauliques et météorologiques doivent être effectués de manière permanente pour caractériser la dynamique des évènements hydrocatastrophes dans le bassin du Mono.

A l'échelle annuelle, les visites d'inspections par les services de contrôle des deux pays (Bénin et Togo) doivent être régulières assorties d'un rapport d'analyse des défaillances avec des mesures de réparation et de suivie. De plus, un rapport annuel sur les infrastructures d'exploitation doit être déposé à la cellule environnementale de la Communauté Electrique du Bénin pour analyse et suivie avec ampliation aux agences environnementales du Bénin et du Togo.

A moyen terme (chaque 2 ans), les organes hydrauliques des deux pays (Bénin-Togo) doivent veiller à la visite technique approfondie des ouvrages, aux essais d'ouverture de vannes de vidange et des évacuateurs de crues. A long terme (chaque 10 an), les examens techniques complets des ouvrages immergés par des moyens de subaquatiques ou par vidange de la retenue d'eau, de l'amont et aval de l'ouvrage sont obligatoires pour permettre au service du contrôle de décider de la procédure de mise en révision spéciale si des travaux d'amélioration sont nécessaires. Ensuite, un rapport de sûreté prenant en compte l'ensemble des données de surveillance accumulées pendant la vie de l'ouvrage doit être élaboré par un organisme compétent en incluant le niveau de sécurité de l'ouvrage tout en dégageant les dangers mise à jour confortement aux normes des barrages en Afrique de l'Ouest. Les travaux d'amélioration ou de confortement à réaliser si nécessaire doivent être suivis, de même que tous les travaux de surveillance et d'entretien qui incombent à l'exploitant du barrage.

Les stations de mesures des paramètres climatiques, hydrologiques et piézométriques doivent être sous surveillance la téléconnexion dans le bassin.

5.2.1.2. Alerte

L'émission des alertes permet une mobilisation de la population pour éviter les conséquences graves des inondations dans le bassin du fleuve Mono. Elle consiste au déclenchement manuel ou automatique d'un signal (figure 5.6).

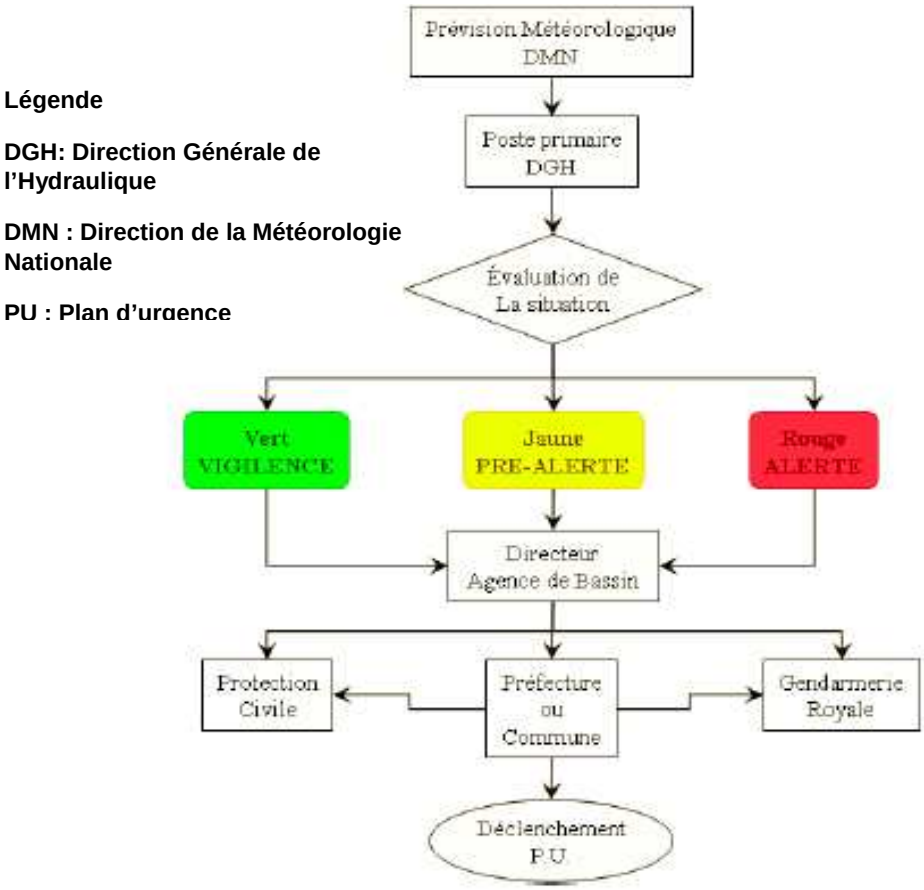


Figure 5.6 : Schéma d'alerte adopté par la Direction Générale de l'Hydraulique (DGH) en cas d'inondation *(**Source** : DSPR, 2008)*

Le système d'alerte peut être adapté aux populations ciblées, et aux positions de ces populations dans la basse vallée. Ainsi, plusieurs niveaux d'alerte sont à envisager en fonction de l'évolution des évènements hydrocatastrophes :

a.) Premier niveau (Vigilance vert)

A ce stade, l'état de vigilance est renforcé et permet aux gestionnaires d'exercer une surveillance permanente de l'ouvrage et de rester en liaison avec les autorités du barrage de Nangbéto et/ou d'Adjarala (en construction). Il peut être activé en cas de situation inhabituelle, de constats anormaux (risque modéré vers significatif) ou d'évènement météorologique dangereux ou de remontée d'eau dans la retenue. Ce niveau correspond à la couleur de vigilance jaune. La cote d'alerte peut être fixée quand la hauteur d'eau à l'entrée du barrage est comprise entre 141,9-144,2 m.

b.) Deuxième niveau (Vigilance jaune)

Ce niveau de vigilance est atteint si les préoccupations sérieuses subsistent (forte pluviométrie à l'échelle du bassin, élévation de la hauteur d'eau dans les barrages, par exemple le niveau d'eau est compris entre 144, 2 à 144,5 m à Nangbéto). Dans ce cas, les gestionnaires du bassin et particulièrement des barrages (Nangbéto et Adjarala) doivent alerter les autorités désignées par le plan d'alerte et les tenir informées de l'évolution de la situation. Ainsi, elles seraient en mesure d'organiser si nécessaire le déclenchement du plan d'alerte et d'en informer les élus locaux en aval du bassin.

c.) Troisième niveau (Vigilance rouge)

Il correspond au seuil critique de risque et à une vigilance absolue qui s'impose lorsque les phénomènes dangereux d'intensité exceptionnelle (pluie à forte intensité, hauteur d'eau de la retenue supérieure à 144,5 mm à Nangbéto, entrée du barrage) sont prévus et que le danger dévient imminent. La couleur de vigilance est le rouge. Les acteurs des barrages (gestionnaires, techniciens, …) doivent se tenir régulièrement au courant de l'évolution de la situation et respecter impérativement les conseils de sécurité prévue dans ce cas. En aval des barrages, l'alerte aux populations va se faire à l'aide d'un système d'alerte composé de sirène (figure 5.7), de signal téléphonique à travers les réseaux GSM, les messages radiodiffusée en langue locale (Ewé, Adja, Mina, Xwla, Kotafon, …), les véhicules équipés de haut-parleurs, la montée des drapeaux rouges annonçant le degré de danger critique.



Figure 5.7 : Signal d'alerte spécifique aux ouvrages hydrauliques
Source *: http://tpebarrages.jimdo.com/g%C3%A9n%C3%A9ralit%C3%A9/les-risques-relatifs-aux-barrages/*

Le signal sonore d'alerte comporte un cycle d'une durée minimum de deux minutes, composé d'émissions sonores de deux secondes séparées par un intervalle de trois secondes.

En termes de consignes générales, la population doit s'équiper de radio, de lampe torche, des vêtements et couverture avant l'alerte. Mais, au cours de l'alerte, il importe de couper les réseaux électriques, de gaz, d'eau et se mettre à l'abri selon les consignes communiquées par Haut-parleur. Pendant l'alerte, les acteurs du bassin doivent se tenir informés par les médias comme radio Mono : La Voix de Lokossa, radio Possotomè et radio nationale ORTB. Après les catastrophes, il faut attendre l'autorisation des autorités pour sortir des bâtiments. En cas d'évacuation, ne pas réintégrer les maisons sans autorisation, ni rebrancher les réseaux dans le secteur électrique.

Enfin, pour marquer la fin de l'alerte, par exemple si les paramètres redeviennent normaux, un signal sonore continu doit être émis.

5.2.2. Appropriation du risque par les acteurs

La gouvernance du risque d'inondation dans le bassin nécessite un renforcement de la culture du risque des communautés à la base, des décideurs et des entrepreneurs et une maîtrise des outils réglementaires de communication du risque à destination en particulier dans les zones inondables en aval du bassin du Mono. Dans cette dynamique, il faut relever chez les populations riveraines leur niveau d'information sur les indicateurs ou annonciateurs d'inondation, le degré de conscience du risque de crue majeure (aléas significatif et critique), la connaissance de la récurrence des crues. A cet effet, l'absence de crue significative depuis près de 50 ans (en fonction des périodes de retour estimées) et la quasi-disparition des impacts des évènements de fréquence faible, de 10 à 20 ans voire 25 ans, devraient permettre aux populations du bassin du Mono (notamment en aval) de se préparer à l'éminence d'un risque d'inondation. Mais, force est de constater que les populations ont tendance à s'adapter mieux aux évènements de faible fréquence qu'à ceux de fréquence rare et catastrophiques.

Il s'agit également de renforcer la résilience des populations et des systèmes socio-économiques en poursuivant l'amélioration et l'harmonisation de la connaissance des risques et assurant la disponibilité des informations sur les risques à travers un système d'information géographique (SIG) basé dans les communes (Bénin) et préfectures (Togo) partagées par le bassin.

5.2.3. Stratégies de mitigation

Etant donné que les risques d'inondation ont été identifiés, diverses stratégies de mitigation des inondations (James and Korom, 2001 ; Birkland *et al.*, 2003 ; Léon *et al.*, 2012) ont été développées pour réduire les impacts en temps événementiel réel. Elles consistent également à la formation de divers acteurs tels que les aménagistes, les topographes, les ingénieurs hydrauliciens, les architectes, les entrepreneurs et les environnementalistes en matière de conception et de prise en compte des phénomènes naturels (climatiques, géologiques et morpho-pédologiques) dans la définition de règles de construction dans un bassin-versant. Leur application permet de minimiser les dommages causés par les aléas dans les agglomérations.

Dans le contexte de la décentralisation, avec la responsabilisation des communes, il est nécessaire d'y amener les communautés à la base (les propriétaires, locataires ou plus simples citoyens) à se protéger efficacement afin de diminuer leur vulnérabilité. Mais, ceci est possible grâce à une information, une éducation et une communication au préalable de la description, des dangers et des dommages potentiels des inondations aux acteurs riverains.

Ces stratégies de mitigation des risques dans le bassin du fleuve Mono permettent la délocalisation des personnes et des biens du bassin, les récoltes précoces, le désensablement des chenaux navigables, la gestion des réseaux de communication, d'eau et de commercialisation. De plus en plus, les acteurs font les campagnes de reboisement, le réaménagement du calendrier agricole, l'adoption des cultures à cycle court pour atténuer les effets pervers des inondations dans le bassin.

Face aux inondations de 2009 et 2010, les acteurs du bassin, préfèrent de nos jours s'installer loin des lits majeur et mineur du fleuve Mono. Pour faciliter les échanges qui sont très difficiles en période de hautes eaux entre le Bénin et le Togo à la latitude d'Athiémé, un pont est en construction par le Ministère du Transport (photo 5.2).



Cliché : Houessou, mars 2016

Photo 5.2 : Construction de pont traversant le fleuve Mono à Athiémé

5.2.4. Gestion en temps de catastrophes d'inondation et après crises

Les secours en cas des aléas d'inondation ont pour mission la protection des personnes et biens menacées et des zones habitées ou aménagées très

vulnérables. A cet effet, une intervention rapide et efficace est nécessaire. Elle consiste en la mobilisation des moyens (matériels, humains et financiers), à la détection de la médicalisation (kits de médicaments adaptés aux temps d'inondations), à l'application des consignes de sécurité spécifiques au risque d'inondation et à l'évacuation et protection des populations.

La protection des populations riveraines du bassin du fleuve Mono aux évènements d'inondation consiste à agir non plus sur l'enjeu, mais sur l'aléa en vue de mieux contrôler le déroulement (drainage des eaux du fleuve vers les terres fermes, ouverture d'une brèche au niveau du cordon littoral avant l'exutoire du fleuve) et les conséquences de la crue (surveillance des crues, déplacement de la population). Les actions significatives de ces crues en 2009 et 2010 ont été d'une part l'importante opération de renforcement et de secours aux populations de la basse vallée du Mono.

La principale finalité des secours est d'évacuer les victimes, vers les hôpitaux des grandes villes ou dans les hôpitaux de zone. En cette période, seule peut intervenir efficacement une organisation solide (Croix Rouge, FAO, DPPC, Sapeurs-pompiers) des deux pays disposant de moyens de transports importants (camions, ambulances, hélicoptères), et d'un service médical avec des formations chirurgicales légères sous tente.

De plus, dès que le niveau des eaux atteint la cote d'alerte et que le diagnostic de vulnérabilité est établi, quelques conseils pratiques sont à prendre :

✓ veiller à la sécurité et à celle du personnel du barrage ;
✓ être prudent et prévoyant ;
✓ informer le personnel, indiquer précisément ce que doit faire chacun ;
✓ évacuer les lieux avant qu'il ne soit trop tard, ne pas attendre que les accès soient coupés ;
✓ prendre garde aux plaques d'égout qui ont été retirées, aux trous et aux fossés qui ne sont plus visibles ;
✓ alerter les populations de la basse vallée.

La surélévation des maisons dans la basse vallée est un indicateur de réduction des risques de submersion des agglomérations. De plus, la construction des habitations sur pilotis réduirait plus les dommages causés par les aléas d'inondation.

Le retour sur les lieux d'inondation n'a lieu souvent qu'après la décrue. Car, les accès sont souvent rétablis, soit plusieurs jours après le début de l'inondation. En tout état de cause, il faut attendre l'autorisation des autorités et gestionnaires des barrages pour retourner sur les lieux.

Face au risque de rupture de barrage, la seule mesure d'aménagement et d'urbanisation applicable pourrait être l'interdiction de construire dans les zones potentiellement menacées par l'onde de submersion : comme c'est le cas dans toute la basse vallée du Mono. Toutefois, ces zones vulnérables couvrent de si grandes surfaces qu'une telle mesure serait disproportionnée par rapport à la probabilité d'un accident. Pour l'aménagement exposé, il y a lieu de privilégier l'information préventive et les mesures d'alerte et de secours des populations.

5.3. Prévisibilité des risques d'inondation dans le bassin

Dans le bassin-versant du Mono, toutes les informations recueillies par la surveillance doivent permettre une analyse et une synthèse rendant compte de l'état du barrage, ainsi que l'établissement, tout au long de son existence, d'un «diagnostic de santé » permanent. A cet effet, le plan de prévention des risques de survenance des crues doit être établi en collaboration avec les gestionnaires et autorités du bassin du Mono (ABM), la Direction Générale de l'Eau (DG-Eau), la Direction de la Prévention et de la Protection Civile (DPPC), les collectivités locales et les préfectures dans les deux pays. Il faut élaborer également un outil de Système d'Information Géographique (SIG) de gestion des zones inondables du bassin jusqu'au niveau de la crue de référence et la préservation des champs d'expansion des crues.

Malgré le caractère prévisible des crues, il est difficile de maîtriser là ou le risque d'inondation va se manifester. Cette prévisibilité peut se faire par la prévision et/ou la prédiction.

En effet, la prévision des inondations consiste essentiellement en une observation continue des précipitations et des niveaux d'eau des retenues. Mais, cette maîtrise des risques d'inondation nécessite que la surveillance météorologique soit complétée par un suivi des débits dans la plupart des stations du cours d'eau, à l'aide de réseaux de collecte de données.

Cependant, l'efficacité de la prévision des crues doit passer par :

✓ la mise en place d'un réseau de surveillance météorologique permettant de mesurer les pluies couvrant les zones à risque;

✓ la mise en œuvre de modèles performants de prévision des crues ;

✓ la mise à disposition des autorités locales d'une information compréhensible et fiable.

La prédiction est une méthode de détermination des crues qui pourrait être réalisée à l'aide d'un modèle.

5.3.1. Prédiction des crues avec le modèle GRP

Il s'agit d'analyser la variabilité des crues et les risques d'inondation avec le modèle hydrologique GRP (Génie Rural pour la Prévision) au pas de temps quotidien dans le bassin du fleuve Mono. L'utilisation du modèle GRP en amont du barrage de Nangbéto permet d'analyser les débits de crue à l'état ‘*'naturel''* d'une part et en aval les débits de crue à Athiémé à l'état ‘*'artificiel''* sur la période 1988 à 2010 d'autre part.

Le modèle conceptuel GRP permet d'apprécier la reproduction des débits de crues en calage et en validation afin d'en déduire sa robustesse en projection avec les données climatologiques (pluies, ETP) projetées. Ainsi, le modèle est calé et validé (tableau 5.I) en amont et en aval du barrage de Nangbéto

Tableau 5.I : Périodes de calages et de validation du modèle GRP pour l'étude

Périodes	**Mono à Nangbéto**		**Mono à Athiémé**	
	Calage	**Validation**	**Calage**	**Validation**
1988-1995				
1996-2003				

a) Bassin –versant du Mono à Nangbéto

Les figures 5.8 et 5.9 présentent une évolution des débits prévisionnels et observés à Nangbéto. Il ressort de l'analyse des figures que le modèle reproduit bien les débits de crue en calage comme en validation. La corrélation débits observés et de prévision confirme l'efficacité du modèle GRP à simuler les débits. Les critères de performance en simulation comme en prévision (RMSE < 5 %) et la forte valeur de Nash (> 0,80) montrent la robustesse du modèle à simuler les débits et plus précisément les débits de crue prévisionnelle. Dans ce cas, ce modèle pourrait servir d'outil pour prédire les aléas d'inondation et par conséquent les stratégies à développer pour anticiper sur les dommages.

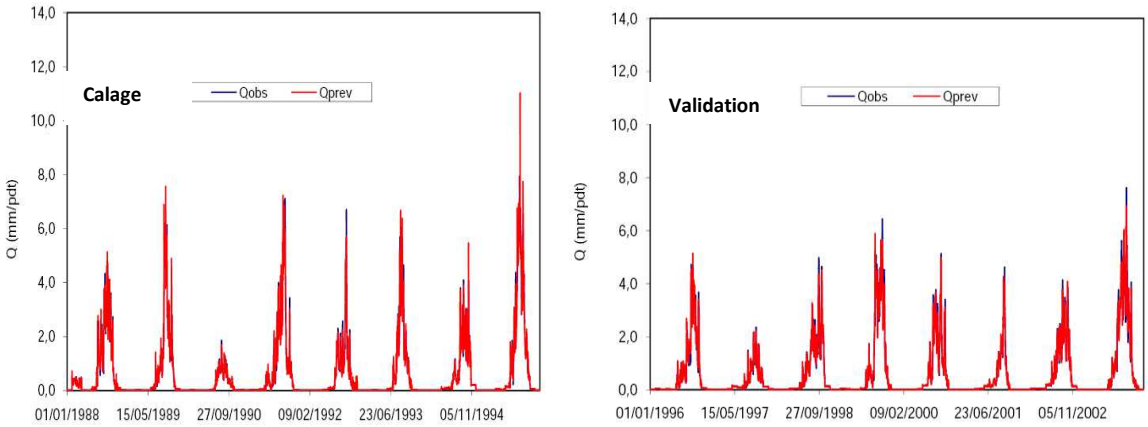


Figure 5.8 : Variabilité des écoulements de surface observés et prédits en calage (1988-1995) et en validation (1996-2003) en amont du barrage de Nangbéto dans le bassin du Mono

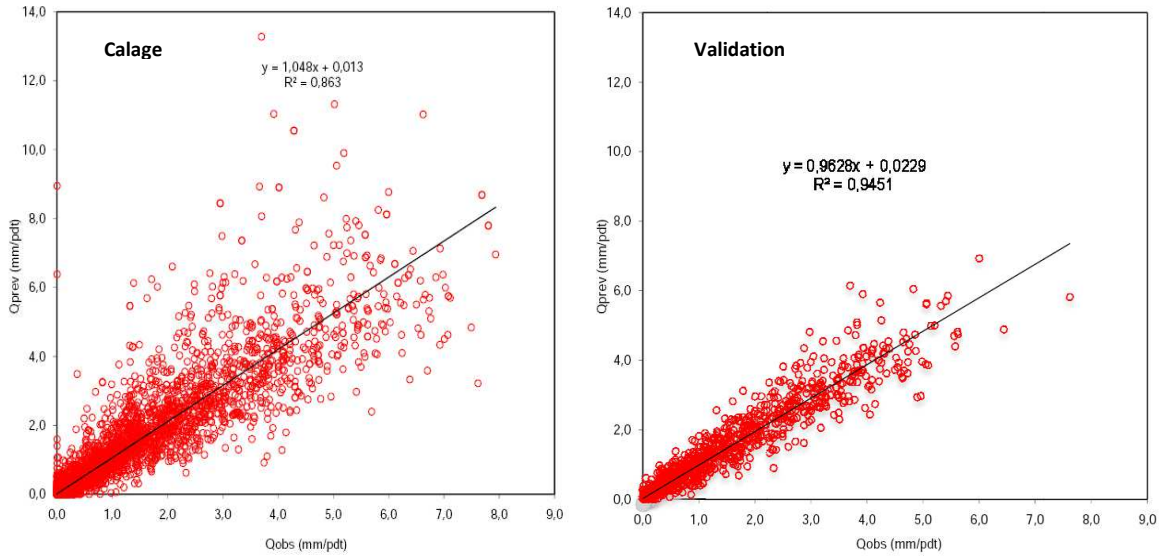


Figure 5.9 : Corrélation écoulements observés et de prévision en calage (1988-1995) et en validation (1996-2003) en amont du barrage de Nangbéto dans le bassin du Mono

b) Bassin –versant du Mono à Athiémé

Les données hydrométriques journalières d'Athiémé ont été utilisées sans combler des lacunes. Le modèle GRP a été tourné à la station aval du bassin afin aussi d'apprécier l'effet du barrage dans la prévision des crues dans la basse vallée.

Les figures 5.10 et 5.11 présentent l'évolution des débits observés et prévisionnels du bassin-versant du fleuve Mono à Athiémé. Il ressort de l'analyse de ces figures une bonne relation entre débits observés et de prévision en calage comme en validation. Les débits de crues sont aussi bien simulés à l'exception de l'année 2000 en validation où le modèle les a surestimés. Cependant, cela n'a pas trop affecté la relation entre débits observés et de prévision. C'est d'ailleurs ce que confirme le coefficient de corrélation (r^2= 0,85 en validation contre 0,95 en calage).

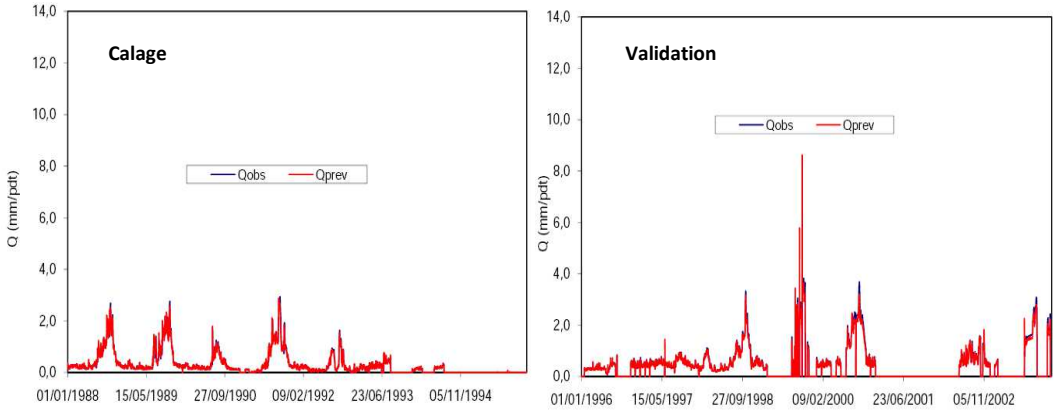


Figure 5.10 : Variabilité des écoulements de surface observés et prédits en calage (1988-1995) et en validation (1996-2003) en aval du barrage de Nangbéto à Athiémé dans le bassin du Mono

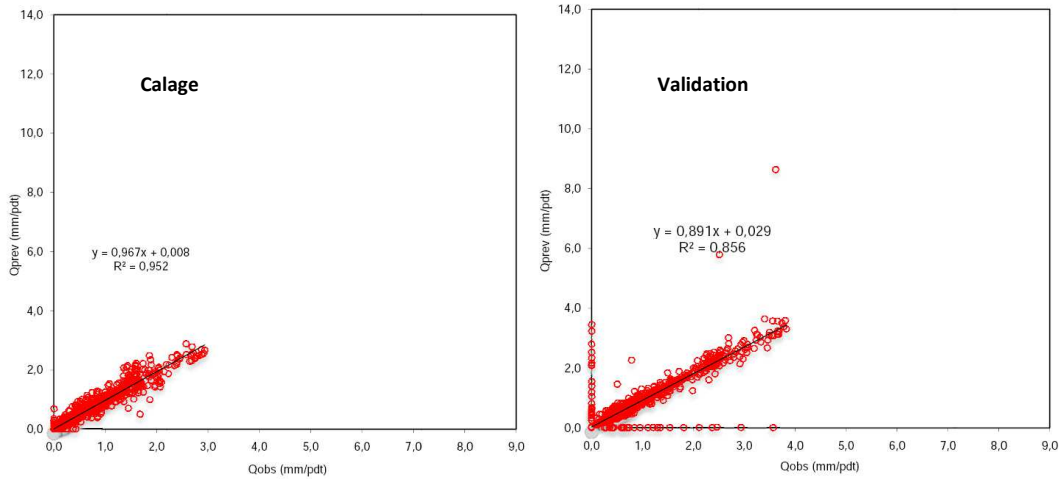


Figure 5.11 : Corrélation écoulements observés et de prévision en calage (1988-1995) et en validation (1996-2003) en aval du barrage de Nangbéto à Athiémé dans le bassin du Mono

Les critères de performance en simulation comme en prévision (RMSE < 5 %) et la forte valeur de Nash (> 0,90) montrent l'efficacité du modèle à simuler les débits de crue prévisionnelle. Ceci montre aussi que l'effet du barrage influence très peu le fonctionnement hydrologique des réservoirs, ce qui corrobore les résultats de Payan (2007) et Amoussou (2010). Néanmoins, l'effet conjugué de deux barrages pourrait influer cette dynamique dans le temps surtout que le barrage d'Adjarala (en construction) est très proche de la basse vallée. A l'instant, le modèle GRP pourrait mieux aider à une meilleure gestion des effets des évènements hydrocatastrophes dans le temps et dans l'espace en présence des données climatologiques projetées.

5.3.2. Prévention

Elle rassemble les dispositions à mettre en œuvre pour réduire les conséquences prévisibles des inondables sur les systèmes humains, matériels et environnementaux, car il est difficile d'empêcher les événements de se produire. A cet effet, le meilleur moyen de prévention contre les risques d'inondation est d'éviter d'urbaniser les zones exposées.

Face au risque d'inondation, il est nécessaire d'agir pour la réduction de la vulnérabilité des éventuels dommages : on parle de mitigation (DSPR, 2008). Celle-ci concerne les biens économiques : les constructions (privées et publiques), les bâtiments industriels et commerciaux, ceux nécessaires à la gestion de crise, les réseaux de communication, d'électricité, d'eau, etc. Si l'État et les communes ont des responsabilités dans ce domaine, les propriétaires, locataires ou plus simples citoyens, peuvent contribuer à se protéger efficacement et diminuer leur propre vulnérabilité. Pour cela, il est primordial que chacun connaisse au préalable le phénomène auquel il est exposé, en s'informant sur sa description, l'accident possible et les dommages potentiels.

Une bonne anticipation de la crise est toujours nécessaire. La meilleure réponse permettant de faire face à la gravité d'une inondation en attendant les secours est un plan familial de mise en sûreté (PFMS). Un tel plan se prépare à l'avance, afin d'éviter la panique au moment de l'événement. Il est recommandé d'y faire figurer des informations sur le signal d'alerte (s'il existe) et les consignes de sécurité, les numéros utiles (urgence, services de l'État, compagnie d'assurance, etc.), les fréquences radio et tout autre élément à adapter à chaque situation familiale. Le PFMS idéal comprend la préparation d'un kit inondation, composé d'une radio avec ses piles de rechange, d'une lampe de poche, d'eau potable, de médicaments d'urgences, des papiers importants, de vêtements de rechange et de couvertures. Il peut également être nécessaire de posséder des dispositifs de protection temporaires, comme les batardeaux ou les couvercles de bouche d'aération. Pour réduire leur vulnérabilité, de nombreux moyens existent, tant au niveau des matériaux utilisés que des méthodes de construction.

5.3.3. Suggestion en situation d'urgence et planification des opérations

5.3.3.1. Suggestions

En matière de vigilance renforcée dans le cadre de gestion des évènements hydrocatastrophes (occurrence d'une crue, séisme, mouvement de sol près du remblai, dysfonctionnement des vannes, d'une apparition de fissures ou mouvement sur la structure), la surveillance doit être intensifiée, par exemple par l'augmentation des visites et des inspections. Une telle situation doit être maîtrisée par la Communauté Electrique du Bénin (CEB).

A cet effet, la communication doit être renforcée avec les autres intervenants concernées. Ainsi, la CEB doit :

✓ informer les élus locaux, les opérateurs économiques des localités exposées de l'amont vers l'aval;

✓ centraliser les informations utiles à la conduite des opérations au niveau des Agences nationales de protection civile du Bénin et du Togo, les diffuser aux cellules opérationnelles décentralisées ;

✓ envoyer, si possible, une équipe de spécialistes en gestion des risques le plus rapidement possible sur les sites des barrages pour apporter de soutien technique dans les prises de décision en matière de mesures diligentes pour la sauvegarde des vies humaines et des ressources économiques;

✓ définir les mesures à prendre sur le barrage de Nangbéto en amont ou d'Adjarala (en construction) en fonction de risques probables.

En outre, la CEB peut appuyer l'Autorité du Bassin du Mono (ABM) à un reboisement des berges du fleuve Mono, pour réduire les effets du ruissellement et de la sédimentation suite à l'érosivité des terres.

5.3.3.2. Planification des opérations en situation de catastrophes

La planification des opérations de gestion de risques d'inondation passe par la mise en place d'un dispositif spécial ORSEC Inondation (Préfecture des Hauts-de-Seine, 2014) adapté au contexte du bassin du fleuve Mono, abritant deux barrages hydroélectriques. Ce dispositif a pour objectif d'assurer la gestion des risques et catastrophes d'inondation tout en limitant les effets pendant la crise (protection et

sauvegarde de la population, perturbation des activités économiques, etc.) ainsi qu'un retour à la normale le plus rapide possible après la crise.

Ce plan vise avant tout à :

✓ créer une organisation opérationnelle permettant une gestion de crise optimisée qui perdure dans le temps pour faire face à une crise de longue durée ;

✓ déterminer les missions attendues des principales cellules (coordination, communication, secours/santé, réseaux, entreprises, etc.) et les moyens pour y parvenir ;

✓ disposer d'un ensemble d'outils opérationnels facilitant la gestion de crise (outils de communication, de synthèse, d'aide à la décision, etc.) ;

✓ faire un recensement des éléments principaux permettant une bonne gestion de crise (acteurs, enjeux majeurs, actions palliatives, moyens nécessaires, etc.).

Le fonctionnement de ce plan stratégique sera basé sur les aléas de référence (pluviométrique, hydrométrique et niveau d'eau dans les barrages de Nangbéto et d'Adjarala (en construction)) déterminés dans le cadre de cette étude. La figure 5.12 illustre l'aléa de référence du niveau dans la retenue du barrage de Nangbéto et les quatre seuils de risques.

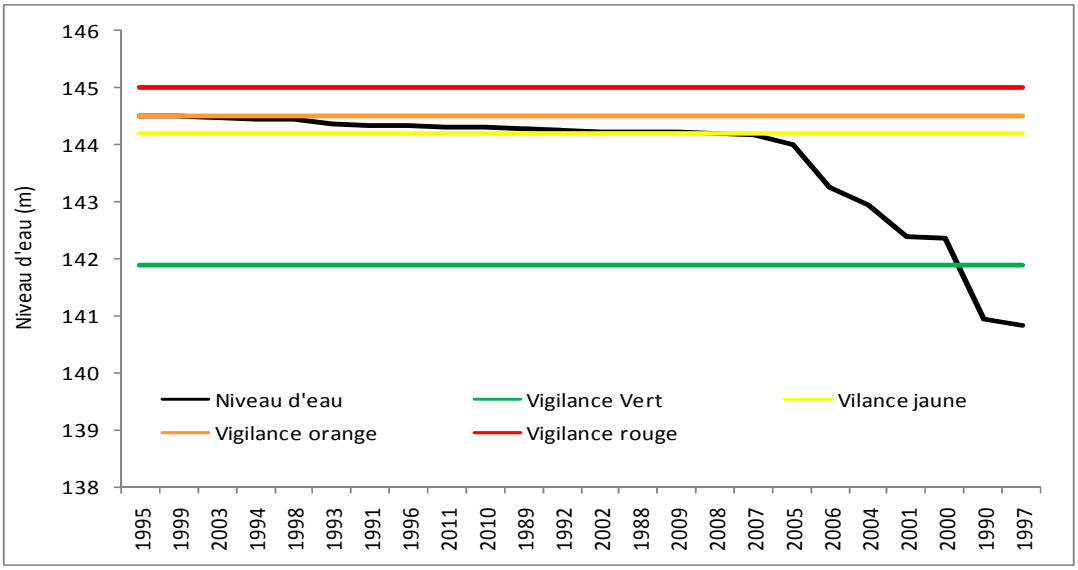


Figure 5.12 : Profil du niveau d'eau maximal annuel et seuils de risque dans la retenue de Nangbéto

Il ressort de l'analyse de la figure 5.12 que les seuils de risque varient en fonction du niveau d'eau dans la retenue de Nangbéto. Dans la figure 5.13, les seuils de risque

permettent une planification pour les prises de décision, la connaissance des impacts et les stratégies de gestion des risques d'inondation et de l'inondation.

La gestion de la crise d'inondation passe par l'opérationnalisation de la structure de résilience composée d'un Etat-major central (en 3 cellules : Coordination, Communication et Information du public). Ce dernier est soutenu par dix autres cellules chargées chacune d'une mission principale (figure 5.13).

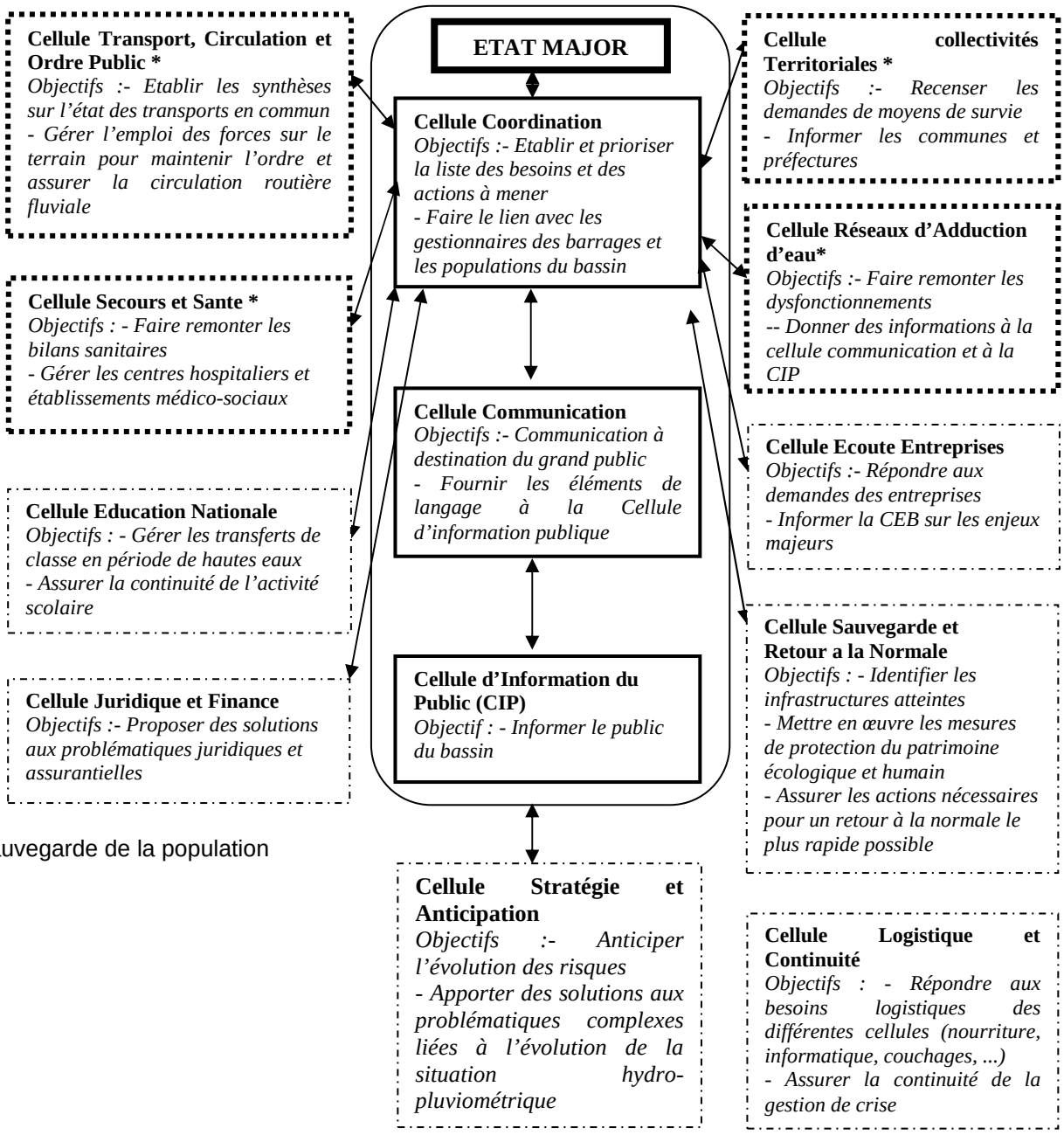


Figure 5.13 : Dispositif d'Organisation de la Réponse de la Sécurité Civile (ORSEC) à la gestion des évènements hydro-catastrophes dans le bassin-versant du fleuve Mono

Il ressort de l'analyse de la figure 5.13 que la gestion efficace des risques d'inondation dans le bassin du Mono est structurée en treize cellules. Leur rôle est d'assurer chacune la gestion de crise partagée entre les services techniques de la CEB, des mairies et préfectures, les services déconcentrés de l'Etat et les Organisations Non Gouvernementales (ONG). Chacun de ses différents services est spécifiquement responsabilisé sur un des volets que sont : éducation, droit, finance, sauvegarde et retour a la normale, logistique, etc.

Ce dispositif ORSEC est un outil d'aide à la décision qui permet de déterminer quelles cellules devraient être activées en fonction de la montée des crues et des niveaux d'eau dans les barrages de Nangbéto (figure 5.12 supra) et d'Adjarala (en construction). Ainsi, la gestion de crise va se faire en trois phases :

- ✓ l'activation de la cellule coordination seule afin de faire une veille renforcée sur l'évolution de la crue à un seuil de vigilance jaune avec prévision de passage à un seuil de vigilance orange.
- ✓ l'activation de l'Etat-major, de la cellule anticipation et des quatre cellules en charge de la sauvegarde de la population (cellules Réseaux, Secours et Santé, Transport, Circulation et Ordre Public, et Collectivités Territoriales) à un seuil de vigilance orange sans prévision de passage à un seuil de vigilance rouge.
- ✓ et l'activation de l'ensemble des cellules à un seuil de vigilance orange avec prévision de passage en seuil de vigilance rouge.

Le plan ORSEC Inondation doit s'accompagner des plans communaux et préfectoraux pour la préparation et la gestion de la crise d'inondation dans le bassin-versant du Mono.

Ce Plan communal ou préfectoral stratégique aura pour but l'organisation concrète des mesures de sauvegarde à l'échelle décentralisée et l'accompagnement des populations pour une efficacité optimale en situation de crise. Il se présente comme l'illustre la figure 5.14.

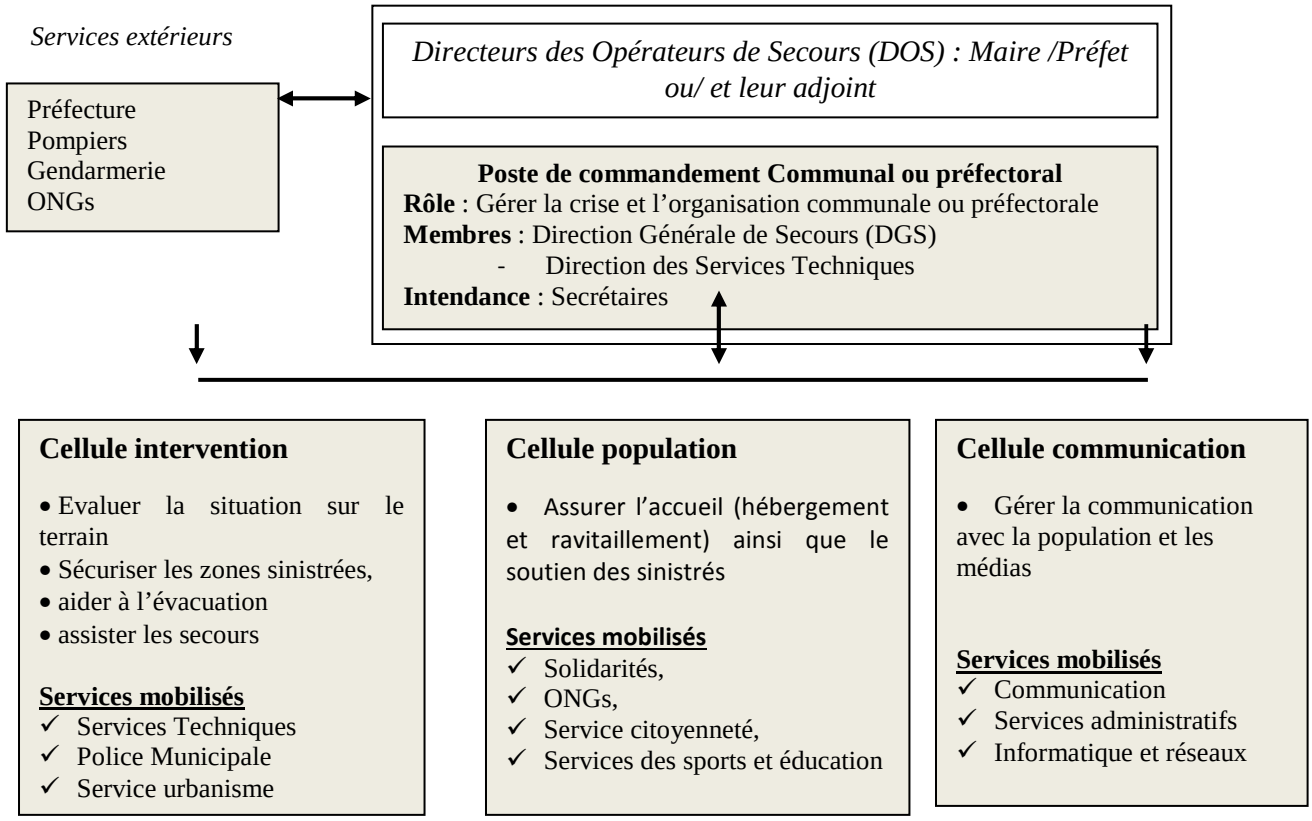


Figure 5.14 : Plan communal ou préfectoral de sauvegarde

L'activation de ce plan est faite par le Directeur des opérations de secours (DOS). Celui-ci ordonne ainsi les cellules à la gestion des crises. Le DOS doit en lien avec les services extérieurs et le poste de commandement des opérations prendre rapidement les décisions qui s'imposent (évacuation des zones dangereuses, accueil des victimes, etc.) en cas de risques d'inondation.

Conclusion partielle

Il ressort de l'analyse de ce chapitre que les risques d'inondation ne sont pas sans conséquences. Celles-ci sont rangées en trois grandes catégories : humaines, environnementales et matérielles, mais d'importance variée. Ainsi, les populations humaines sont plus vulnérables que les biens matériels, socio-économiques et les systèmes écologiques. Face aux risques d'inondation et des effets pervers engendrés, les stratégies de gestion intégrée des risques d'inondation sont nécessaires. Elles consistent à une surveillance et une alerte à trois niveaux d'information (jaune, orange et rouge) permettant de mieux connaître les aléas pour mieux agir, savoir mieux vivre avec le risque et réduire les effets des catastrophes.

Le plan de gestion des risques d'inondation dans le bassin du Mono s'appuie aussi sur la prévisibilité des aléas et l'élaboration d'un dispositif opérationnel de maîtrise de la crise. Ainsi, le modèle Génie Rural pour la Prévision des crues (GRP) a montré son efficacité à prédire les crues en amont comme en aval du barrage de Nangbéto, en calage comme en validation. Il peut donc avec les données projetées de la pluie et l'évapotranspiration (ETP) permettre d'avoir une idée des risques à venir pour un meilleur contrôle et une meilleure planification. Cette approche vise donc à rendre cohérente la surveillance des aléas, afin d'anticiper les inondations, d'évaluer leur intensité pour pouvoir donner l'information en temps réel et alerter rapidement les autorités et la population à la base pour une meilleure gestion de la crise.

Conclusion générale

Les inondations pluviohydrologiques ne peuvent être évitées dans le bassin du Mono, notamment avec la présence des barrages de Nangbéto et d'Adjarala (bientôt en construction). A cet sujet, les seuils des aléas d'inondation dans le bassin ont été définis au regard des données pluviométriques et hydrométriques de 1961 à 2010, de la hauteur d'eau dans la retenue de Nangbéto de 1988 à 2010, d'occupation du sol des années 1985, 2000 et 2014 et socio-économiques.

Ces données ont servi d'une part à déterminer le champ de pluie du bassin à partir de la méthode de krigeage par bloc et validé à l'aide d'une analyse variographique et d'autre part à caractériser les seuils de risques d'inondation à partir d'un traitement statistique d'indice de précipitation/écoulement normalisé (SPI). La cartographie des risques d'inondation dans le bassin a été réalisée par un couplage des données d'occupation du sol, géologiques, topographiques et pédologiques et hydrographiques.

L'anticipation des conséquences hydrométéorologiques observées ces dernières années dans le bassin a été simulée par approche modélisée GRP, un outil conceptuel de prévision des crues, car ces dernières sont en grande partie responsable des inondations dans le bassin. L'évaluation des risques d'inondation a nécessité l'adoption d'une méthode de probabilité d'occurrence des évènements dans le temps et dans l'espace.

La caractérisation hydroclimatique et la dynamique d'occupation du sol dans le bassin sont entre autres deux facteurs déterminants dans la survenance des risques d'inondation. Les facteurs pluviométriques ont permis de comprendre l'inégale répartition des précipitations dans le bassin entre 1961-2010 et leurs rôles sur les écoulements de surface et dans l'apparition des risques d'inondation. Les fortes corrélations pluie-débit (85 %) dans les différentes stations hydrométriques du bassin témoignent de l'importance de l'implication des rythmes pluviométriques. Néanmoins, les lâchers d'eau influencent le fonctionnement hydrologique des eaux de surface, ce que témoigne les quelques dysfonctionnements observés (augmentation de 97 % des débits d'étiage par rapport à la période d'avant barrage).

Le fort coefficient de ruissellement (0,25 à 0,45) dans le bassin attribué à la dégradation des unités paysagères notamment le couvert végétal explique en partie la récurrence des inondations dans le bassin en particulier en aval. L'apport des eaux souterraines n'est pas aussi négligeable dans l'identification et la gestion des risques d'inondation surtout au cours de la vidange des nappes. Outre les facteurs pluviohydrologiques, les pratiques humaines susceptibles d'aggraver les risques d'inondation et de causer des dommages sont entres autres l'urbanisation progressive, le déboisement des berges, l'extraction de sable (carrières), la modification des cours d'eau et de leurs abords (endiguement, remblai en zone inondable), occupation des berges et des bas versants, etc.

Par ailleurs, la détermination des seuils d'aléas pluviométriques (2,6 à 240,6 mm), hydrométriques (99 à 1440 m^3/s) et de niveau d'eau dans la retenue (137,4 à 144,5 m) a permis une catégorisation des risques de caractères limité, modéré, significatif et critique. En ce qui concerne les périodes de retour de ces évènements classés suivant les seuils, il ressort que les évènements rares (≥ 25 ans) et très rares (≥ 50 ans) sont incertains, mais plus catastrophiques que les évènements normaux et anomaux (≥ 2 ans, 5ans, 10 ans et 20 ans) qui n'en sont pas moins aussi. En outre, l'ampleur des aléas d'inondation est appréciée selon la position des acteurs dans le bassin. Ainsi, les risques modérés d'inondation sont considérés comme des risques majeurs (significatifs) par les acteurs installés dans le lit mineur du fleuve.

A ces différents types de risques, s'associent les conséquences sur les systèmes humains, environnementaux et matériels du bassin dont la vulnérabilité est fonction de leur degré d'exposition. Ainsi, la santé des populations, les plans d'eau, ressources en eau la biodiversité et les habitations sociocommunautaires sont les plus exposés aux aléas d'inondation dans le bassin. Les risques d'inondation peuvent être liés aux ruptures de barrages de Nangbéto ou d'Adjarala ou bien les deux. Dans ce cas, les inondations engendreraient des conséquences catastrophiques et dévastatrices auxquelles les populations ne se sont certainement pas préparées faute de leur faiblesse de la connaissance du risque.

A travers la matrice de criticité, les risques ''significatifs à critiques'' d'inondation se situent au dessus de cette courbe de Farmer et ceux ''limité à modéré'' en dessous.

La gravité des risques d'inondation dépend de l'importance des cotes pluviométriques, hydrométriques et de niveau d'eau dans le bassin avec une probabilité d'occurrence allant d'assez fréquente à hautement probable. A chaque niveau de risques, les impacts nécessitent des actions coordonnées en termes de prises de décision.

Les stratégies de gestion intégrée des risques d'inondation consistent ainsi en une surveillance et une alerte à trois niveaux de vigilance et d'information (jaune, orange et rouge) permettant de mieux connaître les aléas pour mieux agir, savoir mieux vivre avec le risque et réduire les effets des catastrophes. Dans l'optique d'une prévisibilité des risques, le modèle Génie Rural pour la Prévision des crues (GRP) qui a montré sa robustesse à prédire les crues en amont comme en aval du barrage de Nangbéto (Nash supérieur à 90 % en calage et en validation) peut être utilisé. Il pourrait permettre de sauver quelque peu les populations des effets pervers des inondations dans la basse vallée du Mono. L'élaboration d'un dispositif opérationnel de maîtrise de la crise (ORSEC) vient renforcer l'idée d'une meilleure planification et d'une cohérente surveillance des aléas pour une anticipation des risques d'inondation, afin de fournir l'information en temps réel et aviser le plutôt possible les autorités et les communautés à la base pour la meilleure gestion de la crise.

Eu égard à l'évaluation des risques d'inondation et aux limites du présent travail, les perspectives de cette recherche sont entre autres :

- l'application du modèle GRP dans le bassin du Mono dans un contexte de la mise en eau simultanée des deux barrages ;
- la redéfinition des cotes d'alerte hydrologiques en aval de chaque barrage ;
- l'analyse le multicritère des risques d'inondation impliquant tous les facteurs physiques et humains du bassin ;
- la cartographie de la dynamique écologique en aval de chaque barrage pour mieux apprécier l'intensité des lâchers d'eau de chaque barrage et leur conséquence ;
- l'élaboration d'un plan communal et préfectoral stratégique de gestion des risques d'inondation.

Bibliographie

Abotchi T., (1992). Production et commercialisation primaire des produits agricoles dans le Haho oriental (Togo). Mémoire de DEA Géographie des espaces tropicaux. Université Michel Montaigne, Bordeaux III. 94p.

Abotchi T., (1997). Dynamisme économique et évolution du milieu rural dans l'est de la région des plateaux au Togo. Thèse de doctorat de géographie tropicale. Université Michel Montaigne, Bordeaux III. 377p.

Abrishamchi A., Dashti M. and Tajrishy M., (2011). "Development of a Multi-Reservoir Flood Control Optimization Model: Application to the Karkheh River Basin, Iran". *World Environmental and Water Resource Congress*, pp. 3048-3057.

Adjonou K., (2011). Structure et indicateurs biologiques de gestion durable des reliques de forêts sèches du Togo Thèse de doctorat, Université de Lomé ; 159 p.

Adjonou K., Bellefontaine R. et Kokou K. (2009). Les forêts claires du Parc national Oti-Kéran au Nord-Togo : structure, dynamique et impacts des modifications climatiques récentes. *Sécheresse*, 20(4), pp.1 - 10.

Adjonou K., Kokuste A. D. et Kokou K., (2010). Dynamique spatiale et diversité floristique de l'aire protégée de faune de Togodo au sud est du Togo (Afrique de l'Ouest). Plant Ecology and Evolution, 37 p.

AECOM., (Septembre 2012). Analyse économique du projet de construction du barrage hydroélectrique d'Adjarala.

Afiademanyo K. M., Bowessidjaou E. et Kulo S., (1997). La faune. In Guelly K.A., Kokou K. et Afiademanyo K.M. (1997). Étude de quelques zones humides du Parc national de la Keran et du sud de l'aire protégée de faune de Togodo. Rapport de fin d'étude- Projet zones humides du Togo.

Agence de l'Eau R.M.C, (1998). Guide technique n° 2 : Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau.

Agence de l'Eau Loire-Bretagne, (2006). Guide méthodologique : Face au risque d'inondation, élaborez votre plan familial de mise en sécurité. Edition de l'Imprimerie Nouvelle, Saint-Jean-de-Braye, France.

Agence d'urbanisme pour le développement de l'agglomération lyonnaise, (2005). Risques technologiques et vulnérabilités dans l'agglomération lyonnaise. Document Agence d'urbanisme. Lyon, 48 p.

Agoumi A. et Debbagh A., (2006). Ressources en eau et bassins versants du Maroc : 50 ans de développement (1955-2005), 50 p.

Akpagana K. et Guelly K. A., (1994). Espèces d'angiospermes nouvelles pour la flore du Togo. Acta bot.Gallica, 141 (6/7) : 781-787.

Akpagana K., (1989). Recherches sur les forêts denses humides du Togo. Th. Doct. Sc. Nat., Univ. Bordeaux III, France, 181p.

Akpagana K., (1992). Espèces nouvelles pour la Flore du Togo. Ann. Univ. Bénin, sect. Sc., 10 : 25-36.

Albaret J.-J., (1982). Reproduction et fécondité des poissons d'eau douce de Côte d'Ivoire. www.agris.fao.org. Date de publication, 1982. Source: Avano (France).

Amegavie K., Kuwadah A. et Etou K., (1992). La faune aquatique : Poissons. In : Salami-Cadoux M.L. 1992. Évaluation et suivi des répercussions de l'aménagement hydro-électrique de Nangbéto (Togo) sur les ressources halieutiques et sur les maladies parasitaires des populations humaines et animales. Rapports de fin de projet- Campus-Nangbéto, 187 p.

Amoussou E. (2003). Dynamique hydro-sédimentaire et mutations des écosystèmes du ''lac'' Ahémé. Mémoire de maîtrise, DGAT/ FLASH/ UAC, 103 p.

Amoussou E. (2005): Variabilité hydro-climatique et dynamique des états de surface dans le bassin versant du Couffo. Mémoire de DEA, EDP/ FLASH/ UAC, 105 p.

Amoussou E. (2010). Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat unique, Université de Bourgogne, Dijon, CRC – CNRS-UMR5210, 313 p.

Amoussou E., (2015). Analyse hydrométéorologique des crues dans le bassin-versant du Mono en Afrique de l'Ouest avec un modèle conceptuel pluie-débit. Rapport à publier avec la Fondation Maison des Sciences de l'Homme (FMSH)- 190 avenue de France - 75013 Paris – France, http://www.fmsh.fr - FMSH-WP-2014-90.

Amoussou E., Boko M., Camberlin P., et Mahé G., (2012). Variation spatio-temporelle des flux sédimentaires dans la basse vallée Mono-Couffo (Golfe de Guinée). In « Les climats régionaux : observation et modélisation ». XXVème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), Grenoble, France, pp 69-74.

Amoussou E., Camberlin P. et Mahé G., (2012). Impact de la variabilité climatique et du barrage de Nangbéto sur l'hydrologie du système Mono-Couffo au Bénin. *Hydrological Sciences Journal,* Vol.57, Issue 4, pp 805-817.

Amoussou E., Camberlin P., Totin Vodounon S. H., Tramblay Y., Houndénou C., Mahé G., Paturel J.-E., Boko M., (2014). Évolution des précipitations extrêmes dans le bassin versant du Mono (Bénin-Togo) en contexte de variabilité / changement climatique. In « Climat : Système & Interactions». XXVIIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), Dijon, France, pp 331-337.

Amoussou E., Totin Vodounon S. H., Tramblay Y., Houndénou C., Camberlin P., Houéssou S., Mahé G., Oyédé L. M. et Boko M., (2013). Impact de la variabilité pluviométrique et du barrage de Nangbéto sur les écoulements de surface dans la basse vallée Mono-Couffo (Golfe de Guinée). In « Climat, Agriculture et Ressources en eau d'hier à demain ». XXVIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), Cotonou, Bénin, pp 63-68.

Amoussou E., Tramblay Y., Totin V. S.H., Mahé G. et Camberlin P., (2014). Dynamique et modélisation des crues dans le bassin du Mono à Nangbéto (Togo/Bénin). Hydrological Sciences Journal, Volume 59, Issue 11, November 2014, pp 2060-2071

Ataie B. M. and Ashtiani M. S., (2008). "Mapping impulsive waves due to subaerial landslides into a dam reservoir: A case study of Shafa-Roud Dam," *Dam Engineering*, vol. XVIII, pp. 243-269, 4 March 2008.

Auclerc P., (1999). Lutte contre les crues et les inondations en Loire moyenne : A l'heure du bilan - Dossier n°30 - Revue "La Loire et ses Terroirs".

Baker V.R., Kochel R.C., & Patton P.C., (1988). Flood Geomorphology. New York, Wiley, 503 p.

Ballais J.L. et Garry G., (2005). Contribution de l'hydro-géomorphologie à l'évaluation du risque d'inondation : le cas du midi méditerranéen français, compte rendu Géosciences 337, pp 1120 – 1130.

Bauchet Z., Conté O., Dlprat M., Dols F., Descotes-Genons S., Heilles A., Floury C., Marqueste C., et Penaud F., (2007). Contrat de rivières et Risque d'inondation. Guide méthodologique élaboré dans le cadre des travaux du groupe régional sur l'eau et les milieux aquatiques, 39 p.

Bayet C., (2005). Riverains inondables et défenseurs de l'environnement. Mobilisations et contestations associatives dans le domaine de la prévention des inondations. (Dir.), P. Lascoumes, Paris, CEVIPOF, 84 p.

Bechler-Carmaux N., Mietton M. et Lamotte M., (2000). Le risque d'inondation fluviale à Niamey (Niger). Aléa, vulnérabilité et cartographie*.* Ann. Géo., n° 612, Armand Colin, pp.176-187.

Beck E., (2006). Approche multirisque en milieu urbain. Le cas des risques sismiques et technologiques dans l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin). Thèse de doctorat de géographie. Strasbourg: Université Louis Pasteur Strasbourg 1, 246 p.

Becouze-Lareure C., Bazin C., Namour P., Breil P., Perrodin Y., (2012). Multi-level approach of the ecotoxicological impact of a combined sewer overflow on a periurban stream. Journal of Water Resource and Protection, 4, 984-992.

Berger H. F., (1984). Contribution à l'analyse statistique des crues, Université Paul-Sabatier, Toulouse, 196p.

Bethemont J., Danière C. and Vanier M., (1997). Rhône-Alpes, l'axe et le carrefour. Mappemonde, 4, 14-19.

Bigand E. et Collet D., (2012). Vivre avec les inondations : de la résistance à la résilience. Etude sur la résilience des communautés urbaines face aux inondations. Sciences Po Paris, France, 193 p.

Birkland, T.A., Burby, R.J., Conrad, D., Cortner, H. and Michener, W.K. (2003). "River Ecology and Flood Hazard Mitigation", *Natural Hazards Review*, **4,** pp. 46-54.

Black, F.J., Bokhutlo T., Somoxa A., Maethamako M., Modisaemang O., Kemosedile T., Cobb-Adams C., Mosepele K. and Chimbari M., (2011). The tropical African mercury anomaly: lower than expected mercury concentrations in fish and human hair. *Sci Total Environ*. 2011 Apr 15 ; 409(10) :1967-75. doi: 10.1016/j.scitotenv.2010.11.027. Epub 2011 Feb 20.

Bodian A., Ndiaye O. & Dacosta H., 2016. Evolution des caractéristiques des pluies journalières dans le bassin versant du fleuve Sénégal: Avant et après rupture, Hydrological Sciences Journal, DOI: 10.1080/02626667.2014.950584. http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2014.950584

Bonaccorso B., Cancelliere A., and Rossi G., (2005). Detecting trends of extreme rainfall series in Sicily. *Advances in Geosciences* (2005) 2: 7–11.

Bonelli S., Radzicki, K., Szczesny J., Tourment R. et Felix H. (2005). L'auscultation des barrages en terres : Une nécessité. *Ingénieries*, 41 : 13-22.

Boukari M., (1998). Fonctionnement du système aquifère exploité pour l'approvisionnement en eau de la ville de Cotonou sur le littoral béninois. Impact du développement urbain sur la qualité des ressources. Thèse Doctorat ès-Science. Université Cheick Anta Diop de Dakar, Sénégal, 278 p. + annexes.

Braga B., Rocha O. and Tundisi, J. (1998). "Dams and the Environment: The Brazilian Experience". *Int. J. Water Resour. Dev*., 14, pp. 127-140.

Bravard J. P. et Petit F., (1997). Les cours d'eau, dynamique du système fluvial, Armand Colin, 222p.

Briton M. N., (1979). The breeding biology and early development of *Clarias gariepinus* (Pisces : Clariidae) in Lake Sibaya, South Africa, with a review of breeding in species of the subgenus *Clarias (Clarias).* The Transactions of the Zoological Society of London.Vol. 35, (1), pages 1–45.

Brunel J.F., Scholz H. et Hiepko P., (1984). Flore analytique du Togo. Phanérogames.GTZ, Eschorn 751 p.

Caradot N., Granger D., Chapgier J., Cherqui F. and Chocat B., (2011). Urban flood risk assessment using sewer flooding databases. Water Science & Technology, 64(4), 832-840.

Carex Environnement, Diren Languedoc-Roussillon, (2004). Atlas des Zones Inondables des bassins versants du Vidourle, du Vistre et du Rhony, 34 p.

Catalogue des mesures de Prévention aux inondations, (1989). Plans d'exposition aux risques, Délégation en charge de l'environnement et des risques majeurs.

Cecchi P., (2007). L'eau en partage. Les petits barrages de la Côte d'Ivoire.

CERTU, (1999). Valoriser les zones inondables dans l'aménagement urbain. Repères pour une nouvelle démarche, 231 p. CETE Méditerranée, (2002) - Opérations de réhabilitation en zone inondable. Juin 2002, 70 p.

CETE Normandie Centre (2002). Opérations de réhabilitations en zone inondable. Avril 2002, 70 p.

Changnon D., (1994). Regional and temporal variations in heavy precipitation in South Carolina. In : International Journal of Climatology, n°14: 165-177.

Chanson H., (2009). "Embankment overflow protection systems and earth dam spillways," in Dams: Impacts, Stability and Design, W. P. Hayes and M. C. Barnes, Eds., ed: Nove Science Publishers, Inc., 2009, pp. 101-132.

Chave S., (2002). Pertinence de la cartographie hydro-géomorphologique dans l'approche des inondations rares à exceptionnelles : exemple de sept bassins fluviaux dans les Corbières et le Minervois. Géomorphologie : relief, processus, environnement, n° 4, p. 297-306

Colling G., (2005). Red List of the Vascular Plants of Luxembourg.In Ferrantia vol.42, 77 p.

Combe C., (2007). La ville endormie ? Le risque d'inondation à Lyon. Approche géohistorique et systémique du risque de crue en milieu urbain et périurbain. Thèse de doctorat de géographie. Lyon : Université Lumière Lyon 2, 467 p

Commission Européenne. (2013). JRC Scientific and Policy Report - PV Status Report.

Coque R., (1993). Géomorphologie, Armand Colin, 503 p.

Courcelaud A., (2000). Ressources forestières de l'aire protégée de faune de Togodo (Sud Togo) : Dynamique et diagnostic d'une gestion participative. Mém. Ingénieur eaux et forêts, ENGREF, Montpellier, France, 148 p.

Coyne et Bellier, (1990). Aménagement hydroélectrique d'Adjarala sur le fleuve Mono, étude d'avant-projet détaillé, Tome 4, Étude d'impact sur l'environnement. 78 p.

Coyne et Bellier, 1997. Aménagement hydroélectrique d'Adjarala, Étude d'impact sur l'environnement, Tome 1 et Tome 2 ; 100 p, mise à jour en 2006.

CPCS (Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols). (1967). Classification française des sols édition de 1967.

Crétat J., Vizy K. E., Cook H. K., 2013. How well are daily intense rainfall events captured by current climate models over Africa? Climatology Dynamics, 42, 2691-2711.

Cuc L., *et al.*, (2012). "Application of Marker Assisted Backcrossing to Introgress the Submergence Tolerance QTL SUB1 into the Vietnam Elite Rice Variety-AS996,". *American journal of Plant Sciences*, vol. 3, pp. 528-536, 2012.

Daget J., (1950). Poissons d'eau douce de la région côtière du Togo et du Dahomey. Notes Africaines, 46 : 57-59. Direction des pêches, 1987.

Dauge Y., (1999). Les politiques publiques de prévention des inondations - Rapport pour le premier ministre français, 23 p.

Dauphine A., (2001). *Risques et catastrophes, Observer-Spatialiser-Comprendre-Gérer*, Paris, Armand Colin, 288 p.

Dauphine A., (2005), Risques et catastrophes : observer, spatialiser, comprendre, gérer, édition A. Colin, Paris. https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00862393

De Mérona B., (2002). Le fleuve, le barrage et les poissons. Le barrage de Petit-Saut sur le Sinnamary en Guyane française (1989-2002), 37 p.

Demangeot J., (1999). La Tropicalité. Géographie physique intertropicale. Collection Armand Colin, 352 p.

Diallo D. M. (2010) Modélisation mathématique et simulation numérique de l'hydrodynamique : cas des inondations en aval du barrage de Diama. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté – Besançon, France, 166 p.

Diallo D. M., 2010. Modélisation mathématique et simulation numérique de l'hydrodynamique : cas des inondations en aval du barrage de Diama. Thèse de Doctorat unique, Université Franche-Comté – Besançon, France, 166 p.

Didrit M., (1996). Le rôle de l'Eglise catholique dans la démocratisation du Togo. Exposé de sociologie politique. Université Paris V, Sorbonne. 14p. Disponible sur internet :<URL : http://perso.club-internet.fr/nicus/Togo.htm

Diman C. P. & Tahir W., (2012b). Dam flooding caused a prolonged flooding. *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS* Vol:12 No:06, 71-75.

Diman C. P. and Tahir W., (2012a). "Potential of stagnant water due to dam flooding," *in Innovation Management and Technology Research* (ICIMTR), 2012 International Conference on, 2012, pp. 609-612.

Dimenc (2012). Le risque rupture de barrage. Rapport technique, 10 p

Diop Ngom F., Malou R., Dacosta H., Mendy A., 2002. Contrainte climatique des nappes d'eaux souterraines en zone soudano-séhélienne: cas de la nappe phréatique du bassin de la néma dans la région du sine au centre ouest du sénégal. African Journal of Science and Technology (AJST). *Science and Engineering Series*, 3(1), 44-50.

Direction de la faune et de la chasse, (2007). Rapport du processus de gestion durable des terres rétrocédées du Parcs National de Togodo-Sud, 9 p.

Direction générale de la statistique et de la comptabilité nationale (DGSCN), (2011). Recensement général de la population et de l'habitat. Rapport, 65 p.

Donou T. B., (2015). Extrêmes hydroclimatiques dans le basin inférieur du fleuve Ouémé : Diagnostic, impact agricole et scénarios de gestion. Thèse de Doctorat de Géographie, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 263 p.

Dourlens C. et Vidal-Nacquet P. A., (1992). La ville au risque de l'eau. L'Harmattan, logiques sociales, 127 p.

Dourlens C., (2004). *La question des inondations au prisme des sciences sociales. Un panorama de la recherche publique*, Paris: 2001 Plus, n° 63, 112 p.

DSPR, (2008). Etude pour la réalisation d'une cartographie et d'un système d'information géographique sur les risques majeurs au Maroc: mission 1 identification des risques le risque d'inondation, Rapport technique, Rabat, Maroc, 57 p.

Dumay H., (1999). L'évaluation des dommages des crues de l'Orne dans l'agglomération caennaise. In « Le coût du risque … l'évaluation des impacts socio-économique des inondations », p. 143-148.

Durin V., (2001). Recherches géomorphologiques et historiques sur la plaine alluviale de l'Ouvèze (84) entre Entrechaux et Bédarrides. Impact de la sédimentation sur l'évolution de l'inondabilité. Université de Provence, Aix-Marseille 1.

Durin V., et Mathieu L., (2006). L'approche hydro-géomorphologique en milieux méditerranéens. Une méthode de détermination des zones inondables. Edition SIEE / GINGER Environnement et Infrastructures, 140 p.

Dutruy S., (2001). Crues catastrophiques : organiser la prévention et gérer la crise. In Les Échos de CGPC, n° 33, avril 2001. p.3-4.

Estupina Borrell V. & Dartus D., (2001). Flash flood forecast hydrological model with space technology data integration.Cinquième colloque international sur le recours à

la télédétection en hydrologie : remote sensing and hydrology symposium, Montpellier - France.

FAO/PNUE (1972). Développement des ressources forestières. Togo : Inventaire pédologique de certains secteurs du sud-Togo. Rome, 160 p. + annexes.

FAO/PNUE, (1980). Système mondial de surveillance continue de l'environnement. Projet pilote sur la surveillance continue de la couverture forestière tropicale : Togo, cartographie du couvert végétal et étude de ses modifications. Rome, 116 p + annexes.

Faye S., Diaw M., Ndoye S., Malou R., Faye A., 2008. Groundwater recharge and salinization in Senegal coastal semiarid regions: Implication of climate change. *Groundwater and Climate in Africa* (Proceedings of the Kampala Conference, June 2008) IAHS Publication. 334-21, 163–173.

FEMA, (2013). Living With Dams. Know Your Risks. FEMA P-956, Catalog No. 13052-3, 28 p.

Garry G., Masson M. and Ballais J.L., (2002). La place de l'hydro-géomorphologie dans les études d'inondation en France Méditerranéenne. Géomorphologie : relief, processus, environnement, n° 4, p.297-306.

Gazelle F., (2006). Les risques actuels d'inondation à Toulouse, Midi-Pyrénées Patrimoine n° 8, 8 p.

Godoui C., Agbossou K. E., et Amoussou E., (2012). Perception des populations de la gestion des ressources en eau dans le pays Adja. In « Climat et Développement », LACEEDE, Université d'Abomey-Calavi, N°13, pp. 28-38.

Grelat D., (2002). Crues et inondations : une histoire d'hommes et d'eaux - Lettre Eau n°19-20 - Revue du réseau eau de France Nature Environnement, 72 p.

Grelat D., (2003). Inondations : (re)connaître le risque et s'adapter ! - Lettre Eau n°21-22 - Revue du réseau Eau de France Nature Environnement.

Hall J. B. and Swaine M. D., (1981). Distribution and ecology of vascular plants in a rain forest vegetation in Ghana. Geobotany I, 383 p.

Heidari A., (2009). Structural master plan of flood mitigation measures. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 61–75, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/61/2009/

Henderson K. G. and Vega A. J., (1996). Regional precipitation variability in the southern United States. Physical Geography, N° 17: pp 93-112.

Hirschboeck K.K. 1988. Flood climatology. in V.R. Baker et al. (eds), Flood Geomorphology. New York: John Wiley & Sons, pp 27-49.

Houéssou S., Amoussou E., Totin V. S. H., Semondji G. E., Ago E. & Houndénou C., (2015). Influence de l'exploitation de la centrale hydroélectrique de Nangbéto sur les écosystèmes de la basse vallée du fleuve Mono. In '' Climat et Développement', LACEEDE/FLASH/UAC, pp 5-17.

Houndénou C., Amoussou E. et Totin V.S.H (2008). Variabilité pluviohydrologique et inondation dans la Basse vallée du Mono (Bénin, Afrique de l'Ouest). In Ben Géo : Revue semestrielle de géographie du Bénin, n° 3 (2008), Bénin. Université d'Abomey-Calavi. pp.5-22.

Houndénou C., Amoussou E., Amouzouvi E., (2012). Dynamique de l'occupation du sol dans la commune d'Athiémé au Bénin. In « Climat et Développement », LACEEDE, Université d'Abomey-Calavi, N°13, pp.94-103.

Houndénou C., Totin V.S.H. et Amoussou E. (2007) : Caractérisation des champs pluviométriques statistiques dans le complexe Mono-Couffo en Afrique Occidentale dans le Golfe de Guinée. (2007) In Revue BenGéo. Département de Géographie et Aménagement du Territoire. FLASH UAC. (Bénin), n°2, pp. 5-24

Houngbedji G. M., (2010). État de conservation du singe à ventre rouge (Cercopithecus erythrogaster erythrogaster) dans la dépression de Tchi au Sud Bénin. Mémoire de DESS/AGRN, Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 93 p.

Hounkpatin P., (2013). L'énergie électrique au Bénin : état des lieux et perspectives de développement par adoption d'une nouvelle politique nationale. Conférence inaugurale de JRSA 2013.

Hugueny B., (1989). Biogéographie et structure des peuplements de poissons d'eau douce de l'Afrique de l'ouest : approches quantitatives. Thèse de doctorat soutenue le 28/11/89.

Humbert J., Cloots A.R. et Maire G., (1987). Crues et inondations (genèse, méthodes d'étude, impacts et prévention), Comité national français de géographie. Commission d'hydrologie continentale, Centre d'études et de recherches éco-géographiques, Université Louis Pasteur, Centre d'études et de recherches éco-géographiques, 363 p.

IRD (2001). "Faisabilité de la modélisation pluie débit." Programme d'optimisaton de la gestion des réservoirs (POGR), Paris, France, 20 p.

ISO 31000:2009 – Management du risque — Principes et lignes directrices, http://www.iso.org/iso/home/

James, L.D. and Korom, S.F. (2001). “Lesson from Grand Forks: Planning Structural Flood Control Measures”, *Nat. Hazards Rev*., 2**,** pp. 22-32.

Jansen L., Lariyah M. S., Mohamed Nor Bin M. D. and Pierre Y. J., (2013). Hydropower Reservoir for flood control: A case study on ringlet reservoir, cameron highlands, malaysia. *Journal of flood engineering (JFE)*, 87-102.

Jeunes volontaires pour l’environnement (JVE), (2007). Mise en place d’un cadre de dialogue national multi-acteurs sur les barrages et le développement durable au Togo, pp. 33-46, 72p.

Jiang S., (1998). "Application of stochastic differential equations in risk assessment for flood releases," Hydrological Sciences Journal vol. 43(3), pp. 349-360, June 1998.

Karsenty A., (1995). Maîtrises foncières et gestion forestière. In La sécurisation foncière en Afrique. Paris : Karthala, p. 103-125.

Keim B. D., (1996). Spatial, synoptic, and seasonal patterns of heavy rainfall in the southeastern United States. In : Physical Geography, N° 17: pp 313-328.

Kemavo A., (2012). Contribution des technologies spatiales et de l’approche systémique dans la gestion intégrée des ressources naturelles : Cas de l’aire protégée de Togodo Sud, Togo ; Mémoire DESS ERAIFT, Université de Kinshasa ; 151 p.

Kirsch TD, et al., (2012). "Impact of the 2010 Pakistan Floods on Rural and Urban Populations at Six Months.," 2012 Aug 22 [last modified: 2012 Aug 29]. 2012.

Kodja D. J., Vissin E. W., Amoussou E. et Boko M., (2013). Risques hydroclimatiques et problèmes d’aménagement agricoles dans la basse vallée de l’Ouémé à Bonou au Bénin (Afrique de l’Ouest). In « Climat, Agriculture et Ressources en eau d’hier à demain ». XXVIème colloque de l’Association Internationale de Climatologie (AIC), Cotonou, Bénin, pp 310-315.

Kokou K, Afiademanyo K. et Akpagana K., (1999). Les forêts sacrées littorales du Togo : rôle culturel et de conservation de la biodiversité. J. Rech. Sci. Univ. Bénin (TOGO), 3 (2) : 91-104.

Kokou K., (1998). Les mosaïques forestières au sud du Togo : Biodiversité, Dynamique et activités humaines, Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, Montpellier, France, 140 p.

Kokou K., Batawila K., Akoegninou A. et Akpagana K., (2000). Analyse morpho-structurale et diversité floristique des îlots de forêt protégés dans la plaine côtière du sud du Togo. Études flor. veg. 5 : 33-48.

Kokou K., Guelly A.K., Afiademanyo K., Mawussi, G., Bowessidjaou E. et Akpagana K., (2002). Évaluation de la biodiversité des mares du sud-est du Togo. Bulletin Ompo, n° 23, pp 3-10.

Konrad C.E., (1994). Moisture trajectories associated with heavy rainfall in the Appalachian region of the United States. In : Physical Geography, N° 15: pp 227-248.

Lalaye P., Chikou A., Philippart J.-C., Teugels G. et Vandewalle P., (2004). Étude de la diversité ichtyologique du bassin du fleuve Ouémé au Bénin (Afrique de l'Ouest). Cymbium 28 : 329-339.

Lalèyè P., Chikou A. et Wuemenou T., (1997). Poissons d'eaux douces et saumâtres du Bénin : Inventaire, distribution, statut et conservation. Inventaire des poissons menacés de disparition du Bénin. 80 p. Rapport d'étude. Coop. bénino-néerlandaise/Ambassade Royale des Pays-Bas, Cotonou (Bénin).

Lamouroux M., (1969). Notice explicative de la carte pédagogique du Togo. ORSTOM, Paris, 86 p.

Lang M., (2008). Evaluer les risques d'inondation. Cemagref - Chercheurs d'eau... Cemagref – Chercheurs. www.cemagref.fr, 2 p.

Larras J., (1975). Défenses contre les crues, Edition Eyrolles, 135p.

Lederoun D *et al., (*2011). *Ichtyodiversité* du bassin du Mono en aval des rapides d'Adjarala au Bénin (Afrique de l'Ouest), 32 p.

Legates D.R. and Mather J.R., (1992). An evaluation of the average annual global water balance. In : Geographical Review, N° 82: pp 253-267.

Leon, A.S., Kanashiro, E.A., Gichamo, T.Z., Valverde, R. and Christopher, G.M. (2012). "Towards the Intelligent Control of River Flooding", *World Environmental and Water Resource Congress*, 1687-1696.

Leroy Poff N. and. Hart D. D, (2002). How Dams Vary and Why It Matters for the Emerging Science of Dam Removal. *BioScience* 659, Vol. 52 No.8.

Lévêque A., (1979). Carte des sols du Togo à 1/200 000 sur le socle granito-gneissique limité à l'ouest et au nord par les Monts Togo, et notice explicative n°82 ORSTOM. Paris 77 p.

Lévêque C, Fairhurst C.P., Abban K., Paugy D., Curtis M.S. and Traore K., (1988). Onchocerciasis Control Programme in West Africa : ten years monitoring of fish populations. Chemosphere, Vo1.17, No.2, pp. 421-440.

Lévêque C. & Paugy D., (1984). Guide des poissons d'eau douce de la zone du programme de lutte contre l'onchocercose en Afrique de l'Ouest. Convention ORSTOM-OMS., 123 p.

Lévêque C. et Paugy D., (2006). Les poissons des eaux continentales africaines. Diversité, écologie, utilisation par l'homme. Éditeurs scientifiques : Paris, 86 p.

Lévêque C., (1991). Problématiques des écosystemes aquatiques, Écosystèmes et sociétés, 37 p.

Luis J. Sidek M. L., Desa M.B.N.M., Julien Y.P. (2013). Hydropower reservoir for flood control: a case study on ringlet reservoir, Cameron highlands, Malaysia. *Journal of Flood Engineering*, 87-102.

Maley J., (1996). The African rain forest – main characteristics of changes in vegetation climate from the Upper Cretaceous to the Quaternary.In Essays on the Ecology of the Guinea-forest. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, 04 (B) : 51-73.

McCabe G. J. Jr. and Wolock D. M., (1992). Effects of climatic change and climatic variability on the Thornthwaite moisture index in the Delaware River Basin. In : Climatic Change, N° 20: pp 143-153.

Mérad M. M., (2004). Appui technique aux comites nationaux d'harmonisation des pratiques des études de dangers et des expertises DRA 38 : Analyse de l'état de l'Art sur les grilles de criticité. Rapport technique d'étude, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Paris, France, 94 p.

Meva'a Abomo D., Fouda M., ZOUM B. C. et Kamwo M., (2010). Analyse spatiale du risque d'inondation dans le bassin versant du Mbanya à Douala, capitale économique du Cameroun. Novatech 2010, 10 p.

Mimikou A. M., Niadas L. A., Jmidjissavva P.S., Kolivopoulos Y.S., (1994). Regional techniques for extreme rainfall and runoff prediction. Hydrol. continent., vol. 9, no 1, 1994 : 2.532.

Ministère de l'environnement et des ressources forestières (MERF), (2011). Plan d'action forestier national (Phase 1). Projet TCP/TOG/3203(D).

Montchowui E., Lalaye P., Philippart J.-C. & Poncin P., (2007). Biologie de la reproduction de Labeo parvus Boulenger, 1902 (Cypriniformes : Cyprinidae) dans le bassin du fleuve Ouémé au Bénin en Afrique de l'Ouest. Cahiers d'Éthologie, 22 (2) : 61-80.

Mugangu T. et Mushengezi V. K., (2000). Exploitation conflictuelle et non durable par la gestion séparée de systèmes contigus de production et de conservation de la nature : Cas du Mont Tshiaberimu au Parc national des Virunga, République démocratique du Congo. Deuxième colloque pan-africain sur l'utilisation durable des ressources naturelles en Afrique : Ouagadougou, Burkina Faso.

Mugangu T., (1983). A new approach to the management of National Parks in Zaire. Cooperative Park Studies Unit, Report # 130. Msc Thesis, University of IDAHO, USA.

Ogouwalé R. et Houssou S. CH., (2012). Indicateurs hydro-pluviométriques des changements climatiques dans le bassin versant du fleuve Mono. In Revue climat et Développement N°7 du LACEEDE/UAC, pp 98-109.

Okoumassou K., (2004). Dénombrement des oiseaux d'eau au Togo in Diagana & Dodman. 2006. Effectifs et distribution des oiseaux d'eau en Afrique : Résultats des dénombrements des oiseaux d'eau en Afrique, 2002, 2003 & 2004. Wetland International, Dakar, Sénégal : 62-64.

Olivry J.C. et Boulègue J., (1995). Grands bassins fluviaux prériatlatiques : Congo, Niger, Amazone. Actes du colloque PEGI INSU-CNRS-ORSTOM.

ORSTOM et CNRS, (1996). Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux. Symposium organisé par le programme ECOFIT, Paris, 20-22 mars 1996, 335 p.

Paugy D. et Benech V., (1989). Les poissons d'eau douce des bassins côtiers du Togo (Afrique de l'Ouest). Revue d'hydrobiologie tropicale, 1989, 22 (4), pp. 295-316. ISSN 0240-8783.

Paugy D. et Benech V., (1989). Les poissons d'eau douce des bassins côtiers du Togo (Afrique de l'Ouest). Rev. Hydrobiol. Trop., 22(4) : 295-316.

Paugy D., (1994). Écologie des poissons tropicaux d'un cours d'eau temporaire (Baoulé, haut bassin du Sénégal au Mali) : adaptation au milieu et plasticité du régime alimentaire Didier Paugy (1) Rev. *Hydrobiol*. *trop*. 27 (2) : 157-172 (1994).

Paugy D., Benech V. et Etou K., (1988). La faune ichtyologique des bassins du Mono et du lac Togo (Togo), 15 mai 1988.

Paugy D., Benech V., Etou K., (1968). La faune ichtyologique des bassins du Mono et du Lac Togo. (Togo). Rapport n° 23 Cahiers de l'ORSTOM, 107 p.

PNAE, (2002). Monographie nationale sur la diversité biologique. 171 p. + Annexes.

Raghunath H.M., (2008). Hydrology: Principles, Analysis, Design. New Age International Limited, Publishers, New Delhi, Revised Second Edition.

Rasid H. and Mallsk A., (1996). "Living on the edge of stagnant water: An assessment of environmental impacts of construction-phase drainage congestion along Dhaka city flood control embankment, Bangladesh," *Environmental Management*, vol. 20, pp. 89-98, 1996.

Robinson N., (1972). Birds note from Republique of Togo. Bull. Niger. Orn. Soc., 9 : 85-89.

Robinson P. J. and Henderson K. G., 1992. Precipitation events in the south-east United States of America. In : International Journal of Climatology, 12: 701-720.

Rossi G. et Antoine A., 1990. Impacts hydrologiques et sédimentologiques d'un grand barrage : l'exemple de Nangbéto (Togo-Bénin), *Rev. Géom. Dyn*. N° 39 (2), pp 63-77.

Rossi G., (1996). L'impact des barrages de la vallée du Mono (Togo-Benin). La gestion de l'incertitude. In : Géomorphologie : relief, processus, environnement. Octobre 1996, vol. 2, n°2. pp. 55-68.

Salami-Cadoux M. L., (1991). Inventaire de faune sur le site du futur barrage et de la future retenue d'Adjarala (Togo-Benin) In : Aménagement hydroélectrique d'Adjarala sur le fleuve Mono, étude d'avant-projet détaillé. Communauté électrique du Bénin, 77 p.

Salami-Cadoux M.L., (1993). Inventaire de la faune sur le site du futur barrage et de la future retenue d'Adjarala. Projet Campus-Adjarala, 15 p.

Samarou M., (2010). Importance socio-économique de la filière des produits forestiers non ligneux au Togo : Cas du miel dans la Région. Master École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, E.N.G.R.E.F de Montpellier.

Segniagbeto G. H. et Guelly K. A., (2010). Diagnostic sur les composantes du Parc national de Togodo-Sud. Rapport de fin d'étude ONG Agbo-Zegue, 55 p.

Segniagbeto H., (2009). Herpétofaune du Togo : Taxinomie, biogéographie. Thèse de doctorat. Univ. Lomé (Togo) & MNHN Paris (France). Tome I : 1-172 & Tome II : 1-192.

Shafiée, M.J., Dashti, M. and Abrishamchi, A. (2012). "A System Dynamics Model for Improving Flood Control Operation Policies". *World Environmental and Water Resources* Congress, pp. 962 -972.

Shelton M. L., (1998). Seasonal hydroclimate change in the Sacramento River Basin, California. *In : Physical Geography*, N° 19: pp 239-255.

Sofreco, (2010). Réalisation de l'étude d'un plan stratégique du sous-secteur de l'énergie électrique au Togo.

Taylor C.J., Alley W.M., 2001. Ground-Water-Level Monitoring and the Importance of Long-Term Water-Level Data. U.S. Geological Survey Circular 1217, Denver, Colorado, 77 p.

Tchamiè K. T.T., (1994). Enseignements à tirer de l'hostilité des populations locales à l'égard des aires protégées au Togo ; Unasylva N° 176.

Tébié K., (2013). Les modalités de création des séries agricoles dans l'optique d'une gestion consensuelle de la forêt classée de Tététou. Mémoire de l'INFA de Tové ; 50 p.

Teugels G. G., (1986). A systematic revision of the African species of the genus Clarias (Pisces ; Clariidae). *Ann. Mus. R. Afr. Centr*., 249, 199 p

Totin V. S. H., (2005). Tendances hydroclimatiques et scénarios de gestion des ressources en eau sur les plateaux du sud-Bénin. Mémoire de DEA, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 66 p.

Totin V. S. H., Amoussou E., Odoulami L., Boko M., Blivi B. A. (2016). Seuils pluviométriques des niveaux de risque d'inondation dans le bassin de l'Ouémé au Bénin (Afrique de l'Ouest). In '' XXIXe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie'', Lausanne – Besançon, pp 369-374.

Totin V.S. H., Amoussou E. et Boko M. (2008). Impacts des migrations de la mousson ouest africaine sur la disponibilité en eau de surface dans le bassin du Couffo au Bénin (Afrique de l'Ouest). Rev. Sci.Env. Univ., Lomé (Togo), 2008 n°005. ISSIN 1812-1403, Mars 2008.

Tramblay Y., Amoussou E., Dorigo W. et Mahé G., (2014). Flood risk under future climate: linking extreme value models and flood generating processes. Journal of Hydrology 519 (2014) 549–558. www.elsevier.com/locate/jhydrol

UICN, (2001). IUCN Red List Categories : Version 3.1. Prepared by the IUCN Species Survival Commission.IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.

UICN., (1994). Catégories de l'UICN pour les Listes rouges. Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), 22 p.

UICN/PACO, (2008). Parcs et réserves du Togo, Évaluation de l'efficacité de la gestion des aires protégées : aires protégées du Togo, 44 p. ISBN : 978-2-8317-1130-0.

Vannote R. L., Minshall G.W., Cummins K. W., Sedell J.R., and Cuching C.E., (1980). The River Continuum Concept. Can. J. Fish Aquat. Sci. 37 : 130-137.

Viven W. J. A. R., Richter C. J. J., Van Oordt P. G. W. J., Janseen J. A. L. and Huisman E. A., (1985). Practical Manual for the Culture of the African Catfish (Clarias gariepinus).Joint publication of Directorate General International Cooperation of the Ministry of Foreign Affairs, The Hague, the Netherlands, Department of Fish Culture.94 p.

Vivian H., (1977). Averses extensives et crues concomitantes dans l'Arc alpin : étude hydro-météorologique, Lille, Atelier Reproduction des thèses, Université Lille III ; Paris.

Volkoff B. et Willaime P., (1976). Carte pédologique de reconnaissance de la République du Bénin à 1/200.000 Feuille de Porto-Novo : Notice explicative n° 66 (1) ORSTOM. Paris 39 p.

Volkoff B., (1976). Carte pédologique de reconnaissance de la République du Bénin à 1/200.000 Feuille d'Abomey : Notice explicative n° 66 (2) ORSTOM. Paris 41 p.

Vyas, J. (2001). "Water and Energy for Development in Gujarat with Special Focus on the Sardar Sarovar Project". *Int. J. Water Resour. Dev*., 17 (1), pp. 37-54.

Wolock D. M. and McCabe G. J. Jr., (1999). Explaining spatial variability in mean annual runoff in the conterminous United States. In : Climate Research, N° 11: pp 149-159.

Sites web

www.cemagref.fr

www.club-cevenol.org

http://www.midi-pyrenees.ecologie.gouv.fr

http://www.geoportail.fr

http://www.inondationthore.com

www.meteofrance.com

http://www.notre-planete.info

www.office-eau974.fr

www.bretagne-environnement.org

www.prim.net

www.epa.govt.nz/...

Le risque rupture de barrage

http://www.prim.net > dossier d'information rupture de barrage

Direction régionale de l'environnement Provence-Alpes-Côte d'Azur (DIREN PACA)

http://www.paca.ecologie.gouv.fr

Direction régionale de l'industrie, de la recherche et de l'environnement (DRIRE)

http://www.paca.drire.gouv.fr

Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt du Var (DDAF 83)

http://ddaf.cdig-83.org

Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR)

http://www.barrages-cfbr.org

Cartographie de l'onde de submersion des grands barrages

http://www.paca.ecologie.gouv.fr

Annexes

Liste des figures

	Titres	Pages
	Chapitre 1 : Caractéristiques du milieu d'étude et historiques des barrages de Nangbeto et d'Adjarala	
Figure 1.1 :	Carte de localisation du bassin-versant du Mono	18
Figure 1.2 :	Topographie du secteur d'étude	20
Figure 1.3 :	MNT du futur site du barrage d'Adjarala	21
Figure 1.4 :	Représentation 3D de la zone du futur barrage (Vue du Sud)	21
Figure 1.5 :	Schématisation de la topographie des sites des barrages sur le bassin du fleuve Mono	22
Figure 1.6 :	Faciès géologique du site du barrage d'Adjarala	24
Figure 1.7 :	Différents types de sols du bassin	26
Figure 1.8 :	Profil type d'altération des gneiss et granites	27
Figure 1.9 :	Schéma des types de temps saisonniers en fonction de leur position par rapport au front intertropical (FIT).	28
Figure 1.10 :	Cartographie des différents domaines climatiques du bassin	30
Figure 1.11 :	Evolution mensuelle des précipitations de 1961-2000 en trois types de classes	31
Figure 1.12 :	Régime des précipitations dans le bassin de 1961 à 2010	31
Figure 1.13 :	Réseau hydrographique du bassin	33
Figure 1.14 :	Profil du fleuve Mono	34
Figure 1.15 :	Schéma de fonctionnement type d'un barrage hydroélectrique	47
Figure 1.16 :	Schéma de fonctionnement type du barrage d'Adjarala	51
	Chapitre 2 : Point des connaissances, données et méthodes d'évaluation des risques d'inondation	
Figure 2.1.	Représentation du risque en fonction de l'aléa et de la vulnérabilité, courbes isorisques	58
Figure 2.2 :	Réseau hydrographique et points de mesures hydroclimatologiques	66
Figure 2.3 :	Positionnement des barrages hydroélectriques dans le bassin du Mono	69
Figure 2.4:	Zone inondable sous l'effet du barrage d'Adjarala	70
Figure 2.5 :	Reconstitution des débits annuels au droit d'Adjarala au moyen de deux relations débit-débit.	73
Figure 2.6 :	Schéma de fonctionnement du modèle GRP (Tangara, 2005)	79
Figure 2.7:	Catégorisation des risques suivant la courbe de Farmer	84
Figure 2.8:	Processus global d'appréciation et de traitement des risques	91
	Chapitre 3 : Contexte hydroclimatique et dynamique de l'occupation du sol dans le fonctionnement des écoulements de surface	
Figure 3.1a :	Variation spatiale mensuelle (janvier à juin) des précipitations dans le bassin du Mono de 1961	94
Figure 3.1b :	Variation spatiale mensuelle (juillet à décembre) des précipitations dans le bassin du Mono de 1961	95
Figure 3.2 :	Variation spatiale des précipitations moyennes annuelles (1961-2010) sur le bassin-versant du Mono	96
Figure 3.3 :	Régimes des précipitations journalières moyennes du bassin versant du Mono de 1961 à 2010	97

Figure 3.4 :	Régime des écoulements dans le bassin versant du Mono à Corrékopé en amont du barrage de Nangbéto de 1961à 1991	99
Figure 3.5 :	Régime des écoulements dans le bassin versant du Mono Nangbéto (entrant et sortant) en amont du projet de barrage d'Adjarala de 1988 à 2010	100
Figure 3.6 :	Régime des écoulements dans le bassin versant du Mono à Athiémé (données non reconstituées) en aval des barrages de Nangbéto et du projet d'Adjarala de 1961 à 2005	100
Figure 3.7 :	Régime des écoulements dans le bassin versant du Mono à Adjarala (données reconstituées à partir de Nangbéto et d'Athiémé) de 1961 à 2010	101
Figure 3.8 :	Variation journalière de la hauteur d'eau dans le bassin du fleuve Mono à Nangbéto de 1988 à 2010 en amont du barrage d'Ajarala (en construction).	101
Figure 3.9 :	Evolution des apports d'eau reconstitués des barrages de Nangbéto (1961-1987) et Adjarala (1961-2010)	103
Figure 3.10 :	Relation entre pluie-débit dans le bassin du Mono au pas de temps journalier	104
Figure 3.11 :	Relation entre pluie-débit (naturel et influencé) dans le bassin du Mono au pas de temps mensuel de 1961 à 2010	104
Figure 3.12 :	Variation du coefficient de ruissellement dans le bassin-versant du Mono suivant les périodes d'occupation du sol	105
Figure 3.13 :	Variation de niveau piézométrique autour du barrage de Nangbéto en fonction de la pluviométrie en 2000 et 2010.	107
Figure 3.14 :	Variation de niveau piézométrique en fonction des débits entrant et sortant et du niveau d'eau de la retenue en 2000 et 2010 dans le bassin du barrage de Nangbéto	108
Figure 3.15 :	Etat de l'occupation des terres dans le bassin-versant du fleuve Mono des années 1986, 2000 et 2014	111
Figure 3.16 :	Evolution des unités paysagiques des années 1986, 2000 et 2014 dans le bassin-versant du Mono	112
Figure 3.17 :	Dynamique des unités d'occupation du sol dans le bassin du Mono	112

Chapitre 4 : Niveau du risque d'inondation et vulnérabilité des systèmes de la basse vallée du Mono

Figure 4.1a :	Répartition spatiales des seuils pluviométriques de risques acceptables (limités et modérés) dans le bassin du Mono	117
Figure 4.1b :	Répartition spatiales des seuils pluviométriques de risques inacceptables (significatifs et critiques) dans le bassin du Mono	118
Figure 4.2 :	Variation des évènements pluvieux journaliers caractéristiques des risques d'inondation dans le secteur amont du barrage de Nangbéto de 1961 à 2010	119
Figure 4.3 :	Variation des évènements pluvieux journaliers caractéristiques des risques d'inondation dans le secteur entre deux barrages de 1961 à 2010	120
Figure 4.4 :	Variation des évènements pluvieux journaliers caractéristiques des risques d'inondation dans le secteur aval du barrage d'Adjarala (en construction) de 1961 à 2010	121
Figure 4.5 :	Potentialité d'accumulation d'eau dans le bassin du fleuve Mono	122
Figure 4.6 :	Répartition des précipitations journalières maximales en fonction des périodes de retour de 2 ans à 50 ans	124
Figure 4.7 :	Variation des évènements hydrométriques (a) et de hauteur	128

	d'eau (b) journalières caractéristiques des risques d'inondation dans le bassin-versant du fleuve Mono	
Figure 4.8 :	Capacité de rétention en eau du bassin	129
Figure 4.9 :	Diagramme de vulnérabilité socio-économique relatif aux systèmes humains dans la basse vallée du Mono	132
Figure 4.10 :	Diagramme de vulnérabilité socio-économique relatif aux systèmes environnementaux dans la basse vallée du Mono	132
Figure 4.11 :	Diagramme de vulnérabilité socio-économique relatif aux systèmes matériels dans la basse vallée du Mono	133
Figure 4.12 :	Diagramme d'indicateurs d'impacts des aléas d'inondations sur chaque système dans la basse vallée du Mono	134
Figure 4.13 :	Carte de relief montrant le secteur le plus vulnérable à l'inondation dans le bassin du fleuve Mono	138

Chapitre 5 : Conséquences d'inondation et stratégies de gestion dans le bassin-versant du fleuve Mono

Figure 5.1 :	Pertes de production agricoles dans la basse vallée du Mono de 2001 à 2010	142
Figure 5.2 :	Pertes d'animaux domestiques dans la basse vallée du Mono de 2001 à 2010	142
Figure 5.3 :	Evolution des pertes de superficies d'étangs et de production halieutique dans la basse vallée du Mono de 2001 à 2010	143
Figure 5.4 :	Variation mensuelle de nombres de cas de maladies diarrhéique et du paludisme en 1995 et 1999 dans la partie Est du bassin du fleuve Mono	144
Figure 5.5 :	Types de dégâts et degré de submersion en rapport avec la crue du Mono	146
Figure 5.6 :	Schéma d'alerte adopté par la Direction Générale de l'Hydraulique (DGH) en cas d'inondation	152
Figure 5.7 :	Signal d'alerte spécifique aux ouvrages hydrauliques	154
Figure 5.8 :	Variabilité des écoulements de surface observés et prédits en calage (1988-1995) et en validation (1996-2003) en amont du barrage de Nangbéto dans le bassin du Mono	160
Figure 5.9 :	Corrélation écoulements observés et de prévision en calage (1988-1995) et en validation (1996-2003) en amont du barrage de Nangbéto dans le bassin du Mono	161
Figure 5.10 :	Variabilité des écoulements de surface observés et prédits en calage (1988-1995) et en validation (1996-2003) en aval du barrage de Nangbéto à Athiémé dans le bassin du Mono	162
Figure 5.11 :	Corrélation écoulements observés et de prévision en calage (1988-1995) et en validation (1996-2003) en aval du barrage de Nangbéto à Athiémé dans le bassin du Mono	162
Figure 5.12 :	Profil du niveau d'eau maximal annuel et seuils de risque dans la retenue de Nangbéto	165
Figure 5.13 :	Dispositif d'Organisation de la Réponse de la Sécurité Civile (ORSEC) à la gestion des évènements hydrocatastrophes dans le bassin-versant du fleuve Mono	166
Figure 5.14 :	Plan communal ou préfectoral de sauvegarde	168

Liste des photos

	Titres	Pages
	Chapitre 1 : Caractéristiques du milieu d'étude et historiques des barrages de Nangbeto et d'Adjarala	
Photo 1.1 :	Aspects du substratum géologique contrasté du bassin du Mono à Adjarala (a) et à Athiémé (b).	23
Photo 1.2 :	Berges du Mono fortement érodées à Athiémé	27
Photo 1.3 :	Inondation dans les agglomérations de la basse vallée du fleuve Mono	35
Photo 1.4 :	Forêt galerie le long du bassin du Mono à Nangbéto et à Adjarala	37
Photo 1.5 :	Dégradation du couvert végétal dans le bassin du Mono à Asrama	38
Photo 1.6 :	Tracé du ruissellement des eaux pluviales vers le lit du fleuve Mono à Asrama	38
Photo 1.7 :	La forêt galerie sur le site du projet de construction du barrage d'Adjarala	39
Photo 1.8 :	*Brycinus macrolepidotus* (a) et *Tilapia* (b), espèces de poisson la plus représentée dans les captures dans la zone d'Adjarala	44
Photo1.9 :	Vue d'ensemble du barrage de Nangbéto	48
Photo 1.10 :	Schéma des évacuateurs de crue dans le bassin du Mono à Nangbéto	48
	Chapitre 4 : Niveau du risque d'inondation et vulnérabilité des systèmes de la basse vallée du Mono	
Photo 4.1 :	Inclinaison des chambres due à l'humidité des sols suite à l'inondation dans le secteur du barrage d'Adjarala	135
Photo 4.2 :	Indicateurs de vulnérabilité des établissements humains aux inondations dans la basse vallée	139
	Chapitre 5 : Conséquences d'inondation et stratégies de gestion dans le bassin-versant du fleuve Mono	
Photo 5.1 :	Conséquences socio-économique des inondations dans l'écosystème Mono	145
Photo 5.2 :	Construction de pont traversant le fleuve Mono à Athiémé	156

Liste des tableaux

	Titres	Pages
	Chapitre 1 : Caractéristiques du milieu d'étude et historiques des barrages de Nangbeto et d'Adjarala	
Tableau 1.I :	Récapitulatif hydrologique de la retenue d'Adjarala	54
	Chapitre 2 : Point des connaissances, données et méthodes d'évaluation des risques d'inondation	
Tableau 2.I:	Classification des valeurs SPI et catégorie de sécheresse / inondations	82
Tableau 2.II:	Correspondance entre valeurs d'indices standardisés et niveaux de risques d'inondation	84
Tableau 2.III:	Modèle de matrice de criticité des aléas d'inondation, utilisé dans le bassin du Mono (*Source : Inspiré Mérad, 2004*)	85
Tableau 2.IV :	Barème d'évaluation des risques d'inondation	86
	Chapitre 4 : Niveau du risque d'inondation et vulnérabilité des systèmes de la basse vallée du Mono	
Tableau 4.I :	Seuils pluviométriques journaliers des risques d'inondation dans la période 1961-2010 dans le bassin du Mono	116
Tableau 4.II :	Périodes de retour des aléas pluviométrique journalier extrêmes des risques d'inondation dans le bassin du Mono	125
Tableau 4.III :	Seuils hydrométriques journaliers des risques d'inondation dans le bassin du Mono	126
Tableau 4.IV:	Périodes de retour évènements hydrométriques journaliers extrêmes dans le bassin du Mono	130
Tableau 4.V :	Matrice de criticité des aléas pluviométriques journaliers de risques d'inondation dans le bassin du Mono	136
Tableau 4.VI :	Matrice de criticité des aléas hydrométriques journaliers de risques d'inondation dans le bassin du Mono	136
Tableau 4.VII:	Matrice de criticité des hauteurs d'eau journalières du barrage de Nangbéto en relation avec les risques d'inondation dans le bassin du Mono	137
	Chapitre 5 : Conséquences d'inondation et stratégies de gestion dans le bassin-versant du fleuve Mono	
Tableau 5.I :	Périodes de calages et de validation du modèle GRP pour l'étude	160

Table des matières

	Titres	Pages
	Sommaire	2
	Dédicace	4
	Sigles et acronymes	5
	Remerciements	6
	Résumé	9
	Abstract	10
	Introduction générale	**11**
	Chapitre 1 : Caractéristiques du milieu d'étude et historiques des barrages de Nangbeto et d'Adjarala	**17**
	Introduction	17
1.1.	Localisation géographique du bassin du Mono	17
1.2.	Caractéristiques physiques du bassin-versant du fleuve Mono	19
1.2.1.	Topographie et morphologie du milieu	19
1.2.2.	Contexte géologique et pédologique	22
1.2.3. 1	Climat et hydrographie	28
1.2.3.1.	Environnement climatique	28
1.2.3.2.	Caractéristiques hydrographique et hydrologique du bassin	32
1.2.4.	Importance de la formation végétale et faunique	36
1.3.	Environnements humains du bassin	41
1.3.1.	Peuplement et habitat	42
1.3.2.	Activités socio-économiques	43
1.3.2.1.	Agriculture	43
1.3.2.2.	Pêche	43
1.4.	Historique des barrages hydroélectriques sur le fleuve Mono	44
14.1.	Historique et description de l'aménagement hydroélectrique de Nangbéto	45
1.4.2.	Historique et description de l'aménagement hydroélectrique d'Adjarala	50
1.4.2.1.	Historique	50
1.4.2.2.	Description sommaire	52
1.4.3.	Opportunités des barrages hydro-électriques	53
	Conclusion partielle	55
	Chapitre 2 : Point des connaissances, données et méthodes d'évaluation des risques d'inondation	**56**
	Introduction	56
2.1.	Point des connaissances	56
2.1.1.	Clarification des concepts	56
2.1.2.	Etat des connaissances	60
2.1.2.1.	Evénements hydroclimatiques et inondation	61
2.1.2.2	Barrages et risques d'inondation	63
2.2.	Nature des données et techniques de collecte	64
2.2.1.	Données climatologiques et hydrologiques	65
2.2.2.	Données topographiques : création d'un MNT	65
2.2.3.	Données d'occupation du sol et planimétriques	67
2.2.4.	Données hydrogéologiques	67
2.2.5.	Données démographiques et socio-économiques	68
2.2.6.	Données d'observation et d'enquêtes socio-anthropologiques	71
2.2.7.	Critique des données hydrométéorologiques manquantes et reconstitution des débits à Adjarala	71

2.3.	Méthodes de traitement des données	73
2.3.1.	Spatialisation des données pluviométriques	73
2.3.2.	Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	77
2.3.3.	Estimation du coefficient de ruissellement	77
2.3.4.	Simulation des crues avec le modèle GRP (Génie Rural pour la Prévision des crues)	78
2.3.5.	Dépendance statistique entre pluie et écoulement dans le bassin	80
2.3.6.	Détermination des seuils des aléas d'inondation	81
2.3.7.	Période de retour selon la méthode de Gumbel	82
2.3.8.	Caractérisation des niveaux de risques d'inondation et matrice de criticité	84
2.3.9.	Evaluation de la vulnérabilité aux aléas d'inondation	85
2.3.10.	Détermination de la dynamique de l'occupation du sol	86
2.3.10.1	Traitement numérique de l'image satellitaire	87
2.3.10.2	Méthodes d'évaluation spatiale de l'état des unités paysagiques	89
2.3.11.	Cartographie de l'aléa et de la vulnérabilité à l'inondation	89
2.4.	Modèle d'analyse des résultats	90
	Conclusion partielle	91
Chapitre 3 : Contexte hydroclimatique et dynamique de l'occupation du sol dans le fonctionnement des écoulements de surface		**93**
	Introduction	93
3.1.	Variabilité hydroclimatique dans le bassin	93
3.1.1.	Evolution des précipitations dans le bassin	93
3.1.2.	Evolution des écoulements dans le bassin	98
3.1.2.1.	Régimes hydrologiques journaliers moyens du bassin	98
3.1.2.2.	Analyse du niveau d'eau dans la retenue de Nangbéto	101
3.1.2.3.	Analyse de la relation pluie-débit	103
3.1.3	Ruissellement : facteur de risque d'inondation dans le bassin	105
3.1.4.	Niveau piézométrique comme indicateur de risques dans le bassin à Nangbéto	107
3.2.	Occupation du sol: un des moteurs de la dynamique des lames d'eau ruisselée et infiltrée dans le bassin	109
	Conclusion partielle	113
Chapitre 4 : Niveau du risque d'inondation et vulnérabilité des systèmes de la basse vallée du Mono		**114**
	Introduction	114
4.1.	Aléas d'inondation et niveau de risque	114
4.1.1.	Seuils pluviométriques et niveau de risque d'inondation	114
4.1.2.	Périodes de retour des aléas pluviométriques extrêmes des risques d'inondation	123
4.1.3.	Seuils hydrologiques et niveau de risque d'inondation	126
4.1.4.	Périodes de retour des aléas hydrométriques extrêmes des risques d'inondation	130
4.2.	Analyse de la vulnérabilité du bassin-versant du fleuve Mono à l'inondation	131
4.3.	Analyse des risques : un composé d'aléa et de vulnérabilité	135
	Conclusion partielle	139
Chapitre 5 : Conséquences d'inondation et stratégies de gestion dans le bassin-versant du fleuve Mono		**141**
	Introduction	141
5.1.	Conséquences humaines, environnementales et matérielles des risques d'inondation dans le bassin du Mono	141

5.1.1.	Conséquences humaines des inondations	141
5.1.2.	Conséquences environnementales	146
5.1.3.	Conséquences matérielles	149
5.2.	Stratégies de gestion intégrée des risques d'inondation	150
5.2.1.	Surveillance et alerte	150
5.2.1.1.	Surveillance	150
5.2.1.2.	Alerte	152
5.2.2.	Appropriation du risque par les acteurs	155
5.2.3.	Stratégies de mitigation	155
5.2.4.	Gestion en temps de catastrophes d'inondation et après crises	156
5.3.	Prévisibilité des risques d'inondation dans le bassin	158
5.3.1.	Prédiction des crues avec le modèle GRP	159
5.3.2.	Prévention	163
5.3.3.	Suggestion en situation d'urgence et planification des opérations	164
5.3.3.1.	Suggestions	164
5.3.3.2.	Planification des opérations en situation de catastrophes	164
	Conclusion partielle	168
	Conclusion générale	**170**
	Bibliographie	**173**
	Annexes	191
	Liste des figures	191
	Liste des photos	194
	Liste des tableaux	195
	Table de matières	196