

Modélisation du fonctionnement hydrologique et incidences des activités anthropiques sur la dynamique spatio temporelle du bassin versant de la Mefou Cameroun

Auteur : Njogi Bella, Anne Rosine Eve

Promoteur(s) : Tychon, Bernard

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master de spécialisation en sciences et gestion de l'environnement dans les pays en développement

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/9946>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement
UCLouvain - Faculté des bioingénieurs

**MODELISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET INCIDENCES
DES ACTIVITES ANTHROPIQUES SUR LA DYNAMIQUE SPATIO-
TEMPORELLE DU BASSIN VERSANT DE LA MEFOU (CAMEROUN)**

Anne Rosine Eve NJOGI BELLA

**MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER DE
SPECIALISATION EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT DANS
LES PAYS EN DEVELOPPEMENT**

MODULE EAU ET SOL

ANNEE ACADEMIQUE 2019-2020

REDIGE SOUS LA DIRECTION DE : Prof. Bernard TYCHON

COMITE DE LECTURE :

Prof. François JONARD

Prof. Marnik VANCLOOSTER

Copyright ©

« Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de l'Université de Liège et de l'Université Catholique de Louvain ».*

**L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège et de l'Université Catholique de Louvain.*

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : ***Anne Rosine Eve NJOGI BELLA***

E-mail : evefrero@yahoo.fr

DEDICACE

*A mes parents **Njogi Bella Alex** et **Ndjip marie claire** pour leur amour inconditionnel. Que Dieu vous comble de ses bénédictions tout en espérant que vous trouverez en ce mémoire l'expression de mon profonde reconnaissance et celle de vos sacrifices sans cesse renouvelés.*

REMERCIEMENTS

Mes sincères remerciements vont à l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur (ARES) de la fondation Wallonie-Bruxelles qui œuvre avec détermination pour la formation des ressortissants des pays du sud et qui a financé mon séjour en Belgique et ma formation en Master de Spécialisation en Sciences et Gestion de l'Environnement dans les Pays en Développement.

Je remercie profondément la Fondation Roi Baudoin et le Fonds Elisabeth et Amélie qui m'ont accordé une bourse de mobilité dans le cadre de la réalisation de mon Travail de Fin d'Etude (TFE). La présente étude n'aurait pu aboutir sans leur soutien financier.

Mes remerciements vont ensuite à l'endroit des personnes suivantes :

- ↗ Mon Promoteur, Professeur Bernard TYCHON pour son assistance effective, sa disponibilité, ses enseignements, conseils et sa rigueur scientifique.
- ↗ Au responsable de Master et au personnel enseignant de L'université de Liège et de l'université catholique de Louvain pour leurs enseignements et conseils.
- ↗ A Mon époux, Martial Cédric MANYE pour son amour, son amitié, sa disponibilité et son sacrifice perpétuel à mon égard.
- ↗ A ma fille Israëlle Dorcas Doxa MANYE pour son amour et son sourire réconfortant.
- ↗ A la famille NLEND pour leur accueil et leur amour inconditionnel durant mon séjour en Belgique.
- ↗ A mes frères et sœurs, qui dans leur élan de fraternité ont su me faire un nid plein de bonheur, de chaleur et d'encouragement. Ce sont les enfants Gislène, Emmanuel, Jocelyne, Hortense, Yolande, Diane, Viviane, Alex frereau , Rigobert, Olivier, Aubin, Marina, junior, Darell, David, Melinda, Mireille, Cécile-christelle
- ↗ Au couple ZAM pour leur accueil, amour et conseils durant mon séjour en Europe.
- ↗ A mon cher ami Beaudelaire SESSOU pour sa collaboration, son soutien et ses sacrifices durant tout mon séjour en Belgique.
- ↗ Au couple ABATTE pour leur soutien moral et spirituel.
- ↗ A ma belle-famille BISSOMBI qui m'ont soutenue sans cesse en prenant soin de ma fille.
- ↗ Au couple SOELLE MBOUNDJA pour leur amour et leur soutien.
- ↗ A mes camarades de promotion pour leur entraide.
- ↗ A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

RESUME

La présente étude évalue les incidences des activités anthropiques sur la dynamique spatio-temporelle du bassin versant de la Méfou (Yaoundé, Cameroun) et s'intéresse à modéliser son fonctionnement hydrologique sur la période 2010-2050. Pour ce faire, des enquêtes de terrain ont été réalisées pour évaluer les perceptions des agriculteurs sur les principales menaces qui entravent le bon fonctionnement du bassin versant. Les résultats de cette enquête révèlent des indicateurs, des causes et des conséquences de la dégradation de l'environnement identifiés par les agriculteurs. 93% des agriculteurs du quartier Odza perçoivent les mauvaises odeurs et la pollution de l'air comme indicateurs de la dégradation de l'environnement. La déforestation, l'urbanisation et la croissance démographique sont identifiées comme causes de dégradation par 100% des agriculteurs du quartier Etoudi. 86% des agriculteurs du quartier Nkomkana identifient les maladies hydriques comme conséquences de la dégradation. Par ailleurs, des images Landsat de Janvier 1998 et Décembre 2018 sont acquises pour procéder à une analyse diachronique. Les résultats révèlent que 49% des prairies ont été converties en parcelles agricoles, eau de surface et bâtis tandis que 26% de la forêt dense ont régressé vers les parcelles agricoles, les prairies et les bâtis. Ce changement dans les unités d'occupation du sol est attribué aux pressions anthropiques exercées dans le bassin versant (agriculture sur brûlis, déboisement, rejets des eaux usées dans la nature sans prétraitement préalable). La modélisation des facteurs qui influencent l'offre et la demande en eau dans le bassin a été effectuée sur une période de 40 ans (2011-2050). Les résultats montrent que les besoins en eau croissent chaque année pour tous les sites de demande dans tous les scénarios. La ville est le site de demande qui a les besoins en eau les plus élevés (14 millions de m³ en 2011 et 119 millions de m³ en 2050). De même la demande en eau reste non couverte pour le scénario croissance de la population. Un réservoir de capacité 1 million de m³ a été créé pour couvrir les besoins en eau des sites de demande jusqu'en 2028. Après 2028 celui-ci n'arrive plus à couvrir les besoins en eau qui croissent et avoisinent 70 millions de m³ pour l'année 2050. Il est donc nécessaire de réduire les naissances dès maintenant pour prévenir une hausse incontrôlée des besoins en eau de la population en 2050.

Mots-clés : *Dynamique spatio-temporelle, modélisation, WEAP, bassin versant, Activités anthropiques.*

ABSTRACT

This study aims to assess the effects of anthropogenic activities on the spatio-temporal dynamics of the Méfou watershed (Yaoundé, Cameroon) and is interested in modeling its hydrological functioning over the period 2010-2050. For this purpose, field surveys were carried out to assess farmers' perceptions of the main threats that hamper the proper functioning of the watershed. The results of this survey reveal indicators, causes and consequences of environmental degradation identified by farmers. 93% of farmers in the Odza district perceive bad smells and air pollution as indicators of environmental degradation. Deforestation, urbanization and population growth are identified as causes of degradation by 100% of farmers in Etoudi district. 86% of farmers in Nkomkana district identify water-borne diseases as consequences of degradation. In addition, Landsat images from January 1998 and December 2018 are acquired to carry out a diachronic analysis. The results reveal that 49% of the grasslands have been converted to agricultural plots, surface water and built-up areas while 26% of the dense forest has declined to agricultural plots, meadows and built-up areas. This change in land use units is attributed to anthropogenic pressures in the watershed (slash-and-burn agriculture, deforestation, discharge of wastewater into nature without prior pre-treatment). The modeling of the factors that influence the water supply and demand in the basin was carried out over a period of 40 years (2011-2050). The results show that the water requirements increase each year for all demand sites in all scenarios. The city is the site of demand with the highest water needs (14 million m³ in 2011 and 119 million m³ in 2050). Likewise, water demand remains uncovered for the population growth scenario. A reservoir with a capacity of 1 million m³ has been created to cover the water needs of demand sites until 2028. After 2028, it can no longer cover the water needs which are growing and approaching 70 million m³ for year 2050. It is therefore necessary to reduce births now to prevent an uncontrolled increase in the water needs of the population in 2050.

Keywords: *Spatio-temporal dynamics, modeling, WEAP, watershed, Human activities.*

TABLE DES MATIERES

<i>Dédicace</i>	<i>i</i>
<i>Remerciements</i>	<i>ii</i>
<i>RÉSUME</i>	<i>iv</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>v</i>
<i>TABLE DES MATIERES</i>	<i>vi</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>ix</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>x</i>
<i>Liste des annexes</i>	<i>xi</i>
<i>Liste des abréviations</i>	<i>xi</i>
<i>1-INTRODUCTION</i>	<i>1</i>
<i>1.1- Choix et justification de la problématique</i>	<i>1</i>
<i>1.2- Objectifs et hypothèses de travail</i>	<i>3</i>
<i>1.2.1- Objectif général</i>	<i>3</i>
<i>1.2.2- Objectifs spécifiques</i>	<i>3</i>
<i>1.3- Hypothèses de travail</i>	<i>4</i>
<i>2- SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE</i>	
<i>2.1- Aperçu général sur les bassins versants</i>	<i>6</i>
<i>2.2- Aperçu des travaux antérieurs sur le bassin versant de la Méfou</i>	<i>7</i>
<i>2.3- Dynamique spatio-temporelle d'un bassin versant</i>	<i>7</i>
<i>2.3.1) Incidences des activités anthropiques sur la dynamique spatio-temporelle d'un Bassin versant</i>	<i>8</i>
<i>2.3.2- Modélisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant</i>	<i>9</i>
<i>2.4- Modélisation du bassin versant selon le modèle WEAP</i>	<i>10</i>
<i>2.4.1- Base de données</i>	<i>10</i>
<i>2.4.2- Calibrage et validation du modèle</i>	<i>10</i>
<i>2.4.3- Alternatives de gestion et analyse de scénarios</i>	<i>10</i>
<i>2.4.3.1- Comptes courants et scénario de référence</i>	<i>10</i>
<i>3- MATERIELS ET METHODES</i>	

<i>3.1- Milieu d'étude</i>	12
<i>3.1.1- Situation géographique du bassin versant de la Méfou</i>	12
<i>3. 1.2.- Climat et pluviométrie</i>	14
<i>3.1.3- Topographie et hydrographie</i>	15
<i>3.1.4- Géologie, géomorphologie, pédologie et végétation</i>	16
<i>3.1.5- Facteur humain</i>	16
<i>3.1.5.1- Croissance démographique</i>	16
<i>3.1.5.2- Croissance urbaine</i>	17
3.2- METHODOLOGIE	
<i>3.2.1- Evaluation des perceptions des agriculteurs locaux sur les principales menaces</i> <i>qui entravent le bon fonctionnement du bassin versant de la Méfou</i>	18
<i>3.2.2.2- Traitement des données satellitaires</i>	19
<i>3.2.3- Analyse et modélisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant de</i> <i>la Méfou jusqu'en 2050.</i>	19
<i>3.2.3.1- Paramètres d'entrée</i>	20
<i>3.2.3.2-Modélisation du bassin versant de la Méfou avec WEAP</i>	22
<i>3.2.3.3- Calibration et validation du modèle</i>	24
4- RESULTATS	
<i>4.1- Evaluation des perceptions des agriculteurs locaux sur les principales menaces</i> <i>qui entravent le bon fonctionnement du bassin versant de la Méfou</i>	25
<i>4.1.1-Indicateurs de la dégradation de l'environnement perçus par les enquêtés</i>	26
<i>4.1.2-Causes de la dégradation de l'environnement perçus par les enquêtés</i>	27
<i>4.1. 3-Conséquences de la dégradation de l'environnement perçus par les enquêtés</i>	27
<i>4.1.4-Accès et usage de l'eau par les agriculteurs dans chaque quartier</i>	28
<i>4.1.5-Effet des facteurs et des quartiers sur les indicateurs de la dégradation</i> <i>de l'environnement</i>	30
<i>4.1.6-Caractérisation des indicateurs de dégradation de l'environnement suivant</i> <i>les quartiers</i>	31
<i>4.2- Cartographie et analyse de la dynamique spatio-temporelle du bassin versant</i>	

<i>de la Méfou entre 1998 et 2018</i>	32
<i>4.2.1-Etat de l'occupation des sols dans le bassin versant de la Méfou en 1998</i>	32
<i>4.2.2-Etat de l'occupation des sols dans le bassin versant de la Méfou en 2018</i>	34
<i>4.2.3- Détection des changements dans le bassin versant de la Méfou</i>	36
<i>4.2.4- Analyse des changements de l'occupation des sols dans le bassin versant de la Méfou de 1998 à 2018</i>	37
<i>4.3- Analyse et modélisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Méfou jusqu'en 2050</i>	39
<i>4.3.1- Représentation schématique des sites de demande et des ressources en eau dans WEAP</i>	39
<i>4.3.2- Représentation des besoins en eau des sites de demande selon le scénario de référence</i>	40
<i>4.3.3- Demande en eau non couverte selon les différents scénarii</i>	40
<i>4.3.4- Demande en eau non satisfaite par site de demande selon le scenario de référence</i>	41
<i>4.3.5- Dynamique de la demande non satisfaite en eau des sites de demande au cours d'une année</i>	42
5. DISCUSSION	
<i>5.1- perceptions des agriculteurs locaux sur les principales menaces qui entravent le bon fonctionnement du bassin versant de la Méfou</i>	44
<i>5.2- Dynamique spatio-temporelle du bassin versant de la Méfou entre 1998 et 2018</i>	46
<i>5.3-Modélisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Méfou jusqu'en 2050</i>	47
6. CONCLUSION ET SUGGESTIONS	49
7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	50

LISTE DES TABLEAUX

<i>TABLEAU 1</i> : code et symbole des classes d'occupation des sols	20
<i>TABLEAU 2</i> : Paramètres d'entrée du modèle WEAP.....	21
<i>TABLEAU 3</i> : Moyenne de consommation d'eau et cout pour chaque quartier par enquêté.....	30
<i>TABLEAU 4</i> :Résultats de l'analyse de covariance (ANCOVA) des facteurs : quartiers, sexe, âge, le niveau d'instruction sur les indicateurs de la dégradation de l'environnement.....	30
<i>TABLEAU 5</i> :Matrice de confusion (2018)	34
<i>TABLEAU 6</i> : Matrice de confusion (1998)	36
<i>TABLEAU 7</i> : Superficies et taux de variation des différentes unités d'occupation des sols dans le bassin versant de la Méfou entre 1998 et 2018.....	37
<i>TABLEAU 8</i> :Matrice de transition des unités d'occupation des sols du bassin versant de la Méfou 1998-2018.....	38

LISTE DES FIGURES

<i>FIGURE 1</i> : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la Méfou en amont de Nsimalen.....	12
<i>FIGURE 2</i> : Photos illustrant les aspects du paysage autour du bassin versant de la Méfou.....	13
<i>FIGURE 3</i> : Variation des précipitations annuelles sur la période 1980-2019. (Source : Google Earth Engine)	14
<i>FIGUE 4</i> : Carte d'occupation du sol du bassin versant de la Méfou (Source : ESACCI-LC-L4-LCCS-Map-300m-P1Y-2015-v2.0.7)	16
<i>FIGURE 5</i> : Carte de l'expansion urbaine de Yaoundé entre 1964 et 2004 par Sarah Dauvergne (Dauvergne, 2011)	17
<i>FIGURE 6</i> : Interface WEAP montrant les liens hydrologiques et infrastructurels.....	22
<i>FIGURE 7</i> :Inventaire des indicateurs de la dégradation de l'environnement par les enquêtés.....	26
<i>FIGURE 8</i> :Inventaire des causes de la dégradation de l'environnement par les enquêtés.....	27
<i>FIGURE 9</i> :Inventaire des conséquences de la dégradation de l'environnement par les enquêtés.....	28
<i>FIGURE 10</i> : Accès à l'eau et usage pour l'irrigation.....	29
<i>FIGURE 11</i> :Plan factoriel montrant les indicateurs de dégradation suivant les quartiers dans le système d'axe factoriel (1,2)	32
<i>FIGURE 12</i> : Carte de l'occupation du sol en 1998 dans le bassin versant de la Méfou.....	33
<i>FIGURE 13</i> : Répartition des unités d'occupation des sols dans le bassin versant de la Méfou en 1998 Légende : P : Prairies ; PA : Parcelles agricoles ; ES : Eaux de surface ; B: Bâties; FD : Forêt dense.....	34
<i>FIGURE 14</i> : Carte de l'occupation du sol en 2018 dans le bassin versant de la Méfou.....	35
<i>FIGURE 15</i> : Répartition des unités d'occupation des sols dans le bassin versant de la Méfou en 2018 Légende : P : Prairies ; PA : Parcelles agricoles ; ES : Eaux de surface ; B: Bâties; FD : Forêt dense.....	36
<i>FIGURE 16</i> : Carte schématique WEAP reprenant les couches SIG et les éléments WEAP.....	39
<i>FIGURE 17</i> :Demande en eau par site de demande selon le scénario de référence (2011-2050)	40

<i>FIGURE 18</i> : Carte de la demande en eau non couverte selon divers scénarii.....	41
<i>FIGURE 19</i> : Demande en eau non satisfaite par site de demande selon le scénario de référence.....	42
<i>FIGURE 20</i> : Dynamique de la demande non satisfaite des sites de demande au cours d'une année selon chaque scénario.....	43

ANNEXES

<i>ANNEXE N°1</i> : Tableau : Caractéristiques des images LANDSAT téléchargées.....	53
<i>ANNEXE N°2</i> : Fiche d'enquête	54

LISTE DES ABREVIATIONS

FAO : Food and Agriculture Organisation
GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernementales sur l'Evolution du Climat
INS : Institut National de la Statistique
NDVI : Normalized Différence Vegetation Index
ONU : Organisation des Nations Unies
ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
SIG : Système d'Information Géographique
SNEC : Société National des Eaux du Cameroun
SEI : Stockholm Environment Institute
WEAP : Water Evaluation And Planning System

1-INTRODUCTION

1.1-Choix et justification de la problématique

La gestion rationnelle des ressources en eau est devenue une des préoccupations majeures mondiales. Les derniers rapports mondiaux sur la mise en valeur des ressources hydriques témoignent que l'eau joue un rôle dans tous les secteurs de l'économie et est indispensable pour parvenir à un développement durable et réaliser les Objectifs du millénaire pour le développement (ONU-Eau, 2012). En effet, l'utilisation sans contrainte de l'eau a augmenté à l'échelle mondiale à un rythme deux fois plus important que celui de la croissance démographique au cours du 20^e siècle, au point qu'il n'est plus possible, dans de nombreuses régions, d'assurer des services d'approvisionnement en eau fiables (FAO, 2012). L'eau devient de plus en plus rare du fait de la croissance démographique et de l'augmentation de la demande en eau qui en résulte pour continuer à soutenir la production alimentaire et satisfaire les besoins domestiques voire industriels. Les conséquences d'une mauvaise compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins tropicaux sont énormes et nécessitent de tendre vers une maîtrise quantitative et qualitative des ressources en eau. La pression démographique, le taux de développement économique, l'urbanisation et la pollution sont autant de facteurs qui exercent des pressions sans précédent sur une ressource renouvelable mais limitée, en particulier dans les régions semi-arides et arides (FAO, 2012). La pénurie d'eau est principalement caractérisée par trois composantes : l'indisponibilité physique en eau pour répondre à la demande ; le niveau de développement des infrastructures qui contrôlent le stockage, la distribution et l'accès à l'eau ; et la capacité institutionnelle à fournir les services d'eau requis (FAO, 2012). Cette pénurie d'eau sera davantage importante selon les prévisions du GIEC (2008) qui montrent une réduction générale des précipitations dans les zones semi-arides, une augmentation des précipitations dans les zones tempérées, une variabilité plus élevée de la distribution des précipitations, une augmentation de la fréquence des événements extrêmes et une augmentation de la température. La modification des régimes hydrologiques et celle de la disponibilité en eaux douces du fait du changement climatique, devrait avoir des répercussions sur l'agriculture pluviale et irriguée (ONU-Eau, 2009, 2012 ; FAO, 2008).

L'Afrique subsaharienne prélève moins de 2% de l'eau disponible pour tous les usages et a besoin d'accomplir d'importants investissements dans l'irrigation pour permettre aux agriculteurs d'accroître leur productivité (FAO AQUASTAT, 1999).

Elle est en grande partie, caractérisée par une pénurie économique et une population majoritairement pauvre. Cependant, certaines parties de cette région sont pourvues de vastes nappes souterraines inexploitées contrairement à de nombreuses régions du monde. Elles présentent également un potentiel considérable de collecte des eaux de ruissellement et de culture des plaines et des fonds de vallée qui captent l'eau naturellement. Avec des investissements, ce potentiel pourrait être libéré (Bouquet, 2011).

Le Cameroun dispose d'énormes ressources en la matière. De façon globale, les ressources en eau superficielles au Cameroun sont abondantes. Les bassins sédimentaires (Bassin de Campo, de Douala et de Rio del Rey, les fossés crétacés de la Mbéré et du Djerem, le bassin crétacé de la Bénoué et de Koum) du Cameroun sont des zones disposant d'énormes ressources en eau souterraine. La productivité des forages complets est de 6000m³ par jour dans la cuvette du Lac Tchad, 4000m³ par jour dans le bassin des grès de Garoua et excède 6000m³ par jour dans le bassin de Douala (BRGM/CIEH, 1979 cité par Kouamet *et al.*, 2006). L'eau souterraine constitue la principale source d'approvisionnement en eau potable de la population de la région de Yaoundé (Kuitchaet *et al.*, 2013). Cependant, La ville de Yaoundé région de notre étude a par exemple vu sa population passer d'environ 600000 habitants en 1960(Franqueville, 1979) à plus de 3 millions en 2017 (UNDESA, 2019). L'accroissement rapide de la démographie accentue les pressions sur les ressources. En effet, les régions tropicales en l'occurrence le Cameroun sont soumises à des changements globaux majeurs que sont de fortes mutations anthropiques du fait de la croissance démographique (déforestation au profit des zones agricoles et de l'urbanisation) (Foley *et al.*, 2005; Geist et Lambin, 2001; Lambin *et al.*, 2003). La qualité de cette ressource en eau se dégrade sous l'effet de la pollution et de la surexploitation. Quelle que soit son origine (urbaine, industrielle ou agricole), la pollution constitue un risque majeur susceptible de dégrader les ressources disponibles des nappes phréatiques. Cette dégradation des ressources paraît plus importante dans un contexte de changement climatique. La gestion rationnelle de l'eau devient un des plus grands défis à la réalisation du développement durable au Cameroun en raison des effets de l'augmentation de la demande en eau ainsi que du changement climatique. Les changements anthropiques se conjuguent aux impacts tels que les changements climatiques (Allan *et al.*, 2010; Knutson *et al.*, 2010). Tous ces enjeux nécessitent le développement d'outils de gestion de la ressource en eau. Dans ce contexte, la fourniture de l'allocation nécessite l'utilisation de moyens plus efficaces pour surmonter la complexité du système d'eau

et l'incertitude. La gestion durable des bassins versants est une nécessité car de nombreux bassins versants connaissent une pénurie et une contamination d'eau à usage agricole et domestique pendant la majeure partie de l'année (Agarwalet al., 2018). C'est le cas du bassin versant de la Méfou qui couvre une surface de 809 km² donc 425 Km² si l'on estime la surface en amont de la station de jaugeage de Nsimalen. Il a longtemps subi les effets de l'urbanisation, les pressions anthropiques, les crues, la pollution (Branchet, 2019 ; Jourdan, 2020). Sa position géographique inclut une zone urbaine et périurbaine présentant une juxtaposition de quartiers structurés et spontanés reflétant à quelques exceptions près celles de l'ensemble de la ville de Yaoundé. A côté de la rivière Méfou, la ville compte quelques lacs naturels ou artificiels dont les eaux augmentent le risque pour la santé publique à cause du déversement des eaux des stations d'épuration non fonctionnelles, des ordures ménagères et des eaux noires situées dans les zones marécageuses. On y a également observé d'autres pressions telles que l'occupation anarchique des sols, les plaintes des populations face aux problèmes d'accès à l'eau potable et à l'assainissement, la forte pression sur les ressources en eau et la récurrence des inondations. C'est dans cette optique que la présente étude s'intéresse à « *la Modélisation du fonctionnement hydrologique et aux incidences des activités anthropiques sur la dynamique spatio-temporelle du bassin versant de la Méfou (Cameroun)* ». Elle nous permettra d'une part, de mieux appréhender les conséquences liées au dysfonctionnement du bassin versant et d'autre part, de dégager les stratégies nécessaires pour améliorer sa gestion.

1.2- Objectifs et hypothèses de travail

1.2.1- Objectif général

La présente étude vise à contribuer à une meilleure gestion du bassin versant de la Méfou par l'analyse de l'impact des activités anthropiques sur sa dynamique spatio-temporelle et par la compréhension de son comportement hydrologique jusqu'en 2050.

1.2.2-Objectifs spécifiques

Spécifiquement il s'agit :

- D'évaluer les perceptions des agriculteurs locaux sur les principales menaces qui entravent le bon fonctionnement du bassin versant.

-
- De cartographier et analyser les changements dans les classes d'occupations du sol à l'échelle du bassin versant.
 - D'analyser et modéliser le fonctionnement hydrologique du bassin versant jusqu'en 2050 avec WEAP.

1.3- Hypothèses de travail

En fonction des objectifs spécifiques, nous avons formulé les hypothèses suivantes :

H1 : les perceptions des principales menaces qui entravent le bon fonctionnement du bassin versant de la Méfou varient en fonction des quartiers.

H2 : la dynamique d'occupation du sol est fortement influencée par les activités anthropiques

H3 : les besoins en eau des sites de demande n'arrivent plus à être couverts jusqu'en 2050 à l'échelle du bassin versant.

2- SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1- Aperçu général sur les bassins versants

Le bassin versant représente l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique et de ses effets (Musy, 2003). Il est considéré comme un système, avec les précipitations comme entrées principales et les différents flux d'évapotranspiration et d'écoulements de surface et souterrains comme sorties. Ainsi, le fonctionnement hydrologique du bassin peut être marqué par des processus hydrologiques dominants ou des combinaisons de processus dominants qui varient dans l'espace et dans le temps (Ambroise, 1999). L'interaction entre les différents processus (brièvement définis plus bas) répond à une certaine organisation fonctionnelle, spatiale et temporelle du bassin. Déterminer le fonctionnement hydrologique d'un bassin, c'est alors associer les processus dominants avec des compartiments délimités spatialement et verticalement, en rapport avec les caractéristiques du milieu géologique, pédologique ou agronomique et en rapport avec leurs périodes d'apparition (Charlier, 2007). En ce qui concerne la dynamique spatio-temporelle, du point de vue spatial, les processus à l'échelle du bassin sont intimement liés aux processus à l'échelle locale. Du point de vue temporel, pour caractériser un cycle hydrologique, il est nécessaire d'établir un bilan sur des chroniques pluriannuelles.

L'emploi de bassin versant s'est élargi avec la recherche lorsque celle-ci s'est principalement attachée à "appréhender le fait hydrologique et d'abord le débit comme un fait spatial, comme le produit d'un espace géographique saisi dans toutes ses dimensions, dans toute son épaisseur, dans toute sa dynamique" (Lambert, 1973). Le bassin versant n'est pas seulement une somme de caractères moyens, tels que la superficie, le relief, la forme, le sol, la végétation. Il est composé de parties aux caractéristiques particulières qui répondent différemment aux impulsions climatiques et météorologiques. (Monique, 1995).

La plupart des études sur les bassins versants focalisent leur attention sur la modélisation du fonctionnement hydrologique. Au Cameroun plusieurs travaux ont été menés sur les bassins versants dans le domaine de la dynamique spatio-temporelle et la modélisation des écoulements. (Bedimo, 1999) a fait une étude hydrologique dans un milieu tropical humide sur le bassin expérimental du Mengong à Nsimi au Sud du Cameroun. Il a évalué la dynamique spatiotemporelle des flux hydriques au travers des informations acquises sur l'ensemble des stations hydrométriques et a fait une analyse comparée des facteurs

responsables de l'écoulement dans les différentes composantes de la zone d'étude par des bilans hydrologiques du bassin et des événements averse-crue observés. Fouépé *et al.*, (2009) ont également étudié la modélisation de l'écoulement des eaux souterraines dans le bassin versant supérieur de la rivière Anga'a, (Yaoundé, Cameroun). Une simulation d'écoulement des eaux souterraines à l'état stationnaire a été réalisée à l'aide du logiciel Visual MODFLOW et étalonnée pour les niveaux d'eau souterraine de février 2008 à 18 puits d'observation. Kouamet *et al.*, (2010) ont étudié la vulnérabilité à la pollution des ressources en eau du bassin versant de Mingoa (Yaoundé-Cameroun). Ils trouvèrent que le comportement hydrodynamique dans le bassin versant Mingoa est étroitement lié aux fluctuations pluviométriques. La carte hydrodynamique de l'aquifère supérieur du bassin versant a révélé deux types d'écoulements convergents et divergents avec les grands axes de drainage d'orientation globale NE - SW ; SE - NW et N - S permettant de délimiter des sites favorables à l'implantation d'ouvrages de captage des eaux souterraines. Les sources potentielles de pollution répertoriées après l'étude ont été nombreuses et variées (latrines, tas d'ordures sauvages,). Par ailleurs, Chemeli, (1995) dans son étude sur les effets des changements des écoulements des bassins versants dus aux activités anthropiques a identifié l'effet combiné des facteurs humains et naturels comme responsable de la diminution des débits de base du fleuve avec une augmentation de 30% de la déforestation, 20% dans l'agriculture et 10,4% dans l'urbanisation. Il observe également que la disponibilité de l'eau a diminué d'un coefficient de ruissellement de 22% dans les années 60, 10% dans les années 70 et 8% dans la période de sécheresse hydrologique des années 80. L'indice de différence de végétation normalisé (NDVI) a été fiable dans la prédiction des changements de débit dans le bassin versant. Des simulations de précipitations et d'écoulement ont soutenu les changements observés dans les variables hydrologiques.

2.2- Aperçu des travaux antérieurs sur le bassin versant de la Méfou

Jourdan (2019) a utilisé une approche mixte instrumentation-modélisation hydrologique pour comprendre les impacts des débordements lors des fortes crues sur le bilan hydrologique du bassin versant de la Méfou. Il a quantifié la dynamique spatio-temporelle, l'effet des événements de crue et l'impact de l'urbanisation sur le bilan hydrologique. Ses résultats révèlent qu'une augmentation de l'écoulement annuel de 53% est engendré par un recul des zones forestières de 50 % et une augmentation de la proportion de zone urbaine de 10 % en 1980 à 35 % en 2017.

Perrine, (2018) quant à elle a fait une étude visant à caractériser l'impact des activités humaines sur la qualité de la ressource en eau en milieu urbain sub-saharien dans le but de cerner la contamination du bassin versant de la Méfou par les pesticides et les résidus pharmaceutiques. Il en ressort que les pratiques d'agriculture urbaine et en particulier le maraîchage intensif dans les bas-fonds, peuvent entraîner l'utilisation massive de pesticides. En absence d'assainissement efficace, les multiples latrines, drains et fosses septiques constituent autant de sources diffuses de contamination par les résidus de médicaments. Concernant les pesticides, la méthode cartographique basée sur la construction de cartes d'aptitude à produire et à accumuler le ruissellement a permis de confirmer l'hypothèse selon laquelle les parcelles agricoles pourraient être identifiées comme des sources de pollution diffuses de pesticides via le ruissellement. Une liste de 32 pesticides et de 23 résidus pharmaceutiques a été recherchée dans les eaux de surface et les eaux souterraines du bassin versant de la Méfou. Les résultats généraux indiquent de fortes concentrations en herbicides et en anti-inflammatoires, une contamination bien plus marquée en milieu urbain qu'en milieu péri-urbain, un risque environnemental identifié pour deux herbicides (diuron et atrazine) et la contamination de certains points d'eau souterrains (forages, puits, sources) par les résidus pharmaceutiques. Ces résultats renseignent donc sur les pressions anthropiques, les niveaux de contamination et les enjeux liés à l'eau à Yaoundé.

2.3- Dynamique spatio-temporelle d'un bassin versant

La dynamique représente l'état entre deux instants et traduit les différents changements qui ont été observés au cours de ladite période. Les études sur la dynamique de l'occupation de l'espace entre deux instants (analyse diachronique) permettent alors d'établir la variation entre l'état de référence et l'état actuel de la zone sujette à l'étude (Margalef, 1994). Le même auteur rappelle que l'état de référence est une situation d'une zone ou d'un milieu donné à un moment de son évolution. Sa description vise à cerner les principales caractéristiques de la zone d'étude dans une perspective évolutive et temporelle, soit avant le changement. Il sert donc à décrire et à mieux appréhender les différentes composantes physiques, sociales et économiques avec leurs différentes interactions, qui caractérisent le territoire à l'étude (Kokou, 1998). Le but, c'est de rassembler et d'analyser les informations à référence spatiale relatives à la surface du sol. Ainsi, la terminologie "occupation du sol" a été utilisée dans le sens de "**occupation des terres**" afin de mieux concorder avec les préoccupations des utilisateurs. Les objectifs d'une telle étude visent à reconstituer l'état du couvert végétal à une

date reculée (au moins 10 ans) et de dégager les grands changements intervenus dans le temps et dans l'espace en vue d'envisager une planification adéquate dans la gestion des ressources naturelles. L'analyse de la dynamique des changements dans l'utilisation des terres ou de la couverture du sol est donc un outil fondamental dans l'adoption de stratégies de conservation de la biodiversité (Verburghet *al.*, 2009) et dans la planification des techniques de gestion appropriées des terres dégradées. C'est dans cette optique que la présente étude relative au bassin versant de la Méfou a été initiée. Cette étude nécessite la collecte des données satellitaires, l'utilisation des outils de télédétection et des SIG permettant d'évaluer la dynamique spatiale et temporelle de l'occupation des sols dans la zone d'étude.

2.3.1) Incidences des activités anthropiques sur la dynamique spatio-temporelle d'un bassin versant.

L'anthropisation regroupe toutes les activités humaines qui transforment les milieux pour exploiter les ressources dans l'optique d'établir et/ou développer les sociétés humaines (Elissalde, 2014). Les activités anthropiques peuvent engendrer des perturbations des écosystèmes. L'urbanisation par exemple conduit à des processus d'érosion et d'imperméabilisation des surfaces, quant à l'érosion anthropique, il joue un rôle important dans la morphogenèse des sols (Tchotsoua, 1994). Il est donc nécessaire de tenir compte des changements d'occupation du sol pour les transferts de polluants à cause de la modification des écoulements, mais aussi l'intensification des rejets des industries et des eaux usées domestiques en fonction des densités d'habitation qui sont le reflet de l'anthropisation des milieux. Leurs impacts s'illustrent globalement par la modification des habitats (destruction, fragmentation), la perte de la biodiversité associée (Caitano *et al.*, 2018) et l'introduction de contaminants dans l'environnement via un réseau anthropique.

Par ailleurs, le milieu agricole est caractérisé par un réseau de pistes et de routes qui influencent parfois les écoulements de surface et la réponse du bassin versant (Carluer et Marsily, 2004). Le réseau des fossés agricoles est distingué du réseau hydrographique naturel du fait qu'il ne suit pas nécessairement la ligne de plus grande pente. Les fossés jouent deux rôles fondamentaux au sein d'un système agricole : un premier sur le temps de transfert et donc le temps de réponse des crues, un second sur les échanges avec la nappe superficielle et donc sur les volumes ruisselés (Moussa *et al.*, 2002; Chahinian, 2004). Tout ceci favorise l'entrée des contaminants dans l'hydrosystème dépendant de la concentration des activités anthropiques dans les zones urbaines et rurales (industrielles, agricoles, développement de

l'habitat, etc.). L'anthropisation révèle plusieurs facettes parmi lesquelles le phénomène d'urbanisation qui correspond à la croissance de la population et à l'extension des villes. Les conséquences de l'urbanisation entraînent l'augmentation de la demande en eau potable, l'imperméabilisation des sols, la modification des zones humides et des effluents. Les conséquences se traduisent par une diminution des temps de réponse hydrologiques, des phénomènes de ruissellement intenses (Poulardet *et al.*, 2015) et une augmentation de la fréquence des inondations. L'érosion des sols et le transport des sédiments s'ajoutent à la modification des écoulements (Whitney *et al.*, 2015). En ce qui concerne la diminution de l'infiltrabilité des sols, les besoins en eau peuvent contribuer à la diminution de la recharge des eaux souterraines (Marsalek, 2008). Les effluents urbains et les eaux de ruissellement sur les surfaces urbaines atteignent le milieu aquatique et y introduisent des contaminants organiques et inorganiques. Les eaux de surface sont le réceptacle final de ces contaminants. Ces contaminants peuvent atteindre les eaux souterraines en fonction de différents processus de transfert (Burantet *et al.*, 2018).

2.3.2- Modélisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant

Le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant passe par l'association des processus hydrologiques dominants avec des compartiments délimités spatialement et verticalement. La pluie qui constitue l'entrée du système est divisée en différentes composantes que sont l'évapotranspiration, les écoulements de surface et les écoulements souterrains(Charlier 2007).A la surface du sol, l'eau redistribuée est partagée entre le ruissellement et l'infiltration. La partie ruisselée se propage jusqu'au réseau et transite à l'exutoire du bassin. Les écoulements de surface comprennent les écoulements dans le réseau hydrographique en période de crue et d'étiage et les écoulements à la surface du sol sur les versants en période de crue (Charlier 2007). En ce qui concerne les écoulements dans le réseau hydrographique, le premier processus est la précipitation directe qui tombe sur la surface libre du réseau hydrographique. Même si la surface du cours d'eau est très faible, ce processus peut devenir important lors des crues de bassin. Le second processus est celui issu du drainage de la nappe superficielle et qui constitue le débit de base du cours d'eau pérenne à l'exutoire du bassin. A l'échelle de l'année, le débit de base est un terme important du bilan de bassin.

2.4-Modélisation du bassin versant selon le modèleWEAP

Water Evaluation and Planning software (WEAP), développé par le Stockholm Environment Institute (SEI), est un outil pratique pour la planification des ressources en eau, qui intègre à

la fois l'approvisionnement en eau et les problèmes de demande en eau en plus de la qualité de l'eau et de la préservation des écosystèmes, comme l'exige une approche intégrée de la gestion des bassins (SEI, 2007). Le modèle est semi-théorique, continu dans le temps, semi-distribué et déterministe. Comme le modèle est semi-théorique, il nécessite un étalonnage et une vérification (Abrishamchiet *et al.*, 2007). Le modèle WEAP est un modèle intégré, approprié pour simuler le système hydrologique dans n'importe quel bassin versant. Il vise à étudier les facteurs affectant la disponibilité de l'eau, en particulier les facteurs influençant la demande et l'approvisionnement en eau dans le bassin hydrographique (Ahmed, 2018).

Le modèle simule les opérations du système d'eau dans un système fluvial avec les principes de base de la comptabilité de l'eau sur un pas de temps défini par l'utilisateur ; il calcule le bilan massique de l'eau pour chaque nœud et maillon du système pour la période de simulation (SEI, 2007; Yilmaz *et al.*, 2010). La simulation permet de prédire et d'évaluer des scénarios et des politiques de l'eau tels que les programmes de conservation de l'eau, les projections de la demande, les changements hydrologiques, les nouvelles infrastructures et les changements dans les allocations ou les opérations (Mutiga *et al.*, 2010; Purkey *et al.*, 2007; Raskin *et al.*, 1992; SEI, 2008; Yates *et al.*, 2005).

2.4.1- Base de données

L'exécution de WEAP nécessite l'entrée d'une grande base de données pour chaque élément du réseau. La structure des données et le niveau de détail peuvent être facilement personnalisés pour répondre aux exigences d'une analyse particulière et pour refléter les limites imposées lorsque les données sont limitées.

2.4.2- Calibrage et validation du modèle

Le but de l'étalonnage est d'ajuster les paramètres afin que les solutions du modèle correspondent aux observations de manière optimale. L'étalonnage du modèle est effectué manuellement par essais et erreurs, cherchant à minimiser l'erreur quadratique moyenne (RMSE); maximiser le coefficient de corrélation, R (Yates *et al.*, 2005).

2.4.3- Alternatives de gestion et analyse de scénarios

2.4.3.1- Comptes courants et scénario de référence

Les comptes courants (ou situation actuelle) représentent un jeu de données à partir duquel un ou plusieurs scénarios sont construits. En d'autres termes, c'est l'année de base que l'utilisateur lui-même définit comme précédent la période du scénario de référence. Les scénarios explorent les changements possibles du système, les années futures après l'année des comptes

courants. Le scénario de référence est un scénario par défaut : c'est la «référence». Il reporte les données des comptes courants sur toute la période du projet spécifiée et sert de point de comparaison pour les autres scénarios dans lesquels des modifications sont apportées aux données du système (SEI, 2007).

Outre le scénario de référence, d'autres scénarios peuvent être analysés :

- ▣ Scénario de changement climatique: il analyse une situation de variation des paramètres climatiques (précipitations, température, etc.).
- ▣ Scénario de gestion de la demande : il analyse une situation avec les problèmes de gestion de la demande en eau et évalue l'impact de l'application de la stratégie de gestion de la demande au scénario de référence
- ▣ Scénario croissance démographique : le but de ce scénario est d'évaluer l'influence future de l'augmentation de la croissance de la population sur l'offre et la demande en eau pour le bassin
- ▣ Scénario réservoir : ce scénario évalue la stratégie appliquée de gestion de la demande pour satisfaire les besoins en eau des sites de demande.

3-MATERIELS

3.1- Milieu d'étude

3.1.1- Situation géographique du bassin versant de la Méfou

Le bassin versant de la Méfou s'étend sur 840 km² sous les latitudes 3,5500° et 3,9811°, les longitudes 11,3552° et 11,6453° dans la région Centre du Cameroun (Figure 1). Dans sa partie amont il intègre la ville de Yaoundé. La rivière Méfou est un affluent rive droite du bassin versant du Nyong. Dans ce travail, nous avons considéré la partie du bassin versant de la Méfou à Nsimalen (425km²) qui comprend les plus hauts reliefs du bassin du Nyong avec une altitude qui varie de 650 m à 1200m. La ville de Yaoundé est souvent surnommée « la ville aux sept collines » du fait de nombreux inselbergs situés dans la partie nord-ouest du bassin de la Méfou. Depuis des années 1960, ce bassin fait face à des changements majeurs d'occupation des sols marquant le début de développement de la ville de Yaoundé au dépend des zones forestières originelles. Ces modifications anthropiques importantes entraînent des impacts environnementaux majeurs sur le fonctionnement hydrologique global de la région.

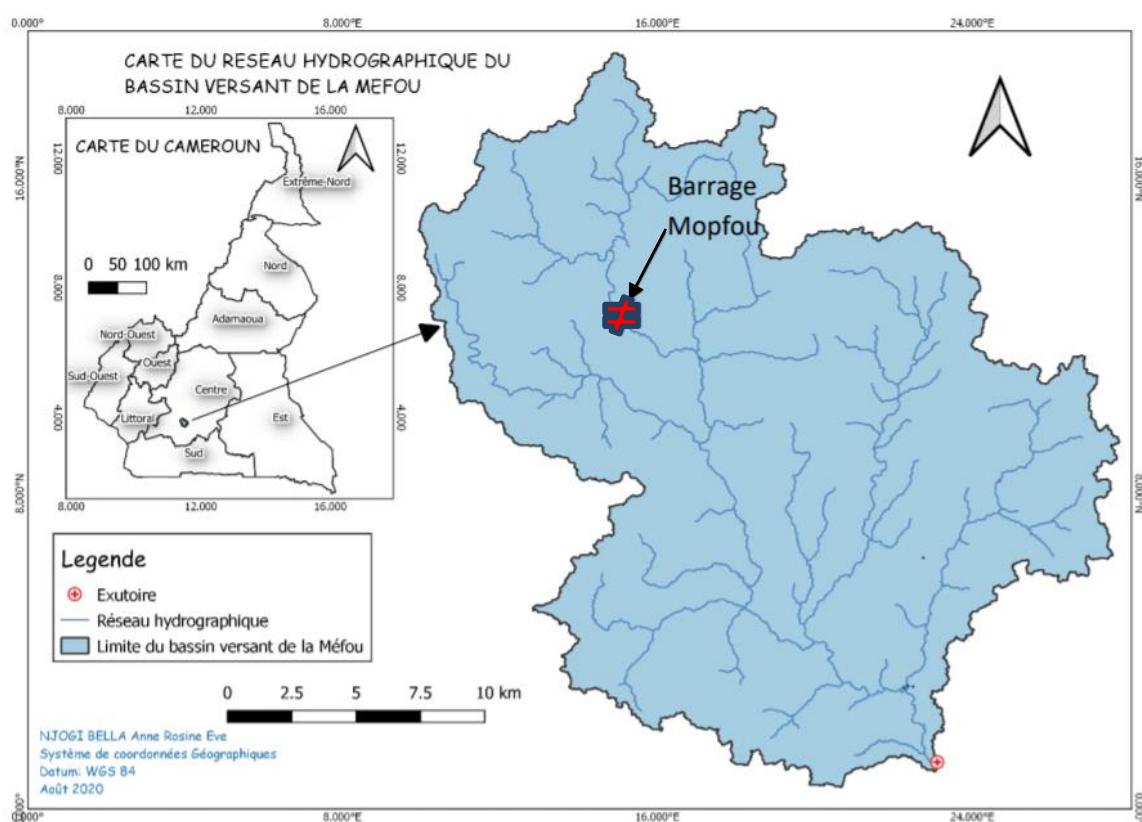


Figure1 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la Méfou en amont de Nsimalen

3.1.2- Topographie et hydrographie

La rivière Méfou présente une longueur estimée à 35 km entre la sortie du barrage Mopfou en amont (qui draine 70 km² du bassin) et la station à Nsimalen considérée comme l'exutoire dans le cadre de notre étude. Les principaux tributaires de la Méfou sont le Mfoundi (90 km² dont 24 km² drainés par la rivière Biyeme) qui draine la partie la plus urbanisée du bassin, l'Anga'a (54 km²) et le Nga (51 km²).

Le bassin présente un relief marqué par de hautes collines, d'altitude souvent supérieure à 1000m dans la partie nord et nord-ouest (Figure d) tandis que les bas-fonds (Figure b) longent la majeure partie du cours d'eau principal et des principaux tributaires particulièrement importante dans la zone de confluence entre la Méfou et le Mfoundi ainsi que la partie aval du bassin. On observe également de très faibles pentes le long du cours d'eau principal et de certains tributaires (1% et 5%). Ce qui engendre fréquemment des débordements avec de larges zones inondables (Figure c) le long du réseau hydrographique

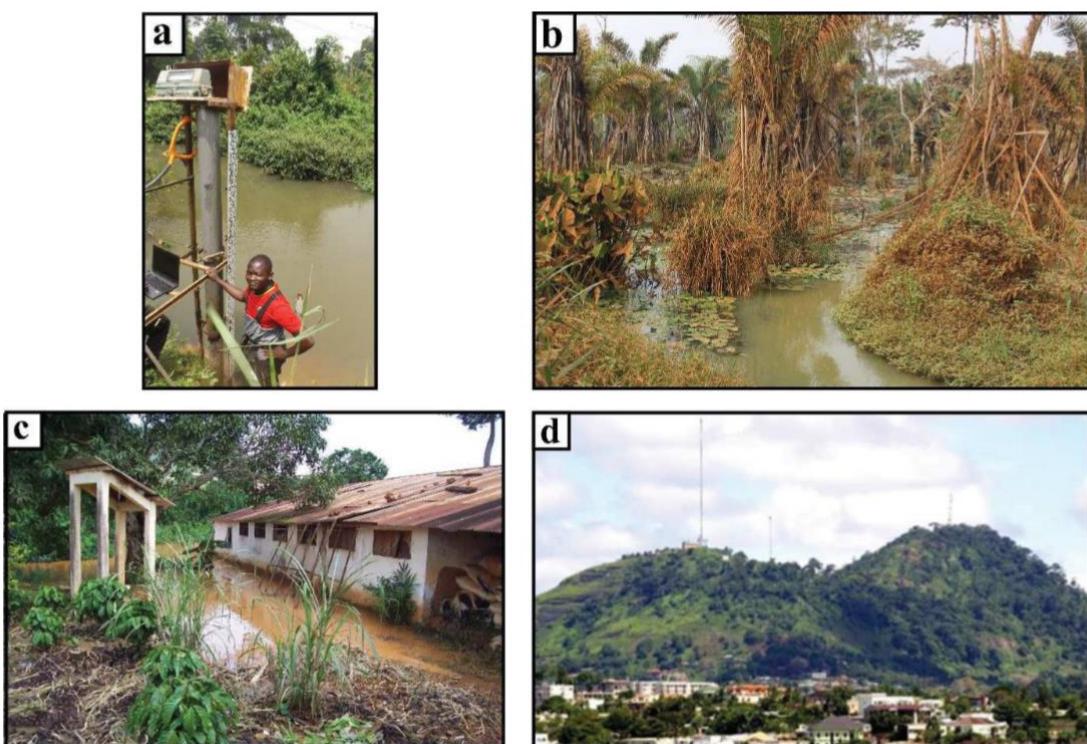


Figure 2 : Photos illustrant les aspects du paysage autour du bassin versant de la Méfou

- a) Station hydrométrique historique à Nsimalen ; b) Zone de bas-fonds sur le bassin de la Biyeme ; c) Zone de débordements proche de zones habitées (Fezeu, 2017) ; d) Mont Mbankolo situé à la limite nord du bassin de la Méfou.

3.1.3- Climat et pluviométrie

Le climat au niveau de notre bassin versant est de type guinéen chaud et humide avec une température moyenne annuelle de 25°C (Olivry, 1986). Les températures maximales mesurées sont autour de 30°C entre Janvier et Mars. L'hygrométrie moyenne se situe autour de 80%. Les précipitations sont réparties toute l'année avec des variations qui caractérisent quatre saisons alternées : la grande saison sèche se situe entre décembre et février (rares précipitations et fortes températures), la petite saison de pluies allant de Mars à Juin (Précipitations orageuses et températures plus faibles), la petite saison sèche de Juillet à Septembre (Températures fraîches, basses précipitations, brouillards fréquents) et la grande saison des pluies d'Octobre à Novembre (faibles températures et longues précipitations et intenses) (figure 3). De nos jours, la tendance des précipitations globales est en baisse avec un décalage des saisons (Moffo *et al.*, 2011).

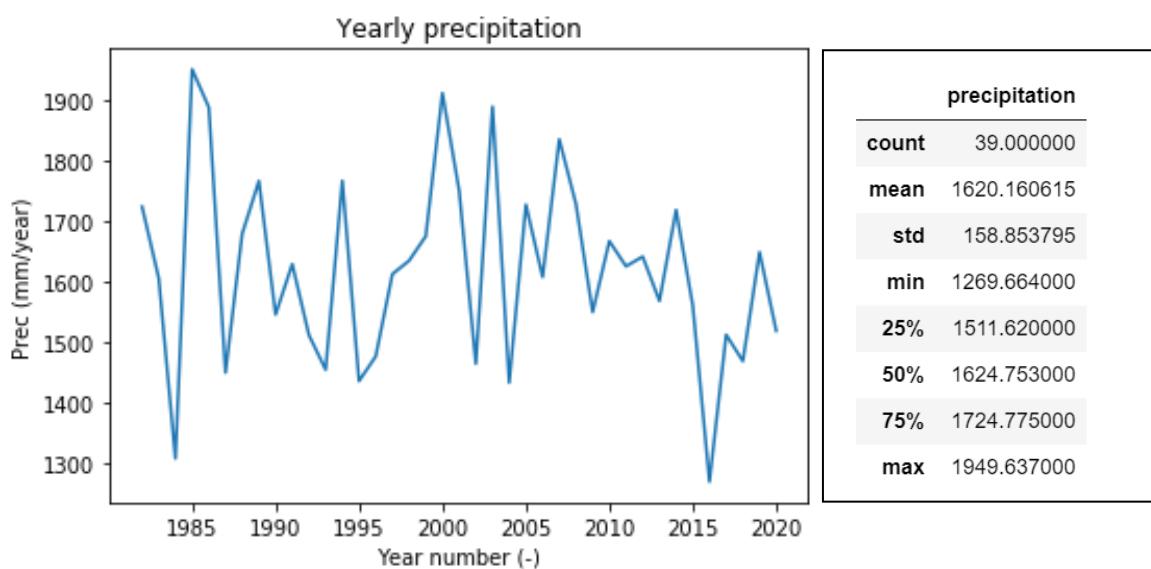


Figure 3: Variation des précipitations annuelles sur la période 1980-2019. (Source : Google Earth Engine)

L'analyse de la figure 3 révèle que les précipitations varient de 1269 mm à 1949 mm avec une moyenne de 1620 mm sur la période d'observation. Ces précipitations sont spatialisées avec les zones d'altitude au Nord-ouest du bassin cumulant de très grandes quantités de pluies.

3.1.4- Géologie, géomorphologie, pédologie et végétation

De façon globale, la géomorphologie du bassin de la Méfou présente un relief marqué par des collines et des bas-fonds inondables avec des altitudes comprises entre 630 m et 1295 m, (Kuété, 1990 ; Ebodé, 2017). Du Nord au Sud, un ensemble de massifs élevés est suivi du plateau de Yaoundé puis du plateau de Nsimalen. On distingue trois types de reliefs : les inselbergs d'altitude entre 850m et 1100m au Nord du bassin ; les altitudes moyennes entre 850 m et 750 m et les zones de bas-fonds en dessous de 750m jusqu'à 630m. Les pentes hydrographiques sont abruptes comprenant de fortes ruptures de pente en amont du bassin, puis s'adoucissant en direction de Nsimalen. Dans la ville de Yaoundé, les formations tectoniques aboutissent à une diversité de paysage permettant l'alternance des collines hautes (40 à 100m) et d'interfluves aux bas-fonds inondables reliés aux versants par de fortes pentes.

La roche mère est constituée de roches métamorphiques tels que le para gneiss, migmatite et schistes. Il s'y trouve aussi les produits d'érosion latéritiques. Le réseau de fractures et de fissures génère des aquifères poreux exploitables au niveau des couches de sols supérieures tandis que des aquifères plus profonds sont localisés dans le gneiss fracturé (Bon *et al.*, 2016; Ntep et *al.*, 2014).

Les sols sont argilo-sabloneux hydromorphes dans les bas-fonds et sont issus des colluvions des pentes et des alluvions des rivières (Bachelier, 1959 ; Ikounga, 1978; Pellier, 1969). Sur le sommet des collines et sur les versants, les sols sont ferralitiques.

Le bassin versant de la Méfou, dès l'origine est recouvert d'une forêt équatoriale hémi-ombrophile. La zone nord du bassin est caractérisée par une forêt stratifiée (sous-bois, arbustes et grands arbres) ; les sommets et les versants sont distingués par une savane arbustive les sterculiacées (cacaoyers...), les ulmacées (ormes...), maracées (caoutchouc...) et ficus sont les familles de végétaux qui prédominent. Les zones humides sont peuplées de cypéracées, raphias et fougères aquatiques (Letouzey, 1968 cité par Tchotsoua, 1994). On observe cependant au niveau de la forêt dense primitive une dégradation par l'intensification de l'agriculture et de l'urbanisation. La dégradation s'étend particulièrement vers le sud du bassin de la Méfou avec une perte des écosystèmes marécageux (Lieunang Letche *et al.*, 2009) et en particulier leur rôle tampon des crues, de rétention et de phytoépuration des polluants (Garcia *et al.*, 2016). La figure 4 présente la carte d'occupation des sols du bassin versant.

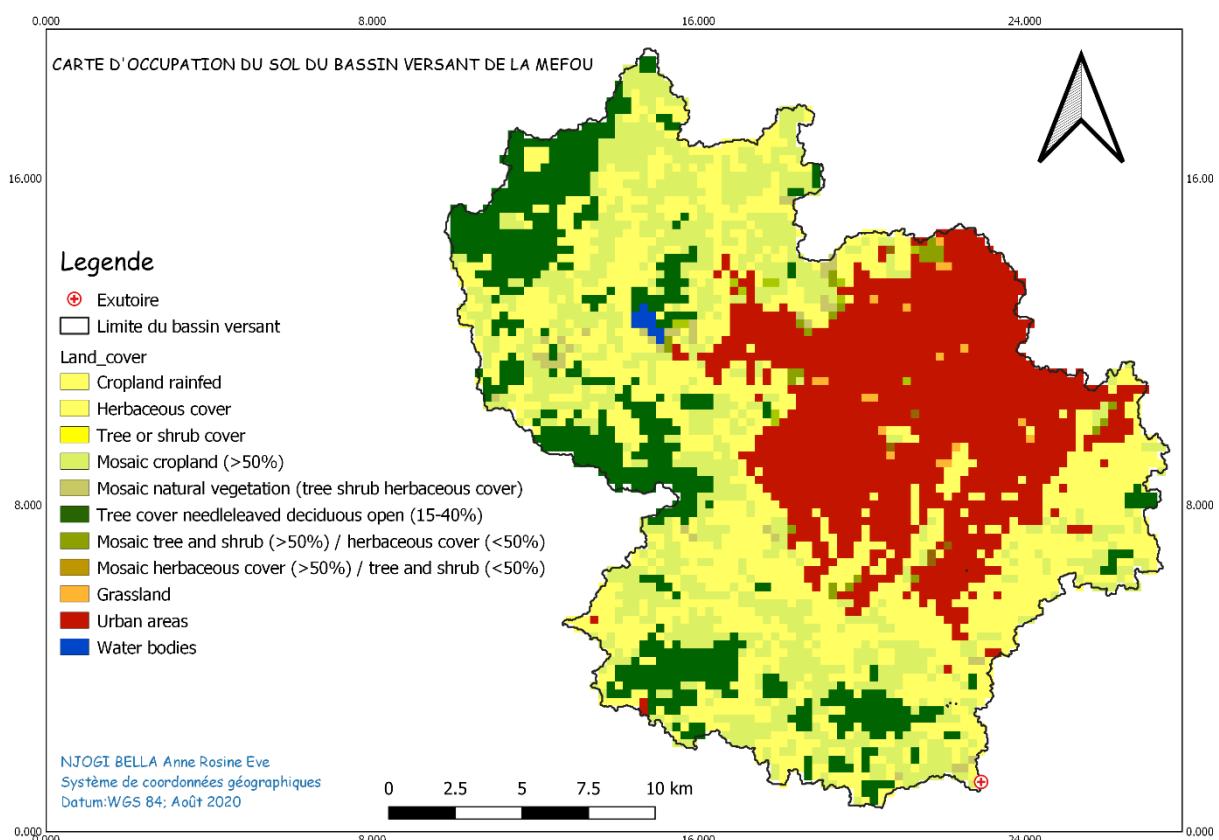


Figure4 : Carte d'occupation du sol du bassin versant de la Méfou (Source : ESACCI-LC-L4-LCCS-Map-300m-P1Y-2015-v2.0.7)

3.1.5- Facteur humain

3.1.5.1- Croissance démographique

La croissance démographique de Yaoundé a toujours été observée depuis la fin de la seconde guerre mondiale comme la plupart des métropoles de pays subsahariens (Tchindjanget *al.*, 2009). Cette croissance est due naturellement aux naissances qui excèdent les décès, mais aussi en grande partie à l'immigration et à l'exode rural après l'indépendance de 1960. La population a ainsi augmenté de 58000 habitants en 1957 à plus de 1,8 millions en 2005 pour atteindre 3 millions en 2017 selon le dernier recensement démographique du Bureau Central de Recensement et d'Etude de la Population au Cameroun (BUCREP, 2010). Le taux de croissance démographique a ensuite diminué de 9,5% à environ 5% dans les années 2000. De nos jours, il est constant de l'ordre de 5,7% entre 2005 et 2017 (INS, 2018). La densité moyenne de population est d'environ 5700 habitants/km² avec de fortes variations spatiales en fonction des quartiers et des types d'habitats considérés (Tchotsoua, 1994).

3.1.5.2- Croissance urbaine

Yaoundé, ville située sur le plateau central africain dotée d'atouts géographiques (altitude moyenne de 750m, situation stratégique au centre du pays entourée de collines), climatiques (climat relativement doux), mais surtout économiques rendirent la station militaire « Yaoundé station » fondée en 1887 (Franqueville, 1984) propice à une implantation durable des coloniaux allemand puis français (Tchindjang *et al.*, 2009). La présence des ethnies forestières a fait de la ville le lieu du commerce de traite (cacao, hévéa, huile de palme, ivoire) qui contribuèrent à son développement et son extension. En 1909 Yaoundé devient la capitale politique et culturelle du Cameroun. Les caractéristiques physiques du site, l'héritage colonial (1884-1960) ont transformé l'aménagement urbain et la répartition des densités de la population entraînant une grande diversité de modes de vies et de types d'habitats. L'extension de la ville s'est faite par rattachement des zones rurales (villages périphériques). L'extension est limitée au Nord par les reliefs et la présence du palais présidentiel autour duquel aucune habitation ne peut être construite le long des principaux axes routiers praticables (Yaoundé-Douala et Yaoundé Nsimalen) (Naah, 2013).

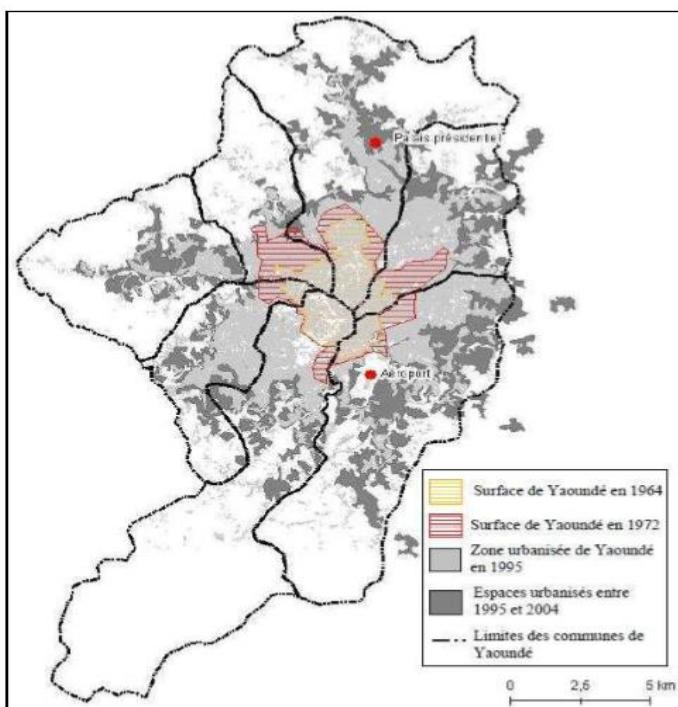


Figure 5 : Carte de l'expansion urbaine de Yaoundé entre 1964 et 2004 (Dauvergne, 2011)

3.2- METHODOLOGIE

La démarche méthodologique adoptée par la présente étude comprend la documentation en rapport avec la thématique, la réalisation d'une enquête socio-économique pour identifier les perceptions des populations locales sur les principales menaces qui entravent le bon fonctionnement du bassin versant, la collecte des données satellitaires pour évaluer la dynamique spatio-temporelle du bassin versant et la modélisation du bassin versant avec le model WEAP.

3.2.1- Evaluation des perceptions des agriculteurs locaux sur les principales menaces qui entravent le bon fonctionnement du bassin versant de la Méfou

L'évaluation des perceptions des populations s'est faite par l'administration d'un questionnaire d'enquête. Les enquêtes de terrain ont porté sur les réactions des agriculteurs face à la dégradation de l'environnement dans le bassin versant de la Méfou, en tenant compte de trois paramètres (Indicateurs, les causes, les conséquences) de la dégradation de l'environnement et du volet de l'eau (accès, usage et cout de l'eau) pour chaque agriculteur. Le choix s'est orienté vers les agriculteurs car ils perçoivent mieux que d'autres répondants les changements qui s'opèrent dans l'environnement. De plus l'agriculture représente un site de besoin en eau dans le modèle hydrologique WEAP que nous allons concevoir sur une période de 40ans. Les enquêteurs étaient des ingénieurs agronomes de niveau Master maitrisant bien les dialectes du milieu. La taille de l'échantillon a été déterminée par la formule de Dagnelie, (1998) :

$$n = \frac{U_{1-\alpha/2}^2 p(1-p)}{d^2}$$

n= taille de l'échantillon (nombre de personnes à interroger)

U= niveau de confiance selon la loi normale centrée réduite (pour un niveau de confiance de 95%, $U_{1-\alpha/2}=1,96$)

P= proportion des personnes enquêtées lors de l'enquête exploratoire qui perçoivent des pressions sur le bassin versant ($p= 0,9$).

d= valeur de probabilité de marge d'erreur de l'estimation. Dans cette étude, $d= 8\%$.

$$n = (1.96^2 * 0.9 * 0.1) / (0.08^2) = 54 \text{ enquêtés.}$$

Nous avons réparti équitablement cette taille d'échantillon entre quatre quartiers dont deux quartiers en milieu rural : Odza et Dragage et deux autres quartiers en milieu urbain à savoir Etoudi et Nkomkana, que nous avons retenus pour cette étude en raison de leur emplacement par rapport au bassin. Pour des raisons d'égalité, nous avons retenu **56 enquêtés** comme taille pour notre étude. 14 enquêtés par quartier ont été choisis au sein des agriculteurs à raison de quatre enquêteurs donc un par quartier sur une période de deux semaines. Les enquêtés ont été choisis de manière aléatoire. Dans un premier temps les enquêteurs ont procédé à des entretiens avec des personnes ressources (responsables administratifs et technique, notables) dans le but de recueillir des informations d'ordre social, économique, historique, écologique et politique. Après ces entretiens, un questionnaire a été soumis au chef de ménage.

Les données recueillies de la collecte des données et les stratégies répertoriées ont été traitées et analysées dans le tableur Excel avec l'aide du logiciel R 3.3.3. Dans un premier temps, il a été question d'encoder ces données dans le tableur Excel de manière à faciliter les analyses statistiques. Ensuite il fallait déterminer les facteurs (quartiers, âge, etc.) qui influencent le bon fonctionnement du bassin grâce à l'analyse de covariance (ANCOVA). Aussi, une analyse factorielle des correspondances a été réalisée uniquement avec le paramètre indicateurs de la dégradation de l'environnement afin de décrire les corrélations avec les quartiers. Pour prioriser les indicateurs, nous avons compté le nombre de répondants ayant cité chaque indicateur.

3.2.2- Cartographie et analyse de la dynamique spatio-temporelle du bassin versant

3.2.2.1- Collecte des images satellitaires

Les images satellitaires correspondant à notre bassin versant ont été obtenues par téléchargement sur le site earthexplorer.usgs.gov. Les images Landsat 4-5 TM C1 Level-1 ont été utilisées pour télécharger les images de l'année 1998 et celles de Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-1 pour le téléchargement des images de l'année 2018 pour notre zone d'étude. L'approche méthodologique utilisée pour la dynamique d'occupation du sol est basée uniquement sur l'utilisation des techniques de la télédétection avec l'interprétation des images satellitaires multi-dates Landsat TM à haute résolution. Les caractéristiques des capteurs utilisés ainsi que des images utilisées pour notre étude sont récapitulées dans le tableau 1 en annexe.

3.2.2.2- Traitement des données satellitaires

Le traitement des données en vue de leur analyse a été fait suivant les objectifs de l'étude en combinant plusieurs approches et outils (Ang *et al.*, 2012 ; Denis, 2016). Les logiciels ENVI CLASSIC 5.0 et QGIS 3.8. ont été utilisés pour le prétraitement et le traitement des images satellitaires acquises afin de concevoir des cartes thématiques des images classifiées. Nous avons procédé au prétraitement des images avec l'outil «Layer stacking » qui nous a permis de regrouper les bandes spectrales numéro 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7 de l'image Landsat-8 en une seule image composée de plusieurs bandes spectrales. Un deuxième prétraitement par l'utilisation de l'outil «Spatial subset» nous a permis de découper spatialement l'image layer-stackée multi-bandes sur une petite zone d'intérêt. La composition des couleurs (RVB 4, 3, 2) a été utilisée pour améliorer la différenciation des types de couverture terrestre à l'écran. Les images prétraitées ont été ensuite modifiées avec l'outil resized data afin de pouvoir dégager les aires d'entraînement (Region Of Interest) pour la calibration (ROI-calibration) et pour la validation (ROI_validation). Les classes d'occupation du sol ont été définies dans ENVI de manière à extraire les données statistiques sur l'évaluation des superficies du bassin relatives à chaque classe d'occupation du sol entre les deux différentes périodes. Ceci nous a permis d'apprécier les superficies du bassin versant par classe d'occupation du sol qui ont connu des changements négatifs ou positifs entre les différentes dates. Le choix des classes s'est fait dans un premier temps en fonction des données de l'occupation des sols récents disponibles tel que présentées sur la figure 4 (Source : ESACCI-LC-L4-LCCS-Map-300m-P1Y-2015-v2.0.7), et de deuxièmement suivant une étude menée sur les conséquences de l'anthropisation de l'occupation des sols (ESA-CCI product 1992-2015) de Perrine (2018) mettant en exergue les cinq classes décrites dans le tableau 1 ci-dessous.

Nous avons utilisé des codes et des symboles pour chaque classe d'occupation du sol retenue et regroupée dans le tableau 1.

Tableau 1 : code et symbole des classes d'occupation des sols

Code	Classe	Symbol
1	Forêt dense	FD
2	Prairies	P
3	Parcelles agricoles	PA
4	Bâties	B
5	Eaux de surface	ES

Les outils *Class Statistics* et *Change Detection Statistics* contenus dans la fenêtre *Post Classification* dans ENVI 5 ont été utilisés pour l'analyse des résultats de la classification et des changements spatio-temporels. Ces outils ont permis de générer respectivement les statistiques descriptives sur les superficies et proportions d'occupation des différentes classes d'occupation du sol pour chacune des dates d'étude de comparaison et de mettre en évidence les modifications du couvert végétal entre 1998 et 2018. Les images traitées ont été importées dans QGIS 3.8.3 avec GRASS 7.6.1 pour la réalisation des cartes.

3.2.3- Analyse et modélisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Méfou jusqu'en 2050.

Plusieurs scénarios ont été créés en utilisant le modèle d'évaluation et de planification de l'eau (WEAP) pour mieux appréhender le comportement hydrologique du bassin versant de la Méfou.

3.2.3.1- Paramètres d'entrée

Le taux de croissance de la population et le volume d'eau consommé par habitant ont été obtenus respectivement auprès du BUCREP / Bureau central de recensement et d'étude de la population au Cameroun et du Ministère de l'eau. Les tendances des cultures et la superficie irriguée dans la ville de Yaoundé, ainsi que les superficies des prairies ont été obtenues auprès du ministère de l'Agriculture et du développement rural (MINADER). Les débits à l'exutoire du bassin versant de station de Nsimalen et de nos quatre rivières en 2010 ont été obtenus auprès de l'Office de la recherche scientifique et technique outre-mer (ORSTOM), organisme aujourd'hui remplacé par l'IRD (Institut de recherche pour le développement) (Olivry , 2011).

Les paramètres d'entrée du modèle concernant le bassin versant de la Méfou sont regroupés dans le tableau suivant

Tableau 2 : Paramètres d'entrée du modèle WEAP

Sites de demande	Année de base (2010)	Taux de croissance	Besoin en eau annuel	Part réellement consommée
Milieu rural	137942 hbts	5,7%	50 m ³ /hbts	30 m ³
Cultures	7225 ha	3%	2000 m ³ /ha	1600 m ³
Prairies	3825 ha	1%	500 m ³ /ha	300 m ³
Villes	185042 hbts	5,7%	70 m ³ /hbts	49 m ³

hbts= habitants ; ha= hectare

3.2.3.2-) Modélisation du bassin versant de la Méfou avec WEAP

Nous avons schématisé l'ensemble du réseau hydrographique du bassin versant de la Méfou qui comprend quatre rivières (Méfou, Mfoundi, Anga'a et Nga) qui approvisionnent en eau les quatre sites de demande. Ces ressources en eau sont en relation avec les sites de demande par deux types de liaison : les liaisons de transmission qui vont des ressources en eau (rivière) vers les sites de demande et des liaisons de retour (qui vont des sites de demande vers les ressources en eau). La figure 6 présente le schéma du bassin dans WEAP avec les liens hydrologiques et infrastructurels du bassin. Chaque site de demande est affecté d'un niveau de priorité (1) ainsi que d'un système de préférence de ses sources d'approvisionnement possibles permettant ainsi une grande variété dans la gestion de la demande de ressources en eau suivant la politique de l'eau. En conséquence, la structure du modèle développé prend en compte les éléments impliqués, y compris l'emplacement des sites de demande, le lien de transport, la rivière, les débits de nos quatre rivières. Les problèmes potentiels de l'eau et les problèmes de ressources en eau qui pourraient survenir dans un futur proche ont été étudiés à travers plusieurs scénarios.

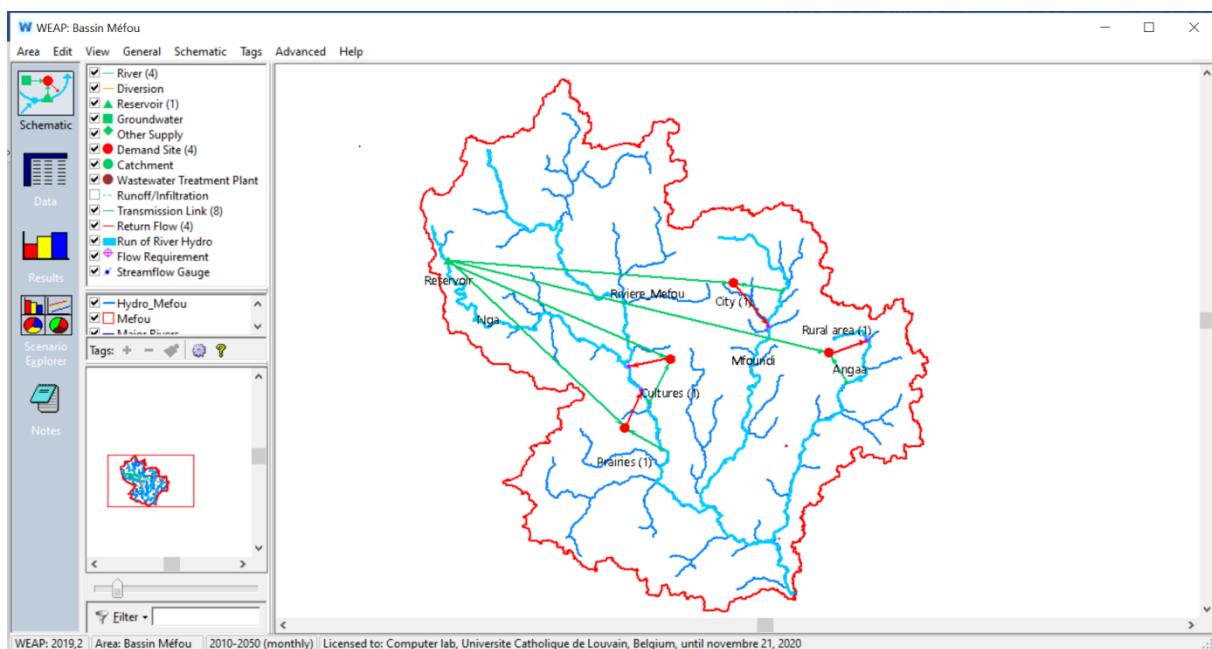


Figure 6 : interface WEAP montrant les liens hydrologiques et infrastructurels

✓ *Scénario de référence*

Il est établi pour décrire l'évolution normale du système avec les données réelles sans intervention humaine ni changements climatiques. Le scénario de référence est basé sur la période allant de 2011 à 2050. L'année de base (current accounts) considérée est alors 2010. On encode les données réelles des débits mensuels de chaque rivière, les besoins en eau de chaque site de demande (catégorie d'utilisateur de la ressource en eau) et de taux de croissance, le prélèvement de chaque site de demande pour voir les projections futures. Tous les autres scénarios sont arrimés sur le scénario de référence.

✓ *Scénario croissance démographique très élevée*

Ce scénario est basé sur le canevas du scénario de référence à la seule différence que le taux de croissance démographique qui était de 5,7% dans le scénario de référence, a été fixé à 7% dans celui-ci. Les besoins en eau par site de demande et les approvisionnements en eau des ressources en eau restent inchangés comme dans le scénario de référence. Le but de ce scénario est d'évaluer l'influence future d'une augmentation encore plus rapide de la population (taux de croissance de 7%) sur les besoins en eau et la fourniture d'eau pour satisfaire ces besoins.

✓ *Scénario changement climatique*

Les débits des rivières étant fortement liés aux précipitations, une diminution des précipitations entraînera certainement une réduction des débits. Le scénario changement climatique est calqué sur le scénario de référence à la seule différence que dans le scénario changement climatique, on suppose que les débits des ressources en eau ont diminué de 25%. Ce scénario ambitionne d'évaluer l'impact de cette diminution sur la satisfaction des besoins en eaux des sites de demande au cours de la période de simulation.

✓ *Scénario Réservoir*

Dans ce scénario les taux de croissance des sites de demande et les débits de rivière restent les mêmes que ceux du scénario de référence. Cependant, les besoins vont augmenter en fonction de la croissance des populations. Le scénario de Référence ambitionne d'évaluer le volume d'eau dont on doit disposer pour continuer à couvrir les besoins en eau des sites de demande lorsque les débits de la rivière ne seront plus suffisants pour couvrir les besoins de la

population. On fixe un volume d'eau au réservoir et on voit l'influence que ce volume peut avoir sur la fourniture de l'eau pour satisfaire les sites de demande. Il permet de combler le déficit en eau au niveau des sites de demande pendant une période donnée.

3.2.3.4-) Calibration et validation du modèle

Des ensembles de données devraient être utilisés pour la période 2011-2016 parmi les périodes où les données de débit étaient disponibles. Pour la calibration, nous devrions utiliser les données de la période 2011-2013 pour étalonner le modèle, tandis que les données de la période 2014-2015 ont été utilisées pour valider le modèle. Ceci devait être fait à l'aide de la fonction d'étalonnage intégrée de WEAP appelée PEST (WEAP, 2016). Mais compte tenu du temps qui nous a été imparti et de la panoplie des données à traiter, nous n'avons pas pu réaliser cette analyse.

4- RESULTATS

4.1- Evaluation des perceptions des agriculteurs locaux sur les principales menaces qui entravent le bon fonctionnement du bassin versant de la Méfou.

L'évaluation des perceptions des agriculteurs sur les principales menaces qui entravent le bon fonctionnement du bassin versant de la Méfou s'est faite par l'administration d'un questionnaire d'enquête en se focalisant principalement sur les indicateurs, les causes, les conséquences de la dégradation de l'environnement, ainsi que sur l'aspect accès, utilisation /consommation et coût de l'eau dans les différents quartiers où nous avons mené l'étude. Les résultats d'enquêtes sont présentés sur les figures (7, 8, 9 et 10) et tableaux 3 et 4 ci-dessous.

4.1.1-Indicateurs de la dégradation de l'environnement perçus par les enquêtés

Plusieurs indicateurs de la dégradation de l'environnement dans le bassin versant ont été identifiés par les agriculteurs de chaque quartier. En effet, les répondants citaient dans un premier temps les indicateurs qui leur venaient à l'esprit. Ensuite, une liste (d'autres indicateurs) leur était proposée pour s'assurer que les répondants avaient cité tous les indicateurs qu'ils connaissaient. Ceci permettait de pallier d'éventuels oubli. La figure 7 ci-dessous présente 08 indicateurs identifiés par les répondants. Il s'agit de la pollution de l'air, de la pollution de l'eau, des mauvaises odeurs, de l'excès de chaleur, de la perte du couvert végétal, de l'insalubrité, des ravageurs et des espèces invasives. Elle met également en exergue la répartition des indicateurs de la dégradation perçus par agriculteurs des différents quartiers. L'analyse de l'histogramme révèle que 92,86% des agriculteurs des quartiers Odza et 85,71% du quartier Etoudi perçoivent les mauvaises odeurs et la pollution de l'eau comme des indicateurs prioritaires de la dégradation de l'environnement. 71,43% et 64,29% des agriculteurs du quartier Etoudi perçoivent la pollution de l'air et l'insalubrité comme deuxième indicateur de la dégradation de l'environnement. Viennent ensuite respectivement 64,29% des agriculteurs du quartier Nkomkana, 57,14% des agriculteurs du quartier Odza qui affirment que l'excès de chaleur, les espèces invasives et la perte du couvert végétal sont des indicateurs de la dégradation important de l'environnement. Les mauvaises odeurs et la pollution de l'eau restent donc de loin les indicateurs majeurs de la dégradation de l'environnement dans ce volet.

Inventaire des indicateurs de la dégradation de l'environnement par les enquêtés

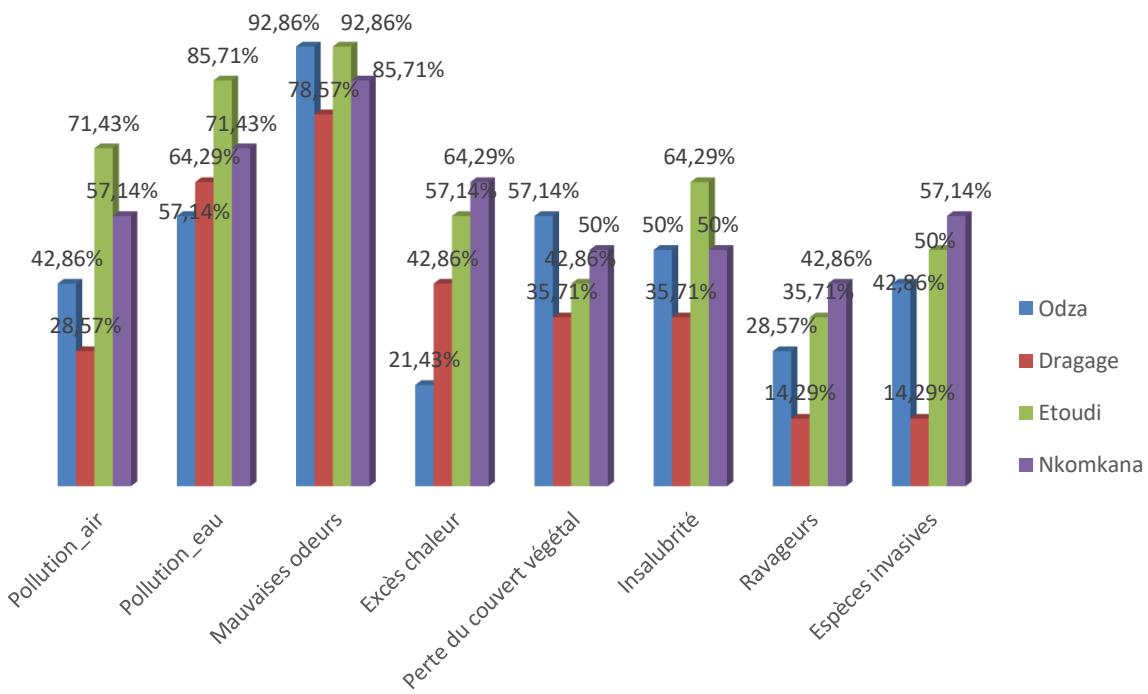


Figure 7 : Inventaire des indicateurs de la dégradation de l'environnement par les enquêtés

4.1.2-Causes de la dégradation de l'environnement perçus par les enquêtés

Plusieurs causes de la dégradation de l'environnement ont été identifiées dans le bassin versant par les agriculteurs de nos quatre différents quartiers. La figure 8 ci-dessous énumère six causes : la déforestation, l'urbanisation, la mauvaise gestion des eaux et des ordures, une forte démographie, et la pauvreté. L'analyse de l'histogramme révèle que respectivement 100% et 92,86% des agriculteurs des quartiers Etoudi et de Odza perçoivent la déforestation comme cause majeure de la dégradation de l'environnement. Plus de 85 % des agriculteurs des quartiers Dragage et Nkomkana et plus de 70% de ceux des quartiers Nkomkana et Odza affirment respectivement que l'urbanisation et la forte démographie sont des causes importantes de la dégradation de l'environnement. 71,43% des agriculteurs du quartier Etoudi et Odza sont également du même avis. Enfin 64,29% des agriculteurs du quartier Nkomkana et 57,14% des agriculteurs des quartiers Etoudi, Odza et Nkomkana trouvent que la pauvreté et la mauvaise gestion des ordures sont des causes importantes de la dégradation de

l'environnement. Un très faible pourcentage des agriculteurs perçoit la mauvaise gestion des eaux comme cause importante de la dégradation de l'environnement. Il en ressort donc de cette analyse que la déforestation, l'urbanisation et la forte démographie sont les trois principales causes majeures de la dégradation de l'environnement à maîtriser si nous voulons éviter d'importants enjeux dans le futur.

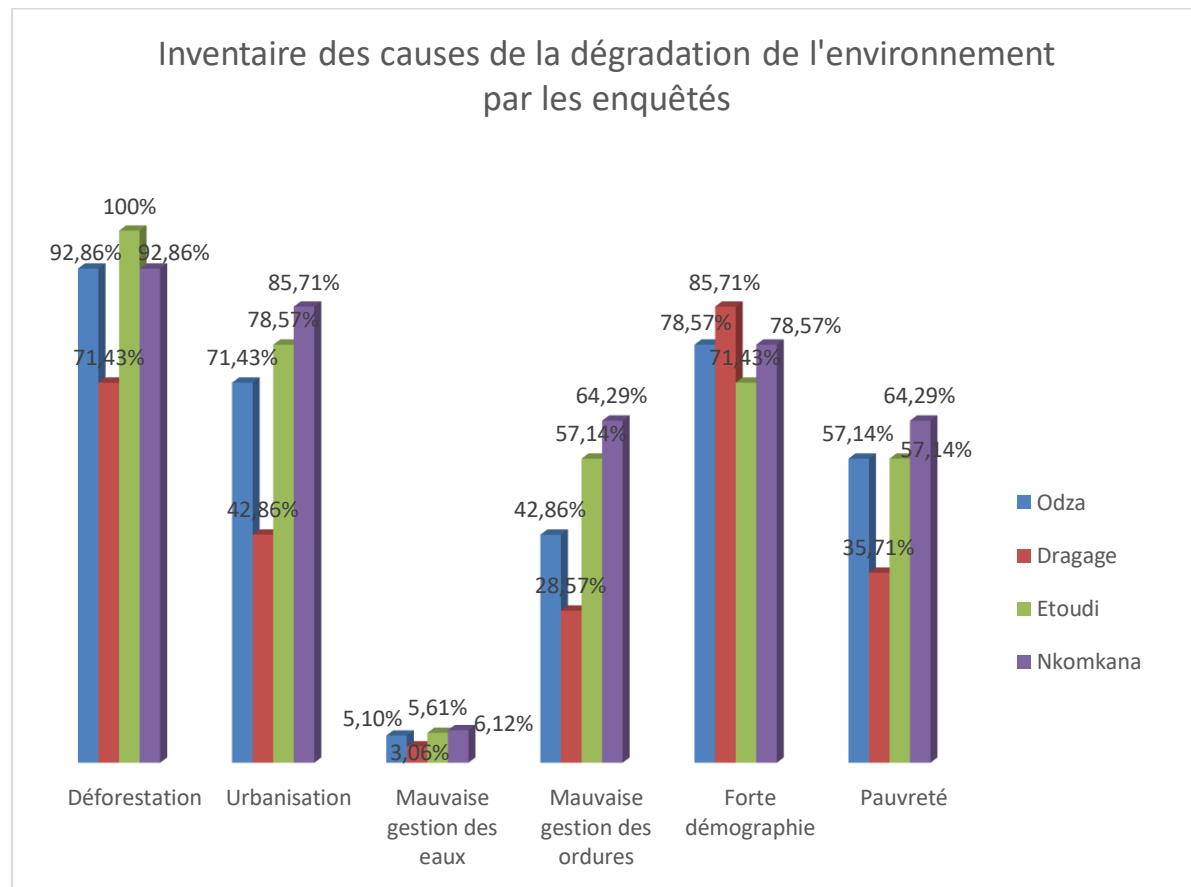


Figure 8 : Inventaire des causes de la dégradation de l'environnement par les enquêtés

4.1.3- Conséquences de la dégradation de l'environnement perçus par les enquêtés

Diverses conséquences de la dégradation de l'environnement ont été identifiées dans le bassin versant de la Méfou par les agriculteurs enquêtés. La figure 9 ci-dessous présente six conséquences : les maladies hydriques, la prolifération des nuisibles, une mortalité élevée, l'érosion, la baisse des rendements agricoles, l'inondation. L'analyse de l'histogramme montre dans un premier temps sans contester que 100% des agriculteurs du quartier Etoudi perçoivent les maladies hydriques comme conséquences prioritaire de la dégradation de l'environnement. Tandis que 85,71% des agriculteurs du quartier Nkomkana affirment que les

maladies hydriques et la prolifération des nuisibles sont des enjeux importants de la dégradation de l'environnement. 78,57% des agriculteurs du quartier Etoudi considèrent la prolifération des nuisibles et la baisse des rendements agricoles comme conséquences de la dégradation de l'environnement. 71,43% des agriculteurs des quartiers Nkomkana identifient également la baisse des rendements agricoles comme conséquences importantes de la dégradation de l'environnement. Enfin, 64,29% des agriculteurs du quartier Etoudi prennent en compte l'érosion comme conséquence de la dégradation de l'environnement. Les facteurs comme l'inondation ne sont pas à négliger, car 50% des agriculteurs les considèrent comme conséquences de la dégradation de l'environnement. La mortalité élevée présente un faible pourcentage de conséquences de la dégradation de l'environnement.

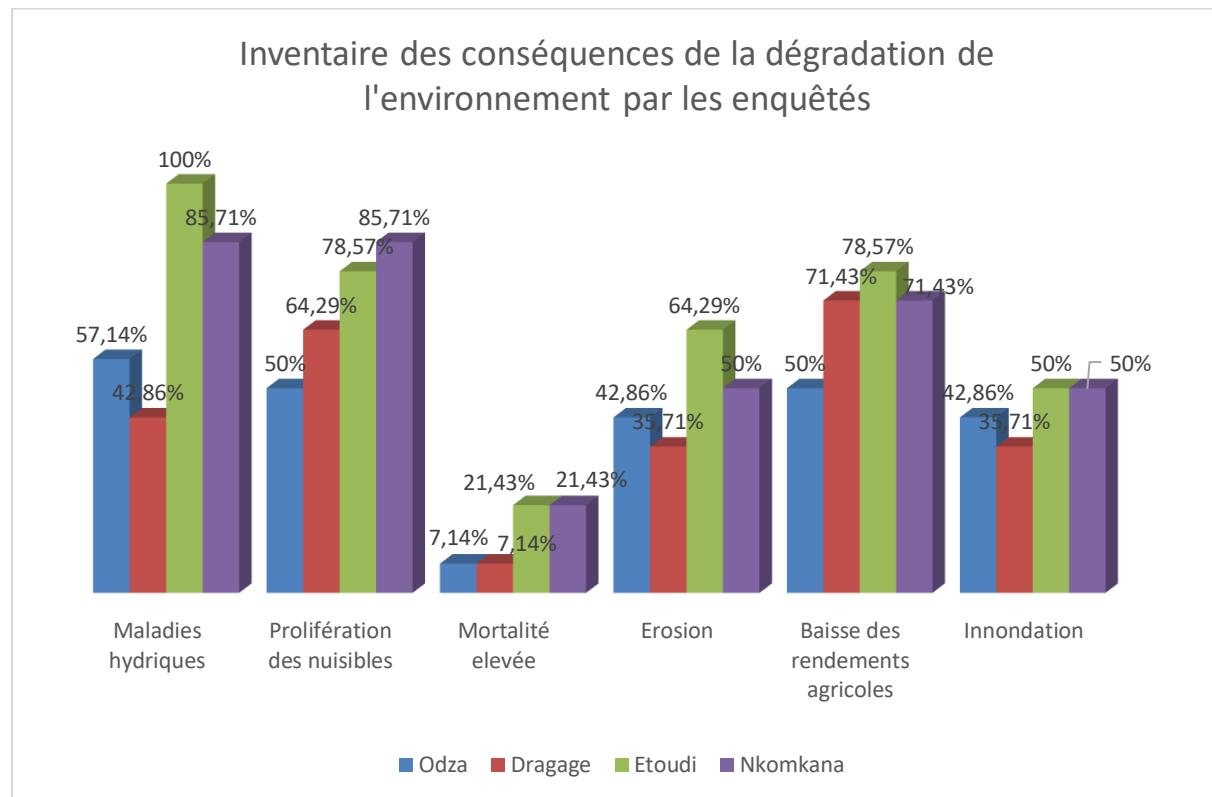


Figure 9 : Inventaire des conséquences de la dégradation de l'environnement par les enquêtés

4.1.4-Accès et usage de l'eau par les agriculteurs dans chaque quartier

Le pourcentage d'agriculteurs ayant accès à l'eau potable et à domicile a été déterminé ainsi que celui des agriculteurs utilisant de l'eau pour irriguer leurs cultures (figure 10). L'analyse de l'histogramme révèle que le quartier dragage présente les agriculteurs ayant le pourcentage le plus élevé ayant accès à l'eau potable (71,43%) et à domicile (64,29%). Viennent ensuite

les agriculteurs du quartier Etoudi et Odza avec 57,14% d'accès à l'eau potable et à domicile. Enfin 50% des agriculteurs du quartier Nkomkana ont accès à l'eau potable et à l'eau à domicile. Les agriculteurs du quartier Etoudi présentent un pourcentage élevé quant à la possibilité d'irriguer leurs cultures, ceci est dû à la proximité des habitats de ce quartier auprès des parcelles agricoles et des cours d'eau environnants (quartier rural). Par ailleurs, 35,71%, 28,57% et 21,43% des agriculteurs des quartiers Nkomkana, Dragage et Odza ont accès à l'usage de l'eau pour l'irrigation. Il faut noter que Dragage et Odza sont des quartiers urbains donc les agriculteurs y résidant ont des difficultés à pratiquer l'irrigation dans leurs champs à cause de la distance entre les habitats et les champs. Quant au cout et la consommation de l'eau de chaque agriculteur, Le Tableau 3 ci-dessous révèle qu'un agriculteur consomme en moyenne 0,225 m³ d'eau / Jour soit 225litres/Jour et dépense en moyenne 2125 Fcfa/m³ d'eau.

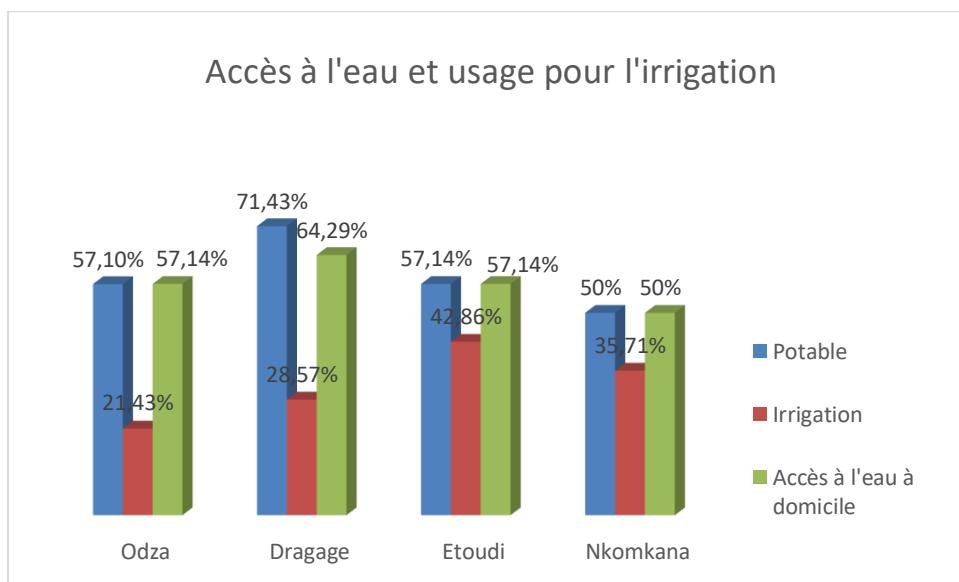


Figure 10 : Accès à l'eau et usage pour l'irrigation

Tableau 3 : Moyenne de consommation d'eau et cout pour chaque quartier par enquêté (Source enquête)

Quartiers	Consommation d'eau en m ³ /jr	Coût en Fcfa/m ³
Odza	0,25	2000
Dragage	0,3	2500
Etoudi	0,15	2000
Nkomkana	0,2	2000
Moyenne	0,225	2125

4.1.5-Effet des facteurs et des quartiers sur les indicateurs de la dégradation de l'environnement

L'analyse de la covariance effectuée sur l'ensemble des indicateurs de la dégradation a montré que ces indicateurs varient significativement d'un quartier à un autre.

Tableau 4: Résultats de l'analyse de covariance (ANCOVA) des facteurs : quartiers, sexe, âge, le niveau d'instruction sur les indicateurs de la dégradation de l'environnement.

Source	Df	SumSq	MeanSq	F value	P-value
Quartiers	3	22.65	7.55	27.89	0.019*
Instruction	1	10.90	10.91	1.717	0.199
Sexe	1	0.75	0.75	0.119	0.733
Age	1	1.81	0.60	0.075	0.662
Ethnie	1	5.85	6.85	1.079	0.306
Instruction:Sexe	1	2.26	2.25	0.355	0.555
Instruction:Village	3	8.71	2.91	4.57	0.064
Sexe:Village	3	13.96	4.65	0.733	0.540
Instruction:Age	1	0.42	0.415	0.065	0.800
Sexe:Age	1	4.10	4.70	0.741	0.396
Village:Age	3	1.81	0.60	0.095	0.962
Instruction:Village:Age	3	3.93	1.33	0.209	0.840
Sexe:Village:Age	1	0.30	0.29	0.047	0.829

Codes : '****' = Significatif à 0,0 ; '**' = significatif à 0,001 ; '*' = significatif à 0,05 ; '.' = significatif à 0,1 ; ' ' = significatif à 1

L'analyse du tableau 4 révèle que les indicateurs de la dégradation de l'environnement varient d'un quartier à un autre. Le facteur quartier est le seul facteur qui influence la connaissance des indicateurs dans les quartiers environnant le bassin versant de la Mefou.

4.1.6-Caractérisation des indicateurs de la dégradation de l'environnement suivant les quartiers

Nous avons effectué une analyse factorielle des correspondances pour apprécier les corrélations entre les indicateurs de la dégradation de l'environnement et les quartiers. Ceci nous a permis de déterminer le facteur le plus cité par les enquêtés et de les relier à chaque quartier. Les résultats sont présentés dans la figure 11 ci-dessous. Les deux premiers axes (Dim 1 et Dim 2) expliquent 89,42% de l'information totale collectée. Le quartier Dragage est corrélé négativement à l'axe 1 tandis que le quartier Odza est corrélé négativement à l'axe 2. Les quartiers Etoudi et Nkomkana sont corrélés positivement à l'axe 2. Quant aux facteurs de la dégradation de l'environnement, la pollution de l'air et les ravageurs sont corrélés positivement à l'axe 1. Tandis que l'excès de chaleur, l'insalubrité, les mauvaises odeurs, la perte de couverture végétal sont corrélés négativement à l'axe 2. La pollution de l'eau est corrélée négativement à l'axe 1. La superposition des indicateurs de la dégradation de l'environnement aux quartiers révèle que les agriculteurs du quartier Dragage ont cités les mauvaises odeurs et la pollution de l'eau comme indicateurs que les autres répondants des autres quartiers. Quant aux agriculteurs du quartier Odza, la perte du couvert végétal et les mauvaises odeurs sont les indicateurs qu'ils ont le plus cités que les répondants des autres quartiers. Les agriculteurs du quartier Nkomkana se distinguent des autres quartiers en citant l'excès de chaleur, la pollution de l'air, les ravageurs et ceux du quartier Etoudi ont cité l'insalubrité et la pollution de l'eau plus que les répondants des autres quartiers.

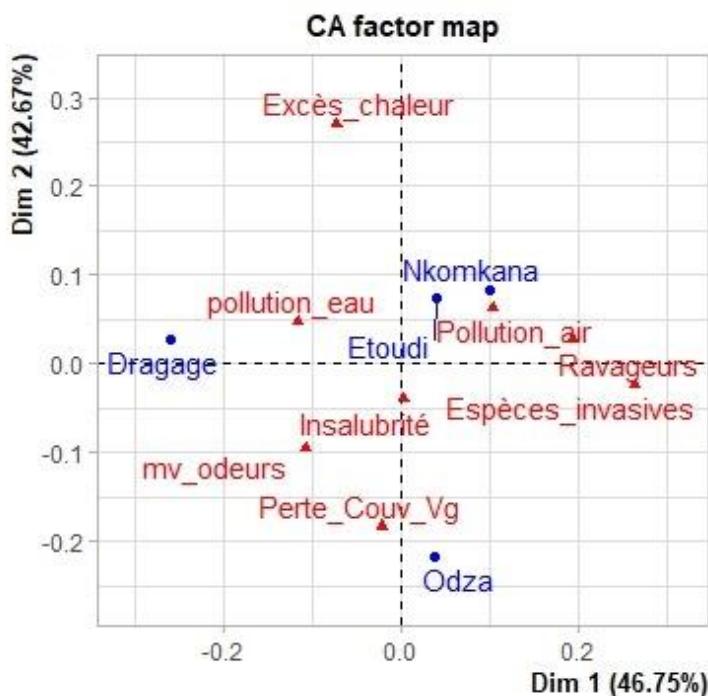


Figure 11 : Plan factoriel montrant les indicateurs de dégradation suivant les quartiers dans le système d'axe factoriel (1,2).

4.2- Cartographie et analyse de la dynamique spatio-temporelle du bassin versant de la Méfou entre 1998 et 2018

Une analyse cartographique de la dynamique spatio-temporelle du bassin versant de la Méfou a été réalisée afin de déterminer les différents facteurs limitants les ressources naturelles face à la demande de la population.

4.2.1-Etat de l'occupation des sols dans le bassin versant de la Méfou en 1998

L’observation et l’interprétation de la carte d’occupation des sols de 1998 (Figure 12) révèle une occupation des sols dominée respectivement par une forêt dense, des bâtis, des parcelles agricoles, des prairies et des eaux de surfaces en pourcentage faible.

Ces observations sont confirmées par la figure 13 du graphe de répartition des différentes unités d’occupation des sols suivants :

- La forêt dense plus concentrée au Nord du bassin s’étend sur 15 193,75 ha soit 35,75% de la superficie totale du bassin. Les bâtis représentent 10 030 ha soit 23,6 % de la superficie totale du bassin. Les parcelles agricoles couvrent une superficie de 8529,75 ha soit 20,07 % de la

superficie totale du bassin. Les prairies et les eaux de surface couvrent respectivement 6621,5 ha et 1275 ha soient 15,58% et 3 % de la superficie du bassin.

Par ailleurs, la matrice de confusion de l'image Landsat 5 TM C1 Level 1(tableau5) indique une classification effectuée correcte de 93,14% (coefficient de Kappa). Dans le détail, les classes forêt dense, eau de surface et prairies sont les mieux classées avec respectivement, des valeurs de l'ordre de 97,55%, 97,95% et 95,32% contre 89,20% et 85,72% des parcelles agricoles et des bâtis. Les classes forêt dense, prairies et eau de surface sont celles qui ont été le moins affectées par les échantillons des autres classes avec de faibles pourcentage de classes non classifiées. Cependant, les parcelles agricoles (4,72%) et les bâtis (7,68%) semblent avoir été plus souvent choisies à la place d'autres classes avec un pourcentage élevé de classes non classifiées.

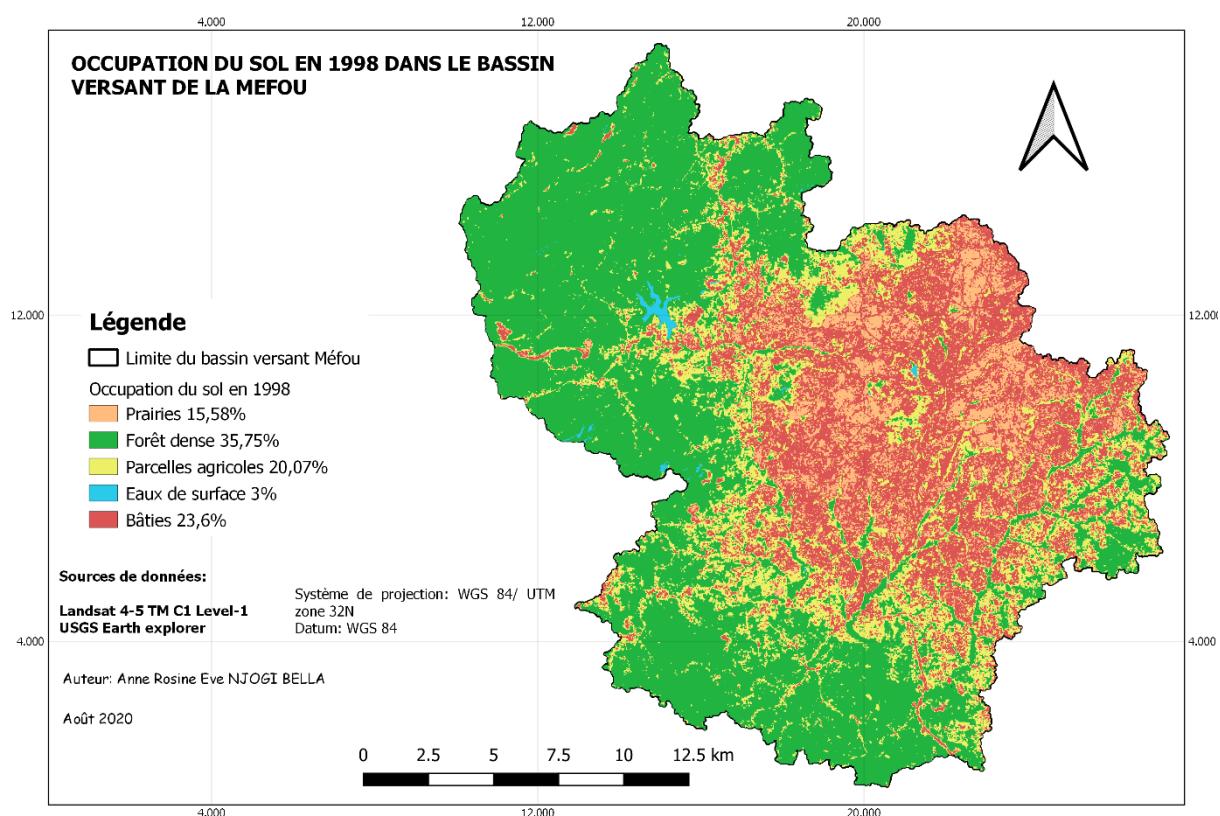


Figure 12 : Carte de l'occupation du sol en 1998 dans le bassin versant de la Mefou

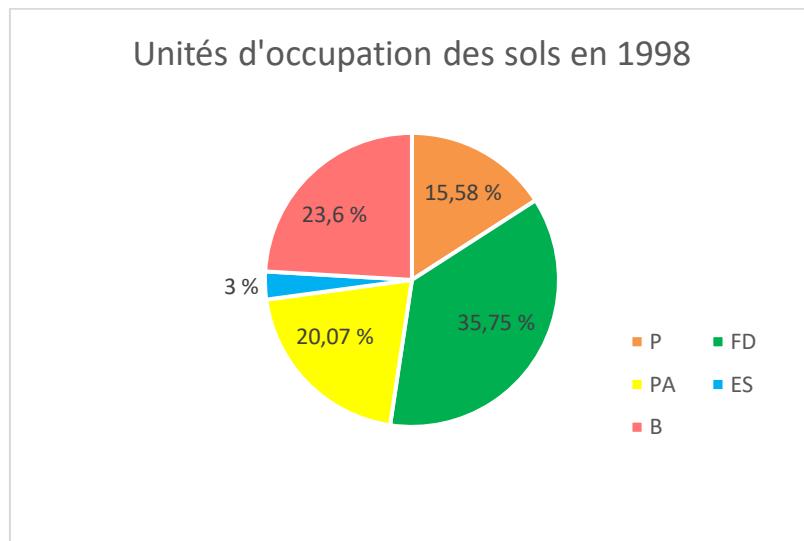


Figure 13 : Répartition des unités d'occupation des sols dans le bassin versant de la Méfou en 1998 Légende : P : Prairies ; PA : Parcelles agricoles ; ES : Eaux de surface ; B: Bâties; FD : Forêt dense.

Tableau 5 : Matrice de confusion (1998)

Unités d'occupation du sol	Images classifiées					
	Forêt dense	Prairies	Parcelles agricoles	Eau de surface	Bâties	Non classifiés
Foret dense	97,55	0	0	0	0	2,45
Prairies	0	95,32	3,89	0	0	0,79
Parcelles agricoles	2,11	3,97	89,20	0	0	4,72
Eau de surface	0	0	0	97,95	0	2,05
Bâties	0	4,25	2,35	0	85,72	7,68
K				93,14		

K=Coefficient de kappa

4.2.2-Etat de l'occupation des sols dans le bassin versant de la Méfou en 2018

L'analyse de la carte d'occupation des sols de 2018 (Figure 14) témoigne de la dégradation de la forêt dense, une disparité des prairies et une régression des eaux de surface (3% à 1,5%) qui connaissent une forte conversion au profit des formations anthropisés (cultures).

Ces observations sont confirmées par la figure 15 du graphe de répartition des différentes unités d'occupation des sols suivants :

- La forêt dense a fortement régressé et s'étend sur 11 198,75 ha soit 26,35% de la superficie totale du bassin. Les bâties et les parcelles agricoles ont fortement augmentés et représentent respectivement 15117,25 ha et 12 155 ha soit 35,57 % et 28, 60 % de la superficie totale du bassin. Les prairies et les eaux de surface ont régressé de moitié et couvrent respectivement 3391,5 ha et 637,5 ha soient 7,98% et 1,5 % de la superficie du bassin.

La matrice de confusion de l'image Landsat 8 OLI-TIRS Level 1 (tableau 7) indique une classification effectuée correcte de 91,92% (coefficient de Kappa). Dans le détail, les classes prairies, eau de surface et bâties sont les mieux classées avec respectivement, des valeurs de l'ordre de 92,78%, 98,99% et 95,72% contre 86,95% et 85,18% de la forêt dense et des parcelles agricoles. Les classes eau de surface et bâties sont celles qui ont été le moins affectées par les échantillons des autres classes avec de faibles pourcentage de classes non classifiées. En revanche, 7,76% des parcelles agricoles et 9,25% de forêt dense semblent avoir été plus souvent confondus avec d'autres classes ou ont été non classifiés.

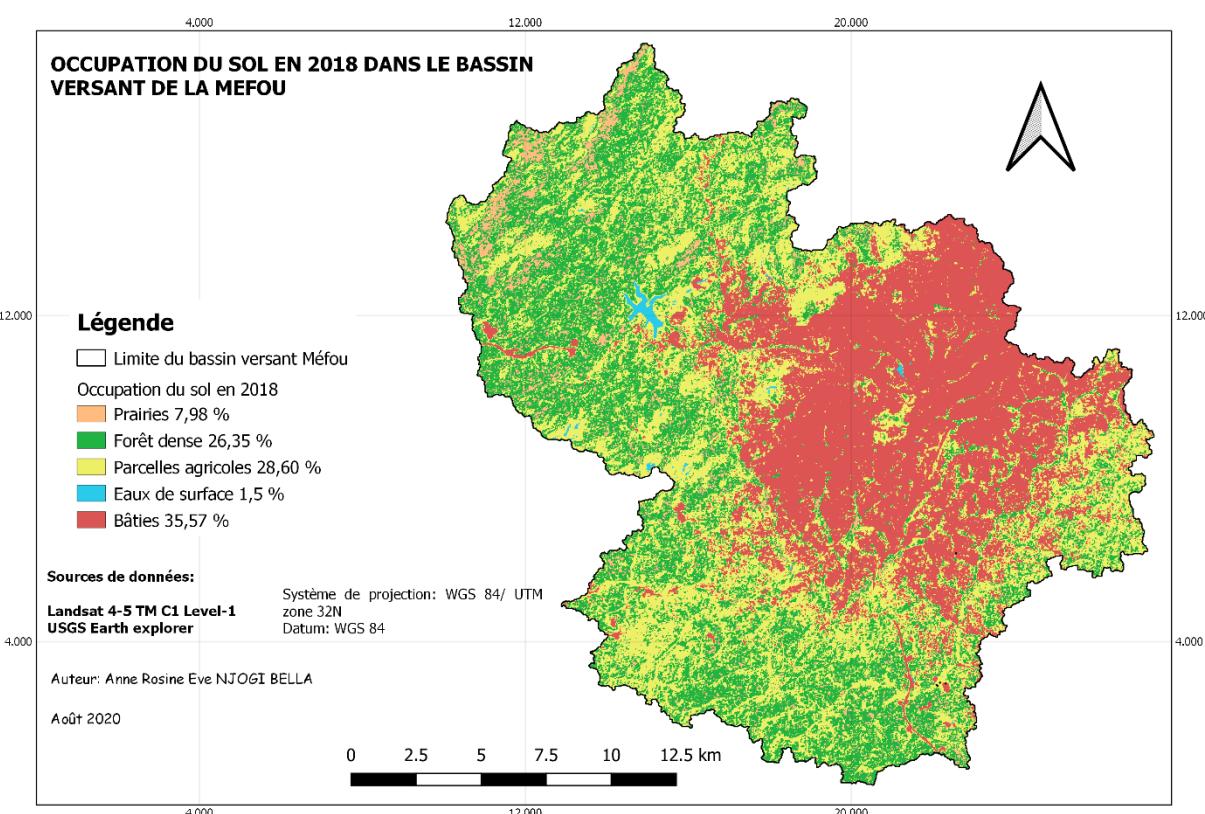


Figure 14 : Carte de l'occupation du sol en 2018 dans le bassin versant de la Mefou

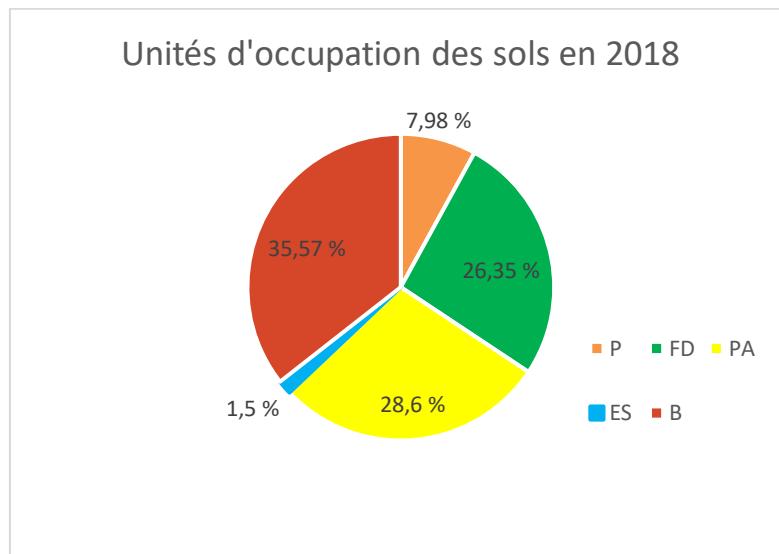


Figure 15 : Répartition des unités d'occupation des sols dans le bassin versant de la Méfou en 2018 Légende : P : Prairies ; PA : Parcelles agricoles ; ES : Eaux de surface ; B: Bâtis; FD : Forêt dense.

Tableau 6 : Matrice de confusion (2018)

Unités d'occupation du sol	Images classifiées					
	Forêt dense	Prairies	Parcelles agricoles	Eau de surface	Bâtis	Non classifiés
Forêt dense	86,95	0	3,80	0	0	9,25
Prairies	0	92,78	2,65	0	0	4,57
Parcelles agricoles	2,88	4,18	85,18	0	0	7,76
Eau de surface	0	0	0	98,99	0	1,01
Bâtis	0	0	1,65	0	95,72	2,63
K				91,92		

K=Coefficient de kappa

4.2.3- Détection des changements dans le bassin versant de la Méfou

L'évolution de l'occupation du sol dans le bassin versant de la Méfou entre 1998 et 2018 a été évaluée (Tableau 6). Elle montre les différents changements du bassin et leurs variations en superficies. En effet, deux types de changement ont été observés dans le bassin versant entre les années 1998 et 2018 : les changements positifs qui se traduisent par l'accroissement des

superficies occupées par la population et les changements négatifs qui s'expriment par la perte de superficie des ressources naturelles.

Tableau 7 : Superficies et taux de variation des différentes unités d'occupation des sols dans le bassin versant de la Méfou entre 1998 et 2018

Unités d'occupation du sol	Etat en 1998 (superficie en ha)	Etat en 2018 (superficie en ha)	Variation (superficie en ha)	Taux d'évolution au sein de la formation (%)	Taux annuel d'évolution (%)
Prairies	6621,5	3391,5	-3230	-48,78	-2,43
Forêt dense	15193,75	11198,75	-3995	-26,29	-1,31
Parcelles agricoles	8529,75	12155	3625,25	42,50	2,12
Eaux de surface	1275	637,5	-637,5	-50	-2,5
Bâties	10030	15117,25	5087,25	50,72	2,53
Total	42 500	42 500	---	---	---

Sur les cinq unités d'occupation du sol identifiées dans le bassin versant de la Méfou, deux ont connu un changement positif et trois ont eu un changement négatif. En effet les bâties et les parcelles agricoles ont eu un taux de changement positif. Le plus élevé des deux sont les bâties avec 50,72% et les parcelles agricoles 42,50%. Le taux annuel d'évolution des bâties est également plus fort et s'élève à 2,53% et celui des parcelles agricoles est de l'ordre de 2,12%. Par contre les eaux de surface ont connu le plus fort taux de changement négatif avec -50% et un taux annuel d'évolution de -2,5 % ; ils sont suivis respectivement des prairies -48,78% et de la forêt dense -26,29% avec des taux annuels d'évolution -2,43% et -1,31%.

4.2.4- Analyse des changements de l'occupation des sols dans le bassin versant de la Méfou de 1998 à 2018

Les changements dans l'occupation des sols ont été évalués à travers la matrice de transition présentée dans le tableau 8. La matrice est obtenue à partir des données statistiques issues de la superposition des deux cartes d'occupation des terres, ceci à l'aide de la fonction « Intersect » de la boîte à outils de traitement de QGIS 3.8.3 with GRASS 7.6.1. Cette matrice permet de comprendre et d'apprécier les conversions (progression ou régression) qui s'effectuent d'une

unité d'occupation à une autre ainsi que sa stabilité. Les données en diagonale traduisent les unités restées intactes, celles au-dessus de la diagonale expriment la régression tandis que celles en dessous de la diagonale révèle la progression.

L'analyse de la matrice révèle que durant la période allant de 1998 à 2018, 73,71% de la forêt dense sont restés stables alors que 2,8% sont transformés en prairies, 17,30% en parcelles agricoles, 6,19% sont convertis en bâtis. La forêt dense a connu la plus haute stabilité, tandis que les parcelles agricoles, les prairies, les eaux de surface, les bâtis ont connu respectivement 57,5 %, 51,22%, 50%, 49,28% de stabilité.

Par ailleurs, les Prairies ont régressé vers les parcelles agricoles de 13,20%, puis vers les eaux de surface de 3,15% et vers les bâtis de 25,10%. Ils ont par contre progressé vers la forêt dense de 7,33%.

Les parcelles agricoles (57,5%) ont progressé de 14,6% vers les prairies, 19,6% vers les parcelles agricoles et régressé vers les bâtis de 8,30%. Les eaux de surface ont progressé vers les parcelles agricoles de 35,8% et vers la forêt dense de 14,2%.

Les bâtis (49,28%) ont connu une expansion de 24,75% des parcelles agricoles, 19,95% des prairies et 6,02% de la forêt dense. Tous ces changements confirment la croissance démographique, la construction des bâtiments pour les logements et infrastructures ainsi que l'essor de l'agriculture pour subvenir aux besoins alimentaires de la population.

Tableau 8 : Matrice de transition des unités d'occupation des sols du bassin versant de la Mefou 1998-2018

	Année	2018				
		Types d'occupation	Forêt dense	Prairies	Parcelles agricoles	Eau de surface
1998	Forêt dense	73,71	2,8	17,30	0	6,19
	Prairies	7,33	51,22	13,20	3,15	25,10
	Parcelles agricoles	19,6	14,6	57,5	0	8,30
	Eau de surface	14,2	0	35,8	50	0
	Bâtis	6,02	19,95	24,75	0	49,28

4.3- Analyse et modélisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Méfou jusqu'en 2050

La modélisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Méfou s'est faite sur une période de 40 ans, en utilisant les débits de chaque ressource en eau (rivières) dans le bassin versant mettant en exergue les besoins en eau au niveau de chaque site de demande en eau dans le bassin.

4.3.1- Représentation schématique des sites de demande et des ressources en eau dans WEAP

Pour mieux décrire le comportement hydrologique du bassin versant de la Méfou, nous avons schématisé les différentes composantes du bassin telles que définies dans le scénario de référence. La figure ci-dessous résume les 04 sites de demande (la ville, la zone rurale, les cultures, les prairies), les ressources d'approvisionnement en eau (rivières Méfou, Mfoundi, Anga'a, Nga) ainsi que les différents flux entre sites et ressources. Nous avons aussi matérialisé le réservoir que nous avons créé pour subvenir aux besoins non couverts des sites de demande qu'approvisionnent les rivières.

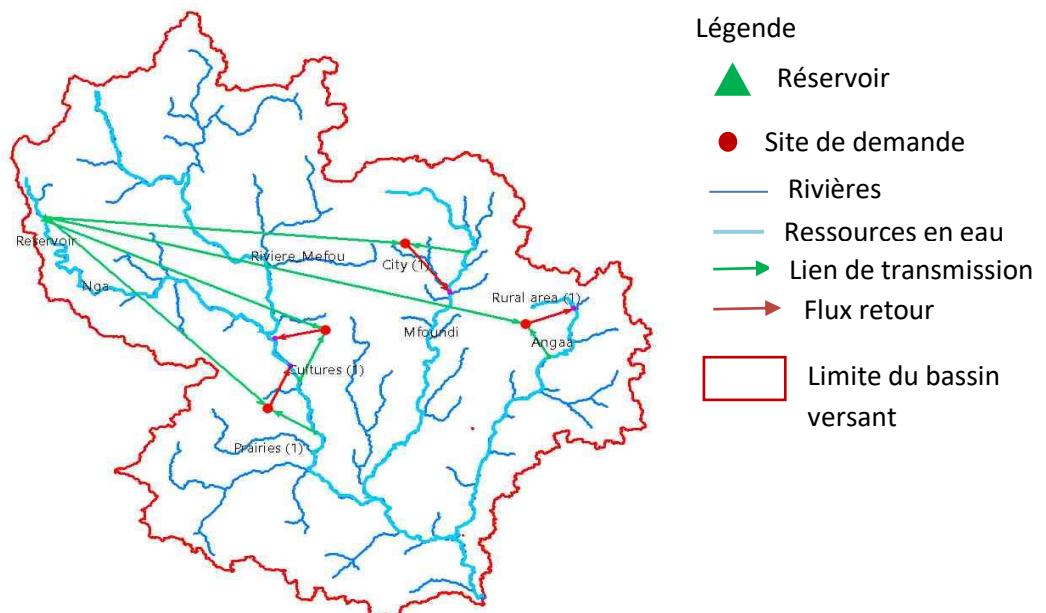


Figure 16 : Carte schématique WEAP reprenant les couches SIG et les éléments WEAP

4-3-2-Représentation des besoins en eau des sites de demande selon le scénario de référence

La figure 17ci-dessous présente la dynamique des besoins en eau pour chaque site de demande sur la période de référence 2011-2050. Il ressort de l'analyse de cette figure, que les besoins en eau croissent chaque année pour tous les sites de demande. La ville reste le site de demande qui a les besoins en eau les plus élevés. Ces besoins en eau, estimés à 14 millions en 2011 ont augmenté pour atteindre 119 millions en 2050. Les besoins en eau du milieu rural viennent en deuxième position en termes d'accroissement. Ils varient de 7 millions en 2010 à 63 millions en 2050. Les besoins en eau des cultures et ceux des prairies occupent respectivement la troisième et la quatrième place. Notons que les besoins en eau de la prairie sont les plus faibles et varient de 2 millions en 2010 à 3 millions en 2050 comparativement aux autres sites de demande.

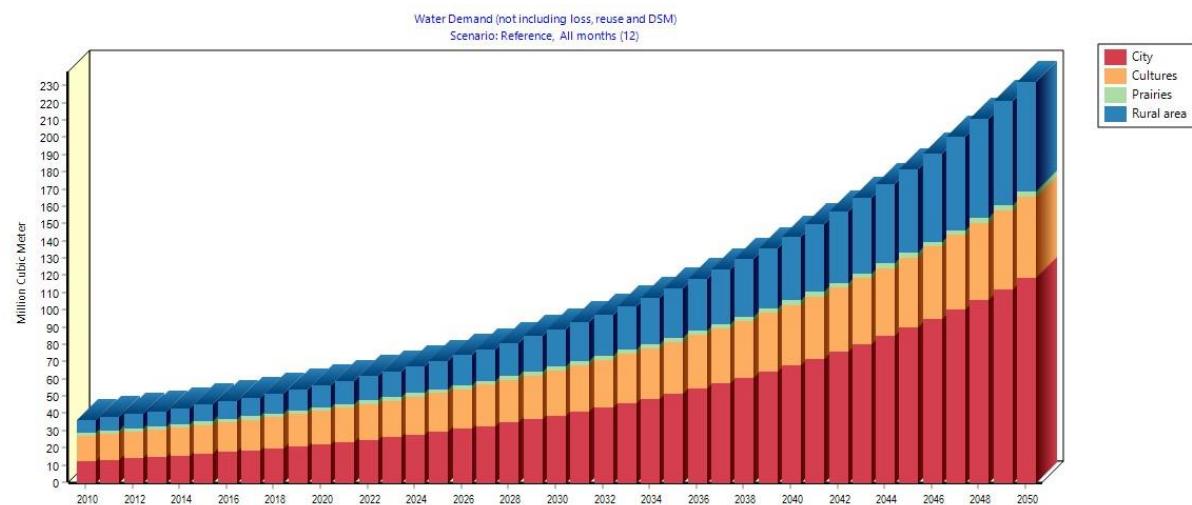


Figure17 :Demande en eau par site de demande selon le scénario de référence (2011-2050).

4-3-3-Demande en eau non couverte selon les différents scénarii

La figure 18ci-dessous présente la demande en eau non couverte selon les différents scénarii (Climate change, croiss pop, référence, réservoir). L'analyse de la figure révèle que le scénario 'croiss pop' (croissance de la population de 7% par an) est le scénario le plus important devant conduire à un accroissement plus élevé des besoins en eau non couverts pour tous les quatre sites de demande. C'est donc le scénario à éviter dans le futur car il impacte sérieusement la fourniture en eau au niveau des sites de demande avec une hausse de la demande en eau non couverte. Le deuxième scénario qui impacte l'approvisionnement en eau des sites de demande est celui du 'changement climatique' (25% de réduction des débits

des ressources en eau et 5,7% d'accroissement annuel de la population). Cependant, même si ces deux scénarios impactent plus les besoins en eau des sites de demande, les changements climatiques ont un impact plus faible que celui d'un accroissement de la population de 7%. En ce qui concerne le scénario de référence, les besoins en eau commencent par ne plus être couverts dès 2024 avec une valeur de 500.000 m³ pour atteindre 71 millions m³ en 2050. Ceci suppose que déjà en 2024, il va falloir un réservoir ayant un volume de 500.000 m³ en soutien aux ressources en eau pour continuer à satisfaire les besoins en eau des sites de demande pour cette année.

En ce qui concerne le scénario 'Réservoir' de 1 million m³ que nous avons créé en 2010 (mais fonctionnel en 2011) pour subvenir aux besoins en eau des sites, la figure ci-dessous montre que ce réservoir arrive à desservir et couvrir entièrement les besoins en eau des quatre sites de demande jusqu'en 2028. Après 2028, ce réservoir n'arrive plus à couvrir les besoins en eau qui augmentent jusqu'à 70 millions m³ pour l'année 2050.

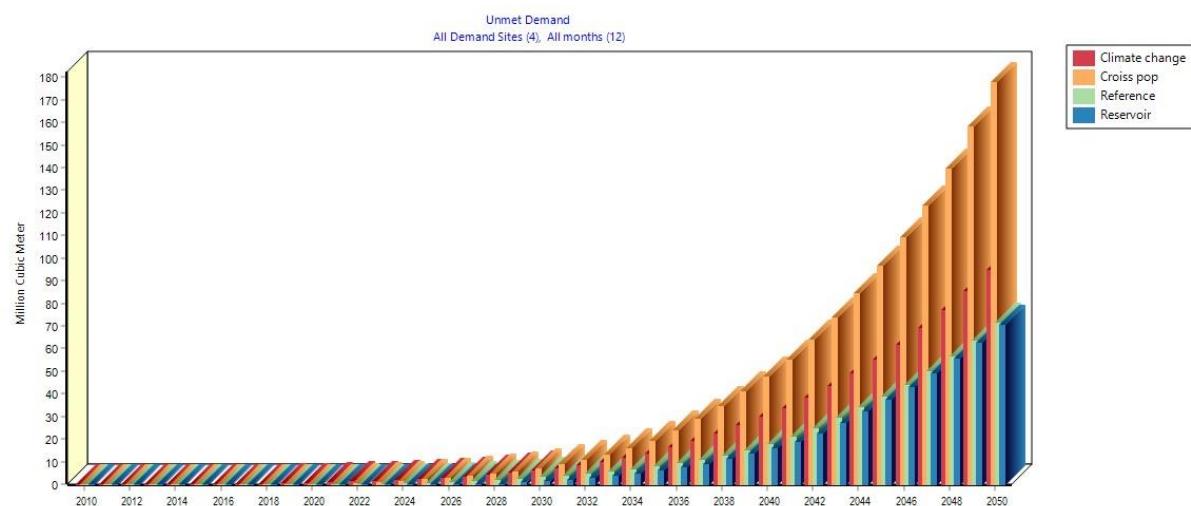
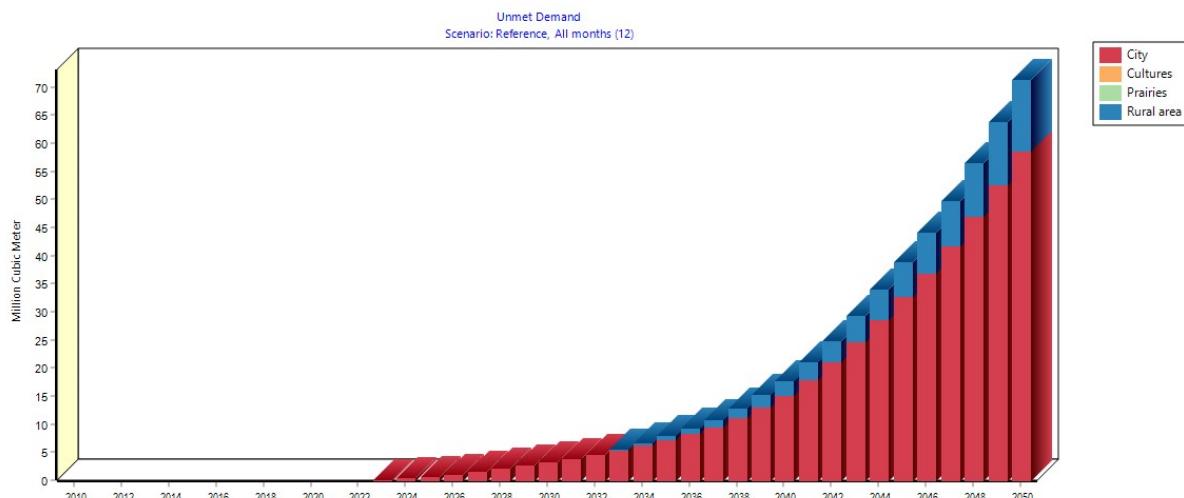


Figure 18: Carte de la demande en eau non couverte selon divers scénarii

4.3.4-Demande en eau non satisfaite par site de demande selon le scenario de référence

La figure 19ci-dessous présente la demande en eau non satisfaite par site de demande selon le scénario de référence. L'analyse de la figure montre que les sites dont les besoins en eau sont très peu couverts sont la ville et le milieu rural. En effet, ces deux sites ont la même priorité que les autres sites de demande, mais ce qui leur confère cette hausse des besoins en eau non couverts, c'est leur taux de croissance démographique de 5,7% par année dans le scénario de référence. Par ailleurs, la ville commence par avoir des besoins en eau non couverts de

250.000 m³ dès l'année 2023 alors que le milieu rural commence par connaître des besoins en eau non couverts similaires dès l'année 2034. Ceci s'explique par la forte démographie de la ville qui implique une augmentation conséquente des besoins en eau. Toutefois, même si tous les besoins en eau non couverts augmentent chaque année pour tous les sites, les sites cultures et prairies connaissent un accroissement plus faible que les autres sites. Ceci est peut-être dû à la faible superficie des parcelles irriguées par rapport à d'autres régions et au faible



accroissement annuel des prairies (1%) qui ne consomment pas beaucoup d'eau.

Figure 19 : Demande en eau non satisfaite par site de demande selon le scénario de référence.

4.3.5-Dynamique de la demande non satisfaite en eau des sites de demande au cours d'une année

La figure 20ci-dessous traduit la dynamique de la demande non satisfaite en eau des sites de demande au cours d'une année pour tous les scénarii. Elle reprend les fluctuations mensuelles de la demande en eau non couverte des sites de demande au cours de l'année pour chaque scénario. Son analyse révèle que les besoins en eau non couverts atteignent leur pic en Janvier et en Août au cours d'une année. Ces deux périodes coïncident avec le pic de la saison sèche où il pleut moins. Pour tous les scénarii, les besoins en eau non couverts existent de décembre à juin et puis de juillet à septembre. On remarque aussi que les besoins en eau sont couverts d'octobre à Novembre, période qui coïncide avec la grande saison pluvieuse. Aussi, la figure permet de savoir selon les scénarii, la période de l'année au cours de laquelle, les besoins en eau sont les plus élevés. Par ailleurs, le réservoir se recharge pendant la saison pluvieuse et

dès que la saison sèche revient, il commence par se vider. Toutefois, nous avons préservé un volume résiduel de 10% du volume total du réservoir pour le permettre de fonctionner. En effet, les rivières, exutoires naturels des différents réservoirs hydriques, jouent un rôle essentiel dans l'équilibre physicochimique et hydrodynamique du bassin versant (Braun *et al.*, 2002).

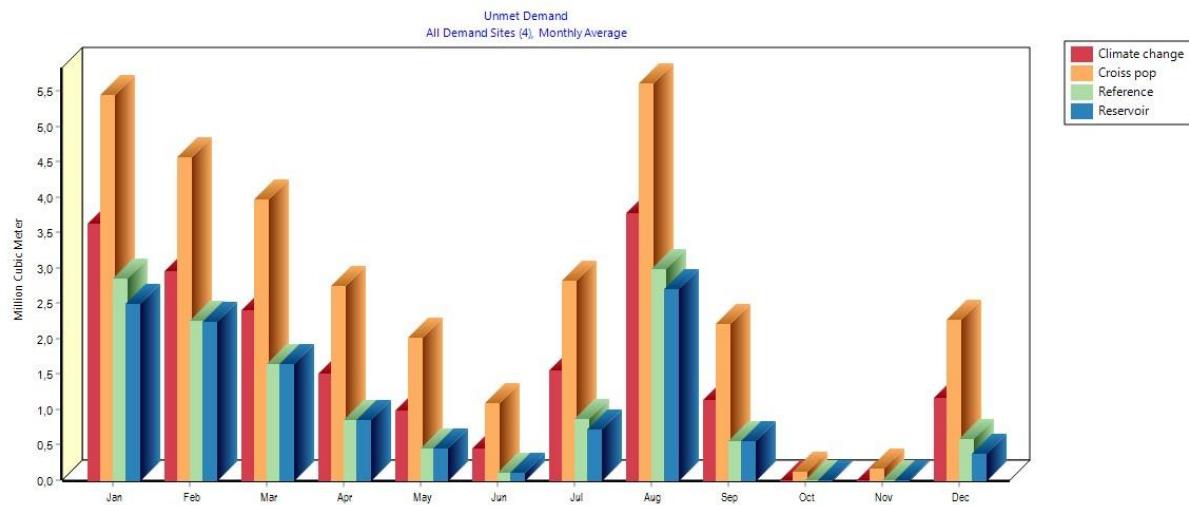


Figure 20: Dynamique de la demande non satisfaite des sites de demande au cours d'une année selon chaque scénario

5.DISCUSSION

5.1-perceptions des agriculteurs locaux sur les principales menaces qui entravent le bon fonctionnement du bassin versant de la Méfou

L'environnement tel que nous le percevons de nos jours, a connu des modifications au cours du temps. Ces transformations telles que perçues par les agriculteurs ont été regroupées en trois catégories : les indicateurs, les causes et les conséquences de la dégradation de l'environnement. Des enquêtes réalisées auprès de ces derniers sur la dégradation de l'environnement, il apparaît que 92,86% des agriculteurs des quartiers Odza, et 85,71% du quartier Etoudi perçoivent les mauvaises odeurs et la pollution de l'eau comme des indicateurs prioritaires de la dégradation de l'environnement, à quoi s'ajoute l'insalubrité et la pollution de l'air perçus par 71,43% des agriculteurs du quartier Etoudi. L'excès de chaleur, les espèces invasives et la perte du couvert végétal sont également identifiés comme indicateurs de la dégradation de l'environnement par 64,29% des agriculteurs du quartier Nkomkana. Toutes ces perceptions révèlent de la pollution des eaux de surface dans la ville de Yaoundé. L'institut National de la Statistique (INS, 2013) dans son étude pilote sur la pollution des eaux de surfaces et souterraines à Yaoundé démontre que près de 58% des ménages déversent leurs eaux usées dans les caniveaux/rigoles proches de leurs logements, ce qui génère parfois des odeurs, les eaux sont alors drainées en période de saison pluvieuse et se déversent dans les cours d'eau. 11,7% des ménages évacuent les ordures dans la broussaille ou dans la cour. La présence des différents secteurs d'activités tels que les transports, les industries, l'agriculture génère des émissions dans l'air qui sont pour la plupart source de pollution. Pendant la saison sèche (Octobre à Avril), les températures avoisinent 40°C dans la ville de Yaoundé, ce qui cause un excès de chaleur ressenti par la population. Durant cette période les odeurs sont également facilement perceptibles à l'odorat.

100% des agriculteurs des quartiers Etoudi et 92,86% de ceux d'Odza et Nkomkana ont perçu la déforestation comme causes majeurs de la dégradation de l'environnement. Par ailleurs 85,71% des agriculteurs des quartiers Dragage et 78,57% des agriculteurs des quartiers Nkomkana affirment que l'urbanisation et la forte démographie en sont des indicateurs importants. Ces trois aspects de la dégradation de l'environnement (déforestation, forte démographie, urbanisation) sont liés (FAO, 2010). La forêt située au sein et aux environs de la ville de Yaoundé est qualifiée de forêt urbaine (Miller ,1997), C'est un ensemble de la végétation ligneuse ou non présente à l'intérieur et autour d'agglomérations denses, allant des

petites communautés rurales aux régions métropolitaines qui avec la croissance démographique présente de nombreux avantages pour satisfaire aux besoins des populations. C'est une forêt productrice de vivres (aliments, fruits et fourrage) et énergétique (bois de feu, charbon de bois, combustibles (FAO, 2001). De même, Branchet (2019) énonce l'existence de disparités au sein de la ville de Yaoundé en termes de démographie et de structures d'habitat. Elle met en exergue le lien entre la déforestation et l'agriculture. Elle affirme que la pression foncière sur les zones péri-urbaines de Yaoundé ne permettant plus leur exploitation par les agriculteurs, l'agriculture s'est intégrée dans la diversité géographique de la ville. Trop pauvres pour s'enrichir en ville, les agriculteurs exploitent les espaces vacants non constructibles (Forêt et bas-fonds) on assiste alors de plus en plus à la pratique de l'agriculture sur brûlis. De nos jours elle est la première cause majeure de la déforestation au Cameroun. Le système de brûlis est connu dans toutes les régions tropicales de forêt humide (NkeNdih, 2008). Il consiste à couper un pan de forêt que l'on nettoie par le feu pendant la saison sèche avant la préparation du terrain et la mise en cultures durant la saison des pluies.

Quant aux conséquences de la dégradation de l'environnement, 100% des agriculteurs du quartier Etoudi ont identifiés les maladies hydriques comme conséquences prioritaire de la dégradation de l'environnement. D'autres conséquences ont également été perçues comme importants par les agriculteurs à savoir : prolifération des nuisibles (85,71%), baisse des rendements agricoles (71,43%), et l'érosion (64,29%). (L'INS, 2013) stipule que le mode d'évacuation des eaux usées agit plus sur la prévalence des maladies hydriques que sur celle des maladies non hydriques, soit 7.0 % contre 4.9 %. Cette prévalence des maladies hydriques est en grande partie imputable à la prévalence du paludisme au sein de la population des ménages de la ville de Yaoundé. Des cas fréquents d'autres maladies telles que la fièvre typhoïde, la dysenterie et la diarrhée ont été observées à la fin de la saison sèche. Un environnement malsain peut favoriser la présence d'insectes et d'animaux nuisibles dans les logements : (92,6%) des cafards, (91,2%) des moustiques, (87,1%) des souris sont des vecteurs de maladies et partagent le quotidien des ménages. En ce qui concerne la baisse des rendements agricole, elle est étroitement liée à l'érosion ; depuis les années 30, les agriculteurs africains dégradent leur terre à cause de l'agriculture itinérante et de la croissance démographique (FAO, 2015). 95 % des denrées alimentaires proviennent des sols. L'érosion des sols et la dégradation des terres constituent une menace majeure pour la sécurité alimentaire mondiale. *"En diminuant les éléments nutritifs disponibles pour les plantes ainsi*

que l'espace dont elles disposent pour s'enraciner, l'érosion peut réduire le rendement des cultures jusqu'à 50 %", (FAO, 2019). L'irrigation joue également un grand rôle pour le rendement des cultures. Mais cette pratique n'est pas courante pour les agriculteurs de la ville de Yaoundé à cause des difficultés d'accès à l'eau, soit à domicile ou encore à proximité des champs. (71,43%) des agriculteurs résidants au quartier Dragage ont accès à l'eau potable et dans leur domicile, contrairement à ceux des quartiers Etoudi et Nkomkana (57,14%). Il faut noter que les infrastructures diffèrent selon les quartiers, les habitats spontanés (Etoudi et Nkomkana) sont parfois mal desservis en termes d'approvisionnement en eau. Tandis que les habitats planifiés (Dragage) par les pouvoirs publics mieux desservis par les infrastructures, de moyen standing, sont formés par des maisons entourées d'un petit terrain personnel qui réduit la densité de population. L'analyse de la covariance effectuée sur l'ensemble des indicateurs de la dégradation de l'environnement affirmait que ces indicateurs variaient significativement d'un quartier à un autre. Le facteur quartier est le seul facteur qui influence la connaissance des indicateurs dans les quartiers environnant le bassin versant de la Méfou. Par ailleurs, la situation géographique de chaque quartier influence les perceptions des répondants sur la dégradation.

5.2- Dynamique spatio-temporelle du bassin versant de la Méfou entre 1998 et 2018

Les résultats issus de notre étude sur la dynamique spatio-temporelle du bassin versant de la Méfou entre 1998 et 2018 ont révélé que la végétation naturelle qui couvrait le bassin a été transformée en formations anthropiques. En effet, la forêt dense, les prairies et les eaux de surface ont connu respectivement un taux moyen annuel d'expansion négatif de l'ordre de -1,31%,-2,43% et -2,5% au profit des parcelles agricoles et des bâtis. Ceci confirme les résultats de (Branchet, 2019) dans ce même bassin : selon elle, les surfaces bâties ont augmenté de 21 à 27% entre 1992 et 2015 avec une réduction de la couverture forestière de 19 à 15% tandis que les parcelles agricoles couvrent des superficies relativement stables (34-37%) ce qui est confirmé dans notre matrice de transition (tableau 6). Dans son étude, (Jourdan, 2019) est également arrivé à la même conclusion que les forêts ont évolués vers les parcelles agricoles et les bâtis durant la période allant de 1960 à 2018. Il affirme que la végétation originelle a largement subit une dégradation par la très forte urbanisation du bassin versant depuis 1950, elle s'accompagne d'un important développement de l'agriculture périurbaine. Les changements d'occupations des sols pour les bassins versants situés en milieu urbain et périurbain ont été peu étudiés en milieu tropical. Par contre l'impact d'autres

changements comme la conversion des zones forestières en zone agricoles ont plus été étudiés. Au Bénin, Arouna (2012) a fait un constat sur le fait que les zones de formations végétales naturelles composées de forêt dense et claires sont majoritairement converties en parcelles agricoles de telles sorte que les mosaïques de champs soient devenues le principal type d'occupation dans la commune de Djidja. (Ballo *et al*, 2016) au Mali pense que la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol est l'enjeu d'une forte conversion des zones de végétation naturelles en cultures. Parmi toutes les unités d'occupation des sols, les eaux de surface ont connu une régression importante avec un taux annuel d'expansion (-2,5%) le plus élevé, l'impact de la disparition des zones naturelles au profit des surfaces anthropisés ont des répercussions néfastes sur le cycle hydrologique (Jourdan, 2019). Cette disparité de ressources naturelles due aux activités anthropiques exercées dans le bassin est également liée au développement des activités socio-économiques (culture sur brûlis, exploitation du bois de chauffage) dans un contexte de forte croissance démographique comme cité par (Palé, 2000) : « Les fortes densités de population ont des enjeux sur l'occupation des terres et sur la gestion des ressources naturelles ».

5.3-Modélisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Méfou jusqu'en 2050

Le modèle WEAP a été utilisé pour modéliser les besoins en eau des sites de demande selon différents scénarios sur une période de 40 ans (2011-2050) en considérant 2010 comme année de base. Les résultats obtenus démontrent que les besoins en eau augmentent chaque année pour tous les sites de demande. La ville reste le site de demande ayant les besoins en eau les plus élevées estimés à 14 millions de m³ en 2010 et 119 millions de m³ en 2050. (Kengfack *et al.*, 2017) confirme ce fait dans leur étude et affirme que des 75 612 000 millions de m³ d'eau produite en 2012 par la Société National des Eaux au Cameroun (SNEC), seulement 4 498 000 millions ont été distribué dans la ville de Yaoundé. Au Cameroun, le résultat d'exploitation est déficitaire pour le secteur de l'eau. Les performances techniques et financières de la SNEC se dégradent continuellement. Quant aux besoins en eau du milieu rural, ils varient de 7 millions de m³ en 2010 à 63 millions m³ en 2050. L'accès à l'eau dans le milieu rural demeure un problème crucial, à cause de la situation géo écologique défavorable dans certaines régions, d'une insuffisance des investissements et d'une politique inappropriée

dans le secteur de l'eau et l'assainissement (Kengfack *et al.*, 2017). Les besoins en eau des cultures et des prairies sont négligeables à côté de ceux de la ville et du milieu rural.

Des différents scenarii utilisés (Climate change, croiss pop, référence, réservoir), le scenario croissance de la population conduit à une demande en eau plus importante. Ensuite vient le scenario du changement climatique qui impacte l'approvisionnement en eau des sites de demande. Le GIEC dans son rapport technique consacré à la question de l'eau, fait un point sur les conséquences probable du réchauffement planétaire et les ressources en eau et l'accès à ces ressources. Il affirme que la montée des températures affecte les différentes composantes des systèmes hydrologiques (Précipitation, évapotranspiration, teneur en eau du sol et végétation). Une gestion intégrée des ressources en eau est nécessaire pour satisfaire une population de plus en plus grandissante. La FAO estime que dans 30 ans, il faudra 60% d'aliments de plus pour nourrir la population mondiale, cette croissance sera obtenue au travers d'une agriculture intensive faisant appel à l'irrigation. Mais la raréfaction de l'eau entraîne des difficultés dans de nombreux pays. Aussi la FAO pense que la solution serait l'amélioration de la productivité agricole et l'efficacité de l'utilisation de l'eau. En ce qui concerne le scenario de référence, les besoins en eau commencent à ne plus être couverts en 2024. Nous avons donc créé un scénario réservoir d'une capacité de 1million de m³au niveau des bas-fonds pouvant subvenir aux besoins des quatre sites de demande jusqu'en 2028, mais faut noter qu'en 2050 les besoins en eau seront de l'ordre de 70 millions de m³.

La dynamique de la demande non satisfaite en eau des sites demande au cours de l'année révèlent que pendant la saison sèche les besoins en eau augmentent et le réservoir se vide rapidement pour satisfaire la demande. Tandis que pendant les saisons pluvieuses le réservoir se recharge. La mise en place des stratégies de conservation de l'eau comme la collecte des eaux de pluies pendant les années humides peut devenir efficace pour les années sèches.

6. CONCLUSION ET SUGGESTIONS

Le bassin versant de la Méfou constitué d'une métropole de plus de 1 millions d'habitants, de nos jours, implique des enjeux socio-économiques majeurs. L'analyse des perceptions des agriculteurs de la dégradation de l'environnement permet d'affirmer que le phénomène de dégradation de l'environnement est lié aux facteurs humains et physiques. Leur connaissance a permis d'énumérer les indicateurs, les causes, les conséquences de cette dégradation. Le bilan des enquêtes menées auprès des agriculteurs révèle que ceux-ci sont conscients de l'ampleur des enjeux liés aux changements de l'environnement. Les analyses scientifiques ont confirmé l'existence de cette réalité à travers une étude diachronique des unités d'occupation des sols dans le bassin versant de la Méfou entre 1998 et 2018. La dégradation de l'environnement a été perçue par les agriculteurs comme un effet de la pression démographique. L'essor démographique étant un fait réel, les besoins de consommation des ressources naturelles sont sans cesse grandissantes et leur mauvaise gestion entraîne des situations actuelles préoccupantes.

Compte tenu des résultats obtenus, il importe aux autorités de la ville de Yaoundé de :

- ▣ Intégrer l'utilisation des modèles tel que WEAP dans les instituts de recherche scientifiques pour développer les plans de gestion intégrées de l'eau.
- ▣ Mettre sur pieds une base de données sur l'occupation et l'utilisation des sols, essentielle à une meilleure prise de décisions ; afin de faire des planifications dans le domaine de l'agriculture, la foresterie et la protection de l'environnement
- ▣ Faire le suivi rigoureux des programmes de reboisement dans le but d'empêcher la déforestation
- ▣ Fixer des objectifs pour l'accès, l'utilisation, la protection et la conservation de l'eau dans la ville de Yaoundé
- ▣ Mettre sur pieds des investissements durables pour satisfaire les besoins en eau de la population

7-REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ✿ **Arouna O. (2012).** *Cartographie et modélisation prédictive des changements spatio-temporels de la végétation dans la Commune de Djidja au Bénin : implications pour l'aménagement du territoire.* Thèse de Doctorat en Géographie, EDP / FLASH, 246 p
- ✿ **Ballo A, Traoré S. S, Coulibaly B, Diakité C. H, Diawara M, Traoré A et Dembélé S. (2016).** Pressions anthropiques et dynamique d'occupation des terres dans le terroir de Ziguéna, zone cotonnière du Mali. European Scientific Journal, 12(5) : 90 - 99.
- ✿ **Chemelil, M. (1995).** *The effects of human-induced watershed changes on streamflows.* Thèse de Doctorat, Université de Loughboroug Juillet 1995. 301pp.
- ✿ **Azandegbe, E. et TokoImorou, I. (2019).** Dynamiques spatio-temporelles de l'occupation des terres dans le bassin versant du Lomon au Sud-Ouest du Bénin Juillet 2019. 18pp.
- ✿ **Branchet. P. (2019).** *Caractérisation de l'impact des activités humaines sur la qualité de la ressource en eau en milieu urbain sub-saharien : étude de la contamination du bassin versant de la Méfou (Région Centre du Cameroun) par les pesticides et les résidus pharmaceutiques.* Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, France, Février 2019 ; 277 pp.
- ✿ **Bouklia-Hassane R., Yebdri D. (2015).** Analyse et simulation de scenarios alternatifs de développement des ressources en eau de la wilaya d'Oran sur l'horizon du moyen-long terme. Juin 2015. 24pp.
- ✿ **Braun J. J., Dupré, B., VIERS, J., NdamNgoupayou, J. R., BedimoBedimo, J. P., Sighankamdjou, L., Freydier, R., Robain, H., Nyeck, B., Bodin, J., Oliva, P., Boeglin, J. L., Stemmler S. et Berthelin, J. (2002).** Biogeohydrodynamic in the forested humid tropical environment : the case study of the Nsimi small experimental watershed (South Cameroon). Bull. Soc. Geol. Fr., 173, 347-357.
- ✿ **BEDIMO BEDIMO, J. (1999).** Hydrologie d'un milieu tropical humide le bassin expérimental demengongàNsimi (sud cameroun). Mars 1999. 108 pp.
- ✿ **Charlier J. P. (2007).** *Fonctionnement et modélisation hydrologique d'un petit bassin versant cultiver en milieu volcanique tropical.* Décembre 2007 ; Thèse de Doctorat, Université de Montpellier 2 France ; 246 pp.

- ✿ **Ebodé, V.B:** Etude de la variabilité hydroclimatique dans un bassin versant forestier en voie d'urbanisation accélérée : Le cas de la Mefou. Mém., Master. Univ. Yaoundé I. 156p. 2017.
- ✿ **FAO, (2012)** L'avenir de l'alimentation et de l'agriculture, tendance et défis
- ✿ **FAO, (2010)** La foresterie urbaine dans les pays en Développement.
- ✿ **FAO de l'ONU (2011)** La pratique de la gestion durable des terres ; Directives et bonnes pratiques pour l'Afrique Sub saharienne. Application sur le terrain. 243pp.
- ✿ **FAO, (2019)** Dégradation et érosion des sols : Cinq chiffres chocs sur un danger mondial. Décembre 2019. 4pp.
- ✿ **FAO (2002)** L'eau une ressource précieuse et limitée. Des politiques régissant l'utilisation des eaux agricoles sont nécessaires aux plans international, national et local. 02pp.
- ✿ **Franqueville, A. (1979).** Croissance démographique et immigration à Yaoundé. Les Cahiers d'Outre-Mer 32, 321–354. <https://doi.org/10.3406/caoum.1979...>
- ✿ **GIEC (2008)** Les conséquences du changement climatique sur les ressources en eau
- ✿ **GILLET, P. VERMEULEN, C. FEINTRENIE, L. DESSARD H et Garcia, C. (2016).** Quelles sont les causes de la déforestation dans le bassin du Congo ? Synthèse bibliographique et études de cas. 11 Avril 2016. 7pp.
- ✿ **Hamlat, A. Mohamed, E. (2012).** Simulation of water resources management scenarios in western Algeria watersheds using WEAP model Mars 2012. 12pp.
- ✿ **Hien Sié, A. (1998).** *La perception paysanne de la dégradation de l'environnement et les stratégies d'adaptation : Cas de Niaogho Beguedo dans la province du Boulgou.* Mémoire de maîtrise, Université de Ouagadougou Burkina Faso. 1998. 152pp.
- ✿ **INS (2013)** Etude Pilote sur la pollution des eaux de surface et souterraine à Yaoundé, et son impact sur la santé des populations riveraines. 341pp
- ✿ **Jourdan, C. (2019).** *« Approche mixte instrumentation-modélisation hydrologique multi-échelle d'un bassin tropical peu jaugé soumis à des changements d'occupation des sols : cas du bassin de la Méfou(Yaoundé, Cameroun).* Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, France, Juin 2019 ; 449 pp.
- ✿ **Kouam, K. G. (2014).** Vers une gestion rationnelle de l'eau dans une situation complexe d'urbanisation anarchique dans un pays en développement : cas du bassin

versant de l'abiergue (Yaoundé-Cameroun). Thèse de Doctorat, Université de Liège (2014), 272 pp.

- ✿ **Kouam , G. Mpakam, G . Ekodeck , G. Ayonghe S. (2009)** Gestion intégrée des ressources en eau et objectifs du millénaire pour le développement en Afrique : Cas du Cameroun
- ✿ **Mbiadjeu-Lawou (2019)** Quelle économie circulaire spontanée pour une ville moyenne Camerounaise ? Le cas des déchets solides ménagers de Baganté. Avril 2019. 312pp.
- ✿ **Mazzucato, V.Niemeijer, D. (1991)** Le Sahel : une dégradation des terres exagérée, un potentiel paysan sous-estimé. 29pp.
- ✿ **Monique D ; Margat. J. (1995)** Hydrologie et définition d'un bassin versant
- ✿ **Nkengfack. H, Noubissi-Domguia. E, Kamajou. F.** Analyse des déterminants de l'offre de l'eau potable au Cameroun.
- ✿ **NkeNdihi, J. (2008)** « les pygmées : un peuple en danger », valeurs vertes-magazine du développement durable, Paris n°91 (2008), 21 pp.
- ✿ **Nkengfack, H. Noubissi, E. Domguia, Kamajou, F. (2017)** Analyse des déterminants de l'offre de l'eau potable au Cameroun. 19 Avril 2017.
- ✿ **Padonou A. B., Lykke, E. Bachmannd, M. Y., Idohoue, R. et Sinsin, B. (2017)** Mapping changes in land use/land cover and prediction of future extension of bowé in Benin, West Africa . 8pp.
- ✿ **Sunny A. Jyoti, P. Patil ,V. C. Goyal. Ajai S. (2018).** Assessment of Water Supply–Demand Using Water Evaluation and Planning (WEAP) Model for Ur River Watershed, Madhya Pradesh, India Octobre 2018. 12 pp.
- ✿ **Sadaiou, B. Barbier, N. Dossahoua, I. Traore. Lejoly, J. Jan Bogaert, J.** Dynamique paysagère en milieu de transition forêt-savane Ivoirienne.
- ✿ **Traoré, (2008).** Alimentation en Eau potable et Assainissement en milieu Semi Urbain. Rapport d'évaluation de projet ;2008 ; 29pp.
- ✿ **Zghair-Jaber .A (2018).** Weap modelling for effective management of water demand and supply in shatt al hilabansin -Iraq Décembre 2018. 13 pp.

8-ANNEXES

Tableau 7 : Caractéristiques des images LANDSAT téléchargées

Satellites	LANDSAT 5 TM C1 Level 1			LANDSAT 8 OLI-TIRS Level-1		
	Bandes spectrale	Résolution spetrale en ()	Résolution spatiale	Bandes spectrale	Résolution spectrale ()	Résolution spatial ()
	Thematic Mapper (TM)			Bandes spectrales de l'instrument OLI		
	Bandes 1- 0,45-0,52		30	Bandes 1- 0,433-0,453	30	
	Bleu			Aérosols		
	Bandes 2- 0,52-0,60			Bandes 2- 0,450-0,515		
	Vert			Bleu		
	Bandes 3- 0,63-0,690			Bandé 3- 0,525-0,600		
	Rouge			Vert		
	Bandes 4- 0,76-0,90			Bandé 4- 0,630-0,680		
	PIR			Rouge		
	Bandes 5- 1,55-1,75			Bandé 5- 0,845-0,885		
	MIR 1			PIR		
	Bandes 6- 10,4-12,5		120	Bandé 6- 1,560-1,660		
	IRTh			MIR 1		
	Bandes 7- 2,08-2,35		30	Bandé 7- 2,100-2,300		
	MIR 2			MIR 2		
				Bandé 8- 0,500-0,680	15	
				Pan		
				Bandé 9- 1,360-1,390	30	
				Cirrus		
				Bandes spectrales de l'instrument TIRS		
				Bandé 10- 10,30-11,30	100	
				IRM		
				Bandé 11- 11,50-12,50		
				IRM		
Fauchée	170x185km			170x185km		
Résolution	8 bits			12 bits		
radométrique						
Cycle orbital	16 jours			16 jours		
Format des images	GEOTIFF			GEOTIFF		

Questionnaire (Anne Rosine Eve NJOGI BELLA)

Fiche d'enquête

Objectif : Identifier les perceptions des agriculteurs locaux sur les principales menaces qui entravent le bon fonctionnement du bassin versant.

I-/ CARACTÉRISTIQUES SOCIO-ECONOMIQUES DE L'ENQUETÉ(E)

N° de fiche..... **Date d'enquête**.....

Commune **Quartier**.....

Nom de l'enquêté.....

Sexe : (1= féminin 2= Masculin) **Age** :

Ethnie :

Niveau d'instruction : 1= non instruit 2= alphabétisé 3= scolarisé

Situation matrimoniale : 1=Célibataire ; 2= Marié Polygame ; 3= Marié Monogame

Taille du ménage : **Personnes à charge** :

Combien sont de sexe : Masculin Féminin

Effectif des enfants scolarisés ?

Effectif des enfants non scolarisés ?

Pourquoi ?

.....

Comment qualifier la situation économique de votre famille?

- dégradée
- améliorée
- stable
- Autre

Quelles sont donc les raisons qui expliquent la situation économique de votre famille ?

.....

.....

De quel moyen de déplacement disposez-vous ?

- Bicyclette
- Voiture
- Moto
- Autre
- En bois
- En matériau artisanal
- En briques
- Autre

Type de toiture

- En paille
- En matériau endogène
- En tôle ondulée
- Autre

Cheptel :

Bovins :..... Ovins :..... Caprins :..... Porcins :..... Volaille :.....

Autres (à préciser).....

II-/ ACTIVITÉS MENÉES

Tableau 1 : Activités menées par l'enquêté(e)

Activités	Activités par ordre d'importance en termes de			
	Temps	Quantité de travail	Main d'œuvre	Revenu
1= Agriculture				
2= Commerce				
3= Exploitation forestière				
4= Elevage				
5= Autre				

Quelles sont vos principales cultures (par ordre d'importance)?

1-

4-

2-

5-

3-

6-

Perceptions de l'enquêté(e) sur les indicateurs, les causes et conséquences de dégradation de l'environnement

Tableau 3 : Perceptions de l'enquêté(e) sur les indicateurs, les causes et les conséquences de la dégradation de l'environnement

Quels sont par ordre d'importance les indicateurs que vous utilisez pour définir la dégradation de l'environnement ?	Quelles sont les causes (par ordre d'importance) de la dégradation de l'environnement ?	Quelles sont les conséquences par ordre d'importance de la dégradation de l'environnement ?
1-	1-	1-
2-	2-	2-
3-	3-	3-
4-	4-	4-
5-	5-	5-

6-	6-	6-
7-		

Comment a évolué le couvert végétal ou forestier ces 20 dernières années dans votre zone ?

1= très dégradé ; 2= dégradé ; 3= stable ; 4= amélioré

Pensez-vous que l'agriculture dégrade l'environnement ? Oui Non

Si oui, expliquez

.....
.....

Le déboisement est-il pratiqué dans votre quartier ? Oui Non

.....

Si oui, à quoi sert le bois coupé?

.....
.....

Avez-vous accès à l'eau potable dans votre quartier ? Oui Non

Avez-vous accès à l'eau à domicile ? Oui Non

Irriguez-vous vos cultures ? Oui Non

Si oui, d'où provient l'eau utilisée pour irriguer vos cultures ?

.....
.....
.....

Sinon, quelles en sont les raisons ?.....

.....

Quelle quantité d'eau consommez-vous par jour ?

Combien coûte 100l d'eau potable dans votre quartier ?.....

Connaissez-vous des épisodes de crues en saison pluvieuse ? Oui Non

Si oui, arrive-t-il que vos champs soient inondés ? Oui Non

Comment jugez-vous la qualité de la rivière ? 1= très mauvaise ; 2= mauvaise ; 3=moyenne, 4=bonne ; 5= très bonne

Qu'est-ce qui a le plus changé dans la physionomie de votre environnement ?.....

Où déversez-vous les déchets solides ménagers ?

Avez-vous un système de collecte des eaux usées domestiques dans votre maison ?

Oui non

Comment appréciez-vous la salubrité dans votre quartier ?

1= très mauvaise ; 2= mauvaise ; 3= acceptable ; 4= élevée ; 5=très élevée