

# **ANALYSE DIACHRONIQUE DE LA DYNAMIQUE URBAINE ET DE L'ENVASEMENT DU LAC DU BARRAGE DU KAN DE BOUAKÉ (CÔTE D'IVOIRE)**

**ETTIEN Dadja Zénobe \***, **KOFFI Kan Emile \***, **SYLLA Daouda \*\*** et **KOKO Konan Sylvain \***

\* Université Alassane Ouattara de Bouaké, Département de Géographie, (Côte d'Ivoire)

\*\* Université Félix Houphouët Boigny de Cocody (Abidjan), Institut de Géographie Tropicale,

## **RESUME**

Le lac du barrage du Kan, situé au Sud de la ville de Bouaké, a été construit pour fournir de l'eau potable à la population. Il se trouve en aval du bassin versant du Kan, aujourd'hui soumis à une expansion urbaine.

Cet article utilise la géomatique pour mener une analyse diachronique en vue de montrer l'impact de la dynamique urbaine dans le comblement du lac. Pour atteindre cet objectif, des données multi-sources sont utilisées (images, pluviométriques et démographiques) et traitées avec des logiciels de géomatique et de statistique pour obtenir des cartes, des graphiques, des courbes et des tableaux.

Les résultats montrent une disparition progressive de la couverture végétale au bénéfice de l'espace anthropisé, sur le bassin versant du Kan. Cette mutation spatiale est le résultat de l'expansion non maîtrisée de la ville. L'analyse statistique indique un niveau d'envasement fortement corrélé avec l'espace anthropisé ( $r=0,99$ ) et la pluviométrie ( $r=1$ ). Ces résultats révèlent une contribution significative de l'espace anthropisé au comblement du lac favorisé par l'érosion hydrique. Les précipitations abondantes, qui ont arrosé le bassin versant ces décennies durant, sont l'agent principal de cette érosion.

**Mots clés** : barrage du kan, envasement, bassin versant, dynamique urbaine.

## ABSTRACT

### *Diachronic analysis of the urban dynamics and the silting up of the lake of Kan (Bouaké, Côte d'Ivoire)*

*The lake of the Kan Dam, located south of the city of Bouaké, is built to provide drinking water to the population. It is downstream of the Kan watershed, which is now subject to urban dynamics.*

*This article uses geomatics to conduct a diachronic analysis to show the responsibility of urban expansion in filling the lake. To achieve this objective, image, rainfall, demographic, and topographic data of the study area are collected. These data have been processed with geomatics and statistical software to obtain maps, graphs, curves and tables.*

*The results show a gradual disappearance of the vegetal cover for the benefit of the anthropized spaces, on the catchment of the lake. This spatial shift is the result of the city's disorderly expansion.*

*Statistical analysis indicates the level of the siltation highly correlated with built-up space ( $r=0.99$ ) and rainfall ( $r=1$ ). This means a significant contribution of the anthropized space to the filling of the lake favored by water erosion. The abundant precipitation, which watered the watershed during these decades, is the main agent of this erosion.*

**Key words:** *the Kan dam, siltation, watershed, urban dynamics.*

## INTRODUCTION

La Côte d'Ivoire, comme de nombreux pays du monde, a construit de nombreux barrages pour amorcer son développement économique et social. Certains de ces ouvrages hydrauliques sont des réserves d'eau destinées à l'approvisionnement des populations en eau potable, à l'irrigation en milieu rural et au fonctionnement des activités industrielles en zone urbaine, tandis que d'autres (barrages hydro-électriques) alimentent les localités du pays en électricité.

Depuis l'indépendance en 1960, ce sont au total 578 retenues d'eau qui ont été réalisées à travers le pays pour une capacité de stockage avoisinant 38 milliards de m<sup>3</sup>, dont 36,8 milliards de m<sup>3</sup> dédiés à l'hydro-électricité contre 1,2 milliard de m<sup>3</sup> pour les autres secteurs d'activité (EnterpriseWork *et al.*, 2010).

Malheureusement, ces ouvrages hydrauliques se dégradent chaque jour davantage du fait de l'hydro-sédimentation. En effet, l'hydro-sédimentation crée des problèmes d'envasement se produisant à des vitesses

variant selon les régions. En effet, des récents travaux (Ouattara, 2000 ; Yapo, 2002 ; Kouassi, 2007 ; Kouamé *et al.*, 2010 ; Grogga, 2012 ; Mélédeje *et al.*, 2014) ont montré que les retenues d'eau des barrages (Ayamé 1 et Taabo) sont menacées par l'envasement. Cet envasement des plans d'eau résulte des activités anthropiques : agriculture, exploitation minière et urbanisation rapide et incontrôlée qui intensifient les phénomènes d'érosion et augmentent la production des sédiments (N'Go, 2000 ; Grismer, 2012). Comme conséquences, il provoque des inondations, la modification des paramètres physico-chimiques de l'eau et un développement rapide des plantes aquatiques (Meledje, 2014).

Dans la ville de Bouaké, des constats ont montré que la retenue d'eau du barrage du Kan est confrontée au problème d'envasement. En effet, depuis sa mise en service en 1964 et faute d'entretien, elle connaît un ensablement perceptible sur les berges. Ce manque d'entretien s'est accentué pendant la crise politique des années 2000 et a favorisé la présence des plantes aquatiques envahissantes sur le lac.

Par ailleurs, en raison de la place prépondérante de ce lac artificiel dans le développement économique et social de la ville et ses environs, il mérite une attention particulière. En effet, le barrage du Kan s'inscrit au centre du réseau de distribution d'eau potable qui a un impact à la fois direct et indirect sur les conditions de vies des populations. Aussi, est-il un véritable patrimoine naturel dont il convient aujourd'hui de mieux connaître les causes d'envasement afin de sécuriser ses ressources hydrauliques et aquatiques ainsi que les formes d'exploitation auxquelles il est soumis.

Dans une perspective de développement durable, le présent article examine de façon générale par le biais de la géomatique, l'impact de la dynamique urbaine de Bouaké sur le phénomène d'envasement dans la retenue d'eau du barrage du Kan. Plus spécifiquement, il se propose d'utiliser la télédétection et les Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour mettre en lumière la forte corrélation entre l'expansion de l'assiette urbaine de Bouaké et le processus d'envasement de la réserve d'eau du barrage du Kan.

Cette étude comprend trois parties : la présentation de la zone d'étude, l'approche méthodologique et les résultats.

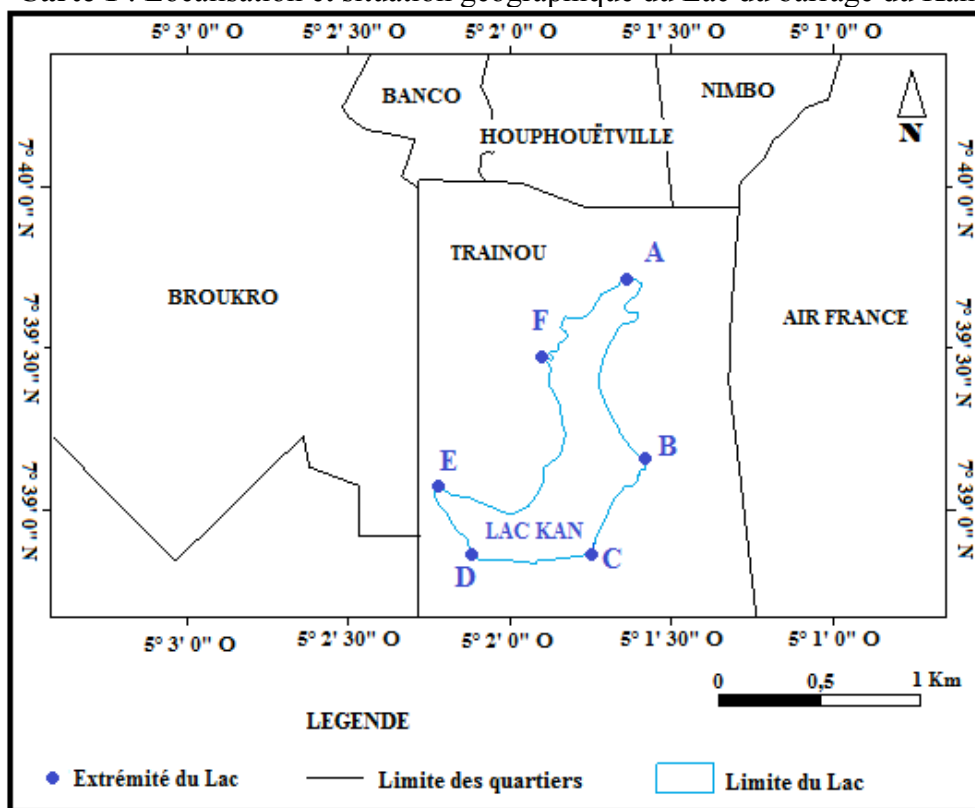
## **1. DESCRIPTION DU LAC ET DE SON BASSIN VERSANT**

Cette partie présente la situation géographique et les fonctions socio-économiques du lac Kan ainsi que les caractéristiques physiques et humaines de son bassin versant.

### 1.1. Localisation du lac Kan

Le lac Kan est situé au sud de la ville de Bouaké (carte 1). Il est à 130 m de Kouadio-Assèkro et à 260 m de Mlan Gougoukro, deux villages périurbains, phagocytés par la ville de Bouaké. Le quartier d'Air-France se trouve à moins de 800 m à l'Est du lac alors que le quartier de Broukro est à environ 2 km à l'Ouest. Au Nord, ce sont les quartiers de Houphouët-ville, Banco et de Nimbo qui sont à moins de 350 m du lac, tandis qu'au Sud, se trouve la forêt classée de Kongodékro située à plus d'un kilomètre.

Carte 1 : Localisation et situation géographique du Lac du barrage du Kan



Source : Google earth, 2016; Cadastre de Bouaké, 2014 / Concepteur et réalisateur : ETTIEN D. Zénobe, 2016

### 1.2. Utilité du lac Kan dans la vie des populations de la ville

Le barrage du Kan, mise en service en 1964, joue un rôle fondamental dans la vie sociale et économique de la métropole de Bouaké. En effet, il a été créé pour stocker de l'eau fluviale destinée à produire de l'eau potable pour les activités domestiques et économiques de la ville de Bouaké. C'est

donc à ce titre qu'une station de traitement d'eau brute a été créée en aval de la retenue d'eau par la Société de Distribution et d'Eau en Côte d'Ivoire (SODECI). L'eau potable ainsi produite est acheminée par un grand conduit dans deux châteaux d'eau implantés à travers la ville. Ces deux réservoirs d'eau (quartiers de Commerce et d'Amanibô) vont donc servir de point d'alimentation en eau potable dans les ménages, restaurants, hôtels, services administratifs et commerciaux branchés aux réseaux de distribution de la SODECI. Ainsi, la station de traitement de la retenue d'eau du Kan produit 1 439 174 m<sup>3</sup> d'eau potable pour un total de 10 782 ménages connectés au réseau de distribution (SODECI, 2015). Les quartiers de Bouaké (Koko, Air-France, Commerce, Nimbo, Kennedy, Sokoura et Belleville), dépendant de cette station, enregistrent le plus gros effectif d'abonnés (8 813 soit 81,74 % du total des abonnés) et consomment à eux seuls 1 255 474 m<sup>3</sup> d'eau potable, soit 87,23 % du volume total d'eau produit par le centre de traitement. Ils sont suivis des communes de N'Djébonouan et de Brobo qui comptent respectivement 1 063 et 906 abonnés (soit 9,86% et 8,40% du total). Les populations de ces deux localités consomment respectivement 120 200 m<sup>3</sup> (soit 8,35 % du total d'eau produit) et 60 338 m<sup>3</sup> (4,19 %).

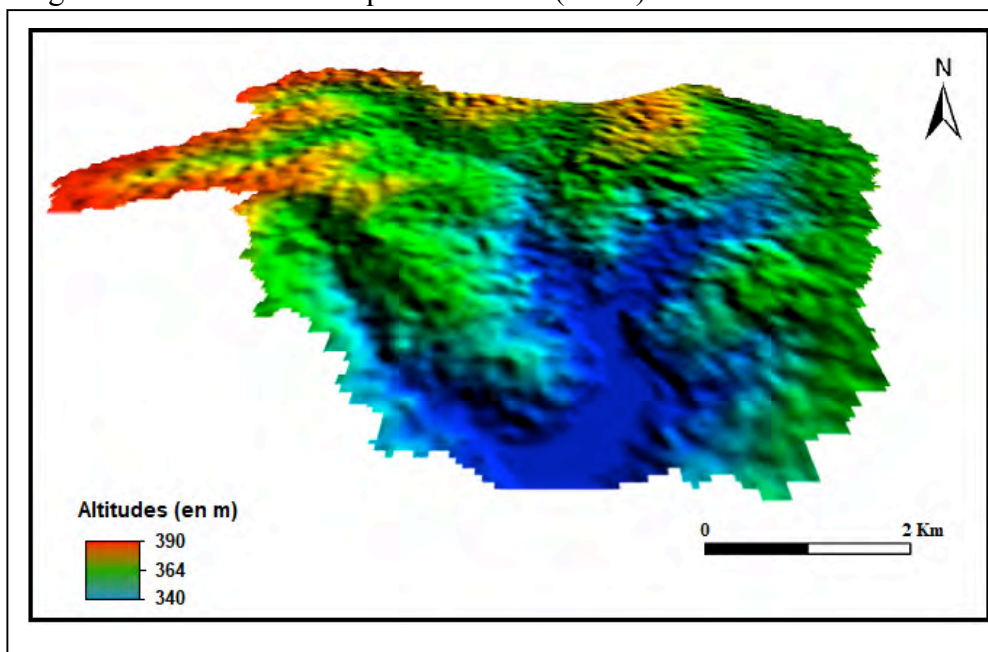
### **1.3. Caractéristiques physiques et humaines du bassin versant du lac Kan**

#### ***1.3.1. Caractéristiques physiques du bassin versant du lac Kan***

Le bassin versant du Kan est situé entre les parallèles 7° 41'' et 7° 38'' Nord et les méridiens 5° 0'' et 5° 4'' Ouest. Il possède une superficie de 1 904,1 ha et un périmètre de 36,98 Km. Il s'allonge sur 6,30 Km du quartier d'Air-France à l'Est au quartier d'Ahougansou à l'Ouest. Du Sud au Nord, il s'étend sur un peu plus de 6 Km entre le village de Kouadio-Assékro et le quartier Municipal.

Le bassin versant du Kan occupe un dôme granitique présentant un relief de plateau le plus accidenté de la ville de Bouaké avec une altitude moyenne de 360 m. Ce relief, incliné vers le Sud, présente une altitude maximale de 390 m. Il s'abaisse progressivement, pour atteindre 340 m dans sa partie méridionale où se trouve le plan d'eau du Kan. La pente moyenne est de 8,83 % et les terrains de pente supérieure à cette moyenne s'observent à la fois le long des cours d'eau et aux abords du Lac (figure 1).

Figure 1 : Modèle Numérique du Terrain (MNT) du Lac



Sources : Images SRTM (IARC-Second Global), 2014

Sur le plan pédologique, le bassin possède des sols ferrugineux tropicaux de savane et des sols latéritiques de forêt. En l'absence de couverture végétale, ces sols sont très sensibles à l'érosion.

Le réseau hydrographique du bassin versant du Kan est relativement dense et s'organise selon des écoulements du nord au sud. Quatre rivières (Kan, Gnagban Klan, Tongba et Kôkôbanou), avec des lits peu profonds, arrosent ce bassin. Le Kan et le Gnangban Klan constituent les principales rivières. Elles fragmentent l'espace urbain, entraînant ainsi l'isolement de certains quartiers. La rivière Kan, long de 5 km, prend sa source dans le quartier d'Ahounansou, précisément à 230 m au sud du marché de N'Dakro. Ce cours d'eau possède quelques affluents, mais les plus remarquables coulent dans les quartiers d'Ahounansou et de N'Gattakro. Pour sa part, la rivière Gnangban Klan prend sa source au Commerce. Elle traverse le quartier de Nimbo avant de se jeter dans le lac en parcourant ainsi, une distance de 3,15 km. Les deux autres cours d'eau du bassin versant (Kôkôbanou et Tongba) ne fragmentent pas le tissu urbain. Le premier prend sa source dans la forêt de Broukro village et traverse un espace non urbanisé avec une longueur de 2 km. Quant au deuxième, il prend sa source dans la vallée séparant les villages de Kouadio-Assèkro et Mlan Gougoukro et coule sur une distance de 400 m avant de se déverser dans le lac. Ces cours d'eau constituent les sous bassins versants du bassin versant du Kan.

Le climat du bassin versant du Kan est de type équatorial de transition comprenant quatre saisons : deux saisons des pluies (d'avril à juin pour la première et la seconde, plus irrégulière s'étale de septembre à octobre) et deux saisons sèches. La pluviométrie annuelle, très irrégulière d'une année à l'autre, peut cependant être estimée en moyenne à 1 088 mm sur la période de 1965 à 2015. Les pluies tombent sous forme d'orages avec une forte intensité. Quant aux deux saisons sèches, la première part de juillet à août tandis que la deuxième commence en novembre et finit en avril. Au cours de cette dernière saison sèche, pendant au moins trois mois (décembre à février), l'harmattan, un vent sec et chaud provenant du Sahel, souffle sur la zone avec des températures minimales comprises entre 14 et 21° C.

### *1.3.2. Caractéristiques humaines du bassin versant du Kan*

Le bassin versant du Kan est occupé par une dizaine de quartiers (qui représentent 40,86 % de l'ensemble des quartiers de la ville). On en dénombre quatre : Nimbo, Commerce, N'gattakro et Houphouët ville dont la totalité de la superficie se retrouve sur le bassin, tandis que les six autres : Kouadio-Assékro, Air France, Koko, Municipal, Ahougnanssou et Broukro ont seulement une partie de leur superficie appartenant au bassin (tableau I).

Tableau I : Superficie des quartiers dans le bassin versant du Kan

Quartiers	Superficie totale (ha)	Superficie sur le bassin (ha)	Pourcentage (%)
Ahougnansou	541	270,85	50,06
Air France	1 241	281,42	22,68
Broukro	1630	450,41	27,63
Commerce	60,42	60,42	100
Houphouët ville	187,1	187,1	100
Municipal	398	58,73	14,76
N'gattakro	166,61	166,61	100
Nimbo	141,42	141,42	100
Trainou	294	287,14	97,67
Total	4 659,55	1 904,1	40,86

Sources : INS 2014, Cartographie, KOKO, 2016

La proportion des superficies se trouvant sur le bassin versant diffère d'un quartier à un autre (tableau I). Ces territoires constituent l'ossature du bassin versant sur lequel se développent plusieurs activités (agricoles, domestiques, commerciales et administratives) qui lui donnent ainsi une

tenue foncière urbaine particulière. Du point de vue démographique, la population du bassin versant du Kan est estimée à près de 59 303 habitants en 2014, contre 68 488 en 1998, soit une régression totale de 0,86 %. Cette population représente 11 % de la population de Bouaké. La densité moyenne du bassin versant est de 31,14 habitants à l'hectare.

## 2. APPROCHE METHODOLOGIQUE

La démarche méthodologie comprend la collecte et le traitement des données ainsi que les matériels mobilisés pour la manipulation de ces dernières.

### 2.1. Données collectées et matériels utilisés

Pour la présente étude, plusieurs données concernant le secteur d'étude ont été utilisées. Ce sont trois images satellitaires Landsat de 30 m de résolution spatiale, saisies par les capteurs TM (1993), EMT+ (2002) et L8 OLI/TIRS (2015) (tableau II). Elles ont été téléchargées sur le site Earth Explorer des études géologiques du gouvernement américain (United States Geological Survey). Une autre image satellitaire du « Shuttle Radar Topography Mission » (SRTM) (tableau II), également de 30 m de résolution spatiale, a été recueillie sur le même site. Les images des capteurs TM et EMT+ de Landsat 7 offrent respectivement 7 et 8 bandes spectrales (comprises entre 0,45 à 12,5 microns). L'image du capteur OLI/TIRS de Landsat 8 contient 9 bandes spectrales (0,43 à 12,5 microns). À ces images, s'ajoute la carte des quartiers de Bouaké (réalisée en 2014) et obtenue auprès du service du cadastre de ladite ville.

Tableau II : Caractéristiques des données images collectées

IMAGES	REFERENCES	DATE D'ACQUISITION	BANDES SPECTRALES
Landsat 7 TM	LT41970551993027XXX02	27/01/1993	1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7
Landsat 7 EMT+	LE71960552002365EDC00	31/12/2002	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8
Lansat 8 OLI/TIRS	LC81970542015352LGN00	18/12/2015	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 et 11
SRTM	n07_w006_larc_v3_2	2014	C et X

Source : United States Geological Survey (USGS)

À la Société d'Exploitation de Développement aéroportuaire Aéronautique et Météo (SODEXAM) et à l'Institut National de la Statistique (INS), l'on a eu accès respectivement aux données pluviométriques (de 1965 à 2015) et démographiques (1965, 1989, 1998 et 2014) de la zone d'étude. Des missions de terrain à la Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire



(SODECI) ont eu pour objectif de collecter des données relatives aux volumes d'eau stockés dans le lac et à la quantité d'eau potable produite par la station de traitement d'eau du barrage du Kan. Aussi, elles ont été l'occasion de réaliser des entretiens avec des agents de la SODECI.

Les matériels utilisés sont composés d'un ordinateur, d'un scanner, des logiciels de Systèmes d'Information Géographique (SIG) (ArcGIS et Global Mapper) et de télédétection (ENVI) ainsi que d'un logiciel de traitement statistique (XLSTAT).

## **2.2. Traitement des données**

Le traitement des données collectées a commencé par l'application d'une composition colorée aux trois images Landsat avec le logiciel ENVI 3.8. Cette opération a pour but de faciliter l'interprétation de ces images. Elle a consisté à combiner les canaux 7, 5 et 2 sur l'image de 1993 issue du capteur TM, ensuite les canaux 7, 4 et 2 sur l'image de 2002 saisie par le capteur ETM+ (2002) et enfin les canaux 4, 3 et 2 sur l'image de 2015 provenant du capteur L8 OLI/TIRS (2015). La méthode de classification dirigée par maximum de vraisemblance, employée sur ces dernières, a donné lieu à trois cartes d'occupation du sol de 1993, 2002 et 2015 comportant trois classes : espaces anthropisés, couvert végétal et plan d'eau. Par définition, les espaces anthropisés sont composés du bâti (comportant des habitats réguliers et irréguliers), des voies de communication et des espaces maraîchers (dans les bas-fonds) ; tandis que les espaces végétalisés sont les friches urbaines, des enclaves de forêts sacrées et classées, quelques espaces verts aménagés et des broussailles rencontrées le long des voies et en d'autres endroits de la ville. La classification dirigée par maximum de vraisemblance a été appliquée aux trois images de Landsat pour affecter les pixels de manière respectives aux trois classes définies (espaces anthropisés, espaces végétalisés et plan d'eau). La matrice de confusion de cette opération de classification indique un coefficient de Kappa de 0,95 pour l'image aérienne de 1993, 0,97 pour celle de 2002 et 0,92 pour celle de 2015. Par la suite, les superficies des trois types d'occupation du sol ont été calculées en multipliant leur nombre de pixel par la superficie d'un pixel (900 m<sup>2</sup>).

Le logiciel Global Mapper a été employé pour extraire le réseau hydrographique du secteur étudié sur l'image satellitaire de 2014 du SRTM. Il a également servi à produire une carte du bassin versant du Kan et ses sous bassins versants ainsi que ses cours d'eau. En rappel, les cartes d'occupation du sol sont dans la même référence spatiale que celles des sous bassins versants du Kan et des quartiers de Bouaké. Cela va donc faciliter la superposition de la carte d'occupation du sol du bassin à celle du bassin

versant (avec ses sous-bassins versants et ses cours d'eau), donnant ainsi une carte de synthèse représentant le mode d'utilisation du sol dans les quatre sous bassins versants. Une deuxième carte de synthèse résultant de l'opération de superposition a généré une carte d'occupation du sol des quartiers implantés dans le grand bassin versant du Kan.

Le traitement statistique des données quantitatives (population du bassin versant du Kan, pluviométrie, superficie du plan d'eau, des espaces bâtis et du couvert végétal) a été fait avec le logiciel XLSTAT 2014. Dans un premier temps, la somme des populations (des recensements de 1965, 1989 et 1998) des quartiers établis dans le bassin versant a donné lieu à la population totale de la zone d'étude de ces trois années. Ensuite, les populations des années comprises entre 1965 et 2015 ont été estimées avec la formule suivante :

$$P = P_0 (1 + t)^{\frac{1}{n}}$$

Avec :

$P$  = population à estimer,

$P_0$  = population de départ,

$t$  = taux d'accroissement moyen annuel de la population et ;

$n$  = année écoulée entre  $P$  et  $P_0$

Pour sa part, la pluviométrie totale de 1965 à 1993, 1965 à 2002 et de 1965 à 2015 est obtenue en cumulant les valeurs annuelles.

Les procédés de la statistique descriptive ont servi à calculer les sommes, les pourcentages et les moyennes arithmétiques ; pendant que la méthode de corrélation a permis de montrer le degré de relation entre certaines variables (précipitation, niveau d'envasement, espaces bâti, couvert végétal et population). Ces deux méthodes de traitement statistiques ont autorisé la réalisation des graphiques et des tableaux.

### 3. RESULTATS

Dans cette partie, il s'agit au préalable d'examiner l'influence de la dynamique urbaine dans le processus d'envasement du lac Kan et ensuite d'analyser les autres facteurs de ce phénomène en rapport avec la dynamique urbaine du bassin versant.

#### **3.1. Impact de la dynamique urbaine au sein du bassin versant du Kan dans l'envasement du lac Kan**

##### *3.1.1. Mode d'utilisation du sol du bassin versant et problème d'envasement du lac Kan*

L'analyse géographique de la zone d'étude montre que le bassin versant du lac Kan est sous l'emprise de trois grands types d'occupation du sol : espaces anthropisés, espaces végétalisés et plan d'eau lacustre. Une observation synoptique des trois cartes (2a, 2b et 3c) permet de constater l'évolution au fil du temps de l'espace anthropisé au détriment des espaces végétalisés et du plan d'eau lacustre. En effet, les surfaces du couvert végétal et du plan d'eau connaissent une régression alors que celles des espaces anthropisés gagnent du terrain. Au niveau des sous bassins, seul Kôkôbanou (à l'Ouest) connaît une évolution faible de son espace anthropisé. De 1993 à 2015, il a quasiment gardé son couvert végétal qui est plus grand que l'espace bâti. Quant aux sous bassins du Kan (au Nord-Ouest) et de Gngban Klan (à l'Est), en 1993, avec des espaces anthropisés plus étendus que le couvert végétal, ils ont connu une perte de leurs couverts végétaux au profit des espaces bâtis. Le sous-bassin du Tonbga (au Sud-Est), de son côté, enregistre un accroissement significatif de son espace anthropisé. Présent en 1993 avec un couvert végétal plus étendu que l'espace anthropisé, il se retrouve en 2015 avec plus de la moitié de sa surface dominée par les espaces humanisés. Les superficies des types d'occupation du sol sur le grand bassin du Kan, consignées dans le tableau III, permettent de corroborer ces observations faites sur les cartes 2a, 2b et 2c à l'échelle des sous bassins.

Carte 2 : Mode d'utilisation du sol dans les sous bassins versants

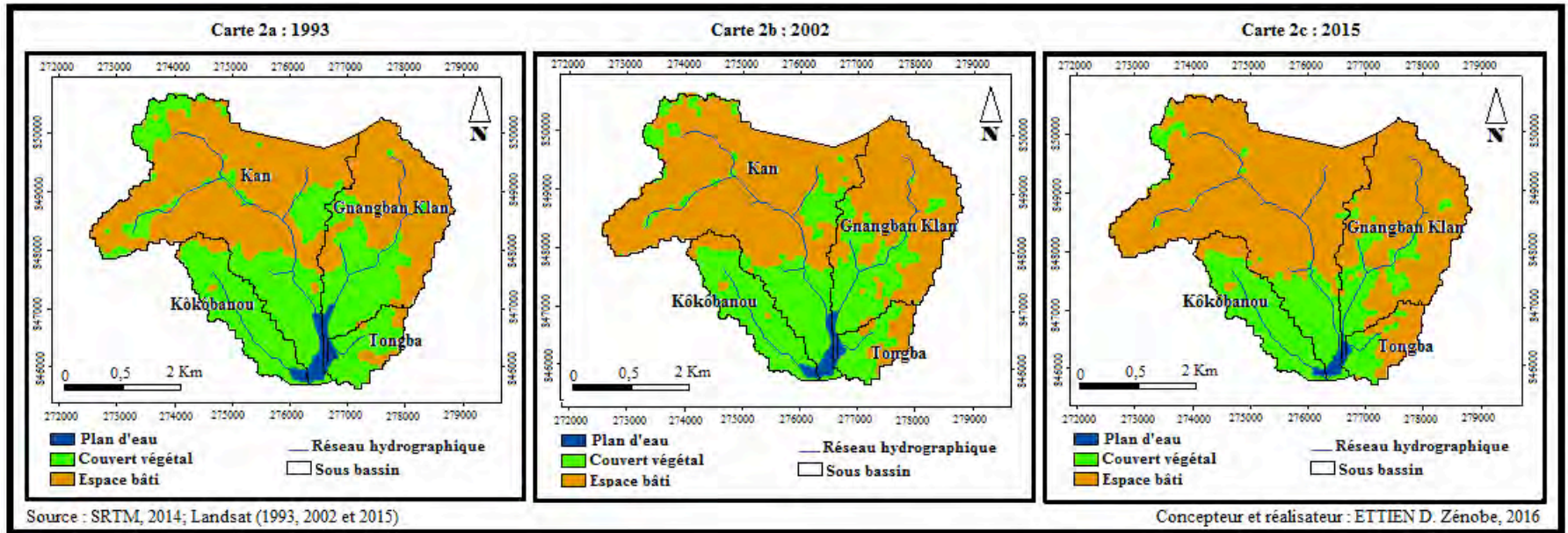


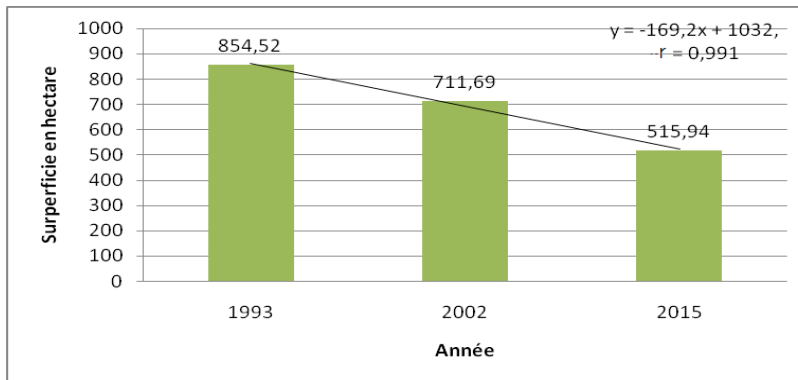
Tableau III : Superficie des types d'occupation du sol dans le bassin versant  
du Lac du barrage du Kan

Année	Couvert végétal (ha)	Espace anthropisé (ha)
1993	854,52	1049,58
2002	711,69	1192,41
2015	515,94	1388,16

Sources : Landsat (1993, 2002, 2015) ; Cartographie, ETTIEN Zénobe, 2016.

Ainsi, de 1993 à 2015, pendant que la superficie du couvert végétal diminue sur le bassin versant, celle de l'espace humanisé augmente (tableau III). L'examen des aires des types d'occupations du sol pour chaque année, révèle qu'en 1993 le couvert végétal, estimé à 854,52 ha, représentait 44,88 % de la superficie totale du bassin versant du Kan. Par contre, les espaces anthropisés occupaient 1 049,58 ha, soit 55,12 % de la surface totale du bassin versant. En 2002, soit neuf ans après, le couvert végétal est passé à 711,69 ha (soit une perte de 142,83 ha) et les espaces anthropisés à 1 192,41 ha (soit une augmentation de 142,83 ha). À cette date (2002), le bassin versant était couvert de 62,62 % des espaces anthropisés et 37,38 % de couvert végétal. En 2015, le couvert végétal continue de diminuer ; il passe de 711,69 ha (2002) à 515,94 ha (soit une occupation de 27,09 % de la superficie totale du bassin versant). Les espaces anthropisés, pour leur part, évoluent à la hausse, passant de 1 192,41 ha en 2002, à 1 388,16 ha en 2015 (soit 72,91 % de la surface totale du bassin versant). Le rythme annuel de croissance des espaces anthropisés de 1993 à 2002 (15,87 ha/an) est légèrement supérieur à celui de la période de 2002 à 2015 qui est de 15,06 ha. Entre 1993 et 2002, la population du bassin versant : 68 488 habitants (INS, 1998), était plus dense, car elle représentait 15 % de population totale de la ville ; mais elle exerçait moins de pression foncière. C'est ce qui explique ce rythme de croissance des espaces anthropisés à cette période. Par contre, de 2002 à 2015, l'on note une population moins dense : 59 303 (INS, 2014) qui résulte d'abord d'un déplacement massif de la population de cette zone vers d'autres contrées du fait de la crise qui a secoué la ville et ensuite d'un retour progressif des populations à la fin de la crise. Cette population représente 11 % de la population totale de la ville de Bouaké. Cependant, elle exerce une pression foncière relativement forte, ce qui permet de garder quasiment le même rythme de croissance des espaces bâtis. Au total, l'évolution des espaces anthropisés sur le bassin ne résulte pas de la taille de sa population de 1993 à 2015 mais de la forte production du bâti. À ce rythme, cette évolution compromet gravement l'état du bassin versant pour les décennies à venir comme traduit par la figure 2.

Figure 2 : Evolution du couvert végétal dans le bassin versant du Kan



Source : Landsat (1993, 2002 et 2015) ; cartographie, KOKO, 2016.

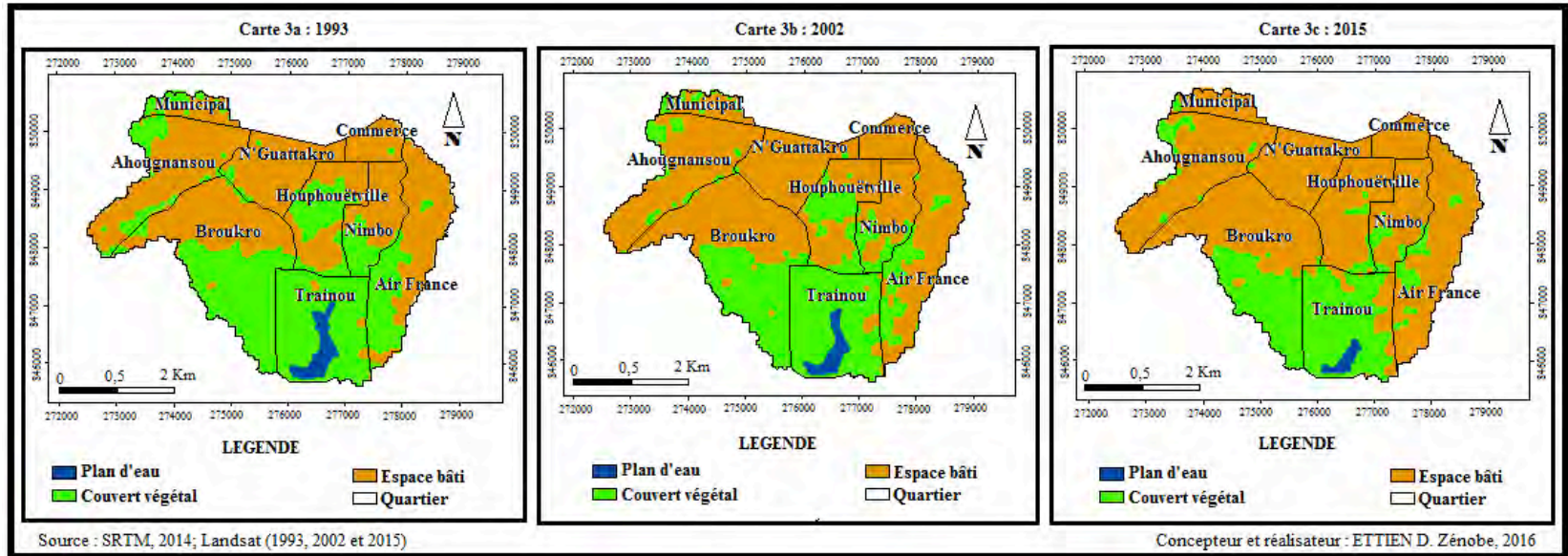
En effet, la courbe d'évolution des superficies du couvert végétal de 1993 à 2015 indique une tendance régressive avec un coefficient directeur de -169,29. Elle traduit une baisse moyenne de 169,29 ha tous les onze ans. Cela signifie que chaque année, ce sont 15,39 ha de couvert végétal qui disparaissent sur le bassin versant du Kan au profit des espaces bâtis. En extrapolant sur la base de ce rythme de régression (figure 2), le couvert végétal (avec le lac) pourrait disparaître à l'horizon 2049, c'est-à-dire dans 34 ans.

### ***3.1.2. Analyse des quartiers du bassin versant contribuant à l'envasement du Lac du barrage du Kan***

Les quartiers de la ville de Bouaké, implantés sur le bassin versant du barrage du Kan, contribuent de plus en plus à l'envasement du lac, car on y retrouve des espaces déboisés du fait de l'urbanisation. Toutefois, le degré de contribution varie d'un quartier à un autre (carte 3). Ainsi, les quartiers de N'Guattakro, Ahougnansou, Broukro, Houphouët ville, Nimbo, Air France et de Municipal contribuent de façon importante à ce phénomène. En effet, la quasi-totalité ou une grande partie de leur surface a été progressivement dénudée de 1993 à 2015 (cartes 3a, 3b et 3c). Les quartiers de Commerce et de Trainou contribuent faiblement à l'envasement du lac. Le premier est moins indexé à cause de sa fonction de quartier commercial et administratif viabilisé, équipé des infrastructures d'assainissement et d'une voirie quasi-bitumée. Cela facilite l'évacuation des eaux usées et le drainage des eaux de ruissellement, réduisant ainsi l'érosion hydrique. Le deuxième (Trainou) est un quartier périphérique qui a conservé son couvert végétal composé d'une forêt sacrée (dans le village de Kouadio-Assèkro), de l'ex-terrain de golf dont la couverture végétale s'est reconstituée et d'une forêt galerie le long de la rivière Tongba (cartes 3a, 3b et 3c).

ANALYSE DIACHRONIQUE DE LA DYNAMIQUE URBAINE ET DE  
L'ENVASEMENT DU LAC DU BARRAGE DU KAN DE BOUAKÉ (CÔTE D'IVOIRE)

Carte 3 : Mode d'occupation du sol des quartiers implantés dans le bassin versant



### 3.2. Analyse des autres facteurs d'envasement en lien avec la dynamique urbaine du bassin versant

La pression urbaine qui a lieu sur le bassin versant du Kan ne saurait à elle seule expliquer l'envasement du lac. Elle doit être associée aux facteurs physiques : pluviométrie qui arrose la ville de Bouaké et la topographie (pente du relief) caractéristique du bassin versant. Ainsi, l'importance de la pluviométrie (variable d'une saison à une autre et d'une année à une autre) et le degré des pentes (variable selon les endroits) vont déterminer l'intensité de l'érosion hydrique sur les espaces dénudés et décapés par l'urbanisation du bassin versant du Kan. C'est cette érosion qui intervient dans le processus du comblement du lac du Kan.

#### 3.2.1. L'action des précipitations sur les espaces dénudés

La comparaison des valeurs des variables pluviométrie, espace bâti, population et niveau d'envasement (tableau IV) les unes avec les autres met en évidence l'intervention de la pluviométrie dans le processus d'envasement du lac. En effet, le niveau d'envasement du lac s'élève lorsque les précipitations augmentent au fil du temps. Cette progression de l'ensablement est aussi liée à la hausse des espaces anthropisés et à la croissance de la population établie sur le bassin versant. De ces constats, il ressort que les précipitations en association avec les espaces bâtis développés sur le bassin versant contribuent à l'envasement du lac. Autrement dit, la pluviométrie agit sur les espaces bâtis au travers de l'érosion pluviale qui à son tour va drainer les sédiments vers le lac.

Tableau IV : Évolution de la pluviométrie, des espaces bâtis, de la population et du niveau d'envasement du lac

Année	Pluviométrie (mm)	Espace anthropisé (ha)	Population estimée	Niveau d'envasement (m)
1965-1993	31 757,2	1 049,58	45 161	3,92
1965-2002	41 294,2	1 192,41	75 835	5,18
1965-2015	55 523,5	1 388,16	60 246	7

Source : SODEXAM, 2016 ; SOGED, 2016 ; Cartographie, KOKO, 2016.

Par ailleurs, ces constats, découlant de cette comparaison, sont confortés par la matrice de corrélation (tableau V) contenant les coefficients de corrélation qui évaluent la dépendance entre ces quatre variables.



Tableau V : Matrice de corrélation entre la pluviométrie, l'espace bâti, la population et le niveau d'envasement

Variables	Pluviométrie	Espace bâti	Population	Niveau d'envasement
Pluviométrie	1	0,9997	0,3900	1,0000
Espace bâti	0,9997	1	0,4115	0,9999
Population	0,3900	0,4115	1	0,3982
Niveau d'envasement	1,0000	0,9999	0,3982	1

Source : ETTIEN D. Zénobe, 2016.

En effet, cette matrice révèle que le niveau d'envasement est très corrélé à la fois avec la pluviométrie ( $r=1$ ) et l'espace bâti ( $r=0,99$ ). Cependant, il existe une corrélation faible entre la population présente sur le bassin et le niveau d'envasement ( $r=0,39$ ). Nous pouvons en déduire que les facteurs les plus prépondérants à l'envasement de la retenue d'eau du Kan sont ceux de la pluviométrie et de l'espace bâtis. La présence des espaces dénudés est un facteur dont sa mise en place est renforcée par les actions anthropiques, d'où une implication indirecte de la présence de l'homme sur l'envasement du bassin versant du lac. Tandis que la pluviométrie est un facteur naturel qui n'agit que lorsqu'il existe des espaces dénudés.

Même si la corrélation est faible entre le niveau d'envasement et la présence humaine, il est important de signaler que des ménages installés sur le bassin versant du lac, de par des pratiques tendant à dégrader l'environnement urbain (exploitations agricoles dans les bas-fonds et rejets des déchets solides et liquides dans la ville), ont une responsabilité plus ou moins prépondérante dans l'accumulation, dans le lac, des matières solides et en suspension transportées par le ruissellement des eaux pluviales.

### ***3.2.2. Le terrain : pente du relief et nature du sol en rapport avec les espaces dénudés***

Les espaces dénudés cachent d'autres réalités, à savoir la nature du sol et la pente du relief, qui favorisent l'érosion hydrique. Cette hypothèse a été développée dans les travaux de Roose (1994), Zingg (1940) et de Savat (1982) qui indiquent que l'érosion hydrique est dépendante de la topographie du relief, c'est-à-dire l'inclinaison du terrain susceptible d'être érodé en l'absence de couverture végétale. Selon leurs analyses, la vitesse de ruissellement des eaux pluviales accélère avec le pourcentage de pente qui fait augmenter de façon exponentielle le transport des matériaux arrachés.

Les sols du bassin versant du Kan sont composés de cuirasse (ferrugineux et latéritiques) et d'alluvions (formés autour de la retenue d'eau et dans les bas-fonds). Selon Dumas (2010), ils appartiennent à la classe 3 qui correspond à une sensibilité forte à l'érosion.

Dans le cas de la présente étude, le bassin versant du Kan présente une pente moyenne de 8,83 % qui correspond à 5,05°. Cette valeur, appartenant à la classe 4, correspond à une pente faible qui peut causer une érosion légère capable d'arracher jusqu'à 25 % d'une grande partie de la couche de sol sensible (Soil Survey Staff, 1960). Cependant, cette moyenne de pente varie d'un sous bassin à un autre. Le degré d'agression du processus érosif sera donc fonction de la pente du sous bassin constitué de sols facilement abrasifs lorsqu'ils sont dénudés. Ainsi, les sous-bassins de Kôkôbanou et Tongba sont les plus inclinés avec des pentes moyennes de 13,61 % (soit 7,75°) et 12,57 % (7,16°) respectivement. Ces valeurs s'inscrivent dans la classe 5 des pentes modérées qui favorisent une érosion hydrique modeste pouvant enlever environ 25 à 75 % d'une grande partie de la couche de sol apparent. En dépit de ces pentes modérées, ces deux sous bassins sont soumis à une faible érosion hydrique, car ils contiennent des quartiers moins découverts de leur végétation (carte 3). Pour leur part, les pentes moyennes des sous bassins versants du Kan (8,21 %) et de Gnganban klan (8,08 %) avoisinent la moyenne du bassin versant (8,83 %). Ils sont respectivement inclinés de 4,69° et 4,62° par rapport à l'horizontal. A l'image du grand bassin versant, ces deux sous bassins versants appartiennent à la classe des pentes faibles qui entraînent une érosion hydrique légère. En revanche, ils présentent des quartiers d'Ahougansou, Broukro, N'Guattakro, Nimbo et d'Air-France qui au fil du temps ont perdu presque toute leur couverture végétale au profit des espaces bâtis (carte 3). Ces immenses espaces dénudés sont propices à l'érosion malgré la faible pente de ces sous-bassins. Ainsi, l'envasement du lac est le résultat d'un long processus érosif qui se fait généralement sur des terrains bâtis à pente faible et de façon moindre sur les terrains moins bâtis (présence de couverture végétale) à pente moyenne.

#### 4. DISCUSSION

Suivant les résultats de cette étude, le lac Kan est confronté à un problème d'envasement qui a certainement débuté dans la troisième décennie de la mise en service du barrage en 1964. Deux démarches scientifiques ont servi à l'analyse du phénomène. Le premier qui est de type géographique, met en relation l'évolution de l'envasement du lac avec le mode d'utilisation du sol sur le bassin versant. Il s'agit d'une analyse spatio-temporelle montrant la progression, au niveau du lac, de l'envasement en rapport avec

l'urbanisation du bassin versant du Kan. La méthode de classification dirigée a été employée pour révéler la dynamique urbaine sur le bassin versant au travers les cartes d'occupation du sol. Les coefficients de Kappa, qui évaluent la qualité de cette opération de classification, indiquent des valeurs de 0,95, 0,97 et 0,92 pour les cartes de 1993, 2002 et 2015, respectivement. Etant donné que ces valeurs dépassent 0,8 (soit 80%) (Landis et Koch, 1977), on peut déduire que l'approche par classification dirigée appliquée à cette étude est conventionnellement considérée pertinente.

En revanche, la deuxième approche se consacre au traitement statistique des variables et met en évidence l'implication de l'urbanisation dans le processus d'ensablement du lac. De manière pratique, l'application de la méthode de corrélations aux variables d'analyse a permis de révéler un lien étroit entre les espaces anthropisés, les précipitations et le niveau d'envasement du lac. Ce résultat traduit la responsabilité des espaces anthropisés (espaces bâtis et zones d'exploitations agricoles) dans le problème de l'hydro-sédimentation du lac déjà notifié par Kouassi *et al.* (2013) dans le lac du barrage hydro-électrique d'Ayamé.

Dans une approche analytique des résultats obtenus, nous pouvons soutenir que l'expansion urbaine sur le bassin versant du Kan a fait disparaître la couverture végétale en amont du lac. Les sols de cet espace, de nature alluvionnaire et ferrugineux et dont une bonne partie est désormais dénudée, sont sensibles à l'érosion hydrique causée par une pluviométrie abondante. À un moment donné du fonctionnement du barrage du Kan, l'érosion pluviale a arraché puis transporté des matériaux des espaces anthropisés vers le lac situé en aval du bassin versant du Kan. Ces sédiments s'accumulent excessivement sur les berges et au fond du lac. La topographie des surfaces dénudées sur le bassin versant du Kan est déterminante dans l'accomplissement de ce processus, dans la mesure où elle est un paramètre à considérer quant à l'évaluation de la force de l'érosion pluviale. Dans la présente étude, les pentes du bassin versant du Kan sont variables d'un lieu à un autre. Il va sans dire que les zones faiblement inclinées (de 5° environ), en majorité dénudées par l'urbanisation, favorisent une érosion légère tandis que les surfaces moyennement inclinées (de 7° environ), moins décapées de leur végétation, provoquent une érosion modérée. Dans l'ensemble, le niveau d'inclinaison du terrain n'est pas très important pour permettre à l'érosion pluviale d'agir avec force. Dans ces conditions, nous pouvons déduire que le dépôt excessif de sédiments dans le lac Kan est le résultat d'une érosion pluviale à faible puissance. Cependant, elle s'est produite tout au long du temps sur des surfaces de terre en grande partie dénudées par l'urbanisation non planifiée. Ce résultat confirme ainsi l'hypothèse, émise par Mélédje *et al.*

(2014), selon laquelle l'urbanisation rapide et incontrôlée serait l'une des actions anthropiques responsable de la dégradation des retenues d'eau.

On peut ainsi admettre que le facteur anthropique contribue beaucoup au processus d'envasement du lac Kan. Il est soutenu par des éléments pluviométriques, topographiques et pédologiques. Plus concrètement, l'urbanisation constitue le principal vecteur de l'action anthropique sur le milieu naturel. Pour sa part, la pluviométrie d'origine naturelle va causer l'érosion des sols dénudés dont l'aboutissement est l'accumulation des sédiments dans le lac.

## CONCLUSION

Cette étude, au moyen des analyses spatio-temporelles et statistiques, fait ressortir l'implication de la dynamique urbaine dans le processus d'envasement dont souffre le lac du barrage du Kan. Nous retenons que l'expansion urbaine a effectivement influencé la physionomie du bassin versant du Kan en mettant progressivement en place des zones bâties et maraîchères au préjudice de la couverture végétale. Ce sont ces espaces anthropisés qui ont contribué incontestablement au comblement du lac du barrage construit en aval du bassin versant. Sous l'action d'une pluviométrie abondante, caractéristique des années de mise en opération du barrage, les espaces anthropisés ont subi une érosion hydrique qui a sédimenté le lac suite aux opérations d'ablation et de transport des matériaux. Cette érosion pluviale, d'une agressivité minime en raison de la faible inclinaison des terrains dénudés, est tout de même parvenue à générer des sédiments qui, en espace de trois décennies, ont fini par combler les berges et le fond du lac. L'accomplissement de cet envasement est donc le résultat d'un processus qui s'est déroulé en chaîne suivant un rythme presque graduel. Cette étude a montré le fort pouvoir de la dynamique urbaine dans l'exacerbation du processus d'envasement du lac du barrage du Kan de Bouaké. Il est toutefois nécessaire, afin d'appréhender plus globalement le processus, d'examiner son impact sur la profondeur, la capacité de stockage, la superficie et la qualité des eaux du lac.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ENTERPRISEWORKS, UNICEF et PRACTICA FOUNDATION, 2010. *Côte d'Ivoire : Etude de faisabilité des forages manuels et identification des zones potentiellement favorables*, 73 p.

DUMAS (P.), 2010. « Méthodologie de cartographie de la sensibilité de sols à l'érosion appliquée à la région du Dumbéa à Païta-Bouloupari (Nouvelle Calédonie) » in *Les cahiers d'Outre-Mer. Revue de Géographie de Bordeaux* Vol. 63, n° 252, pp. 567-584.

GROGA (N.), 2012. *Structure, fonctionnement et dynamique du phytoplancton dans le lac de Taabo (Côte d'Ivoire)*, Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 224 p.

GRISMER (M. E.), 2012. « Erosion modeling for land management in the Tahoe basin, USA: scaling from plots to forest catchments » in *Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 57, n° 5, pp. 878-899.

INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE (INS), 1998. *Recensement Général de la Population et de l'Habitation 1998. Données socio-démographiques et économiques de la localité de Bouaké*. INS, Abidjan.

INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE (INS), 2014. *Recensement Général de la Population et de l'Habitation 2014. Données socio-démographiques et économiques de la localité de Bouaké*. INS, Abidjan.

KOUCAME (M. K.), DIETOA (M. Y.), DA COSTA (S. K.), EDIA (E. O.), OUCATTARA (A.) et GOURENE (G.), 2010. « Aquatic macroinvertebrate assemblages associated with root masses of water hyacinths, *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms-Laubach, 1883 (Commelinales: Pontederiaceae) in Taabo Lake, Ivory Coast » in *Journal of Natural History*, Vol. 44, n° 8, pp. 257-278.

KOUASSI (K. L.), 2007. *Hydrologie, transport solide et modélisation de la sédimentation dans les lacs des barrages hydroélectriques de la Côte d'Ivoire : Cas du lac de Taabo*. Thèse de doctorat, Université d'Abobo-Adjamé, 209 p.

KOUASSI (K. L.), KOUAME (K. I.), KONAN (K. S.), DIBI (B.), MOUSSA (S.), KONE (D.) et GNAKRI (D.), 2013. « Prospects for minimizing the potential environmental impacts of the hydro-agricultural dam of M'Bahiakro. (Côte d'Ivoire) » in *Journal of Water Resource and Protection*, Vol. 5, pp. 847-853.

LANDIS (J. R), KOCH (G. C), 1977. « The measurement of observer agreement for categorical data », in *Biometric*, Vol. 33, pp. 159-174.

MELEDJE (N. H.), KOUASSI (K. L.), N'GOH (Y. A.), KOUASSI (K. M.), SAVANE (I.), AKA (K.), 2014. « Caractérisation des apports sédimentaires et morphologie du lac du barrage hydroélectrique d'Ayamé 1 (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) » in *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol .8, n° 3, pp. 1290-1307.

N'GO (Y.), 2000. *Etude de l'érosion des sols de la région de Buyo : Analyse des facteurs et essai d'évaluation des risques par télédétection et les Systèmes d'Informations Géographiques*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université d'Abobo-Adjamé, 155 p.

OUATTARA (A.), 2000. *Premières données systématiques et écologiques du phytoplancton du lac d'Ayamé (Côte d'Ivoire)*. Thèse de doctorat unique, Université Catholique de Louvain, Belgique, 207 p.

ROOSE (E.), 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. Bulletin pédologique de la FAO, 70 p.

SERBAH (B.), 2011. *Etude et valorisation des sédiments de dragage du barrage de Bakhada Tieret*, Mémoire de maîtrise, Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen (Algérie), 129 p.

SAVAT DE PLOEY (J.), 1982. "Sheetwash an rill development by surface flow" In BRYAN (R.), YAIR (A.), dir. *Badland Geomorphology and Piping*. Norwich (Angleterre) : Geo Books, 408 p.

SOIL SURVEY STAFF, 1960. *Soil classification*. 7th approximation. U.S.D.A Washington D.C.

YAPO (O.), 2002. *Evaluation de l'état trophique du lac de Buyo (Côte d'Ivoire)*. Thèse de doctorat unique, Université d'Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 296 p.

ZINGG (A. W.), 1940. « Degree and length of slope of land slope as it affects soil loss in runoff » in *Agric Eng.* n°21, pp. 59-64.