

Diagnostic à la mi-saison sèche de l'état hydrique des drains du Sous-bassin versant du Kohodio à partir des images multispectrales de la génération Landsat de 1986 à 2018

[Diagnostic of hydrous state of drain in the mid-dry season of kohodio watershed using multispectral images of Landsat generation from 1986 to 2018]

YOUAN TA Marc^{1,2}, NJEUGEUT MBIAFEU Amandine Carine², ADJA Miessan Germain³, KOUADIO Armel¹, DANUMAH Jean², JOURDA Jean Patrice^{1,2}, and N'GUESSAN Vami Herman²

¹Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM),
Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire

²Centre Universitaire de Recherche Appliquée en Télédétection (CURAT),
Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire

³Ecole Normale Supérieure (ENS), Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire

Copyright © 2019 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This study focuses on the kohodio watershed in north-eastern of Côte d'Ivoire. The objective is to present the seasonal variation of the water status during the wet season and in the mid-dry season, from 1986 to 2018, using remote sensing.

This study focuses on the Kohodio watershed in northeastern Côte d'Ivoire. The aim is to present the seasonal variation of the hydrous state of drains from wet season (December-January) to mid-dry season using Landsat multispectral image processing (TM 1986, ETM + 2002 and OLI 2018).

The approach combine: (i) the discrimination of wet drains by calculating moisture indices in mid-dry season and color compositions in wet-season; (ii) the automatic extraction of wet units on our composite indices and images; (ii) and the superposition of the global hydrographic network on the extracted layers. The intersection allowed mapping of wet drains in the wet season and in the mid-dry season.

The analysis shows that the physical and spatial hydrous state results in the drying of the drains from 1986 to 2018.

Total length of wet drains in the basin is 23.80%; 21.7% and 22.4% of its water potential during wet season; and 21.1%; 7.7% and 10.1% in the dry mid-season, respectively in 1986, 2002 and 2018. From the end of the rains until mid-dry season, rate drain drying is 11.2%; 64.6% and 54.8% respectively in 1986, 2002 and 2018.

drain drying observed in the mid-dry season was greatly felt from 1986 to 2002, with a percentage equal to -63.70%. This phenomenon is the consequence of climate change and the construction of dams of reservoirs in the area.

KEYWORDS: Volta, seasonal variation, drying, hydric potential, Ivory Coast.

RESUME: La présente étude porte sur le bassin versant de Kohodio, situé au nord-est de la Côte d'Ivoire.

L'objectif est de présenter la variation saisonnière de l'état hydrique des drains de la saison humide(décembre-janvier) à la mi-saison sèche à partir du traitement d'images multispectrales Landsat (TM 1986 ; ETM+ 2002 et OLI 2018).

L'approche a combiné : (i) la discrimination des drains humides par le calcul des indices d'humidité en mi- saison sèche et des compositions colorées en saison humide ; (ii) l'extraction automatique des unités d'occupation humides sur nos indices et images composites ; (ii) et la superposition du réseau hydrographie global et des couches extraites. L'intersection a permis de cartographier réseau des drains humides en saison humide et en mi-saison sèche.

Il ressort après analyse que l'état hydrique, au plan physique et spatial se traduit par l'assèchement des drains de 1986 à 2018.

La longueur totale des drains humides du bassin correspond à 23.80% ; 21.7% et 22.4% de son potentiel hydrique en période humide et à 21.1 % ; 7.7% et 10.1% en mi-saison sèche, respectivement en 1986, 2002 et 2018. De la fin des pluies jusqu'en mi-saison sèche, le taux d'assèchement des drains est estimé à 11.2% ; 64.6 % et 54.8% en 1986, 2002 et 2018.

L'assèchement observé en mi-saison sèche s'est beaucoup fait ressentir de 1986 à 2002, avec un taux d'assèchement égale à - 63,70%. Ce phénomène est certainement dû au changement climatique et à la construction des barrages de retenues d'eau observés dans la zone.

MOTS-CLEFS: Volta, variation saisonnière, assèchement, potentiel hydrique, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

L'eau est une substance fondamentale pour le maintien de la vie. C'est aussi un facteur d'une grande utilité aussi bien pour la production agricole et énergétique, pour les usages domestiques que pour d'autres activités de la vie courante. Depuis quelques décennies, l'eau est restée la question centrale de beaucoup de colloques, séminaires et recherches scientifiques à travers le monde. En Afrique, les projections futures indiquent que les impacts du changement climatique sur les ressources en eau sont susceptibles de s'aggraver avec le temps [1].

En Afrique de l'Ouest, des études menées sur les fluctuations climatiques montrent que la pluviométrie a baissé de 10% à 30% ([2] ; [3] ; [4] ; [5] ; [6] ; [1]).

Les études menées sur les différents bassins en Côte d'Ivoire, ont montré une baisse des ressources en eau. Cette baisse affecte aussi bien les eaux de surface que les eaux souterraines. Elle est due aux variabilités climatiques [2], [3], [4], [7], [8], [5], [9], [6], [10], [11], [12], [13], [14], [15]. De plus, ces bassins sont soumis à de fortes pressions à cause des différents pays riverains qui l'ont en commun (Ghana, Burkina Faso, Togo, Côte d'Ivoire, Benin, Mali) [16]. Chacun de ces pays manifeste des besoins de développement et de modernisation, et des besoins d'exploitation grandissant des ressources en eau pour un meilleur épanouissement de la population.

C'est dans ce contexte que cette étude a été située pour évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau de surface dans la partie ivoirienne du bassin de la volta.

Elle se fixe comme objectif de présenter la variation saisonnière de l'état hydrique des drains au Sud du bassin versant de la volta en Côte d'Ivoire, à partir d'images multispectrales de la génération Landsat TM 1986, ETM+ 2002 et OLI 2018.

Compte tenu de la sensibilité avérée des phénomènes hydrologiques à l'échelle de temps (jours, mois, saisons...) suscitant en leur sein des variations importantes, en occurrence l'assèchement des cours d'eau, le bassin versant du Kohodio sert de zone test pour rendre compte de l'état hydrique des drains au Sud de cette partie du bassin versant de la volta. Le choix a été porté sur ce bassin versant car il occupe une plus grande superficie au niveau de la partie ivoirienne du bassin de la volta.

2 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le secteur qui fait l'objet de cette étude est la partie ivoirienne du bassin versant de la volta située au Nord-Est de la Côte d'Ivoire. Elle s'étend sur une superficie d'environ 12 960 km² soit 3,2% de la superficie totale du bassin versant de la Volta.

Le bassin présente un réseau hydrographique très dense avec une longueur totale des drains estimée à 2 0616,4 km soit une densité de drainage de 1,13 km/km². Une grande variété dans la configuration du drainage le caractérise. L'influence relative et conjuguée de quatre principaux facteurs à savoir la pente, la tectonique, la géomorphologie et la nature des roches ont contribué à la mise en place de l'architecture donnée à ce réseau hydrographique.

Le bassin versant du Kohodio, qui fait l'objet de cette étude, couvre une superficie de 2881,67 km². Il est compris entre les longitudes 2°32' et 3°11' Ouest et les latitudes 8°45' et 8°8' Nord (Fig. 1).

Les activités agricoles et pastorales fortement liées aux ressources en eau constituent les principales sources de revenus des populations de la région.

Le climat du bassin est de type baouléen. Il se caractérise par deux saisons de pluies (avril-juin / septembre-novembre) et deux saisons sèches (décembre-mars / mai-août).

Les données de pluies des localités de Bouna et Bondoukou, de 1986 à 2016, ont servi à expliciter le climat du bassin de kohodio (Fig. 2).

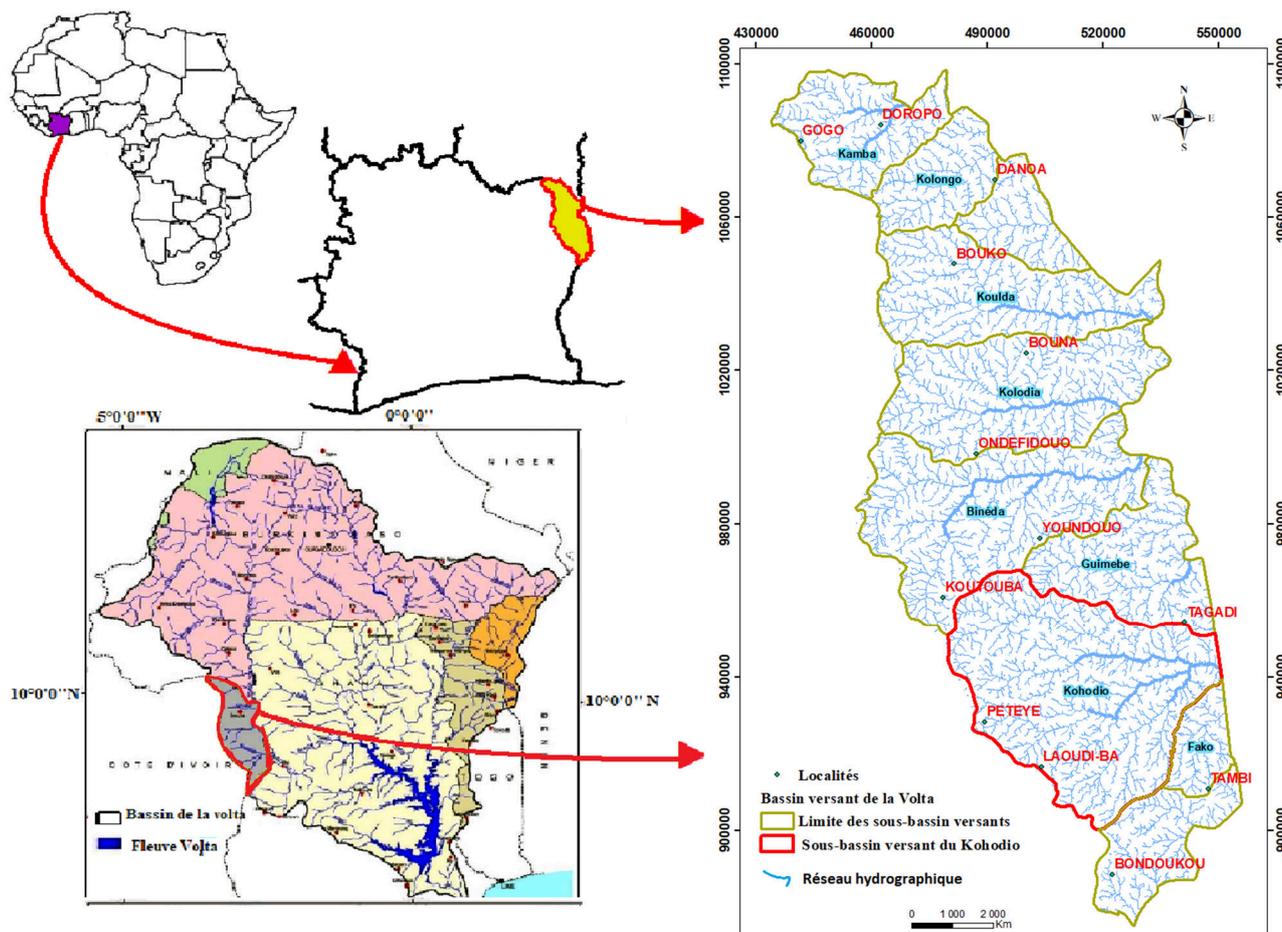


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude

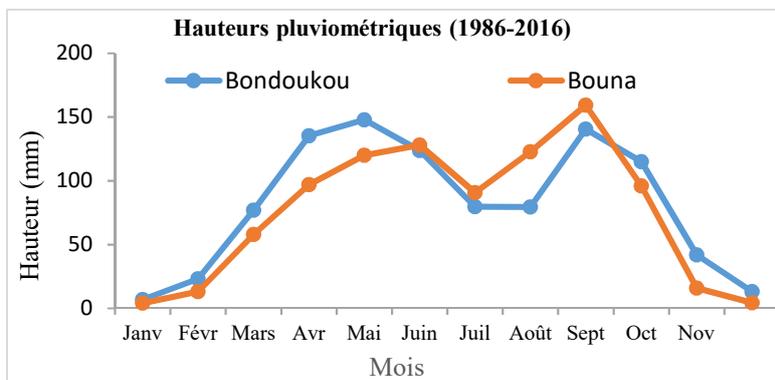


Fig. 2. Pluviométrie moyenne des départements de Bondoukou et de Bouna (Source : SODEXAM)

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 DONNÉES ET MATÉRIELS

Les données utilisées se composent, essentiellement, d'images satellitaires, de données cartographiques et de données météorologiques.

Les données de base utilisées sont des images optiques des générations Landsat 4 et 5 avec le capteur TM (Thematic Mapper) en 1986, Landsat 7 avec le capteur ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) en 2002 et Landsat 8 avec le capteur OLI (Operational Land Imager) en 2018 (en téléchargement libre sur le site <http://earthexplorer.usgs.gov/>).

La zone d'étude est couverte uniquement par la scène 195/054 du découpage landsat. Pour chacune des périodes étudiées, la scène a été acquise en octobre/novembre pour rendre compte de l'état hydrique du bassin en période humide et en décembre/janvier (mi-saison sèche) pour rendre compte de l'état hydrique du bassin en mi-saison sèche. L'étude sur 16 ans (1986-2002 et 2002-2018), permet de mieux observer le phénomène de variation de la pluviométrie.

Les mois de décembre/janvier et octobre/novembre, ont été choisis à cause des saisons climatiques et de la disponibilité des images multispectrales landsat TM (1986) ; ETM+ (2002) et OLI (2018), de bonne qualité (faible couverture nuageuse).

Les bandes du multispectrales (bleue, verte, rouge, proche infrarouge, infrarouge moyen et lointain), ont servi à la réalisation de ce travail. Ces images ont été choisies du fait de leurs caractéristiques spectrales (images prises sur différentes longueurs d'ondes), spatiales (haute résolution) et temporelle (bonne répétitivité) permettant une bonne cartographie de l'occupation du sol et un diagnostic de l'état hydrique à grande échelle.

Le GDEM ASTER (Global Digital Elevation Model) de résolution spatiale (23,7m x 30,8m), est exploité pour extraire le réseau hydrographique global de la zone d'étude.

Les données météorologiques utilisées sont constituées des données de hauteurs de pluies, provenant de la Société de Développement et d'Exploitation Aéronautique et Météorologique (SODEXAM). Ces données couvrent les localités Doropo et Tehini sur les périodes allant de 1986 à 2018. Elles sont exploitées pour étudier la variation de la pluviométrie dans la zone d'étude.

Quatre logiciels ont permis la réalisation de cette étude : IMPACT Toolbox3.3 utilisé pour les différents prétraitements des images, ENVI 5.3 utilisé pour le traitement ; ArcGis 10.5 utilisé pour numériser les réseaux de drains sur les différentes images traitées, habiller et éditer les différentes cartes. ; et XLSTAT version 7 a servi dans l'analyse statistique des résultats obtenus.

3.2 MÉTHODOLOGIE

L'état hydrique des drains d'un bassin versant correspond à son niveau d'humidité, défini par l'ensemble des drains humides du bassin à la période d'étude. Il est estimé par le biais des longueurs ou densités des drains humides (Adja, 2009).

La méthodologie, résumée à la figure3, consiste à comparer le réseau des drains humides en saison humide (RDHSH) et le réseau des drains humides en mi-saison sèche (RDHMSS), de 1986, 2002 et 2018. L'objectif est d'arriver à mieux discriminer les drains humides sur les images Landsat, afin d'extraire le réseau de drains humides, en se référant au réseau hydrographique global (RHG). Le processus s'est faite en quatre étapes essentielles : i) le prétraitement des images TM (1986), ETM+ (2002) et OLI (2018) ; ii) la discrimination des drains humides sur les images prétraitées, iii) l'extraction du réseau des drains humides en saison humide (RDHSH), octobre/novembre, et en mi-saison sèche (RDHMSS), décembre/janvier, de 1986, 2002 et 2018, à partir des données de télédétection ; puis iv) l'analyse de l'évolution des drains humides.

3.2.1 PRÉTRAITEMENT DES IMAGES

Les images Landsat acquises, ont été fournies avec une correction géométrique (WGS 84 zone 30N), niveau de correction (Level 1T). Seules les corrections radiométrique et atmosphérique, puis extraction de la zone d'étude ont été effectuées.

L'amélioration radiométrique consiste à corriger les effets des différents artefacts qui perturbent la mesure radiométrique, notamment les défauts du capteur et le voile atmosphérique. Les images subissent la correction atmosphérique afin d'harmoniser les luminances au sol et rendre comparables les images acquises sous périodes et conditions climatiques variées. Les opérations préalablement réalisées (corrections radiométrique et atmosphérique) ont permis d'uniformiser au mieux les informations radiométriques.

Le MNT étant construit à partir de balayage radar, certaines zones à l'abri des ondes de ce balayage peuvent être à l'origine de pixels manquants sur l'image. Il est donc important de combler ces vides par interpolation (méthode du plus proche voisin).

De plus, les images multispectrales Landsat et le MNT GDEM ASTER, ont des résolutions spatiales différentes (30 m x 30 m pour Landsat et 23,72 m x 30,84 m pour GDEM), et des systèmes de projections différents (WGS 84 zone 30 N, pour Landsat, et WGS 84 pour GDEM). Pour une précision topographique, dans la superposition des couches, un reéchantillonnage du MNT GDEM Aster à 30 m x 30 m, puis une reprojexion dans le système WGS 84, ont été nécessaires.

Compte tenu de la sensibilité avérée des phénomènes hydrologiques à l'échelle de temps (jours, mois, saisons...) suscitant en leur sein des variations importantes, en occurrence l'assèchement des cours d'eau, le bassin du Kohodio, recouvert par une seule scène (195/054) a donc été extrait.

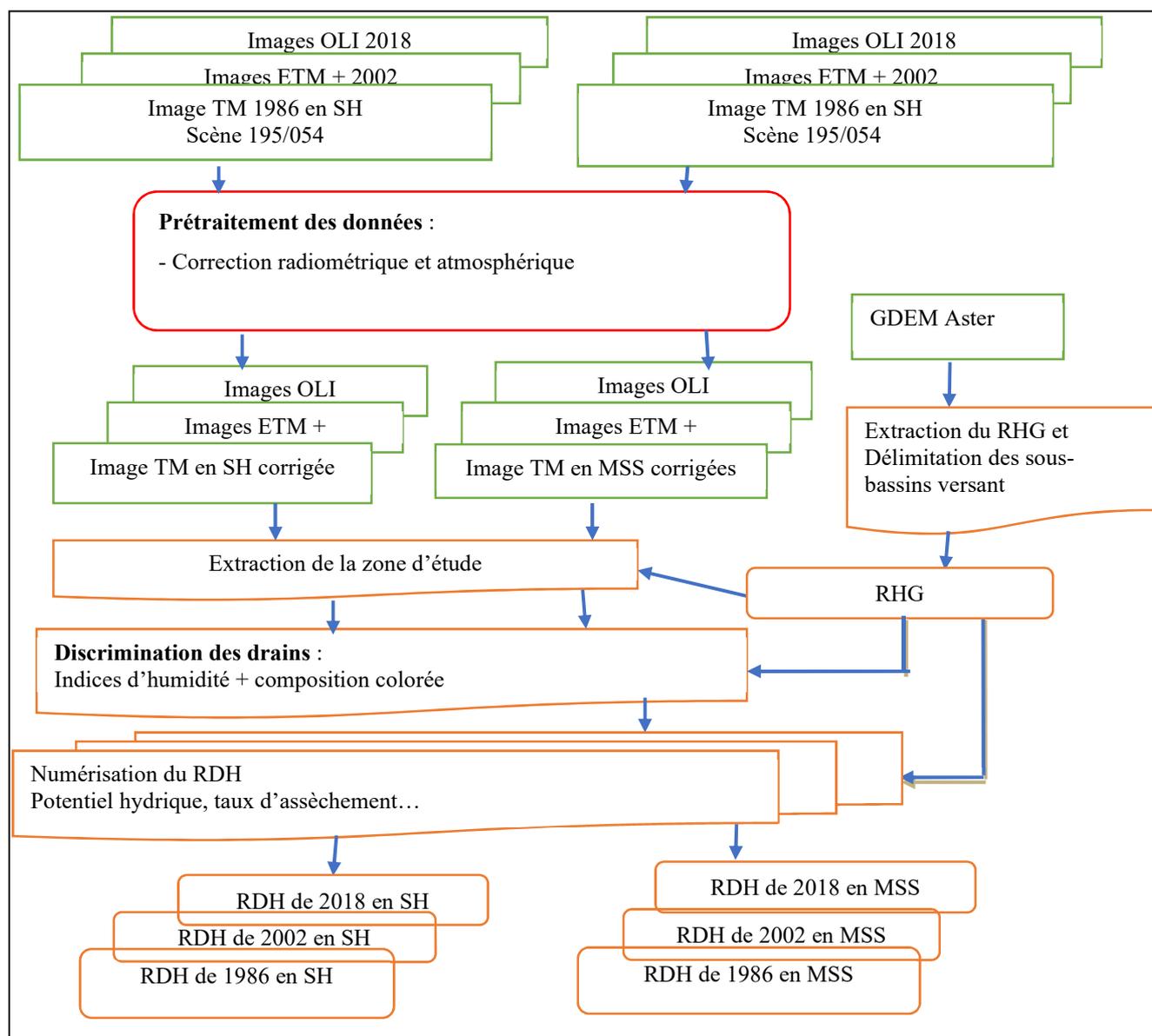


Fig. 3. Processus de diagnostic de l'état hydrique des drains à partir des images de télédétection

3.2.2 DISCRIMINATION DES DRAINS HUMIDES

La discrimination des drains humides nécessite l'observation de l'aspect des bras des cours d'eau sur l'image. Cette observation a permis de différencier les surfaces toujours en eau, des surfaces humides, et des surfaces sèches. Les surfaces humides et les surfaces en eau rendent compte de l'état humide du bassin à la période d'étude.

Pour mieux discriminer les drains sur les images, une série de techniques de transformation d'images (calcul des indices d'humidité sur les images de décembre/janvier) et d'amélioration d'images (compositions colorées sur les images d'octobre/novembre) ont été effectuées.

Les compositions colorée **4-5-7 pour TM et ETM+**, **5-6-7 pour OLI** ont été appliquées uniquement sur les images de la saison de pluies (octobre/novembre), qui ne nécessitaient pas une transformation particulière des images, pour discriminer les drains encore humides des drains asséchés, à cause de la présence des pluies.

La discrimination du réseau de drains sur les images de décembre/janvier (mi-saison sèche), a nécessité le calcul des indices :

$$NDWI = \frac{PIR - MIR}{PIR + MIR}, \quad NDWI_f = \frac{V - PIR}{V + PIR}, \quad MNDWI = \frac{V - MIR2}{V + MIR2} \text{ et } IH_5 = \frac{(PIR - MIR) + 0,5}{(PIR - R) + 0,5}$$

Le choix s'est porté sur le MNDWI qui discrimine au mieux les différents aspects des bras de cours d'eau de la zone d'étude. Cet indice maximise la réflectance de l'eau en utilisant la bande verte, et minimise celle des masses d'eau en utilisant le moyen infrarouge. Les masses d'eau sont ainsi mieux délimitées, par discrimination efficace des surfaces en eau et des surfaces sèches.

3.2.3 EXTRACTION DES DRAINS HUMIDES

L'extraction des drains humides est réalisée par interprétation qualitative (Nonguierma, 1994) ou visuelle (Biemi et al., 1998) des images à l'écran.

La démarche consiste d'abord à afficher les images d'indice d'humidité (MNDWI) qui discrimine le mieux les drains humides sur les images de mi-saison sèche, et les images composites (composition colorée 5-4-7 pour TM et ETM+, et 5-6-7 pour OLI) qui discriminent les portions humides sur les images de la saison humide.

Ensuite les drains humides (DH) sont digitalisés, sur les différentes images, à partir de l'outil Arc scan du logiciel ArcGIS. Le réseau hydrographique global (RHG) est ensuite superposé, à chacune des différentes couches des DH digitalisés. Enfin à l'aide de l'outil Intersect de ArcGIS, l'intersection entre les deux couches (DH et RHG) est extraite. Cette intersection représente le RDHSH ou le RDHMSS, en 1986, 2002 et 2018.

3.2.4 ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE DES RÉSEAUX DE DRAINS HUMIDES

L'analyse spatio-temporelle des réseaux des drains humides sur le bassin du Kohodio, vise à formaliser, sur la base de données disponibles et de connaissances plus ou moins approfondies sur l'état hydrique des drains humides, les caractéristiques spatiales et les dynamiques spatio-temporelles des réseaux de drains humides.

Pour mieux cerner le phénomène sur les périodes d'études (1986, 2002 et 2018), plusieurs paramètres sont déterminés : le potentiel hydrique saisonnier (en saison humide et mi-saison sèche), la densité de drainage, et le taux d'assèchement des drains humides de la saison humide à la mi-saison sèche.

- **Potentiel hydrique**

Le bassin versant, de façon générale a un potentiel hydrique défini par son réseau hydrographique global ou réseau de référence. La proportion stable (P_s) d'un bassin versant, à une période donnée est la part des drains toujours humides du bassin à cette période.

$$P_s = \frac{L_{C_{RDH}}}{L_{C_{RHG}}} * 100 \quad (\%)$$

- **Densité de drainage**

La densité de drainage est le rapport entre la longueur totale des cours d'eau dans un bassin et la superficie de ce dernier. Elle s'exprime en km/km².

Pour déterminer la densité de drainage, l'aire du bassin est subdivisée en maille carrées de 5 km x 5 km comme échelle adaptée à l'étude spatiale des variables hydroclimatiques des régions au Nord de la Côte d'Ivoire [17]. Les densités de drains sont ensuite regroupées en quatre classes ayant pour effectifs le nombre de mailles dont les densités sont définies par ladite classe :

- Les très faibles densités (I) de drains (0-5 km/maille);
- Les faibles densités (II) de drains (5-10 km/maille) ;
- Les densités moyennes (III) de drains (10-15 km/maille)
- Les fortes densités (IV) de drains (15-20 km/maille)

- **Taux d'assèchement (TA)**

Pour évaluer l'assèchement des drains de la période humide à la mi-saison sèche, le taux d'assèchement est déterminé. Le taux d'assèchement (TA) des drains humides ou déficit hydrique de la saison humide à la mi-saison sèche en 1986, 2002 et 2018, est déterminé par la formule suivante :

$$TA = \frac{L_{cSH} - L_{cMSS}}{L_{cSH}} * 100$$

Avec L_{cSH} , la longueur cumulée des DH en SH et L_{cSH} la longueur cumulée des DH en MSS.

Le TA a des valeurs comprises entre -100% et 100%. Les valeurs négatives traduisent un gain en eau et les valeurs positives un assèchement

4 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

4.1 DISCRIMINATION DES DRAINS HUMIDES

Les différents aspects des drains observés sur les images sont fonctions du type de compositions colorées ou du type d'indices d'humidité (Fig. 4).

Les compositions colorées Vert-PIR-MIR2 (2-4-7 pour les capteurs TM et ETM+, et 3-5-7 pour le capteur OLI), en mi-saison sèche ont permis de discriminer l'état hydrique des drains sur les images multispectrales Landsat.

Sur ces images, la coloration est en vert foncée au niveau des zones à forte concentration en eau. En outre, plus la concentration en eau décroît, plus la coloration s'éclaircit jusqu'à tendre vers le violet. Cette différence de coloration pour un même climat s'explique soit par la pente élevée en certains endroits du bassin ou par le fait que, les différents bras des cours d'eau du réseau hydrographique de la zone d'étude ne sont pas du même ordre, donc ils ne retiennent pas l'eau dans les mêmes proportions. De plus la végétation envahissante du bassin de la Volta influe sur la discrimination des cours d'eau ; d'où la nécessité de se référer aux indices d'humidité.

L'indice d'humidité IH5 ne facilite pas la discrimination des différents états des drains. Il offre un aperçu général des drains du bassin sans discrimination des drains asséchés et les drains toujours en eau. Par contre, l'indice d'humidité MNDWI offre une meilleure discrimination de l'état des drains. En appliquant de la composition colorée fausse couleur (Blue/Green/Red/Yellow), on observe que l'indice MNDWI combine les portions toujours en eau, en bleu, et les portions légèrement asséchées par un dégradé de bleu. De plus cet indice facilite l'extraction des drains en attribuant une valeur inférieure à zéro aux autres unités d'occupation du sol différents des drains humides.

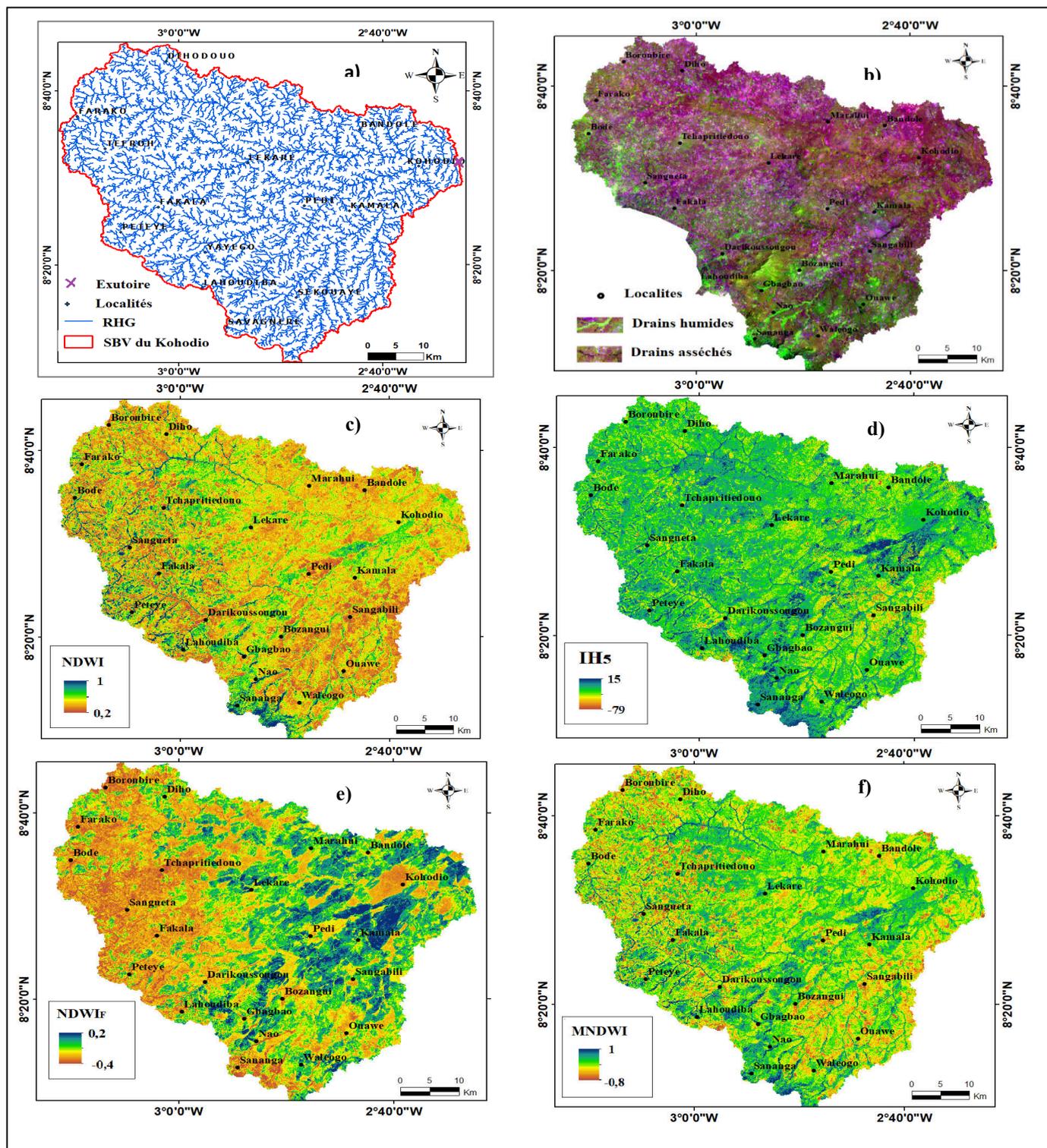


Fig. 4. (a)Réseau hydrographique global(RHG), (b)Composition colorée (2-4-7), en période humide et indices d'humidités (NDWI(c), NDWI,(d), MNDWI(e) et IHS(f)) en mi-saison sèche,en composition colorée fausse couleur (Blue/Green/Red/Yellow), cas de TM 1986

4.2 ANALYSE DES CARTES DE RÉSEAU DE DRAINS HUMIDES

La figure 5 présente les cartes de réseau de drains humides (période humide et mi-saison sèche) du bassin de Kohodio, et illustre clairement l'assèchement des cours d'eau de la saison humide à la mi-saison sèche. Ces différentes cartes sont également très différentes du réseau hydrographique global de la zone.

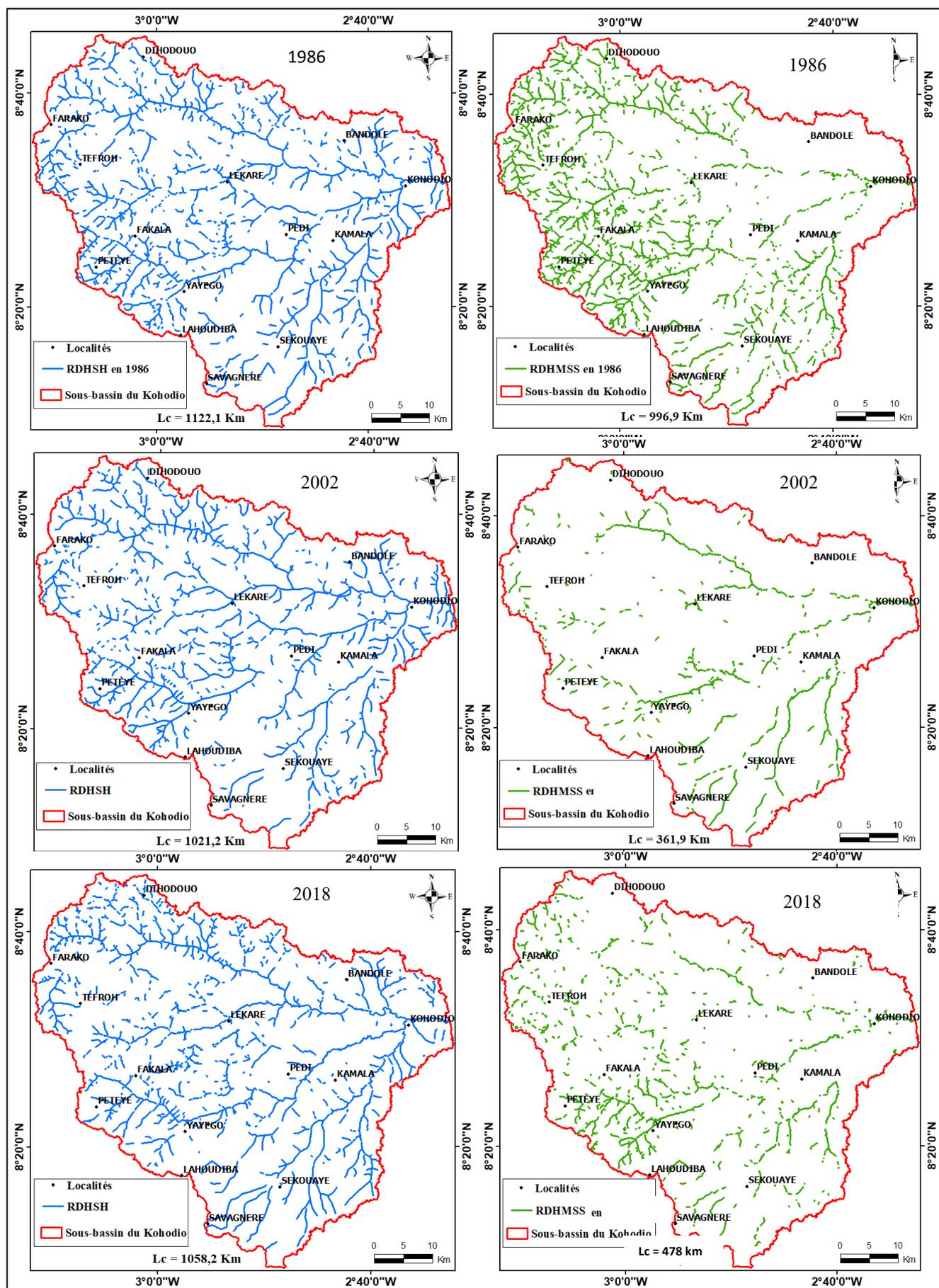


Fig. 5. Réseaux des drains humides du bassin versant du Kohodio issus des images TM 1986, ETM+ 2002 et OLI 2018 en saison humide RDHSH et en mi-saison sèche RDHMSS

4.2.1 POTENTIEL HYDRIQUE

Le réseau hydrographique global du bassin du Kohodio est différent du réseau des drains humides en période humide (RDHSH) et celui de la mi-saison sèche (RDHMSS). Cette différence se traduit par la variation de la longueur cumulée des drains humides (Tableau 1). Elle s'explique par le fait que les drains inférieurs, notamment d'ordre 1, s'assèchent rapidement (quelques heures ou quelques jours) après une période de pluie. En effet :

- En période humide, la longueur totale des drains humides du bassin (RDHSH) fait 4714,3 km, 1021,2 km et 1058,21 km, respectivement en 1986, 2002 et 2018 contre 1122,1 km correspondant au réseau hydrographique global. Ces derniers moins denses, correspondent respectivement à 23,80%, 21,7%, et 22,4% de son potentiel hydrique (RHG). Cela sous-entend que :76,2%, 78,3 % et 77,55 % des drains du RHG du bassin du Kohodio, respectivement en 1986, 2002 et 2018, se trouveraient dans des conditions topographiques défavorables à la rétention d'eau quand le bassin est hydrologiquement stabilisé.
- En mi-saison sèche, la longueur totale des drains humides du bassin (RDHMSS) fait 996,9 km, 361,9km et 478 km, respectivement en 1986, 2002 et 2018. Ces derniers moins denses, correspondent respectivement à 21,1 %, 7,7% et 10,1% de son potentiel hydrique (RHG).

Après la fin des pluies, l'état hydrique du bassin a baissé de son potentiel hydrique en l'espace de deux mois (d'octobre à décembre) au niveau du bassin de 2,7% ; 14% et 12,3% respectivement en 1986 ; 2002 et 2018.

Tableau 1. Evolution des longueurs cumulées des drains humides de la saison humide à la mi-saison sèche de 1986 à 2018

RDH	Longueurs cumulées (km)			Proportions des drains stables (%)			Proportions des drains instables (%)		
	1986	2002	2018	1986	2002	2018	1986	2002	2018
RDHSH	1122,1	1021,2	1058,2	23,8	21,7	22,4	76,2	78,3	77,6
RDHMSS	996,9	361,9	478,0	21,1	7,7	10,1	78,9	92,3	89,9
RHG	4714,3								
Baisse de la SH à la MSS	125,2	659,4	580,2	2,7	14,0	12,3			

4.2.2 DISTRIBUTION STATISTIQUE DES DRAINS HUMIDES ET DENSITÉ DE DRAINAGE

Le bassin de Kohodio est couvert par 135 mailles de 5km x 5km, pour lesquelles les densités de drains sont déterminées (Tableau 2). L'analyse de l'évolution de la densité moyenne de drainage en mi-saison sèche présente deux tendances. La tendance progressiste concerne les périodes 1986 à 2002 et 1986 à 2018, respectivement une baisse de densité égale à 2.9 et 1.1km/km² et la tendance regressiste concerne la période allant de 2002 à 2018 soit une hausse de 1.8 km/km². L'évolution en période humide se traduit uniquement par une baisse de 1986 à 2002, de 2002 à 2018 et de 1986 à 2018, respectivement de 2.3, 3.6 et 5.9 km/km². Ceci s'explique par la réalisation de quelques aménagement (barrages hydrauliques) pour la rétention d'eau de surface, comme c'est le cas du barrage de Boda à Bondoukou, et le phénomène de variabilité climatique qui s'accroît au fil du temps.

En saison de pluie, les quatre classes de densités sont représentées dans des effectifs sensiblement pareil. Par contre en mi-saison sèche, les classe III et IV des densités élevées sont faiblement représentés en 2002 et 2018. Les caractéristiques statistiques des classes de densités montrent que la distribution des densités de drains varie beaucoup plus en mi-saison sèche qu'en période humide.

Tableau 2. Statistiques des longueurs cumulées des drains humides de 1986 à 2018.

Saison	Densité moyenne de drainage			Variation de la densité moyenne de drainage			Classe	Effectifs			Nbre de mailles
	1986	2002	2018	1986-2002	2002-2018	1986-2018		1986	2002	2018	
Saison Humide	12,5	10,2	6,6	2,3	3,6	5,9	I	17	22	26	135
							II	28	24	29	
							III	25	21	25	
							IV	65	68	55	
Mi-saison sèche	5,6	2,7	4,5	2,9	-1,8	1,1	I	42	86	88	135
							II	35	37	32	
							III	37	8	9	
							IV	21	4	6	

4.2.3 ASSÈCHEMENT SAISONNIER DES DRAINS

Les longueurs cumulées des drains humides sont exploitées pour déterminer le taux d'assèchement des drains de la saison humide à la mi-saison sèche en 1986, 2002 et 2018. En 2002 le taux d'assèchement a atteint 64,6%. Ceci se traduit par le fait que l'année 2002 est considérée comme période chaude. En 2018, le taux d'assèchement a été réduit à l'ordre de 54,8% (Tableau 3). Ce phénomène est certainement dû à l'adoption des pratiques de la lutte contre le changement climatique et le développement durable.

Tableau 3. Taux d'assèchement (TA) des drains humides du bassin de Kohodio de la saison humide à la mi-saison sèche de 1986 à 2018

TA de la saison humide à la mi-saison sèche (%)		
1986	2002	2018
11,2	64,6	54,8

L'assèchement s'est beaucoup fait ressentir de 1986 à 2002 avec un taux d'assèchement égale à -63,70%. Il y'a eu par contre un gain en eau, estimé à 32,10% dans la période allant de 2002 à 2018 (Tableau 4). Ce gain s'explique par le fait que, les études ont démontré que la période allant de 1999 à 2002 a été une période chaude. Selon l'OMM, l'année 2001 sera la vingt-troisième année consécutive où la température moyenne à la surface du globe aura dépassé la normale pour la période 1961-1990 [18] Plus la hauteur de pluviométrie est élevée, moins l'assèchement se fait ressentir.

Tableau 4. Variation du potentiel hydrique de 1986 à 2016

Saison	Taux d'assèchement annuel (en%)		
	1986 à 2002	2001 à 2016	1986 à 2016
Humide	-5,70	-3,49	-8,99
Mi-saison sèche	-63,70	32,10	-52,05

5 DISCUSSION

Les ressources en eau de surface connaissent une évolution régressive dans le bassin versant de Kohodio, à travers les valeurs de pluviosité. Cette récession pluviométrique a été observée de façon générale en Afrique de l'Ouest et Centrale [19], [20], et particulièrement en Côte d'Ivoire [21]. Le choix des images multispectrales Landsat dans l'étude du diagnostic de l'état hydrique offrent des résultats satisfaisants [22]. Plusieurs travaux ont abouti à la même conclusion [5], [9], [15].

Partant de l'hypothèse qu'un réseau hydrographique a pour ressource initiale la pluie qui subit des transformations et suit des chemins divers, dont les principaux sont le ruissellement [23] », la hausse de la pluviométrie traduit par ricochet l'accroissement des longueurs cumulées des drains humides.

Les cartes de réseau de drains humides obtenues reflètent clairement les réalités de terrain. En effet, le taux d'assèchement du bassin de la saison humide à la mi-saison sèche est estimé à 11,2% en 1986 ; 64,6% en 2002 et 54,8% en 2018. Combinées aux données hydroclimatiques, ces valeurs illustrent clairement l'impact de la variation de la pluviométrie sur les ressources en eau de surface sur cette partie du bassin versant de la Volta. Constat fait par Adja [9] sur l'étude du diagnostic en mi saison sèche de l'état hydrique du bassin versant de Bagoé au nord de la Côte d'Ivoire, de la fin des pluies en octobre (période humide) jusqu'en mi-saison sèche en décembre 2000, il a obtenu un taux d'assèchement des cours d'eau du bassin de la Bagoé égal à 20,84%. Le taux a atteint 73,52% en fin janvier. L'assèchement des cours d'eau s'accroît au fur et à mesure que la période sèche perdure sur le bassin, car son ampleur évaluée de mi-décembre à fin janvier, se traduit par un fort taux de 66,55%. Alors la valeur obtenue 64,6% obtenue en 2002 sur le bassin du kohodio renseigne dans le même contexte de période de temps.

Le phénomène d'assèchement dans cette région peut s'expliquer par le fort tarissement des cours d'eau constaté en pareille période de l'année dans les régions du Nord de la Côte d'Ivoire [24], [5], [25], [26].

En effet, le tarissement dans ces régions est très rapide les trois premiers mois après la fin des pluies (octobre-novembre-décembre). Il se poursuit par un régime très faible durant la période de janvier à avril-mai, période au cours de laquelle le faible écoulement constaté résulte de la restitution d'eau de la nappe à la rivière. De plus la zone d'intérêt se trouve en amont du grand bassin de la Volta. La quasi-totalité des cours d'eau du bassin de kohodio draine rapidement l'eau vers le territoire de la République voisine le Ghana [5].

Ce travail a le mérite d'avoir réussi à estimer le degré d'assèchement du bassin de Kohodio, l'objet de cette étude et ainsi de montrer au grand jour l'ampleur du phénomène dans cette région du pays. Les drains qui gardent leur humilité et surtout qui constituent des portions de rétention d'eau toute l'année ont été ainsi cartographiés. Une exploitation de ces drains et des environs pour le développement des cultures vivrières ou maraichères pourrait aider à créer des sources de revenus additionnelles pour les populations de la région.

6 CONCLUSION

La présente étude portant sur le diagnostic de l'état hydrique a montré que le climat et la variabilité climatique ont une influence sur l'état hydrique au niveau du bassin de la Volta.

L'utilisation des images Landsat TM, ETM+ et OLI et des SIG a permis d'élaborer les cartes du réseau des drains humides et d'analyser la dynamique des réseaux de drains humides du bassin, entre 1986, 2002 et 2018.

L'utilisation des indices d'humidité, la composition colorée et le réseau hydrographique global obtenu à partir du MNT nous a permis d'établir nos cartes de réseaux de drains de 1986, 2002 et 2018.

L'exploitation de ces cartes a révélé dans un premier temps que la stabilité hydrologique du bassin est assurée par 23,80%, 22,45% et 21,66 % du réseau hydrographique globale extrait à partir du MNT de la zone d'étude, respectivement en 1986, 2002 et 2018.

Les 76,20%, 77,55 et 78,34% restant décrivent les drains du réseau hydrographique global se trouvant dans des conditions topographiques défavorables à la rétention d'eau, c'est-à-dire situés sur des terrains à pentes fortes à moyennes.

Dans un second temps, la comparaison du réseau des drains humides en période humide à celui de la mi-saison sèche a mis en évidence un taux d'assèchement des cours d'eau d'octobre à décembre de l'ordre de 18,90%, 57,60% et 56,93%.

Le phénomène de l'assèchement des cours d'eau a été donc amplifié sur le bassin de 1986 à 2002, exprimé par un important taux d'assèchement des cours d'eau s'élevant à 60,51% et à 43,85% de 1986 à 2018.

Ce fort taux montre que le déficit hydrique s'aggrave démesurément au fur et à mesure que la saison sèche s'allonge et que le climat varie sur le bassin. La période allant de 2002 à 1986, a été une période de gain en ressource en eau, car le taux de changement des longueurs cumulées des drains humides à cette période est positif. Ceci s'explique par le fait que 2002 a été une période chaude.

Compte tenu de l'important assèchement des cours d'eau constaté au cours de la période sèche, et au fur et à mesure que les années passent, il est opportun de :

Développer des politiques de rétention des eaux de surface pendant la période humide pour les redistribuer en saison sèche.

Pratiquer le reboisement, car la végétation est un régulateur de climat ; Préconiser également l'utilisation contrôlée des ressources en eau et inventorier les aires cultivables du bassin. Cet inventaire permettra d'appréhender la régression de leur niveau d'humidité après l'arrêt des pluies, en vue d'assurer à un certain niveau la continuité des cultures ne serait-ce que maraichères ou vivrières.

Effectuer une évaluation mensuelle de l'état hydrique à petite échelle de temps et d'espace, dans la zone d'étude, avec l'utilisation d'image satellitaire de très haute résolution

REMERCIEMENTS

Pour avoir utilisé les locaux et équipements du Centre Universitaire de Recherche et d'application en Télédétection (CURAT), nous saisissons cette occasion pour remercier le Directeur de cette prestigieuse Institution Dr KOUAME KAN Jean.

REFERENCES

- [1] Muoghalu J. I (2014). Vulnérabilité des systèmes biophysiques et socioéconomiques des savanes et formations boisées d'Afrique occidentale et centrale au changement climatique. *Forum forestier africain*. Vol 2, n°14, 45p.
- [2] Savané I., Coulibaly K. M. et Gion P. (2001). "variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de man". *Sécheresse*, vol. 12, n°4, pp. 231-237.
- [3] Goula B. T. A., Savané I., Konan B., Fadika V. et Kouadio G. B. (2006). Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'Zo et N'Zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide). *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, vol.7, n° 1, pp. 27 - 49.
- [4] Kouakou K. E., Goula B. T. A., Savané I. (2007). Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface en zone tropicale humide : cas du bassin versant transfrontalier de la Comoé (côte d'ivoire - Burkina Faso). *European Journal of Scientific Research*, vol16, n°1, pp.31-43.
- [5] Youan Ta M. (2008). Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'ouest : cas de la région de Bondoukou (nord-est de la côte d'ivoire), thèse de doctorat de l'université de Cocody, Côte d'Ivoire, 237 p.
- [6] Ibrahim B. (2012). Caractérisation des saisons de pluie au Burkina Faso dans un contexte de changement climatique et évaluation des impacts hydrologiques sur le bassin du Nakanbé. Kouassi A. M. (2007). Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'ouest : cas du bassin versant du N'Zi en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 210 p.
- [7] Ahoussi K. E. (2008). Évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le Sud de la Côte d'Ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région d'Abidjan-Agboville. Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 270 p.
- [8] Adja M. G. (2009). Étude de l'état hydrique saisonnier du bassin versant de la Bagoé dans un contexte de variabilité climatique. Département de Boundiali et Tengrela (milieux soudano-sahéliens au Nord-ouest de la cote d'ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 184 p.
- [9] Kouamé K. F. (2011). Influences de la variabilité climatique et de la dégradation environnementale sur le fonctionnement de l'hydrosystème du N'Zo dans la région guinéenne humide et semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire. Contribution de la télédétection, des systèmes d'informations géographiques et du modèle hydrologique hydrotel. Thèse d'Etat, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 379 p.
- [10] Kouakou Y. E., Koné Brama, Guéladio C., Djè K. B., N'Go Y. A., Konaré A., Savané I. (2013). Environmental Vulnerability Index: application to the White Bandama Bassin in the northern Côte d'Ivoire. *International Journal of Conservation Sciences*, Vol. 4, pp.357-369.
- [11] N'Guettia R. Y., Oule A.F., Kouadio N. D. (2013) : Étude de Vulnérabilité du Secteur Agricole face aux Changements Climatiques en Côte d'Ivoire, 105p.
- [12] Sorokoby V. M. (2013). Étude hydrologique et hydrogéologique de la région de Soubré (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire) dans un contexte de variabilité climatique. Thèse de Doctorat, l'Université Félix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire, 163 p.
- [13] Kouakou E., Brama K., N'Go A., Guéladio C., Chinwe Ifejika Speranza, Savané I. (2014). Ground water sensitivity to climate variability in the white Bandama basin, Côte d'Ivoire. *SpringerPlus*, vol3, n°226, 11p.
- [14] Kouamé K. F. (2015). Estimation des précipitations par la méthode Tamsat dans le nord de la Côte d'Ivoire et analyse de la variabilité pluviométrique et de ses impacts environnementaux et sociodémographiques : cas de Korhogo. Mémoire de master, l'Université Félix Houphouët Boigny, 78 p.
- [15] UNEP-GEF Volta Project (2011). Analyse Diagnostique Transfrontalière du bassin versant de la Volta : Rapport thématique sur les écosystèmes du bassin, 120p.
- [16] Jourda J. P. (2005). Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'État, Université de Cocody, 430 p.
- [17] Notre planete.info of Futura planète, 2019
[Online] Available: <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/climatologie-bilan-climatique-mondial-annee-2001-321/>
- [18] Ardoin B. S. (2004). Variabilité hydro- climatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de l'Université de Montpellier II, France, 330 p.
- [19] Ardoin B. S., Lubès-Niel H., Servat E., Dezetter A. et Boyer J. F. (2013). Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest : caractérisation de la situation de la décennie 1990. *IAHS Publication*, n°278, pp.223-228.
- [20] Kouassi K. J. (2014). Suivi de la dynamique de l'occupation du sol à l'aide de l'imagerie satellitaire et des systèmes d'informations géographiques : cas de la direction régionale des eaux et forêts de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire). Mémoire de fin d'études, Institut national polytechnique de Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 73 p.

- [21] Soro G., Ahoussi E. K., Kouadio E. K., Soro T. D., Oulare S., Saley M. B., Soro N., Biemi J. (2014). Apport de la télédétection à la cartographie de l'évolution spatio-temporelle de la dynamique de l'occupation du sol dans la région des Lacs (Centre de la Côte d'Ivoire). *Afrique Sciences*, Vol.3, n°10, pp146-160.
- [22] Mardhel V., Machard de Gramont H., Vinchon C. (2002). Relation entre le réseau hydrographique de surface et les eaux souterraines dans le secteur du bassin d'Orchies. Implication de son aménagement sur la vulnérabilité des nappes phréatiques, Rap BRGM RP-RP 51408-FR, 148p.
- [23] Agrar and Hydrotechnik GmbH, Beller Consult GmbH et Société Centrale pour l'Équipement du Territoire SA. (1986b). Développement et stabilisation de la riziculture irriguée dans la région Nord. Programme des zones de prise au fil d'eau. Ministère du Développement Rural, République de Côte d'Ivoire, 120 p.
- [24] Tra Bi A. Z. (2013). Étude de l'impact des activités anthropiques et de la variabilité climatique sur la végétation et les usages des sols, par utilisation de la télédétection et des statistiques agricoles, sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc). Thèse de Doctorat de l'université d'Artois à Arras (France) et de l'université Houphouët Boigny d'Abidjan (Côte d'Ivoire), 189p.
- [25] Boko A. N. N. (2015). Variabilité climatique, changements dans l'environnement et conscience écologique à Korhogo. Thèse de doctorat de troisième cycle, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire, 355 p.