

Modélisation agro-hydrologique de l'impact des pressions anthropiques sur les flux d'eau entrant dans la retenue destinée à l'approvisionnement en eau potable de la ville de Issia (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire)

[Agro-hydrological modelling of the impact of anthropic pressures on water flows entering the reservoir intended for the drinking water supply of the city of Issia (Central-Western Côte d'Ivoire)]

Arthur Brice Konan-Waidhet, Kouao Armand Anoh, Sampah Georges Eblin, Jairus Christos Kouakou Boko, Brou Dibi, and Kouakou Lazare Kouassi

Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement, UFR Environnement, Université Jean Lorougnon Guedé, Daloa, Côte d'Ivoire

Copyright © 2022 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: The water of the Issia reservoir is used to supply drinking water to the local population. Unfortunately, the various anthropogenic pressures in the Lobo watershed threaten the quantity of water flows entering the Issia reservoir. The objective of this study is to assess the impact of the combined actions of anthropization and climate change on the water flows entering the Issia reservoir. The approach implemented was based on the coupling of remote sensing and agro-hydrological modeling with SWAT. The diachronic analysis of Landsat 7 ETM+ (2008 and 2013) and Sentinel-2 (2019) images through the method of supervised classification by maximum likelihood has allowed to discriminate five (05) classes of land use that are: forest, degraded forest, habitat and bare soil, crop and fallow, and water bodies. The overall accuracies obtained for the 2008, 2013 and 2019 classified images are 90%; 92% and 95.33% respectively. The Kappa indices of the confusion matrix for the three classified images are 0.88; 0.9 and 0.94 for 2008, 2013 and 2019 respectively. From 2008 to 2019, dense forest, degraded forest, and crops and fallow had overall regressions of 13.70%, 10.49%, and 1.29% respectively. In addition, bare soil and habitats and water bodies increased by 75.50% and 57.09% respectively. The graphical and statistical criteria of the SWAT model (NS and R2, greater than 0.5) showed good model performance for both calibration and validation. The water balance analysis for the 2050 time horizon indicates that water flows into the reservoir will decrease by 52% compared to current flows. This decrease could constitute a real threat for the population of the Issia locality in the years to come.

KEYWORDS: Satellite image, SWAT model, land use, water balance, human activities, Issia.

RESUME: L'eau de la retenue de Issia est utilisée pour l'alimentation en eau potable des populations locales. Malheureusement, les différentes pressions anthropiques exercées dans le bassin versant de la Lobo menace la quantité des flux d'eau entrant dans la retenue de Issia. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'incidence des actions combinées de l'anthropisation et du changement climatique sur les flux d'eau entrant dans la retenue de Issia. L'approche mise en place a reposé sur le couplage de la télédétection et la modélisation agro-hydrologique avec SWAT. L'analyse diachronique des images Landsat 7 ETM+ (2008 et 2013) et Sentinel-2 (2019) à travers la méthode de classification supervisée par le maximum de vraisemblance a permis de discriminer cinq (05) classes d'occupation de sol que sont: la forêt, la forêt dégradée, l'habitat et sol nu, la culture et jachère, et les plans d'eau. Les précisions globales obtenus pour les images classifiées de 2008, 2013 et 2019 sont respectivement 90 %; 92 % et 95,33 %. Les indices de Kappa de la matrice de confusion pour les trois images classifiées sont de 0,88; 0,9 et 0,94 respectivement pour l'année 2008, 2013 et 2019. De 2008 à 2019, la forêt dense, la forêt dégradée et les cultures et jachères ont subi des régressions globales respectivement de 13,70 %, 10,49 % et 1,29 %. En outre, les habitats et sols nus ainsi que les

plans d'eau ont connu une progression respectivement de 75,50 % et 57,09 %. Les critères graphiques et les critères statistiques du modèle SWAT (NS et R^2 supérieurs à 0,5) ont montré une bonne performance du modèle à la fois pour la calibration et la validation. L'analyse du bilan hydrique à l'horizon 2050 indique que les flux d'eau entrant dans la retenue baisseront de 52 % par rapport aux flux actuels. Cette baisse pourrait constituer une réelle menace pour la population de la localité de Issia dans les années à venir.

MOTS-CLEFS: Image satellitaire, modèle SWAT, occupation du sol, bilan hydrologique, activités anthropiques, Issia.

1 INTRODUCTION

La dégradation continue des ressources naturelles que sont le couvert forestier et les ressources hydriques sont les principaux défis de l'époque contemporain en Côte d'Ivoire. L'agriculture, du fait de sa course au rendement est considérée comme le principal responsable de cette dégradation [1]. En effet, au lendemain de son indépendance en 1960, la Côte d'Ivoire a fait de l'agriculture, le pilier de son économie et le principal secteur d'emploi. Ainsi, parallèlement à la création des cultures de spéculation, le patrimoine forestier est soumis à une déforestation sans précédent. Par conséquent, de 15 millions d'hectares au début du siècle dernier, les surfaces de forêts denses ont été estimées à environ 2,5 millions d'hectares en 1996, soit une réduction de plus de 83% [2]. Or, selon les travaux de [3], la transformation des surfaces forestières en zones agricoles en Côte d'Ivoire n'est pas sans effet sur le climat et les régimes hydrologiques. En effet, d'importantes études, sur les fluctuations pluviométriques, menées par ([4], [5], [3], [6], [7], [8]) ont montré qu'une tendance à la sécheresse s'est manifestée à partir de la décennie 1960. Parallèlement à l'agriculture, la dégradation des ressources naturelles est accentuée par l'extraction artisanale de l'or (orpaillage). En effet, l'orpaillage a des effets négatifs considérables sur l'écosystème forestier et les ressources hydriques du bassin de la Lobo déjà fragilisé par les activités anthropiques et la péjoration climatique [9]. Ainsi, pour la stabilité des fosses, les orpailleurs utilisent des essences de bois très résistantes; ce qui contribue aussi à la destruction du couvert végétale. De même pour l'extraction de l'or, ils créent des fosses qui participent fortement à la perturbation du patron d'écoulement des eaux de surface. Si dans la partie sud du bassin, notamment à Issia, la situation n'est pas encore alarmante, l'ampleur des pénuries prononcées d'eau de la ville de Daloa appelle à des mesures urgentes. Du fait de l'étroite corrélation entre les variables hydroclimatiques et la modification du couvert végétal, la prise en compte des changements d'occupation du sol dans les études d'impacts de gestion des ressources en eau s'avère indispensable. Selon [10], un outil innovant qui est le couplage de la télédétection à la modélisation permet une meilleure gestion des ressources hydriques. Cette étude vise à évaluer l'impact des actions combinées de l'anthropisation et du changement climatique sur les flux d'eau entrant dans la retenue. La démarche méthodologique appliquée repose sur l'utilisation de la télédétection et de la modélisation agro-hydrologique avec SWAT.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

Le bassin versant de la Lobo est situé au Centre-ouest de la Côte d'Ivoire, précisément entre 6°05' et 6°55' de longitudes Ouest et entre 6°02' et 7°55' de latitudes Nord (Figure 1). Etendue sur une superficie de 12 722 km² le bassin a un périmètre de 650 km. La majeure partie du bassin est drainée à 2,08 % par le département de Bouaflé; 1,38% par le département de Buyo; 24,80 % par le département de Daloa; 0,97 par le département de Gagnoa; 19,77 % par le département d'Issia; 2,27 % par le département de Séguéla; 5,95 % par le département de Soubré; 34,06 % par le département de Vavoua; 5,44 % par le département de Zoukougbeu et 3,28 % par le département de Zuénoula. La ville de Daloa représente le pôle économique de la région ([9], [10], [5]).

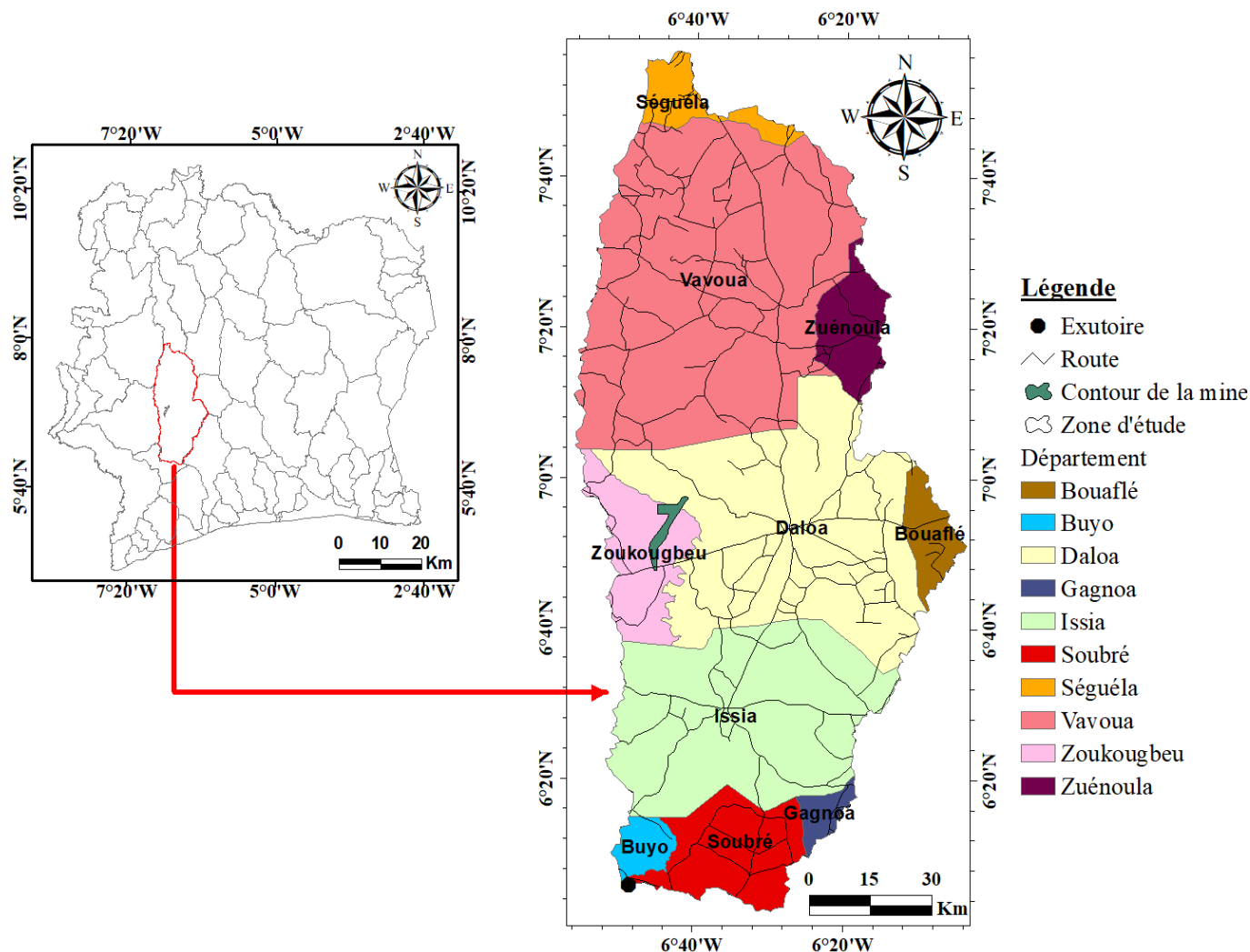


Fig. 1. Présentation de la zone d'étude

2.2 MATERIEL

Cette étude utilise différents types de données qui ont soit été téléchargées via des sites web ou octroyées par les structures en charge. Ainsi:

- Le Modèle numérique d'Altitude (MNA) a été téléchargé à partir du site web : <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputcoord.asp>. Il a une résolution de 90 mètres;
- La carte d'occupation du sol du bassin a été obtenue auprès du Centre de Cartographie et de Télédétection (CCT). Elle a été établie à l'échelle de 1/900 000 et date de janvier 2012;
- Les images satellitaires (Landsat 7 ETM+ et Sentinelles-2) ont aussi été téléchargées sur le site www.usgs.earth.explorer.com. Elles ont été acquises en saison sèche et datent du mois de janvier 2012. La prise en compte de ces dates est dictée non seulement par la présence d'orpailleurs, mais aussi par la plage de couverture des données hydrométriques;
- La carte pédologique du bassin de la Lobo établie par la FAO [11] avec une résolution spatiale de 10 km a été sollicitée. Le choix de cette carte repose sur la disponibilité des analyses des propriétés physico-chimiques des profils de sols (0 à 100 cm) réalisés par [12];
- Les données climatiques (pluies et températures) couvrant la période de 1979 à 2013, proviennent de la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire Aéronautique et Météorologique (SODEXAM). Du fait de leur proximité et des périodes d'enregistrement, les postes pluviométriques de Daloa (2000-2017), Gagnoa (2000-2017) et Vavoua (1953-2011) ont été sollicités. Au niveau de la température, seule la

station de Daloa avec des températures maximales et minimales journalières de 2000 à 2016 ont été utilisées;

- Les données hydrométriques collectées auprès de la Direction des Normes, Réglementation et de la qualité (DNRQ); structure sous tutelle de la Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humaine (DGIHH) ont été mobilisées. Elles couvrent la période de 1992 à 2011 et sont au pas de temps mensuel;
- Les données morphologiques du réservoir de la retenue de Issia incluant la date de mise en marche ont été prises en compte. Celles-ci proviennent de l'Office National de l'Eau Potable (ONEP)

Pour traiter toutes ces données, plusieurs logiciels ont été utilisés; ce sont:

- Arcgis 10.0, pour la cartographie et le support du modèle agro-hydrologique;
- Envi 5.3, pour le traitement numérique des images satellitaires;
- Google Earth, pour la photo-interprétation des images satellitaires et la détermination de la matrice de confusion;
- La version 2009 du modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) et l'algorithme SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting) du logiciel SWAT-CUP (Soil and Water Assessment Tool-Calibration Uncertainties Program), pour la modélisation agro-hydrologique;
- Mapinfo 7.5, pour la digitalisation de la carte d'occupation de sol fournie par le CCT;
- TERR-SET 18.31, pour la prédiction de l'occupation du sol à l'horizon 2050

2.3 METHODES

2.3.1 EVALUATION DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL

La cartographie de la dynamique de l'occupation du sol a reposé sur la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG). L'extraction de l'information des images Landsat s'est déroulée à travers toute une série d'opérations regroupées en trois phases que sont le prétraitement, le traitement et le post-traitement.

2.3.1.1 PRÉTRAITEMENT D'IMAGES SATELLITAIRES

Le prétraitement des images satellitaires a permis de rendre compatibles les images prises à des dates différentes. Dans cette étude, le prétraitement a consisté à appliquer aux images Landsat 7 des corrections géométriques, radiométriques et d'extraire la zone d'étude. Quant aux images Sentinelles, elles n'ont subi que l'extraction de la zone d'étude.

2.3.1.2 TRAITEMENT DES IMAGES SATELLITAIRES

Le traitement des images satellitaires a combiné plusieurs techniques que sont: les indices de végétation, les compositions colorées et la classification supervisée. Les indices de végétation sont des rapports entre les bandes du visible, du proche et du moyen infrarouge. Les principaux indices calculés sont le NDVI (Normalized Difference Végétation Index) et le Tasseled cap. L'Indice de Végétation Normalisé fait intervenir les canaux du Rouge (R) et du Proche Infra Rouge (PIR). Cet indice a pour but de donner des images dont les pixels mesurent les caractéristiques physiques et biologiques de la végétation [13]. Le NDVI qui varie de -1 à +1 se calcule selon l'équation 1:

$$NDVI = \frac{PIR-R}{PIR+R} \quad (\text{Eq. 1})$$

Le Tasseled cap comprend plusieurs types d'indices dont les indices Brightness et Wetness. L'indice de Brillance des sols (Brightness Index (BI)) est un indice sensible à la brillance des sols [14]. Il se calcule selon l'équation 2.

$$BI = (R^2 + PIR^2)^{1/2} \quad (\text{Eq. 2})$$

Le Wetness Index (WI) ou indice d'humidité maximise la réflectance de l'eau et minimise celle des masses d'eau [14]. Il se calcule selon l'équation 3.

$$WI = \frac{PIR-MIR}{PIR+MIR} \quad (\text{Eq. 3})$$

Les compositions colorées ont consisté à afficher simultanément à l'écran, trois bandes d'images dans les canaux de base (Rouge/Vert/Bleu) afin de faciliter l'extraction d'informations. Les compositions colorées combinant les bandes 4-3-2 pour les Landsat 7 et Sentinelle-2 fut réalisée. La classification supervisée a eu pour but de mettre en rapport l'objet sur le terrain et la signature spectrale sur l'image.

2.3.1.3 POST-TRAITEMENT DES IMAGES SATELLITAIRES

La phase de post-traitement a consisté à évaluer d'une part, le taux moyen annuel antérieur d'expansion spatiale et d'autre part, l'occupation du sol future à l'horizon 2050. Le taux moyen annuel permet d'apprécier les changements intervenus au sein de chaque classe d'occupation du sol [15]. Les principaux changements ont été déterminés sur les trois (3) périodes (2008-2013), (2013-2019) et (2008-2019). Le taux de changement (Tc) ou taux moyen annuel d'expansion spatiale utilisé dans les études sur le changement d'occupation du sol [16] est traduit par les équations 4 et 5.

$$Tc = \left[(S2/S1)^{\frac{1}{t}} - 1 \right] \times 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

$$Tg = [(S2 - S1) / S2] \times 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

Avec Tc: taux de changement (taux moyen annuel d'évolution) (%); Tg: taux global de changement (%); S1: superficie d'une classe d'unité de surface à la date t1; S2: superficie de la même classe d'unité de surface à la date t2; t: nombre d'années entre les deux dates.

Une valeur positive de Tc indique une progression du changement d'occupation du sol, tandis qu'une valeur négative traduira une régression. En outre, une valeur de Tc proche de zéro indique que la variation de la classe est relativement faible. La carte d'occupation future du sol a été obtenue à partir du Land Change Modeler (LCM) du logiciel Terr-Set. Terr-Set s'est appuyé sur les connaissances passées et actuelles de l'occupation des terres pour prédire le futur.

2.3.2 QUANTIFICATION DES FLUX D'EAU DE LA RETENUE DE ISSIA

La quantification des flux d'eau s'est appuyée sur le modèle agro-hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool) [17], [18]. SWAT est un modèle déterministe semi-distribué, à base physique qui fonctionne sur une base continue avec un pas de temps journalier ([19], [20], [1], [21]). La mise en place du modèle SWAT sur le bassin de la Lobo est longuement décrite dans les travaux [22] et [10]. Toutefois, un certain nombre de réglages ont été effectués. Les principaux réglages effectués sont:

2.3.2.1 PHASE DE TRAITEMENT

L'aire seuil a été fixée à 100 km² en se basant sur les travaux de [23]. L'option « unité de réponse hydrologique (URH) dominant » a été retenue pour la discrétisation des unités spatiales de base de calcul. Au niveau des écoulements verticaux, l'infiltration a été évaluée suivant la méthode de Green et Ampt, tandis que l'évapotranspiration potentielle, par la méthode de Hargreaves. Quant aux écoulements horizontaux, le ruissèlement a été calculé selon la méthode SCS (Soil Conservation Service).

2.3.2.2 PHASE DE POST-TRAITEMENT

La phase de post-traitement consiste à évaluer la performance et la robustesse du modèle à reconstituer les écoulements. Ainsi, l'analyse de la sensibilité s'est basée sur les paramètres jugés sensibles dans la plupart des travaux sur la modélisation agro-hydrologique en Côte d'Ivoire; notamment sur le bassin de Taabo par [1], [24] et [25]; le bassin du lac de Buyo par [26]; et le bassin de la Lobo par [22] et [10]. Les fonctions objectives utilisées pour évaluer la performance du modèle sont le critère de Nash (NS) et le coefficient de détermination (R²). Ces critères ont été retenus car ils représentent mieux la performance du modèle. D'ailleurs, ils sont les plus utilisés dans la plupart des études de modélisation [24]. La calibration s'est étalée sur la période de 2002 à 2006. Quant à la validation du modèle, elle a couvert la période de 2007 à 2011. Trois années ont été utilisées pour le réchauffement du modèle.

2.3.2.3 EVALUATION PRÉDICTIVE DES FLUX D'EAU

Les flux d'eau futur ont été directement simulés par le model SWAT-CUP préalablement calibré et validé. Les seuls paramètres qui ont variés dans les nouvelles sorties de SWAT concernent, l'occupation du sol de l'année 2050 et les données climatiques journalières du scénario RCP 4.5. La période de 2011 à 2050 a été considérée comme futur vu que les données climatiques observées s'arrêtaient en 2011.

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL

Les indices NDVI, WI et BI ont permis de caractériser la couverture végétale du bassin versant de la Lobo. En effet, bien que de nombreuses confusions aient été constatées lors de la classification des images, la classification par le maximum de vraisemblance adoptée a permis d'obtenir des précisions globales de 90 %, 92 % et 95,33 % respectivement pour les images de 2008, 2013 et 2019. Cette précision globale obtenue est au-dessus de 80 % comme préconisé par [27]. Elle reste aussi très proche des valeurs obtenues par d'autres auteurs ayant travaillé en Côte d'Ivoire, notamment [28] dans la région des Lacs (88,47 % et 90,46 % respectivement pour 1986 et 2002) et [29] dans la localité de Bonikro (91,48 % pour l'an 2007 et 88,56 % pour l'année 2016). Les coefficients de Kappa respectifs obtenus sont de 0,88; 0,9 et 0,94 pour les images de 2008, 2013 et 2019. Les cartes d'occupations du sol de 2008, 2013 et 2019 issues de la classification des images sont présentées à la figure 2.

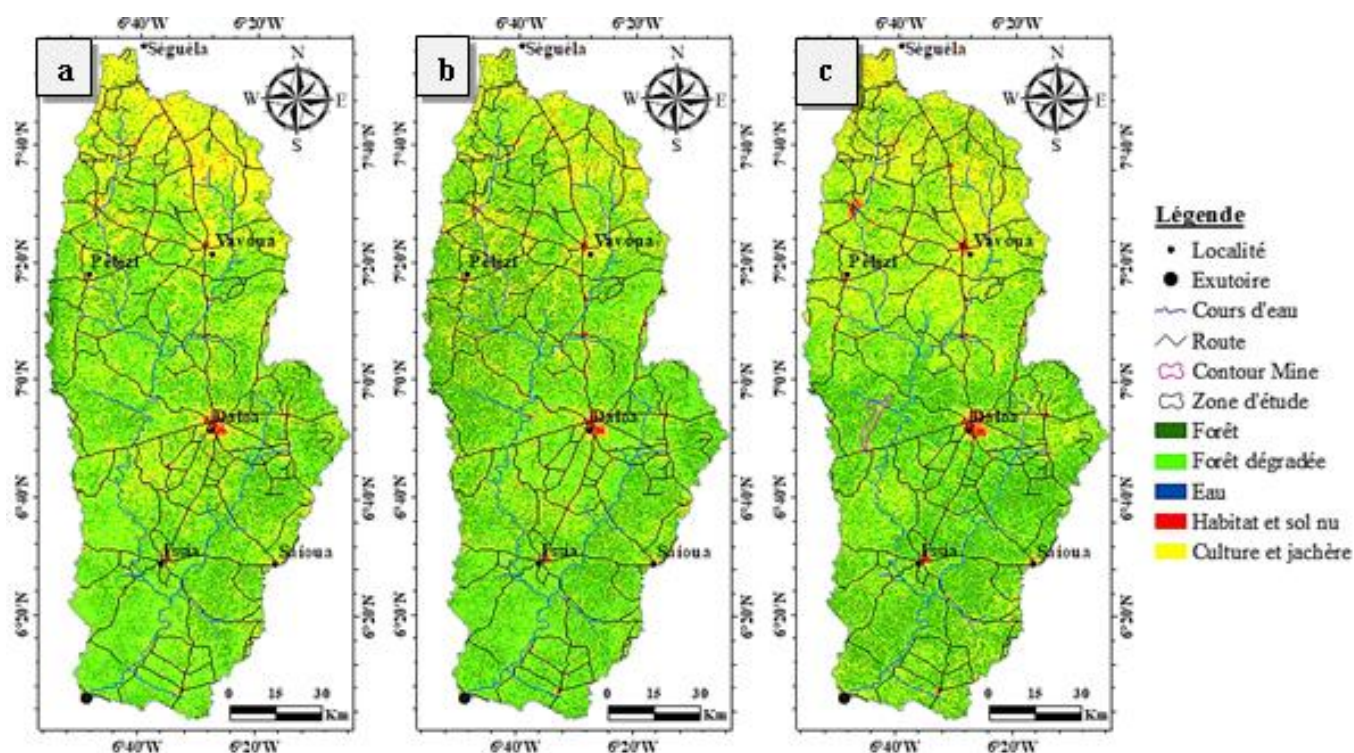


Fig. 2. Evolution de l'occupation du sol (a = 2008, b = 2013 et c = 2019)

L'évolution des superficies des différents types d'occupation du sol entre 2008 et 2019 est résumée dans le tableau 1.

Tableau 1. Proportion spatiale des différents types d'occupation du sol

Classes	2008		2013		2019	
	Superficie (Ha)	Pourcentage (%)	Superficie (Ha)	Pourcentage (%)	Superficie (Ha)	Pourcentage (%)
Habitat et sol nu	34 714,88	2,73	102 640,12	8,07	141 706,73	11,14
Forêt	487 799,17	38,34	356 735,75	28,04	429 010,31	33,72
Forêt dégradée	487 690,29	38,33	662 575,35	52,08	441 372,38	34,69
Culture et jachère	260 914,76	20,51	148 710,83	11,69	257 591,35	20,25
Eau	1 080,90	0,08	1 537,95	0,12	2 519,23	0,20
Total	1 272 200	100	1 272 200	100	1 272 200	100

La prévision de l'occupation du sol basée sur le LCM à l'horizon 2050 montre que les habitats et sols nus augmenteront de 141 707 ha à 180 560 ha entre 2019 et 2050. Les cultures et jachères augmenteront également de 257 591 ha à 1 018 867 ha entre 2019 et 2050. Par contre, la forêt, la forêt dégradée et l'eau diminueront respectivement de 429 010 ha à 24 246 ha, 441 372 ha à 48 300 ha et de 2 519 ha à 227. Si rien n'est effectué, il n'existera pratiquement plus de forêt sur le bassin versant de la Lobo d'ici 2050 (Figure 3).

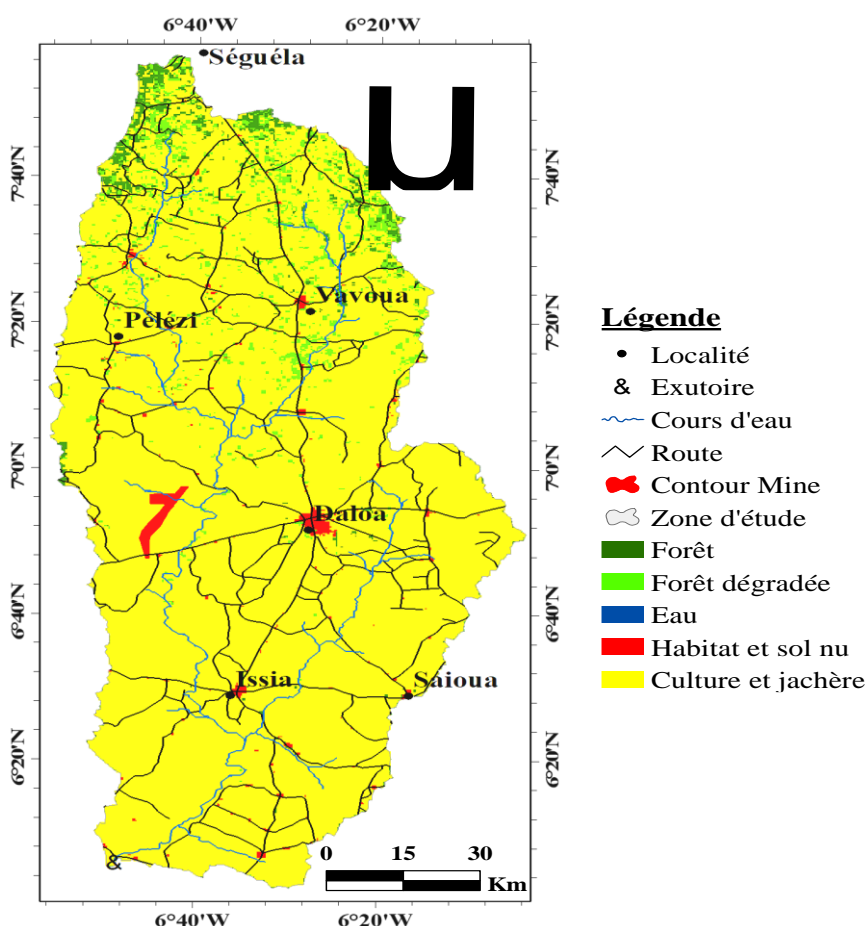


Fig. 3. Occupation du bassin versant de la Lobo à l'horizon 2050

Cette dégradation des superficies forestières au profit des mosaïques de cultures et jachères a été soutenue par [2] sur le Parc de la Marahoué en Côte d'Ivoire avec une disparition d'ici 2026, par [30] dans la région centrale du Bénin avec une disparition d'ici 2025. Ces auteurs expliquent la forte demande des terres cultivées et du bâti par l'augmentation de la population.

3.2 RESTITUTION DES DEBITS DE LA RETENUE DE ISSIA

La restitution des flux d'eau de la retenue de Issia à l'aide du modèle Agro-hydrologique SWAT a permis d'obtenir des résultats satisfaisants pour la calibration et la validation du modèle. En effet, les critères statistiques (NS et R^2 supérieurs à 0,5) ont montré une bonne performance du modèle à la fois pour la calibration et la validation (Tableau 2).

Tableau 2. Critères statistiques d'évaluation de la performance du modèle

N° du sous bassin	p_facteur	r_facteur	R ²	NS
Calibration	0,63	1,19	0,57	0,53
Validation	0,75	1,54	0,61	0,57

Les performances du modèle obtenues en calage comme en validation respectent les conditions de [31] et de [32]. L'analyse des critères visuelles montre aussi un bon synchronisme entre les débits observés et simulés. Toutefois, une légère sous-estimation des pics de crue simulés au niveau des deux périodes est observée sur la figure 4.

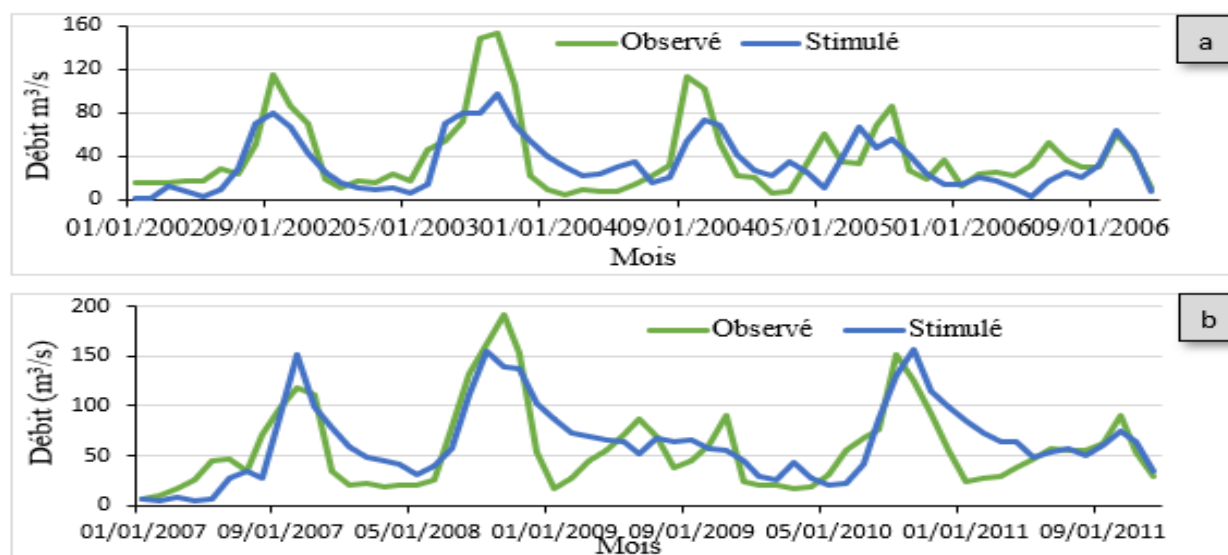


Fig. 4. Hydrographes des débits simulés et observés (a= calibration et b= validation)

Ces hydrographes montrent que les sorties du modèle sont entravées par de nombreuses lacunes. En effet, les données climatiques utilisées ne sont pas assez représentatives. De même, les données de débits comportent des lacunes avec des données manquantes et non étendues. Or, selon [1], la disposition spatiale des stations climatiques ne couvrant pas tous les régimes climatiques aura un impact négatif sur la restitution des écoulements. Aussi, moins la série de données d'entrées est importante et répartie dans l'année, moins les résultats en calage et en validation sont bons [32]. Parallèlement aux données ponctuelles, la résolution spatiale des données raster, notamment la carte pédologique constitue une limite à l'atteinte d'une très bonne performance du modèle. Selon [33] et [34], le modèle SWAT reste extrêmement sensible à la qualité des données spatiales, notamment de sols, à l'utilisation des terres ainsi qu'aux procédures de prétraitement. En plus des données d'entrées, l'empirisme du modèle SWAT pourrait augmenter les incertitudes [35]. Malgré ces lacunes qui bien que nombreuses, le modèle a montré à travers les paramètres p-facteur et r-facteur, une bonne prise en compte des incertitudes. L'extraction des flux d'eau entrant dans le réservoir a permis d'obtenir les débits d'eau entrant dans le réservoir de la retenue de Issia (Figure 5).

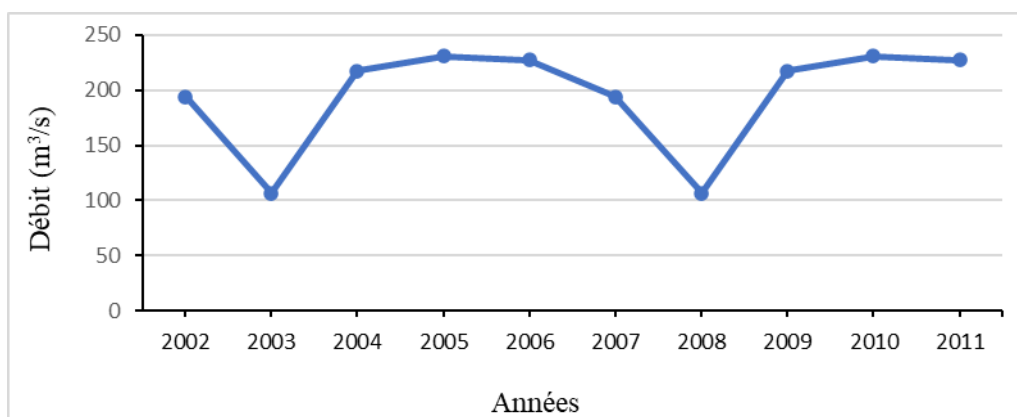


Fig. 5. Evolution des débits d'eau annuels entrant dans la retenue de Issia

Les flux d'eau entrant dans le réservoir de Issia, sur la période de 2002 à 2011 présentent un débit moyen interannuel de 1951,83 m³/s, soit une lame d'eau moyenne de 4 840,49 mm. Les débits d'eau annuelle entrant dans la retenue oscillent de 106,45 m³/s à 231,03 m³/s. A l'horizon 2050, les lames d'eau entrant dans le réservoir devraient baisser de 52 % (Figure 6).

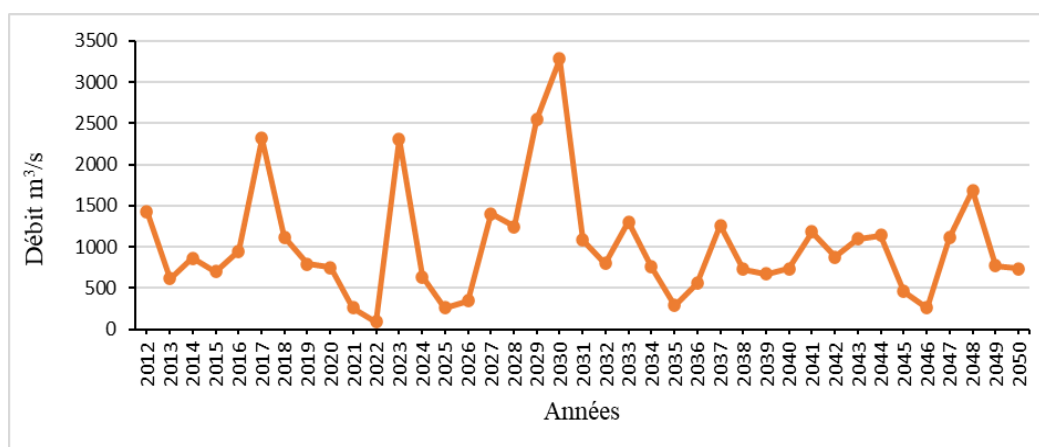


Fig. 6. Flux d'eau entrant dans la retenue de Issia

L'hydrographe prédictive des flux d'eau entrant dans la retenue de Issia présente deux tendances. La première tendance (2012 à 2032) est marquée par des débits qui oscillent entre 89,82 m³/s à 3 282,3 m³/s. Les lames d'eau entrant dans la retenue durant cette période sont ainsi estimées de 222,65 mm à 8 136,35 mm. La seconde tendance est celle de la période de 2032 à 2050. Elle est marquée par des débits d'eau entrant dans la retenue de Issia variant de 262,12 m³/s à 1 682,84 m³/s; soit des lames d'eau de 649,77 mm à 4 171,52 mm. De ces deux tendances, il est remarqué que les lames d'eau entrant dans le réservoir baissent de 52 %. Cette réduction des flux d'eau serait donc imputable à la conjugaison de l'anthropisation et du changement climatique qui ont pour corolaire l'augmentation de gaz à effet de serre tel que le CO₂.

4 CONCLUSION

Ce travail réalisé sur le bassin versant de la Lobo a permis d'évaluer l'incidence des actions combinées des activités anthropiques et du changement climatique sur les flux d'eau entrant dans la retenue de Issia. L'approche méthodologique mise en place a combiné télédétection et modélisation agro-hydrologique. L'approche par télédétection qui a reposé sur l'analyse diachronique des images Landsat 7 ETM+ (2008 et 2013) et Sentinelle-2 (2019) à travers la méthode de classification supervisée par le maximum de vraisemblance a permis de discriminer cinq (05) classes d'occupation de sol que sont: la forêt, la forêt dégradée, l'habitat et sol nu, la culture et jachère, et les plans d'eau. Les précisions globales obtenus pour les images classifiées de 2008, 2013 et 2019 sont respectivement 90 %, 92 % et 95,33 %. Les indices de Kappa de la matrice de confusion pour les trois images classifiées sont de 0,88; 0,9 et 0,94 respectivement en 2008, 2013 et 2019. Les cartes élaborées pour les

trois années ont permis d'identifier une évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol. De 2008 à 2019, des taux moyen annuel de régression globale sont de 13,70 % pour la forêt, 10,49 % pour la forêt dégradée et de 1,29 % pour les culture et jachères. Dans la même période, il est remarqué une progression des habitats et sols nus (75,50 %) et eau (57,09 %). Il ressort que si aucune action n'est menée, il n'existera pratiquement plus de forêt sur le bassin versant de la Lobo d'ici 2050. La quantification des flux d'eau de la retenue de Issia a été réalisée à l'aide du modèle agro-hydrologique SWAT. Les critères statistiques et graphiques ont montré une bonne capacité du modèle à reproduire de manière satisfaisante les séries de débits à l'échelle mensuelle. L'analyse du bilan hydrique indique que le flux d'eau de la retenue baissera de 52 % par rapport aux flux actuels. Ces diminutions peuvent constituer une menace réelle pour la population de la localité de Issia les années à venir.

REFERENCES

- [1] Anoh K.A.: Apport d'un SIG et du modèle agro-hydrologique SWAT dans la gestion durable des ressources en eau du bassin versant du lac de Taabo (Centre de la Côte d'Ivoire). Sciences de la Terre et des Ressources Minières. Côte d'Ivoire, Félix Houphouët Boigny. PhD, 197p, 2014.
- [2] Dibi N.d.H.: Étude et suivi par télédétection et système d'informations géographiques d'une aire protégée soumise aux pressions anthropiques: cas du Parc National de la Marahoué. UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody, PhD, 140p, 2007.
- [3] Brou Y.T.: Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire de synthèse des activités scientifiques présenté en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Techniques de Lille, France: 212p, 2005.
- [4] Adja M.G.: Étude de l'état hydrique saisonnier du bassin versant de la Bagoé dans un contexte de variabilité climatique. Départements de Boundiali et Tengréla (milieux soudano-sahéliens au nord-ouest de la Côte d'Ivoire), Université de Cocody-Abidjan (Côte d'Ivoire). PhD, 184p, 2009.
- [5] K.A.Anoh, Z.A. Kouadio, D.Konaté, K.B. Djè, K.H. Kouassi, T.J.-J.Koua and B.Dibi, Analysis of climate disruption variability in the Sassandra River basin limited at Soubré (Western Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Scientific Research* 54 (2), pp. 90-101, 2021c.
- [6] B.T.A.Goula, I.Savané, B.Konan, V.Fadika and G.B. Kouadio, Etude comparative de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau des bassins du N'zo et du N'zi en Côte d'Ivoire. *Sciences et Nature* 2 (2), pp. 107-120, 2005.
- [7] Kouassi A.M., 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 (Bandama) en Côte d'Ivoire, Université de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), PhD, 210p, 2007.
- [8] A.B. Yao, B.T.A.Goula, Z.A. Kouadio, K.E. Kouakou, A.Kane and S.Sambou Analyse de la variabilité climatique et quantification des ressources en eau en zone tropicale humide. Cas du bassin versant de la Lobo au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie* 19, pp.136-157, 2012.
- [9] Yao A.B.: Evaluation des potentialités en eau du bassin versant de la Lobo en vue d'une gestion rationnelle (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire), Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire). PhD, 192p, 2015.
- [10] B.Dibi, K.A. Anoh., A.B.Konan-Waidhet, T.J.J.Koua and K.L. Kouassi Coupling modeling and remote sensing for the determination of high-flow drilling locations in the Lobo watershed at Nibehibé in Côte d'Ivoire. *Environmental and Water Sciences, public Health and Territorial Intelligence Journal* 5 (2), pp.578-587, 2021.
- [11] FAO. The digital soil map of the world and derived soil properties. 1995. [electronic resource].
- [12] C.A. Reynolds, T.J. Jackson and W.J. Rawls, Estimating available water content by linking the FAO soil map of the world with global soil profile database and pedo-transfer functions. *Water resources research* 36 (12), pp. 3653-3662, 1999.
- [13] Tonyé E., Akono A. and Ndi N.A.: Le traitement par exemple des images de télédétection. Laboratoire d'électronique et de traitement du signal, Yaoundé (Cameroun), 250 p, 1999.
- [14] E.P. Cristand R.C.Cicone, A physically-based transformation of Thematic Mapper data-The TM Tasseled Cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing* (3), pp. 256-263, 1984.
- [15] V.J.Mama and J. Oloukoi, Évaluation de la précision des traitements analogiques des images satellitaires dans l'étude de la dynamique de l'occupation du sol. *Télédétection* 3 (5), pp.429-441, 2003.
- [16] FAO Forest resources assessment 1990. Survey tropical forest cover studies of change processes. FAO Forestry Paper 130, Food and Agriculture Organization of United Nations, Rome, Italie 1996.
[Online] Available: <http://www.fao.org/docrep/007/w0015e/w0015e00.htm> (consulté le 12 Août 2021).
- [17] J.G.Arnold, P.M.Allen and G. Bernhardt, A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology* (142), pp.47-69, 1993.
- [18] J.G.Arnold, D.N.Moriasi, P.W. Gassman, K.C.Abbaspour, M.J.White, R.Srinivasan, C.Santhi, R.Harmel, A.Van Griensven and M.W.Van Liew, SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 55 (4), pp.1491-1508, 2012.

- [19] Obuobie E.: Estimation of groundwater recharge in the context of future climate change in the White Volta River Basin. West Africa. Ecology series, University of Bonn, Germany, PhD, 153p, 2008.
- [20] Thiébault M. "Modélisation hydrologique d'un scénario de changement climatique sur le bassin versant du Bani avec SWAT." ENGEES, Strasbourg: 55p, 2010.
- [21] K.A.Anoh, T.J.J.Koua, W.E Yeo., S.G. Eblin, K.J.Kouame and J.P.Jourda, Application of the agro-hydrologic SWAT model on the Taabo river basin (Côte d'Ivoire) to evaluate the effect of three vegetative filter strip scenarios on streamflow and nutrients. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)* 20 (1), pp.13-23, 2021b.
- [22] J.-J.T.Koua, A.K.Anoh, D.T.Soro, J.K.Kouame and R.J.P.Jourda, Evaluation of Agricultural Practices Scenarios for Reducing Erosion in Buyo Lake Catchment (Sassandra; Côte d'Ivoire) by Use of GIS. *Journal of Geoscience and Environment Protection* 7 (7), pp.154-171, 2019.
- [23] K.A. Anoh, K.S.Konon, S.G.Eblin, A.V.Atcho and K.L.Kouassi Contribution of Agro-Hydrological Modeling in the Evaluation of Water Availability of an Ungauged Basin Reservoir in Côte d'Ivoire: Case of the Loka Reservoir in Bouaké. *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering* 10 (3), pp. 117-130, 2021a.
- [24] K.A.Anoh, T.J.J.Koua, K.J. Kouamé, J.P.Jourda and F.Laurent, Modelling water flow in a complex watershed in humid a tropical area using swat: a case study of Taabo watershed in Ivory Coast. *International Journal of River Basin Management* 16 (2), pp.157-167, 2017b.
- [25] K.A. Anoh, T.J.J.Koua, S.G.Eblin, K.J.Kouamé and J.P.Jourda, Modelling freshwater availability using SWAT model at a catchment-scale in ivory coast. *Journal of Geoscience and Environment Protection* 5 (13), pp.70-83, 2017a.
- [26] T.J.J.Koua, J.P. Jourda, K.J.Kouame, K.A Anoh, W.K.C.N'Dri, G.Lazar and S. Lane, Effectiveness of soil and water assessment tool model to simulate water flow in a large agricultural complex watershed: Case of Buyo Lake Basin, West of Côte D'Ivoire. *Environmental Engineering and Management Journal* 13 (7), pp.1735-1742, 2014.
- [27] Girard M.-C. and Girard C.: Traitement des données de télédétection, DUNOD Ed. Paris. France, 529 p, 1999.
- [28] G. Soro, E.K. Ahoussi, E.K.Kouadio, T.D Soro, S.Oulare, M.B.Saley, N. Soro and J.Biemi, 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 Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie* 10 (3). 2014).
- [29] L.Tia, S.F. Ayenon and K.Koffi, Impacts des exploitations aurifères industrielles sur le milieu naturel et les populations à Bonikro (Côte d'Ivoire). *Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement*, 2, pp.61-73, 2018.
- [30] Orékan V.A.: Implémentation du modèle local CLUE-s aux transformations spatiales dans le Centre Bénin aux moyens de données socio-économiques et de télédétection. Université de Bonn, Allemagne. PhD, 230p, 2007.
- [31] M.W.Van Liew, J. Arnold and D.Bosch, Problems and potential of autocalibrating a hydrologic model. *Transactions of the ASAE* 48 (3), pp.1025-1040, 2005.
- [32] D.N.Moriasi, J.G.Arnold, M.W.Van Liew, R.L.Bingner, R.D.Harmel and T.L. Veith, Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50 (3), pp. 885-900, 2007.
- [33] A.A. Romanowicz, M.Vanclouster, M.Rounsevell and I.La Junesse, Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment, Belgium. *Ecological modelling* 187 (1), pp.27-39, 2005.
- [34] L. Chen, G. Wang, Y.Zhong and Z.Shen, Evaluating the impacts of soil data on hydrological and nonpoint source pollution prediction. *Science Of The Total Environment* (563–564), pp.19–28, 2016.
- [35] F.Laurent, D.Ruelland and M. Chapdelaine, Simulation de l'effet de changements de pratiques agricoles sur la qualité des eaux avec le modèle SWAT. *Revue des sciences de l'eau* 20 (4), pp. 395–408, 2007.