

Apport De La Teledetection Pour Le Suivi Spatio-Temporel De L'occupation Du Sol Dans La Region Montagneuse Du Tonkpi (Cote D'ivoire)

Cyrille Bi Tiesse,

Unité Mixte de Recherche en Innovation (UMRI) Sciences Agronomiques et Génie Rural, Ecole Doctorale Polytechnique INPHB Yamoussoukro, BP 1313 Yamoussoukro Côte d'Ivoire

Eboua Narcisse Wandan,

Institut National Polytechnique-Félix Houphouët Boigny de Yamoussoukro, UMRI Sciences agronomiques et Génie Rural, Laboratoire Sciences, Société, Environnement & Gestion des Ressources naturelles, BP 1313, Yamoussoukro

Hyppolite Dibi N'da,

Département de Botanique et Biologie Végétale, Faculté des Sciences et Techniques, Université Nationale d'Abidjan, 22 B.P. 582, Abidjan, Côte d'Ivoire

doi: 10.19044/esj.2017.v13n15p310 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2017.v13n15p310](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2017.v13n15p310)

Abstract

Objective: This study aims to characterize and to map vegetation cover in the mountainous region of Tonkpi in order to evaluate forest dynamics by remote sensing. *Methodology and Results:* This work relied on four satellite images of the scene 198-55 Landsat 4 TM 1990 from Landsat 7 ETM+ in 2000, Landsat 5 TM 2011 and Landsat 8 OLI-SHOTS 2015. Based on field data, classification was conducted using the maximum likelihood method in satellite images (OLI-SHOTS, ETM + and TM) in order to map vegetation from 1990 to 2015. These maps were superimposed to the Digital elevation model produced from an ASTER image in order to assess forest dynamics at altitude levels. The diachronic study of land use revealed a change in the landscape with a significant reduction of dense forest (-35.6%) and crop lands and fallow (-42.14%), and an increase of degraded forests (15.13%) and bare soil land and houses (10.46%). Moreover, high altitudes occupy a large proportion (37.7%) of the landscape (12,284 km²), followed by medium altitudes (34.6%), and low altitudes (27.7%). Concerning bare soil and homes, there is a large increase of the area at low altitudes (88, 96%) while concerning crops and fallow, the area reduction was more pronounced at high altitudes (-53.64%). The medium

altitudes have the highest rate of increase (51.14%) in degraded forests, and the highest decrease (-43.25%) in the dense forests. *Conclusion and Application:* The study shows that high altitudes occupy the largest proportion of the total area of the region and a change in the landscape due to human activities. Based on the results, we recommend a spatio-temporal monitoring of the net erosion on the mountains in order to maintain its agricultural potential and fight effectively against erosion.

Keywords: Remote sensing, Deforestation, Mountains, Côte d'Ivoire, Tonkpi region

Résumé

Objectif: La présente étude se propose de caractériser et de cartographier la couverture végétale de la région montagneuse du Tonkpi, puis d'évaluer sa dynamique forestière à partir de d'imagerie satellitaire.

Méthodologie et résultats : Ces travaux se sont appuyés sur quatre images satellitaires de la scène 198-55 de Landsat 4 TM datant de décembre 1990, de Landsat 7 ETM+ de février 2000, Landsat 5 TM de janvier 2011 et de Landsat 8 OLI-TIRS de janvier 2015. A partir des observations de terrain, des classifications dirigées par la méthode de maximum de vraisemblance sur les images satellitaires (OLI-TIRS, ETM+ et TM) ont permis d'élaborer les cartes de végétation de la région du Tonkpi de 1990 à 2015. Ces cartes ont été superposées au modèle Numérique de terrain obtenu à partir d'une image ASTER en vue d'évaluer la dynamique forestière au niveau des classes d'altitudes. L'étude diachronique de l'occupation du sol révèle une modification de l'espace naturel avec une importante réduction des forêts denses (-35,6%) et des cultures et jachères (-42,14%) et une augmentation des forêts dégradées (15,13%) et des terrains nus et habitations (10,46%). Par ailleurs, les hautes altitudes occupent une forte proportion (37,7%) de la superficie du paysage (12 284 km²), suivi des moyennes altitudes (34,6%) et des basses altitudes (27,7%). Au niveau des terrains nus et habitations, on constate un accroissement plus importante des superficies au niveau des basses altitudes (88, 96%) tandis qu'au niveau des cultures et jachères, la diminution des surfaces est plus marquée au niveau des hautes altitudes (-53,64%). Les moyennes altitudes enregistrent les plus forts taux d'augmentation (51,14%) au niveau des forêts dégradées, et de diminution (43,25%) au sein des forêts denses. *Conclusion et application :* L'étude révèle que les hautes altitudes occupent la plus forte proportion de la superficie totale de la région et une modification de l'espace naturel par les activités anthropiques. Sur la base des résultats obtenus, nous recommandons un suivi spatiotemporel de l'érosion nette sur ces montagnes afin de maintenir le potentiel agricole et lutter efficacement contre l'érosion.

Mots-clés : Télédétection, Déforestation, Montagnes, Cote d'Ivoire, région du Tonkpi

Introduction

Le phénomène de déforestation constitue un des défis majeurs auxquels est confronté l'homme, aujourd'hui. Les statistiques de la FAO (2007) indiquent que les surfaces forestières sont passées de 4,077 milliards d'hectares en 1990 à 3,952 milliards d'hectares en 2005 (Achar et al., 2002). En Côte d'Ivoire, les forêts bien connues pour leur biodiversité floristique sont également confrontées à cette réalité (Aké Assi, 1984; N'Guessan, 2004; 2006, Diby et al., 2008). En effet, d'environ 15 millions d'ha au début du siècle dernier, la forêt ivoirienne est passée à 2,5 millions d'hectares en 1996 (SODEFOR, 1996). Le développement de l'agriculture et l'exploitation forestière de type minier constituent les principaux facteurs de cette déforestation.

Dans la région du Tonkpi, les causes de la déforestation sont de deux ordres : la première est liée à la surpopulation. En effet, l'attrait du commerce a attiré une population immigrante venue des pays frontaliers conduisant à un accroissement des emblavures, réduction du cycle de jachère forestière : jadis de douze (12) à seize (16) ans, hier de huit (8) à dix (10) ans, aujourd'hui de quatre (4) à six (6) ans à proximité des routes. Deuxièmement, la régénération du sol se fait mal et on aboutit à la savanisation, dont la jachère normale est de six (6) ans (J.A. Mouton, 1959). Cette déforestation a contribué à dénuder la plupart des versants des montagnes, ce qui a aggravé les problèmes d'érosion (Bakayoko et al., 2013, N'Guessan, 1989) provoquant l'effleurement et le détachement des blocs rocheux. Cela engendre des dégâts matériels dans les cultures et constitue des risques de protection civile. En outre, avec l'absence de l'administration forestière due à la guerre qu'a connu le pays en 2002 et la crise post électorale, les activités d'exploitation forestière illégale et la pratique inadaptée de l'agriculture ont entraîné une destruction de la couverture forestière sur les versants des montagnes.

Face à la forte croissance démographique et la rareté des terres cultivables, la problématique de la reconstitution du couvert forestier, du maintien de la production agricole et de la lutte antiérosive se pose avec acuité. Dans ce cadre, l'Etat de Côte d'Ivoire à travers le Ministère des Eaux et Forêts a mis en place le projet de reboisement des flancs de montagnes. Dans un contexte de rareté des ressources, il paraît primordial d'engager des études préalables à l'aménagement forestier de cette région en vue d'orienter les gestionnaires sur les zones prioritaires au reboisement. Ainsi, la présente étude centrée sur la région du Tonkpi a pour objectif général d'améliorer les

connaissances sur le phénomène de la déforestation dans la région du Tonkpi et donner aux gestionnaires des éléments indispensables à la mise en place d'une politique de gestion durable des forêts. Il s'agit plus spécifiquement d'identifier et de cartographier les différents types de d'occupation du sol, d'évaluer et cartographier la dynamique de l'occupation du sol de 1990 en 2015 pour en déduire la déforestation, et d'estimer et de déterminer la distribution spatiale des différents types d'occupation du sol en fonction des classes d'altitude dans la même période.

MATERIEL ET METHODES

Matériel

Site de l'étude : La Région du Tonkpi, l'une des plus vastes de la Côte d'Ivoire est située à l'extrême ouest dans le District des montagnes. Elle appartient au secteur montagneux du domaine guinéen (Guillaumet et Adjanohoun, 1971) et s'étend sur une superficie de 12 284 Km². Elle se situe entre les longitudes 5°24' et 7°3' Ouest et les latitudes 8°4' et 6°34' Nord (Figure 1). La population de la région est estimée à 435 196 habitants (RGPH, 2014).

Les hauteurs de pluie varient entre 1300 et 2400 mm par an. Les températures se situent en moyenne à 24°C. L'hygrométrie oscille entre 80 et 85%. La région est drainée par les fleuves Sassandra à l'est et Cavally à l'ouest avec chacun, de nombreux affluents (CNRA, 2009) qui favorisent une végétation constituée à 80% de forêt humide. Toutefois, une partie de cette forêt est transformée en jachères à *Chromolaena odorata* tandis qu'une autre partie est exploitée sous forme de plantations de café, de cacao ou d'hévéa.

La topographie de la Région du Tonkpi est marquée par une série de bas plateaux (Bakayoko et al., 2013) qui s'enchaînent par endroits avec des zones très accidentées aux contours variant entre des pentes moyennes et des altitudes dépassant parfois les 1 000 m. Les sommets les plus élevés se rencontrent au Mont Tonkpi (1189 m), au Mont Mia (1077m), au Mont Glas (1175 m). La plupart des versants des montagnes, abrupts et fracturés ainsi que les vallées encaissées, sont exposés à un risque élevé d'érosion. Les sols de type ferrallitique à fertilité chimique moyenne sont dominants. Il y existe également des sols développés sur des roches basiques, des sols hydromorphes dans les bas-fonds et des sols minéraux dans les zones montagneuses (CNRA, 2009).

On rencontre dans cette région une grande diversité de systèmes de production liée à trois principaux facteurs dont les conditions agro-climatiques favorables qui favorisent une vaste gamme de spéculations industrielles et vivrières; des écosystèmes spécifiques à la morphologie montagneuse distribuée en coteaux ou flancs de montagne granitiques, bas

de pente, et bas-fonds; et un niveau de saturation foncière élevé obligeant les producteurs à optimiser l'espace, notamment en pratiquant les cultures vivrières associées.

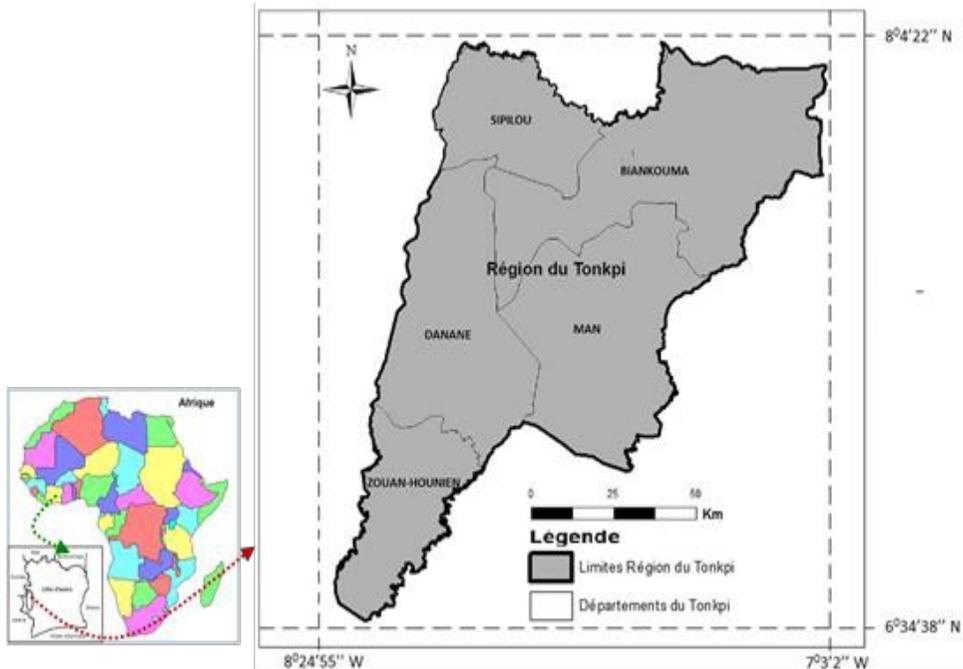


Figure 2 : Situation géographique de la zone d'étude

MÉTHODES

Les données primaires sont constituées d'images satellitaires, de couches cartographiques géoréférencées des limites administratives de la Côte d'Ivoire, de la région du Tonkpi, de son réseau routier, hydrographique, végétation et de l'habitat. Les images satellitaires sont constituées de 4 images Landsat et 4 images Aster GDEM (Global Digital Elevation Model). Les images Landsat sont issues de la scène 198-55 prises le 28 décembre 1990 par le capteur TM de Landsat 4, le 7 février 2000 par le capteur ETM+ de Landsat 7, le 12 janvier 2011 par le capteur TM de Landsat 5 et le 7 janvier 2015 par le capteur OLI-TIRS de Landsat 8 ; Les images Landsat ont été obtenues gratuitement du site internet de l'US Géologique Survey (USGS). La cartographie a été effectuée en utilisant le logiciel ArcGis 10.0. Les images Aster correspondantes à un modèle numérique de terrain (MNT) couvrant la région du Tonkpi.

Les données secondaires sont constituées des données climatologiques (températures, pluviométries) de 1986 à 2015 fournies par la SODEXAM, les données sur la population obtenues auprès de l'antenne de l'Institut National de la Statistique (INS) de Man.

La méthodologie adoptée dans ce travail a combiné les techniques de traitements d'images satellitaires, les visites et observations de terrain. Le prétraitement d'image a débuté par la correction géométrique des images satellitaires. Ainsi, l'image Landsat 5 TM géométriquement rectifiée a servi de base à la correction de Landsat 7 ETM+ et Landsat 8 OLI par un polynôme de degré 1, avec une erreur résiduelle d'environ 7 m (largement inférieure au $\frac{1}{2}$ pixel qui est de 15 m). Sept points de calage ont servi de points d'amers. La méthode de rééchantillonnage du plus proche voisin qui conserve les valeurs radiométriques originales de l'image (Caloz et al., 1993) a été utilisée. Nous avons par la suite réalisé la correction radiométrique pour réduire les effets perturbateurs de l'atmosphère, qui est particulièrement chargée de nuage de poussière en période de l'harmattan (Song and al., 2001; Foody et al., 1996). Pour finaliser le prétraitement, la fenêtre d'étude centrée sur la région du Tonkpi a été découpée puis un masque a été appliqué pour extraire l'image de la région du Tonkpi. Le traitement numérique proprement dit, a commencé par la production de classes d'occupation du sol non dirigées devant servir de base aux missions de visites de terrain.

Les compositions colorées avec les bandes brutes (TM 5-4-3 ETM+ 5-4-3 et OLI 6-5-4) et les néocanaux de l'analyse en composantes principales (ACP1-2-3) réalisées ont permis d'effectuer la discrimination des différents types d'occupation du sol, la sélection des sites à visiter et l'orientation sur le terrain, le choix des parcelles d'entraînement pour la classification dirigée, et le choix des parcelles de contrôle pour l'élaboration de la matrice de confusion. Ainsi, il a été possible de discriminer cinq classes : les forêts denses, les forêts dégradées, les cultures et jachère, les cours d'eau et bas-fonds, et les terrains nus et habitations.

Une soixantaine de parcelles dite « vérité terrain » caractérisées par leur homogénéité et leur taille suffisamment grande pour être reconnues sur le terrain, représentant tous les types d'occupation du sol, ont été identifiées et sélectionnées pour être comparées aux observations de terrain. Au cours des observations sur le terrain, pour chaque type d'occupation du sol les types probables d'occupations de sol sur les compositions colorées ont été conformées.

Les informations recueillies sur le terrain, ont également permis de finaliser les traitements numériques. En effet, la classification dirigée des images Landsat par la méthode de classification par maximum de vraisemblance a permis de produire des cartes d'occupation du sol de la région du Tonkpi. La validation de la carte de végétation 2015 de la région du Tonkpi a été faite par l'analyse de la matrice de confusion, qui a été élaborée à partir de 30 autres parcelles dites parcelles de contrôle. Il s'agit de parcelles visitées sur le terrain et n'ayant pas servi d'entraînement. Ce traitement a été finalisé par une visite de terrain post classification.

Cette méthode est reprise à l'identique pour la production de carte d'occupation de sol de la région du Tonkpi des années 1990, 2000, et 2011, en utilisant comme réalité de terrain les couches cartographiques de la région du Tonkpi et les données de terrain de 2015. En effet, les différents types d'occupation des sols identifiés dans la région du Tonkpi en 2015 sont les mêmes que celles qui existaient en 1990, 2000, et 2011. Seule l'occupation spatiale de ces classes ou unités cartographiques marque une différence entre les différentes dates. Ainsi, les parcelles d'entraînement et de contrôle sélectionnées sur la composition colorée, respectivement pour la classification dirigée et l'élaboration de la matrice de confusion, sont validées par les couches cartographiques d'occupation du sol de la région du Tonkpi des données collectées sur le terrain en 2016. Les cartes d'occupation des sols des années 1990, 2000, et 2011 et 2015 de la région du Tonkpi, permettent une analyse qualitative et quantitative de la dynamique des occupations des sols

Pour mieux appréhender la dynamique des occupations de sols en fonction du relief, dans la région du Tonkpi fortement accidenté avec de nombreuses chaînes de montagnes, nous avons intégré l'altitude à notre analyse. En effet, l'altitude troisième coordonnée de la position d'un lieu, n'est pas représentée directement sur la carte à 2 dimensions car une projection cartographique ne traduit pas l'altitude. La représentation de l'altitude sur la carte nécessite l'utilisation de signes conventionnels spécifiques (DELVAUX et NYS, 2002). Les altitudes de la surface terrestre permettent de déterminer ses formes de reliefs. La carte des altitudes de la région du Tonkpi a donc été produite à partir de la classification non supervisée du modèle numérique de terrain (MNT) puis vectorisée pour calculer la superficie de chaque classe.

Le prétraitement des images ASTER a consisté au regroupement des différentes couches MNT de la zone d'étude est à cheval entre plusieurs scènes d'images ASTER. L'extension Spatial Analyst du logiciel ArcGis 10.0 a permis d'enlever le masque sur les images ASTER. Le traitement de l'image et la classification ASTER a été possible grâce à la méthode de classification non dirigée qui a permis de produire la carte des altitudes. Ainsi, il a été possible de distinguer trois différentes classes d'altitude : les basses altitudes comprises entre 160 m et 320 m d'altitude ; les moyennes altitudes comprises entre 320 m et 520 m d'altitude ; et les hautes altitudes comprises entre 520 m et 1320 m d'altitude.

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Identification et cartographie des différentes classes d'occupation du sol : Les résultats de la classification a permis de mettre en évidence cinq types d'occupations du sol, à savoir les forêts denses, les forêts dégradées,

les cultures et jachères, les cours d'eau et bas-fonds et les terrains nus et habitations.

Les forêts denses sont composées de forêts naturelles et de plantations forestières qui sont soit des forêts denses à canopée fermée, soit des forêts denses ouvertes ou des forêts galeries se présentant sous forme de cordons de végétaux de types forestiers. Ces forêts denses se rencontrent sur les montagnes et dans les zones de basses altitudes.

Les forêts dégradées sont des formations forestières qui découlent de la dégradation des forêts denses. Cette dégradation est provoquée soit par l'exploitation forestière, soit par l'implantation de l'agriculture. Leur structure est comparable à celle des forêts denses.



Figure 3 : Photo illustrant les forêts denses (à gauche) et les forêts dégradées (à droite) dans la région du Tonkpi

Les zones de jachères observées sont pour la plupart des terres non cultivées pour permettre à celles-ci de se reconstituer. Les jachères sont constituées de graminées notamment *Panicum maximum* (Poaceae), *Brachiaria ruziziensis* (Poaceae) et de *Chromolaena odorata* (Asteraceae). On les retrouve un peu partout dans la région.



Figure 4 : Photos illustrant une zone de jachère (à gauche) et une parcelle de culture (à droite) dans la région du Tonkpi

On rencontre les cultures pérennes telles que le cacaoyer (*Theobroma cacao*, Sterculiaceae), le caféier (*Coffea* spp. Rubiaceae) et le palmier à huile (*Elaeis guineensis*, Arecaceae) et des cultures vivrières : le manioc (*Manihot esculenta*, Euphorbiaceae), le maïs (*Zea mays*, Poaceae), le riz (*Oryza sativa*, Gramineae) et la banane plantain (*Musa acuminata*,

Musaceae). On retrouve la plupart de ces cultures sur les flancs des montagnes.

Les cours d'eau sont constitués des fleuves Cavally etassandra et leurs affluents, les rivières et autres points d'eau stagnants. Les bas-fonds, quant à eux, sont en majorité aménagés pour la riziculture.



Figure 5 : Photos illustrant un cours d'eau (à gauche) et une zone de bas-fonds (à droite)

Les terrains nus et habitations sont essentiellement constitués des zones urbanisées, de routes non bitumées et de terrains nus.



Figure 6 : photos montrant une zone d'habitation (à gauche) et un terrain nu servant de marché (à droite)

Qualité de la classification : Les matrices de confusions des traitements indiquent que les coefficients de kappa des classifications sont de 0,95 et 0,956, respectivement pour les images de 2015 et 1990 (Tableau 1) et de 0,947 et 0,934 respectivement pour les images des années 2011 et 2000 (Tableau 2). Ces valeurs coefficients de kappa obtenues permettent de conclure que les résultats de ces classifications sont statistiquement acceptables (Landis et Koch, 1977).

Ces tableaux affichent dans la diagonale le pourcentage de pixels bien classés et hors diagonale le pourcentage de pixels mal classés. On constate qu'en 2015, la classe cours d'eau et Bas-fonds présente un faible pourcentage de pixels bien classés (67,79) à cause des confusions avec le

classe forêts denses (12,78%) et la classe forêts dégradées (19,43%). Par ailleurs, en 1990, la classe forêts denses présente de fortes confusions (29,33%) avec la classe cours d'eau et Bas-fonds, d'où le faible pourcentage de pixels de cours d'eau et Bas-fonds bien classés (70,67%).

Tableau 4 : Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat OLI-TIRS de 2015

Signatures Spectrales	Classes thématiques					Total signatures
	Forêts denses	Forêts dégradées	Cultures et Jachère	Cours d'eau et Bas-fonds	Terrains nus et Habitations	
Forêts denses	88,73	0	0	12,78	0,03	7,70
Forêts dégradées	9,44	99,57	15,26	19,43	0	51,46
Cultures et Jachère	0	0,43	84,74	0	0	7,88
Cours d'eau et Bas-fonds	1,83	0	0	67,79	0	2,19
Terrains nus et Habitations	0	0	0	0	99,97	30,77
Total Classe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Précision Globale = 96.50%

Coefficient de Kappa = 0.945

Tableau 5 : Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat TM de 1990

Signatures Spectrales	Classes thématiques					Total signatures
	Forêts denses	Forêts dégradées	Cultures et Jachère	Cours d'eau et Bas-fonds	Terrains nus et Habitations	
Forêts denses	93,89	0	0	29,33	0	11,85
Forêts dégradées	5,24	98,89	5,99	0	0	45,97
Cultures et Jachère	0	1,11	94,01	0	0	13,05
Cours d'eau et Bas-fonds	0,87	0	0	70,67	0	2,75
Terrains nus et Habitations	0	0	0	0	100,00	26,38
Total Classe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

L'étude diachronique de l'occupation du sol de 1990 à 2015 révèle une modification de l'espace naturel avec un accroissement (15,13 %) des forêts dégradées avec un gain de 85 450 ha, une extension des terrains nus et habitations (10,46 %), représentant une augmentation de 33 919 ha et une réduction de la superficie des forêts denses (-35,60%), marquée par une perte de près de 51 800 ha. Par contre, on observe une diminution des surfaces cultivées et des jachères au profit des forêts dégradées, terrains nus et habitations. Les surfaces occupées par les cours et bas-fonds n'ont pas subies de changement notable (Tableau 3).

Tableau 6 : Evolution de l’occupation du sol en fonction du temps

Types d'occupation du sol	Superficies (Ha)				Variation (1990-2015)	
	1990	2000	2011	2015	%	Superficie
Forêts denses	145 565,40	150 397,11	145 485,18	745,95	-35,6	-51 819,45
Forêts dégradées	564 654,53	477 151,51	635 205,64	650 105,35	15,13	85 450,82
Cultures et Jachères	160 306,20	166 898,61	613,84	755,76	-42,14	-67 550,44
Cours d'eaux et bas-fonds	33 740,05	33 740,05	740,05	740,05	0	0,00
Terrains nus et Habitations	324 133,81	400 212,72	349 355,29	358 052,89	10,46	33 919,08

La figure 6 permet de mettre en évidence la distribution spatiale des différentes classes d’occupations des sols de 1990 à 2015, sur toute la région du Tonkpi. En 1990, les différentes classes d’occupations sont très bien différenciées par des zones bien précises, avec des massifs forestiers au Nord-Ouest et des grandes zones agricoles au centre eu dans la pointe sud de la région. A partir de 2000 à 2015, on note une dissémination des différentes classes d’occupation du sol sur toute la région.

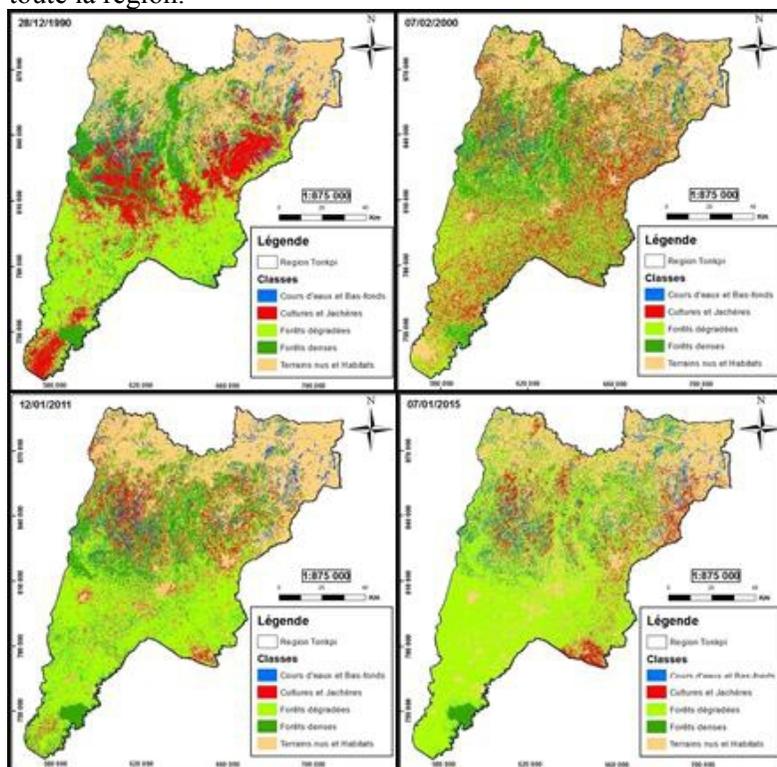


Figure 7: Evolution de l’occupation du sol dans la région du Tonkpi

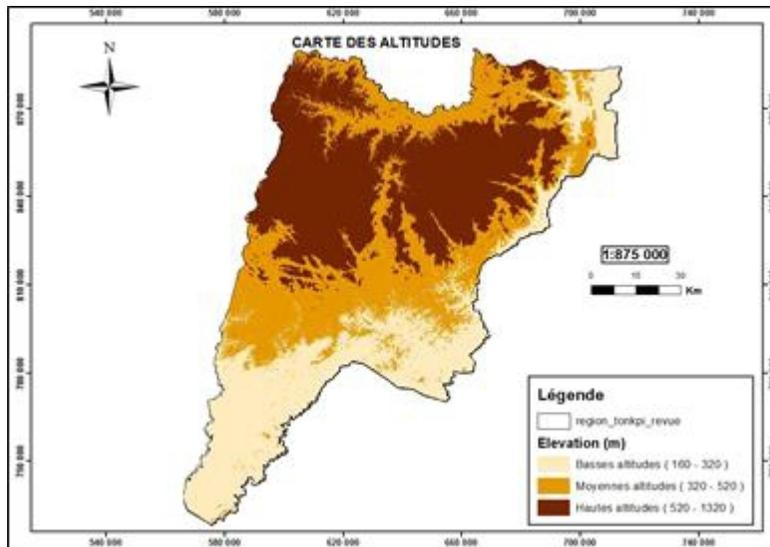


Figure 8 : carte des classes d'altitude de la région du Tonkpi

L'analyse de la figure 7 et du tableau 4 montre que les basses altitudes (situées entre 160 m et 320 m d'altitude par rapport au niveau de référence de la mer) sont localisées en majorité au Sud de la région et dans des zones disséminées à l'Est de la région. Elle couvre une superficie de 3403 km² soit 27,7% de la superficie totale de la région.

Les zones de moyennes d'altitudes (320 m - 520 m) se concentrent essentiellement au Centre et au Nord de la zone d'étude. Elles couvrent 4250km² et représentent 34,6% de la superficie de la région du Tonkpi.

Enfin, la classe des hautes altitudes (520 m - 1320 m) qui occupent la majorité de la région (37,7%) avec 4631km² se rencontrent dans toute la partie Nord de la région du Tonkpi.

Tableau 7 : Les superficies des classes d'altitude de la région du Tonkpi

Classe des altitudes	Altitudes	Superficies	Pourcentage
Basses altitudes (BA)	160 - 320	3 403	27,7
Moyennes altitudes (MA)	320 - 520	4 250	34,6
Hautes altitudes (HA)	520 - 1 320	4 631	37,7
Total		12 284	100

Les résultats indiquent que les basses altitudes (160 m - 320 m) sont localisées en majorité au Sud de la région et dans des zones disséminées à l'Est de la région. Elles couvrent une superficie de 3403 km² soit 27,7% de la superficie totale de la région.

Les zones de moyennes d'altitudes (320 m - 520 m) se concentrent essentiellement au centre et au nord ; elles couvrent 4250km² et représentent 34,6% de la superficie de la région. On trouve par contre dans toute la partie

nord de la région, les hautes altitudes (520 m - 1320 m) qui couvrent 4631km² soit 37,7% de la superficie.

Evolution de l'occupation des sols en fonction des altitudes Le tableau 5 met en évidence une augmentation très importante des terrains nus et habitations en basses altitudes (88%) de 1990 à 2015.

Tableau 8 : Variation de l'occupation du sol en fonction du temps (en Ha) en basses altitudes

Types d'occupation du sol	Superficies (ha)				% de variation (1990-2015)
	1990	2000	2011	2015	
Forêts denses	19 735,49	32 050,90	35 531,19	12 848,64	-34,90
Forêts dégradées	246 013,04	162 601,44	225 713,32	209 336,45	-14,91
Cultures et Jachères	27 221,36	53 087,99	11 685,40	30 221,01	11,02
Cours d'eaux et bas-fonds	1 701,34	1 701,34	1 701,34	1 701,34	0
Terrains nus et Habitations	45 595,78	90 825,81	65 635,28	86 160,02	88,96

Tableau 9 : Evolution de l'occupation du sol en moyennes altitudes

Types d'occupation du sol	Superficies (ha)				% de variation (1990-2015)
	1990	2000	2011	2015	
Forêts denses	58 745,77	52 642,40	56 440,98	33 340,31	-43,25
Forêts dégradées	143 566,61	162 336,24	195 064,11	216 987,39	51,14
Cultures et Jachères	72 254,42	59 569,66	21 401,74	34 335,99	-52,48
Cours d'eaux et bas-fonds	10 200,62	10 200,62	10 200,62	10 200,62	0,00
Terrains nus et Habitations	140 258,58	140 275,79	141 918,17	130 160,85	-7,20

Ces zones sont essentiellement localisées au Nord–Est de la région d'étude (Figure 8). Les forêts dégradées situées particulièrement au Sud, occupent la majeure partie des basses altitudes mais ont subies une diminution de 14,91% de leurs superficies sur la même période.

Le tableau 6 montre que dans les zones de moyennes altitudes, toutes les occupations des sols ont subi une régression à l'exception des forêts dégradées qui ont connu une hausse ; elles ont même doublé en 2015 (51,14%). Comme le montre la figure 9, cette forte dégradation s'est accentuée au centre de la région en résorbant les superficies des cultures et jachères, qui ont connues une régression de moitié sur la même période.

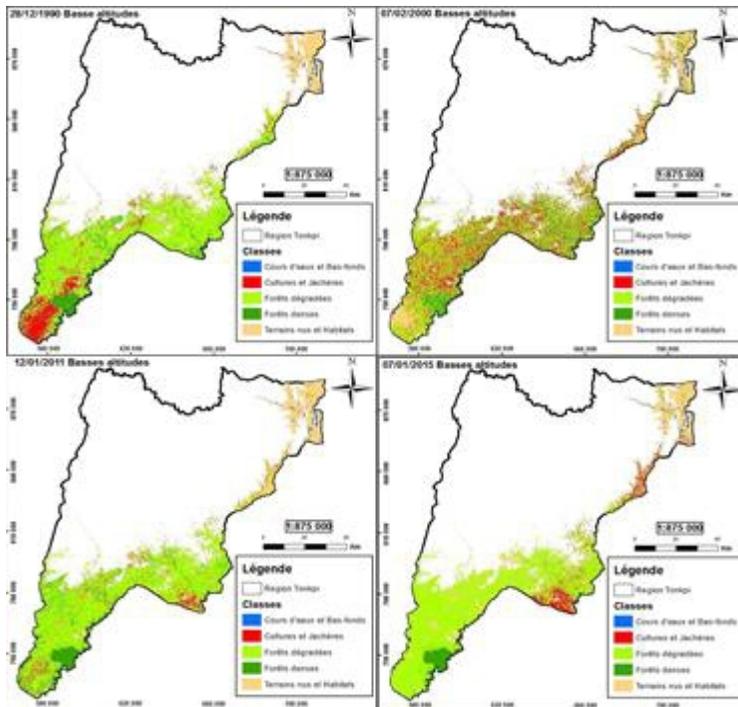


Figure 9: Evolution de l'occupation du sol en basses altitudes

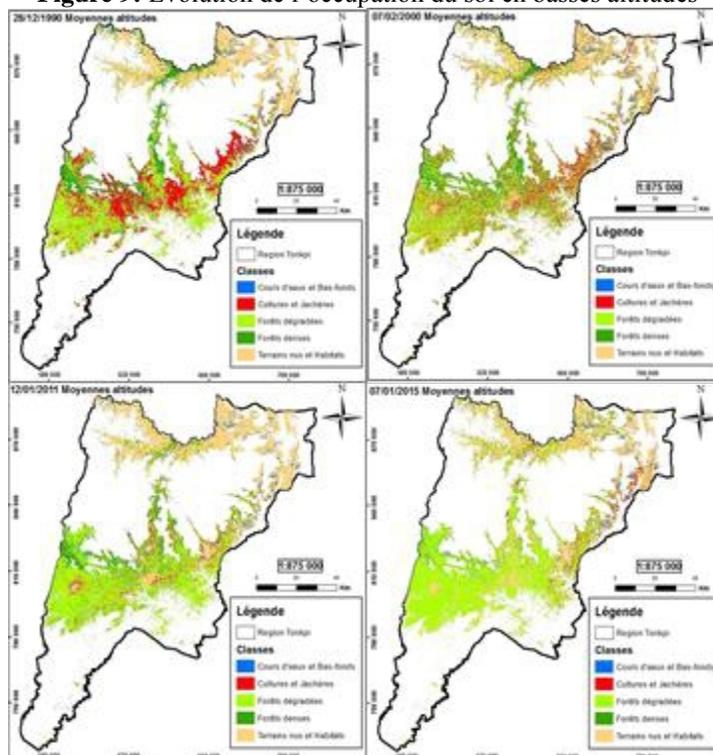


Figure 10: carte d'évolution de l'occupation du sol en moyennes altitudes

Les zones de moyennes altitudes, comme le montre la figure 9 sont dominées par les forêts dégradées situées au centre de la région et qui s’étendent au fil des années de 1990 à 2015. Le tableau 7 montre une tendance à la baisse régulière des superficies de forêts denses, de cultures et de jachères de 1990 à 2015 avec un taux plus important pour les cultures et jachères (-53,64%). Par contre les forêts dégradées connaissent une augmentation avec un taux de 27,82%.

Tableau 10 : Evolution de l’occupation du sol en hautes altitudes

Types d'occupation	1990	2000	2011	2015	% de variation
Forêts denses	67 083,82	65 703,75	53 512,75	47 556,77	-29,11
Forêts dégradées	175 074,78	152 213,56	214 428,14	223 781,86	27,82
Cultures et Jachères	60 830,64	54 240,57	31 526,77	28 198,54	-53,64
Cours d'eaux et bas-fonds	21 837,91	21 837,91	21 837,91	21 837,91	0
Terrains nus et Habitats	138 279,85	169 111,10	141 801,58	141 732,28	2,50

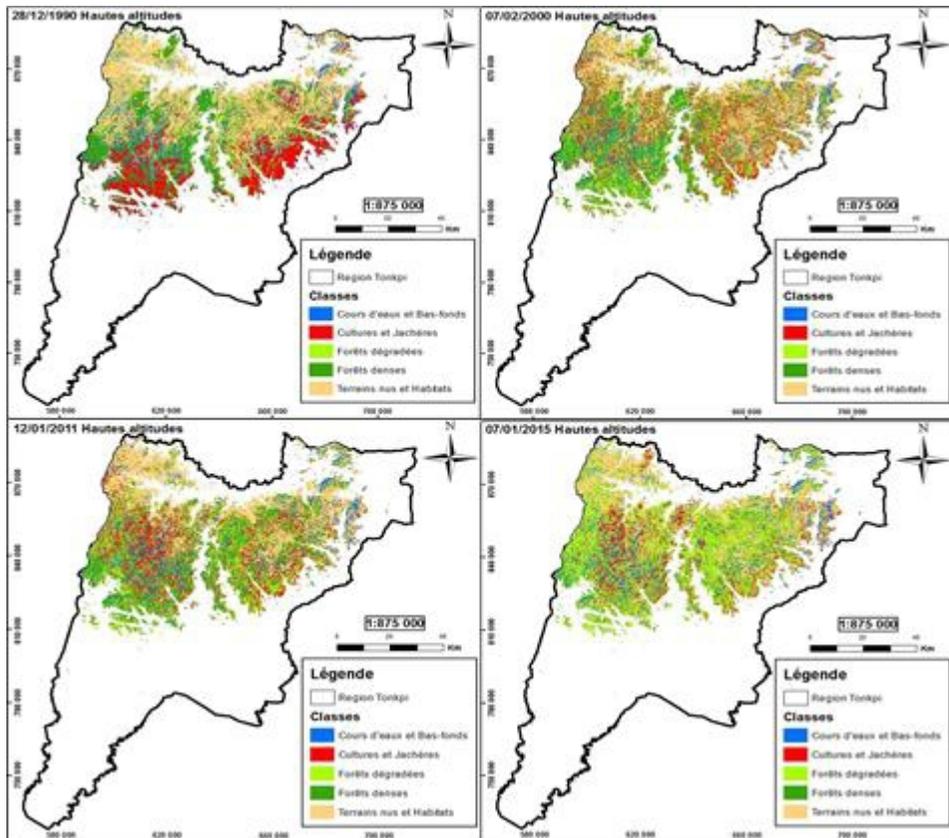


Figure 11: Evolution de l’occupation du sol en hautes altitudes

Comme le montre la figure 10, les zones de hautes altitudes sont dominées par les forêts dégradées et les terrains nus et habitations. Les

grandes zones de cultures de 1990 se dispersent en de petites zones. Les forêts denses disparaissent peu à peu pour donner place aux forêts dégradées.

Dynamique spatio-temporelle au sein d'une classe d'occupation du sol en fonction de l'altitude

Le tableau 8 montre que les forêts denses, en général, ont subi une réduction de 35% de leurs superficies entre 1990 et 2015, ce qui équivaut à une perte de plus de 51 800 ha. Cette dynamique est observée au niveau de toutes les altitudes et est plus marquée en moyenne altitude avec des pertes qui avoisinent la moitié des superficies.

Concernant les forêts dégradées, on observe une augmentation des superficies de plus de 15% soit 85 450 ha sur la période de 1990 à 2015. Cette augmentation est plus marquée au niveau des moyennes altitudes avec une hausse de près de 73 420 ha. Par contre, cette dynamique n'est pas constatée au niveau des basses altitudes où l'on observe une diminution des surfaces de près de 15%, soit environ 36 676 ha.

Tableau 11 : Evolution la superficie au sein d'une classe d'occupation du sol en fonction de l'altitude

Types d'occupation du sol	1990	2000	2011	2015	% de variation (1990-2015)
Forêts denses	145 565,40	150 397,11	145 485,18	93 745,95	-35,6
<i>Hautes altitudes</i>	67 083,82	65 703,75	53 512,75	47 556,77	-29,11
<i>Moyennes altitudes</i>	58 745,77	52 642,40	56 440,98	33 340,31	-43,25
<i>Basses altitudes</i>	19 735,49	32 050,90	35 531,19	12 848,64	-34,9
Forêts dégradées	564 654,53	477 151,51	635 205,64	650 105,35	15,13
<i>Hautes altitudes</i>	175 074,78	152 213,56	214 428,14	223 781,86	27,82
<i>Moyennes altitudes</i>	143 566,61	162 336,24	195 064,11	216 987,39	51,14
<i>Basses altitudes</i>	246 013,04	162 601,44	225 713,32	209 336,45	-14,91
cultures et jachères	160 306,20	166 898,61	64 613,84	92 755,76	-42,14
<i>Hautes altitudes</i>	60 830,64	54 240,57	31 526,77	28 198,54	-53,64
<i>Moyennes altitudes</i>	72 254,42	59 569,66	21 401,74	34 335,99	-52,48
<i>Basses altitudes</i>	27 221,36	53 087,99	11 685,40	30 221,01	11,02
Terrains nus et habitations	324 133,81	400 212,72	349 355,29	358 052,89	10,46
<i>Hautes altitudes</i>	138 279,85	169 111,10	141 801,58	141 732,28	2,5
<i>Moyennes altitudes</i>	140 258,58	140 275,79	141 918,17	130 160,85	-7,2
<i>Basses altitudes</i>	45 595,78	90 825,81	65 635,28	86 160,02	88,96

Les superficies emblavées en cultures et les jachères connaissent en général, une réduction de 42%, soit plus de 67 500 ha de perte. Cette réduction est également plus importante au niveau des moyennes altitudes

avec une perte de près de 40 000 ha. Par contre au niveau des basses altitudes, on observe une augmentation de près de 3 000 ha de surfaces cultivées ou abandonnées en jachères.

S'agissant des surfaces dévolues aux terrains nus et habitations, on constate qu'il ya une augmentation de 10, 46%, soit un hausse de près de 34 000 ha. Cette dynamique est plus marquée au niveau des basses altitudes avec un gain de plus de 40 000 ha. Mais, au niveau des moyennes altitudes, on observe une baisse de plus de 10 000 ha.

Traitement numérique : La discrimination spectrale des types d'occupation du sol, a fait suite à des visites de terrain. Ces visites ont permis la collecte de données au niveau des types d'occupation du sol. Les traitements numériques ont donc été validés par l'analyse statistique des résultats (matrices de confusions), mais également par la confrontation des données spectrales fournies par les images et les données de terrain. La visite post classification a finalisé la validation des résultats. Au regard de ce qui précède, nous pouvons dire que nos résultats sont fiables. Ainsi,

L'imagerie satellitaire Landsat a permis d'avoir une vision synoptique des types d'occupation du sol. On note que la sélection des sites à échantillonner dans les différents types d'occupation du sol et leur repérage dans la région du Tonkpi, a été rendue possible par les images Landsat (Achard et al., 2002).

Les précisions globales des traitements estimées à 96.50% et 96.9%, respectivement pour les années 2015 et 1990, restent très proches des valeurs obtenues par d'autres auteurs ayant travaillé les images Landsat. En effet, les travaux de Youssef (2013) sur l'Étude diachronique de l'occupation du sol et de modélisation des processus érosifs du bassin versant du Bouregreg (Maroc) à partir des images Landsat, ont respectivement obtenu des précisions globales de classifications de 89,25% et 87,67% pour les années 1987 et 2011.

N'da et al., (2005), ont quant à eux obtenu une précision globale de 82,60% et 82,66%, respectivement pour les années 2003 et 1986, en classifiant des images Landsat couvrant le Parc de la Marahoué, en vue d'étudier la déforestation.

Dynamique forestière dans la Région du Tonkpi : De façon générale, cette étude permet de mettre en évidence le phénomène de déforestation de 1990 à 2015 avec une perte de près de 52 000 ha de forêts denses, soit un taux de déforestation de 2080 ha/an. Cette déforestation est la résultante de la combinaison de divers facteurs socioéconomiques, politiques et militaires défavorables à la conservation de la nature. En effet, de 1990 à 2000, nous constatons une augmentation de 6500 ha de terres emblavées par l'agriculture et les jachères. Cette situation s'explique par la mise en œuvre

dans cette période d'un vaste projet agricole : le projet BAD-OUEST, qui a aménagé au moins 4000 ha de terres pour la riziculture irriguée. Ces résultats sont similaires à ceux des travaux d'EL GAROUANI et al., (2007) qui a mis en évidence le rôle joué par l'agriculture dans la déforestation dans les régions montagneuses du bassin versant de l'Oued Tlata au Maroc. Selon, cet auteur, de 1994 à 2000, les surfaces des forêts ont régressé de 1, 29 km² à 1,06 km² tandis que les superficies occupées par l'agriculture ont connu un accroissement sur la même période de 10,95 km² à 16,56 km².

Outre l'agriculture, la déforestation dans la région du tonkpi s'explique par la crise militaro-politique qu'a connu la Côte d'Ivoire, à partir de 2002, qui a particulièrement sévi dans la région du Tonkpi. Cette crise s'est traduite par le retrait de l'Administration forestière, laissant ainsi un libre accès à l'exploitation forestière de type minier.

Conclusion

L'approche méthodologique adoptée au cours de cette étude, a permis de montrer que les traitements numériques d'images Landsat ETM+ et TM associés aux observations et mesures de terrain constituent un moyen efficace pour discriminer les différents types d'occupation du sol dans la région du Tonkpi. Ainsi, ont été identifiées : les forêts denses, les forêts dégradées, les cultures et jachères, les cours d'eau et bas-fonds et les terrains nus et habitations.

L'étude diachronique de l'occupation du sol de 1990 à 2015 révèle une modification de l'espace naturel avec une déforestation de 51 819 ha (-35,6%), la réduction des surfaces occupées par les cultures et les jachères de 42,14% et une augmentation des forêts dégradées de 15,13% et des terrains nus et habitations 10,46%.

Par ailleurs, le découpage du relief en fonction des altitudes a permis de montrer que les hautes altitudes, comprises entre 520 m et 1320 m occupaient la plus forte proportion (37,7%) de la superficie totale de la région du Tonkpi.

La prise en compte du relief dans l'analyse de la dynamique de l'occupation du sol montre une répartition hétérogène en fonction des altitudes. Ainsi, au niveau des terrains nus et habitations, l'accroissement est plus important au niveau des basses altitudes (+88, 96%), tandis qu'au niveau des sols occupés par la végétation, la variation de surface est particulièrement plus marquée au niveau des moyennes altitudes. C'est ainsi qu'en ce qui concerne, les forêts dégradées, l'extension des surfaces est plus marquée au niveau des moyennes altitudes (-51,14%) avec un gain de 73 420 ha. Quant aux cultures et jachères et forêts denses, elles enregistrent également une réduction dans les moyennes altitudes.

References :

1. Achard, F., Eva, H. D., Stibig, H. J., Mayaux, P., Gallego, J., Richard, T. et Manlingreau, J. P. (2002) Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forest. *Science* 297 (5583), p. 999-1002.
2. Aké Assi, L. (1984) Flore de la Côte-d'Ivoire: Etude descriptive et biogéographique avec quelques notes ethnobotaniques. Tome I.II. III. Thèse Doct. Ès-Sc. Nat., F.A.S.T. Univ. Abidjan. 1205p.
3. Bakayoko S., Soro D., Kouadio K.K.H., KONAN-Waidhet A.B., ANGUI P., « Characteristics of Tonkpi Mountain soils and plateaus soils in West Côte d'Ivoire » [archive], sur heraldjournals.org, Décembre, 2013 (consulté le 22 juin 2014)
4. Caloz, R., Blaser, T. J. et Willemin, G. (1993) Création d'une ortho-image à l'aide d'un modèle numérique d'altitude : influence des modes de rééchantillonnage radiométrique. In télédétection et cartographie. Ed. aupelf-uref. Les Presses de l'université du Québec. p. 17-30.
5. Chatelain, C. (1996) Possibilités
6. Delvaux M. & Nys C., (2002). Géographie : Lire le monde. De Boeck Edition, Bruxelles. Pages 296. ISBN : 2-8041-4075-X.
7. Dibi H. N'Da, Edouard Kouakou N'Guessan, Mathieu Egnankou Wajda, Kouadio Affian. (2008) Apport de la télédétection au suivi de la déforestation dans le Parc National de la Marahoué (Côte-D'Ivoire). *Bulletin - Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, pp.17-34.
8. El GAROUANI A., CHEN H., LEWIS L., TRIBAK A., ABAHROUR M., (2007). Apport de la Télédétection et du SIG pour le suivi spatio-temporel de l'occupation du sol et de l'érosion nette dans le bassin de l'Oued Tlata (Maroc), Actes des JSIRAUF, Hanoi, 6-9 novembre 2007
9. FAO (2007). Situation des forêts en 2007, Rome, 143p. <http://www.fao.org/docrep/009/a0773f/a0773f00.htm>
10. Foody, G. M., Palubinska, G., Lucas, R. M., Curran, P. J. and Honzak, M. (1996) Identifying terrestrial carbon sinks: classification of stages in regenerating forest from Landsat TM data. *Remote Sens. Environ.* 55, p. 205-216.
11. Guillaumet, J. L. et Adjanohoun, E. (1971). La végétation de Côte d'Ivoire. In : Avenard J.M., Eldin E., Girard G., Sircoulon J., Touchebeuf P., Guillaumet J. L., Adjanohoun E. and Perraud A. (eds). *Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire*. 159-263. O.R.S.T.O.M., Paris.
12. J.A. Mouton (1959), *Agronomie Tropicale*, Vol. XIV, N° 2, 225-231.

13. Landis J. R. and Koch G. G. (1977) The measurement of observer agreement for categorical data *Biometrics*, (33) 159-174, dans le *Kappa de Cohen: un outil de mesure de l'accord inter-juges sur des caractères qualitatifs* Frederic Santos CNRS, UMR 5199 PACEA ; 2015
14. N'Da Hippolyte Dibi, Edouard Kouakou N'Guessan, Mathieu Egnankou Wajda, Kouadio Affian, (2008). Apport de la télédétection au suivi de la déforestation dans le Parc National de la Marahoue *Bulletin - Société Française de Photogrammétrie et de télédétection, (Cote d'Ivoire)*. pp.17-34.
15. N'guessan K. A. (1989). *Commentaire du Code Forestier et de la législation forestière de la Côte d'Ivoire*. Librairie Générale de Droit et de Jurisprudence, Paris, France, 333 p
16. N'guessan, K. E. et N'da, D. H., Bellan, M. F., Blasco, F. (2006) *Pression anthropique sur une réserve forestière en Côte d'Ivoire: Apport de la télédétection*. *Télédétection*, 2006, Vol. 5, n° 4, pp. 307-323.
17. N'guessan, K. E. (2004) *Utilisation des données satellitaires à haute résolution pour l'étude des ressources végétales en Côte d'Ivoire: Cas des forêts classées de Badenou et du Haut Sassandra*. Thèse de Doctorat. Université Paul Sabatier, Toulouse France. 219p.
18. SODEFOR (1996) *Plan d'aménagement de la forêt classée de Bouaflé*. Ministère de l'agriculture et des ressources animales. P. 3-61.
19. Song, C., Curtis, E. Woodcock, Karen C. Seto, Mary P. Lenney, and Scott, A. Macomber (2001) *Classification and change detection using Landsat TM data : When and how to correct atmospheric effects ?* *Remote Sens. Environ.* 75, p. 230-244.
20. Youssef El HADRAOUI, (2013). *Étude diachronique de l'occupation du sol et de modélisation des processus érosifs du bassin versant du Bouregreg (Maroc) à partir des données de l'Observation de la Terre*. Maroc.