Télédétection, 2003, vol. 3, n° 5, p. 429–441
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2003 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*
Imprimé en France

ÉVALUATION DE LA PRÉCISION DES TRAITEMENTS ANALOGIQUES DES IMAGES SATELLITAIRES DANS L'ÉTUDE DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL

VINCENT JOSEPH MAMA*[a] et JOSEPH OLOUKOI[b].

a Institut National des Recherches Agricoles du Bénin
06 B. P. 1105, Cotonou, Bénin.
Téléphone : 229 33 55 83 ; télécopieur : 229 3342 39/33 42 41

b Département de géographie, Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines,
Université d'Abomey Calavi, 06 B. P., Cotonou, Bénin

Courriel [(a,b)] : mamvincent@yahoo.com ; chabijos@yahoo.fr

(soumis le 6 janvier 2003 ; révisé le 5 mars 2003 ; accepté le 7 juillet 2003)

Une étude basée sur l'analyse des données satellitaires multidates et multisbandeses a été réalisée en vue d'évaluer la dynamique de l'occupation du sol dans la région de Savè (République du Bénin) fortement marquée par des migrations de populations à la recherche de terres agricoles. Des images HVR(XS) de SPOT-1 de décembre 1986 et de ETM de Landsat-7 de décembre 1999 ont été utilisées pour cette analyse. Pour s'assurer de la qualité de la précision de l'interprétation des images et de la classification de l'occupation du sol, 807 points proportionnellement répartis selon l'importance des classes ont été enregistrés sur la carte de base utilisée pour les travaux de terrain. Le pourcentage de points de terrain qui s'accordent avec ceux de la carte détermine le degré de précision de l'interprétation de l'image satellitaire. L'évaluation qualitative de la précision de l'interprétation a été réalisée à l'aide de l'indice de Kappa déterminé à partir d'une matrice de confusion. Les résultats de cette analyse ont montré que la précision obtenue de la classification des images est évaluée à 76,2 % et l'indice de Kappa à 0,69. En regroupant les classes de l'occupation du sol, les erreurs d'omission et de confusion dans la classification diminuent de plus de 68 %. Il ressort de cette étude que, plus détaillée est une classification, moins précise elle devient. En conséquence, toute opération de photo-interprétation devra s'accompagner d'une analyse de sa précision.

L'étude de la dynamique intervenue dans l'occupation du sol de 1986 à 1999 fait apparaître que le taux moyen annuel de régression calculé au niveau de ces formations, donne 1 % à Alafia ; 2,3 % à Kilibo et 1,8 % à Tchaourou. En définitive, cette analyse montre que les migrations et la colonisation agricole des terres ont entraîné des modifications profondes dans les formes d'utilisation des terres et ont été un élément très déterminant dans la dynamique de l'occupation du sol.

Mots-clefs : traitement analogique ; colonisation agricole ; dynamique de l'occupation du sol ; précision de la classification ; données multidates ; données multibandes ; Bénin.

EVALUATION OF ANALOGICAL SATELLITE IMAGE PROCESSING ACCURACY IN A STUDY OF LAND COVER DYNAMICS

A study based on satellite multitemporal and multispectral image data analysis was undertaken in order to assess the land cover change dynamics in Savè Area located in Republic of Benin, an area where heavy in migrations used to take place. SPOT-1 VHR-XS and ETM Landsat-7 images acquired respectively in December 1986 and December 1999 were used for this analysis. To ensure the quality and the accuracy of the image interpretation and the land use classification 807 coordinate points proportionally distributed according to the land use class area, were recorded and reported on the base map used for the field check. The percentage of fitness represents to some extent the degree of accuracy of the image interpretation. Qualitative assessment was performed using Kappa index through a confusion matrix. The results of this analysis have shown that the land use classification accuracy was estimated to 76,2 % and Kappa index to 0,69. When land use classes are merged, omission errors and commission errors are reduced to 68 %. It comes up from this study that the more detailed a land cover classification is, the less accurate it becomes. The study of land use dynamics from 1986 to 1999 has shown that the mean annual regression rates for some vegetation classes are 1 % in Alafia key site, 2,3 % in Kilibo key site, and 1,8 % in Tchaourou key site. Finally, this study has shown that migrations and agricultural colonization cause profound modifications in the land use patterns and in land cover dynamics.

Keywords : analogical image processing; agricultural colonization; land cover dynamics; classification accuracy; multitemporal data; multispectral data; Benin.

---

* Correspondant principal

1. INTRODUCTION

La contrainte majeure souvent identifiée pour analyser les changements de l'occupation du sol est la disponibilité des données à utiliser. Dans de nombreuses institutions, quand ces données existent, elles sont obsolètes ou manquent de précision parce que n'ayant pas subi de test de qualité. Aussi, la précision des données générées lors de l'analyse des documents de base est aussi un facteur limitant qui biaise les résultats de l'occupation du sol (Nelson, 2000).

D'après van Genderen et Lock (1977), l'interprétation des images satellitaires s'accompagne toujours d'erreurs de tout genre. Les erreurs enregistrées pendant les interprétations manuelles résultent entre autres de la mauvaise identification des éléments, de leur généralisation excessive, des variations dans les détails de l'interprétation ainsi que des procédures d'enregistrement et d'intégration des données. Pour les traitements numériques au contraire, les erreurs évoquées ci-dessus proviennent essentiellement des interactions entre la structure spatiale du paysage considéré, de la résolution du capteur, de l'algorithme du pré-traitement de l'image et des procédures de classification (Story and Congalton, 1986).

Aussi, pour évaluer la précision de la classification, diverses méthodes sont utilisées. Certaines se fondent sur l'analyse des pixels issus de la classification de l'image utilisée (Mahavir and Galema, 1991 ; Natta, 2000). D'autres au contraire, qui s'appuient sur l'analyse des produits finis, consistent à déterminer la précision d'une carte par rapport à celle d'une autre de la même localité mais réalisée à des dates différentes et où l'une de ces cartes est considérée comme la carte de référence et la seconde, la plus récente, comme élément de comparaison.

S'il existe une kyrielle d'études orientées sur l'appréciation de la précision de la classification basées sur l'analyse des pixels qui correspond bien à la classification résultant du traitement numérique des images, en revanche très peu de recherches ont été entreprises sur la base de l'analyse des points de contrôle de terrain qui consiste à évaluer, pour toutes les strates de l'occupation du sol, le pourcentage de points contrôlés sur le terrain correspondant à ceux précédemment identifiés avant la mission de terrain. Pourtant, cette méthode basée sur l'analyse des points de contrôle de terrain s'adapte bien aux traitements analogiques des images. Cette situation s'explique par le fait que la production des cartes de manière analogique est souvent acceptée sans recours au test de précision (Anderson *et al.*, 1976 ; Ginevan, 1979). Comme la tendance actuelle penche de plus en plus vers une méthode mixte de production où le traitement analogique des images prend de plus en plus une place prépondérante, il s'avère nécessaire de disposer d'une approche permettant d'apprécier la précision des productions cartographiques.

Cette méthode, basée sur l'analyse des points de contrôle de terrain de la minute d'interprétation des images de 1999, s'est révélée très adaptée pour les traitements analogiques des images satellisables et mérite d'être mieux documentée. C'est pour ce faire que cette étude vise comme objectif global à évaluer la précision de la classification de l'occupation du sol en utilisant une méthode novatrice d'appréciation.

Ses objectifs spécifiques sont les suivants :

– analyser la dynamique de l'occupation du sol ;

– identifier les zones les plus affectées par la colonisation agricole du secteur d'étude.

2. SECTEUR D'ÉTUDE

Localisé dans la partie centrale du Bénin, le secteur d'étude est compris entre 8° et 9° de latitude Nord, 2°10' et 2° 49' de longitude Est (figure 1) et sa superficie a été évaluée à 5 870 km^2. Selon Afouda (1990), cette région est sous l'influence d'un climat de transition soudano-guinéen à fortes précipitations avec des températures qui sont sans grandes variations diurnes ou saisonnières dans l'ensemble et dont les moyennes mensuelles fluctuent autour de 27 °C à Savè et à Ouèssè et de 28 °C à Tchaourou. L'humidité relative moyenne avoisine 70 % avec des moyennes maximale et minimale respectivement de près de 95 % et 50 %. La moyenne inter-annuelle de l'évapotranspiration potentielle est de l'ordre de 1 497 mm à la station synoptique de Savè.

Le secteur est balayé par deux types de vents : la mousson et l'harmattan. La mousson souffle d'avril à novembre et engendre les précipitations. L'harmattan constitue un vent chaud et sec qui a une influence très marquée de décembre à février. La pluviométrie moyenne annuelle avoisine parfois 1 200 mm d'eau. L'analyse du diagramme climatique (figure 2) permet de scinder l'année en quatre phases d'événements bioclimatiques (Franquin, 1969).

Le réseau hydrographique comporte trois cours d'eau importants : l'Ouémé, la Beffa et l'Okpara et un réseau très ramifié et hiérarchisé d'affluents qui drainent tout le secteur d'étude.

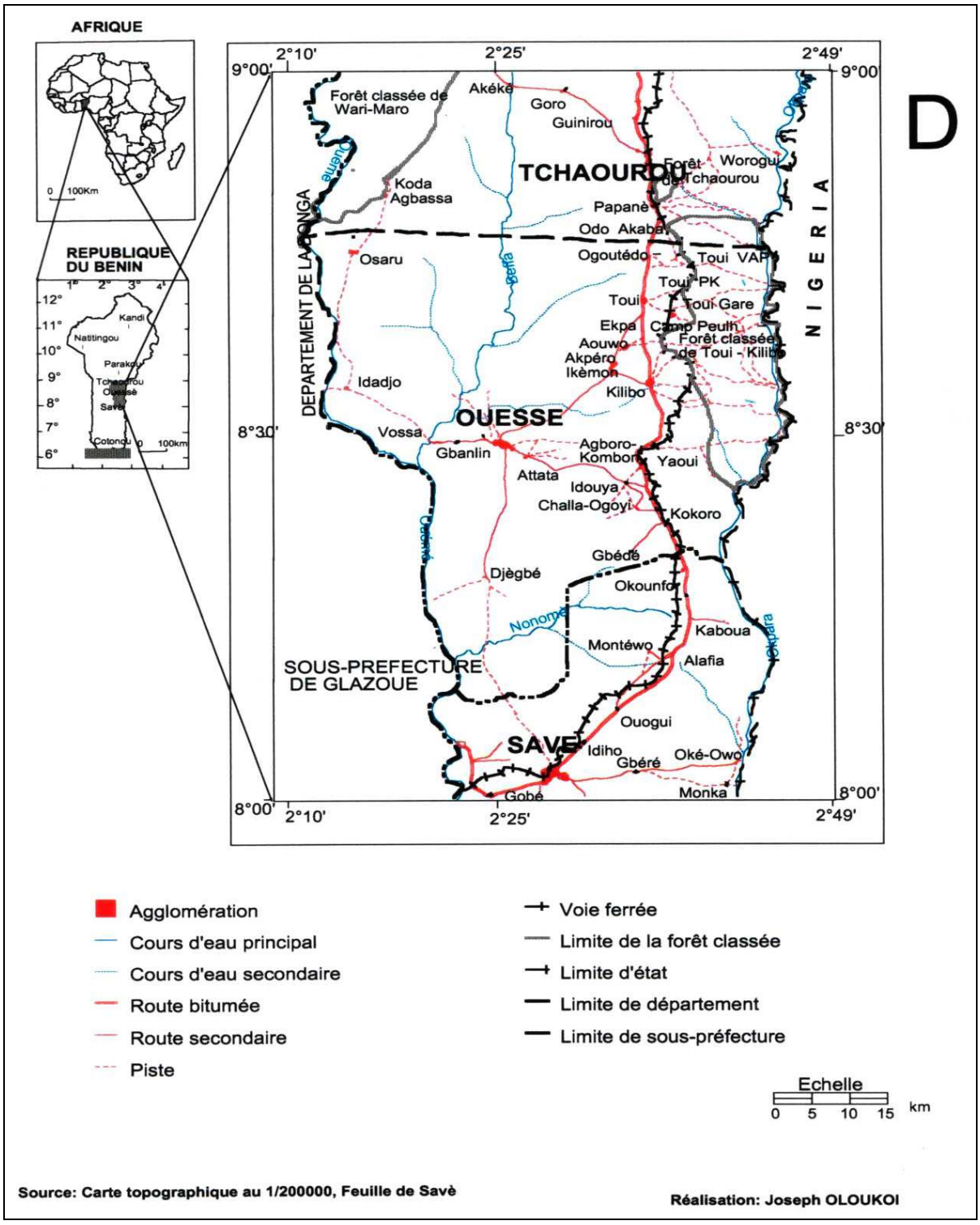
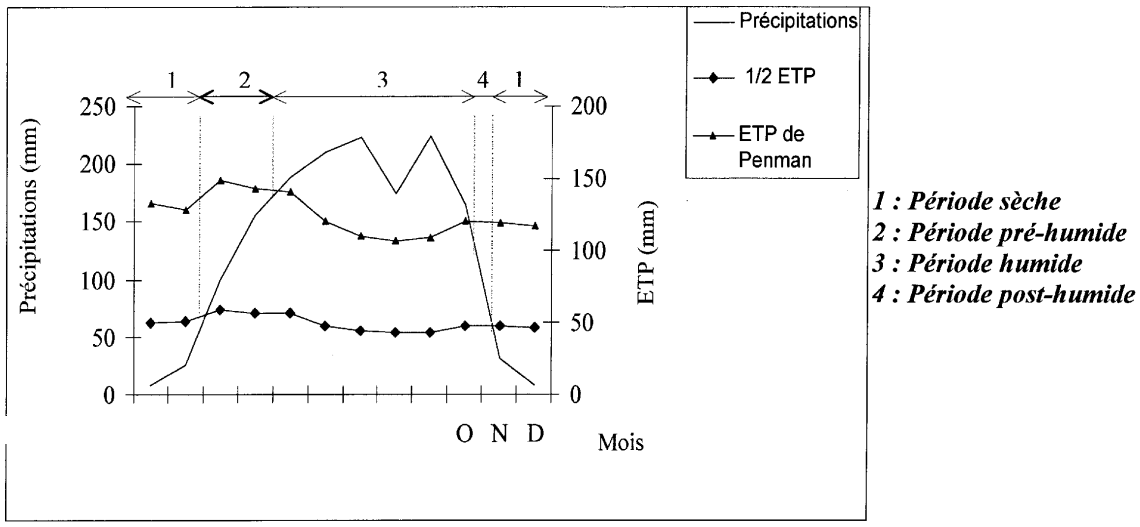


FIGURE 1 Localisation de la zone d'étude. *Study area location.*



Source: Station météorologique de Savè

FIGURE 2 Station météorologique de Savè.

Selon Igué (2000), les sols du secteur d'étude qui appartiennent au grand ensemble ferrugineux du milieu tropical, peuvent se répartir en trois grands ensembles qui sont les suivants : les sols hydromorphes, les sols à sesquioxydes de fer et de manganèse, et les sols minéraux bruts.

La végétation est constituée de formations ligneuses comme la savane arborée et arbustive, la forêt claire, la forêt dense sèche, la forêt galerie, riches en tapis herbacé dominé majoritairement par des graminées. Ces formations sont parsemées par endroits de champs et de jachères (Mama *et al.*, 1995).

Avec une population de 140 434 habitants en 1998 dont 49 % sont des hommes, le secteur d'étude est constitué de 3 sous-préfectures, de 17 communes, de 25 grandes agglomérations et d'un nombre important de villages et de hameaux (MEHU, 2001).

La densité de population estimée à 24 habitants/km^2, est relativement faible comparée à celles de certaines régions du sud du Bénin qui avoisinent 300 habitants/km^2. Cette faible densité explique l'abondance de terres encore vierges, propices à l'agriculture. C'est ce qui explique que ce secteur d'étude constitue une zone d'attraction pour les populations des zones surpeuplées du sud et du nord du pays. Ces populations migrent vers le secteur d'étude à un rythme pour lequel aucune statistique fiable ne permet d'en évaluer l'importance. La cohabitation des deux types de populations a contribué au changement brutal de l'occupation du sol et est à l'origine de la dynamique sociale qui se traduit par de nouvelles formes de gestions des ressources (Mama et Oloukoi, 2002).

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1. Matériel

Les différentes analyses proviennent de l'exploitation des images satellitaires HRV-(XS) de SPOT-1 du 20 décembre 1986 et ETM de Landsat-7 du 11 décembre 1999. En complément aux informations recueillies, des photographies aériennes de la mission IAP de 1982 ont été également exploitées. Le traitement des images a été réalisé à l'aide du logiciel ERDAS-Imagine. Par ailleurs, pour les applications du système d'information géographique (SIG), les logiciels ATLAS-GIS et ARC-VIEW ont été d'une grande contribution. Un GPS (*Global Positioning System*) portable *Magellan 15* a été utilisé pour la reconnaissance et le contrôle de terrain. Des cartes topographiques de l'IGN au 1 : 50 000 de 1982 et au 1 : 200 000 de 1965 ont été utilisées comme carte de base.

3.2. Méthode

3.2.1. Élaboration des données récentes basée sur l'analyse des images satellitaires

L'élaboration des données qui repose sur l'analyse analogique des images numériques HRV et ETM, a été réalisée les séquences ci-après :

• correction géométrique des images à l'aide d'un minimum de 20 points amers par image, sélectionnés à partir de la carte topographique ;

• identification visuelle des classes spectrales à l'écran à partir de la nomenclature adoptée par la FAO (Baltaxe, 1985) complétée par celles définies par Anderson *et al.* (1976) ;

• numérisation directe des classes spectrales à l'écran ;

• identification de 4 ha comme la plus petite superficie à cartographier (Anderson *et al.*, 1976) ;

• élaboration d'une couverture d'occupation du sol de toute la zone d'étude à partir des images ETM de 1999 et celle de trois sites clé à partir des images HRV de 1986 ;

• finalisation des bases de données de 1986 et de 1999.

Sur le tableau 1, on présente la classification à deux niveaux, basée sur la nomenclature adoptée par la FAO (Baltaxe, 1985 ; Anderson *et al.*, 1976) qui a servi de base pour l'élaboration de la présente nomenclature de l'occupation du sol.

TABLEAU 1 Classification des strates de l'occupation du sol. *Land cover classification.*

Code	1er niveau de classification	Code	2e niveau de classification
1	Forêt dense	1.1	Galerie forestière
		1.2	Forêt dense sèche
2	Forêt claire	2.0	Forêt claire et savane boisée
3	Savanes	3.1	Savane arborée arbustive
		3.2	Savane saxicole
		3.3	Savane à emprise agricole
4	Espace agricoles	4.1	Champs et jachère
		4.2	Plantation
5	Agglomération	5.0	Agglomération
6	Hydrographie	6.1	Cours d'eau principal (permanent)
		6.2	Cours d'eau secondaire (temporaire)
		6.3	Plan d'eau
7	Voie de communication	7.1	Route principale
		7.2	Route secondaire
		7.3	Voie ferrée

3.2.2. Estimation de la précision de l'interprétation des images

En vue de tester la précision de la classification de l'occupation du sol réalisée à partir des données de 1999, une méthode basée sur l'évaluation des points de contrôle a été tentée. Cette méthode consiste à vérifier sur le terrain, à partir de la minute d'interprétation, les points précédemment identifiés avant la mission de terrain pour chacune des classes de l'occupation du sol, et à déterminer le pourcentage de ces points vérifiés qui correspondent à ceux définis au préalable. Elle se réalise selon la procédure décrite ici :

– un échantillonnage stratifié a été adopté de manière à ce que les points de contrôle à vérifier sur le terrain soient définis proportionnellement à la taille de la strate ;

– pour tenir compte de la diversité des classes de végétation, un minimum de 15 points de contrôle est déterminé pour chacune des classes de grande taille ou présentant de grandes variabilités et un minimum de 3 points pour les autres classes de l'occupation du sol qui au contraire des premières prêtent peu à des confusions ;

– un total de 807 points a été défini pour l'ensemble de la zone d'étude ;

– au niveau de chaque strate, les points de contrôle sont autant que possible dispersés sur l'ensemble de la zone d'étude ;

– la précision de la localisation des points est obtenue à l'aide du GPS *Magellan 15* qui favorise une précision de l'ordre de 10 m ;

– une matrice de confusion a été construite (tableau 2) pour rendre compte des résultats ; la matrice révèle non seulement les erreurs générales commises au niveau de chaque classe lors de l'interprétation mais aussi les erreurs dues aux confusions entre les classes de l'occupation du sol ;

– les erreurs d'omission et de confusion ont été calculées pour chaque classe de l'occupation du sol ; les valeurs obtenues rendent compte des précisions de l'interprétation de chaque classe. En considérant une classe comme la forêt dense, on parle d'erreur d'omission quand cette classe de forêt a été omise sur la carte. L'erreur de commission ou de confusion intervient quand l'aire de forêt dense a été classifiée en une autre classe sur la carte.

L'indice de Kappa a été utilisé pour apprécier la précision de la classification adoptée sus décrite.

TABLEAU 2 Matrice de confusion pour l'évaluation de la précision de la classification. *Confusion matrix for classification accuracy assessment.*

		Points de contrôle de terrain									
		Gf	Fds	Fcs	Saa	Sea	Ss	Cj	Agg	Pe	**Total**
Strates	Gf	**13**	2								**15**
	Fds	1	**11**	3							**15**
	Fcs	1	3	**123**	42	5	2				**176**
	Saa		2	44	**172**	19	2				**239**
	Sea				3	**64**		3			**70**
	Ss						**9**				**9**
	Cj			4	38	16		**210**	2		**270**
	Agg								**3**		**3**
	Pe									**10**	**10**
	Total	**15**	**18**	**174**	**255**	**104**	**13**	**213**	**5**	**10**	**615**

Gf : galerie forestière ; Fds : forêt dense sèche ; Fcs : forêt claire et savane boisée ; Saa : savane arborée arbustive ; Sea : savane à emprise agricole ; Ss : savane saxicole ; Pe : plan d'eau ; Agglo : agglomération ; Cj : champs et jachères.

D'après Pontius (2000), l'indice de Kappa (k) est utilisé pour valider et estimer la précision dans le schéma de classification de la végétation.
Sa formule est la suivante :

$$\frac{P_0 - P_c}{P_p - P_c} \qquad (1)$$

où P_0 est égal au pourcentage réel obtenu de classification des éléments de l'occupation du sol; il est égal au quotient de la somme des chiffres de la diagonale de la matrice avec le total du nombre d'observations ;
où P_c est l'estimation de la probabilité d'obtenir une classification correcte ; pour calculer P_c, on procède de la façon suivante : on réalise les produits marginaux des valeurs des colonnes et des rangées au niveau de chaque cellule de la matrice, puis la somme des valeurs de la diagonale est divisée par le total des produits de chaque cellule de la matrice ; pour une classification correcte, la valeur de P_c est en général inférieure à P_0 ;
et où Pp est le pourcentage obtenu lorsque la classification est parfaite c'est-à-dire bonne à 100 %.

De ce qui précède, la formule (1) peut s'écrire :

$$K = \frac{P_0 - P_c}{1 - P_c} \qquad (2)$$

3.2.3. Évaluation de la dynamique de l'occupation du sol

En raison de l'étendue importante du secteur d'étude, trois sites d'étude ont été sélectionnés : Alafia, Kilibo et Tchaourou. Chaque site a été sélectionné de manière à ce qu'il soit le plus représentatif possible des tendances de l'occupation du sol de la sous-préfecture à laquelle il appartient.

Leur superficie correspond à 10 % de l'ensemble de la zone d'étude. C'est au niveau de chaque site que des études diachroniques ont été réalisées.

Un des objectifs visés par la réalisation de l'étude diachronique est de dégager les grands changements intervenus dans le temps et dans l'espace aux fins d'une planification adéquate dans la gestion des ressources naturelles et d'en évaluer leurs causes. Les données obtenues de l'interprétation des images HRV de décembre 1986 et de ETM de Landsat de décembre 1999 de chaque site ont été analysées et comparées. Pour chaque unité de l'occupation du sol, le taux d'évolution annuel est calculé selon la formule ci-après :

$$T_{annuel} = \frac{Vi_{1999} - Vi_{1986}}{100 \times P} \qquad (3)$$

où Vi_{1999} représente la valeur des statistiques de la strate i en 1999 ;
Vi_{1986} est la valeur des statistiques de la strate i en 1986 ;
P est la durée de la période d'observation entre 1999 et 1986 qui est 13 ans.

4. ANALYSE DES RÉSULTATS

4.1. Classification de la végétation : analyse de la matrice de confusion

De l'analyse des images, neuf classes d'occupation du sol ont été identifiées. Une matrice de confusion pour l'évaluation de la précision de la classification a été élaborée (tableau 2). Il ressort de cette analyse que, des 807 points contrôlés sur le terrain, seuls 615 correspondent aux strates auxquelles ils avaient été attribués. Cela génère une précision moyenne pour l'ensemble de la zone d'étude

évaluée à 76,2 %. L'indice de Kappa a été évalué à 0,69.

D'après Pontius (2000), dans une étude de l'occupation du sol, lorsque l'indice de Kappa évalué dans les opérations de classification est compris entre 50 et 75 %, la classification adoptée est valable et les résultats peuvent être judicieusement utilisés.

Comme on le présente sur les tableaux 2 et 3, certaines classes d'occupation du sol sont classifiées avec plus de précision que d'autres. En dehors de la savane saxicole, des plans d'eau et des agglomérations, qui affichent 100 % de précision, la galerie forestière présente une précision de 87 % dans la classification. La plus faible précision a été observée au niveau de la classe forêt claire et savane boisée.

À partir du tableau 2, les erreurs de confusion et d'omission ont été déterminées pour chaque classe de l'occupation du sol et se trouvent présentées sur le tableau 3.

Les erreurs d'omission et de confusion intervenues dans la classification ont été évaluées à 23,8 % (tableau 3). Les erreurs d'omission les plus élevées ont été enregistrées au niveau des classes de forêt claire et savane boisée (30 %) et de celle de savane arborée et arbustive (28 %). Aucune erreur d'omission n'a été commise au niveau des classes agglomération, plan d'eau et savane saxicole.

Par contre, des erreurs de confusion ont été enregistrées au niveau de 8 des 9 classes d'occupation du sol. Les valeurs les plus importantes ont été obtenues au niveau des classes suivantes : savane à emprise agricole 57,1 %, agglomération 66,7 % et forêt dense sèche 46,7 %. La plus faible valeur de l'erreur de confusion concerne la classe de champs et jachère (1,1 %).

En vue de réduire les erreurs de confusion et d'omission, on a procédé à un regroupement des classes de l'occupation du sol. Toutes les classes représentant la végétation ont été fusionnées pour constituer la classe de végétation, tandis que les autres ont été regroupées pour former la classe non-végétation. Au total, les classes de l'occupation du sol ont été réduites de 9 à 2 (tableau 4). Il ressort de l'analyse résultant du regroupement des classes de l'occupation du sol que moins il y a de classes, plus grande est la précision de la classification. En conséquence, les erreurs de confusion diminuent quand le nombre de classes de l'occupation du sol diminuent. Comme on le confirme sur le tableau 5, les erreurs de confusion et d'omission sont réduites de 68 % quand les classes de l'occupation du sol sont réduites de 9 à 2. En conséquence, il en résulte que plus détaillée est une classification, plus importantes sont les erreurs qui sont commises (Anderson *et al.*, 1976).

TABLEAU 3 Erreur de confusion et d'omission dans la classification d'occupation du sol. *Omission and confusion errors occuring during land cover classification.*

Classes	Erreur d'omission (%)	Erreur de confusion (%)	Précision (%)
Gf	15-13/15 = 13,3	15-13/15 = 13,3	86,7
Fds	15-11/15 = 26,7	18-11/15 = 46,7	73,3
Fcsb	176-123/176 = 30,1	174-123 = 29,0	69,9
Saa	239-172/239 = 28,0	255-172/239 = 34,7	70,1
Sea	70-64/70 = 8,6	104-64/70 = 57,1	71,4
Ss	9-9/9 = 0	13-9/9 = 44,4	100
Cj	270-210/270 = 22,2	213-210/270 = 1,1	70,2
Agg	3-3/3 = 0	5-3/3 = 66,7	100
Pe	10-10/10 = 0	10-10/10 = 0	100
Total	**23,8**	**23,8**	**615/807 = 76,2**

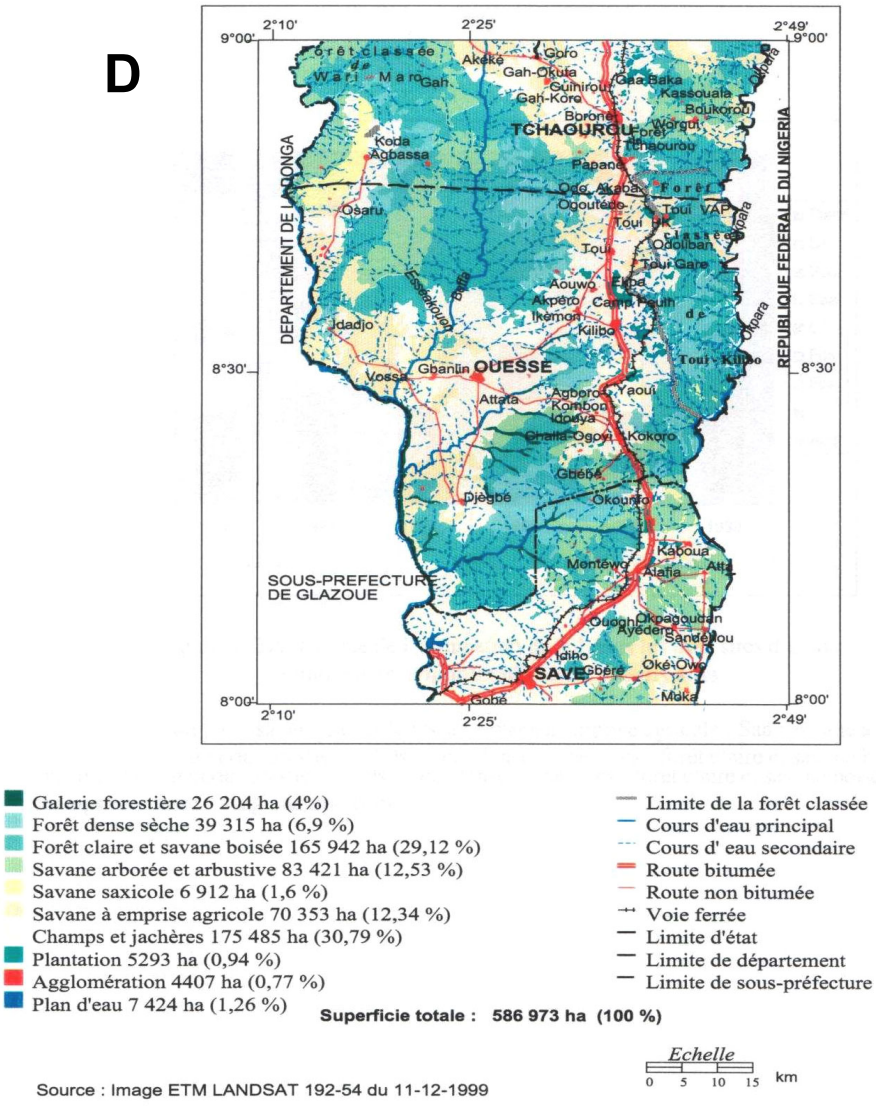
Gf : galerie forestière ; Fds : forêt dense sèche ; Fcs : forêt claire et savane boisée ; Saa : savane arborée arbustive ; Sea : savane à emprise agricole ; Ss : savane saxicole ; Pe : plan d'eau ; Agglo : agglomération ; Cj : champs et jachères.

TABLEAU 4 Taux de variation de la précision de la classification. *Variation rates in land cover classification accuracy.*

	Précision totale (%)	Erreur confusion (%)	Erreur d'omission (%)	Kappa
Classification normale	**76,2**	**23,8**	**23,8**	**0,69**
Classification avec regroupement	**92,4**	**7,6**	**7,6**	**0,83**
Taux de variation (%)	**21,2**	**-68,1**	**-68,1**	**20,3**

4.2. Analyse de l'occupation du sol

De l'analyse des images satellitaires de 1999, une carte d'occupation du sol de l'ensemble de la zone d'étude a été élaborée. L'examen de cette carte montre une forte extension des champs et jachères (31 %), suivis des forêts claires et savanes boisées (28 %), des savanes arborées arbustives (14 %) et des savanes à emprise agricole (12 %) (figure 3). Les forêts denses sèches, qui ne constituent que 7 % de la zone d'étude, existent sous forme de poches à cause de la forte pression dont elles sont l'objet de la part des producteurs de charbon de bois et des colons agricoles. Les grandes agglomérations, telles que Kilibo, Tchaourou et Diho, se retrouvent le long de la voie bitumée. Des hameaux se rencontrent le plus souvent au cœur des formations végétales, où les occupants s'installent pour pratiquer l'agriculture et d'autres activités génératrices de revenus. Les plantations sont constituées en grande partie d'espèces comme *Tectona grandis* et *Anacardium occidentale ;* cette dernière a été adoptée ces dernières années pour occuper les terres en jachère. En raison des revenus importants que les agriculteurs tirent de la vente des noix d'*Anacardium occidentale,* cette essence a pris progressivement de l'ampleur. Au total, plus de 66 % de la zone d'étude est couverte de végétation, ce qui représente une bonne réserve de terres aptes pour l'agriculture.



Galerie forestière 26 204 ha (4%)
Forêt dense sèche 39 315 ha (6,9 %)
Forêt claire et savane boisée 165 942 ha (29,12 %)
Savane arborée et arbustive 83 421 ha (12,53 %)
Savane saxicole 6 912 ha (1,6 %)
Savane à emprise agricole 70 353 ha (12,34 %)
Champs et jachères 175 485 ha (30,79 %)
Plantation 5293 ha (0,94 %)
Agglomération 4407 ha (0,77 %)
Plan d'eau 7 424 ha (1,26 %)

Limite de la forêt classée
Cours d'eau principal
Cours d' eau secondaire
Route bitumée
Route non bitumée
Voie ferrée
Limite d'état
Limite de département
Limite de sous-préfecture

Superficie totale : 586 973 ha (100 %)

Echelle 0 5 10 15 km

Source : Image ETM LANDSAT 192-54 du 11-12-1999

FIGURE 3 Occupation du sol du secteur d'étude (1999). *Land cover map of the study area (1999).*

4.3. Évaluation de la dynamique de l'occupation de 1986 à 1999

Les résultats de l'interprétation des images satellitaires des trois sites (Alafia, Kilibo, Tchaourou) (tableau 5) révèlent de façon générale une tendance à l'augmentation des strates sans végétation : champs et jachères, savanes à emprise agricole et des installations humaines (agglomérations). Corrélativement, on assiste à une régression des formations végétales : galeries forestières, forêts claires, savanes boisées, forêts denses sèches de même que les savanes arborées et arbustives.

TABLEAU 5 Matrice de confusion pour les classes regroupées. *Confusion matrix for merged land cover classes.*

	Points de contrôle de terrain			
	Végétation	Non-végétation	Total	Précision (%)
Végétation	521	3	524	0,6
Non-végétation	58	225	283	20,5
Total	579	228	746/807	

Erreur d'omission	**7,6 %**
Erreur de confusion	**7,6 %**
Précision totale	**92,4 %**
Kappa	**0,83**

L'analyse des figures 4 et 5, présentant la dynamique de l'occupation du sol des trois sites étudiés entre 1986 et 1999, révèle de profonds changements au niveau de la végétation. Afin de mieux apprécier ces changements, des taux d'évolutions des unités d'occupation du sol ont été déterminés et présentés sur le tableau 6.

De l'analyse du tableau 6, il ressort ce qui suit :

– les taux d'évolution au sein même des unités varient avec de grandes amplitudes d'un site à un autre ; les plus grandes variations ont été observées sur certaines strates telles que la galerie forestière et la savane saxicole ;

– les taux d'évolution par rapport à l'ensemble de la zone étudiée varient d'une classe à une autre et d'un site à un autre ; dans aucun site, ces valeurs n'ont pu égaler celles relatives aux taux d'évolution par rapport à la strate.

– les observations plus détaillées ont été faites sur quelques unités de l'occupation pour apprécier leur dynamique entre 1986 et 1999 : galerie forestière, forêt dense sèche, forêt claire et savane boisée, savane arborée arbustive, zones à emprise agricole, agglomérations.

A) Galerie forestière

Le taux de régression moyen annuel est estimé à 2,3 % pour l'ensemble des trois sites étudiées. Cette unité est spécialement dégradée au profit des espaces cultivés. De même, les animaux en transhumance pendant la saison sèche participent à cette dégradation, à la recherche des ressources fourragères et de l'eau, car cette unité est la seule qui conserve encore de la verdure pendant la période sèche (Oloukoi, 2001). Le secteur de Kilibo connaît le plus fort taux de régression soit 3,4 % , ce qui équivaut à une perte annuelle de 6,4 ha.

B) Forêt dense sèche

Cette formation est dégradée au profit des espaces cultivés et des agglomérations. L'exploitation du bois et la production du charbon de bois expliquent en partie la transformation progressive de la forêt dense sèche en d'autres formations plus claires. Elle se dégrade à un taux moyen annuel de 2,8 % pour les trois secteurs.

C) Forêt claire et savane boisée

Le taux de régression moyen annuel de cette unité est évalué à 2 %. Tchaourou connaît le plus fort taux avec 3,3 % alors que les deux autres secteurs régressent de 2,5 %. Une partie de cette formation est convertie en champs et en agglomérations.

D) Savane arborée arbustive

Comparativement aux classes ci-dessus présentées, la savane arborée arbustive disparaît aussi de plus en plus à un taux annuel de 1,6 %. Elle se convertit progressivement en d'autres formations plus claires suite à des pressions démographiques fortes, se manifestant par un besoin croissant de terre pour l'agriculture, l'extension des agglomérations et l'exploitation du bois à des fins d'énergie.

E) Zones à emprise agricole

Ces zones rassemblent les champs et jachères ainsi que les plantations et les savanes à emprise agricole. Elles ont connu une forte progression spatiale de 2 969 ha à Alafia, 4 929 ha à Kilibo et 2 446 ha à Tchaourou. La nécessité pour les populations autochtones d'étendre et de multiplier les plantations d'anacarde, la recherche de terre fertile à l'agriculture par les migrants agricoles, interfèrent pour conduire les populations à la conquête de nouveaux espaces pour les cultures. Les zones à emprise agricole progressent à un taux moyen annuel de 4,7 %. Le secteur Tchaourou enregistre le plus fort taux de progression, soit 7 % par an.

F) Agglomérations

L'essor du développement agricole dans le milieu, avec l'installation de nouveaux colons agricoles, expliquent la création de nouvelles agglomérations, hameaux et villages. Le taux d'évolution moyen annuel évalué sur les trois secteurs étudiés est de 9,5 %. Ce taux est plus élevé à Tchaourou et plus

faible à Kilibo. L'augmentation de la population n'est pas la seule raison qui explique la forte progression constatée. Certaines agglomérations ont vu le jour avec le développement du réseau routier, principalement avec le bitumage de la voie inter-état au bord de laquelle elles se sont fixées.

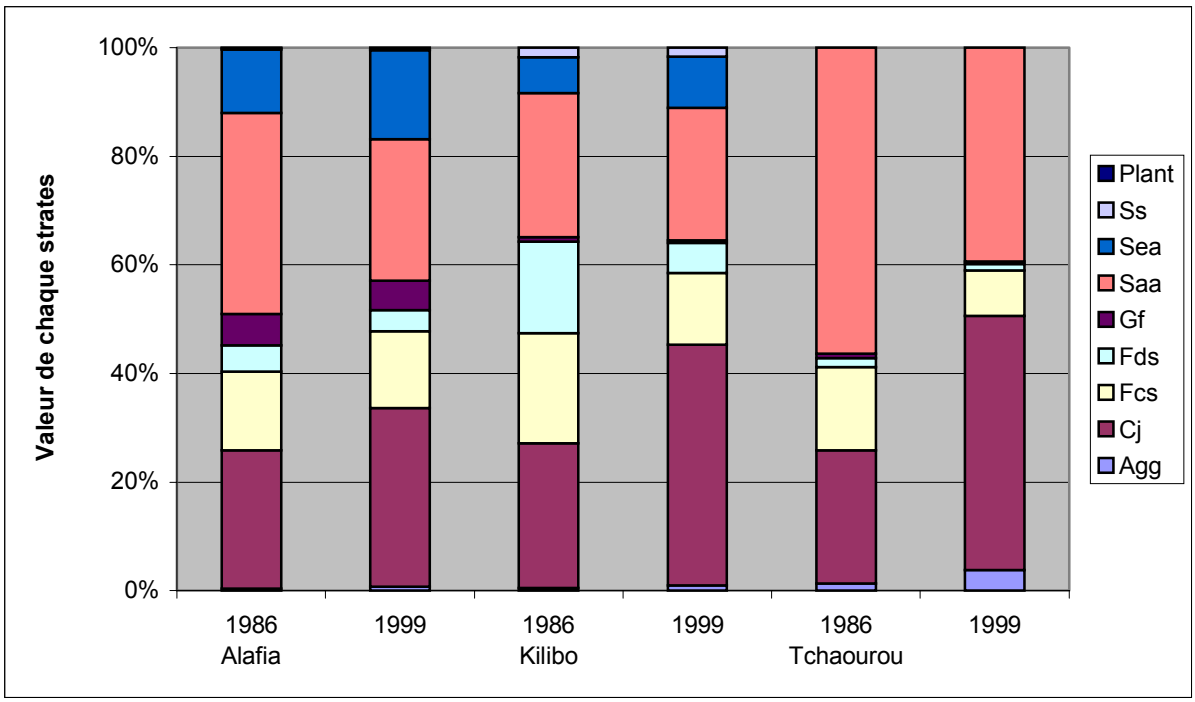


FIGURE 4 Dynamique de l'occupation du sol dans les trois site d'étude. *Land cover dynamics of the three study sites.* Plant : plantation ; Ss : savane saxicole ; Sea : savane à emprise agricole ; Saa : savane arborée arbustive ; GF : galerie forestière ; Fds : forêt dense sèche ; Fcs : forêt claire et savane boisée ; Cj : champs et jachère ; Agg : agglomération

TABLEAU 6 Taux d'évolution des unités de l'occupation du sol au sein de la même classe. *Evolution rates within classes of land cover.*

	Alafia		Kilibo		Tchaourou	
Strates	**Tb (%)**	**Ta (%)**	**Tb (%)**	**Ta (%)**	**Tb (%)**	**Ta (%)**
Galerie forestière	–5,1	– 0,3	–47,5	– 0,4	–41,6	**Tb**
Forêts denses sèches	–19,4	– 0,9	–66,8	– 11,2	–33,0	– 0,3
Forêt claire et savane boisée	– 2,5	– 0,4	–34,9	– 7,1	–45,6	– 0,5
Savane arborée et arbustive	–29,7	– 11,0	–8,1	– 2,2	–30,0	– 7,0
Savane saxicole	–14,9	– 0,03	–2,7	– 0,04	–	– 16,9
Zones à emprise agricole*	32,8	12,2	61,3	20,5	90,7	–
Agglomérations	118,2	0,4	84,5	0,4	197,1	90,7

Ta : taux d'évolution moyen annuel de 1986 à 1999
Tb : taux d'évolution au sein de la même classe de 1986 à 1999
* **Les zones à emprise agricole regroupent les champs, les jachères, les savanes à emprise agricole et les plantations**

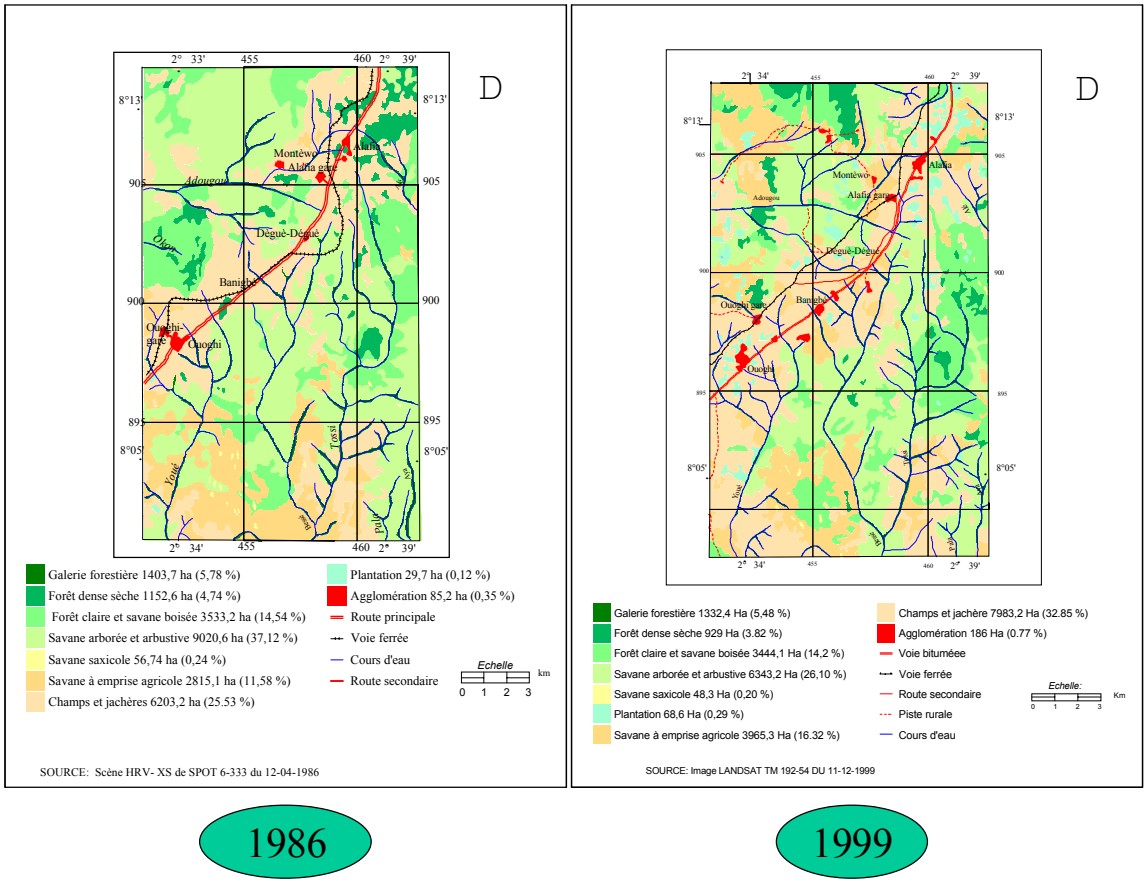


FIGURE 5 Carte de la dynamique de l'occupation du sol du site d'Alafia en 1986 et en 1999. *Land cover dynamics pas of the Alafia site in 1986 and in 1999.*

5. DISCUSSION

La classification de l'occupation du sol résultant de l'analyse des images ETM de 1999 a donné une précision globale de 76,2 %. Mais, si les résultats sont acceptables, ils ne doivent pas nous faire perdre de vue les contraintes rencontrées lors de l'analyse des images utilisées. En effet, les erreurs enregistrées pendant l'analyse des images découlent de plusieurs sources dont notamment :

– l'analyse de certaines parties de l'image rendue difficile par la présence de nuages ; l'image ETM utilisée en effet est la seule disponible du secteur d'étude qui présente une couverture nuageuse acceptable ;

– la confusion dans la discrimination de certaines classes.

En utilisant l'indice de Kappa, dont la valeur est de 0,69, on peut conclure que les résultats de cette analyse sont statistiquement acceptables. En effet, d'après Pontius (2000), pour une analyse d'image dont la valeur de Kappa est supérieure à 0,50, les résultats sont bons et exploitables. En conséquence, la classification adoptée et ayant débouché sur neuf classes de végétation est acceptable.

En faisant une analyse plus fine des erreurs enregistrées au niveau des différentes classes, il est aisé de constater, comme on le présente sur la figure 6, que les erreurs d'omission sont beaucoup plus faibles au niveau de chaque classe et pour l'ensemble de toutes les classes que les erreurs de confusion. Cette situation s'explique par le fait des difficultés de l'analyse des images mentionnées. Ces difficultés ont induit des erreurs de confusion plutôt que des erreurs d'omission. Les classes difficiles à discriminer visuellement sont celles dont les signatures spectrales sont similaires. C'est ce qui explique que les agglomérations se confondent avec la savane à emprise agricole et la savane saxicole. Mais les valeurs des erreurs de confusion enregistrées sont acceptables dans la mesure où aucune de ces erreurs n'est au–dessus de 70 %, qui est la valeur limite.

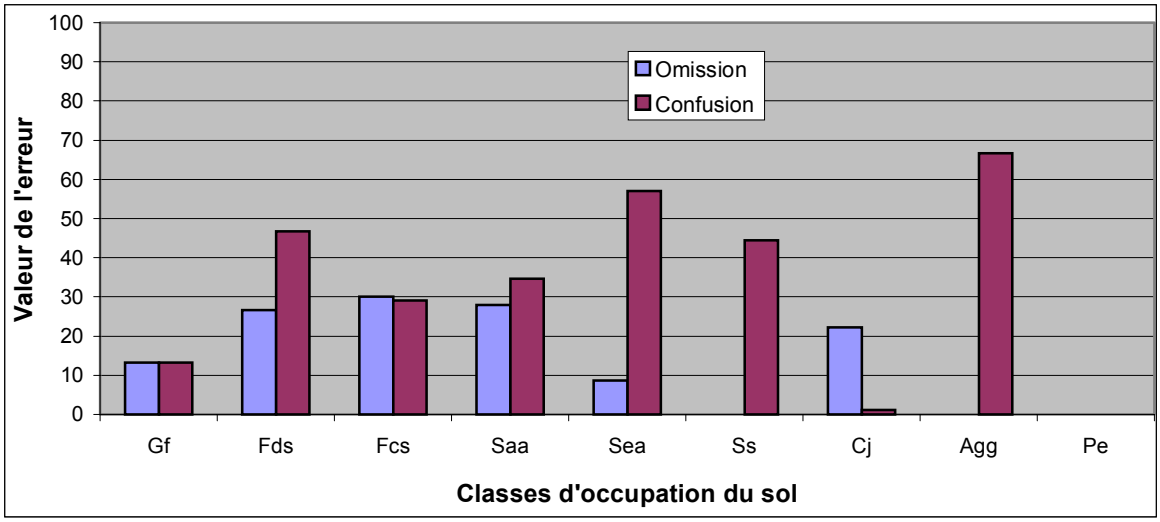


FIGURE 6 Erreurs de confusion et d'omission. *Omission and confusion errors.*
GF : galerie forestière ; Fds : forêt dense sèche ; Fcs : forêt claire et savane boisée ; Saa : savane arborée et arbustive ; Sea : savane à emprise agricole ; Ss : savane saxicole ; Cj : champs et jachère ; Agg : agglomération ; Pe : plan d'eau.

L'analyse de la dynamique de l'occupation du sol montre que les formations végétales denses, par opposition aux formations claires, régressent de façon importante. Cette analyse est nécessaire pour la compréhension des changements intervenus dans l'occupation du sol, d'une part, et les forces causales qui les expliquent, d'autre part (Goldsmith and Harrison, 1976).

Les taux de régression constatés au niveau des formations végétales, telles que la galerie forestière, la savane arborée arbustive, la forêt claire et savane boisée, la forêt dense sèche et la savane saxicole sont des plus élevés. Le taux de régression moyen annuel calculé au niveau de ces formations donne 1 % à Alafia , 2,3 % à Kilibo et 1,8 % à Tchaourou. Pour une étude couvrant l'ensemble du pays pendant la période de 1990 à 1995, ce taux a été évalué à 1,2 % (FAO, 1997). De ce qui précède, on peut conclure que les secteurs étudiés font partie des zones dont les ressources forestières subissent plus de pression aujourd'hui au Bénin. Un processus de déforestation est enclenché, à travers la régression constatée au niveau des formations végétales mentionnées. Les essences les plus attaquées sont *Anogeissus leiocarpus*, *Afzelia africana* et *Khaya senegalensis.* Elles sont détruites principalement par trois acteurs qui sont :

– les agriculteurs par la pratique de l'écobuage,
– les producteurs de charbon,
– les éleveurs transhumants à travers la pratique de l'émondage et de l'élagage des essences pour l'alimentation de leur bétail.

6. CONCLUSION

Cette étude a permis de comprendre que la classification obtenue à partir des traitements analogiques s'accompagne d'erreurs. La méthodologie d'évaluation de ces erreurs, basée sur l'analyse des points de contrôle de terrain, a permis d'évaluer non seulement les erreurs de confusion mais aussi celles qui sont omises (omission). En raison de sa simplicité, cette méthode peut permettre de bien évaluer les erreurs des traitements analogiques dont la précision est rarement évaluée, contrairement aux productions résultant des traitements numériques qui disposent de nombreuses méthodes d'évaluation de la précision.

Cette étude a aussi permis de mettre en exergue l'importance de l'analyse des images satellitaires dans la compréhension des modifications profondes de l'occupation du sol du fait de la colonisation agricole activée par des migrations.

Au total, l'adoption de cette méthodologie permettra d'insuffler une autre dynamique dans l'analyse des classifications de l'occupation du sol et de ce fait une amélioration des productions cartographiques obtenues de manière analogique.

Remerciements

Nous tenons à remercier le professeur Peter Adeniyi de l'Université fédérale de technologie d'Akure (Nigéria), monsieur Georges Agbahungba, directeur scientifique par intérim de l'Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB) et le professeur Mohamed Rached Boussema, de l'École nationale d'ingénieurs de Tunis qui, par leurs remarques et commentaires, ont contribué à l'amélioration de cet article.

Références

Afouda, F. (1990) L'eau et les cultures dans le Bénin central et septentrional : étude de la variabilité des bilans de l'eau dans leurs relations avec le milieu rural de la savane africaine. Thèse de doctorat, Université Paris IV Sorbonne, 448 p.

Anderson, J.R., Hardy, E.E., Roack, J.T.and Witmer, R.E. (1976) A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. Professional Paper 964, USGS 964, Washington DC., 28 p.

Baltaxe, R. (1985) Guidelines for tropical forest cover monitoring based on remote sensing.

FAO special study on forest management. Gcp/ras/106/JPN.Field doc., Bangkok, 103 p.

FAO (1997) Situation des forêts du monde. Food and Agriculture Organization, Rome, 200 p.

Franquin, P. (1969) Analyse agroclimatique en régions tropicales. Saison pluvieuse et saison humide. Applications. Cahier ORSTOM, Série Biologie nº 9, p. 65–95.

Ginevan, M. E. (1979) Testing land use map accuracy: another look. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 45, p. 1371–1377.

Goldsmith, F.B. and Harrison, C.M. (1976) Description and analysis of vegetation. In Chapman, A. (réd.) Methods in Plant Ecology. Blackwell Scientific Publications, Oxford, p. 85–109.

Igué, A. M. (2000) The use of a soil and terrain database for land evaluation procedures : Case study of Central Benin. Thèse de doctorat, University of Hohenheim, 235 p.

Mahavir, E. and Galema, M. (1991) Monitoring urban growth using Spot images and aerial photographs. ITC Journal, vol. 2, p. 63–69.

Mama, V. J. et Oloukoi, J. (2002) Colonisation agricole et dynamique sociale dans la région centrale du Bénin. Communication présentée au Comité Régional de Recherche et Développement de l'Institut National des Recherches Agricoles, Dassa, Bénin, 16 p.

Mama, V. J., Houndagba, C. J., Oloni, G., Allé, P. et Tete, R. (1995) Contribution d'un système d'information géographique à la caractérisation des bas–fonds du Département du Zou en République du Bénin. In Jamin, J.Y. et Windmeijer, P.N. (réd.) La caractérisation agro–écosystèmes des bas–fonds, un outil pour leur mise en valeur durable. Actes du 1er Atelier du Consortium Bas–fond, Bouaké, p. 181–190.

MEHU (2001) Communication nationale initiale du Bénin sur les changements climatiques.. Ministère de l'Environnement de l'Habitat et de l'Urbanisme, Projet BEN/98/G31 Changements climatiques, Cotonou, 76 p.

Natta, K.A. (2000) Tree species diversity assessment in riparian forests using remote sensing, geographical information system and geostatistics. Case study of Toui–Kilibo protected forest in Benin. Mémoire de maîtrise, Institut for Aerospace Survey and Earth Science, Esched (The Netherlands), 91 p.

Nelson, G. C. (2000) Modelling deforestation and land use change; Sparse data Environments. IAAE Spatial Analysis learning Workshop, Berlin, August 12th 2000, 14 p.

Oloukoi, J. (2001) Impact environnemental de la transhumance dans les Sous–préfectures de Savè, Ouèssè et Tchaourou. Mémoire de maîtrise, Département de géographie et aménagement du territoire, Université d'Abomey–Calavi, 125 p.

Pontius, Jr.R.G. (2000) Quantification error versus location in comparison of categorical maps. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 66, n° 8, p.1011–1016.

Story, M. and Congalton, R.G. (1986) Accuracy assessment : A user's perspective. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 52, p. 397–399.

Turner, M.G. (1997) Spatial simulation of landscape changes in Georgia: a comparison of three transition models. Landscape Ecology, vol. 1, p. 29–36.

van Genderen, J. and Lock, B. (1977) Testing land use map accuracy. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 43, p.1135–1137.