



# Possibilités d'utilisation de Google Earth™ pour le suivi du couvert forestier de forêts claires en zone soudanienne au Bénin

Eudes Shègoun IDJIGBEROU<sup>1</sup> et Bernard TYCHON<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de recherche en Ecologie, en Botanique et Biologie végétale (LEB), Université de Parakou, Bénin

<sup>2</sup> Université de Liège - Arlon campus environnement, Unité Eau Environnement Développement, Belgique

Reçu le 30 Juillet 2017 - Accepté le 25 Août 2017

## Potential of using Google Earth™ for the monitoring of woodland forest cover in the sudanian zone in Benin

**Abstract:** In a global context of the growing forest degradation, efficient monitoring tools are needed to manage forest cover. We have explored the potential of using Google Earth™ for the monitoring of woodlands forest cover in the sudanian zone in Benin. We assumed that, Google Earth images-based trees cover is strongly correlated with basal area estimated using field data. The supervised classification method (Maximum Likelihood) was first used to classify the digital images based on three lands use classes (woody vegetation and shadows, herbaceous vegetation, and bare ground) with a precision rate greater than 94%. We after estimated the trees cover on squared (20m x 20m) plots using Google Earth™ digital images. Results showed a strong correlation between the trees cover based on Google Earth™ and basal area suggesting the possibility of using Google Earth™ for woodland ecosystems monitoring. However, the lack of regular updating of Google Earth™ database and the deference between images uploading date and the date of inventory data collection are constraints that remains to be challenged for the accurate use of Google Earth in developing countries like Benin.

**Keywords:** Google Earth™, digital image, remote sensing, woodland, basal area, Benin.

**Résumé :** Dans un contexte général de dégradation continue des forêts, le développement des méthodes pour le suivi du couvert forestier devient nécessaire. Cette étude a exploré le potentiel d'utilisation de Google Earth™ pour le suivi du couvert forestier des forêts claires réparties dans le domaine des savanes soudanienne au nord du Bénin. Nous avons supposé que le recouvrement des peuplements ligneux de forêts claires estimé par placeau de 20 m x 20 m de dimensions, à partir des images de Google Earth est positivement corrélé avec la surface terrière calculée par placeau, sur la base des données d'inventaires forestiers. La méthode de classification supervisée « maximum Likelihood » a permis de classer les extraits d'images numériques de Google Earth avec une précision globale supérieure à 94 %, en se basant sur trois classes d'occupation du sol (formation boisée et zones d'ombre, végétation herbacée, sol nu), et d'en extraire le recouvrement des ligneux par placeau. Les résultats montrent une forte corrélation entre la surface terrière calculée à partir des données de terrain et le taux de recouvrement des ligneux estimé à partir de Google Earth et suggère que Google Earth™ pourrait être utilisé pour le suivi du couvert forestier. Cependant, le manque de mise à jour régulière de la base de données de Google Earth™ et le décalage entre dates de capture d'images dans Google Earth™ et celles de collectes des données de terrain sont des contraintes à surmonter afin de rendre plus fiable l'utilisation de l'outil dans les pays en développement comme le Bénin.

**Mots clés :** Google Earth™, image numérique, télédétection, forêt claire, recouvrement ligneux, surface terrière, Bénin

## 1. Introduction

Les forêts tropicales sèches, dont les forêts claires, sont parmi les écosystèmes forestiers les plus exploités et les plus fragmentés (Biaou, 2009, Tyukavina et al., 2016) et nombreux sont les rapports scientifiques alarmant sur les causes de leur dégradation.

Au Bénin, les forêts claires constituent, avec les forêts galeries et les vestiges de forêts denses sèches, les seules formations fermées en zone de savane (Sokpon et al., 2006). Malheureusement, ces écosystèmes forestiers connaissent une évolution régressive imputable aux pressions anthropiques (Yabi, 2003). Sokpon et al. (2006) ont indiqué que de fortes pressions sont exercées sur les espèces de forêts claires par les exploitants de bois. Bouko et al. (2007) ont aussi remarqué que les conditions naturelles favorables qui prévalent dans les zones forestières, en ont fait des régions de colonisation agricole. Autant de pratiques qui affectent la structure spatiale et la régénération naturelle des arbres (Hakizimana et al., 2011), désorganisent la structure naturelle des peuplements forestiers (CERF, 2011), et influent sur la dynamique de l'occupation du sol (Bouko et al., 2007).

Dans un tel contexte, les systèmes traditionnels de gestion des ressources forestières ne peuvent plus faire face efficacement à ces situations qui amoindrissent les nombreux services et fonctions assurés par la forêt (Bellefontaine et al., 1997). La gestion écologiquement viable des écosystèmes forestiers s'impose.

La méthode actuellement utilisée pour évaluer l'état des ressources forestières est l'inventaire écologique et forestier de terrain. Certes, elle permet de collecter des informations qualitatives et quantitatives exhaustives, mais elle reste onéreuse et exige beaucoup de temps. Une des difficultés dans les pays pauvres comme le Bénin est la faible fréquence de réalisation des inventaires forestiers ne permettant pas le suivi régulier de l'évolution de la couverture forestière. Les techniques faisant appel à la télédétection s'offrent comme une alternative pour le contrôle et le suivi des écosystèmes forestiers. En effet, selon Pouliot et al. (2002), les techniques de télédétection fournissent une alternative potentiellement à plus faible coût que les inventaires forestiers classiques basés sur des prospections sur le terrain. Girou (1998) rappelle toutefois que, avec la télédétection satellitale, l'échelle est trop petite pour distinguer les sous-unités de paysages, même si les images satellitales offrent un faible coût par rapport à la surface étudiée. Cependant, la réussite de ces évaluations nécessite des méthodes élaborées nécessaires pour extraire facilement et avec une bonne précision les informations requises. A cet effet, Google Earth semble offrir plus de possibilité d'utilisation que la télédétection classique. En effet, Google Earth est un programme gratuitement disponible qui offre une visualisation de l'ensemble de la surface du globe terrestre au moyen de l'assemblage d'images satellitaires et de photographies aériennes (Google, 2014). De plus, Google

Earth offre la possibilité d'explorer le monde en trois dimensions (Lonchay, 2007) et permet d'avoir des images de très hautes résolutions allant de 10 à 250 m (Pfeifer et al., 2012). Une étude récente a révélé qu'avec Google Earth, il est possible de cartographier et de suivre les tâches urbaines (Baro et al., 2014).

Dans la présente étude, nous avons vérifié la possibilité de l'utilisation de Google Earth™ pour le suivi du couvert forestier en particulier les forêts claires réparties dans le domaine des savanes soudaniennes au nord du Bénin. Pour vérifier cette possibilité, nous avons testé l'hypothèse selon laquelle le recouvrement des peuplements ligneux des forêts claires estimé à partir de Google Earth™ est positivement corrélé avec la surface terrière calculée pour ces peuplements ligneux à partir des données d'inventaires. Nous avons utilisé la surface terrière comme un proxy au recouvrement, à défaut de disposer des données de recouvrement des ligneux mesurées sur le terrain. En effet, plusieurs études suggèrent une corrélation positive entre le recouvrement des ligneux et la surface terrière (Uzoh et Ritchie, 1996 ; Shimano, 1997 ; Korhonen et al., 2007 ; Ray, 2013). Toutefois, comme l'a annoncé Ray (2013), l'utilisation de la surface terrière comme un proxy au recouvrement présente des insuffisances car la relation entre les deux variables varie suivant les espèces ou groupes d'espèces et peut être influencée par la qualité du modèle utilisé.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Sites d'étude

Les forêts claires réparties dans le domaine des savanes soudaniennes au nord du Bénin, entre les latitudes 9° et 12° Nord et les longitudes 1°65' et 4° Est, sont les formations forestières dans lesquelles les données de terrain utilisées pour cette recherche sont collectées. A l'origine, 64 placeaux d'inventaire de dimensions 20 m x 20 m répartis sur 16 sites de recherche ont été installés (4 placeaux par site). Cependant pour des raisons de faible résolution spectrale de certaines images couvrant ces sites, seulement 5 sites de recherche répartis au-delà de la latitude 10° Nord (zone soudanienne) sont pris en compte pour cette étude (figure 1)

Le climat de la zone d'étude est typiquement tropical sec avec une seule saison de pluie, et l'indice d'humidité est de 1,9. Le gradient pluviométrique est décroissant du Sud avec 1 150 mm/an, vers le Nord avec 900 mm/an (Sinsin & Kampmann, 2010). Le sol est de type ferrugineux, et la végétation est largement dominée par les savanes à tapis graminéen continu, parsemées d'îlots de forêts denses sèches à *Anogeissus leiocarpa* et de forêts claires à *Isoberlinia* spp plus ou moins étendues.

---

\* Auteur Correspondant : email : shegouneudes@gmail.com

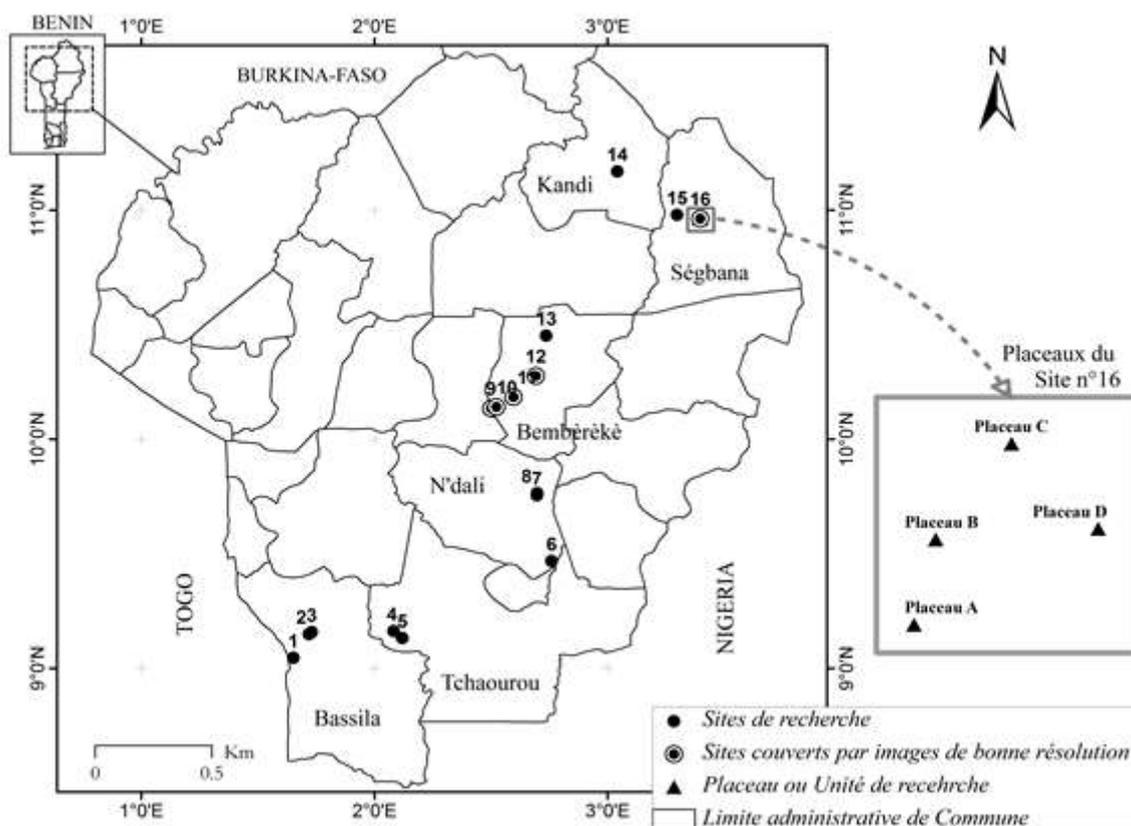


Figure 1 : Localisation des sites de recherche forêt claire au Bénin

Figure 1: Map showing the distribution of sampled sites in the studied woodland in Benin

## 2.2. Collecte de données

Deux types de données sont collectées et utilisées : les données de surface terrière calculées par placeaux pour les peuplements des forêts claires ; et le recouvrement des ligneux des peuplements de forêts claires estimé par placeau à partir des images numériques extraites par capture d'écran de la mappemonde virtuelle Google Earth™.

### 2.2.1. Données de surface terrière

Les données de diamètre des arbres (DBH) ayant servi au calcul de la surface terrière des peuplements de forêts claires étudiées sont collectées à partir d'un dispositif permanent d'inventaire (ou placeau) de dimensions 20 m x 20 m, installé en 2003 par Biaou (2009). A la même période (entre novembre et mars), le diamètre de chaque arbre a été mesuré sur l'écorce à l'aide du ruban pi, à la hauteur de référence de 1,30m au-dessus du niveau du sol, en 2003 et 2006 par Biaou (2009), et en 2010 (données non publiées). Les données de surface terrière utilisées pour l'étude sont celles des vingt (20) placeaux répartis sur les cinq (05) sites de recherche couverts par des images numériques de bonne qualité. couvrant chaque site de recherche, d'en réaliser la classification, puis d'en extraire les informations concernant les

### 2.2.2. Données images pour l'estimation du recouvrement des ligneux

Le recouvrement du peuplement ligneux des forêts claires est estimé par placeau à partir de l'analyse des extraits d'images numériques acquies gratuitement depuis Google Earth™, directement par capture d'écran de l'ordinateur (Venard et al., 2010). Ces extraits d'images sont de 8 bits et les canaux disponibles lors de leur enregistrement sont les trois couleurs du format JPEG : le rouge, le vert et le bleu. Cet outil propose pour le Bénin des images multi spectrales GeoEye-1 en mode couleur dotées d'une très haute résolution spatiale (1,84m).

La base de données utilisée dans cette étude comprend cinq (05) extraits d'images prises : le 12 décembre 2007 (site n°11), le 23 décembre 2007 (site n°12), le 06 mars 2008 (Site n°16) et le 11 octobre 2009 (Sites n°9 et n°10).

Vue qu'à l'échelle du placeau (400m<sup>2</sup>), la résolution des images extraites de Google Earth ne permet pas d'observer convenablement le recouvrement des ligneux, l'approche développée a consisté à extraire dans Google Earth™ une image géoréférencée de grande taille (500 x 300 m, soit 15ha) placeaux. Pour ce faire, nous avons d'abord procédé à une projection des coordonnées GPS des centres et des quatre

coins des placeaux d'inventaires dans Google Earth™ afin de reconstituer les placeaux, ensuite à la visualisation et au choix des images à la bonne résolution de capture (altitude de visualisation), et enfin à l'extraction. L'enregistrement des extraits d'images a été effectué à une altitude de visualisation de 900 m. Une fois extraites, les images numériques sont rognées au moyen du logiciel Microsoft Office Picture Manager de façon à leur donner la dimension 500 m x 300 m.

### 3. Analyse des données

#### 3.1. Calcul de la surface terrière des peuplements de forêts claires

Elle est calculée par la formule :

$$G = \sum_{i=1}^n \pi(DBH)^2 / 4 \quad (1)$$

Elle s'exprime en m<sup>2</sup> et correspond à la somme des sections transversales à 1,30 m de hauteur des arbres inventoriés sur le placeau.

#### 3.2. Analyse des extraits d'images et estimation des données de recouvrement des ligneux

La chaîne de traitement des images numériques pour produire les données de recouvrement des ligneux est réalisée à l'aide des logiciels ENVI™ 4.5 dédié au traitement d'images et ArcGIS® 9.3 dédié au système d'information géographique (SIG), pour développer les approches spatiales. L'approche utilisée pour l'analyse des images numériques a consisté dans un premier temps, à réaliser la classification de la grande image de 150 000 m<sup>2</sup> (500 x 300 m), puis dans un second temps, à extraire les informations concernant les placeaux de 400 m<sup>2</sup> (20 x 20 m). Pour ce faire, nous avons procédé à la classification supervisée « maximum Likelihood » des images au moyen du logiciel ENVI 4.5, et en nous basant sur notre connaissance du terrain. Ainsi, l'analyse de l'occupation du sol à travers l'examen de la composition colorée des images à classifier nous a permis de définir, indépendamment des différentes formations végétales, quatre (04) différentes classes agrégées en trois classes, du fait de la difficulté d'identifier correctement et de traiter les zones d'ombres sur les images : Il s'agit : des formation boisée et zones d'ombre, de la végétation herbacée vivante et sénescente, et du sol nu (terrain dénudé).

Des matrices de confusion ont été établies pour chaque image classifiée afin de juger de la précision des résultats de classifications. Les paramètres fournis par ces matrices pour juger de la qualité de la classification sont :

- le Coefficient de Kappa (K) :

$$K = (\Pr_{(a)} - \Pr_{(e)}) / (1 - \Pr_{(e)}) \quad (2)$$

où  $\Pr_{(a)}$  est la probabilité d'accord observée et  $\Pr_{(e)}$  la probabilité d'accord aléatoire. Il nous permet de déterminer la fiabilité de notre classification, c'est-à-dire de mesurer le taux d'accord ou de concordance entre la réalité de terrain (classes

réellement observées sur l'image numérique) et l'image classifiée (classes d'observations définies). Il est compris entre -1 et +1. La concordance sera d'autant plus élevée que la valeur de Kappa est proche de +1 ;

- la précision du producteur :

$$P_p(i) = M_c(i) / m_2 * 100 \quad (3)$$

où  $M_c(i)$  est le nombre de pixels de la classe (i) ayant effectivement été affectés à celle-ci après classification ; et  $m_2$  est le nombre de pixels appartenant effectivement à la classe (i). C'est la probabilité pour qu'un point d'observation au sol soit correctement classé sur la carte. Elle mesure les erreurs d'omission (1 - précision du producteur) ;

- la précision de l'utilisateur : probabilité pour qu'un point sur la carte corresponde effectivement à la bonne classe au sol. Elle mesure les erreurs de commission (1 - précision de l'utilisateur).

Enfin, la fonction « Zonal statistics as table (sa) » de ArcGIS, nous a permis d'estimer pour chaque placeau, le taux de recouvrement des ligneux (en unité de surface) par classe.

#### 3.3. Corrélation entre le recouvrement des cimes estimé et la surface terrière calculée

Le logiciel R (R Core Team, version 2017, <https://www.R-project.org>) a été utilisé pour apprécier la corrélation entre le taux de recouvrement des ligneux estimé à partir des images Google Earth™ et la surface terrière des peuplements ligneux des forêts claires étudiées. Partant du nuage des points, nous avons testés deux modèles : le modèle linéaire simple ( $y=ax+b$ ) et le modèle non linéaire défini par une fonction polynomiale d'ordre 2 ( $y=ax^2+bx+c$ ) sous le package "stats". Le modèle approprié a été choisi sur la base de l'AIC (Akaike's information criterion) et du coefficient de détermination  $R^2$ . Le modèle le plus approprié étant celui ayant l'AIC le plus faible (Burnham et Anderson, 2004) et dont le  $R^2$  est supérieur ou égale à 0,5 (Santhi et al., 2001 ; Moriasi et al., 2007). Les points de coordonnées ayant des valeurs aberrantes de surface terrière ont été supprimés afin de permettre une bonne appréciation de la relation entre les deux variables.

## Résultats et discussion

### 4.1. Précisions des images numériques classifiées

Dans l'ensemble, nous avons obtenu de bonnes précisions globales de classification (> 94%) avec des coefficients de Kappa tous supérieurs à 0,87; et les erreurs de commission obtenues pour chaque classe sont faibles (< 0,1) à quelques exceptions près (tableau 1).

Tableau 1 : Statistiques des matrices de confusion à l'issue de la classification supervisée selon la méthode du maximum de vraisemblance des images de dimension 500 m x 300

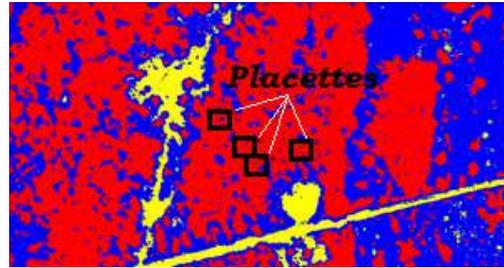
Table 1: Confusion matrix from the supervised classification with the *Maximum Likelihood* method of images dimension 500 m x 300 m

N° Site	Classes	Précision du Producteur (%)	Précision de l'utilisateur (%)	Erreur de Commission	Coefficient de Kappa
Site 09	Formation boisée	99,52	98,8	0,012	0,98
	Végétation herbacée	98,43	99,59	0,0041	
	Sol nu	99,75	98,37	0,0163	
Site 10	Formation boisée	99,96	94,79	0,0521	0,92
	Végétation herbacée	96,18	98,52	0,0148	
	Sol nu	93,58	89,43	0,1057	
Site 11	Formation boisée	94,07	28,46	0,7154	0,87
	Végétation herbacée	93,77	97,9	0,021	
	Sol nu	95,61	99,77	0,0023	
Site 12	Formation boisée	96,97	96,45	0,0355	0,88
	Végétation herbacée	92,87	98,36	0,0164	
	Sol nu	95,81	67,52	0,3248	
Site 16	Formation boisée	99,30	99	0,01	0,97
	Végétation herbacée	98,78	99,06	0,0094	
	Sol nu	97,91	97,33	0,0267	

Ces statistiques supposent que nos classifications se rapprochent bien de la réalité observée sur les images Google Earth selon nos hypothèses de classification (formation boisée et zones d'ombre assimilées à la même classe) (figure 2).



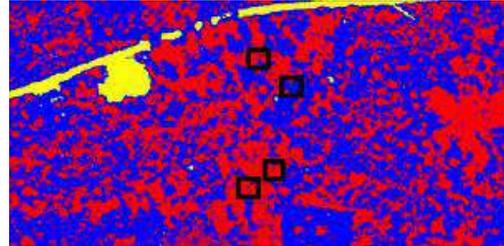
Site n°9. Date capture image satellite : 11/11/2009



Site n°9 : Image classifiée



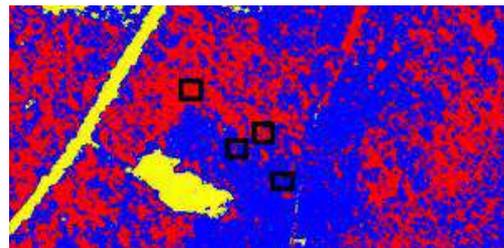
Site n°10. Date capture image satellite : 12/12/2007



Site n°10 : Image classifiée



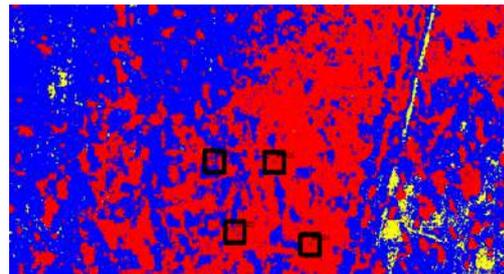
Site n°11. Date capture image satellite : 12/12/2007



Site n°11 : Image classifiée



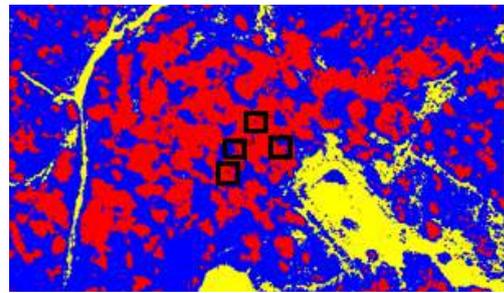
Site n°12. Date capture image satellite : 23/12/2007



Site n°12 : Image classifiée



Site n°16. Date capture image satellite : 06/03/2008



Site n°16 : Image classifiée

Figure 2 : Images classifiées par la méthode supervisée « *Maximum Likelihood* » dans ENVI version 4.5 : formation boisée et zones d'ombre (rouge), végétation herbacée (bleu), sol nu (jaune)

Figure 2: Classified images by the supervised method « *Maximum Likelihood* » in ENVI software, version 4.5: wooded vegetation and shadow areas (red), herbaceous vegetation (blue), bare ground (yellow)

Cependant, certaines images classifiées présentent des imperfections qui trouvent leur fondement dans la difficulté de distinguer la signature spectrale des zones d'ombre, d'avec les classes de formation boisée et de sol nu, comme en témoignent les valeurs élevées des erreurs de commission obtenues pour ces classes, pour les sites n°11 et n°12 (respectivement, formation boisée : 0,7 et sol nu : 0,3 ; Cf. tableau 1). Pour Amani (2006), il était important de pouvoir bien détecter les ombres sur les images de télédétection afin de corriger leurs effets ou de les exploiter autrement, et de leur donner ainsi de la valeur ajoutée. Notre méthodologie de classification

montre ainsi ces insuffisances car les zones d'ombres devaient être corrigées avant la classification supervisée.

#### 4.2. Recouvrement estimé des ligneux et surface terrière calculée

La formation boisée et la végétation herbacée sont les deux éléments majeurs de l'occupation du sol qui sont détectés sur les placeaux, à l'issue de la classification supervisée de l'image numérique visualisée à 900 m d'altitude (tableau 2).

Tableau 2 : Taux de recouvrement du sol des placettes d'inventaire et surface terrière calculée

Table 2: Land cover rate in each inventoried plot and calculated basal area

N° Site	N° Placeau	Date des images sources Google Earth	Recouvrement des ligneux (%) par placeau				Données d'inventaires forestiers	
			Formation boisée	Formation herbacée	Sol nu	Total	Année	G (m <sup>2</sup> /ha)
9	P1	11 oct. 2009	348,8	55,4	0	404,2	2010	14,25
	P2		365,6	38,6	0	404,2		15,17
	P3		391,1	13,2	0	404,2		6,29
	P4		379,0	25,2	0	404,2		12,17
10	P1	11 oct. 2009	310,4	90,1	0	400,5	2010	12,78
	P2		91,9	308,6	0	400,5		0,00
	P3		375,0	25,5	0	400,5		23,62
	P4		381,8	18,7	0	400,5		25,15
11	P1	12 déc. 2007	386,4	9,7	0	396,1	2006	10,15
	P2		297,3	98,7	0	396,1		11,88
	P3		83,6	312,4	0	396,1		13,87
	P4		35,6	360,5	0	396,1		14,15
12	P1	23 déc. 2007	385,8	18,3	0	404,1	2006	19,38
	P2		335,8	68,3	0	404,1		20,85
	P3		376,0	28,2	0	404,1		20,9
	P4		217,9	186,3	0	404,1		11,24
16	P1	06 mars 2008	351,1	51,3	0	402,5	2010	11,11
	P2		274,7	127,8	0	402,5		19,62
	P3		397,7	4,8	0	402,5		22,88
	P4		283,8	118,6	0	402,5		28,22

En effet, les quadrats de 400 m<sup>2</sup> (20 x 20 m) centrés sur les coordonnées des centres de placeaux élaborés dans ArcGis ont généré des informations dont le recouvrement total (formation boisée & zones d'ombre et formation herbacée) varie entre 396,1 m<sup>2</sup> et 404,2 m<sup>2</sup>. Le peuplement ligneux (formation boisée) présente en général un fort taux de recouvrement (53,9% à 98,8%), à l'exception de certaines unités d'observations dont le recouvrement est inférieur à 50% (200 m<sup>2</sup>). Ces résultats corroborent la description des forêts claires faite par White (1986), qui stipule que la forêt claire est un peuplement ouvert d'arbres dont les cimes culminent entre 8 et

20 m de hauteur ou davantage, et dont le recouvrement des cimes atteint au moins 40%.

En ce qui concerne la surface terrière calculée, elle varie entre 6,29 et 28,22 m<sup>2</sup>/ha, et sa valeur moyenne est évaluée à 17,43 m<sup>2</sup>/ha. Dans la même zone de recherche (communes de Bembèrèkè et de Ségbana), Sokpon et al. (2006) ont obtenu des valeurs de surface terrière moyenne des forêts claires variant entre 12,1 et 14,7 m<sup>2</sup>/ha. Ces auteurs précisent toutefois, qu'une grande variabilité est observée en ce qui concerne la surface terrière des forêts claires (10 à 25 m<sup>2</sup>/ha), dans les zones soudanaises et guinéennes.

### 4.3. Liaison statistique entre le recouvrement estimé et la surface terrière

En général, on observe une corrélation significative et positive entre le recouvrement des ligneux estimé par plateau à partir de Google Earth™ et la surface terrière ( $r=0,72$  ;  $p=0,005$ ). Cette relation est mieux ajustée par une fonction polynomiale d'ordre 2 ( $AIC=103,16$  ;  $R^2=0,60$  ; Figure 3)

comparativement à la fonction linéaire ( $AIC=111,70$  ;  $R^2=0,48$  ; Figure 3).

Le recouvrement ligneux estimé augmente avec la surface terrière et devient maximal au point de surface terrière d'environ 21 m<sup>2</sup>/ha.

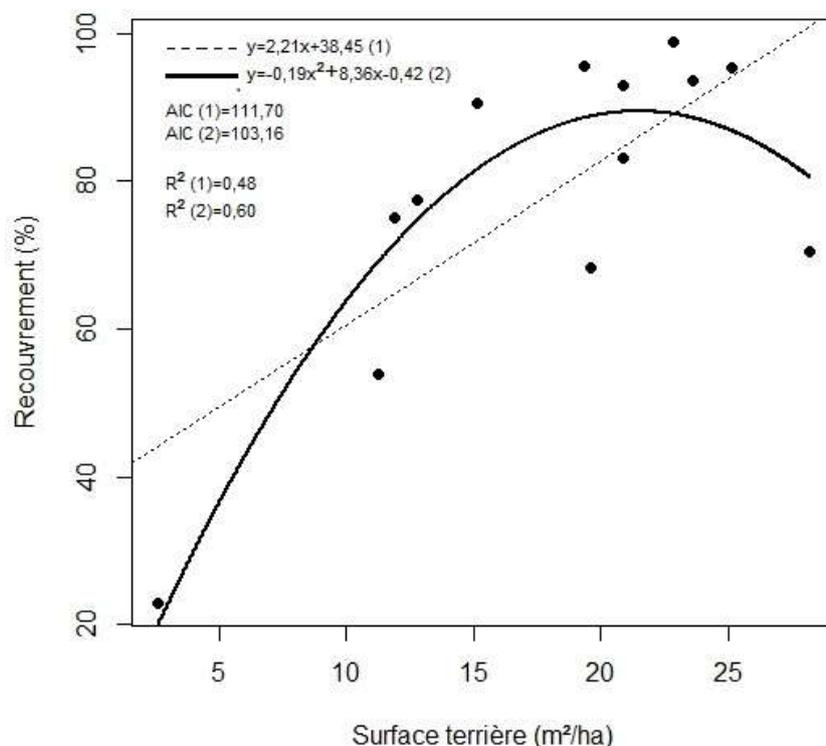


Figure 3 : Relation entre le recouvrement estimé des ligneux et la surface terrière calculée

Figure 3: Relationship between trees crowns recovery estimated using Google Earth™ images and trees basal area calculated from inventory data.

Cette relation positivement significative entre les deux variables suppose que, les images Google Earth™ pourraient permettre de détecter le recouvrement des cimes des arbres, dans les conditions de notre recherche. Un tel résultat témoigne de la possibilité d'utilisation de l'outil Google Earth™ pour le suivi des peuplements forestiers.

### 4.4. Limites de la recherche et sources d'erreurs

La non disponibilité d'images de très bonne qualité au niveau de nos sites de recherche constitue la première contrainte à notre étude. Pour Venard et al. (2010) cette contrainte est la plus problématique. De plus, les images disponibles ne sont pas régulièrement mises à jour. Or, une meilleure mise à jour régulière des images aurait permis de sélectionner les images les plus appropriées aux dates de collectes de données de terrain. De ce point de vue, une des faiblesses de l'étude est la validation du recouvrement ligneux estimé par des données de terrain antérieures : image de 2009/ inventaire de 2010 ; 2007/2006 et 2008/2010. En outre, ce sont les données de surface terrière qui ont servi de validation. Or il

aurait été intéressant d'utiliser les données réelles de recouvrement ligneux estimé à partir du sol mais nous n'avons pas collecté ce type de données. Quant aux erreurs, la présence d'ombre est la première source, en dépit de la qualité spectrale des images. Leur correction est cruciale car selon Dedieu (1989), la position d'un pixel en zone d'ombre induit une très forte atténuation de ses valeurs radiométriques par rapport aux pixels identiques qui sont en éclaircissement. Nous suggérons pour une étude future, que les zones d'ombre potentielles présentes sur les images, soient détectées et corrigées par l'analyse de leur histogramme avec un seuillage automatique avant toute exploitation.

Enfin, il est nécessaire de préciser que la fiabilité du GPS utilisé pour l'enregistrement des coordonnées des centres de placettes au cours des travaux de terrain n'a pas été évaluée. Ce contrôle doit être effectué pour toute étude future. Venard et al. (2010) ont indiqué, qu'à partir des points relevés précédemment sur un repère fixe, il est possible de définir la fiabilité du GPS pour une série de mesures temporelles, en se basant sur l'écart-type.

## 5. CONCLUSION

Dans cette étude nous avons exploré la possibilité d'utilisation de l'outil Google Earth™ pour le suivi de couvert forestier en nous basant sur la corrélation entre la surface terrière calculée à partir des données de terrain, et le recouvrement des ligneux estimé à partir Google Earth™. Le méthode de classification supervisée « Maximum Likelihood » a permis de classer les images avec un coefficient de Kappa supérieur à 87%. Nos résultats montrent que le recouvrement des ligneux est positivement corrélé à la surface terrière, ce qui suggère qu'on pourrait utiliser Google Earth™ pour le suivi du couvert forestier.

Toutefois l'assimilation de la classe d'ombres à la classe de végétation ligneuse limite la fiabilité de nos résultats de classification. En outre, l'inadéquation des dates des images satellites disponibles, aux dates d'inventaires de terrain a limité l'appréciation du pouvoir de détection des recouvrements des ligneux par les images Google Earth™. Au niveau de la qualité des images, la zone soudanienne du Bénin n'est pas toujours couverte par des images de très haute résolution (2007 à 2009). En somme, cette étude montre les opportunités, mais aussi les difficultés d'exploitation des images Google Earth™ et les sources d'erreurs associées à la méthode de classification appliquée. Il est souhaitable que des mises à jour régulières des images soient réalisées afin d'augmenter le potentiel d'exploitation des images et de l'outil Google Earth™. Ces mises à jour rendraient disponibles les anciennes images, favoriseraient la réalisation d'études diachroniques et le suivi de l'état du couvert forestier.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions le Conseil interuniversitaire de la Communauté française de Belgique (CIUCF), pour le soutien financier qui a permis la réalisation de cette recherche, dans le cadre du programme de bourses : Formation, Recherche et Sensibilisation pour le Développement (FRSD, 2011). Nos remerciements vont également à l'endroit du Dr. Ir. H. S. Biaou, Enseignant-Chercheur à la Faculté d'Agronomie de l'Université de Parakou pour les données d'inventaires forestiers dont nous avons bénéficié pour les besoins de cette recherche.

## CONFLIT D'INTERET

Les auteurs n'ont déclaré aucun conflit d'intérêt.

## REFERENCES

Adjonou K. Bellefontaine R. & Kokou K. 2009. Les forêts claires du Parc national Oti-Kéran au Nord-Togo : structure, dyna-

mique et impacts des modifications climatiques récentes. Sécheresse, 20 (1) : 1-10. URL: [http://publications.ci-rad.fr/une\\_notice.php?dk=553451](http://publications.ci-rad.fr/une_notice.php?dk=553451)

Agbahungba G. Sokpon N. & Gaoué O. G. 2001. Situation des Ressources Génétiques Forestières du Bénin. Note Thématique FGR/ 12F. 30 P. Atelier sous-régional FAO/IPGRI/ICRAF sur la conservation, la gestion, l'utilisation durable et la mise en valeur des ressources génétiques forestières de la zone sahélienne (Ouagadougou, 22-24 sept. 1998). URL: <http://www.fao.org/3/a-ab395f.pdf>

Amani M. 2006. Détection et exploitation d'ombre de bâti sur les images de très haute résolution spatiale (Ikonos) : Application au milieu urbain (Sherbrooke). URL: <http://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/2751>

Baro J. Mering C. & Vachier C. 2014. Peut-on cartographier des taches urbaines à partir d'images Google Earth ?» Cybergeo : European Journal of Geography. 2014 : 1-39. DOI : 10.4000/cybergeo.26401

Bellefontaine R. Gaston A. & Petrucci Y. 1997. Aménagement des forêts naturelles des zones tropicales sèches. Rome, Italie, FAO. URL: <http://www.fao.org/docrep/w4442f/w4442f00.htm>

Biaou S. S. H. 2009. Tree recruitment in West African dry woodlands: the interactive effects of climate, soil, fire and grazing. PhD thesis: Wageningen (Netherlands). 196 p.

Bouko S. B., Sinsin B. & Soulé B. G. 2007. Effets de la dynamique d'occupation du sol sur la structure et la diversité floristique des forêts claires et savanes au Bénin. *Tropicultura*, 25 (4) : 221-227. URL <http://www.tropicultura.org/text/v25n4/221.pdf>

Burnham K. P. & Anderson D. R. 2004. Multimodel Inference: understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological Methods Research*, (33): 261-304. URL : [http://hbanaszak.mjr.uw.edu.pl/TempTxt/BurnhamAnderson\\_2004\\_Multimodel%20Inference%20Understanding%20AIC%20and%20BIC%20in%20Model%20Selection.pdf](http://hbanaszak.mjr.uw.edu.pl/TempTxt/BurnhamAnderson_2004_Multimodel%20Inference%20Understanding%20AIC%20and%20BIC%20in%20Model%20Selection.pdf).

Centre d'étude, de recherches et de formations forestières (CERF). 2011. Capitalisation et documentation des acquis et innovation de recherche pour la gestion durable des ressources forestières. Rapport final. République du Bénin. 306 p.

Dedieu J. P. 1989. Télédétection et montagnes. Un outil privilégié pour l'étude des milieux d'altitude ? *Revue de géographie alpine*, 77(1-3) : 105-123. URL: [http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/rga\\_0035-121\\_1989\\_num\\_77\\_1\\_2734](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/rga_0035-121_1989_num_77_1_2734).

Girou D. Deschamps N. & Delorme M. 1998. Apports et limites de la télédétection aérienne et satellitale pour la gestion des milieux naturels en Guyane : exemple du zonage écologique et humain de la région de Saül. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 40 (1) : 423-432. URL: [http://www.persee.fr/doc/AsPDF/jatba\\_0183-5173\\_1998\\_num\\_40\\_1\\_3683.pdf](http://www.persee.fr/doc/AsPDF/jatba_0183-5173_1998_num_40_1_3683.pdf)

Google. 2014. Google, Google Earth Features URL: <http://www.google.com/earth/media/features.html>

Hakizimana P. Bangirina F. Havyarimana F. Habonimana B. & Bogaert J. 2011. Analyse de l'effet de la structure spatiale des arbres sur la régénération naturelle de la forêt claire de Rumonge au Burundi. *Bulletin scientifique de l'Institut national*

- pour l'environnement et la conservation de la nature, 9 : 46-52. URL : <http://www.caribsat.teleddetection.fr>
- Lonchay M. 2007. "Google Earth » et « windows live search maps" analyse fonctionnelle et comparaison. Bulletin de la Société géographique de Liège, 49 (2007) : 75-84. URL: <http://popups.ulg.ac.be/0770-7576/index.php?id=1729&file=1>
- Moriasi D.N. Arnold J.G. Van Liew M.W. Bingner R.L. Harmel R.D. & Veith T.L. 2007. Model Evaluation Guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 50(3): 885-900. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.532.2506&rep=rep1&type=pdf>
- Pouliot D.A. King D.J. Bell F.W. & Pitt D.G. 2002. Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration. Remote Sensing of Environment, 82: 322-334. URL:
- Pfeifer M. Disney M. Quaife T. & Marchant R. 2012. Terrestrial ecosystems from space: a review of earth observation products for macroecology applications
- Global Ecol. Biogeogr., 21 (6) : 603-624, DOI: [10.1111/j.1466-8238.2011.00712.x](https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00712.x)
- R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org>
- Sinsin B. & Kampmann D. (eds). 2010 : Atlas de la Biodiversité de l'Afrique de l'Ouest, Tome I : Bénin. Cotonou & Frankfurt/Main.
- Sokpon N. Biaou S. H. Ouinsavi C. & Hunhyet O. 2006. Bases techniques pour une gestion durable des forêts claires du Nord-Bénin : rotation, diamètre minimal d'exploitabilité et régénération. Bois et forêts des tropiques, 287 : 45-57. URL: [http://bft.cirad.fr/cd/BFT\\_287\\_45-57.pdf](http://bft.cirad.fr/cd/BFT_287_45-57.pdf)
- Santhi C. Arnold J.G. Williams J.R. Dugas W.A. Srinivasan R. & Hauck L.M. 2001. Validation of the swat model on a large river basin with point and nonpoint sources. Journal of the American Water Resources Association, 37(5): 1169-1188. URL: <http://ssl.tamu.edu/media/11881/validation%20of%20the%20swat%20model%20on%20a%20large%20river%20basin%20with%20point%20and%20nps.pdf>
- Tyukavina A. Hansen M. C. Potapov P. V. Krylov A. M. & Goetz S. J. 2016. Pan-tropical hinterland forests: mapping minimally disturbed forests. Global Ecology and Biogeography, 25: 151-163. doi:10.1111/geb.12394
- Venard C. Delaitre E. Callot Y. Ouessar M. & Ouerchefani D. 2010. Exploitation d'images satellitaires à très haute résolution spatiale fournies par Google Earth. Exemple d'application à l'Etude de l'ensablement d'oliveraies en Tunisie. Revue Téléddetection, 9(1) : 59-71. URL: <http://www.caribsat.teleddetection.fr>
- White F. 1986. La végétation d'Afrique. ORSTOM/UNESCO/AETFAT/UNSO, Paris 391 p.
- Yabi C.C. 2003. Contribution méthodologique au cubage des essences locales des forêts naturelles : cas de *Isobertia spp.* dans la zone Soudanienne au Bénin. Thèse d'Ingénieur Agronome. Université d'Abomey Calavi, Bénin, 121p