

## La dynamique spatiale de la forêt située dans la réserve naturelle forestière de Bururi au Burundi

F. Havyarimana<sup>1\*</sup>, T. Masharabu<sup>1</sup>, J.K. Kouao<sup>2</sup>, I. Bamba<sup>3</sup>, D. Nduwarugira<sup>1</sup>, M.-J. Bigendako<sup>1</sup>, P. Hakizimana<sup>1</sup>, A. Mama<sup>4</sup>, F. Bangirina<sup>5</sup>, G. Banyankimbona<sup>1</sup>, J. Bogaert<sup>6</sup> & C. De canniere<sup>7</sup>

**Keywords:** Anthropogenic disturbance- Forest spatial dynamic- Satellite images- Socio-political instability- Burundi

### Résumé

*La forêt étudiée est une aire protégée située au sud du Burundi à proximité de la ville de Bururi et des villages agricoles. La protection effective de cette réserve forestière a débuté en 1980 mais l'aire protégée a été délimitée en 2000. L'objectif de cette étude est d'analyser la dynamique spatiale de cette forêt afin de vérifier si son statut de protection a limité les pressions anthropiques auxquelles elle était soumise avant sa protection. Les changements d'occupation du sol au sein de la réserve ont été analysés à l'aide de six images satellitaires multispectrales de type Landsat et des observations sur le terrain. L'analyse des changements d'aire et du périmètre de la forêt de Bururi montre que la dynamique de cette forêt comprend deux phases: la première est principalement caractérisée par la déforestation et la savanisation en bordure des zones agricoles mais également par la cicatrisation de son intérieur entre 1986 et 2001. La deuxième phase est caractérisée par l'augmentation de la superficie et du périmètre forestier suite à la transformation des zones antérieurement savanisées. La limitation de la pression anthropique liée notamment à la délimitation de l'aire protégée, la perturbation des activités agricoles suite à l'instabilité sociopolitique ainsi que l'augmentation du nombre de garde-forestiers, seraient à l'origine de l'augmentation de la superficie entre 2001 et 2011. L'implication des populations locales dans la protection de cette forêt pourrait limiter davantage la pression anthropique et favoriser ainsi la régénération des zones dégradées. Dans ce contexte, l'innovation des pratiques agropastorales dans les villages riverains de l'aire protégée pourrait également contribuer à limiter les perturbations anthropiques.*

### Summary

#### The Forest Spatial Dynamics in the Bururi Forest Nature Reserve, Burundi

*The studied forest is a protected area located in Southern Burundi, close to Bururi city and to agricultural villages. The effective protection of this forest started in 1980 but the protected area delimitation occurred in 2000. The forest spatial dynamic is analyzed to assess the effectiveness of this protection status. The study combines six Landsat multispectral satellite images analysis with field observations. Forest area and perimeter analysis highlights its dynamic in two phases: the first one is mainly characterised by deforestation and savannah development around agricultural lands but also by forest regrowth processes between 1986 and 2001. The second phase (2001-2011) of the forest dynamic is characterized by the increase of its surface and perimeter following the transformation of savannah zones. The anthropogenic effect limitation linked to the protected area delimitation, agricultural activities disturbance during socio-political instability period and to the increasing number of forest-rangers, would have influenced the surface and perimeter gain between 2001 and 2011. Local population implication in forest protection could further limit human pressure and promote degraded zones regeneration. Thus, agropastoral practices innovation in neighboring villages of the protected zone could contribute to limit these anthropogenic disturbances.*

<sup>1</sup>Université du Burundi, Faculté des Sciences, Département de Biologie, Bujumbura, Burundi.

<sup>2</sup>Université Nangui Abrogoua, UFR Sciences de la Nature, Laboratoire de Biologie et Amélioration des Productions Végétales, Unité de Recherche en Ecologie et Biodiversité, Abidjan, Côte d'Ivoire.

<sup>3</sup>Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire

<sup>4</sup>Université d'Abomey-Calavi, Faculté des Sciences Agronomiques, Laboratoire d'Ecologie Appliquée, Cotonou, Bénin.

<sup>5</sup>Ecole Normale Supérieure, Bujumbura, Burundi.

<sup>6</sup>Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, Unité Biodiversité et Paysage, Passage des Déportés, Gembloux, Belgique.

<sup>7</sup>Université Libre de Bruxelles, Ecole Interfacultaire de Bioingénieurs, Service d'Ecologie du Paysage et Systèmes de Production Végétale, Belgique.

\*Auteur correspondant: Email: francois.havyarimana@ub.edu.bi; frhavyarimana@yahoo.fr

## Introduction

L'intérêt accordé à la protection de l'environnement a depuis longtemps amené plusieurs pays à créer des aires protégées sur leurs territoires (44). La plupart d'entre elles se trouvent en zone tropicale (20). Cette politique de conservation est fondée notamment sur l'intérêt pour les générations actuelles et futures de conserver la biodiversité en raison de son patrimoine génétique (51) mais aussi son rôle dans l'alimentation, la santé, la résistance des écosystèmes en cas de perturbation, la régulation de l'équilibre physico-chimique de la biosphère, etc. (38, 67).

Même si la création d'aires protégées présente des avantages pour les populations locales notamment la création d'emplois ou le désenclavement suite à l'aménagement pour le tourisme, ces populations sont cependant condamnées à limiter ou à abandonner l'exploitation de tels espaces où elles vivent depuis plusieurs siècles (1). Cette politique entraîne ainsi des revendications foncières qui influencent significativement les rapports entre l'aire protégée et la population riveraine, qui la considère toujours comme son territoire traditionnel (59). Dans les pays moins développés, les agriculteurs estiment que cette politique de conservation les conduit à un état d'extrême pauvreté. La contribution de la superficie déforestée dans l'accroissement de la production agricole reste pourtant insignifiante (19). Définies par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) comme étant des zones strictement protégées (46), ces écosystèmes subissent cependant des pressions anthropiques qui s'exercent de la périphérie vers l'intérieur ou dans le sens inverse (65). En zone tropicale, le taux de déforestation serait paradoxalement plus élevé par rapport à celui des forêts soumises à une gestion communautaire (56). Plusieurs auteurs (17, 21, 22, 55) considèrent unanimement que dans un tel contexte, la recherche de nouvelles terres agricoles plus fertiles constitue l'une des causes majeures de la déforestation. En Afrique subsaharienne, 86% de la déforestation est attribué à l'agriculture, avec 54% de la superficie concernée qui est imputable à l'agriculture de subsistance, tandis que le reste revient à l'agriculture intensive (40). Des études réalisées dans certains pays de l'Afrique australe ont montré que la plupart des parcs nationaux et réserves forestières ont diminué de superficie alors qu'ils étaient supposés protégés (52, 61). A titre d'exemple, Green *et al.* (29) signalent une perte de 5% de forêts dense et 43% de forêts claires sur la chaîne de montagne de l'Est de la Tanzanie entre 1975 et 2000. En Ouganda, une perte de 25% de la forêt du Mont Elgo a été enregistrée entre 1973 et 2009 (54). Cette perte d'habitats naturels entraîne incontestablement l'érosion de la biodiversité surtout lorsque les écosystèmes concernés sont de petite superficie (6).

La plupart des Parcs et Réserves Forestières du Burundi sont de petites superficies et se trouvent dans une matrice anthropique où les zones agricoles constituent la classe d'occupation du sol la plus dominante. Selon les informations fournies par le Ministère en charge de l'environnement au Burundi en 2008, ces aires protégées sont en perpétuelle dégradation suite à la pression des populations locales dont les intérêts n'ont pas été pris en considération dans les systèmes de gestion (52). En plus, leur protection aurait été perturbée par l'instabilité sociopolitique survenue au Burundi en octobre 1993 (60). Ces écosystèmes abritent pourtant des espèces animales et végétales endémiques ou en voie de disparition (54). Selon le décret-loi du 25 janvier 2000 portant délimitation de la Réserve Naturelle Forestière de Bururi (RNFB), l'exploitation des terres autour de cette réserve n'est permise qu'à un rayon de 1 km au moins de sa limite. Cependant, cette limite est contiguë aux milieux agricoles et se trouve à quelques mètres seulement de la ville de Bururi. Les quelques références consultées divergent sur la superficie réelle de la forêt située dans cette réserve et ne précisent pas à quelle année elle a été évaluée. Nzigidahera (47) indique qu'elle a une superficie d'environ 2000 ha tandis que Kanyamibwa et Vande Weghe (35) lui attribuent une superficie de 1600 ha. La divergence entre les deux estimations pourrait s'expliquer par le processus de régénération forestière ou de déforestation survenu entre les deux dates d'évaluation. Compte tenu de la localisation de la réserve dans un paysage agropastoral, les activités anthropiques qui s'y déroulent et qui auraient été davantage influencées par l'instabilité sociopolitique, sont susceptibles de perturber les processus écologiques et de limiter ainsi la régénération forestière.

L'objectif global de cette étude est d'analyser la dynamique spatiale de la forêt de Bururi afin de vérifier si son statut de protection a limité les pressions anthropiques auxquelles elle était soumise avant sa protection. Ainsi, cette étude cherche à répondre à trois questions:

(i) La création de la RNFB aurait-elle entraîné l'augmentation de la superficie et du périmètre de la forêt suite à la régénération des zones antérieurement dégradées? Cette forêt jouit en effet d'un statut de protection depuis 1980 et une équipe de garde-forestiers a été mise en place pour lutter contre son exploitation illicite.

(ii) L'augmentation de l'aire et du périmètre de la forêt de Bururi seraient-elle principalement liée à la transformation des zones antérieurement savanisées? En effet, compte tenu de sa localisation dans un paysage agropastoral où les feux de brousse sont fréquents, un processus de savanisation de la forêt pourrait s'y être déroulé.



### Choix des images satellitaires

Le choix des images satellitaires permettant de détecter les changements d'occupation du sol constitue une étape fondamentale (36). Ces images doivent être prises aux dates similaires pour minimiser les effets saisonniers (63). Dans cette étude, les images utilisées ont été prises au cours de la même saison (sèche) pour minimiser cette influence saisonnière. Les images prises pendant la saison sèche permettent en effet d'avoir un maximum de contraste entre les éléments du paysage et la disponibilité des données devient par conséquent maximale du fait de la faible nébulosité (48). L'évolution de l'aire et du périmètre de la forêt de Bururi a été analysée à l'aide de six images satellitaires multispectrales de type Landsat dont la résolution spatiale est de 30 m. Parmi ces images, trois ont été prises avant la délimitation officielle de la RNFB tandis que les trois autres ont été prises après. Celles prises avant la délimitation sont des images TM (*Thematic Mapper*) qui datent respectivement du 12 juillet 1986, 27 août 1991 et 3 août 1994. Les images prises après la délimitation de la RNFB sont de type ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper plus*) et TM. Leurs dates d'acquisition sont respectivement le 1 octobre 2001 (ETM+), 31 août 2007 (ETM+) et 1 juillet 2011 (TM). La zone couverte par ces images comprend les provinces de Makamba, Rutana et une partie de la province de Bururi contenant cette forêt.

### Collecte des données de terrain

Lors des travaux de terrain, les types d'occupation du sol observés ont été notés. Au total, 771 points ont été relevés dans des zones homogènes à l'aide d'un GPS (Garmin, précision de 7 m) au cours des années 2010, 2011 et 2012. Le nombre de points relevés dans les différentes classes d'occupation du sol était variable mais dépendait surtout de la superficie de chaque classe. Ainsi, 276 points ont été échantillonnés en zones agricoles, 118 en forêt, 316 en savanes-prairies et 61 points en plantations, soit en moyenne 1 point sur une superficie de 6,5 km<sup>2</sup>. Nous avons également mené une enquête non structurée sur l'histoire de l'occupation du sol auprès de la population locale. Il était question de savoir approximativement depuis quand la classe d'occupation du sol observée existe à cet endroit en se référant à l'âge de la personne interrogée. Dans le cas où la classe était récente, il s'agissait de déterminer la classe qui existait avant elle. Seules les personnes ayant un âge permettant de connaître l'occupation du sol de 1986 ont été interrogées. Nous tenons à préciser que les réponses données par toutes les personnes interrogées à propos de l'histoire de l'occupation du sol n'étaient pas divergentes.

### Prétraitement et classification des images satellitaires

La composition colorée de toutes ces images a été effectuée en associant les bandes spectrales 4 (proche infra rouge), 3 (rouge) et 2 (vert). Ces bandes sont en effet appropriées dans l'étude de la dynamique de la végétation étant donné que cette dernière réfléchit très fortement le rayonnement proche infrarouge (28, 39). La classification supervisée de toutes ces images a été réalisée en utilisant l'algorithme du maximum de vraisemblance à l'aide du logiciel ENVI. Globalement, ce type de classification consiste à définir au préalable les classes thématiques qu'on souhaite extraire de l'image satellitaire. On identifie ensuite quelques zones de l'image occupées, sans ambiguïté, par les classes d'intérêt. Par après, les pixels sont affectés à la classe qui correspond le mieux à ses caractéristiques spectrales (15).

En se basant sur l'ancienne carte d'occupation du sol du Burundi (1:50000) établie par l'Institut Géographique du Burundi et l'Institut Géographique de France en 1982, quatre classes d'occupation du sol ont été retenues. Il s'agit des forêts, savanes-prairies, plantations (cane à sucre, palmiers, Eucalyptus,...) et zones agricoles (champs, jachères, habitations et sols nus). Cette classification a été retenue car elle s'inspire de celle réalisée par Mayaux *et al.* (43) sur toute l'Afrique. L'utilisation des points de terrain relevés à l'aide d'un GPS (Garmin, précision de 7 m) dans le choix des zones d'entraînement a permis de discriminer les formations herbeuses naturelles des zones agricoles. Le logiciel ENVI 4.3 que nous avons utilisé pour classifier les images permet en effet de retrouver ces points de terrain sur les images en composition colorée, ce qui a permis de localiser les différentes classes mais aussi de distinguer les pixels des formations herbeuses et ceux des zones agricoles. Après avoir classé l'image de 2011 dont les classes d'occupation du sol étaient encore vérifiables sur le terrain, il a été possible de reconstituer l'occupation du sol des années antérieures (1986, 1991, 1994, 2001 et 2007) en réutilisant les mêmes zones d'entraînement (48). Il convient cependant de signaler que seuls les pixels dont l'occupation du sol n'avait pas changé ont été considérés. Ces pixels ont été déterminés en s'inspirant des informations livrées par les personnes enquêtées mais aussi en comparant visuellement leur réflectance en 2011 et celle observée sur les images des années antérieures.

### Validation de la classification des images satellitaires

Pour valider la classification réalisée, deux indices issus de la matrice de confusion à savoir la précision globale (*PG*) et le coefficient de Kappa (*K*) ont été utilisés en se basant sur des valeurs de référence. Les valeurs du coefficient de Kappa varient en effet de 0 à 1.

La valeur 0 n'indique aucun gain par rapport à une classification aléatoire tandis que la valeur 1 indique une classification parfaite (18, 68). Selon Fitzgerald et Lees (25), une valeur du coefficient de Kappa inférieure à 0,40 indique une mauvaise classification. Une valeur comprise entre 0,40 et 0,75 est jugée acceptable tandis qu'elle est excellente si la valeur est supérieure à 0,75. Les valeurs de  $PG$  et de  $K$  ont été calculées en utilisant respectivement les équations (I) et (II).

$$PG = \frac{\sum m(i, i)}{T_{classés}} \quad (I)$$

$$K = \frac{(T_{classés}) \sum m(i, i) - \sum [m(i, +) \cdot m(+, i)]}{T_{classés}^2 - \sum [m(i, +) \cdot m(+, i)]} \quad (II)$$

où  $m(i, i)$  est le nombre de pixels de la classe  $i$  correctement classés,  $T_{classés}$  le nombre total des pixels classés en considérant toutes les classes,  $m(i, +)$  la valeur marginale de la ligne  $i$  dans la matrice de confusion c'est-à-dire la somme de la ligne et  $m(+, i)$  le total des pixels devant appartenir à la classe  $i$  (15).

#### Traitement cartographique et extraction des données numériques

Les images classées ont été vectorisées en utilisant le module conversion tools du logiciel ArcGIS 9.3. Ce logiciel a également été utilisé pour calculer l'aire et le périmètre des différentes taches qu'on retrouve dans le paysage dont la forêt de Bururi. Ensuite, l'extraction du polygone correspondant à cette forêt a été réalisée à partir des cartes d'occupation du sol dérivées d'images satellitaires. L'aire et le périmètre de la forêt correspondant à chaque date ont été transformés en valeurs relatives en les divisant respectivement par l'aire et le périmètre maximal observés entre 1986 et 2011. Cette transformation a été réalisée pour avoir la même échelle sur le graphique qui montre leur évolution. Il convient de préciser que le paysage est ici considéré comme une portion du territoire composée d'ensembles d'écosystèmes en interaction tandis qu'une tache constitue un élément paysager (14, 26).

#### Analyse de la dynamique des classes d'occupation du sol dans l'empreinte forestière

Pour analyser la dynamique spatiale de la Forêt de Bururi, nous avons d'abord déterminé l'empreinte forestière c'est-à-dire la zone qui a été occupée par la forêt au moins à l'une des six dates considérées (1986, 1991, 1994, 2001, 2007, 2011). En d'autres termes, pour déterminer l'empreinte forestière, nous avons considéré tous les pixels qui ont été observés au moins une fois forestier.

Pour cela, les six polygones correspondant à la tache forestière aux 6 dates ont été fusionnées (à l'aide du module data management tools de ArcGIS 9.3) et l'aire du polygone résultant a été déterminée. Ce dernier qui correspond à l'empreinte forestière, a été ensuite utilisé pour extraire la zone contenant la forêt de Bururi à partir de chacune des six cartes d'occupation du sol dérivées d'images satellitaires. La zone extraite comprend la forêt de Bururi mais aussi d'autres classes d'occupation du sol résultant de sa transformation. Superposées deux à deux à l'aide du logiciel ArcGIS 9.3, ces zones ont permis de détecter les changements d'occupation du sol et la conversion des différentes classes au sein de l'empreinte forestière. Les matrices de transition qui en résultent ont été par la suite utilisées pour analyser la dynamique de la forêt au cours du temps. Afin d'analyser l'influence du statut de protection sur la dynamique spatiale de cette forêt, le rapport en pourcentage entre l'aire de la zone forestière non transformée et l'aire de la forêt de l'année précédemment étudiée a été calculé. La stabilité de la forêt est indiquée par la proportion de la forêt qui n'a pas été convertie en d'autres classes d'occupation du sol. Cette proportion est déterminée par rapport à l'aire totale de l'empreinte forestière. Le taux de déforestation annuel ( $y$ ) exprimé en pourcentage a été défini comme étant la proportion de la forêt transformée en classes anthropiques (zones agricoles et plantations). Il a été calculé à l'aide de l'équation III.

$$y = \frac{100n}{N(t_2 - t_1)} \quad (III)$$

où  $n$  représente l'aire de la forêt convertie en classes anthropiques entre deux dates  $t_1$  et  $t_2$  et  $N$  étant l'aire de la forêt à la date  $t_1$ .

#### Analyse des processus de transformation spatiale

L'analyse de la dynamique de la forêt de Bururi a été également réalisée en identifiant les processus de transformation spatiale associés à la dynamique des classes d'occupation du sol dans l'empreinte forestière. L'arbre de décision dichotomique de Bogaert *et al.* (6) a été utilisé pour identifier les processus de transformation spatiale sur la base de l'analyse de l'évolution de l'aire, du périmètre et du nombre de taches des différentes classes d'occupation du sol entre deux dates considérées.

## Résultats

### Evaluation de la qualité de la classification des images satellitaires

Pour les six images traitées, la valeur de la précision globale est comprise entre 77% et 95% tandis que celle du coefficient de Kappa est comprise entre 0,74 et 0,94. Même si la classification peut être considérée comme très bonne de manière générale pour les six images utilisées, les plus récentes ont été les mieux classées par rapport aux plus anciennes si on tient compte de la valeur du coefficient de Kappa. Le nombre de pixels correctement classés dépasse en moyenne 80% pour toutes les classes d'occupation du sol (Tableau 1).

Les erreurs de commission et d'omission observées pour les différentes classes et pour toutes les images sont inférieures à 50%, ce qui indique que la classification réalisée est acceptable.

### Evolution de l'aire et du périmètre de la forêt de Bururi

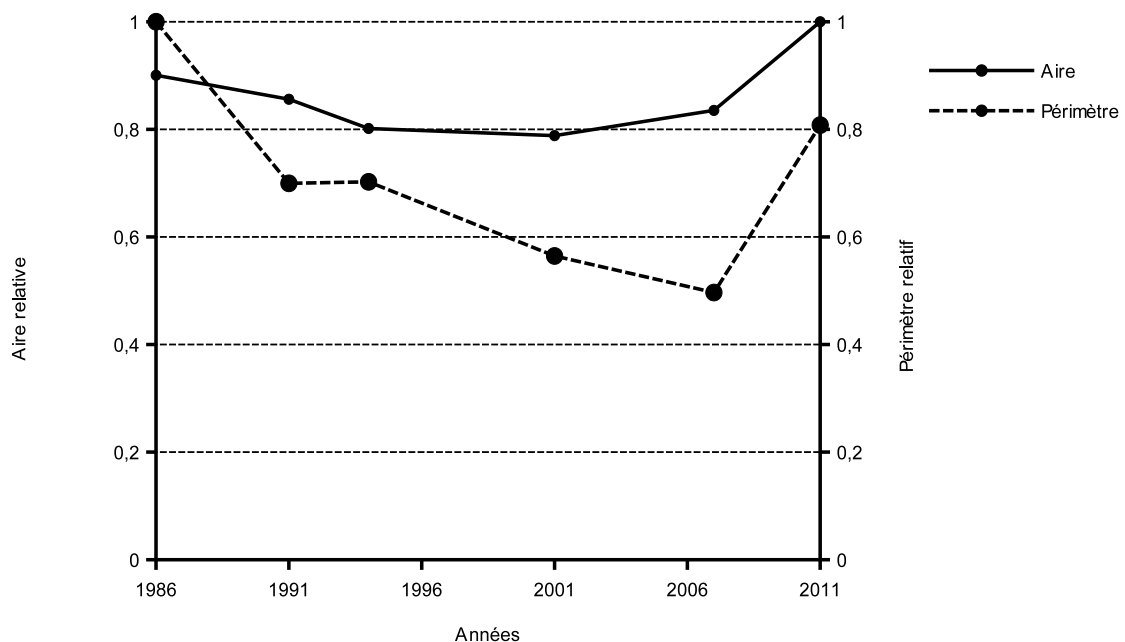
La zone qui a été occupée par la forêt de Bururi entre 1986 et 2011 c'est-à-dire l'empreinte forestière s'étend sur 2362 ha. Cependant, pour chacune des six années d'étude, la forêt n'a jamais occupé toute cette superficie. La plus grande superficie est observée en 2011 (1974 ha) tandis que la plus petite (1556 ha) s'observe en 2001 (Figure 2). L'analyse de l'évolution de la superficie forestière au cours du temps montre qu'elle a subi une diminution progressive de 1986 à 2001.

**Tableau 1**

Pourcentage de pixels correctement classés pour les 4 classes d'occupation du sol en utilisant l'algorithme du maximum de vraisemblance.

Classes	Dates d'acquisition des images satellitaires					
	1986	1991	1994	2001	2007	2011
ZA	82,95	96,13	97,01	99,94	99,77	100,00
FO	87,15	89,33	95,49	91,78	95,22	95,63
SP	59,44	91,15	96,68	97,11	96,54	99,67
PL	83,05	82,24	84,37	92,64	81,41	88,90
PG	77,33	87,96	92,17	94,52	91,43	94,68
K	0,74	0,87	0,93	0,95	0,95	0,94

Pour chaque classe, ce pourcentage est calculé par rapport au total de pixels de cette classe. ZA: zones agricoles, FO: forêts, SP: savanes-prairies, PL: plantations, PG: précision globale, K: coefficient de Kappa.



L'aire maximale de la forêt est de 1974,96 ha (en 2011) et le périmètre maximal est de 115,48 km (en 1986). L'aire relative est le rapport entre l'aire de la forêt à une date donnée et l'aire maximale observée entre 1986 et 2011. Le périmètre relatif est le rapport entre le périmètre de la forêt à une date donnée et le périmètre maximal observé entre 1986 et 2011. L'aire et le périmètre ont été obtenus à partir de 6 images satellitaires.

**Figure 2:** Evolution de l'aire relative et du périmètre relatif de la forêt de Bururi entre 1986 et 2011 (Burundi).

La diminution la plus faible s'observe entre 1994 et 2001, période caractérisée par l'instabilité sociopolitique au Burundi. L'augmentation de sa superficie est observée entre 2001 et 2011. Cette augmentation est la plus élevée entre 2007 et 2011. L'analyse de l'évolution du périmètre de la forêt indique qu'il a diminué progressivement de 1986 à 2007 malgré une légère augmentation en 1994. Il importe de souligner que sa valeur maximale s'observe en 2011 c'est-à-dire onze ans après la délimitation effective de la Réserve et huit ans après la fin de l'instabilité sociopolitique.

### **La dynamique spatiale de la forêt entre 1986 et 2011**

L'analyse des matrices de transition (Tableau 2) montre que la stabilité de la forêt est plus élevée entre 2007 et 2011 tandis qu'elle est plus faible entre 1986 et 1991. La zone forestière qui n'a pas été convertie en d'autres classes représente en effet 58% de l'aire totale de l'empreinte forestière entre 1986 et 1991 tandis qu'elle atteint 67% entre 2007 et 2011. La fraction de la forêt convertie en savanes-prairies a globalement diminué au cours du temps. Elle représente 15,8% de la superficie forestière entre 1986 et 1991.

Par rapport à toute l'empreinte forestière, cette fraction représente 11,9%. Par contre, cette conversion en savanes-prairies est passée à 3,2% de l'aire totale de l'empreinte forestière entre 2007 et 2011.

La transformation de la forêt en zones agricoles et plantations est plus importante entre 1986 et 1991. Au cours de cette période, le taux de déforestation annuel est de 1,47%. Ce taux passe de 0,77% entre 1991 et 1994 à 0,26% entre 2007 et 2011.

La conversion des savanes-prairies en forêts est également observée. La stabilité des savanes-prairies est plus faible entre 2007 et 2011. La fraction de cette classe convertie en forêt est passée de 11,43% de l'aire totale de l'empreinte forestière entre 1986 et 1991 à 15,66% entre 2007 et 2011. C'est entre 1991 et 1994 que la conversion des savanes-prairies en forêts est la plus faible (3,41%).

Quant aux plantations, leur superficie a augmenté au cours de la période d'étude. L'aire totale des plantations est passée de 1,26% de l'aire totale de l'empreinte forestière en 1986 à 5,61% en 2011. Entre 2007 et 2011, la fraction des plantations résultant de la conversion de la forêt et des savanes-prairies représente environ 82% de l'aire totale des plantations en 2011.

L'analyse comparative des cartes d'occupation du sol de toute l'empreinte forestière montre cependant la persistance d'une pression anthropique centripète à partir de la périphérie de la forêt. En plus, la façade Ouest proche des milieux agricoles semble plus anthropisée que la façade Est, proche de la ville de Bururi (Figure 3).

Entre 1986 et 1991, la cicatrization de l'intérieur de la forêt ainsi que la savanisation et la déforestation de sa périphérie sont observées. Bien que la périphérie de la forêt montre globalement une tendance à la régénération à partir de 1994, le sud de la forêt est par contre caractérisé par la progression des milieux agricoles entre 1994 et 2001, suivi par leur transformation en plantations entre 2001 et 2011. En somme, la dynamique spatiale de cette forêt comprend deux phases: la première entre 1986 et 2001 est caractérisée par la déforestation et la savanisation de la zone située surtout en bordure des milieux agricoles mais également par la cicatrization de son intérieur. La seconde observée entre 2001 et 2011 est caractérisée par l'augmentation de sa superficie et de son périmètre suite à la transformation des zones antérieurement savanisées.

### **Analyse des processus de transformation spatiale**

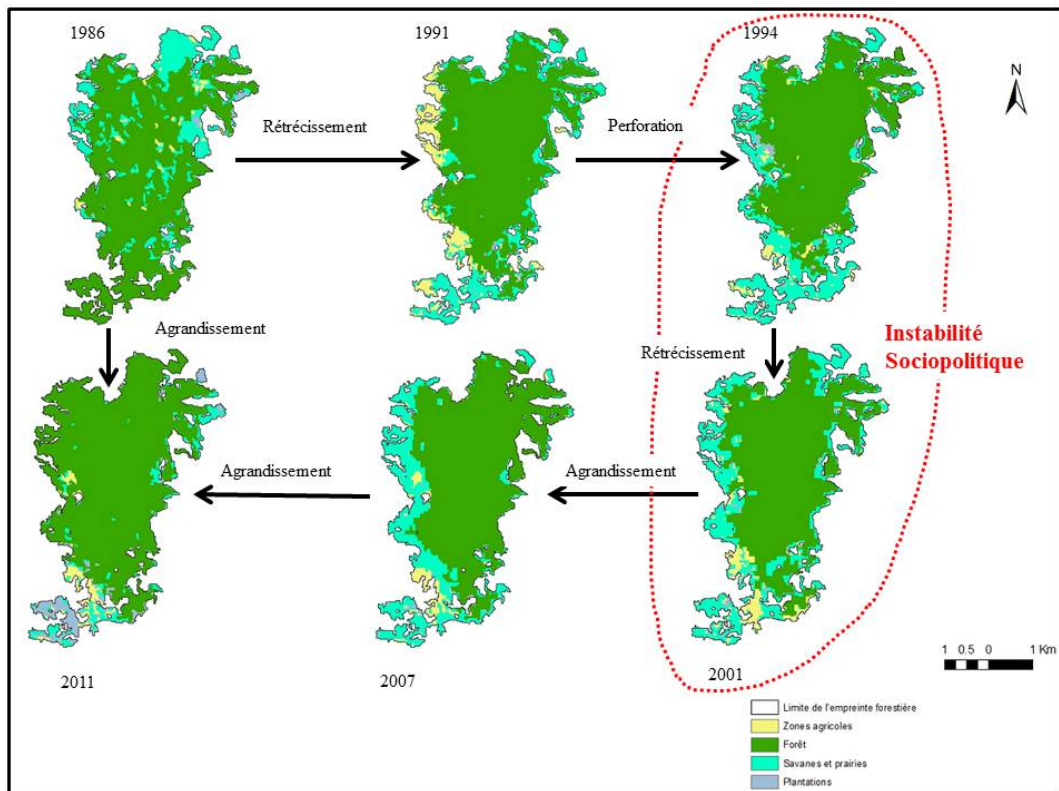
L'analyse des processus de transformation spatiale montre que cette forêt est constituée d'une seule tache durant toute la période d'étude. Cette tache a d'abord subi un processus de rétrécissement entre 1986 et 1991, qui a été suivi par un processus de perforation entre 1991 et 1994. Pendant la période d'instabilité sociopolitique (1994-2001), la tache forestière est ensuite caractérisée par un processus de rétrécissement. Ces processus de rétrécissement et de perforation ont entraîné la diminution de sa superficie entre 1986 et 2001. Entre 2001 et 2011, un processus d'agrandissement est observé (Figure 3).

**Tableau 2**  
Matrices de transition décrivant les  
changements d'occupation du sol dans la forêt  
de Bururi entre 1986 et 2011.

		Année 1991					
		Classe	ZA	SP	FO	PL	Total
Année 1986	ZA	0,21	0,53	1,38	0,03	2,15	
	SP	3,45	6,11	11,43	0,32	21,31	
	FO	4,62	11,90	57,84	0,91	75,27	
	PL	0,04	0,72	0,43	0,06	1,26	
	Total	8,33	19,26	71,08	1,33	100,00	
		Année 1994					
Année 1991	ZA	0,98	6,60	0,32	0,43	8,33	
	SP	2,63	12,75	3,41	0,47	19,26	
	FO	0,66	6,44	63,10	0,99	71,08	
	PL	0,20	0,87	0,18	0,09	1,33	
	Total	4,46	26,66	67,00	1,87	100,00	
		Année 2001					
Année 1994	ZA	0,84	2,85	0,62	0,14	4,46	
	SP	3,98	16,32	5,56	0,80	26,66	
	FO	0,38	7,22	59,16	0,24	67,00	
	PL	0,29	0,94	0,55	0,09	1,87	
	Total	5,49	27,34	65,89	1,27	100,00	
		Année 2007					
Année 2001	ZA	1,19	3,70	0,44	0,17	5,49	
	SP	2,19	16,71	7,62	0,83	27,34	
	FO	0,22	4,04	61,34	0,30	65,89	
	PL	0,16	0,80	0,22	0,09	1,27	
	Total	3,75	25,25	69,62	1,38	100,00	
		Année 2011					
Année 2007	ZA	2,00	0,60	0,68	0,46	3,75	
	SP	1,18	4,45	15,66	3,96	25,25	
	FO	0,09	2,26	66,64	0,63	69,62	
	PL	0,06	0,16	0,61	0,55	1,38	
	Total	3,33	7,47	83,59	5,61	100,00	

ZA: zones agricoles, FO: forêts, SP: savanes-prairies, PL: plantations. Les valeurs en gras représentent la fraction de l'empreinte forestière qui n'a pas été transformée entre deux dates considérées.





Les plages blanches sont des zones non forestières qui n'ont pas été converties en forêt entre 1986 et 2011. Les zones agricoles sont des champs, jachères, habitations ou sols nus. Entre 1986 et 2011, la tache forestière est globalement caractérisée par un processus d'agrandissement. Ce processus se manifeste après l'instabilité sociopolitique.

**Figure 3:** Dynamique de l'occupation du sol et processus de transformation spatiale dans la forêt de Bururi entre 1986 et 2011 (Burundi).

## Discussion

### Classification des images satellitaires

L'analyse de la dynamique spatiale de la forêt de Bururi sur la base des images satellitaires constitue l'objectif de cette étude. Dans une étude de détection des changements d'occupation du sol comme celle-ci, il est important que les images utilisées présentent des caractéristiques les plus homogènes possibles pour que les différences résultant de leur comparaison, soient attribuées à de réels changements du territoire et non à des artefacts liés à ces images (64). Même si la réflectance des objets peut varier d'un capteur à l'autre (3, 49), l'utilisation des images TM et ETM+ dans notre étude pourrait ne pas entacher significativement les résultats obtenus. Une étude de comparaison des réflectances dans les bandes homologues a montré en effet que les deux capteurs fournissent des données similaires si les images sont prises au-dessus d'un même site (3). Il importe de signaler cependant que même si l'analyse par télédétection permet de quantifier les changements d'occupation du sol, les causes sous-jacentes ne peuvent s'expliquer qu'à partir de données socio-économiques, culturelles et historiques (37, 66). C'est la raison pour laquelle le contexte sociopolitique a été mis en avant pour expliquer les causes de la dynamique de cet écosystème.

Les coefficients de Kappa obtenus pour les six images utilisées varient entre 74 et 94%, ce qui indique que la classification réalisée est acceptable si on tient compte des valeurs de références proposées par Fitzgerald et Lees (25). Il convient de signaler en outre que les valeurs du coefficient de Kappa obtenues dans notre étude sont similaires à celles considérées dans d'autres études pour valider la classification (4, 24, 58, 62). Les quelques erreurs de confusions observées seraient dues à la configuration spatiale des classes (42). Certaines petites parcelles agricoles sont en effet mélangées aux autres classes d'occupation du sol, et les cultures restent mêlées aux arbres dans le système d'abattis-brûlis observé dans notre zone d'étude (19). Cet agencement spatial pourrait conférer à ces parcelles agricoles des propriétés spectrales proches de celles de la végétation naturelle environnante (42) et pourrait ainsi être à l'origine de ces erreurs de confusions observées.

### Dynamique de la forêt de Bururi et processus de transformation spatiale

Depuis la création de la RNFB, la forêt de Bururi a d'abord subi une diminution de sa superficie malgré son statut d'aire protégée. Cette diminution pourrait être attribuée au fait que la zone protégée n'était pas matériellement délimitée.

Le décret-loi portant délimitation effective de cette Réserve forestière a en effet été promulgué en 2000 alors que la forêt était supposée protégée depuis 1980. Le taux de déforestation annuel observé avant la délimitation de cette réserve forestière est supérieur à celui des forêts de l'Afrique de l'Est (Ouganda, Kenya, Tanzanie, Rwanda, Burundi) qui est de 0,8% (53). Il est également plus élevé par rapport au taux moyen de déforestation des forêts africaines estimé à 0,4% (30). La reforestation par des espèces exotiques (*Pinus*, *Eucalyptus*, ...) observée dans notre zone d'étude a également été signalée dans d'autres forêts du Burundi notamment à Kigwena et dans la Kibira. L'étendue de ces plantations et leur dynamique spatiale sont cependant peu connues, ce qui limite la comparaison des taux de reforestation à l'échelle nationale. Il convient de signaler que le taux de reforestation dans la forêt de Bururi est plus de deux fois plus élevé que la moyenne du continent africain (2,3%) mais reste inférieur à la moyenne mondiale (6,6 %) (23).

Les facteurs susceptibles d'influencer significativement la déforestation sont multiples et complexes (53). L'accessibilité à la forêt constitue l'un des facteurs majeurs (7). La topographie, la distance ou le temps nécessaire pour accéder à la forêt sont autant de variables permettant d'évaluer l'impact de l'accessibilité (34). La localisation de la forêt de Bururi dans un paysage anthropisé, à proximité de la ville et des habitations des agri-éleveurs, aurait fortement contribué à la diminution de sa superficie. Plusieurs auteurs (7, 19, 59) estiment en effet que la pression urbaine contribue significativement à l'altération du milieu naturel périurbain en zone tropicale (Ex. Parc National de Banco, Abidjan, Côte d'Ivoire). L'anthropisation de cette forêt est accentuée par l'absence de zone tampon dans laquelle la population locale pourrait prélever certaines ressources nécessaires (32). Le fait que la façade Ouest qui est en contact direct avec les agri-éleveurs semble plus anthropisé que la façade Est qui est proche de la ville, indique que la recherche des terres agricoles serait le facteur majeur influençant la déforestation de cet écosystème. Ce constat confirme l'idée selon laquelle l'agriculture constitue l'une des causes majeures de la déforestation en Afrique tropicale (7, 12). Il convient de souligner cependant que la localisation du bureau du responsable forestier juste à la lisière forestière Est pourrait également expliquer la différence d'anthropisation observée entre les deux façades. L'extension des parcelles agricoles situées à la lisière forestière, la culture à l'intérieur des forêts (pour s'échapper à la surveillance des gardes forestiers), les feux et la coupe du bois sont signalés comme étant les principales menaces des forêts tropicales (50).

Ainsi, le processus de perforation observé dans cette forêt serait dû à la culture en forêt mais aussi à la coupe du bois précieux (*Entandrophragma* par exemple). Par contre, les feux de brousse et l'extension des parcelles agricoles situées juste à la bordure de cette forêt auraient entraîné le rétrécissement de la tache forestière entre 1986 et 2001. D'origine anthropique, ces processus sont connus comme étant caractéristiques de la transformation spatiale des taches naturelles (7). Le brûlage des résidus agricoles sous prétexte que les cendres qui en résultent enrichissent le sol, accentue le risque des feux accidentels dans un tel milieu où la forêt et les champs sont contigus. Il pourrait par conséquent être à l'origine du processus de savanisation de la périphérie de la forêt observé entre 1986 et 2001. Certaines espèces savanicoles résistantes au feu comme *Parinari curatellifolia*, *Hyparrhenia* sp et *Psorospermum febrifugum* (41) ont été en effet observées lors de nos travaux de terrain. Les savanes observées dans la forêt de Bururi sont également signalées dans la forêt de Nyungwe au Rwanda (5). Ces derniers auteurs soulignent que de telles savanes sont généralement moins fréquentes. Cette caractéristique commune est expliquée par le fait que les deux forêts résulteraient de la fragmentation d'une même forêt qui occupait toute la crête Congo-Nil (14).

La phase d'augmentation de la superficie de la forêt entre 2001 et 2011 résulte principalement de la conversion des savanes-prairies. Cette évolution positive a également été constatée par Bangirinama *et al.* (2) dans leur étude sur la caractérisation du processus de la succession écologique au Burundi. Ces derniers auteurs indiquent en effet que les zones anciennement perturbées de la forêt de Bururi affichent une tendance vers la reconstitution de la forêt initiale. Une telle dynamique traduit normalement la diminution de la pression anthropique (33). Dans un tel paysage où l'on observe une forte croissance démographique mais aussi où plus de 90 % de la population sont des agriculteurs, la diminution de la pression anthropique paraît cependant constituer un paradoxe. D'une part, le décret-loi de la délimitation de cette réserve forestière promulgué en 2000 pourrait limiter la pression anthropique et favoriser ainsi la régénération forestière. L'augmentation du nombre de garde-forestiers aurait également contribué à la diminution de la pression anthropique. D'autre part, la perturbation des activités agricoles en période d'instabilité sociopolitique (16) aurait limité la pression anthropique dans certaines zones de la forêt. La régénération de la végétation dans ces zones moins perturbées aurait entraîné plus tard (après l'instabilité) l'augmentation de la superficie forestière.

Cela ne veut pas signifier cependant que l'instabilité sociopolitique n'a pas eu d'impact négatif sur la protection de la forêt car l'on observe un taux de déforestation élevé entre 1991 et 1994 et un rétrécissement de la tache forestière en 2001. La faible stabilité des savanes-prairies observée en 2011 n'est donc pas le résultat d'une pression anthropique mais traduit plutôt un processus de succession écologique. Elle est en effet observée au même moment que l'agrandissement de la tache forestière. D'autres études ont également abouti à la même conclusion que le processus de savanisation peut être réversible une fois que la pression anthropique est limitée (27).

## Conclusion

Cette étude montre que la dynamique spatiale de la forêt située dans la Réserve Naturelle Forestière de Bururi comprend deux phases: la première est principalement caractérisée par la déforestation et la savanisation de la zone située surtout en bordure des milieux agricoles mais également par la cicatrization de son intérieur entre 1986 et 2001, notamment en raison de l'instabilité sociopolitique survenue au Burundi en 1993.

La deuxième phase est caractérisée par l'augmentation de sa superficie et de son périmètre suite à la transformation des zones antérieurement savanisées. Cette dynamique successione est survenue entre 2001 et 2011 après la délimitation effective de cette Réserve Naturelle qui aurait limité la pression anthropique de la ville de Bururi et des villages agricoles environnants. Le statut d'aire protégée a donc contribué à la protection de cet écosystème bien que des perturbations anthropiques persistent. A cet égard, l'implication des populations locales dans la protection de cette forêt, notamment les agri-éleveurs, pourrait limiter les feux de brousse et favoriser davantage la dynamique successione des zones dégradées.

## Remerciements

Les auteurs remercient le Gouvernement du Burundi, l'Université Libre de Bruxelles à travers le Bureau des Relations Internationales et de la Coopération, l'ARES-CCD ainsi que l'Université de Liège pour leur soutien financier

## Références bibliographiques

1. Aubert S., Rambintsaoatra S. & Razafiarijaona J., 2013, L'insécurité foncière dans et autour des aires protégées de Madagascar: un obstacle à surmonter pour la conservation de la biodiversité et le développement rural, *Dév. Durable Territ.*, **4**, 1, 1-19.
2. Bangirina F., Bigendako M.J., Lejoly J., Noret N., De Cannière C. & Bogaert J., 2010, Définition d'indices successionnels pour la caractérisation du processus de la succession post-culturale au Burundi, *Bois Forêts Tropiques*, **305**, 3, 57-66.
3. Bannari A., Teillet P.M. & Landry R., 2004, Comparaison des réflectances de surfaces naturelles dans les bandes spectrales homologues des capteurs TM de Landsat-5 et TM+ de Landsat-7, *Téledétection*, **4**, 3, 263-275.
4. Bianchi C.A. & Haig S.M., 2012, Deforestation trends of tropical dry forests in Central Brazil, *Biotropica*, **45**, 3, 395-400.
5. Bizuru E., Niyigaba P. & Mujawamariya M., 2014, Phytosociological study of Nyungwe montane savannahs, *J. Nat. Sci. Res.*, **4**, 9, 67-78.
6. Blankespoor B., Dasgupta S. & Wheeler D., 2014, Protected areas and deforestation. New results from high resolution panel data. *Policy Research Working*, 7091, 1-30.
7. Bogaert J., Bamba I., Kabulu J. P., Koffi K. J., De Cannière C., Visser M. & Sibomana S., 2008, *Fragmentation of Forest Landscapes in central Africa: causes, consequences and management*. In: [Patterns and Processes in Forest Landscapes: Multiple Use and Sustainable Management]. Laforteza, R., Chen, J., Sanesi, G., Crow, Th. R. (Eds.), 67-87. Springer, Verlag, New York, 425 p.
8. Bogaert J., Barima Y.S.S., Ji J., Jiang, H., Bamba I., Iyongo Waya Mongo L., Mama A., Nysen E., Dahdouh-Guebas F. & Koedam, N., 2011a, *A methodological framework to quantify anthropogenic effects on landscape patterns*. In: Hong K S., Wu J., Kim J.-E., Nakagoshi N., 2011 (eds.) *Landscape ecology in asian cultures*, 141-167, Library of Congress, Springer, Tokyo, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 331 p.
9. Bogaert J., Ceulemans R. & Salvador-Van Eysenrode D., 2004, Decision tree algorithm for detection of spatial processes in landscape transformation, *Environ. Manage.*, **33**, 1, 62-73.
10. Bogaert J., Vranken I., & André M., 2014, *Anthropogenic effects in landscapes: historical context and spatial pattern* pp 89-112, In: Hong, S. K, Bogaert, J., Min, Q. (eds.), *Biocultural landscapes: diversity, functions and values*, Library of Congress, Springer, Tokyo, Dordrecht, Heidelberg, New York, London, 218 p.
11. Bonnefille R., Rioulet G. & Buchet G., 1991, Nouvelle séquence pollinique d'une tourbière de la crête zaïre-nil (Burundi), *Rev. paleobotany & palynology*, **67**, 315-330.
12. Brink A.B. & Eva H D., 2009, Monitoring 25 years of land cover change dynamics in Africa: a sample based remote sensing approach, *Appl. Geogr.*, **29**, 501-512.
13. Brinkmann K., Schumacher J., Dittich A., Kadaore I. & Buerkert A., 2012, Analysis of landscape transformation processes in and around four west african cities over the last 50 years, *Landscape and Urban Planning*, **105**, 94-105.
14. Burel, F, Baudry, J, 2003. *Landscape ecology: concepts, methods and applications*. TEC & DOC, Paris, 362 p.
15. Caloz R. & Collet C., 2001, *Précis de télédétection: Traitements numériques d'images de télédétection*. Volume 3, Québec, Presses de l'Université du Québec, 386 p.
16. Cazenave-Piarrot A., 2004, Burundi: Une agriculture à l'épreuve de la guerre civile, *Les Cahiers d'Outre-Mer*, **226-227**, 1-15.
17. Chakravarty S., Ghosh S.A., Suresh C.P., Dey A.N. & Shukla G., 2012, *Deforestation: causes, effects and control strategies*. *Global Perspectives on Sustainable Forest Management*, InTech, 27 p.
18. Chokmani K., Bernier M. & Slivitzky M., 2006. Suivi spatio-temporel du couvert nival du Québec à l'aide des données NOAA-AVHRR, *Rev. Sci. Eau*, **19**, 3, 163-179.
19. Cochet H., 2001, *Crises et révolutions agricoles au Burundi*. Paris, Editions Karthala, 468 p.
20. DeFries R., Hansen A., Newton A.C. & Hansen M.C., 2005, Increasing isolation of protected areas in tropical forests over the past twenty years, *Ecol. Appl.*, **15**, 1, 19-26.
21. De Fries R., Hansen A, Turner B.L., Reid R. & Liu J., 2007, Land use change around protected areas: Management to balance human needs and ecological function, *Ecol. Appl.*, **17**, 4, 1031-1038.
22. Engelsen A., 2010, Policies for reduced deforestation and their impact on agricultural production, *P. Nat. Acad. Sci.*, **107**, 46, 19639-19644.
23. FAO, 2010, *Evaluation des ressources forestières mondiales 2010*. Rapport principal, Etude FAO: Forêts, 163, Rome, 348 p.
24. Fichera C.R., Modica G. & Pollino M., 2012. Land cover classification and change-detection analysis using multi-temporal remote sensed imagery and landscape metrics, *Eur. J. Remote Sensing*, **45**, 1-18.

25. Fitzgerald R.W. & Lees B.G., 1994. Assessing the classification accuracy of multisource remote sensing data, *Remote Sensing Environ.*, **47**, 362-368.
26. Forman R.T.T., 2005. *Land mosaics. The ecology of landscapes and regions*. Cambridge University press, Cambridge, 632 p.
27. Geiger E.L., Gotsch S.G., Damasco G., Haridasan M., Franco A.C. & Hoffmann W.A., 2011, Distinct roles of savanna and forest tree species in regeneration under fire suppression in a Brazilian savanna, *J. Vegetat. Sci.*, **22**, 312-321.
28. Girard M.C. & Girard C., 2010. *Traitement des données de télédétection. Environnement et ressources naturelles*, 2ème édition, Dunod, Paris, 553 p.
29. Green J.M.H., Larrosa C., Burgess N.D., Balmford A., Johnston A., Mbilinyi B.P., Platts P.J. & Coad L., 2013, Deforestation in a African biodiversity hotspot. Extend, variation and the effectiveness of protected areas, *Biol. Conserv.*, **164**, 62-72.
30. Hansen M.C., Stehman S.V. & Potapov P.V., 2010, *Quantification of global gross forest cover loss*. PNAS, **107**, 19, 8650-8655
31. Havyarimana F., Bogaert J., Ndayishimiye J., Barima S.S., Bigendako Y., Lejoly J. & De Cannière C., 2013. Impact de la structure spatiale de *Strombosia scheffleri* Engl. et *Xymalos monospora* (Harv.) Baill sur la régénération naturelle et la coexistence des espèces arborescentes dans la Réserve Naturelle Forestière de Bururi, Burundi, *Bois Forêts Tropiques*, **316**, 2, 49-61.
32. Heinen J.T., 1996, Human behavior, incentives and protected area management, *Conserv. Biol.*, **10**, 2, 681-684.
33. Inoussa M.M., Mahamane A., Mbow C., Saadou M. & Bachmann Y., 2011, Dynamique spatio-temporelle des forêts claires dans le Parc National du W du Niger (Afrique de l'Ouest), *Sécheresse*, **22**, 2, 108-116.
34. Joppa L. & Pfaff A., 2010, *Reassessing the forest impacts of protection: The Challenge of nonrandom location and a corrective method*. Annals of the New York Academy of Sciences, **1185**, 135-149.
35. Kanyamibwa S. & Vande Weghe J.P., 2001. *Burundi. Important bird's areas in Africa and associated islands: priority sites for conservation*, in Fishpool L. D. C., Evans M. I., (eds.), pp127-132, Newbury and Cambridge, UK: *Pisces Publications and BirdLife International*, BirdLife Conservation series n° 11.
36. Lagabrielle E., Metzger P., Martignac C., Durieux L. & Grellet G., 2005, *Guide pratique d'utilisation des informations produite dans le cadre du projet TEMOS à la Réunion*, 64 p.
37. Laporte N., 1999. *Géographie des relations ville-forêt en Afrique Centrale: approche régionale* (volume II). CARPE, Washington DC, 32 p.
38. Le Roux X., Barbault R., Baudry J., Burel F., Doussan I., Garnier E., Herzog F., Lavorel S., Lifran, R., Roger-Estrade J., Sarthou J.P. & Trommetter M., 2008, *Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies*. Expertise scientifique collective, Synthèse du rapport, INRA (France), 113 p.
39. Lillesand T. M., Kiefer R.W. & Chipman J.W., (2008)- *Remote sensing and image interpretation*. Sixth Edition. John Willey & Son, USA, 756 p.
40. Liniger H.P., Mekdaschi Studer R., Hauert C., & Gurtner M., 2011, *La pratique de la gestion durable des terres. Directives et bonnes pratiques en Afrique subsaharienne*, TerrAfrica, Panorama mondial des approches et technologies de conservation (WOCAT) et Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), 249 p.
41. Masharabu T., Noret N., Lejoly J., Bigendako M.J. & Bogaert J., 2010, Etude comparative des paramètres floristiques du Parc National de la Ruvubu, Burundi, *Eco Géo-Trop.*, **34**, 29-44.
42. Mayaux P., Bartholomé E, Massart M., Cutsem C.V., Cabral A., Nonguierma A., Diallo O., Pretorius C., Thompson M., Cherlet M., Pekel J.F., Defourny P., Vasconcelos M., Di Gregorio A., Fritz S., De Grandi G., Elvidge C., Vogt P. & Belward A., 2003, *A land cover map of Africa*. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 56 p.
43. Mayaux P., Bartholomé E, Fritz S. & Belward A., 2004, A new land-cover map of Africa for the year 2000, *J. Biogeogr.*, **31**, 861-877.
44. Mengue-Medou C., 2002, Les aires protégées en Afrique: perspectives pour leur conservation, *Vertigo*, **3**, 1, 1-14.
45. Ministère de l'eau, de l'environnement, de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme (MEEATU), 2008, *Modes de gouvernance et catégories d'aires protégées actuelles et futures au Burundi*. INECN, Bujumbura, 56 p.
46. Nyamuyenzi S., 2004, *Identification des besoins de renforcement des capacités pour la mise en œuvre de la stratégie nationale et plan d'action en matière de diversité biologique zone écologique du Mugamba Bututsi*. INECN, Bujumbura, 60 p.

47. Nzigidahera B., 2000, *Analyse de la diversité biologique végétale nationale et identification des priorités pour sa conservation*. INECN, Bujumbura, 126 p.
48. Oszwald J., Gond V., Dolédec S. & Lavelle P. (2011) Identification d'indicateurs de changement d'occupation du sol pour le suivi des mosaïques paysagères, *Bois Forêts Tropiques*, **307**, 1, 7-21.
49. Paolini L., Grings F., Sobrino J.A., Munoz J.C.J. & Karszenbaum H., 2006, Radiometric correction effects in Landsat multi-date/multi-sensor change detection studies, *Int. J. Remote Sensing*, **27**, 3-4, 685-704.
50. Peres C.A., 2011, Conservation in sustainable-use tropical forest reserves, *Conserv. Biol.*, **25**, 6, 1124-1129.
51. Perrings C., Gadgil M., 2002, *Pour une protection efficace et équitable de la biodiversité*. Iddri, Paris, 46 p.
52. Pfeifer M., Burgess N.D., Swetnam R.D., Platts P.J., Willcock S. & Marchant R., 2012, *Protected areas: mixed success in conserving east African's evergreen forests*. Plos One, **7** (6): e39337.doi: 1371/journal.pone.0039337.
53. Pfeifer M., Platts P.J., Burgess N.D., Swetnam R.D., Willcock S., Lewis S.L. & Marchant R., 2012, Land use change and carbon fluxes in East Africa quantified using earth observation data and field measurements, *Environ. Conserv.*, **40**, 3, 241-252.
54. Plumtre A.J., Davenport T.R.B., Behangana M., Kityo R., Eilu G., Segawa P., Ewango C., Meirte D., Kahindo C., Herremans M., Peterhans J. K., Pilgrim J., Wilson M., Languy M. & Moyer D., 2007. *The biodiversity of the Albertin Rift. Biological Conservation*, **134**, 178-194.
55. Pomel S., Salomon, J.N., 1998, *La déforestation dans le monde tropical*. Presses Universitaires de Bordeaux, Talence, 160 p.
56. Porter-Bolland L., Ellis E. A., Guariguata M.R., Ruiz-Mallén, I., Negrete-Yankelevich S. & Reyes-Garcia V., 2012, Community managed forests and forest protected areas: an assessment of their conservation effectiveness across the tropics, *Forest Ecol. Manage.*, **268**, 6-17.
57. Rishirumuhirwa T., 2000, *Gestion et conservation des sols dans les tropiques humides d'altitude: Cas du Burundi-Région des Grands lacs, document du Département de génie rurale, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne*, 58 p.
58. Rodriguez-Galiano V.F., Ghimire B., Rogan J., Chica-Olmo M. & Rigol-Sanchez J.P., 2012, An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS J. Photogrammetry Remote Sensing*, **67**, 93-104.
59. Sako N., Beltrando G., Atta K.L., N'da H.D. & Brou T., 2013, Dynamique forestière et pression urbaine dans le Parc National de Banco (Abidjan, Côte d'Ivoire), *Vertigo*, **13**, 2, 1-23.
60. Sanginga P., Mapatano S.M. & Niyonkuru D., 2013, Vers une bonne gouvernance des ressources naturelles dans les sociétés post-conflits: concepts, expériences et leçons des Grands Lacs en Afrique, *Vertigo*, **17**, 1-19.
61. Sassen M., Sheil D., Giller K.E. & Ter Braak C.J.F., 2013, Complex contexts and dynamic drivers. Understanding four decades of forest loss and recovery in an east African protected area, *Biol. Conserv.*, **159**, 257-268.
62. Sexton J.O., Urban D.L., Donohue M.J., Song C., 2013, Long-term land cover dynamics by multi-temporal classification across the landsat-5 record, *Remote Sensing Environ.*, **128**, 246-258.
63. Skupinski G., BinhTran D. & Weber C., 2009, Les images satellitaires Spot multi-dates et la métrique spatiale dans l'étude du changement urbain et suburbain-cas de la basse vallée de la Bruche (Bas-Rhin, France), *Eur. J. Geogr.*, **439**, 1-20.
64. Soucy-Gonthier, N., Marceau, D., Délage, M., Cogliastro, A., Domon, G. & Bouchard, A., 2003, *Détection de l'évolution des superficies forestières en Montérégie entre juin 1999 et août 2002 à partir d'images satellitaires TM*. Agence Forestière de la Montérégie, 29 p.
65. Terra T.N., Dos Santos R.F. & Cosat D.C., 2013, Land-use changes in protected areas and their future: The legal effectiveness of landscape protection, *Land Use Policy*, **38**, 378-387.
66. Timms B.F., Hayes J., Mccracken M., 2013. From deforestation to reforestation: applying the forest transition to the cockpit country of Jamaica, *Area*, **45**, 1, 77-97.
67. UPA, 2011. *Biodiversité: les alliés naturels de l'agriculteur, une richesse à préserver*. La Terre, Québec, 4p.
68. Vannier C., Vasseur C., Hubert-Moy L. & Baudry J., 2011. Multiscale ecological assessment of remote sensing images. *Landscape Ecol.*, **26**, 1053-1069.

F. Havyarimana, Burundais, PhD, Professeur, Université du Burundi, Faculté des Sciences, Département de Biologie, Burundi.

I. Bamba, Ivoirien, PhD, Professeur, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire

T. Masharabu, Burundais, PhD, Professeur, Université du Burundi, Faculté des Sciences, Département de Biologie, Bujumbura, Burundi.

D. Nduwarugira, Burundais, PhD, Professeur, Université du Burundi, Faculté des Sciences, Département de Biologie, Bujumbura, Burundi.

M.-J. Bigendako, Burundaise, PhD, Professeur, Université du Burundi, Faculté des Sciences, Département de Biologie, Bujumbura, Burundi.

A. Mama, Béninois, PhD, Professeur, Université d'Abomey-Calavi, Faculté des Sciences Agronomiques, Laboratoire d'Ecologie Appliquée, Cotonou, Bénin.

F. Bangirinama, PhD, Professeur, Ecole Normale Supérieure, Bujumbura, Burundi.

J. Bogaert, Belge, PhD, Professeur, Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, Unité Biodiversité et Paysage, Gembloux, Belgique

C. De Cannière, Belge, PhD, Professeur, Université Libre de Bruxelles, Ecole Interfacultaire de Bioingénieurs, Service d'Ecologie du Paysage et Systèmes de Production Végétale, Bruxelles, Belgique.