

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté des sciences

« Étude longitudinale de la fragmentation du paysage
dans la région de *Nkhota kota* au Malawi. »

Analyse par télédétection

Matthieu LEROY

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade
de licencié en sciences géographiques

– Année académique 2006-2007 –

Promoteur : Professeur E. F. Lambin

Co-promoteur : Dr. S. Vanwambeke

Laboratoire d'analyse régionale et de télédétection

« L'écologie est surtout un problème culturel. Le respect de l'environnement passe par un grand nombre de changements comportementaux. »

Nicolas Hulot

« Vous voulez sauver la planète et vous avez raison ! Le développement durable, n'est ni une utopie ni même une contestation, mais la condition de survie de l'économie de marché.

La révolution que je vous propose, c'est de faire du développement durable un des piliers des politiques publiques. »

Nicolas Sarkozy

« Dans ce monde, les optimistes gagnent, non pas qu'ils aient toujours raison, mais parce qu'ils sont positifs.

Même lorsqu'ils ont tort, ils sont positifs et telle est la voie de la réussite, de l'ajustement, de l'amélioration et du succès.

Un optimisme éduqué et lucide paie ; le pessimisme peut seulement offrir la vaine consolation d'avoir raison. »

David Landes

« Ce qui vaut la peine d'être fait, vaut la peine d'être bien fait. »

Nicolas Poussin

« La victoire sur soi est la plus grande des victoires. »

Platon

En préambule à ce mémoire, je souhaite adresser ici tous mes remerciements aux personnes qui m'ont soutenu et encouragé et qui ont ainsi contribué à son élaboration ;

Tout d'abord Zabou, pour sa patience, son soutien, son attention et ses encouragements, sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour ;

Flo, pour m'avoir accompagné et soutenu dans le travail, tout au long de ces longs mois de juillet et août 2007 ;

Caro, ma soeur, pour ses relectures approfondies et ses mots de vocabulaire, souvent les bien venus ;

Mes parents et mon frère, pour m'avoir soutenu et encouragé tout au long de ces nombreuses années d'étude ;

Enfin, j'exprime ma gratitude au professeur Eric Lambin, promoteur de ce mémoire, à Sophie Vanwambeke, co-promoteur, ainsi qu'à Patrick Meyfroidt pour l'aide et le temps qu'ils ont bien voulu me consacrer.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Présentation du cadre général de l'étude	1
1.1.1	Le contexte Africain	1
1.1.2	Les enjeux de la trypanosomiasse en Afrique	2
1.1.3	Le contexte de l'étude	3
1.2	Synthèse bibliographique	4
1.2.1	Présentation du Malawi et de la zone d'étude	4
1.2.1.1	Situation géographique	4
1.2.1.2	Climat	4
1.2.1.3	Végétation naturelle et déforestation	6
1.2.1.4	Contexte humain	9
1.2.1.5	Pratiques agricoles et fragmentation du paysage	11
1.2.2	Écologie des glossines, habitat et lutte anti-vectorielle	13
1.2.2.1	Aspects généraux de l'écologie des glossines	13
1.2.2.2	Habitat de la mouche tsé-tsé	15
1.2.2.3	La lutte anti-vectorielle	16
1.3	Objectifs du mémoire et démarche adoptée	17
1.3.1	Constat	17
1.3.2	Objectifs du mémoire	18
1.3.3	Démarche et hypothèse	18
1.4	Présentation des données	18
1.4.1	Images satellites	18
1.4.2	Photographies aériennes et cartes topographiques	20
2	Classification des images satellites	21
2.1	Introduction	21
2.2	Choix de la légende	21
2.3	Processus de classification	22
2.3.1	Termes et définitions	22
2.3.2	Classification des images	23
2.3.3	Comparabilité des classifications	25
2.3.4	Évaluation de la précision	25
2.4	Résultats	26

2.5	Étude de l'évolution des classifications	27
2.5.1	Évolution générale	27
2.5.2	Évolution des différentes classes	28
2.6	Conclusion	31
3	Étude longitudinale de la fragmentation	32
3.1	Introduction	32
3.2	Termes et définitions	32
3.3	Le logiciel FRAGSTATS	35
3.4	Choix des indices	35
3.4.1	Le « <i>Shannon's diversity index</i> » (SHDI)	36
3.4.2	Le « <i>Percent of landscape</i> » (PLAND)	36
3.4.3	Le nombre de patches de la classe forêt (NP)	37
3.4.4	Le « <i>Shape index</i> » (SHAPE)	37
3.5	Définition de la zone tampon	39
3.6	Résultats	39
3.6.1	Étude de l'évolution des indices de fragmentation	39
3.6.2	Vérification de l'hypothèse	42
3.7	Conclusion	45
4	Discussion critique, améliorations et conclusion	47
4.1	Discussion critique	47
4.2	Améliorations	48
4.3	Conclusion	49
A	Cartes et images satellites	58
A.1	Localisation du Malawi	58
A.2	Localisation de la zone d'étude	59
A.3	Précipitations annuelles moyennes	60
A.4	Images satellites	61
A.5	Composition colorée d'une image <i>SPOT</i>	62
B	Images satellites classifiées	63
B.1	Légende des classifications	63
B.2	Image SPOT classifiée (1986)	64
B.3	Image SPOT classifiée (1991)	65
B.4	Image SPOT classifiée (1996)	66
B.5	Image SPOT classifiée (1999)	67
B.6	Image SPOT classifiée (2001)	68
B.7	Évaluation de la précision	69

B.7.1	Formulaire	69
B.7.1.1	Exemple d'une matrice de confusion	69
B.7.1.2	Indice de précision globale	69
B.7.1.3	Indice Kappa	70
B.7.1.4	Précision de l'utilisateur et du producteur	70
B.7.2	Matrices de confusion des classifications réalisées	71
B.7.3	Indices de précision des classifications réalisées	73

Introduction

1.1 Présentation du cadre général de l'étude

1.1.1 Le contexte Africain

« Par un cruel calcul auquel oblige la pauvreté extrême, la décision d'envoyer Suzan Mwase à l'école plutôt que ses soeurs a été prise en 1993, pour des raisons tristement pratiques. Suzan était la plus jeune des trois filles de paysans pratiquant l'agriculture de subsistance, dans une campagne éloignée du Malawi, et sa famille n'avait les moyens de scolariser que l'une d'entre elles. Pour acquitter des frais de scolarité de 1,30 dollar par an, sa famille avait besoin de plus de bras à la ferme et les aînées étaient plus productives ... » (Fleshman, 2003).

Cette brève introduction nous rappelle à quel point le continent africain se trouve dans un contexte socio-économique assez catastrophique. En effet, à notre époque, plus d'un cinquième de la population du Malawi doit encore faire face à ce dilemme, opposant l'instruction d'un enfant à son emploi comme main d'oeuvre. Nous pouvons affirmer cela grâce à la statistique suivante : au Malawi, en 2004, 20,8 % de la population vivait avec moins de \$1 par jour (Université de Sherbrooke, 2007). Bien sûr, cette statistique est imparfaite, car elle ne représente que très partiellement le contexte de la pauvreté. Elle permet, néanmoins, de faire comprendre aux citoyens et décideurs des pays riches l'ampleur des souffrances éprouvées par les populations démunies des pays en voie de développement.

Le Malawi est l'un des 36 pays les plus pauvres de la planète : en 2005, il était classé au 165^{ème} rang sur 177 pour l'Indice de Développement Humain du PNUD (PNUD, 2005). En 1998, le rapport mondial sur le développement humain nous enseignait que « la consommation d'un ménage africain moyen est en recul de 20 % par rapport à il y a 25 ans ». De façon spécifique, « l'Afrique subsaharienne présente le plus fort taux et la croissance la plus rapide de la pauvreté humaine » (PNUD, 1997). Enfin, selon un rapport du Fond Monétaire International, 52,4 % de la population du Malawi se trouvaient en dessous du seuil de pauvreté en 2004/05 (Fond Monétaire International, 2007).

Malgré la pauvreté tenace, les ravages de la sécheresse et de la famine et la propagation de l'épidémie du VIH/sida, la situation s'est quelque peu améliorée entre 1993 et 2000. « Les taux d'alphabétisme ont grimpé et les taux d'inscription dans l'enseignement primaire, à défaut du nombre de diplômés, sont parmi les plus élevés au monde. L'éducation absorbe à présent près du quart du budget national alors qu'il n'était que de 10 % en 1993 » (Fleshman, 2003).

Les progrès inattendus du Malawi sont un exemple des succès obtenus par les Africains dans leurs efforts de développement économique et social. En effet, sur un continent trop souvent perçu

comme assisté, le Malawi démontre qu'il est possible d'améliorer les conditions de vie d'un certain nombre de personnes. Pour cela, il faut réunir un certain nombre de conditions. Fleshman (2003), par exemple, nous propose de mettre en place « une direction politique résolue, accompagnée d'une participation active de la société civile et d'accroissements modestes de l'aide extérieure ».

En outre, ces efforts peuvent aider l'Afrique à réaliser les ambitieux Objectifs du Millénaire pour le Développement. Ceux-ci ont été adoptés par la communauté internationale en septembre 2000, à l'occasion du Sommet du Millénaire de l'ONU. Ils visent, entre autres, à réduire de moitié la proportion de la population vivant dans l'extrême pauvreté, à assurer l'éducation primaire pour tous, et à réduire sensiblement les taux de mortalité infantile et maternelle en 2015 au plus tard (ONU, 2007).

1.1.2 Les enjeux de la trypanosomiase en Afrique

Comme nous l'avons susmentionné, la situation socio-économique de l'Afrique est assez catastrophique. Quelques progrès apparaissent çà et là, mais malheureusement ceux-ci sont atténués par la présence d'une maladie particulièrement préoccupante : la trypanosomiase africaine ou maladie du sommeil.

Il faut savoir que la trypanosomiase est une maladie infectieuse, spécifique à l'Afrique, qui est transmise par la piqûre d'un vecteur, la glossine ou mouche tsé-tsé, et qui est due à un protozoaire, le trypanosome. Cette maladie, présente dans 37 pays subsahariens, affecte à la fois les personnes [Trypanosomiase humaine africaine (THA) ou maladie du sommeil] et les animaux [Trypanosomiase animale africaine (TAA) ou trypanosomiase à *T. brucei*]. Elle provoque une dégradation lente et progressive de l'état général et, non traitée, elle entraîne rapidement la mort (FAO, 2002, 2007b).

La trypanosomiase menace près de 60 millions de personnes en Afrique et, actuellement, on estime à 500 000 le nombre de personnes infectées. Chaque année, environ 35 millions de doses de médicaments antiglossinaires sont administrées (FAO, 2007b). Selon Cheneau (1994) : « Pour contribuer à satisfaire les besoins alimentaires des populations africaines, il est indéniable qu'un besoin pressant se fait sentir en Afrique de contenir l'infestation par la mouche tsé-tsé et de contrôler les trypanosomoses ». Les trypanosomoses africaines font donc peser une lourde menace sur la santé publique (Pollock, 1982).

Outre les infections humaines, la FAO estime qu'environ 50 millions de têtes de bétail sont menacées en Afrique subsaharienne (FAO, 2007b). D'après Pollock (1982), « la TAA imposent de graves entraves à la production animale, ainsi qu'au développement agricole d'une vaste partie de l'Afrique ». En effet, au-delà des impacts de la maladie sur la faune sauvage et les animaux domestiques, la trypanosomiase affecte gravement l'agriculture de la région, dans la mesure où elle contraint l'intensification de l'élevage. En outre, « son élimination conduirait à une augmentation importante de la production agricole » (Hendrickx et al., 2004). Enfin, nous apprenons également que « les pertes annuelles associées aux maladies, atteignant 4,75 milliards de \$ en Afrique subsaharienne, représentent l'équivalent d'environ un quart de la valeur totale des productions de l'élevage.

Les pertes directes engendrées par la seule trypanosomose bovine, transmise par la mouche tsé-tsé, seraient de 1 à 1,2 milliard de \$ par an » (Cheneau, 1994).

1.1.3 Le contexte de l'étude

Notre mémoire s'inscrit dans le cadre plus vaste d'un projet de recherche sur la fragmentation de l'habitat des glossines, intitulé FRAGFLY et financé par le *Wellcome Trust*. Ce projet, d'une durée de trois ans, est exécuté conjointement par l'Institut Tropical d'Anvers (ITP – professeur P. Van den Bossche), Avia-GIS, le CIRAD-EMVT, le CIRDES, le Ministère de l'Agriculture et des coopératives de Zambie, l'Université d'Oxford et l'Université de Prétoria (Dargie, 2006, p. 61). Il a pour objectif de comprendre l'impact de la fragmentation de l'habitat, sur les populations de glossines et l'épidémiologie des trypanosomes, et de contribuer au développement de stratégies de contrôle plus efficaces et ciblées (Cirad, 2006).

Ils se sont fixé les objectifs intermédiaires suivant (Dargie, 2006) :

1. Identifier des zones d'étude en Afrique de l'ouest et en Afrique australe.
2. Quantifier et qualifier la fragmentation de la végétation ripicole¹ et des savanes boisées dans ces zones à l'aide de données écologiques et télédéteectées.
3. Identifier des sites d'étude avec différents degrés de fragmentation et y surveiller les populations de glossines et de bétail.
4. Accorder une attention particulière aux paramètres qui peuvent être utilisés pour développer des modèles de dynamique de la population et de transmission de la maladie. Ces modèles permettront de déterminer le bien-être, la dynamique et la vulnérabilité des sous-populations de glossines dans les habitats fragmentés et le taux d'infection des hôtes et des vecteurs, ainsi que le risque de transmission de la maladie lié à celui-ci.
5. Tester diverses approches de lutte et évaluer leur efficacité.

Dans ce contexte, l'objectif de notre mémoire se réduit à apporter une expertise de géographe, pour l'étude de la fragmentation des habitats de la tsé-tsé. Nous y reviendrons dans la section "Objectifs du mémoire et démarche adoptée" (section 1.3, page 17).

Avant de nous aventurer dans l'analyse de la fragmentation du paysage et afin de mieux cerner le contexte géographique de notre étude, nous allons réaliser une brève synthèse bibliographique. D'une part, nous vous présenterons le Malawi et notre zone d'étude. D'autre part, nous aborderons l'écologie des glossines, leur impact, leur habitat, ainsi que la lutte anti-vectorielle.

¹ « Qui vit sur les rives »

1.2 Synthèse bibliographique

1.2.1 Présentation du Malawi et de la zone d'étude

1.2.1.1 Situation géographique

Le Malawi est un pays enclavé d'Afrique australe qui partage ses frontières avec la Tanzanie, la Zambie et le Mozambique, comme nous pouvons le voir sur la Fig. A.1 (annexe A, page 58). Il est traversé du nord au sud par la vallée du grand Rift, élément géologique majeur du continent africain. Dans cette dépression se trouve le lac Malawi (ou *Nyassa*), le troisième plus grand lac d'Afrique. Celui-ci couvre environ 20 % de la superficie du pays, qui est de 118 480 km² (CIA, 2007). À l'extrémité méridionale du lac prend naissance le fleuve *Shire*, qui se jette dans le Zambèze, 400 km plus au sud.

Le Malawi un pays étroit et allongé puisqu'il s'étend sur près de 850 km alors que sa largeur varie entre 80 et 160 km. Il est constitué de hauts plateaux surplombants le grand Rift, le *Nyika* au nord (2600 m d'altitude) et le *Shire* au sud (de 600 à 1600 m), avec comme point culminant, le mont *Mulanje* à 3048 m (Wikipédia, 2007).

Notre zone d'étude se situe dans la région centrale du Malawi, dans le district de *Nkhota kota*, à environ 140 km au nord-ouest de la capitale, *Lilongwe* (voir Fig. A.2, en annexe A, page 59). Elle est bordée à l'ouest par la plus ancienne réserve naturelle du pays, la *National Game Reserve*, et à l'est par le lac Malawi.

1.2.1.2 Climat

Le climat du Malawi est essentiellement subtropical et est assez varié. Il est semi-aride dans les basses vallées du sud du pays, semi-aride à sub-humide sur les plateaux et sub-humide dans les montagnes (Reynolds, 2000).

D'octobre à mai, le climat est chaud et humide le long de la côte ouest du lac Malawi, ainsi que dans la vallée du fleuve *Shire* et dans la zone de *Lilongwe*. Les températures moyennes annuelles varient avec l'altitude, de 25 °C dans la basse vallée du *Shire* à 13 °C sur le plateau du *Nyika*. Elles sont plus élevées en octobre et en novembre : de 21 à 32 °C. Elles diminuent pendant la saison des pluies et sont les plus faibles en juin et juillet : de 15 à 25 °C (NOAA, 1990). Ensuite, elles réaugmentent rapidement au début de la saison sèche. De plus, notons « qu'il peut geler occasionnellement sur les parties basses des plateaux, mais ce n'est pas un facteur restrictif significatif pour la production pastorale » (Reynolds, 2000).

Le pays est également soumis à des périodes de sécheresse plus ou moins sévères qui sont parfois corrélées positivement aux événements *El Niño Southern Oscillation phenomenon*² (ENSO), comme en 1991/92, 1994/95 et 1997/98 (Clay et al., 2003; MSN - Encarta, 2007). En effet, « les

² « phénomène climatique particulier qui diffère du climat usuel et qui se caractérise par une élévation anormale de la température de l'océan » (Wikipédia, 2007).

climatologues ont établis qu'il existe une relation très significative entre l'ENSO et les variations inter-annuelles des précipitations dans le sud de l'Afrique » (Clay et al., 2003, p. VII).

En région tropicale, les précipitations se produisent le plus souvent sous forme de fortes averses, associées à des orages. Si elles sont accompagnées d'une forte évapotranspiration potentielle et qu'elles sont moins abondantes, elles peuvent engendrer des sols pratiquement secs, même en saison des pluies. Près de 90 % des précipitations annuelles tombent entre décembre et mars et il ne pleut quasiment pas de mai à octobre sur presque la totalité du pays. Le Malawi reçoit en moyenne entre 760 et 1150 mm de précipitations par an. Toutefois, quelques zones peuvent recevoir des précipitations supérieures à 1600 mm, comme nous pouvons le voir sur la Fig. A.3 (annexe A, page 60) : le long du lac Malawi et sur les hauteurs (mont *Mulanje* et *Zomba*) (Reynolds, 2000). Ces chutes de pluie dépendent en grande partie de la position relative de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT), qui a une très grande influence sur la météorologie saisonnière de ces régions. Cette "ligne" vers laquelle convergent les vents tropicaux (alizés), suit le déplacement apparent du soleil entre les tropiques et se situe principalement au nord de l'équateur en juin et au sud de celui-ci en décembre-janvier.

À une échelle plus locale et d'après Clay et al. (2003, p. 38), « il y a une différence considérable dans la distribution inter-annuelle et intra-saisonnière des précipitations entre les stations météorologiques dans différentes régions du Malawi ». Par exemple, nous pouvons constater sur la Fig. 1.1, que la distribution mensuelle moyenne des précipitations pour la station de *Nkhota* (en pointillé) est légèrement bimodale, par rapport aux distributions des deux autres stations, qui sont clairement unimodales.

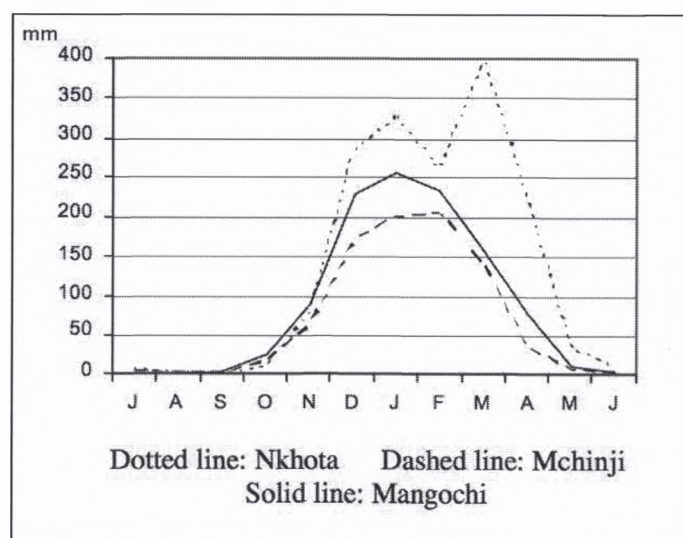


FIG. 1.1 – Distribution moyenne mensuelle des précipitations pour trois stations météorologiques, représentatives du climat du Malawi. (Source : Clay et al., 2003)

Cette station, appartenant au district de notre zone d'étude et située le long du lac Malawi, est, de plus, caractérisée par des précipitations mensuelles moyenne plus importantes et par une saison pluvieuse plus longue que celle de *Mchinji*, située à la même latitude mais un peu plus à l'ouest, ou encore à celle de *Mangochi*, située quasiment à l'extrémité sud du pays. Pour celles-ci, la saison des pluies s'étale de novembre à avril avec des pics supérieurs à 200 mm pour le mois de janvier, et la saison sèche de mai à octobre, avec des précipitations quasiment nulles (voir Fig. 1.1).

Bohn (2002, Cité par Clay et al., 2003) considère que ces différences entre les stations sont dues « [...] aux microvariations climatiques qui peuvent être associées à la localisation particulière du Malawi. En effet, celui-ci se situe, d'une part, dans une région intermédiaire entre deux zones climatiques et, d'autre part, le lac Malawi a une certaine influence sur le climat des régions situées le long de son rivage ».

En outre, selon Clay et al. (2003, p. 39), c'est « la distribution intra-saisonnière, plutôt que la quantité totale de précipitation, qui est le facteur déterminant des rendements agricoles ». Il semble donc que le climat de la région de *Nkhota kota* soit favorable à l'agriculture.

1.2.1.3 Végétation naturelle et déforestation

Le paysage actuel est le reflet des interactions passées et récentes entre la nature et les activités humaines. Dans un premier temps, nous allons aborder la végétation naturelle. Ensuite, nous discuterons des impacts de l'homme sur son environnement.

Tout comme le climat, la végétation naturelle du Malawi est assez diversifiée. Les distributions géographiques des différents types de végétation sont clairement associées à l'altitude, à la pluviométrie, aux conditions édaphiques et climatiques de leurs biotopes. En effet, « la végétation dominante sur les hautes terres est la forêt claire, dégradée en savane arborée dans les régions de plus basses altitudes, en passant par des pâturages plus ou moins denses. Dans le fossé du sud, plus sec, apparaissent des savanes à acacias » (Ambassade de France en Zambie et au Malawi, 2007).

Afin de mieux cerner les caractéristiques de la végétation naturelle du Malawi, nous allons la comparer à celle de l'Afrique subsaharienne. D'après le *World Resources Institute* (WRI, 1993) et comme nous le voyons sur la Fig. 1.2 (page 7), 50 % de la superficie de l'Afrique subsaharienne était couverte de savanes arbustives et de pâturages en 1993. Les 50 % restants étant partagés plus ou moins équitablement entre les forêts (15 %), les zones où la végétation est quasi inexistante (18 %) et des régions très hétérogènes (mosaïque de champs cultivés, en jachère, forêts, savanes et pâturages; 15 %).

La distribution des écosystèmes du Malawi est sensiblement différente de ces proportions. En effet, par rapport à l'Afrique subsaharienne, le Malawi possédait, en 1993, relativement plus de régions très hétérogènes (mosaïque; 29 %) et plus de zones humides et d'étendues d'eau (18 %). Par contre, il possédait relativement moins de savanes arbustives et pâturages (37 %) et beaucoup moins de zones où la végétation est quasi inexistante (2 %); la proportion de forêts étant sensiblement équivalente. Ces constatations nous indiquent que les perturbations anthropiques sont



FIG. 1.2 – Types d'écosystèmes (en pourcentage de la superficie totale), 1992-93. (Source : WRI, 1993)

relativement plus importantes au Malawi que dans l'ensemble de l'Afrique subsaharienne. En effet, nous y trouvons – en proportion – deux fois plus de zones hétérogènes.

Précisons, à présent, la distribution des différentes zones de végétation. Dans un article sur les prairies et les systèmes de pâturage du Malawi, Reynolds (2000) les classe comme suit :

Forêts de montagne, brousses buissonnantes et pâturages : Ces formations sont situées au-dessus de 1500 m d'altitude, là où les précipitations sont supérieures à 1500 mm. Elles comprennent des restes de forêt primaire et, dans les vallées, quelques individus isolés, entrecoupés de pâturage et de buissons. La composition de ces forêts est assez variée et est dominée par des espèces comme *Widdringtonia whytei* (cèdre de *Mulanje*) et *Juniperus procera* (genévrier africain). Cette zone de végétation semble être contrôlée par des feux de brousse réguliers et par l'humidité des zones contigües, plus vertes et plus résistantes aux feux. Entre 1500 et 2100 m, nous trouvons également des pâturages de biomasse variable, allant de courtes touffes éparses à de denses herbages entremêlés.

Savanes arborées ou *Miombo* : Entre 500 et 1500 m d'altitude, nous retrouvons des étendues boisées de *Brachystegia* et de *Julbernardia globiflora*. En Afrique subsaharienne, ces formations sont appelées *Miombo*. Ce sont des savanes arborées que l'on retrouve dans des zones humides, avec des précipitations comprises entre 500 et 1500 mm. Au Malawi, elles couvrent à peu près 17 % de la superficie. Cette zone de végétation est, en général, composée d'un couvert herbacé couvrant peu le sol, et est plus ou moins densément parsemée d'arbres ou d'arbustes. Elle est soit haute et ouverte, soit dense et broussailleuse. Dans certaines dépressions, les arbres sont suffisamment rapprochés et peuvent alors former une forêt claire.

Bellefontaine et al. (1997) approfondissent : « Nous pouvons considérer qu'il existe un gradient continu entre la forêt claire, la savane boisée et la savane arborée. Cela explique que certaines formations, comme le *Miombo* et le *Mopane*, peuvent être classées par certains auteurs parmi la savane ou la forêt claire. En général, nous considérons que dans une forêt claire, la strate herbacée est fortement influencée par la strate ligneuse, alors que dans une savane, les arbres n'influencent la couverture herbacée que localement, principalement sous les couronnes ».

Dans le cas présent, « les arbres offrent une couverture au sol d'environ 20 % et leur taille est en général supérieure à 5 m » (FAO, 1981). Selon Desanker et al. (1997, p. 12), « les feux y sont fréquents et ont une certaine importance, tant pour des raisons écologiques que comme outils de gestion ». Quand ils sont défrichés, les herbages deviennent plus vigoureux et un couvert végétal dense se forme jusqu'à ce que les buissons repoussent. La valeur nutritive de ce genre de pâturage est peu élevée. Ils présentent des variations saisonnières marquées et ont une faible capacité de charge.

Marécages ou *Dambos* : Ce sont des petites mares inondées de manière saisonnière que l'on retrouve dans les légères dépressions au sein des zones de savanes, à proximité ou à la tête d'un réseau de drainage. Nous les reconnaissons facilement grâce au contraste fort entre celles-ci et les *Miombos* ou les terres agricoles défrichées. Ce sont des zones presque sans arbres, dominées par des graminées (sur les bords de la dépression) ou des joncs et roseaux (au centre de celles-ci) et dans lesquelles il y a formation de matière organique. Ces *Dambos* servent de réserve hydrologique car ils retiennent l'eau pendant la saison des pluies et la restitue en aval durant la saison sèche. Ils sont particulièrement importants dans le nord et le centre du Malawi, dans la mesure où ils fournissent une partie non négligeable de l'alimentation du bétail pendant la saison sèche.

Boisements à larges feuilles caduques ou *Chipeta* : Ce type de végétation, mélange de hautes graminées et de boisements à larges feuilles caduques, se retrouve sur les sols limono-argileux rouges de la plaine centrale, ainsi que sur les pentes colluviales et les plaines situées entre 600 et 1200 m d'altitude. Ces zones sont soumises à de violents feux annuels et leurs pâturages ont une faible capacité de charge.

Escarpements de la vallée du Rift : Les escarpements de la vallée du Rift, situés entre 900 et 1500 m, sont caractérisés par une vaste amplitude des précipitations (entre 350 et 1500 mm). Nous y retrouvons des baobabs, des bambous et des graminées. Ces derniers forment un couvert végétal bas sur des sols rocheux fragmentés. Ce sont des régions ayant peu d'intérêt sur le plan pastoral en raison des difficultés du terrain et du manque de pâturages en saison sèche.

Boisements de basse altitude : Ils sont situés en dessous de 600 m d'altitude, notamment dans la vallée du *Shire* et le long de berges des lacs. Dans ces zones de végétation, les précipitations peuvent varier considérablement sur de courtes distances (de 350 à 2500 mm). Par conséquent, nous y retrouvons une large diversité floristique avec, notamment, des espèces arbustives de basse altitude (*Acacia tortilis* et *Sterculia africana*) qui s'élèvent au-dessus d'un couvert dense, composé de hautes graminées. Ces zones de végétation sont fortement perturbées par les activités humaines, car elles sont situées dans les endroits habités et cultivés.

Depuis le début de la révolution industrielle, nos rapports avec la nature se sont profondément modifiés en quantité et en qualité. Selon Lambin (2004, p. 29), « l'échelle, l'intensité et le taux de transformation de la nature par l'homme ont augmenté de plusieurs ordres de grandeur. L'impact

humain sur la nature atteint un point tel que nous vivons aujourd'hui sur une planète dominée par l'empreinte humaine, où peu de processus naturels échappent à l'influence de l'homme ».

En particulier en Afrique subsaharienne, l'action de l'homme a entraîné des dégradations de la végétation, « [...] aboutissant à une mosaïque de stades et de groupements secondaires variés » (Schnell, 1976). D'après Walker et Desanker (2004, p. 346), « actuellement, le Malawi est soumis une forte dégradation des sols et à une intense déforestation ».

Effectivement, au milieu des années 70, la forêt couvrait 4,4 millions d'hectares au Malawi. En 1990, ce n'était plus que 3,9 millions et en 2005, 3,4 millions (FAO, 2005) ; ce qui fait une perte de forêts d'environ 23 % en une trentaine d'années. Bunderson et Hayes (1995, Cité par Hudak et al., 2000) avancent même le chiffre de 41 % de perte entre 1972 et 1990 et Lele et Stone (1989, Cité par Hudak et al., 2000) parlent de 24 %, rien que pendant les années 1990. Par exemple, les *Miombos* au sud de *Lilongwe* ont été largement exploités et la plupart des forêts claires ont été et sont encore surexploitées (Bellefontaine et al., 1997, Section 3.2.b).

Un rapport de la FAO, sur le secteur forestier en Afrique, nous renseigne sur les causes de la déforestation : « Les principales raisons de la déforestation sont les mêmes dans toute l'Afrique, à savoir l'expansion de l'agriculture et la demande accrue de produits forestiers, en particulier à proximité des zones urbaines en expansion rapide, et les feux. Au Malawi, les raisons de la déforestation sont : l'abattage effréné des arbres, pour fournir du bois de feu à usages domestique et industriel (sècherie de tabac), les défrichements au profit de la mise en culture de nouvelles terres ou de jardins potagers, le développement des infrastructures et l'agriculture itinérante. Ces tendances devraient persister tant que la terre demeurera la principale source de revenus et que les progrès technologiques seront lents dans le secteur agricole » (FAO, 2003, Chap. 2, p. 3-4).

Pour lutter contre la déforestation et la dégradation des écosystèmes, de nombreuses réserves naturelles ont été créées, notamment dans le nord et dans certaines parties du fossé méridional (voir Fig. A.2, en annexe A, page 59). En 1997, 11,2 % des forêts tropicales du Malawi étaient protégées (FAO, 2003).

1.2.1.4 Contexte humain

Nous ne nous étendrons pas sur le contexte humain du Malawi, puisque cela n'est pas l'objet de notre étude. Néanmoins, il nous semble important de rappeler quelques indicateurs clés de la situation démographique et sociale du Malawi.

La population actuelle compte environ 13,6 millions d'habitants dont 83 % vivent dans des zones rurales (estimation de juillet 2007; CIA, 2007). La population agricole s'est fortement accrue entre 1988 et 2000 à un taux annuel moyen de 3 % par an (un des plus élevés d'Afrique; Reynolds, 2000). Sur la Fig. 1.3 (p. 10), nous voyons l'évolution de la population entre 1961 et 2007. Nous observons une certaine anomalie dans l'accroissement de cette population, à savoir la présence d'une sorte de "bourrelet" entre 1988 et 1997. Cette forte augmentation est sans doute à mettre en relation avec l'afflux de plus d'un million de réfugiés en provenance du Mozambique, en guerre pendant la même période.

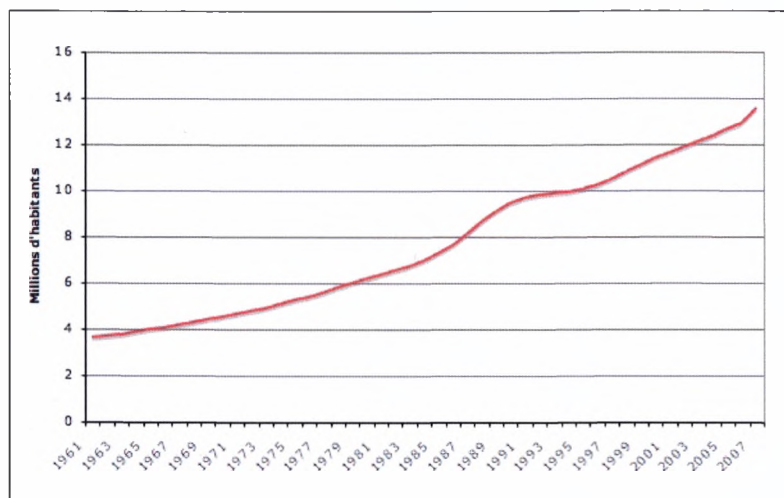


FIG. 1.3 – Évolution de la population entre 1961 et 2007. (Source : FAOSTAT, 2007)

Le Malawi est l'un des pays les plus densément peuplés de l'Afrique subsaharienne (137 hab./km² en moyenne; 46 hab./km² dans le nord; 144 hab./km² dans le sud, le district le plus peuplé comptant plus de 265 hab./km²). Sa structure démographique est caractéristique des pays africains : une croissance naturelle forte (2,4 %, estimation de juillet 2007), un taux de fécondité élevé (5,8 enfants/femme), une mortalité infantile élevée (133 ‰) et une faible espérance de vie à la naissance (43 ans, en moyenne) (National Statistical Office, 2004; CIA, 2007). Ces dix dernières années, les niveaux de pauvreté sont restés stables (World Food Program, 2006).

Actuellement, la principale cause de mortalité est l'infection due au VIH/Sida. Elle touche une grande partie de la population jeune adulte (Université de Laval, 2006); ce qui est dramatique puisque 41 % de la population ont entre 10 et 29 ans (National Statistical Office, 2004). Environ un cinquième de la population est séropositive (Barrault, 2003, p. 31).

La population du Malawi trouve ses origines dans la migration des *Bantou*, venant du sud du Congo dès le 1^{er} siècle de notre ère. Elle est divisée en plusieurs ethnies, dont les *Chewa* représentent le groupe ethnique dominant. Les descendants des colons d'origine anglaise et les Indiens représentent moins de 0,5 % de la population. L'anglais est la première langue officielle. Elle est surtout employée en zone urbaine mais est tout de même connue en zone rurale (Université de Laval, 2006). La deuxième langue officielle est le *Chichewa*.

Le Malawi est l'un des pays les plus pauvres de la planète (PNUD, 2005). En 2006, le Produit Intérieur Brut (PIB) s'élevait à 2,2 milliards de dollars, avec une croissance de 8,5 % par rapport à l'année précédente. Le PIB par habitant était de \$605 (en PPA³) (Université de Sherbrooke, 2007). La dette extérieure atteint 150 % du PIB annuel et l'activité économique se maintient, en partie grâce à l'aide des bailleurs de fonds (Commission européenne, 1999, section 3.1.10., p.

³Parité de Pouvoir d'Achat

60). Nous apprenons également que « l'économie, essentiellement agricole, a souffert de sécheresses catastrophiques en 1992, 1994, 1997, 2002 et 2005 » (MSN - Encarta, 2007).

L'agriculture, qui occupe 90 % de la force de travail et qui contribue à 35 % du PIB, constitue la seule véritable richesse du pays, dans la mesure où les secteurs minier et industriel restent sous-développés (MSN - Encarta, 2007; CIA, 2007). Les principaux produits d'exportations sont le tabac, le thé, le sucre, le café, les arachides et les produits en bois (Université de Laval, 2006).

1.2.1.5 Pratiques agricoles et fragmentation du paysage

Le secteur agricole est divisé en deux sous-secteurs : les grandes exploitations commerciales et les petits exploitants. Alors que ces derniers « [...] produisent près de 80 % de la nourriture consommée dans le pays, la production commerciale de tabac, thé, coton et sucre, compte pour la plus grande part de l'activité économique et de la croissance du secteur agricole, le tabac étant la principale source de devises. La culture vivrière majoritaire est le maïs, bien que le manioc et d'autres cultures racines (pommes de terre, sorgho, légumes secs) occupent une place grandissante dans certaines zones » (Samdup, 2006, p. 26). Dans notre zone d'étude, les cultures racines occupent également une place grandissante (voir Fig. 1.4).

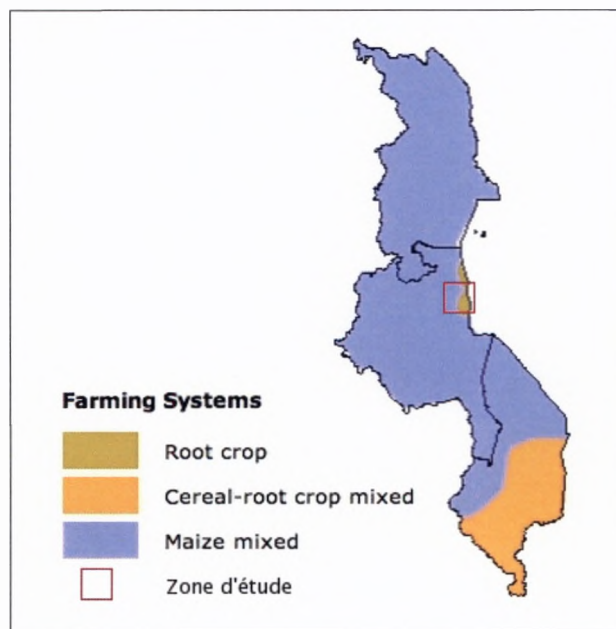


FIG. 1.4 – Système de production agricole. (Source : FAO, 2007a)

De manière générale, la différenciation entre ces deux types d'exploitation se définit selon la capacité d'accès à la terre et en fonction des capacités d'investissement dans le capital de production (Loquet et al., 2003). Les grandes exploitations commerciales sont propriétaires d'un capital important (en surface agricole et en têtes de bétail), produisent principalement des cultures de rentes

(tabac, canne à sucre, coton, thé, maïs) et louent une partie de leurs terres à des petits paysans. Toutefois, ce type d'exploitation est minoritaire.

La grande majorité des exploitations est constituée de petits paysans, « [...] cultivant pour l'essentiel moins d'un hectare de terre par ménage » (Commission européenne, 1999, section 3.1.10, p. 60). Ils pratiquent une agriculture de subsistance (pommes de terre, manioc, sorgho, légumes secs) et possèdent un revenu inférieur au seuil de survie. Ils sont confrontés à un manque de terre, par rapport à la force de travail disponible, et surtout à un manque de capacité d'investissement. En conséquence, ils ne peuvent acheter les fertilisants nécessaires pour intensifier leur production et ne peuvent prendre soin de leurs quelques têtes de bétail (manque de nourriture et de traitements vétérinaires). Ces petits exploitants sont, dès lors, d'autant plus vulnérables à la sécheresse et aux inondations (Samdup, 2006).

Depuis l'indépendance en 1964, la Commission européenne (1999) constate une aggravation des conditions de développement du milieu rural. « Aux conditions climatiques très instables, s'ajoutent la forte pression démographique et l'appauvrissement continu des sols, consécutif à une mauvaise diversification des cultures. Par ailleurs, les politiques de libéralisation des marchés [...] », engagée depuis 1994, « [...] ont réduit les capacités d'accès aux intrants et aux crédits pour les petits producteurs » (Commission européenne, 1999, section 3.1.10, p. 60).

La majorité des populations rurales du Malawi se retrouvent donc régulièrement dans une situation de crise alimentaire et humanitaire. En 2006, par exemple, le Programme Alimentaire Mondial a procédé à des distributions ciblées de nourriture à 2 millions de personnes sur un total de 4,8 millions qui avaient besoin d'aide alimentaire (World Food Program, 2006). Les causes de celles-ci sont : la pauvreté chronique, la forte prévalence du VIH/SIDA, la pénurie de maïs lors des périodes de sécheresses ou d'inondations, la chute des prix du tabac, du thé et du café sur les marchés mondiaux et les conditions climatiques défavorables (Barrault, 2003, p. 31).

En outre, la pauvreté chronique, la pression démographique et l'appauvrissement des sols poussent les populations rurales à agrandir les surfaces des zones de culture. Dans ces conditions, le défrichement des savanes et des forêts s'accélère, conduisant inexorablement à une fragmentation du paysage. Pour les formations forestières, par exemple, cette fragmentation se traduit par une réduction de la superficie forestière et par une multiplication de "patches"⁴ isolés. Pour la faune, cette fragmentation contribue à l'accroissement de la densité par unité de surface, l'augmentation de la compétition et de la prédation entre les espèces (Wu et al., 2003). De plus, selon Loreau (2002, p. 172), « la fragmentation d'un écosystème amplifierait la perte de biodiversité », étant donné que la richesse biologique de celui-ci est une fonction croissante de sa superficie (Rosenzweig, 1995, cité par Loreau, 2002, p. 172). De la même manière, l'équipe du Cirad (2006) indique que la pression anthropique sur les écosystèmes se traduit par une fragmentation des paysages favorables aux glossines.

Nous le constatons, plusieurs auteurs se sont intéressés à l'impact de la fragmentation du paysage sur les populations de glossines. D'après la Thèse de Bouyer (2006), les glossines sont relativement

⁴Par "patches", nous entendons désigner "une aire boisée, d'un seul tenant"

bien connues en paysage homogène mais leurs réactions comportementales en paysage fragmenté l'est beaucoup moins.

Dans la section suivante, nous aborderons les aspects généraux de l'écologie des glossines, utiles à la compréhension de notre étude.

1.2.2 Écologie des glossines, habitat et lutte anti-vectorielle

1.2.2.1 Aspects généraux de l'écologie des glossines

Comme nous l'avons vu précédemment, la trypanosomiase est une maladie infectieuse transmise par la piqure d'un vecteur, la glossine, et qui est due à un protozoaire, le trypanosome.

« La trypanosomiase à *T. brucei* et ses sous-espèces (*T.b. brucei*, *T.b. gambiense* et *T.b. rhodesiense*) sont transmis par un diptère du genre *Glossina*, dont ils colonisent le tube digestif et les glandes salivaires. Les parasites sont injectés par la trompe à travers la peau en même temps que la goutte de salive empêchant la coagulation du sang à l'endroit de la piqure. Ces mouches sont hématophages dans les deux sexes et ont un rôle actif dans la transmission. Elles piquent de jour, sont attirées par l'odeur et l'aspect de leur hôte, ainsi que par les couleurs sombres. Leur durée de vie est de l'ordre de trois mois » (Wéry, 1995).

Pour qu'une tsé-tsé "saine" s'infecte, il faut qu'elle se nourrisse sur des hôtes infectés, c'est-à-dire dont le sang contient des trypanosomes. Au bout de 20 à 30 jours, elle devient capable de transmettre la maladie aux personnes indemnes sur lesquelles elle se nourrit (Pollock, 1982). Ces hôtes forment un réservoir de trypanosomes et constituent une source d'infection permanente pour les mouches "saines".

Lorsque des animaux et des hommes indemnes vivent en contact avec la mouche, la probabilité de contracter l'infection dépendra, selon Pollock (1982) :

1. du taux d'infection des mouches (en général, 20 % ou plus ; varie en fonction de la région, de l'espèce de tsé-tsé et de l'espèce de trypanosome) ;
2. de l'aptitude de la mouche à transmettre l'infection et des occasions qu'elle a de le faire (pour cela, elles doivent vivre dans le même biotope que leurs hôtes).

D'après Aubry (2006), le Malawi est un pays d'endémie⁵ à *Trypanosomia brucei rhodesiense*, car on y observerait entre 50 et 1500 cas/an. Ce parasite est responsable de la forme aiguë de la maladie, mortelle en quelques semaines ou quelques mois seulement. Selon Aubry (2006), « la maladie du sommeil (THA) frappe en particulier les populations rurales, les plus exposées aux piqures de la mouche tsé-tsé » et « pour la première fois en 1999, des foyers urbains et périurbains ont été identifiés à Kinshasa (RDC). La THA devient donc une maladie rurale à extension urbaine ».

Rappelons également que, d'après la FAO, environ 50 millions de têtes de bétail sont menacées en Afrique subsaharienne (FAO, 2007b). La trypanosomiase à *T. brucei* peut donc avoir – potentiellement – un grave impact sur l'agriculture car elle réduit tant la production que la productivité des animaux infectés (FAO, 2002, p. 65).

⁵ « Une endémie désigne la présence habituelle d'une maladie dans une région déterminée » (Wikipédia, 2007).



FIG. 1.5 – Transmission de la forme rhodésienne de la maladie du sommeil. La flèche indique que l'animal sauvage joue le rôle de réservoir de trypanosomes. (Source : Pollock, 1982)

Selon Bouyer (2006, p. 30), la faune sauvage peut être porteuse saine de diverses espèces de trypanosomes, constituant dès lors, un réservoir important de parasites pour le bétail, notamment au niveau des interfaces entre zones protégées et pastorales. De plus, les parasites transmis au niveau de ces interfaces sont généralement plus pathogènes pour le bétail, que ceux transmis uniquement chez ces derniers (Van den Bossche et al., 2003). En outre, certaines races bovines sont trypanotolérantes, comme les *N'Dama* et les *Baoulés*, contrairement aux zébus (*Bos indicus*), beaucoup plus sensibles (Bouyer, 2006).

Pour mieux cerner les impacts de la trypanosomiose sur les animaux d'élevage, voici ce que Swallow (1998) nous enseigne :

« la maladie agit directement sur la productivité du bétail par :

- la réduction des taux de vêlage de 1 à 12 % pour les races trypanotolérantes et de 11 à 12 % pour les races sensibles ;
- l'augmentation de la mortalité des veaux de 0 à 10 % pour les races tolérantes et de 10 à 20 % pour les races sensibles ;
- la diminution de la production laitière de 10 à 26 % chez les races tolérantes ».

Selon le rapport sur la situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture (FAO, 2002, p. 66) : « [...] on peut estimer au bas mot à 20 % la diminution moyenne de la production de viande et de lait du cheptel dans les zones exposées à la mouche tsé-tsé ». De même, « la réduction de l'effectif du cheptel bovin total peut atteindre 30 à 50 %, puisque les agriculteurs gardent leurs animaux hors des zones fortement exposées au risque de trypanosomose ».

Pour toutes ces raisons, un Programme de lutte contre la trypanosomiose africaine (PLTA) a été mis en place par plusieurs agences de l'ONU, dont la FAO et l'OMS. Ce programme a pour principal objectif de superviser et d'organiser une lutte intégrée contre la trypanosomiose, tout en contribuant à l'amélioration de la situation en matière de sécurité alimentaire et de développement agricole durable (FAO, 2002). En 1998, le PLTA a édité un rapport intitulé *Impacts of trypanosomiasis on African agriculture* (voir Swallow, 1998). Celui-ci s'appuie sur dix ans d'études sur le terrain pour

estimer le coût total de la trypanosomiasse supporté par les agriculteurs, les propriétaires de bétail et les pays africains en général (FAO, 1998).

Selon un article du magazine *Focus*, le rapport du PLTA indique que : « Les évaluations des effets de la trypanosomiasse sur l'agriculture sont limitées par la rareté des données quantitatives. Les quelques études systématiques des effets de la trypanosomiasse et des moyens de lutte (par exemple, en Éthiopie, en Gambie et au Zaïre) ne sont intéressantes que pour des systèmes de production particuliers et là où il y a des risques de maladie. ». Il stipule également que : « [...] Ce qu'il faut, c'est une approche qui prenne plus spécifiquement en compte les systèmes de production clés et les situations de risques de maladie. Elle pourrait commencer par la classification systématique des types de systèmes de production/risques de maladie, la caractérisation à l'aide du SIG⁶ de la répartition géographique de ces types, le choix de "sites repères", [...] » (FAO, 1998).

Dans ce mémoire, nous allons étudier une situation de risque de maladie, au sein d'une zone de la région centrale du Malawi, et nous allons réaliser, à partir d'images satellites, une étude longitudinale de la fragmentation du paysage.

1.2.2.2 Habitat de la mouche tsé-tsé

La répartition géographique de la trypanosomiasse est limitée aux zones d'habitat des vecteurs, les glossines de savane. En ce qui concerne la trypanosomiasse à *T. rhodesiense* (transmise par les tsé-tsé du groupe *Morsitans*), nous apprenons grâce à Wéry (1995, Chap. 10, section 4.3) qu'elle sévit « sur les plateaux de l'Afrique orientale : Burundi, Éthiopie, Kenya (rives du Lac Victoria), Malawi, Mozambique, Rwanda, Soudan, Tanzanie, Uganda (régions situées sur la Rive-Nord du lac Victoria), Zambie et Zimbabwe ». Dans chaque pays, la distribution spatiale de la maladie est très hétérogène et se répartit par foyers et micro foyers (Aubry, 2006).

Sur les 22 espèces de mouche tsé-tsé vivant en Afrique, seules quelques-unes, appartenant au groupe *Morsitans*, sont présentes au Malawi (notamment *Glossina pallidipes* et *Glossina brevipalpis*).

Le mode de répartition de ces espèces résulte principalement de l'existence de barrières climatiques et écologiques qui en limitent la propagation. En effet, la présence de la glossine dépend de quatre facteurs : la chaleur (température entre 25 et 30 °C), l'humidité, l'ombrage et la présence de nourriture (Aubry, 2006). Par exemple, pour se protéger des températures trop élevées, la mouche tsé-tsé a besoin d'un couvert végétal : arbres, buissons, fourrés (Pollock, 1982). « Elle ne séjourne presque jamais dans des prairies ou dans des zones de petite végétation, même s'il lui arrive de s'y aventurer. Lorsque la température moyenne est trop élevée, les mouches tsé-tsé se réfugient dans des zones plus fraîches, par exemple, le long des berges des cours d'eau que recouvrent des galeries forestières. D'autre part, les basses températures en hiver dans le sud de la Zambie et du Mozambique limitent les déplacements des glossines et empêchent le développement de leurs larves jusqu'à leur terme » (Pollock, 1982, p.65). De plus, le taux de reproduction varie aussi en fonction

⁶ « Un système d'information géographique (SIG) est un outil informatique permettant d'organiser et présenter des données alphanumériques spatialement référencées, ainsi que de produire des plans et cartes » Wikipédia (2007).

des températures. « Aux environs de 25 °C, une femelle donne naissance tous les 9 à 10 jours à une larve entièrement développée. Lorsque la température s'abaisse, le taux de reproduction diminue et inversement lorsque la température s'élève. Toutefois, si la température est trop basse ou trop élevée, la reproduction s'arrête » (Pollock, 1982, p. 35). Nous retrouvons donc les glossines dans les savanes arborées, les savanes boisées et les forêts claires, ainsi qu'au bord des cours d'eau, des lacs et des forêts-galeries.

L'habitat de la glossine est aussi fonction de la présence de nourriture. D'après Pollock (1982, Chap. 6, p. 70), « les hôtes principaux de la tsé-tsé sont ceux qui occupent le même biotope et qui restent relativement tranquilles et immobiles pendant que la mouche s'alimente ». Parmi ceux-ci, nous pouvons citer : les buffles, les antilopes, les phacochères, les hippopotames, les bovins, les chevaux, les ânes, les chèvres, les porcs, ... et bien sûr les hommes.

Finalement, il est très fréquent que certains de ces facteurs s'associent pour limiter la répartition géographique des glossines. Par conséquent, la tsé-tsé peut devenir rare ou absente si un ou plusieurs de ces facteurs est absent.

1.2.2.3 La lutte anti-vectorielle

La lutte contre les trypanosomes repose sur trois grandes stratégies (Cuisance et al., 2003, Cité par Bouyer, 2006) : la lutte anti-vectorielle, le traitement des animaux et l'élevage d'animaux trypanotolérants. Seule la première sera abordée ici.

Le but de la lutte anti-vectorielle est l'extermination ou la diminution des glossines d'un foyer afin d'arrêter la transmission des trypanosomes de l'homme au vecteur, du vecteur à l'homme et du réservoir de virus au vecteur.

Depuis longtemps, la lutte anti-vectorielle a été menée en pratiquant l'éclaircissement forestier, connu sous le terme de « prophylaxie agronomique » ou de « *clearing* » (Le Rouzic, 1948; Challier, 1968). Appliquée au temps de la colonisation, cette méthode exigeait une main d'oeuvre importante pour déboiser et débroussailler. On parvenait à éliminer totalement le vecteur en zone de savane, mais les risques d'érosion des sols devenaient préoccupants. En forêt, l'élimination de la glossine était impossible en raison de l'importance de la superficie à déboiser. Finalement, les travaux de prophylaxie agronomique n'aboutissaient alors qu'à faire légèrement reculer le front des glossines. Celles-ci pouvaient continuer à piquer l'homme, donc à transmettre la maladie, par exemple au niveau des rizières installées sur les cours d'eau défrichés (Penchenier et Laveissière, 2000).

En outre, dans certains cas, la prophylaxie agronomique n'était pas efficace car « les glossines peuvent franchir des distances de 8 km, ou même plus, à travers des aires dépourvues de végétation » (Ricossé et al., 1973). Cette technique a donc été abandonnée en raison des inconvénients qu'elle engendre. Depuis lors, d'autres méthodes plus sophistiquées ont vu le jour : la pulvérisation d'insecticide, les lâchers de mâles stériles et les méthodes biologiques (utilisation de prédateurs et de parasites).

1.3 Objectifs du mémoire et démarche adoptée

1.3.1 Constat

Comme nous venons de le voir, il existe plusieurs moyens de lutte anti-vectorielle. Vu que la prophylaxie agronomique présente des inconvénients insurmontables, elle n'est plus pratiquée à grande échelle. Néanmoins, si nous considérons que la richesse en glossine d'un habitat est une fonction croissante de sa superficie (Rosenzweig, 1995, cité par Loreau, 2002, p. 172), la fragmentation de celui-ci pourrait contribuer à la mise au point d'une nouvelle stratégie de lutte.

Quand la glossine est mise en situation de stress, elle a tendance à moins se reproduire et à diminuer son nombre de repas. Selon Dargie (2006, p. 61), un facteur majeur contribuant au stress d'une population de glossines est « [...] l'empiètement des humains et la fragmentation concomitante de l'habitat des tsé-tsé ». Comprendre l'impact de la fragmentation de l'habitat sur la dynamique des populations de glossines contribue donc à la mise au point de stratégies de lutte plus efficaces.

Dans la région de *Nkhota kota*, au sein de laquelle se trouve notre zone d'étude, la glossine de savane prolifère. Elle y retrouve, en effet, les quatre facteurs permettant d'assurer sa présence : la chaleur, l'humidité, l'ombrage et la présence de nourriture.

À l'ouest de la zone, se trouve la *National Game Reserve*. La glossine s'y plaît particulièrement, en raison de l'homogénéité de l'habitat forestier, de la présence de la rivière *Bua* et du nombre élevé d'hôtes potentiels (buffles, lions, léopard, hyènes, etc.).

En bordure du lac Malawi, à l'est de notre zone, nous retrouvons une zone très hétérogène, composée de routes, de villages, de zones cultivées et de *dambos*⁷. Ces habitats sont moins propices à la prolifération des tsé-tsé, étant donné le faible nombre de patchs de forêt lui permettant de s'abriter.

Entre ces deux extrêmes, nous constatons la présence d'une zone intermédiaire, que nous appellerons la zone "tampon". Celle-ci présente un certain "gradient de fragmentation de la végétation", selon un axe ouest-est. Dès lors, nous pouvons faire l'hypothèse⁸ qu'il existe, selon un axe ouest-est également, un certain "gradient de présence de la glossine". Au sein de cette zone, les possibilités de rencontre entre les glossines et ses hôtes (hommes, bétail et animaux d'élevage) sont ainsi – théoriquement – de plus en plus élevée d'ouest en est. Par conséquent, la glossine fait peser une lourde menace sur la santé publique et impose de graves limitations à la production animale et au développement agricole de la zone (cf. section 1.1.2). C'est sur ce constat que le mémoire se base.

⁷cf. section 1.2.1.3

⁸La vérification de cette hypothèse ne rentre pas dans les objectifs de ce mémoire. Cependant, elle devrait être vérifiée dans le cadre du projet FRAGFLY, par l'équipe du professeur P. Van den Bossche de l'Institut Tropical d'Anvers.

1.3.2 Objectifs du mémoire

L'objectif du mémoire est de réaliser une étude longitudinale de la fragmentation des habitats de la mouche tsé-tsé, dans la région de *Nkhota kota* au Malawi, à partir d'une série temporelle d'images satellites.

Dans ce cadre, nous avons défini trois objectifs intermédiaires :

1. Classifier les images satellites en optimisant la comparabilité des classes entre les années ;
2. Calculer une série de métriques paysagères pour chaque image classifiée et étudier leur évolution temporelle au sein de la zone tampon ;
3. Vérifier l'hypothèse selon laquelle la taille des patchs d'habitat de la mouche tsé-tsé diminue lorsqu'on s'éloigne de la réserve naturelle.

1.3.3 Démarche et hypothèse

Pour étudier l'évolution de la fragmentation de notre zone d'étude, nous avons utilisé une série temporelle d'images satellites. En premier lieu, nous avons effectué une classification supervisée de ces images à l'aide du logiciel PCI GEOMATICA. Puis, nous avons étudié l'évolution temporelle de ces classifications. Ensuite, nous avons calculé un certain nombre de métriques paysagères, à partir de ces classifications et grâce au logiciel FRAGSTATS. Ces indices paysagers nous ont permis de quantifier et de qualifier la fragmentation de l'habitat des glossines. Pour le calcul de ces métriques, une zone d'étude réduite a été définie. Celle-ci a pour objectif d'optimiser la comparabilité des résultats entre les années. Par après, nous avons étudié l'évolution temporelle des indices de fragmentation. Enfin, nous avons vérifié l'hypothèse selon laquelle la taille des patchs d'habitat des glossines diminue lorsqu'on s'éloigne de la réserve naturelle.

1.4 Présentation des données

1.4.1 Images satellites

Pour réaliser cette étude, nous disposons d'une série temporelle de cinq images numériques, s'étalant entre 1986 et 2001 et provenant de la télédétection spatiale. Ces images multispectrales résultent de mesures effectuées par les capteurs *HRV*⁹, embarqués en double exemplaire à bord de satellites civils d'observation de la Terre (*SPOT* 1, 2 et 3). Le programme de télédétection *SPOT* a été mis en place par la France (*CNES*) en collaboration avec la Belgique et la Suède. Grâce à la constellation de ces satellites, situés en moyenne à 822 km d'altitude, la quasi-totalité de la Terre peut-être observée en une journée. Les trois satellites qui nous intéressent (*SPOT* 1, 2 et 3) ont été placés en orbite, respectivement, en 1986, 1990 et 1993 (BELSPO, 2006; Spot Image, 2007).

⁹ « Haute Résolution Visible » (BELSPO, 2006).

Chaque capteur *HRV* peut acquérir indifféremment des images en mode panchromatique (mode P : une seule large bande dans la partie visible du spectre électromagnétique) ou multispectral (mode XS : les bandes verte, rouge et infrarouge du spectre). Ils peuvent chacun balayer une bande de 60 km, la taille des images étant, par conséquent, de 60 x 60 km. Les satellites *SPOT* (1, 2 et 3) produisent des images à haute résolution spatiale¹⁰, 10 x 10 m pour les images panchromatiques et 20 x 20 m pour les images multispectrales (BELSPO, 2006; Spot Image, 2007). Le Tab. 1.1 résume ces informations.

TAB. 1.1 – Résolution spatiale¹² et spectrale¹² des satellites *SPOT* 1, 2 et 3.

Mode	Bande	Bande spectrale	Domaine spectral	Résolution spatiale
XS-multispectral	XS1	0,50 - 0,59 μm	Vert	20 x 20 m
	XS2	0,61 - 0,68 μm	Rouge	20 x 20 m
	XS3	0,78 - 0,89 μm	Infrarouge proche	20 x 20 m
P-panchromatique	PAN	0,50 - 0,73 μm	N & B	10 x 10 m

Les instruments optiques des satellites Spot peuvent effectuer des observations obliques, jusqu'à ± 27 degrés de la verticale du satellite, en modifiant l'orientation du miroir d'entrée de chaque instrument optique. Cette fonction est télécommandée par les stations au sol, permettant ainsi d'observer des régions particulières qui ne sont pas nécessairement à la verticale du satellite. La résolution temporelle est ainsi ramenée de 26 à 4 ou 5 jours pour les régions tempérées (BELSPO, 2006).

Les images satellites que nous avons utilisées ont toutes été prises pendant la saison sèche, précisément entre juillet et août, de 1986 à 2001 (voir Tab. 1.2, p. 20). Elles couvrent de manière variable le chef lieu du district, *Nkhota kota*, et une partie de la réserve naturelle éponyme, comme nous pouvons le voir sur les Fig. A.5 et A.4 (annexe A, p.61). Sur les images prises entre 1986 et 1999, nous constatons la présence de "bandes noires" de différentes largeurs. Celles-ci correspondent à des zones non couvertes par la trace des satellites lors du jour de la prise de vue. En outre, sur l'image de 1999, nous pouvons observer quelques nuages localisés au-dessus du lac Malawi et en quelques endroits épars de la zone visible.

Les images étaient déjà géoréférencées et celles de 1986 à 1999 ont été corrigées radiométriquement par N. Mokhtari. Pour cela, il a fait appel à la méthode de détermination des invariants radiométriques de L. Séguis et C. Puech (voir Séguis et Puech, 1997) en prenant l'image de 2001 comme référence. Les détails de la correction radiométrique peuvent être retrouvés dans son rapport de stage (voir Mokhtari, 2006).

¹⁰La résolution spatiale est la distance la plus petite permettant de discriminer deux objets voisins. Cette résolution s'exprime en mètres ou en kilomètres et mesure le côté d'un pixel. La résolution spectrale décrit la capacité d'un capteur à utiliser de petites fenêtres de longueurs d'onde (Pouchin, 2001).

1.4.2 Photographies aériennes et cartes topographiques

Outre les images satellites, nous disposons de 14 photographies aériennes couvrant une partie non négligeable de la zone d'étude. Malheureusement, ces prises de vues sont étalées entre le 10 et le 23 juillet de la seule année 1995. Par conséquent, leur utilisation n'a été possible que pour la validation de la classification de l'image satellite de 1996, avec toutes les précautions d'usage. En effet, nous avons dû être particulièrement prudents lors de leur interprétation visuelle, en raison du décalage temporel important par rapport aux données satellitaires. Nous reviendrons sur leur utilisation à la section 2.3 (p. 22).

Nous disposons également de deux cartes topographiques à l'échelle 1/50 000. La première, datant de 1970, est une projection transverse de Mercator. La seconde ne comporte aucune référence mais semble être une mise à jour de la précédente. En comparant cette dernière avec l'image satellite de 1986, nous avons pu situer sa conception autour de l'année 1980. Elles nous ont surtout aidées à nous familiariser avec la zone d'étude et pour repérer les positions des photographies aériennes.

En résumé, voici la liste des données que nous avons exploitées dans cette étude :

TAB. 1.2 – Caractéristiques des données.

Type de donnée	Date	Résolution spatiale ou échelle
Images satellites <i>SPOT</i>	12 août 1986 (8h03)	1 pixel : 20 x 20 m
	19 septembre 1991 (8h08)	
	18 septembre 1996 (7h49)	
	30 août 1999 (8h00)	
	11 septembre 2001 (8h11)	
Photographies aériennes	10-23 juillet 1995	1/25000
Carte topographique	1971	1/50000

Classification des images satellites

2.1 Introduction

Pour réaliser cette étude temporelle de la fragmentation du paysage, nous avons utilisé des images satellites. Nous nous sommes procuré une série temporelle de cinq images, s'étalant de 1986 à 2001 (cf. section 1.4, p. 18). Nous avons effectué une classification supervisée de chacune de celles-ci, à l'aide du logiciel PCI GEOMATICA v. 9.1. L'objectif du processus de classification est de diviser la zone d'étude en classe d'occupation du sol, avec le souci de respecter autant que possible la géométrie des contours.

Dans ce chapitre, nous allons expliciter le choix de la légende des classifications, décrire notre processus de classification, faire état de l'évaluation de la précision, discuter de nos résultats et, finalement, nous ferons une étude de l'évolution des différentes classes.

2.2 Choix de la légende

Pour définir les classes d'occupation du sol, nous sommes partis d'une classification de l'image satellite datant de 2001 effectuée par S. Vanwambeke. Nous avons supprimé la classe "*Swamps and flooded areas*", car celle-ci n'apportait que peu d'information pertinente pour notre étude et qu'elle était à difficile distinguer de la classe "*Wetlands with low vegetation, including irrigated areas*".

Voici les classes que nous avons retenues et qui sont valables pour l'ensemble de nos classifications :

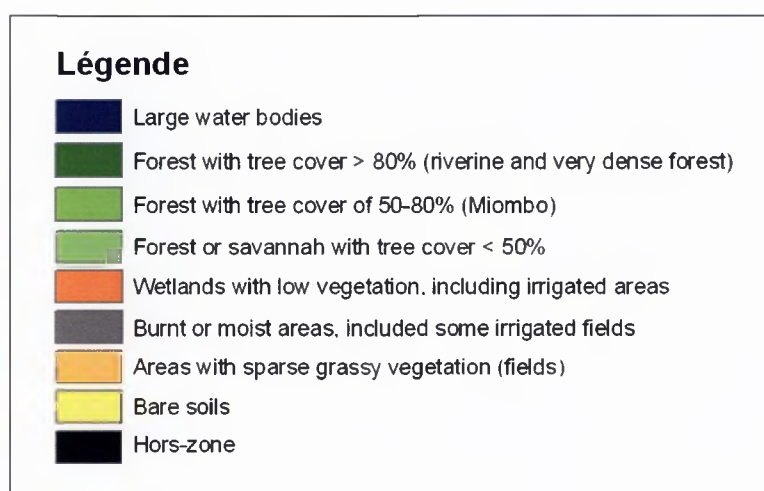


FIG. 2.1 – Légende des classes pour les images satellites *SPOT*

Nous avons choisi de représenter les zones forestières et de savanes dans un dégradé de vert, du plus foncé (forêts avec couvert forestier $> 80\%$) au plus clair (forêt ou savane avec couvert forestier $< 50\%$), en passant par un vert moyen (forêts avec couvert forestier entre 50 et 80 %).

Les marécages couverts d'une faible densité de végétation, incluant quelques surfaces irriguées, sont représentés par des pixels de couleur orange. D'après des recoupements effectués entre les images classifiées et la carte topographique de 1971, cette classe correspond aux *dambos*, dont nous avons parlé à la section 1.2.1.3 (p. 6).

Nous avons classifié en gris les sols brûlés et/ou humides, en y incluant les champs irrigués, et nous avons attribué la couleur bleue aux étendues d'eau, lacs et rivières. En jaune clair, nous avons représenté les sols nus, et en jaune foncé, les surfaces couvertes par une végétation herbeuse ("*grassy*") clairsemée ou par des champs cultivés. Ces deux dernières classes sont liées à l'habitat des populations (Villes et villages, routes, etc.), ainsi qu'aux activités rurales (élevage, pâturages, cultures, etc.).

Enfin, les zones non couvertes par les images satellites ou celles qui se trouvaient sous un nuage lors de la prise de vue sont représentées en noir.

Avec la définition de ces différentes classes thématiques d'occupation du sol, nous pensons pouvoir remplir correctement les objectifs de notre étude.

2.3 Processus de classification

2.3.1 Termes et définitions

Avant de présenter le processus de classification, il nous semble important de préciser succinctement quelques termes et définitions.

Nous voudrions, par exemple, expliquer la différence entre une image et une photographie, car la grande majorité des satellites prennent des images de la Terre et non des photographies. La différence entre les deux peut paraître anodine et pourtant, elle est de taille : une image est au format numérique alors qu'une photographie est au format papier. C'est pourquoi nous parlons, dans ce mémoire, d'image satellite et non de photographie satellite (Pouchin, 2001).

Autre précision. Une image satellite est, en fait, une matrice de pixels. Un pixel est « la plus petite surface homogène constitutive d'une image enregistrée » (Paul, 1997). Chaque pixel de chaque bande des images satellites possède une valeur radiométrique, représentant la moyenne des mesures radiométriques effectuées sur la surface qu'il représente sur le terrain (Pouchin, 2001). Dans nos classifications, à chaque pixel est associée la couleur d'une des classes définies dans la section précédente.

L'information de base d'une image satellite est la valeur radiométrique de chacun de ses pixels, dans chacune de ses bandes spectrales (XS1, XS2 et XS3). Dans le jargon de la télédétection, nous

appelons cela une « luminance spectrale¹ ». Sur les images *SPOT*, cette information est codée en 8 bits. Cela veut dire que chaque pixel peut représenter 256 valeurs par bande. Au total, cela correspond à 256^3 niveaux d'informations différentes que peut représenter un pixel, pour les trois bandes. Dans la réalité, les éléments constitutifs d'une image perceptibles à l'oeil humain ne sont pas si nombreux. Le rôle de l'ordinateur et/ou de l'opérateur est donc de résumer cette matrice d'information, en produisant des classes spectrales susceptibles de s'interpréter en classes thématiques (Caloz et Collet, 2001). La difficulté réside dès lors dans le regroupement des pixels de manière à former des classes spectrales relativement homogènes.

Dans cette démarche, plusieurs points sensibles peuvent apparaître. Par exemple, selon Caloz et Collet (2001, p. 275), « les phénomènes naturels sont caractérisés par une forte composante aléatoire, notamment des propriétés décrivant la manifestation spectrale des classes d'occupation du sol ». En effet, celles-ci se caractérisent, dans chaque bande, par un intervalle de luminances centré sur une moyenne. Ces deux indicateurs de dispersion et de centralité sont appelés la « signature spectrale » de la classe. Or, la signature d'une classe n'est pas invariante dans l'espace géographique. La nature des sols et des effets climatiques locaux peuvent modifier l'activité d'une même formation végétale, avec pour conséquence, des signatures spectrales différentes d'une région à l'autre.

Une deuxième difficulté, entre autres, est liée à l'estimation des incertitudes résultant nécessairement d'une approche statistique. En effet, est-il possible d'estimer, en pourcentage, le niveau de correspondance des résultats obtenus avec la réalité et, de surcroît, comment peut-on cerner celui-ci ? Cette étape, indispensable pour assurer la qualité de démarche de classification, sera explicitée dans la section « évaluation de la précision » (p. 25).

2.3.2 Classification des images

Après avoir formulé les classes thématiques à extraire des images et précisé quelques termes et définitions, nous pouvons développer la démarche nous ayant conduits à la production des cartes d'occupation du sol.

En premier lieu, nous avons affiché les trois canaux des images satellites : le canal XS3 (proche infrarouge) a été codé en rouge, le canal XS2 (rouge) codé en vert et le canal XS1 (vert) codé en bleu. Le résultat obtenu est appelé composition colorée en fausse couleur. Ce mode d'affichage des images satellites, largement répandu, est décrit sur la Fig. A.6 (annexe A, p. 62). Il permet de mettre en évidence les formations végétales photosynthétiquement actives en rouge, les sols nus en blanc et les étendues d'eau en bleu, comme nous pouvons le voir sur nos images satellites (Fig. A.5 et A.4, en annexe A, p. 61).

Au niveau des procédures de classification, deux catégories de démarches ont été identifiées, selon la situation dans laquelle l'opérateur est placé et selon l'objectif suivi : la classification non supervisée et la classification supervisée (Caloz et Collet, 2001).

¹ « Rapport de l'intensité énergétique, dans une direction et une bande spectrale définie, d'un élément de surface à l'aire de projection orthogonale de cet élément sur le plan perpendiculaire à cette direction. Son unité est le $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ » (Paul, 1997).

La classification non-supervisée : L'opérateur ne dispose d'aucune information sur la zone d'intérêt ou ne souhaite pas en exploiter dans la phase d'analyse. Aucune information externe à l'image n'est donc introduite. Le classement des pixels est effectué selon le critère de la ressemblance spectrale. L'interprétation thématique et l'agrégation des classes spectrales produites sont réalisées ultérieurement.

La classification supervisée : L'opérateur définit, au préalable, les classes thématiques qu'il souhaite extraire de l'image. Ensuite, il identifie quelques zones de l'image occupées, sans ambiguïté, par les classes d'intérêt. De ces zones, appelées « aires d'entraînement », il extrait les signatures spectrales pour chaque classe. Enfin, les pixels sont affectés à la classe qui correspond le mieux à ses caractéristiques spectrales. Si les résultats ne sont pas satisfaisants, on remet en cause l'une ou l'autre de ces étapes, jusqu'à ce que la qualité requise soit atteinte. Ce processus est donc itératif et nécessite une intervention beaucoup plus importante de l'opérateur, par rapport à la méthode non supervisée.

Pour notre étude, nous avons commencé par exploiter une combinaison de ces deux procédures, en raison de la complexité des milieux étudiés et du peu d'informations de terrain disponible. Une fois que nous nous étions familiarisés avec la zone d'étude, nous avons utilisé exclusivement la méthode de classification supervisée.

L'étape de constitution des aires d'entraînement nécessite de connaître l'occupation de certains pixels de manière précise. Ceci peut se faire par des missions de terrain ou, à défaut, par l'interprétation de documents comme des cartes topographiques ou des photographies aériennes. Dans l'idéal, les dates de ces documents ou visites de terrain devraient être simultanées à celles de nos images satellites. Dans la réalité, ce n'est pas toujours le cas ; ce qui peut avoir une influence néfaste sur la construction des zones d'échantillon, en raison de la saisonnalité et de la variabilité inter-annuelle de la végétation. Pour notre étude, la seule « vérité - terrain » (ou référence) dont nous disposions étaient les photographies aériennes de 1995, puisque les dates des cartes topographiques sont toutes deux inférieures à celles nos images satellites. Dans ces conditions, il a fallu être très prudent dans le choix de nos zones d'échantillon, d'autant plus pour la classification des images datant de 1986, 1991, 1999 et 2001.

Nous avons donc commencé par classer l'image de septembre 1996, en nous aidant des photographies aériennes de juillet 1995. Les zones d'échantillon, représentatives de chaque classe, ont été divisées en deux groupes : un groupe pour l'établissement des signatures spectrales (zones d'entraînement), et un autre pour vérifier si la procédure avait bien produit les classes attendues (zones tests). Nous reparlerons de ce deuxième groupe dans la section suivante.

Ensuite, nous avons lancé la classification proprement dite de cette image en sélectionnant la classification par « maximum de vraisemblance » (« *Maximum Likelihood Classification* »). Celle-ci se base sur des méthodes probabilistes. Le logiciel calcule la probabilité que chaque pixel appartienne à telle ou telle classe à partir des aires d'entraînement. Puis, la totalité de l'image est classée par l'algorithme de classification sur base de ces statistiques. Un des avantages de cette méthode est

qu'elle fournit pour chaque pixel, en plus de la classe à laquelle il a été affecté, un indice de certitude lié à ce choix (BELSPO, 2006).

Une grande série d'images classifiées de 1996 ont ainsi été produites par itération et "essai-erreur" en modifiant progressivement les zones d'entraînement. Une fois que le résultat correspondait à nos attentes, nous avons pu passer à l'étape d'évaluation de la précision (cf. section 2.3.4).

En outre, il est à noter que nous n'avons pas appliqué de filtre modal² sur nos classifications, en raison de l'influence que ceux-ci pourraient avoir sur le degré de fragmentation des habitats (voir Langford et al., 2006).

2.3.3 Comparabilité des classifications

Un des objectifs intermédiaires de cette étude était de « classer les images satellites en optimisant la comparabilité des classes entre les années ». Malheureusement, nous ne disposions de "vérité-terrain" que pour l'année 1996, et encore, avec un écart de plus d'un an entre l'image satellite et les photographies aériennes. Par conséquent, ces dernières n'ont été utilisées que pour la classification de l'image datant de 1996. Pour les autres années, nous avons été contraints d'extrapoler les aires d'entraînement définies en 1996, en nous focalisant sur cet objectif intermédiaire. Dans cette optique, une sélection rigoureuse des zones d'échantillon de chaque classe a été réalisée pour chacune des années, en choisissant de préférence des zones ayant peu ou pas changé. Bien sûr, au fur et à mesure des nombreuses classifications effectuées, notre expérience, notre acuité visuelle, et notre interprétation des compositions colorées de la zone d'étude se sont considérablement améliorées et précisées.

Enfin, la dernière étape du processus de classification a consisté à évaluer la précision des classifications.

2.3.4 Évaluation de la précision

De manière générale, la qualité d'une classification s'évalue par rapport aux objectifs poursuivis par l'opérateur et au thème traité. Selon Caloz et Collet (2001), « une bonne évaluation repose sur l'esprit critique de l'analyste et sur sa rigueur scientifique ». Néanmoins, le processus de classification reposant sur un algorithme déterministe, il est légitime d'évaluer celui-ci de manière quantitative. L'évaluation quantitative s'appuie sur des outils statistiques dont l'élément principal est *la matrice de confusion*. De cette matrice, nous pouvons déduire plusieurs indices (Précision globale, statistique Kappa, etc.), caractérisant chacun une propriété particulière des résultats.

La matrice de confusion, encore appelée matrice d'erreur ou tableau de contingence, est un tableau à double entrée. Elle présente, en ligne, les résultats de la classification par rapport aux différentes classes thématiques définies dans l'image classée, et, en colonne, les résultats par rapport aux zones de références (zones tests). La diagonale principale porte les points classés correctement.

²Filtre permettant de lisser une image, en réduisant l'effet de moucheture engendré par un processus de classification (Pouchin, 2001).

Nous avons placé en annexe B.7 un exemple d'une matrice de confusion (p. 69), ainsi que les matrices de nos classifications (p. 71).

Grâce à la matrice de confusion, nous pouvons calculer une mesure globale de précision de la classification. Cette formule simple consiste à diviser le nombre de pixels classés correctement (en diagonale), par le nombre total de pixels classés (voir annexe B.7, p. 69). Cet indice exprime les pixels classés correctement par rapport aux pixels mal classés (erreur de *commission*³).

Nous pouvant également calculer l'indice Kappa, proposé par Cohen en 1960 (voir annexe B.7, p. 70). Cet indice est similaire à la précision globale, dans la mesure où il est surtout sensible aux erreurs de *commission*.

Les classifications supervisées ont été conçues pour permettre une évaluation de la capacité d'un algorithme à restituer une zone dont on lui a fourni la signature spectrale. L'évaluation ne s'opère donc – en principe – que sur une partie connue de l'image, c'est à dire sur le deuxième groupe des zones d'échantillon, dont nous avons parlé dans la section précédente : les zones tests. Dans notre cas, vu le peu de données de références disponibles, nous avons décidé de créer un échantillon aléatoire de points dont 50 % étaient localisés au sein des zones tests, le reste étant réparti sur l'ensemble de la zone d'étude. De cette manière, nous pensons avoir éliminé partiellement le biais lié au nombre peu élevé de zones tests.

Ensuite, par hypothèse, on étend ces résultats à l'ensemble de l'image. D'après Caloz et Collet (2001), « cette inférence repose sur des hypothèses statistiques spécifiques, mais qui relèvent aussi du bon sens : la *représentativité* de ces zones tests par rapport à l'ensemble de l'image à classer et leur *indépendance* par rapport aux zones d'entraînement ayant servi au calage du modèle de classification ». Néanmoins, dans l'idéal, il serait intéressant de pouvoir confronter les classifications obtenues avec toute information géolocalisée, concomitante à l'image classifiée : carte topographique, photographie aérienne, ancien état de l'occupation du sol, ... bref, toute information susceptible de conforter la fiabilité du document final. Dans notre étude, comme précisé précédemment, nous n'avons pu utiliser cette "vérité-terrain" que pour la classification de l'image de 1996.

Dans la section suivante, nous présenterons les résultats de nos classifications et de l'évaluation de leur précision.

2.4 Résultats

Nous sommes globalement satisfaits de la qualité des classifications effectuées. En première approximation, nous pouvons constater une certaine continuité dans la distribution des classes entre 1986 et 2001 (voir annexes B, p. 64) ; ce qui nous rassure sur le bon déroulement du processus de classification et conforte nos choix des aires d'entraînement.

Quantitativement, nous pouvons voir dans le Tab. 2.1 que la classification présentant les meilleurs résultats est celle de 2001, avec une précision globale de 74 % et un indice Kappa de 70 %. Les

³ « On parle d'erreur de *commission* quand le classificateur a affecté des pixels dans une classe autre que celle à laquelle ils appartiennent » (Caloz et Collet, 2001)

classifications de 1986, 1991 et 1999 obtiennent des résultats relativement similaires, tant pour la précision globale que pour l'indice Kappa. Par contre, la classification de 1996 présente des résultats très inférieurs pour les deux indices.

TAB. 2.1 – Précision globale et statistique Kappa des classifications

	1986	1991	1996	1999	2001
Overall accuracy (%)	72	70	63	71	74
Kappa statistic (%)	68	67	56	68	70

Nous pensons que ces mauvais résultats sont liés à la faible superficie de la zone d'étude couverte par la trace du satellite en 1996. En effet, sur l'image satellite de cette année-là (voir Fig. A.4, p. 61), nous pouvions déjà constater la présence d'une large bande noire, occultant la totalité de la réserve naturelle et une partie de la zone tampon. Pendant le processus de classification, celle-ci nous a empêché de sélectionner correctement nos zones d'échantillon, surtout pour les classes "Forest with tree cover of 50-80 % (Miombo)" et "Forest with tree cover > 80 % (riverine and very dense forest)". En conséquence, les résultats de la classification de 1996 ne sont pas satisfaisants par rapport à ceux obtenus pour les autres images (voir Fig. B.4, p. 66). Malheureusement, ce sont ces deux classes qui nous intéressent le plus pour notre étude. C'est la raison pour laquelle nous avons décidé de ne pas intégrer la classification de 1996 dans notre analyse longitudinale de la fragmentation des habitats de la mouche tsé-tsé.

Sur les classifications des images de 1986, 1991, 1999 et 2001, nous pouvons clairement distinguer les éléments du paysage dont nous avons discuté à la section 1.3.1 (p. 17). En bordure du lac Malawi, à l'est de notre zone, nous retrouvons un secteur très hétérogène composé de routes, de villages, de zones cultivées, de sols nus et de *dambos*. À l'ouest de la zone, nous observons une portion de la rivière *Bua* et une partie de la *National Game Reserve*. La limite de celle-ci est, d'ailleurs, clairement visible au centre de l'image, le long d'une ligne oblique imaginaire orientée nord-sud. Entre ces deux extrêmes, nous constatons la présence d'une région intermédiaire que nous avons appelée la zone tampon. C'est sur cette dernière que nous allons nous focaliser dans le chapitre suivant. Mais, avant cela, nous allons étudier l'évolution temporelle des différentes classes.

2.5 Étude de l'évolution des classifications

2.5.1 Évolution générale

Comme nous l'avons vu, les classifications des images satellites présentent, en première approximation, une certaine continuité dans la distribution des classes d'occupation du sol entre 1986 et 2001. En effet, sur chaque image classifiée, nous retrouvons plus ou moins les mêmes zones de paysage : en bordure du lac Malawi, le secteur hétérogène composé de routes, de villages, de sols

cultivés, de sols nus et de *dambos* ; à l'ouest de la zone, la réserve naturelle, constituée de couvert forestier dense ($> 50\%$) ; entre ces deux extrêmes, la zone tampon.

Entre 1986 et 2001, l'évolution du secteur hétérogène est relativement stable. Néanmoins, nous observons progressivement un empiètement de celui-ci sur la zone tampon. L'augmentation de la pression anthropique sur les sols semble donc accélérer les processus de dégradation des couverts forestiers (savanes et forêts denses).

Au sein de la zone tampon, nous remarquons que la superficie des zones cultivées et des savanes augmente de plus en plus. En conséquence, nous notons une forte diminution des forêts denses (couvert $> 50\%$), surtout jusqu'à la limite de la réserve naturelle. Dès lors, nous pouvons imaginer qu'il y a, au sein de cette zone intermédiaire, une diminution de la taille des patchs de forêt dense et, par conséquent, une fragmentation progressive de l'habitat de la mouche tsé-tsé. Le professeur Van den Bossche (2001) confirme : « L'extension des surfaces agricoles à travers le processus de conversion des forêts, et surtout les coupes de bois pour la production d'énergie, ont pour conséquence, d'une part, une diminution des zones d'habitat des glossines, et, d'autre part, la réduction de l'interface protectrice entre les habitats humains et les foyers actifs de mouche tsé-tsé. ».

Les traces du satellite en 1986 et en 2001 couvrent une large superficie de la réserve naturelle. Grâce à cette particularité, nous pouvons faire des observations concernant l'évolution de celle-ci. Premièrement, au fur et à mesure que les années avancent, la limite entre la réserve naturelle et la zone tampon est de plus en plus visible sur nos images classifiées. En 1986, elle est peu claire et les forêts denses empiètent largement sur la zone tampon, notamment le long de la rivière *Kaombé* (située au sud de la zone d'étude). En 2001, la limite est clairement visible et il n'y a pratiquement plus de couvert dense dans la zone tampon, à l'exception de quelques patchs isolés. Au nord-est, au centre-est et au sud-ouest de la réserve naturelle, nous observons une fragmentation croissante du couvert forestier dense et un remplacement de celui-ci par du couvert forestier peu dense ($< 50\%$). En outre, de nombreuses zones brûlées sont visibles au sein de la réserve naturelle. À ce propos, nous nous posons un certain nombre de questions sur la réalité de celles-ci, puisque nous sommes, normalement, au sein d'une réserve protégée. Malheureusement, à défaut de données suffisamment précises à leur sujet, le seul moyen pour obtenir une réponse à notre questionnement est de se rendre sur place, afin de valider nos classifications.

2.5.2 Évolution des différentes classes

Pour étudier l'évolution des classes d'occupation du sol entre 1986 et 2001 et afin d'optimiser leur comparabilité, nous avons fait le choix de réduire – temporairement – la zone étudiée à celle couverte par la trace du satellite en 1999. Pour ce faire, nous avons appliqué le masque "Hors-zone" de 1999 à toutes les classifications des autres années. En outre, comme nous pouvons le voir sur la Fig. A.4 (p. 61), la trace du satellite de 1996 est encore plus étroite que celle de 1999. Pour cette étude de l'évolution des différentes classes, nous avons néanmoins décidé de conserver

la classification de cette image afin de profiter de toutes les informations temporelles dont nous disposions.

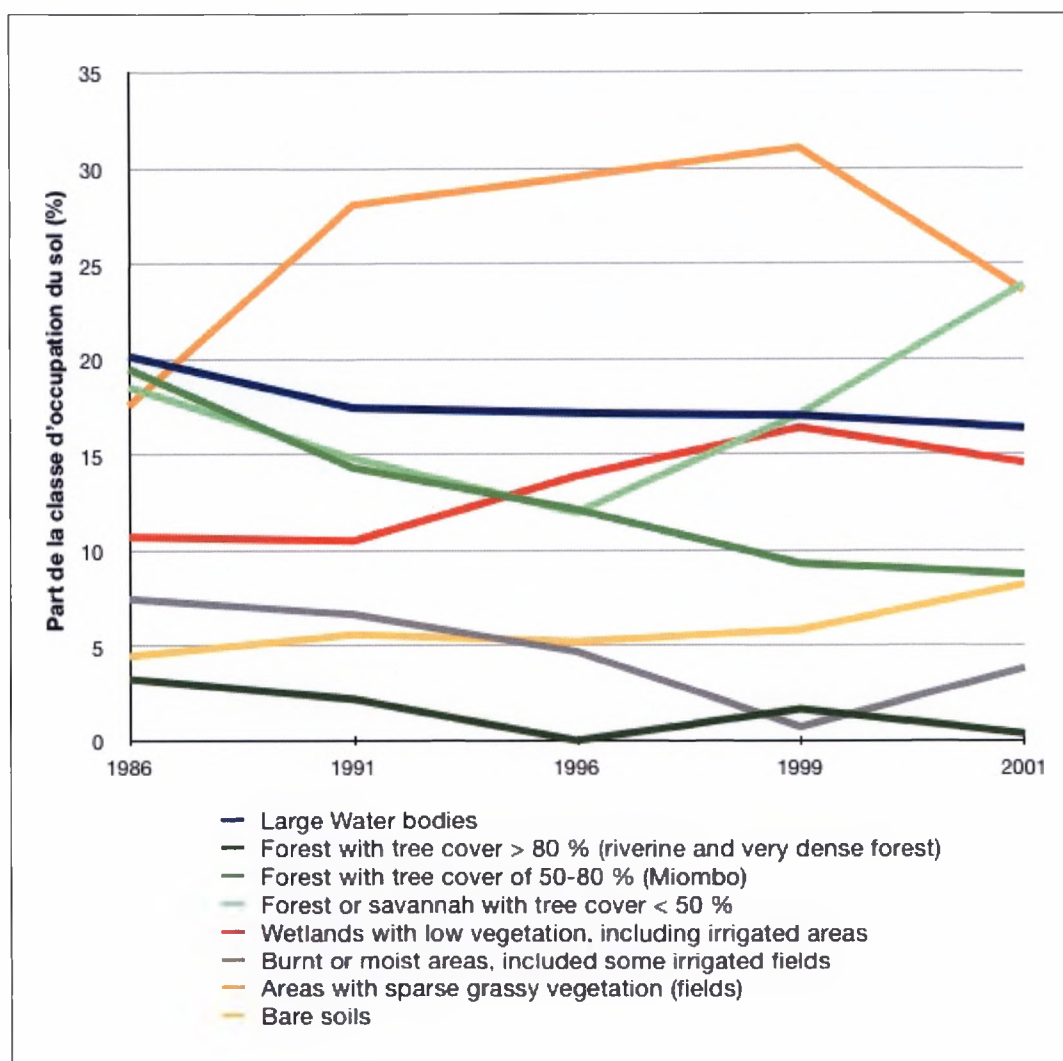


FIG. 2.2 – Évolution des classes d'occupation du sol

La Fig. 2.2 nous montre, pour chaque année, la part que chaque classe occupe par rapport à la superficie totale de la zone réduite⁴.

Nous pouvons faire plusieurs constatations :

Forte augmentation du pourcentage des classes liées à l'habitat et aux activités rurales :

Les classes "*Areas with sparse grassy vegetation (fields)*" et "*Bare soils*" augmentent fortement entre 1986 et 1999. Ce phénomène peut être mis en parallèle avec l'augmentation de la pression démographique qui pousse les populations rurales à agrandir les surfaces des zones de cultures et celles liées à leur habitat (cf. section 1.2.1.5, p. 11).

⁴La zone réduite est celle couverte par la trace du satellite en 1999.

Remarquons également que le pourcentage de la classe “zones cultivées” diminue entre 1999 et 2001. Nous pensons que cela est dû, en partie, à l’augmentation observée entre 1996 et 2001 de la classe “savane ou forêt peu dense (couvert < 50 %)”, mais aussi, en partie, à cause d’une légère erreur de classification des pixels de cette classe.

Forte diminution du pourcentage des classes liées à l’habitat de la mouche tsé-tsé : Sur la Fig. 2.2, nous constatons que les classes “*Forest with tree cover > 80 %*” et “*Forest with tree cover of 50-80 %*” diminuent fortement entre 1986 et 2001. Suite à l’étude de l’écologie des glossines (voir section 1.2.2.2, p. 15), nous avons décidé de rassembler ces deux classes au sein d’une seule classe “Forêt dense”. De cette manière, nous considérons que les habitats des glossines sont entièrement inclus au sein de cette classe unifiée. La tendance que nous observons corrobore l’idée selon laquelle le défrichement des forêts s’accélère, en raison de l’augmentation de la pression démographique. Cette forte diminution semble donc se faire au profit des savanes et forêts peu denses, mais aussi au profit des zones d’habitations et des activités rurales (cultures, élevages, pâturages, etc.).

Diminution puis augmentation du pourcentage des savanes et forêt peu denses : Nous observons une forte diminution, entre 1986 et 1996, puis une forte augmentation, entre 1996 et 2001, de la classe “*Forest or savannah with tree cover < 50 %*”. Nous pensons pouvoir expliquer ce processus en deux étapes. Premièrement, la superficie des surfaces agricoles et des zones d’habitats se sont agrandies et ont de plus en plus empiété sur les savanes et forêts peu denses (couvert < 50 %). D’ailleurs, sur l’image classifiée de 1986, les feux sont essentiellement localisés au sein de cette classe et, sur l’image de 1991, ces zones brûlées ont été attribuées à la classe des champs cultivés. Dans un deuxième temps, les habitants des zones rurales se sont aventurés de plus en plus loin dans les forêts denses, notamment pour y prélever du bois de chauffage, engendrant ainsi leur déforestation au sein de la zone tampon. En conséquence, la superficie des forêts peu denses a eu tendance à augmenter entre 1996 et 2001.

Augmentation des zones de marécage et cultures irriguées : Les années avançant, nous pouvons constater une certaine augmentation, de l’ordre de 50 %, du pourcentage de la classe “*Wetlands with low vegetation, including irrigated areas*”. Cependant, nous n’avons trouvé aucune information crédible nous indiquant que la superficie des *dambos* tend à augmenter. Peut-être que certains agriculteurs de la région ont récupéré une partie de cette terre pour étendre leurs surfaces irriguées, mais cette hypothèse reste à confirmer.

Légère diminution de la part des étendues d’eau : Sur les images satellites et les images classifiées, nous pouvions déjà observer ce phénomène. Il est, d’une part, lié à l’augmentation de la superficie des terres dans le nord-est de la zone d’étude et, d’autre part, à l’assèchement constaté des deux lacs ou étangs, situés le long du lac Malawi, à l’est de la zone.

De moins en moins de feux dans la zone réduite : Nous pouvons également noter une diminution non négligeable du pourcentage des zones brûlées au cours du temps. Cependant, cette constatation ne semble être valable que dans la zone réduite car, sur la classification

de 2001, nous observons un nombre important de feux au sein même de la réserve naturelle. Globalement, nous pouvons constater que les feux se déplacent de l'est vers l'ouest entre 1986 et 2001 (voir annexes B, p. 63).

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé la démarche nous conduisant à la classification des images satellites. Nous avons explicité la légende des classifications, précisé quelques termes et définitions et développé le processus de classification. Ensuite, nous avons discuté de leur comparabilité et évalué leur précision. Finalement, nous avons examiné nos résultats et nous avons réalisé une étude de l'évolution temporelle des classes d'occupation du sol.

Nous sommes globalement satisfaits de la qualité des classifications effectuées, malgré le peu d'informations de terrain dont nous disposions. Nous avons néanmoins été contraints d'exclure l'image classifiée de 1996, pour l'analyse de la fragmentation dans la zone tampon, en raison de la faiblesse relative de ses indices de précisions. Par contre, nous avons décidé de l'intégrer dans notre étude de l'évolution des différentes classes d'occupation du sol, afin de profiter de l'ensemble des informations temporelles disponibles.

En observant attentivement les images classifiées, nous avons pu constater que les classes d'occupation du sol présentent une certaine continuité au cours du temps dans leur distribution au sein de la zone d'étude. Le premier objectif que nous nous étions fixé, à savoir « classer les images en optimisant la comparabilité des classes entre les années », est donc pleinement rempli.

Dans le prochain chapitre, nous allons nous attaquer à l'étude temporelle de la fragmentation des habitats de la mouche tsé-tsé.

Étude longitudinale de la fragmentation

3.1 Introduction

Pour cette étude de la fragmentation des habitats de la mouche tsé-tsé, nous avons décidé de rassembler les deux classes “*Forest with tree cover > 80 %*” et “*Forest with tree cover of 50-80 %*” au sein d’une seule classe “Forêt dense”. Par ce biais, nous considérons que les habitats des glossines sont entièrement inclus dans cette classe.

Dans ce chapitre, nous allons étudier et analyser la dégradation de ces habitats à l’aide d’une démarche et d’outils issus de l’écologie du paysage. Pour ce faire, nous calculerons, grâce au logiciel FRAGSTATS, un certain nombre d’indicateurs spatiaux encore appelés « métriques paysagères ». Ceux-ci nous permettront d’analyser la dynamique dans le temps et dans l’espace de l’habitat des tsé-tsé. Nous nous retrouverons donc à l’interface entre la géographie et l’écologie des paysages.

Nous allons, tout d’abord, préciser quelques termes et définitions. Ensuite, nous présenterons le logiciel FRAGSTATS et nous expliciterons le choix des indices. Nous expliquerons également pourquoi nous avons réduit la zone d’étude des métriques à la zone tampon et nous discuterons de nos résultats. Enfin, nous vérifierons l’hypothèse, définie dans la section 1.3.3, et nous terminerons ce chapitre par une brève conclusion.

3.2 Termes et définitions

La terme de paysage, « portion invisible d’un seul regard », englobe en fait de nombreuses significations. Le paysage étant doté d’un fort pouvoir suggestif, il existe d’abord par le sujet qui l’appréhende. Selon le CRDP (2004), « [...] notre perception d’un paysage varie selon notre position d’observateur, mais aussi en fonction de notre histoire, de nos images mentales, se référant souvent à des symboles identitaires ». Bien sûr, dans cette étude, nous ne nous attarderons pas sur l’évolution de ce concept, ni sur les innombrables définitions que les auteurs de géographie humaine ont produites à son encontre (Paul Vidal de la Blache, R. Brunet, Y. Lacoste, etc.). Nous nous contenterons de la définition de Schlaepfer (2006) : « Le paysage est un complexe écologique pouvant être défini comme : un espace hétérogène, cohérent et dynamique, composé de différents systèmes en interaction, résultant de la conjonction évolutive de facteurs écologiques, sociaux, culturels et économiques, et perçu d’une manière unitaire et distincte de ses voisins ».

La structure du paysage, reflet des interactions passées et récentes entre la nature et les activités humaines, peut être appréhendée en fonction de sa composition et de sa configuration. Selon Blouin-Demers (2006), « la composition exprime la présence et l’abondance d’unités ou de types d’unités

dans le paysage » et la configuration « représente la distribution et l'arrangement des unités dans l'espace ».

En écologie forestière, les études portant sur les effets de la fragmentation des forêts sur les populations animales sont abondantes et variées (Bourque, 2005). Elles montrent que la présence et la densité des populations d'espèces animales sont généralement moins élevés dans les petits fragments forestiers isolés que dans les forêts continues (Robbins, 1979; van Dorp et Opdam, 1987; Blake, 1991). Cet effet de perte et de fragmentation des forêts sur la répartition des populations est particulièrement marqué dans les paysages où la proportion de couvert forestier est très faible. En effet, lorsque celle-ci se situe au-delà d'un seuil de 20-30 % du paysage, la probabilité de présence des espèces semble être associée de façon linéaire à la quantité de forêts résiduelle. Sous ce seuil, la probabilité d'occurrence est plus faible (Andrén, 1994; Bender et al., 1998, cités par Bourque, 2005) et le risque d'extinction locale est plus élevé que ce qui serait prédit (Fahrig, 1997, 2002, cités par Bourque, 2005), en se basant sur la quantité de forêts.

Quand on analyse les processus de dégradation des habitats, il faut distinguer les pertes d'habitat et la fragmentation de ceux-ci. Les pertes d'habitat sont définies comme une réduction de la superficie totale de l'habitat, alors que la fragmentation est une division de zones contigües en fragments distincts (voir Fig. 3.1). La fragmentation modifie la configuration des parcelles de forêt en augmentant le ratio périmètre/surface de ces parcelles. Par contre, la perte de couvert forestier dans un paysage peut se traduire par une réduction du nombre des parcelles sans que la configuration des parcelles ne soit altérée (Bourque, 2005). Généralement les deux tendances sont corrélées (Blouin-Demers, 2006).

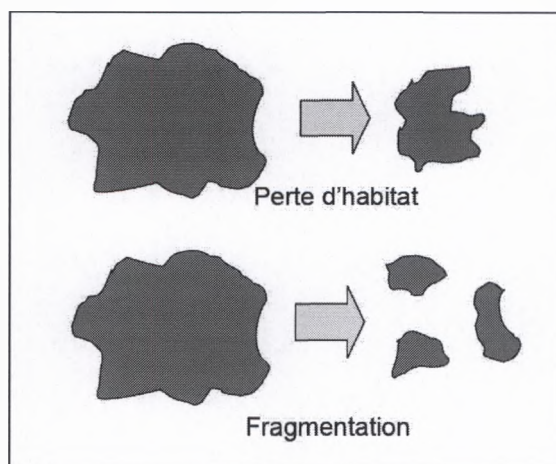


FIG. 3.1 – Distinction entre la perte d'habitat et la fragmentation de ceux-ci (Source : Blouin-Demers, 2006).

Dans ce chapitre, nous nous préoccupons du processus de fragmentation de l'habitat des glosines. Au début de la transformation de la classe forêt dense (couvert forestier > 50 %), nous pouvons observer la formation de trouées, perforant petit à petit l'habitat (Forman, 1995). À ce

stade, le couvert forestier continue à être connecté de façon importante. Ensuite, ces trouées deviennent de plus en plus grandes et nombreuses jusqu'à ce que l'environnement soit dominé par de l'habitat modifié, avec quelques fragments de l'habitat original (voir Fig. 3.2).

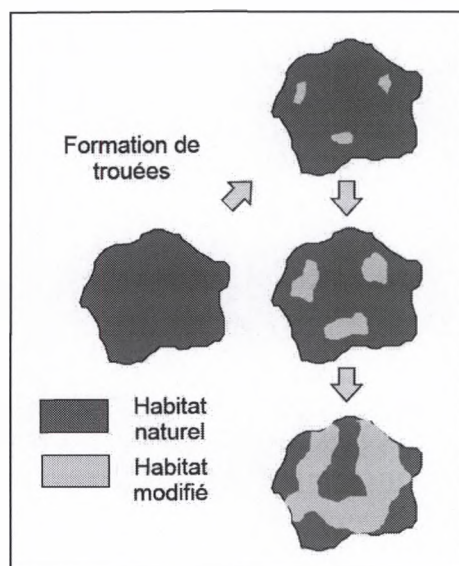


FIG. 3.2 – Processus de fragmentation des habitats (*Source* : Blouin-Demers, 2006).

Enfin, il nous semble important d'introduire ici la notion de "réseau écologique". La fragmentation de vastes habitats continus résulte en une mosaïque de patchs distincts, entre lesquels le mouvement des espèces est limité, ou même rendu impossible. Dans certains cas, des couloirs d'habitat du même type connectent des patchs isolés, permettant ainsi le mouvement d'individu entre les patchs.

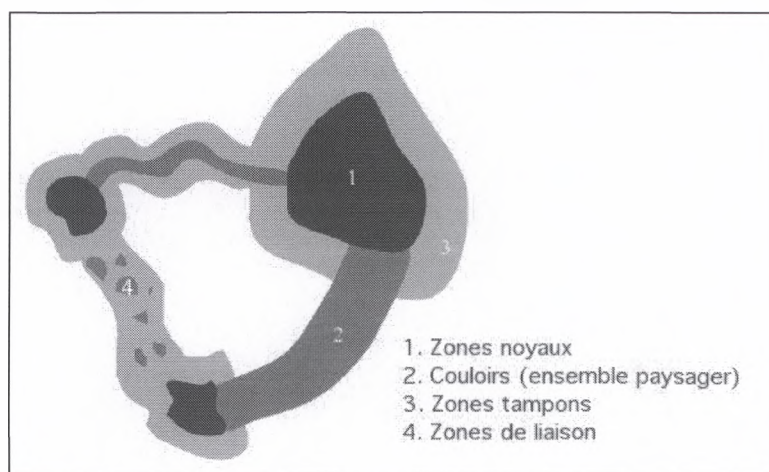


FIG. 3.3 – Schéma de principe du réseau écologique (*Source* : Université de Liège, 2007).

Comme nous pouvons le voir sur la Fig. 3.3, un réseau écologique est un système au niveau du paysage, dont les éléments sont des habitats ou des aires protégées. Ils sont chacun composés d'une zone noyau et d'une zone tampon, et sont reliés entre eux par des couloirs – ou corridors – souvent créés par l'homme.

Après avoir précisé quelques termes et définitions, nous allons maintenant vous présenter le logiciel FRAGSTATS et expliciter le choix des métriques paysagères.

3.3 Le logiciel Fragstats

Pour réaliser cette étude longitudinale de la fragmentation, nous avons utilisé le logiciel FRAGSTATS, développé par deux chercheurs du *Forest Science Department* de l'*Oregon State University* (McGarigal et Marks, 1994). Ce logiciel très performant permet d'effectuer un grand nombre d'opérations pour mesurer le paysage. À l'origine, FRAGSTATS 2.0 a été mis sur le domaine public en 1995 (McGarigal et Marks, 1994). Depuis, ce logiciel a été largement utilisé par de nombreux scientifiques et plusieurs nouvelles versions ont vu le jour (version actuelle : V. 3.3 du 30-08-2002).

FRAGSTATS permet d'effectuer un grand nombre de mesures au niveau du paysage (*landscape*), de la classe (*class*) et des "taches" (*patches*), en fonction des processus à analyser (diversité, fragmentation, évolution des limites, surface, etc.). Une fois que nous lui avons spécifié l'image à partir de laquelle il doit travailler, ainsi que les indices à calculer, il effectue le travail automatiquement. Cependant, l'utilisation de ce logiciel nécessite un travail précis de sélection des indices, étant donné que certains de ceux-ci sont fortement corrélés. En effet, il est possible d'effectuer une multitude de mesures avec les indices de FRAGSTATS, mais celles-ci risquent de nous apporter, à chaque fois, la même information si le travail de sélection n'est pas réalisé correctement. En outre, les images classifiées que nous analysons ne peuvent contenir de patchs superposés et aucune classe ne peut avoir de valeur nulle (McGarigal et Marks, 1994).

3.4 Choix des indices

Les différents indices proposés par FRAGSTATS se déclinent en plusieurs familles de mesures :

- mesures de surface (percent of landscape, largest patch index, etc.)
- mesures de forme (shape index, fractal dimension, mean shape index, etc.)
- mesures de périmètre (edge contrast index, edge density, etc.)
- mesures de diversité (Shannon's diversity index, patch richness, etc.)
- mesures de densité (patch density, mean patch size, etc.)
- mesures de noyaux (core area index, core area density, mean core area per patch, etc.)
- mesures de contagion, de diffusion (contagion index, etc.)

Pour étudier l'évolution de la fragmentation du paysage et, en particulier, la fragmentation de l'habitat des glossines, il nous a semblé important d'obtenir des informations sur l'évolution de la diversité du paysage, du nombre de patchs de la classe forêt dense et de leur forme. C'est pourquoi nous avons choisi d'étudier l'évolution temporelle des indices suivants : le SHDI (*SHannon's Diversity Index*) au niveau du paysage, le PLAND (*Percentage of LANDscape*) pour la classe forêt, le NP (*Number of Patches*) pour la classe forêt également et le SHAPE (*SHAPE index*) au niveau des patchs de cette classe.

3.4.1 Le « *Shannon's diversity index* » (SHDI)

Tout d'abord, nous voudrions obtenir une première évaluation du degré de fragmentation des différentes classes de notre zone d'étude. L'indice le plus populaire pour mesurer l'hétérogénéité d'un paysage est le *Shannon's diversity index* (SHDI), dérivé de la théorie de l'information de Shannon et Weaver (1949, cité par McGarigal et al., 1994). Sa valeur vaut 0 quand il n'y a qu'un seul patch dans l'image, c'est-à-dire quand il n'y a pas de diversité. Il augmente en fonction de l'accroissement du nombre de patch des différentes classes et/ou si la distribution des patchs des différentes classes devient plus équilibrée. Étant donné qu'il n'est pas borné positivement, cet indice nous permettra surtout de faire des comparaisons entre ses valeurs pour les différentes années.

Sa formule est :

$$SHDI = - \sum_{i=1}^m (P_i \cdot \ln P_i) \quad (3.1)$$

avec $i = 1, \dots, m$ type de patch ou classe ;

P_i = proportion de la surface totale de la zone étudiée,
occupée par la classe i .

3.4.2 Le « *Percent of landscape* » (PLAND)

Les métriques implémentées dans FRAGSTATS sont toujours en rapport avec la superficie ou le périmètre du paysage, d'une classe ou d'un patch. Grâce aux indices paysagers en rapport avec les superficies (comme *Area*, *Class area*, *Total landscape area*, etc.), nous pouvons cerner la composition du paysage mais pas sa configuration. En outre, ces métriques mesurent les superficies en termes absolus (hectares) alors qu'il est souvent souhaitable de mesurer la surface d'une zone en des termes relatifs, comme le pourcentage d'une zone par rapport à l'ensemble de la région étudiée. Cette dernière métrique est appelée « *percent of landscape* » (PLAND).

Sa formule est la suivante :

$$PLAND = P_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} (100) \quad (3.2)$$

avec $i = 1, \dots, m$ type de patch ou classe ;
 $j = 1, \dots, n$ patches ;
 a_{ij} = surface du patch ij (m^2) ;
 A = Total landscape area (m^2).

P_i tend vers 0 quand la classe, pour laquelle on l'a mesuré, devient rare au sein de la zone étudiée.
 P_i tend vers 100 quand l'ensemble du paysage est occupé par la classe d'intérêt. Cet indice, simple à comprendre, va nous permettre de suivre l'évolution des superficies de la classe forêt, entre 1986 et 2001.

3.4.3 Le nombre de patches de la classe forêt (NP)

L'évolution des superficies de la classe forêt, étudiée avec l'indice précédent, nous offre la possibilité de mesurer des pertes globales d'habitat, mais sans nous renseigner sur le degré de fragmentation de cette classe. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi de calculer le « *Number of patches* » (NP) de la classe forêt. Cet indice est un bon complément aux autres indicateurs proposés précédemment, puisqu'il va permettre d'apprécier l'uniformité ou la fragmentation de cette classe. Le NP est simplement une addition de tous les patches d'une classe.

3.4.4 Le « *Shape index* » (SHAPE)

Grâce aux deux indices précédents, nous récolterons des informations sur le degré de fragmentation du paysage et de la classe forêt. Cependant, dans l'optique d'une mise en relation de nos résultats avec une étude écologique de l'habitat des glossines, nous voudrions en savoir un peu plus sur les patches de cette classe.

Selon Graham et Blake (2001), un des principaux *challenge* dans l'étude de la fragmentation des habitats est – justement – de déterminer l'influence de la qualité des patches sur leur utilisation par les animaux. D'après ces auteurs, peu d'études ont examiné simultanément les effets des caractéristiques des patches (surface, forme, structure de la végétation) et de la fragmentation des paysages sur l'abondance des communautés animales vivant au sein de ceux-ci. En général, les plus grands patches sont les plus riches en diversité spécifique et en nombre total d'individus (cf. théorie de la biogéographie insulaire¹). Cependant, seuls les patches suffisamment grands développent des conditions intérieures suffisantes pour abriter des espèces animales. En dessous d'une taille critique, la surface du patch peut ne pas être suffisante pour permettre la survie de certaines espèces qui étaient présentes dans le milieu avant sa fragmentation. Des extinctions locales peuvent alors se produire. La taille et la forme des patches affectent aussi l'abondance relative entre la zone périphérique (zone tampon) et la zone intérieure (noyau).

Dans le cadre de notre étude et de la lutte contre la trypanosomiase, la forme des patches peut donc avoir une forte influence, notamment sur la viabilité des populations de glossines. En effet,

¹D'après le modèle de biogéographie insulaire de Mx Arthur et Wilson, le nombre d'espèces présentes sur une île augmente de façon exponentielle avec l'aire de l'île.

quand le patch possède un périmètre très irrégulier et/ou une surface très allongée, le diamètre de la zone de viabilité de la glossine tend à diminuer (voir Fig. 3.4). D'un autre côté, si les zones rurales (habitat, culture, élevage, etc.) sont adjacentes au périmètre du patch, les possibilités de contact entre les tsé-tsé et le bétail ou les hommes sont considérablement augmentées. Finalement, nous ne savons que très peu de choses sur la forme et la taille minimum que devrait avoir un patch de forêt dense, pour qu'une population de mouches tsé-tsé puisse s'y abriter et s'y reproduire. Cette question, fondamentale pour la lutte contre la trypanosomiase, pourrait s'inscrire dans le prolongement de notre étude.

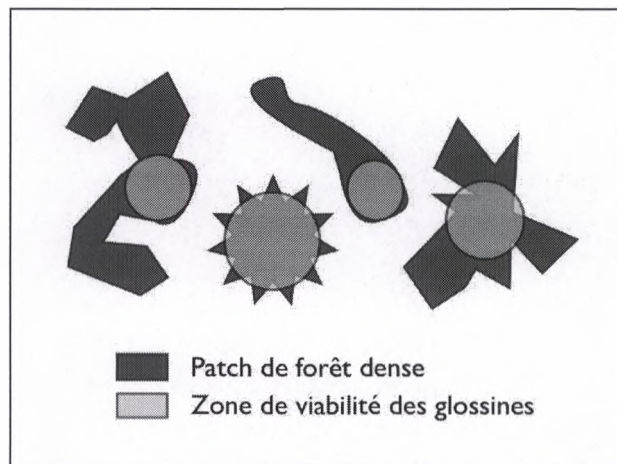


FIG. 3.4 – Différentes formes de patches de forêt dense et zone de viabilité des glossines.

Nous avons donc sélectionné un des indices pouvant nous renseigner sur la forme des patches de la classe forêt, le « *Shape index* » (SHAPE). Cet indice se mesure au niveau d'un patch et est une mesure de sa forme. Il vaut 1 quand le patch a une forme circulaire (en format vectoriel) ou carrée (en format raster) et il augmente sans limite, en fonction de l'irrégularité de son périmètre. Selon Forman et Godron (1986), le *Shape Index* est largement utilisable dans le cadre des recherches en écologie du paysage.

Sa formule est un rapport entre le périmètre du patch et sa superficie :

$$SHAPE = \frac{\frac{1}{4}P_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}} \quad (3.3)$$

avec P_{ij} = périmètre du patch ij (m) ;
 a_{ij} = surface du patch ij (m²).

3.5 Définition de la zone tampon

Une fois les indices définis, nous avons décidé de limiter la zone au sein de laquelle nous allions les calculer.

Plusieurs raisons ont justifié ce choix. Premièrement, une standardisation de la zone étudiée permet d'effectuer une comparaison temporelle des indices calculés pour chacune des années (1986, 1991, 1999 et 2001). Deuxièmement, pour mieux répondre aux objectifs de cette étude, nous avons voulu nous affranchir de l'influence de la réserve naturelle, engendrée par sa taille. Enfin, il était nécessaire de réduire notre zone d'étude à la plus petite zone couverte par la trace des satellites *SPOT*. Comme spécifié précédemment, nous avons décidé de ne pas intégrer l'image de 1996 dans notre étude longitudinale de la fragmentation du paysage (cf. section 2.4, p. 27). Nous avons donc appliqué le masque "Hors-zone" de 1999 à toutes les classifications des autres années. En outre, nous avons exclu la classe "*Large water bodies*" pour le calcul des indices au niveau du paysage.

De cette manière, nous avons pu quantifier et qualifier l'état de fragmentation de l'habitat des glossines au sein de la zone tampon à l'aide des indices paysagers. C'est ce que nous allons voir dans la prochaine section.

3.6 Résultats

3.6.1 Étude de l'évolution des indices de fragmentation

Nous avons calculé le SHDI pour chacune des années considérées, en excluant la classe "*Large water bodies*". Ces valeurs devraient nous fournir une indication sur l'évolution temporelle du degré d'hétérogénéité du paysage.

Comme nous pouvons le voir sur la Fig. 3.5 (p. 40), le paysage est assez hétérogène, puisque les valeurs du SHDI sont supérieures à 0, mais cette hétérogénéité n'évolue pratiquement pas entre 1986 et 2001. Grâce à ce graphique, nous pouvons juste exprimer que la distribution des classes en 1999 est légèrement plus homogène que pour les autres années. D'ailleurs, nous pouvions déjà faire ce constat en observant attentivement la classification pour cette année-là (voir Fig. B.5, p. 67). Ce premier indice ne nous donne donc pas beaucoup d'indication sur l'évolution temporelle de la fragmentation du paysage. Regardons comment évolue le pourcentage de forêt dense par rapport à la superficie de l'ensemble du paysage.

L'évolution temporelle du PLAND nous donne beaucoup plus d'informations que celle du SHDI. En effet, nous apprenons grâce à cet indice, qu'il y avait environ 20 % de forêt dense au sein de la zone tampon en 1986, alors qu'en 2001, il n'y en avait plus que 8 % ! Il y a donc eu, entre ces deux années, une importante perte d'habitat pour les glossines (-60 %). Nous avons à présent une mesure des pertes globales d'habitat, mais qu'en est-il du degré de fragmentation de cette classe ?

Entre 1986 et 1991, le nombre de patchs passe de 3669 à 5284 (voir Fig. 3.7, p. 41). Il y a donc clairement eu une augmentation de la fragmentation des habitats de la glossine entre ces deux années. Par contre, entre 1991 et 2001, la fragmentation semble diminuer puisque le nombre de

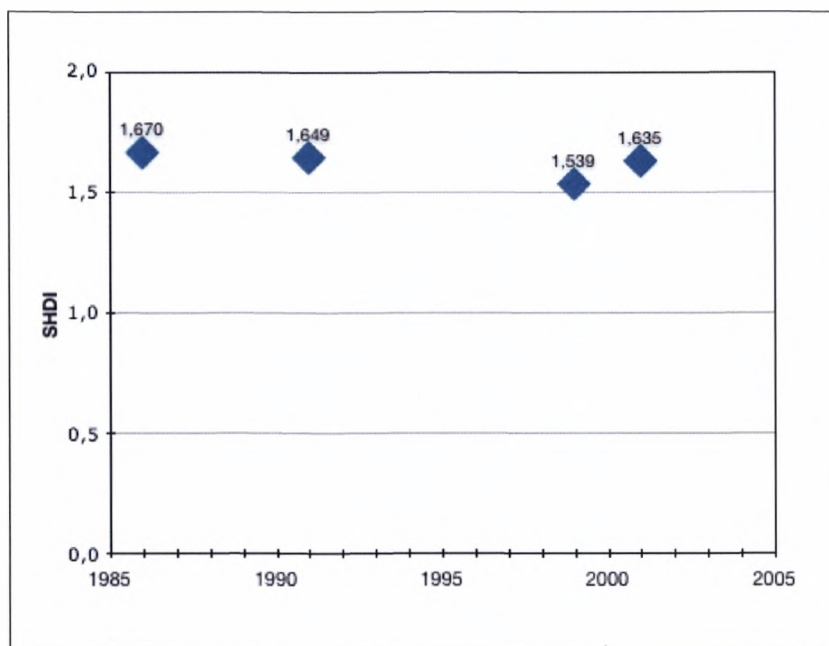


FIG. 3.5 – Évolution temporelle du *Shannon's diversity index* (SHDI).

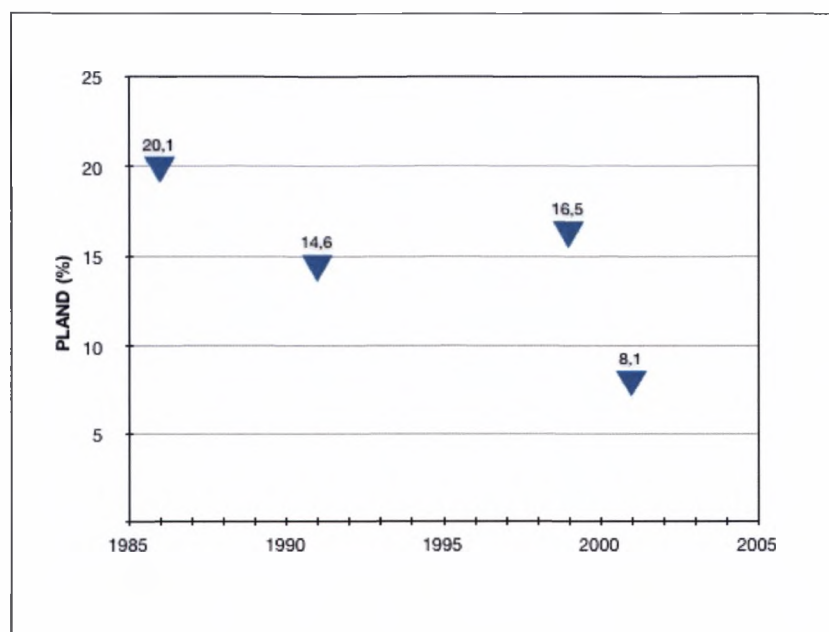


FIG. 3.6 – Évolution temporelle du *Percent of landscape* (PLAND).

patches passe à 5053, en 1999, et à 4262, en 2001. Selon nous, il n'en est rien ! En effet, nous pensons que la diminution du nombre de patches est, au contraire, une preuve supplémentaire de la perte d'habitat des glossines, étant donné la forte diminution de la superficie de la classe forêt.

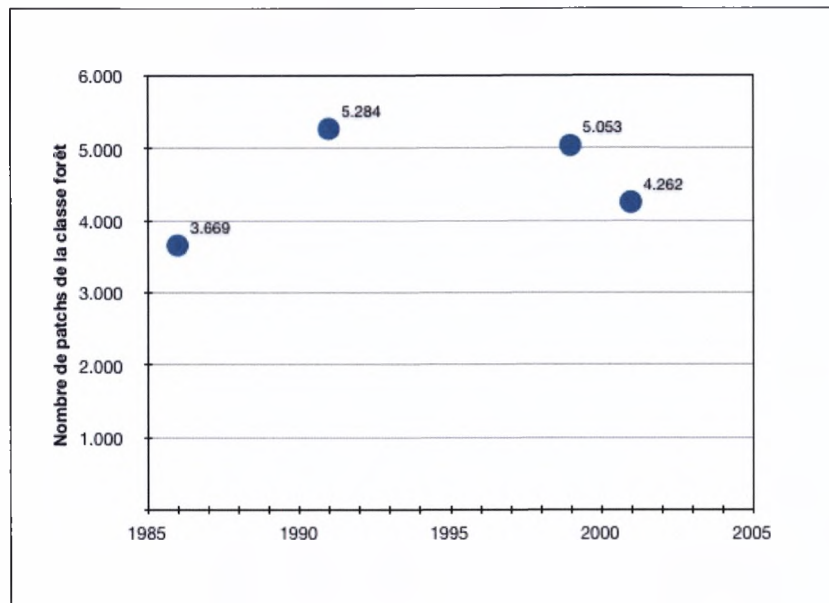


FIG. 3.7 – Évolution temporelle du nombre de patches de la classe forêt (NP).

Ce processus se passe en plusieurs étapes (voir Fig. 3.8). Premièrement, des trouées apparaissent au sein de la forêt dense en raison de la pression anthropique sur l'environnement (cf. section 1.2.1.3, p. 6). Cela engendre, simultanément, un début de fragmentation et une perte d'habitat. Puis, les trouées deviennent de plus en plus grandes et nombreuses, jusqu'au moment où l'habitat original est segmenté en une série de petits patches interconnectés. À ce moment-là, nous sommes en présence d'un réseau écologique tel que nous l'avons décrit à la section 3.2 (p. 34). Enfin, le défrichement de la zone devient trop important et les patches de forêt dense se déconnectent les uns des autres. Lors de cette dernière phase, la perte de surface est considérable. À un point tel que le nombre de patches diminue. C'est ce que nous observons, entre 1991 et 2001, sur la Fig. 3.7.

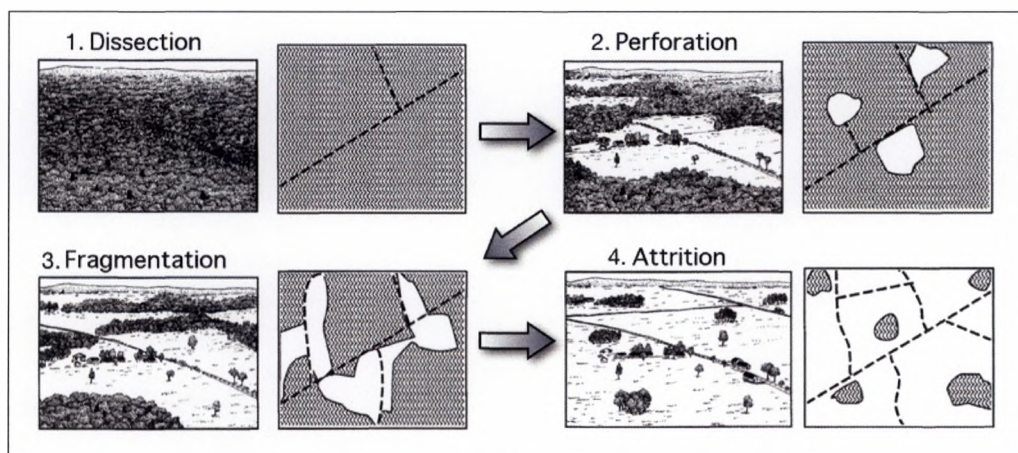


FIG. 3.8 – Processus de perte d'habitat et de fragmentation dans la zone tampon.

La fragmentation de la classe forêt est donc de plus en plus importante au sein de la zone tampon et au fur et à mesure que les années avancent. Néanmoins, comme expliqué précédemment, nous voudrions en savoir un peu plus sur les patchs de cette classe dans l'optique d'une mise en relation de nos résultats avec une étude écologique de l'habitat des glossines. C'est la raison pour laquelle nous avons sélectionné le *Shape Index* (cf. section 3.4.4, p. 37).

Pour ne pas avoir à choisir un patch en particulier, à partir duquel nous calculerions cet indice, nous avons décidé de calculer le *Shape Index* pour l'ensemble des patchs de la classe forêt. Nous avons ensuite sélectionné les 5 patchs possédant les *Shape Index* les plus élevés, pour chacune des années, et nous avons fait un graphe de ces résultats.

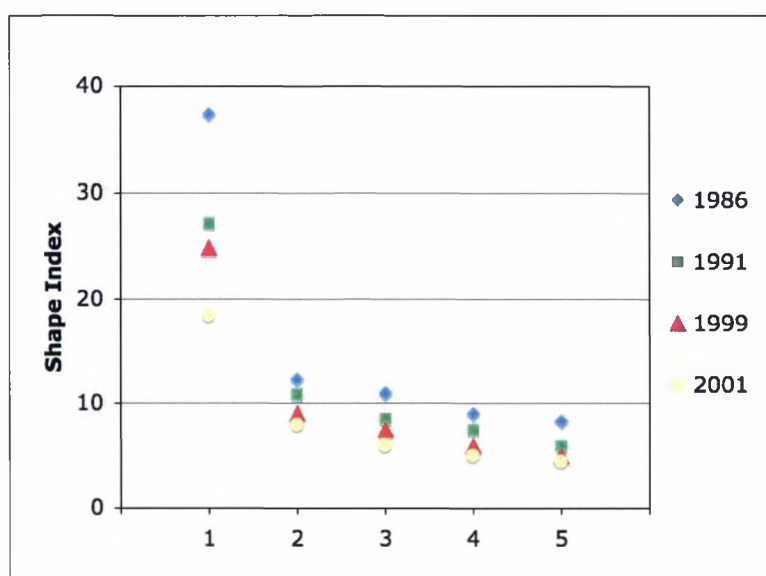


FIG. 3.9 – Les cinq valeurs les plus importantes du *Shape Index* (SHAPE), pour chacune des années

Au plus le *Shape Index* tend vers 1, au plus le patch est compact et sa forme est régulière. Sur la Fig. 3.9, nous remarquons que les patchs sont de plus en plus réguliers et compacts au fur et à mesure que les années avancent.

Cette dernière constatation conforte encore l'idée selon laquelle la fragmentation de la classe forêt, et donc de l'habitat des glossines, est de plus en plus importante d'année en année.

3.6.2 Vérification de l'hypothèse

À présent, nous voudrions confirmer ou infirmer l'hypothèse selon laquelle la taille des patchs d'habitat des glossines diminue lorsqu'on s'éloigne de la réserve naturelle et que l'on se rapproche des zones rurales habitées.

Pour cela, nous avons créé cinq "parcelles-échantillons²", de forme carrée et positionnée le long d'un transect ouest-est. Ensuite, nous avons calculé un ensemble de métriques paysagères pour

²Elles sont numérotées de T1 à T5, d'ouest en est, sur la Fig. 3.10 (p. 43)

chacune d'elles. La localisation du transect a été sélectionnée consciencieusement. En effet, comme nous pouvons le voir sur la Fig. 3.10, celui-ci est borné à l'ouest par la limite de la réserve naturelle, et est borné à l'est par les zones rurales (cultures, élevages, habitats, etc.). De cette manière, nous pensons pouvoir évaluer correctement l'évolution spatiale d'ouest en est de la fragmentation et, ainsi, vérifier l'hypothèse.

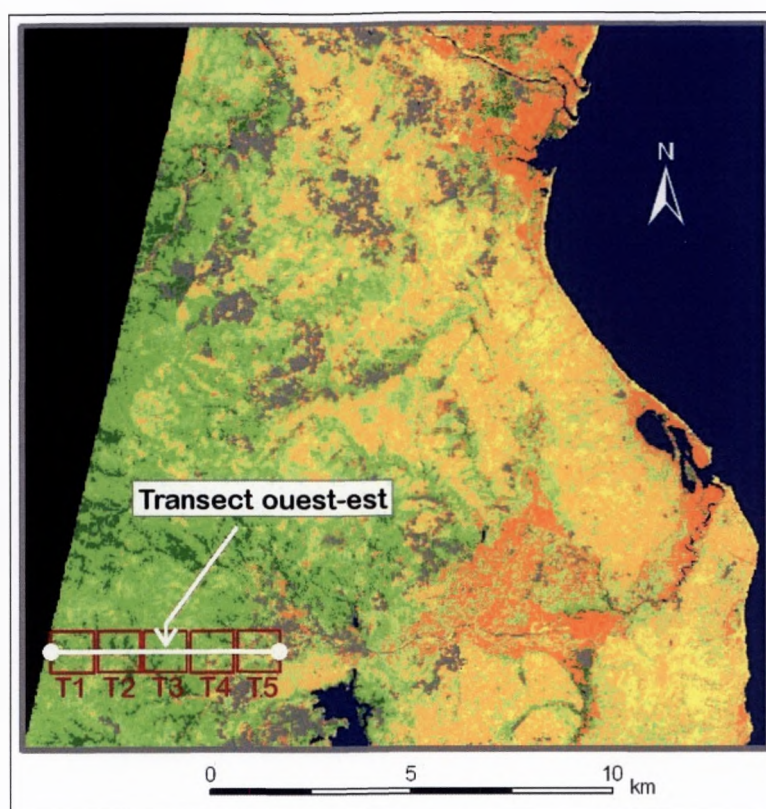


FIG. 3.10 – Localisation du transect ouest-est au sein de la zone tampon. La limite de la réserve naturelle se trouve à l'ouest de ce transect. Les zones habitées et cultivées se trouvent à l'est. Les cinq "parcelles-échantillons" sont numérotées de T1 à T5, d'ouest en est.

Les parcelles ont, chacune, une superficie de 100 ha et sont espacées les unes des autres d'environ 100 m. Dans le cadre de ce mémoire, nous avons décidé de choisir la taille des parcelles visuellement, en fonction de critères tels que : la présence de forêt dense continue en 1986 et la présence de forêt dense très fragmentée en 2001. Même si nous avons fait un choix relativement arbitraire, nous sommes conscients que la plupart des indices de fragmentation varient en fonction de l'échelle d'analyse (Pfister, 2004, p. 6). En dessous d'une échelle "idéale", les indices pourraient ne pas être sensibles au phénomène de fragmentation. A contrario, si la taille des parcelles était trop importante, nous perdriions l'intérêt d'étudier le phénomène à une plus petite échelle. Dès lors, dans le cadre d'une recherche plus approfondie, il serait intéressant de tester plusieurs valeurs de taille des parcelles et d'analyser la sensibilité de ce paramètre sur le calcul des indices.

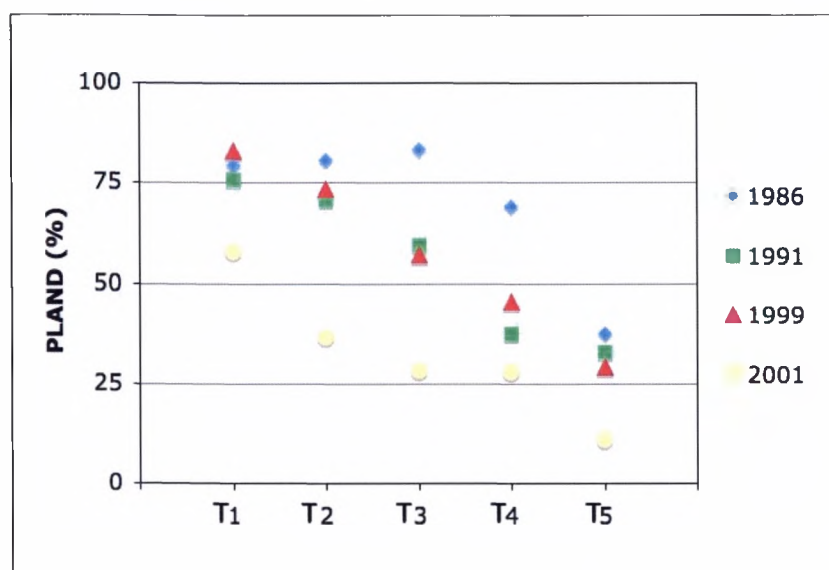


FIG. 3.11 – Variation spatiale du *Percent of landscape* (PLAND), le long du transect ouest-est.

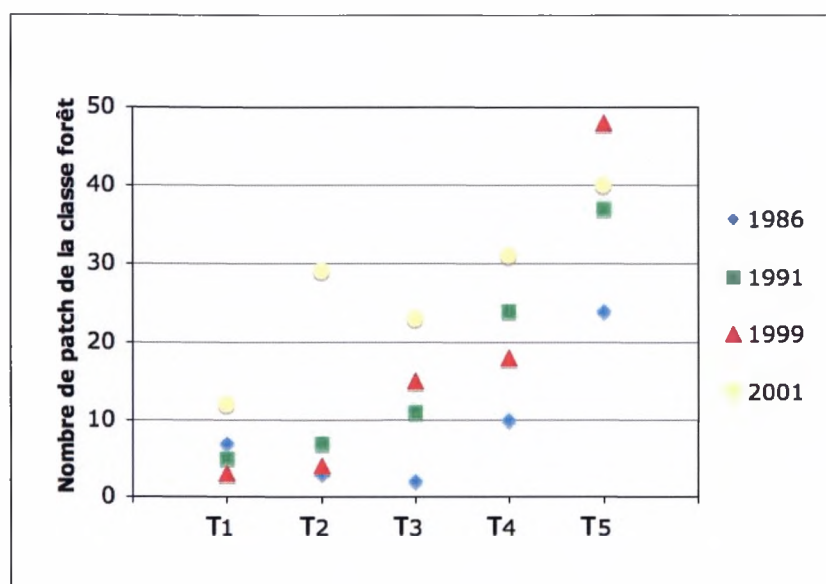


FIG. 3.12 – Variation spatiale du nombre de patchs de la classe forêt (NP), le long du transect ouest-est.

Nous avons commencé par calculer le PLAND de la classe forêt pour les cinq parcelles-échantillons de chacune des années. Dans la section précédente, nous avons constaté une évolution temporelle fortement négative de cet indice. À présent, nous pouvons constater une variation spatiale d'ouest en est tout aussi importante ! En effet, en 1986, le pourcentage de la classe forêt était de 79 % au sein de la parcelle T1, et de 38 % au sein de la parcelle T5 (voir Fig. 3.11). De plus, le nombre de patchs de forêt dense augmente considérablement entre la parcelle T1 et la parcelle T5 (voir Fig. 3.12). Autrement dit, au plus nous nous rapprochons des zones habitées et cultivées, au plus

le pourcentage de forêt dense est faible et le nombre de patchs élevés. Pour 1991, 1999 et 2001, nous pouvons faire le même constat, tant pour le PLAND que pour le NP. La fragmentation et les pertes d'habitat des glossines sont donc de plus en plus importantes au plus on se rapproche des zones rurales. Par conséquent, nous pouvons confirmer notre hypothèse puisque l'augmentation du nombre de patchs est fortement corrélée à leur diminution de taille.

En outre, ces deux graphes présentent une certaine variabilité des indices. Cette variabilité était prévisible puisque nous sommes en présence d'un phénomène naturel. Néanmoins, nous pensons que celle-ci est accentuée en raison de l'influence non négligeable des erreurs de classifications.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'évolution temporelle et spatiale de la fragmentation des habitats de la mouche tsé-tsé, au sein de la zone tampon et à l'aide de métriques paysagères.

Nous avons tout d'abord précisé quelques termes et définitions et présenté le logiciel FRAGSTATS. Ensuite, nous avons explicité le choix des indices, défini la zone tampon et détaillé l'évolution temporelle de nos résultats. Enfin, nous avons vérifié l'hypothèse selon laquelle la taille des patchs d'habitat des glossines diminue lorsqu'on s'éloigne de la réserve naturelle.

Pour cette étude, nous avons décidé de rassembler les deux classes comportant un couvert forestier $> 50\%$ au sein d'une seule classe, nommée "Forêt dense". En faisant cela, nous considérons que les habitats des glossines sont entièrement inclus dans cette classe. De plus, une zone réduite a été définie pour le calcul des indices, afin de rendre possible une comparabilité des résultats entre les années.

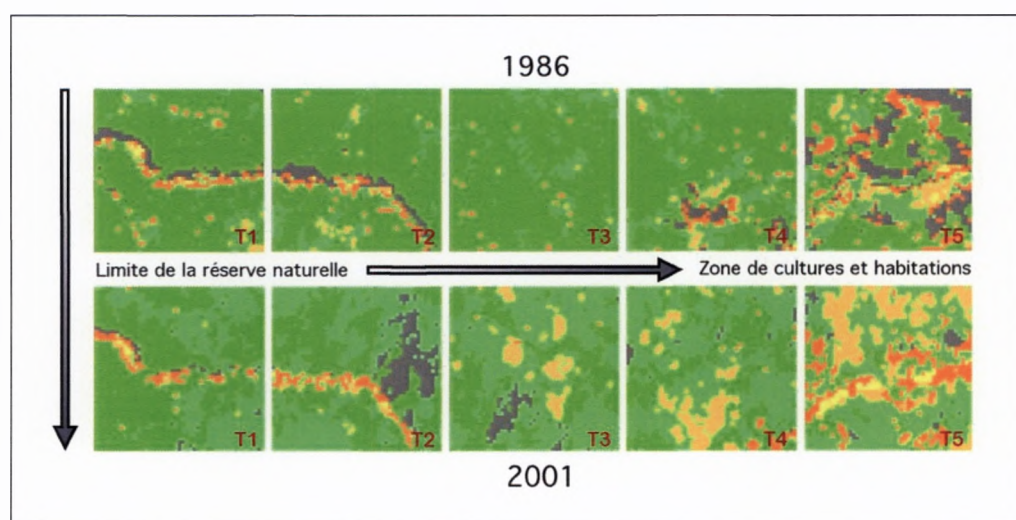


FIG. 3.13 – Évolution spatiale (à l'horizontale) et temporelle (à la verticale) de la fragmentation de la classe "forêt", le long du transect ouest-est. Les deux classes de forêt avec un couvert $> 50\%$ ont été rassemblées au sein d'une seule classe "forêt". De cette manière, nous considérons que les habitats des glossines sont entièrement inclus dans cette classe.

Suite à cette étude, nous sommes clairement arrivés à la conclusion suivante. Entre 1981 et 2001, la dégradation des habitats de la mouche tsé-tsé s'est considérablement amplifiée au sein de la zone tampon. Nous avons pu constater que le pourcentage de forêt dense diminuait fortement (-60 %) et que le nombre de patches augmentait substantiellement (+14 %). De plus, lors de la vérification de notre hypothèse, nous avons pu démontrer que cette tendance à la dégradation est également en application le long d'un transect ouest-est au sein de la zone tampon ! Nous avons constaté, en moyenne, une diminution du pourcentage de forêt dense de ± 64 % entre la parcelle T1 et la parcelle T5 et une augmentation du nombre de patches de plus de 700 %.

Pour visualiser cet effet spatial et temporel en parallèle, nous avons construit la Fig. 3.13 (p. 45). Celle-ci est bon résumé de notre étude de la fragmentation des habitats de glossines puisque nous pouvons y observer, en même temps, les variations spatiales (à l'horizontale) et temporelles (à la verticale) des structures paysagères.

Grâce à ce chapitre, nous avons rempli l'ensemble des objectifs que nous nous étions fixés, à savoir « calculer une série de métriques paysagères pour chaque image classifiée et étudier leur évolution temporelle au sein de la zone tampon » et « vérifier l'hypothèse selon laquelle la taille des patches d'habitat de la mouche tsé-tsé diminue lorsqu'on s'éloigne de la réserve naturelle ».

Dans le prochain chapitre, nous allons réaliser une discussion critique des différentes étapes de cette étude et nous allons discuter des améliorations possibles.

Discussion critique, améliorations et conclusion

4.1 Discussion critique

Dans toute démarche scientifique, il convient de s'interroger sur les méthodes et procédures utilisées. Nous allons donc réaliser une discussion critique de notre travail, en essayant de prendre un maximum de recul par rapport à nos démarches. Celle-ci nous donnera l'occasion de faire la synthèse des limites et des améliorations possibles.

En premier lieu, nous sollicitons l'attention de l'utilisateur final des documents produits. Nous voudrions lui demander de garder constamment à l'esprit l'ensemble des incertitudes liées à toute procédure de classification d'images satellites. En effet, outre les erreurs et distorsions engendrées par les systèmes de mesures et par l'environnement (variation d'altitude, réfraction atmosphérique, etc.), nous pouvons affirmer qu'il existe encore, dans les classifications effectuées, un certain nombre de différences avec la "vérité-terrain". Dans notre étude, nous pensons que ces erreurs potentielles proviennent principalement des choix de nos zones d'échantillon (aires d'entraînement et zones tests). Par exemple, pour l'image de 1996, ces zones d'échantillon ont été définies à partir de notre interprétation des photographies aériennes de 1995 alors que, dans l'idéal, nous aurions dû utiliser des sources d'informations concomitantes. Cette critique est, d'ailleurs, encore plus justifiée pour les classifications des autres années (1986, 1991, 1999 et 2001) puisque, pour celles-ci, nous avons été contraints d'extrapoler les zones d'échantillon de 1996 (cf. section 2.3.3, p. 25). En conséquence, les choix des zones d'échantillon ont pu engendrer un certain nombre d'erreurs de classification. Néanmoins, pour minimiser ce problème de non-concomitance des dates, nous avons sélectionné, de préférence, des zones d'entraînement ayant peu ou pas changé d'occupation du sol.

Finalement, il convient de relativiser ces imprécisions puisqu'elles sont inhérentes à tout processus de modélisation de la réalité. De plus, le taux d'erreurs de classification a pu être évalué grâce aux matrices de confusion et aux indices de précision (cf. section 2.3.4, p. 25).

Plus grave est l'influence que peuvent avoir les erreurs de classification sur les indices calculés au chapitre 3. En effet, nous apprenons grâce à l'article de Langford et al. (2006) que « [...] différentes classifications, possédant des indices de précision similaires, peuvent générer des valeurs d'indices paysagers nettement différentes ». Les conclusions de cet article reviennent donc à remettre totalement en question la démarche adoptée dans cette étude pour qualifier et quantifier la fragmentation des paysages ! Pour nous rassurer, Langford et al. (2006) proposent de quantifier les erreurs sur les métriques elles-mêmes. Cette démarche supplémentaire devrait, en effet, donner un peu plus de poids à l'interprétation des indices et aux conclusions que l'on pourrait en tirer.

En outre, ces auteurs considèrent que l'application d'un filtre modal pour lisser les classifications peut provoquer une sous-estimation de la fragmentation. C'est, d'ailleurs, la raison pour laquelle nous n'avons pas appliqué de filtre modal à nos classifications (cf. section 2.3.2, p. 23).

Une autre critique que nous pourrions faire concerne le choix arbitraire de la taille des parcelles, localisées le long du transect ouest-est (cf. section 3.6.2, p. 42). Selon Pfister (2004, p. 6), la plupart des indices de fragmentation varient en fonction de l'échelle d'analyse. Nous aurions donc pu, comme dans sa thèse, tester plusieurs valeurs de taille des parcelles et analyser la sensibilité de ce paramètre sur les valeurs des métriques (Pfister, 2004). Néanmoins, même avec ce choix arbitraire, nous avons pu démontrer que la fragmentation et les pertes d'habitat augmentent considérablement au sein de la zone tampon, tant spatialement d'ouest en est, que temporellement entre 1986 et 2001 (voir chapitre 3).

Enfin, nous avons également fait un choix arbitraire concernant la localisation du transect ouest-est. Si nous l'avions placé à un autre endroit de la zone tampon respectant les mêmes conditions, aurions-nous obtenu des résultats similaires ? C'est une question qui restera malheureusement sans réponse tant que le calcul d'indices n'aura pas été effectué le long d'un transect différent.

4.2 Améliorations

Dans le chapitre 3, nous avons fait de choix de calculer des indices simples, faciles à comprendre et à interpréter. Une amélioration pourrait-être de choisir d'autres indices plus compliqués, comme le *Mean Core Area Index* (MCAI) ou le *Total Core Area* (TCA). Dans cette optique, il serait nécessaire de réaliser une étude écologique approfondie de la zone tampon des patches d'habitat des glossines (voir Fig. 3.3 et Fig. 3.4, respectivement p. 34 et 38). À l'heure actuelle, nous en savons très peu sur les dimensions de cette zone tampon et sur la taille minimum que devrait avoir un patch de forêt dense¹, pour qu'une population de glossines puisse s'y abriter et s'y reproduire. Pourtant, ces informations sont indispensables pour le calcul du MCAI ou du TCA (McGarigal et Marks, 1994).

Nous pourrions également synthétiser l'ensemble des indices sélectionnés et les associer au sein d'une "équation générale de la fragmentation du paysage". Pour cela, il faudrait les standardiser, les pondérer et, finalement, les combiner en créant un indice global de fragmentation. En réunissant des indices au niveau des patches, il serait même possible de créer une carte représentant le degré de fragmentation de la forêt dense pour chacune des années.

De plus, nous pourrions compléter notre étude de la fragmentation par des données traitées à l'aide d'un système d'information géographique (SIG). Par exemple, en construisant des *buffer* autour des villages, des zones de cultures et des axes de communication, nous serions en mesure de réaliser une étude de l'évolution des patches de forêt dense au sein de ces buffers. L'objectif de cette démarche serait d'analyser la connectivité et le degré des interactions entre les classes d'habitat des glossines et celles liées aux activités rurales.

¹avec un couvert forestier > 50 %

Enfin, dès que les données géolocalisées sur la présence ou l'absence de glossines au sein de la zone tampon seront disponibles, il sera possible d'analyser à quelle échelle les relations entre richesses d'espèces et indices paysagers sont les plus significatives et pertinentes.

4.3 Conclusion

Après avoir présenté le contexte de notre étude, réalisé une synthèse bibliographique et précisé les objectifs de notre mémoire dans le chapitre 1, nous avons développé, dans le chapitre 2, le processus de classification des images satellites.

Ensuite, dans le chapitre 3, nous avons calculé un certain nombre de métriques paysagères afin de qualifier et de quantifier la fragmentation de l'habitat des glossines. Nous avons commencé par étudier son évolution temporelle. Puis, dans un deuxième temps, nous avons considéré son évolution spatiale, le long d'un transect ouest-est. Cette dernière démarche nous a permis de confirmer l'hypothèse selon laquelle la taille des patchs d'habitat des glossines diminue lorsqu'on s'éloigne de la réserve naturelle.

Suite à cette étude, nous sommes clairement arrivés à la conclusion suivante. Entre 1981 et 2001, la dégradation des habitats de la mouche tsé-tsé s'est considérablement amplifiée au sein de la zone intermédiaire, située entre la réserve naturelle, à l'ouest, et les zones habitées et cultivées, à l'est. Au sein de notre zone d'étude, nous assistons donc à une réduction de l'interface protectrice entre les habitats humains et les foyers actifs de mouche tsé-tsé. Le parasite engendrant la maladie du sommeil semble donc avoir de beaux jours devant lui ...

Bibliographie

- Ambassade de France en Zambie et au Malawi (2007). [http ://www.ambafrance-zm.org/article.php3?idarticle=499](http://www.ambafrance-zm.org/article.php3?idarticle=499), Date de la dernière visite : 17 juillet 2007.
- Andrén, H. (1994). Effects of habitat fragmentation on birds and mammals in landscapes with different proportions of suitable habitat : a review. *Oikos*, 71 :355–366.
- Aubry, P. (2006). La trypanosomiase humaine africaine ou maladie du sommeil. Lettre d'information continue en médecine tropicale. Disponible online : [http ://medecinetro-picale.free.fr/cours/trypanoafri.htm](http://medecinetro-picale.free.fr/cours/trypanoafri.htm).
- Barrault, C. (2003). La lutte contre l'insécurité alimentaire au malawi, prendre le chemin le moins fréquenté. Le Courrier ACP-UE, (197). Programme sur la sécurité alimentaire, Délégation de l'Union européenne au Malawi, Disponible online : eu-rope.eu.int/comm/development/body/publications/courier/courier197/fr/fr030.pdf.
- Bellefontaine, R., Gaston, A., et Petrucci, Y. (1997). Aménagement des forêts naturelles des zones tropicales sèches. Cahiers FAO : Conservation, 32. Disponible online : [http ://www.fao.org/docrep/W4442F/w4442f06.htm](http://www.fao.org/docrep/W4442F/w4442f06.htm).
- BELSPO (2006). Educative Website - Observing our Planet, TelSat Guide for Satellite Information, a belgian platform on remote sensing. Earth Observation help desk, Federal Science Policy Office (BELSPO). [http ://telsat.belspo.be/bEO/fr/satellites/spot.htm](http://telsat.belspo.be/bEO/fr/satellites/spot.htm), Date de la dernière visite : 4 juillet 2007.
- Bender, D. J., Contreras, T. A., et Fahrig, L. (1998). Habitat loss and population decline : a meta-analysis of the patch size effect. *Ecology*, 79 :517–533.
- Blake, J. G. (1991). Nested subsets and the distribution of birds on isolated woodlots. *Conservation Biology*, 5 :58–66.
- Blouin-Demers, G. (2006). Cours sur la perte d'habitat et la fragmentation, Laboratoire d'herpétologie (écologie comportementale et physiologique), Université d'Ottawa, Ontario, Canada. Disponible online : www.science.uottawa.ca/gblou656/cours-conservation/telecharge-cons/11-fragmentation.pdf, Date de la dernière visite : 5 août 2007.
- Bohn, L. (2002). Climatic variability in Malawi, Economic and financial impacts of natural disasters : an assessment of their effects and options for mitigation : Malawi Country Study, Background Paper, volume 3. International Economic Development Group. London.
- Bourque, J. (2005). Déterminants comportementaux de la répartition spatiale des oiseaux dans les forêts fragmentées. PhD thesis, Faculté de foresterie et de géomatique, Université de Laval. Québec, Canada.
- Bouyer, J. (2006). Écologie des glossines du Mouhoun au Burkina Faso : intérêt pour l'épidémiologie et le contrôle des trypanosomes africains. PhD thesis, Université de Montpellier II, France.

- Bunderson, W. T. et Hayes, I. M. (1995). Agricultural and environmental sustainability in Malawi. In Paper presented at the Conference on sustainable agriculture for Africa. Abidjan, Cote d'Ivoire.
- Caloz, R. et Collet, C. (2001). Traitements numériques d'images de télédétection, volume 3 of Précis de télédétection. Presses de l'Université du Québec. Publié en collaboration avec l'AUF, Agence Universitaire de la Francophonie.
- Challier, A. (1968). La lutte contre les vecteurs de la maladie du sommeil en Afrique occidentale. Cahiers ORSTOM, Série entomologie médicale et parasitologie, 6 :257-264. Médecine tropicale et paludisme : Congrès international, 1968/09/07-15, Téhéran.
- Cheneau, Y. (1994). Discours d'ouverture. In A systematic approach to tsetse and trypanosomiasis control - Approche systématique de la lutte contre la mouche tsé-tsé et la trypanosomiase, number 121 in FAO - Animal Production and Health Papers.
- CIA (2007). World factbook - country profile : Malawi. <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/mi.html>, Date de la dernière visite : le 15 mars 2007.
- Cirad (2006). FragFly - Impact de la fragmentation des paysages sur les glossines et les trypanosomes, Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad). Disponible online : <http://www.cirad.fr/ur/index.php/epidemiologie/themesetprojetsderecherche/projetsrecherche/fragfly>, Disponible online : 3 août 2007.
- Clay, E., Bohn, L., Blanco de Armas, E., Kabambe, S., et Tchale, H. (2003). Malawi and Southern Africa - Climatic variability and economic performance, pages 34-65. Number 7. United Nations Framework Convention on Climate Change. Disponible online : unfccc.int/files/cooperationandsupport/capacitybuilding/application/pdf/wbmalawi.pdf.
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominales scales. Educational and Psychological Measurement, 20(1) :37-46.
- Commission européenne (1999). Programme communautaire d'aide et de sécurité alimentaire, rapport d'activité 1998-99. Commission européenne, Food and Security Network, Programme RESAL. Disponible online : ec.europa.eu/europeaid/projects/resal/Download/report/fact/9899fspmalmozfr.pdf.
- CRDP (2004). La lecture des paysages, Dossier pédagogique préparé par le service culture-éditions-ressources pour l'éducation nationale, Centre Régional de Documentation Pédagogique (CRDP), Auvergne, France. Disponible online : <http://crdp.ac-clermont.fr/crdp/ressources/DossierPeda/LecturePaysages/Index.html>.
- Cuisance, D., Itard, J., Solano, P., Desquesnes, M., Frézil, J. L., et Authié, E. (2003). Typanosomes, Méthodes de lutte. In Editions Tec et Doc and Editions Médicales Internationales. Principales maladies infectieuses et parasitaires du bétail. Europe et Régions chaudes, pages 139-165. La-voisier, Paris, France.
- Dargie, J. (2006). Bulletin d'information sur les glossines et les trypanosomes, volume 29, page 61. Programme de lutte contre la trypanosomose africaine (PLTA), FAO, Rome. Disponible online : <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/a0720f/>.

- Desanker, P., Frost, P. G., Justice, C. O., et Scholes, R. J. (1997). The Miombo Network : Framework for a terrestrial transect study of land-use and land-cover change in the miombo ecosystems of central africa, Conclusions of the miombo network workshop, Zomba, Malawi, December 1995, volume Report 41. International Geosphere-Biosphere Programme.
- Fahrig, L. (1997). Relative effects of habitat loss and fragmentation on population extinction. Journal of Wildlife Management, 61 :603-610.
- Fahrig, L. (2002). Effect of habitat fragmentation on the extinction threshold : a synthesis. Ecological Applications, 12 :346-353.
- FAO (1981). Tropical forest resources assessment project - Forest resources of Tropical Africa, Part II : country brief. FAO, Department of forestry. Disponible online : <http://www.fao.org/docrep/007/ad910e/AD910E16.htm>.
- FAO (1998). Le coût de la trypanosomiase. Focus Magazine. Disponible online : <http://www.fao.org/ag/fr/magazine/spot1.htm>, Date de la dernière visite : le 3 juillet 2007.
- FAO (2002). La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture, volume 34, pages 65-71. FAO, Department of agriculture, Rome.
- FAO (2003). Etude prospective du secteur forestier en Afrique : Rapport sous-régional - Afrique Australe. Forestry sector outlook studies - FOSA/RP/07. FAO, Department of forestry. Disponible online : <http://www.fao.org/docrep/005/Y8672F/Y8672F00.HTM>.
- FAO (2005). Global Forest Resources Assessment 2005, Progress towards sustainable forest management. FAO, Department of forestry, Rome. Disponible online : <http://www.fao.org/docrep/008/a0400e/a0400e00.htm>.
- FAO (2007a). FAO Country Profiles and Mapping Information System - Malawi, Major Farming Systems. <http://www.fao.org/countryprofiles/Maps/MWI/01/fs/index.html>, Date de la dernière visite : 16 juillet 2007.
- FAO (2007b). Programme de lutte contre la Trypanosomiase Africaine (PLTA). <http://www.fao.org/ag/AGInfo/programmes/fr/paat/home.html>, Date de la dernière visite : 4 juillet 2007.
- FAOSTAT (2007). FAO - Department of statistics. <http://faostat.fao.org/>, Date de la dernière visite : 29 juillet 2007.
- Fleshman, M. (2003). Objectifs du millénaire : L'Afrique peine. Afrique Relance, 17(3) :10. Disponible online : <http://www.un.org/french/ecosocdev/geninfo/afrec/vol17no3/173mdgfr.htm>.
- Fond Monétaire International (2007). Malawi : Poverty reduction strategy paper - growth and development strategy. IMF Country Report N° 07/55. Washington D.C., Disponible online : <http://www.imf.org/external/pubs/ft/scr/2007/cr0755.pdf>.
- Forman, R. T. T. (1995). Land mosaics : the ecology of landscapes and regions. Cambridge University Press. 632 p.
- Forman, R. T. T. et Godron, M. (1986). Landscape ecology. John Wiley, New York.

- Graham, C. H. et Blake, J. G. (2001). Influence of patch- and landscape-level factors on bird assemblages in a fragmented tropical landscape. Ecological Applications, 11(6) :1709–1721.
- Hendrickx, G., de la Rocque, S., et Mattioli, R. C. (2004). Long-term Tse-tse and Trypanosomiasis management options in West Africa - PAAT Technical and Scientific Series (FAO). Number 6. FAO, Rome.
- Lambin, E. F. (2004). La Terre sur un fil. Éditions Le Pommier, Paris.
- Langford, W. T., Gergel, S. E., Dietterich, T. G., et Cohen, W. (2006). Map misclassifications can cause large errors in landscape pattern indices : examples from habitat fragmentation. Ecosystems, 9 :474–488.
- Le Rouzic, J. (1948). La prophylaxie agronomique, un moyen de lutte pour l'assainissement des régions infestées. Bulletin médical de l'Afrique occidentale, 5 :177–122.
- Lele, U. et Stone, S. W. (1989). Population pressure, the environment and agricultural intensification : variations on the boserup hypothesis. MADIA Discussion Paper, 4. World Bank, Washington D.C.
- Loquet, M., Coulibaly, H., et Cochet, H. (2003). Synthèse du diagnostic agro-économique au sud du Malawi, stage de terrain. Institut National Agronomique Paris Grignon.
- Loreau, M. (2002). Biodiversity loss and the maintenance of our life-support system. Puits de carbone et biodiversité, 26 :45–54. Disponible online : <http://biology.mcgill.ca/faculty/loreau/>.
- McGarigal, K. et Marks, B. J. (1994). Fragstats - Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure. Logiciel et manuel disponibles online : <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>.
- Mokhtari, N. (2006). Normalisation radiométrique des images satellites du sud du Malawi par l'utilisation de la méthode des invariants radiométriques, Rapport de stage. Laboratoire d'analyse régionale et de télédétection, Département de géographie, Université Catholique de Louvain.
- Moriniere, L., Chimwasa, S., et Weiss, E. (1996). Malawi vulnerability assesment and mapping (VAM) baseline 1996 : A quest for causality. World Food Programme, Government of Malawi and Famine Early Warning Systems, Lilongwe, Malawi. USAID/FEWS, MoAI, Lilongwe, Malawi.
- MSN - Encarta (2007). Microsoft MSN - Encyclopédie Encarta en ligne. <http://fr.encarta.msn.com/Malawi.html>, Date de la dernière visite : 18 juillet 2007.
- National Statistical Office (2004). Malawi - Demographic and health survey. National Statistical Office, Zomba, Malawi. Disponible online : <http://www.nso.malawi.net/>.
- NOAA (1990). Climate and daylight chart for Nkhota Kota, Malawi, NOAA Global Climate Normals 1961-1990. Données disponibles online : <http://www.climate-charts.com/Locations/m/MW67591.html>.
- ONU (2007). Objectifs du Millénaire pour le développement - Rapport 2007. Département des affaires économiques et sociales DAES des Nations Unies. Disponible online : <http://www.un.org/french/millenniumgoals/>.

- Paul, S. (1997). Terminologie de télédétection et photogrammétrie : manuel terminologique didactique de télédétection et photogrammétrie : français-anglais. Conseil international de la langue française. Paris.
- Penchenier, L. et Laveissière, C. (2000). Manuel de lutte contre la maladie du sommeil en Afrique centrale et occidentale, volume 5. Organisation de coordination pour la lutte contre les endémies en Afrique Centrale (OCEAC), Yaoundé, Cameroun.
- Pfister, J. L. (2004). Using landscape metrics to create an index of forest fragmentation for the State of Maryland. PhD thesis, College of graduate education and research, Towson University, Maryland, USA.
- PNUD (1997). Human Development Report 1997, Poverty from a human development perspective. Economica, Paris. Disponible online : <http://hdr.undp.org>.
- PNUD (2005). Human Development Report 2005, International cooperation at a crossroads : Aid, trade and security in an unequal world. Economica, Paris. Disponible online : <http://hdr.undp.org>.
- Pollock, J. (1982). Manuel de lutte contre la mouche tsé-tsé - Biologie, systématique et répartition des tsé-tsé. Organisation des Nations-Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, 1982.
- Pouchin, T. (2001). Cours de télédétection, Chapitre 1, Les caractéristiques des données, l'imagerie satellitaire. <http://tpouchin.club.fr/chapitre1/imagerie.htm>, Date de la dernière visite : 5 juillet 2007.
- Reynolds, L. (2000). FAO Country Profile - Malawi. <http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/-Counprof/Malawi.htm>, Date de la dernière visite : 15 juillet 2007.
- Ricossé, J., Challier, A., Mao, G. L., Albert, J., Legait, J., et Laveissière, C. (1973). La prophylaxie de la trypanosomiase humaine africaine. Médecine d'Afrique Noire, 20(4) :393-400.
- Robbins, C. S. (1979). Effect of forest fragmentation on bird populations, pages 198-212. R. M. DeGraaf et K. E. Evans, éditeurs. Management of north central and north eastern forests for nongame birds, USDA Forest Service, General Technical Report NC-51.
- Rosenzweig, M. L. (1995). Species diversity in space and time. Cambridge University Press.
- Samdup, C. (2006). Le droit à l'alimentation au Malawi, Rapport d'une mission d'observation internationale au Malawi. Droits & Démocratie, Centre International des droits de la personne et du développement démocratique. Disponible online : www.dd-rd.ca/site/PDF/publications/mondialisation/alimentation/alimentationmalawi.pdf.
- Schlaepfer, R. (2006). Cours sur la conservation de la biodiversité biologique, utilisation de métriques paysagères. Laboratoire de systèmes d'information géographique, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Disponible online : <http://la-sig.epfl.ch/enseignement/cours/sigenv/2006/Schlaepfer>.
- Schnell, R. (1976). Introduction à la phytogéographie des pays tropicaux, volume 3 : La flore et la végétation de l'Afrique tropicale. Gauthiers-Villars, Paris.

- Séguis, L. et Puech, C. (1997). Méthode de détermination des invariants radiométriques adaptée au paysage semi-aride de l'Afrique de l'ouest. International Journal of Remote Sensing, 18(2) :255–271.
- Shannon, C. E. et Weaver, W. (1949). The mathematical theory of communication. Urbana IL : University of Illinois Press.
- Spot Image (2007). Spot image catalogue. <http://www.spotimage.fr/>, Date de la dernière visite : 26 juin 2007.
- Swallow, B. (1998). Impacts of trypanosomiasis on African agriculture. International Livestock Research Institute, Nairobi.
- Université de Laval (2006). L'aménagement linguistique et les langues dans le monde. Québec, Canada, <http://www.tlfi.ulaval.ca/AXL/afrique/malawi.htm>, Date de la dernière visite : le 17 juillet 2007.
- Université de Liège (2007). Econet, réseau écologique. <http://www.econet.ulg.ac.be/pbept/pages/reseau-eco.html>, Date de la dernière visite : 5 août 2007.
- Université de Sherbrooke (2007). World perspectives. <http://perspective.usherbrooke.ca/>, Date de la dernière visite : le 2 juillet 2007.
- Van den Bossche, P. (2001). Some general aspects of the distribution and epidemiology of bovine trypanosomiasis in southern Africa. International Journal for Parasitology, 31 :592–598.
- Van den Bossche, P., Deken, R. D., et Geerts, S. (2003). Trypanosomiasis in southern Africa. old challenges - new threats. Newsletter on Integrated Control of Pathogenic Trypanosomes and their Vectors, (7) :11–13.
- van Dorp, D. et Opdam, P. F. M. (1987). Effect of patch size, isolation and regional abundance in forest bird communities. Landscape Ecology, 1 :59–73.
- Walker, S. M. et Desanker, P. V. (2004). The impact of land use on soil carbon in Miombo woodlands of Malawi. Forest Ecology and management, 203 :345–360. Disponible en ligne : edcintl.cr.usgs.gov/SEMSOC/uploads/documents/carbon-in-soils/impact-of-land-use-on-soil-carbon.pdf.
- Wéry, M. (1995). Protozoologie médicale, chapitre 10 - Trypanosoma brucei et les Salivaria, les trypanosomiasis africaines. Édition De Boeck.
- Wikipédia (2007). <http://fr.wikipedia.org/>, Date de la dernière visite : 17 juillet 2007.
- World Food Program (2002). Southern Africa Humanitarian and Disaster - GIS Library, Country dataset and geographical information. Date de la dernière visite : 8 août 2007.
- World Food Program (2006). Development project - Malawi Report. World Food Program. Disponible en ligne : <http://www.wfp.org>.
- WRI (1993). World Resources Institute - Earthtrends : The environmental information portal, Long-term average covering 1950 to 1993. <http://earthtrends.wri.org/text/forests-grasslands-drylands/country-profile-113.html>, Date de la dernière visite : 18 juillet 2007.
- Wu, J., Huang, J., Han, X., Xie, Z., et Gao, X. (2003). Three-gorges dam - experiment in habitat fragmentation ? Science, 300 :1239–1240.

Table des figures

1.1	Distribution moyenne mensuelle des précipitations pour trois stations météorologiques, représentatives du climat du Malawi.	5
1.2	Types d'écosystèmes, 1992-93	7
1.3	Évolution de la population entre 1961 et 2007.	10
1.4	Système de production agricole.	11
1.5	Transmission de la trypanosomiasse à l'homme	14
2.1	Légende des classes pour les images satellites <i>SPOT</i>	21
2.2	Évolution des classes d'occupation du sol	29
3.1	Distinction entre la perte d'habitat et la fragmentation de ceux-ci.	33
3.2	Processus de fragmentation des habitats.	34
3.3	Schéma de principe du réseau écologique.	34
3.4	Différentes formes de patchs de forêt dense et zone de viabilité des glossines.	38
3.5	Évolution temporelle du <i>Shannon's diversity index</i> (SHDI).	40
3.6	Évolution temporelle du <i>Percent of landscape</i> (PLAND).	40
3.7	Évolution temporelle du nombre de patchs de la classe forêt (NP).	41
3.8	Processus de perte d'habitat et de fragmentation dans la zone tampon.	41
3.9	Les cinq valeurs les plus importantes du <i>Shape Index</i> (SHAPE), pour chacune des années	42
3.10	Localisation du transect ouest-est au sein de la zone tampon.	43
3.11	Variation spatiale du <i>Percent of landscape</i> (PLAND), le long du transect ouest-est.	44
3.12	Variation spatiale du nombre de patchs de la classe forêt (NP), le long du transect ouest-est.	44
3.13	Évolution spatiale et temporelle de la fragmentation de la classe "forêt", le long du transect ouest-est.	45
A.1	Localisation du Malawi et villes principales.	58
A.2	Localisation de la zone d'étude.	59
A.3	Précipitations annuelles moyennes.	60
A.4	Images satellites de 1986, 1991, 1996 et 1999.	61
A.5	Image satellite de 2001)	61
A.6	Exemple du codage des trois canaux d'une image <i>SPOT</i>	62
B.1	Légende des classes pour les images satellites <i>SPOT</i>	63
B.2	Classification de l'image <i>SPOT</i> de 1986	64
B.3	Classification de l'image <i>SPOT</i> de 1991	65
B.4	Classification de l'image <i>SPOT</i> de 1996	66
B.5	Classification de l'image <i>SPOT</i> de 1999	67
B.6	Classification de l'image <i>SPOT</i> de 2001	68

Liste des tableaux

1.1	Résolution spatiale et spectrale des satellites <i>SPOT</i> 1, 2 et 3.	19
1.2	Caractéristiques des données.	20
2.1	Précision globale et statistique Kappa des classifications	27
B.1	Exemple d'une matrice de confusion	69

Cartes et images satellites

A.1 Localisation du Malawi

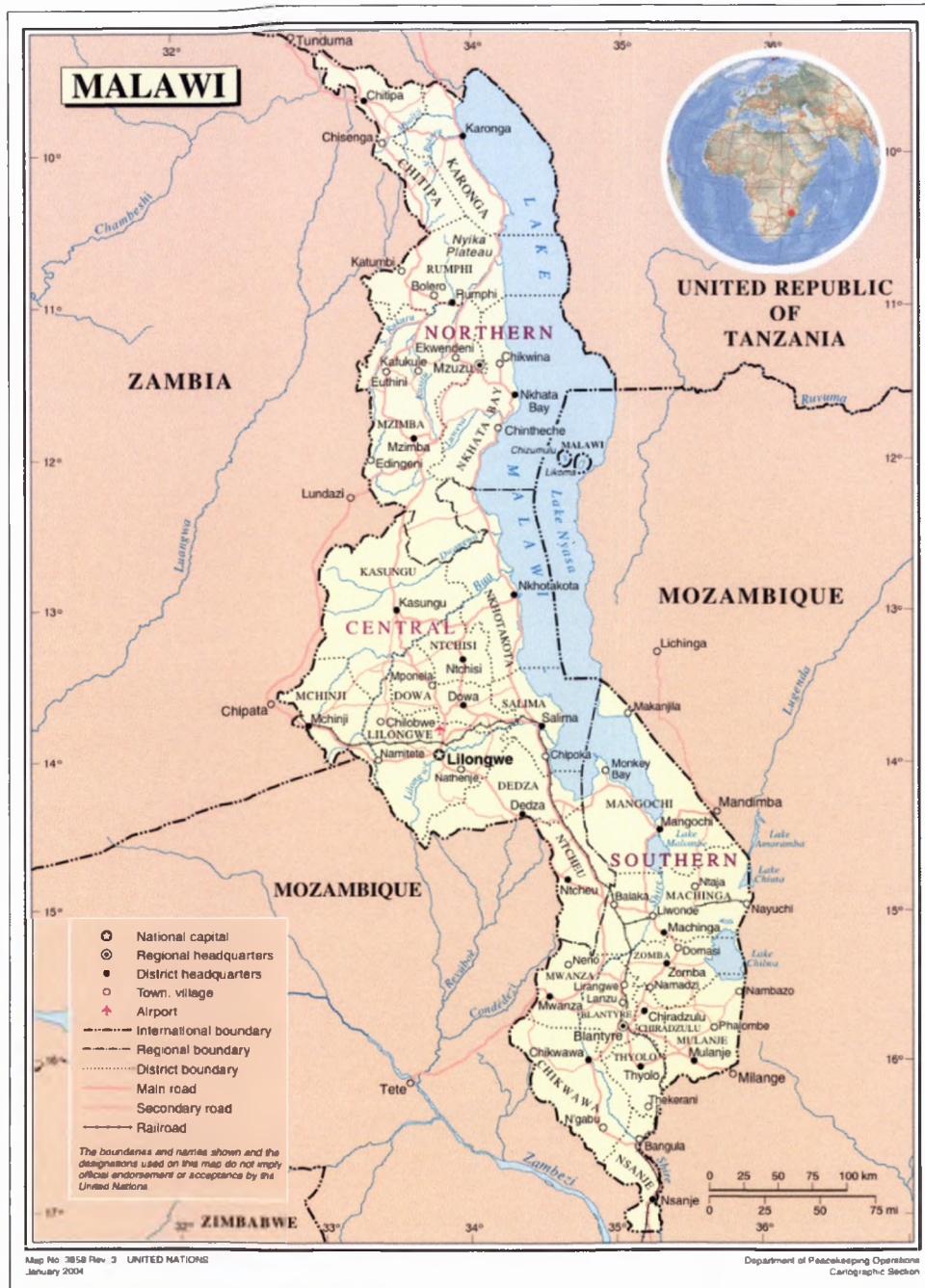


FIG. A.1 – Localisation du Malawi et villes principales.

A.2 Localisation de la zone d'étude

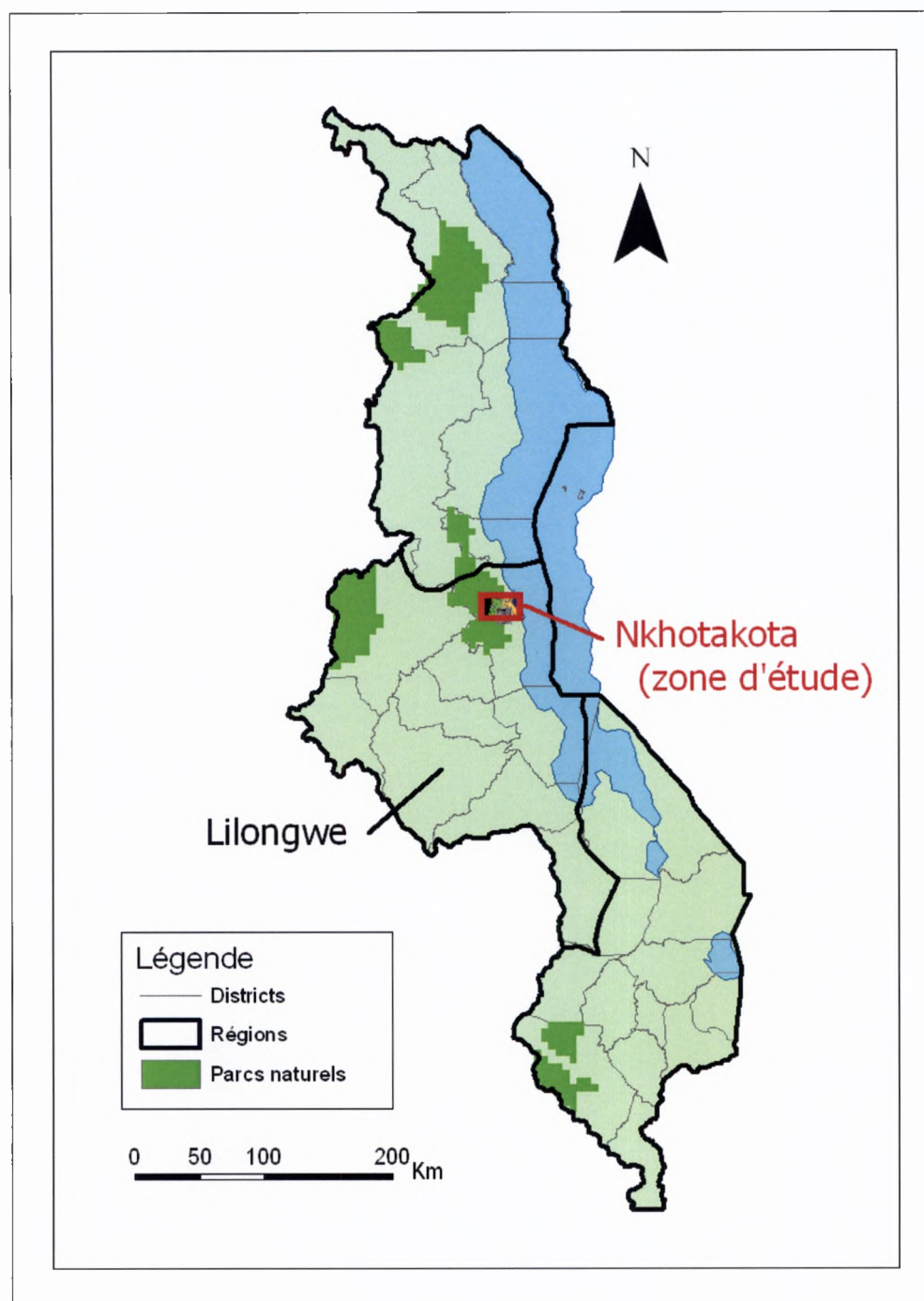


FIG. A.2 – Localisation de la zone d'étude. (Source : World Food Program, 2002)

A.3 Précipitations annuelles moyennes

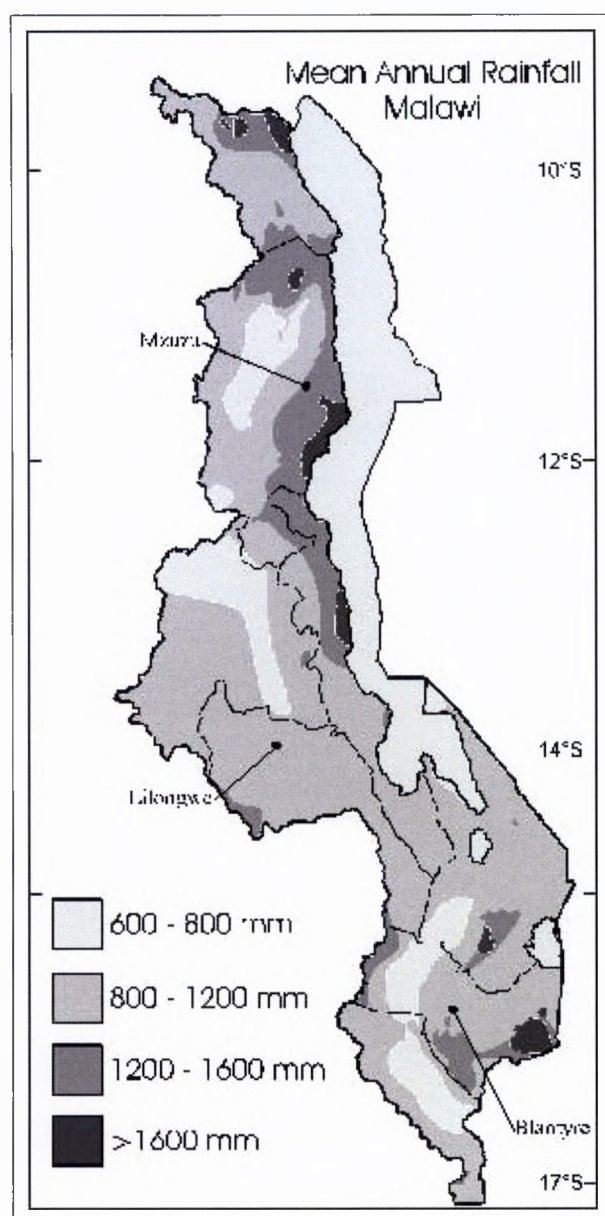


FIG. A.3 – Précipitations annuelles moyennes. (Source : Moriniere et al., 1996)

A.4 Images satellites

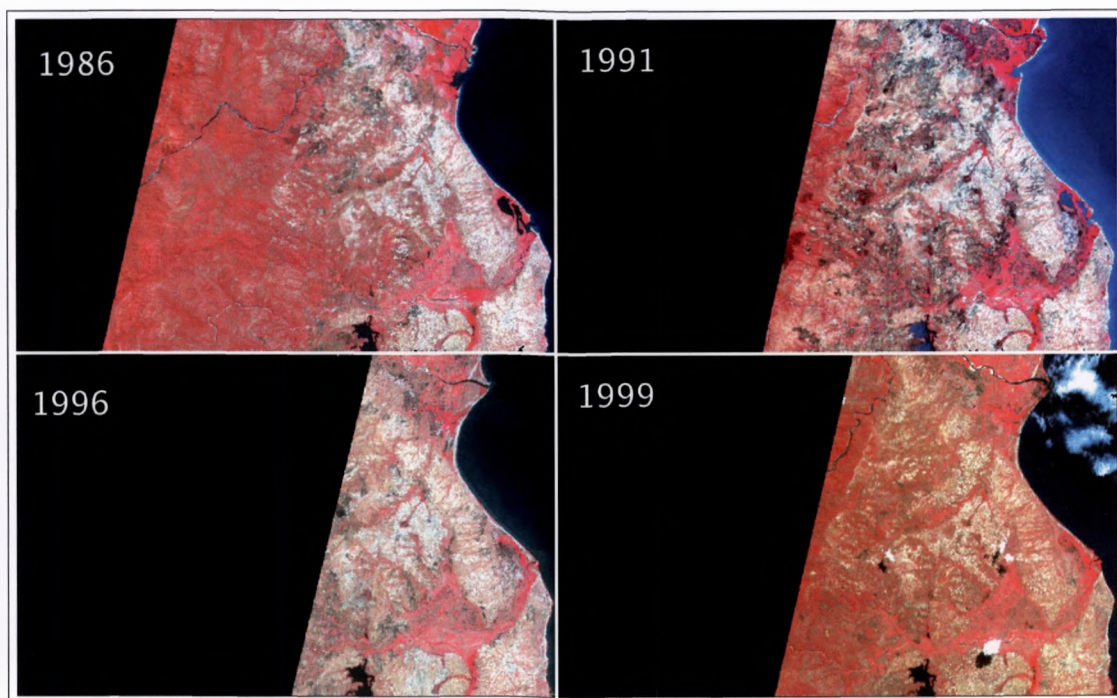


FIG. A.4 – Images satellites de 1986, 1991, 1996 et 1999 (composition colorée RVB). (*Source* : Spot Image, 2007)

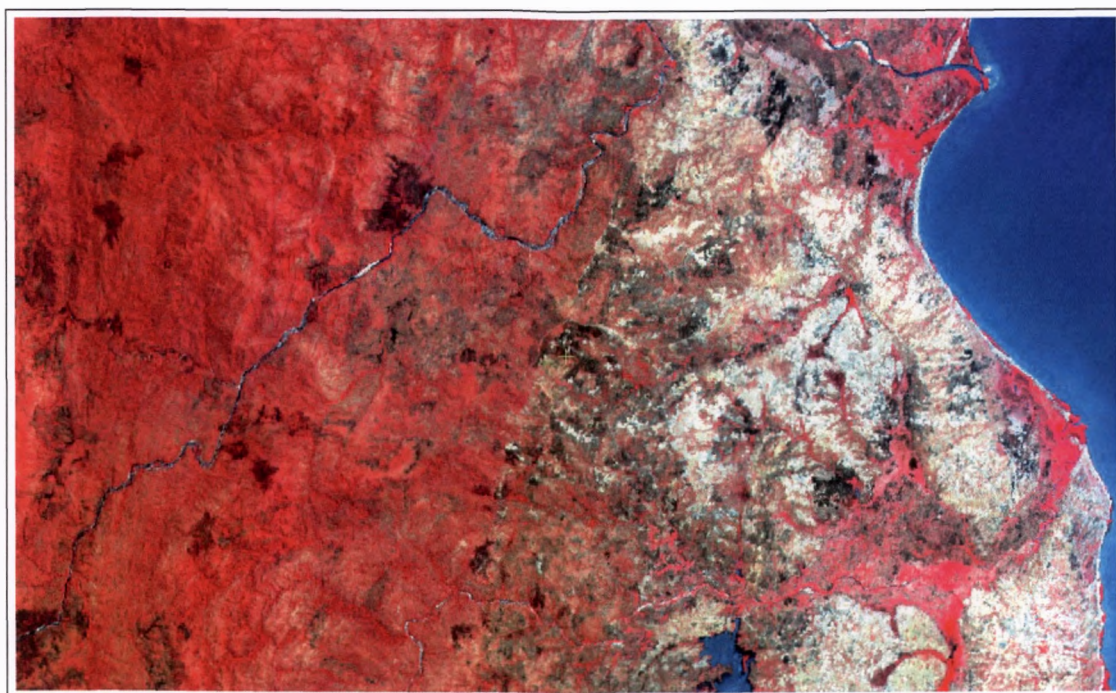


FIG. A.5 – Image satellite de 2001 (composition colorée RVB). (*Source* : Spot Image, 2007)

A.5 Composition colorée d'une image *SPOT*

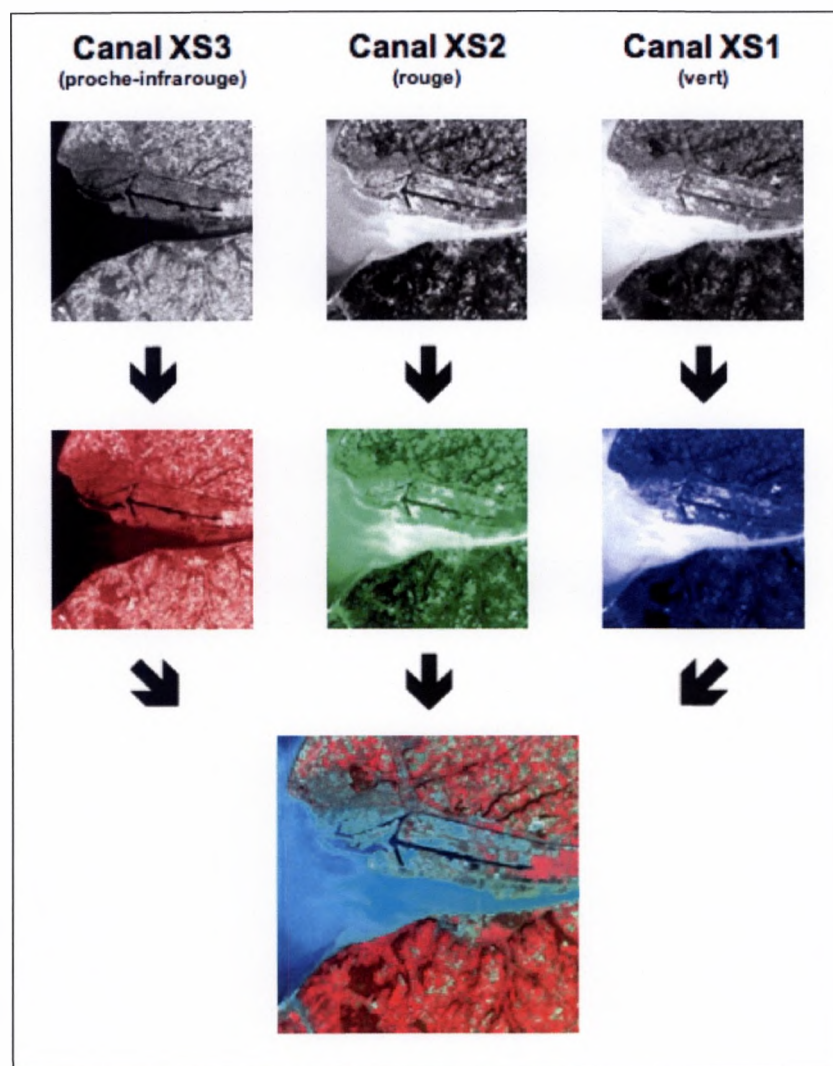


FIG. A.6 – Exemple du codage des trois canaux d'une image *SPOT* : le canal XS3 (proche infra-rouge) est codé en rouge, le canal XS2 (rouge) est codé en vert et le canal XS1 (vert) est codé en bleu. Le résultat est appelé « composition colorée ». (*Source* : Pouchin, 2001)

Images satellites classifiées

B.1 Légende des classifications

Nous avons effectué une classification supervisée des images satellites par maximum de vraisemblance (*Maximum Likelihood Classification*).

Pour définir les classes d'occupation du sol, nous sommes partis d'une classification de 2001 effectuée par S. Vanwambeke. Nous avons supprimé la classe "*Swamps and flooded areas*", car celle-ci n'apportait que peu d'information pertinente pour notre étude et qu'elle était à difficile distinguer de la classe "*Wetlands with low vegetation, including irrigated areas*".

Voici les classes que nous avons retenues et qui sont valables pour l'ensemble de nos classifications (cfr. section 2.2 , p. 21) :

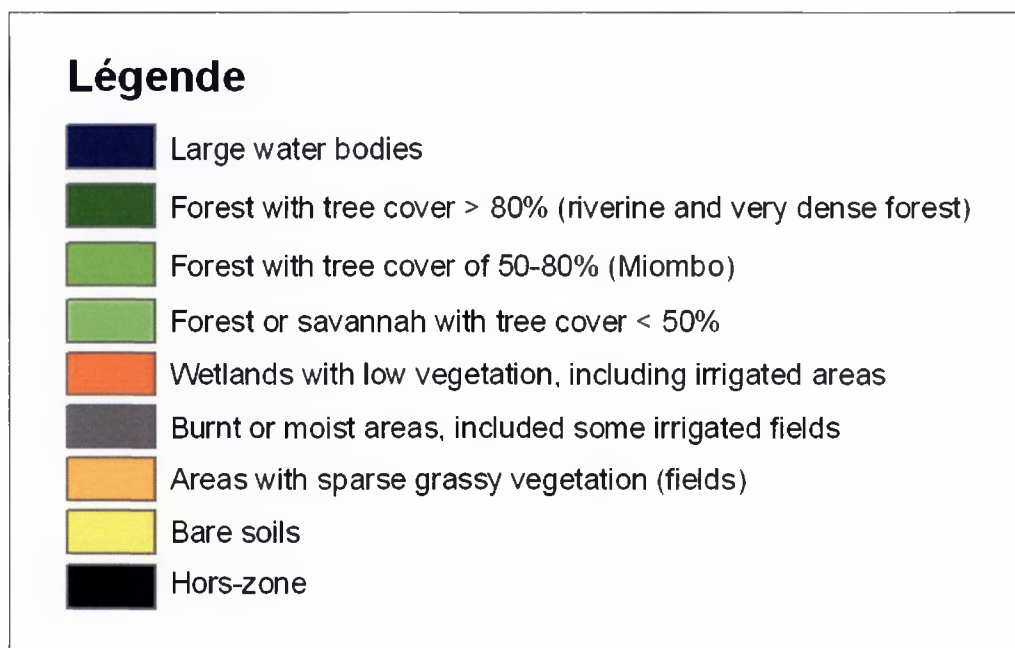


FIG. B.1 – Légende des classes pour les images satellites SPOT

Dans les pages suivantes, nous avons agrandi au maximum les classifications de nos images satellites, afin de pouvoir en observer la qualité.

B.2 Image SPOT classifiée (1986)

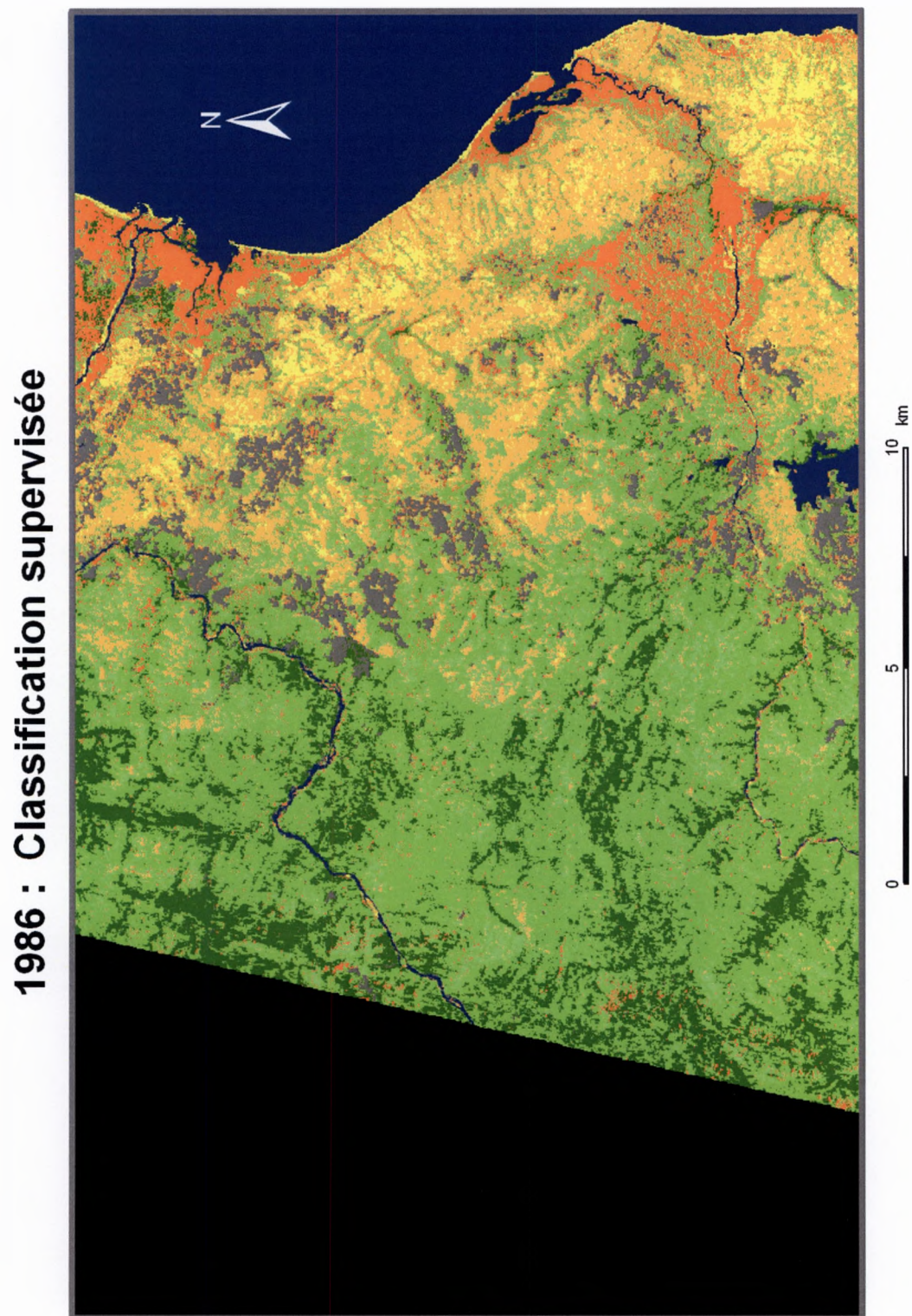


FIG. B.2 – Classification de l'image SPOT de 1986 – Méthode : *Maximum Likelihood Classification*

B.3 Image SPOT classifiée (1991)

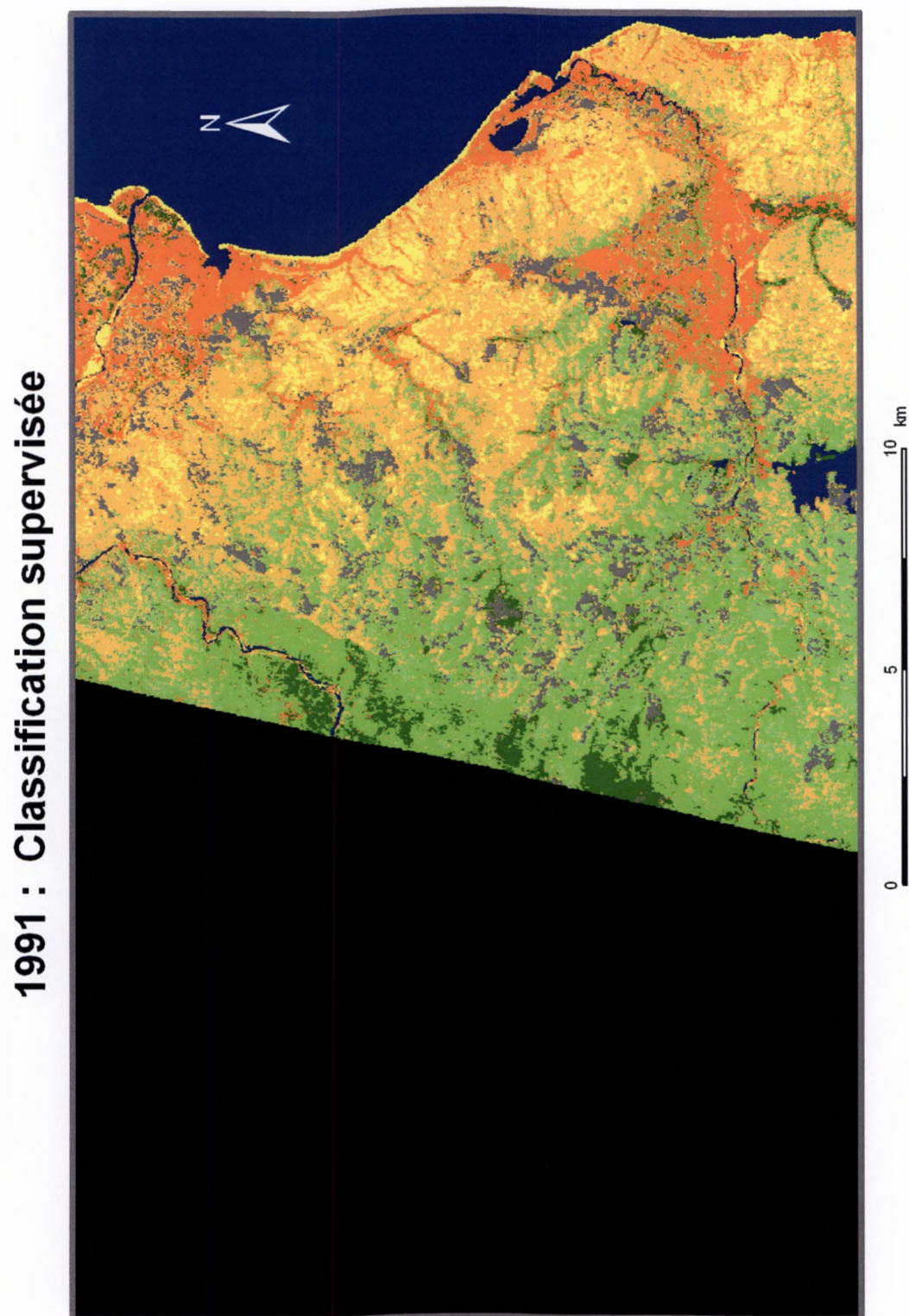


FIG. B.3 – Classification de l'image SPOT de 1991 – Méthode : *Maximum Likelihood Classification*

B.4 Image SPOT classifiée (1996)

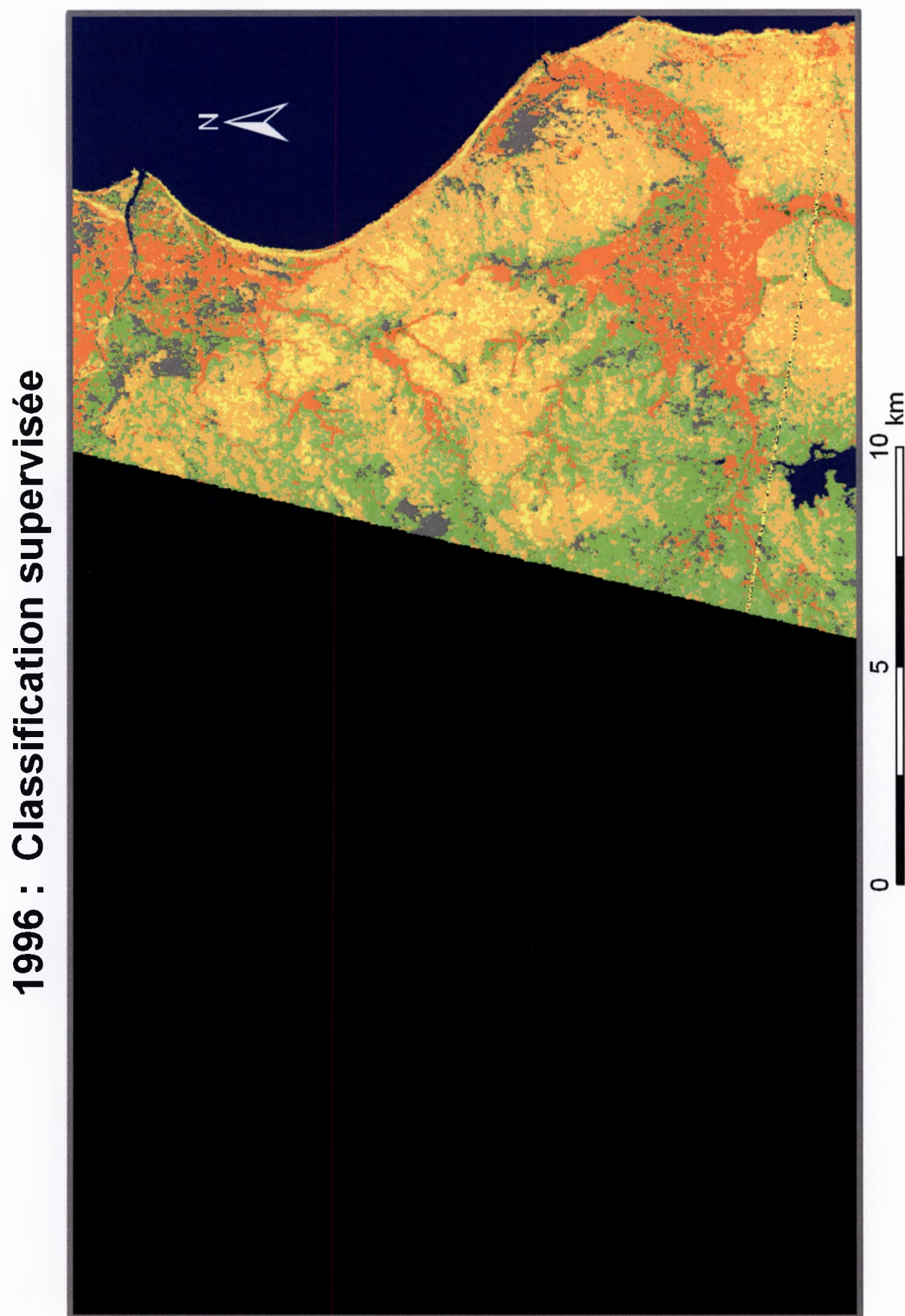


FIG. B.4 – Classification de l'image SPOT de 1996 – Méthode : *Maximum Likelihood Classification*

B.5 Image SPOT classifiée (1999)

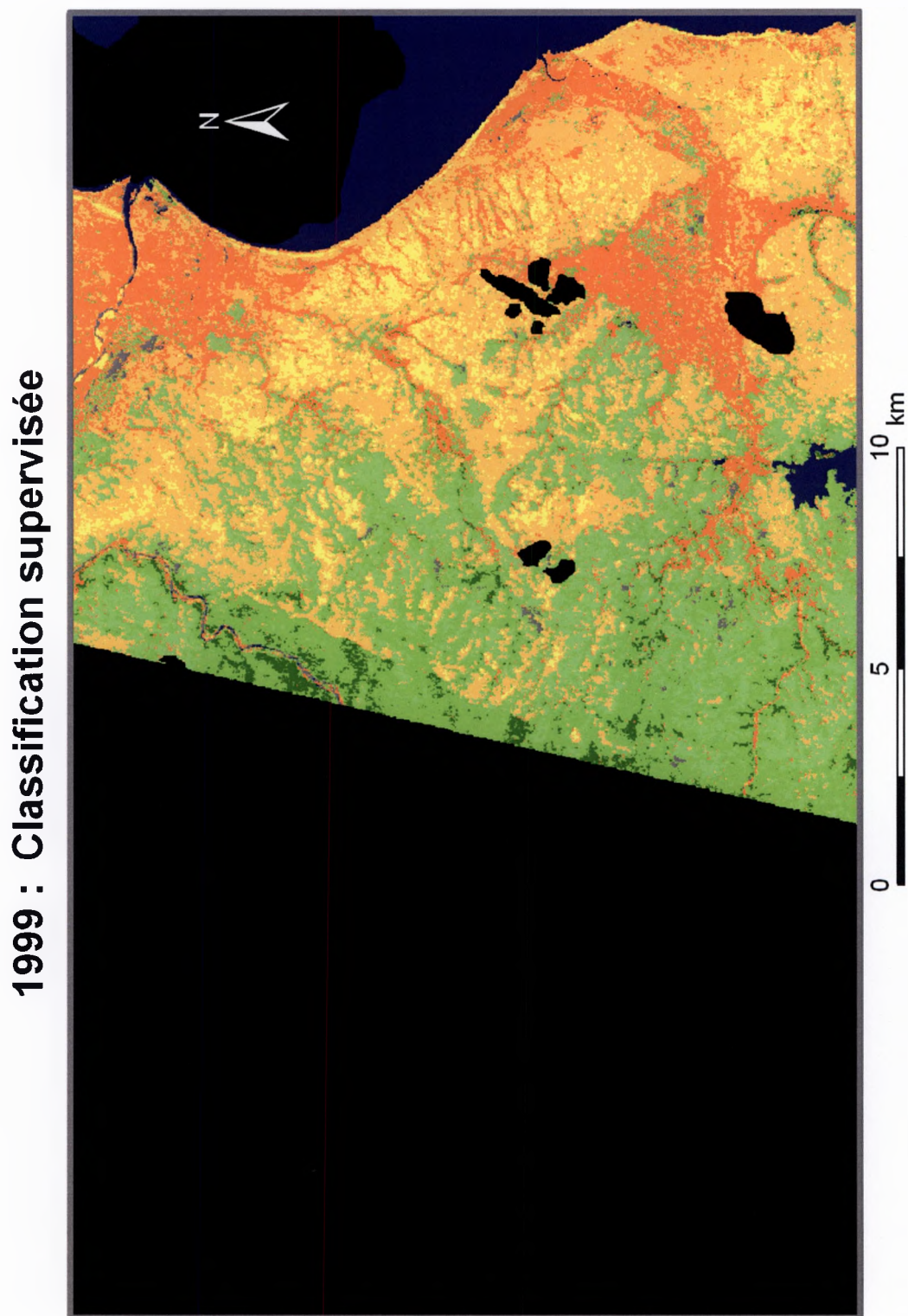


FIG. B.5 – Classification de l'image SPOT de 1999 – Méthode : *Maximum Likelihood Classification*

B.6 Image SPOT classifiée (2001)

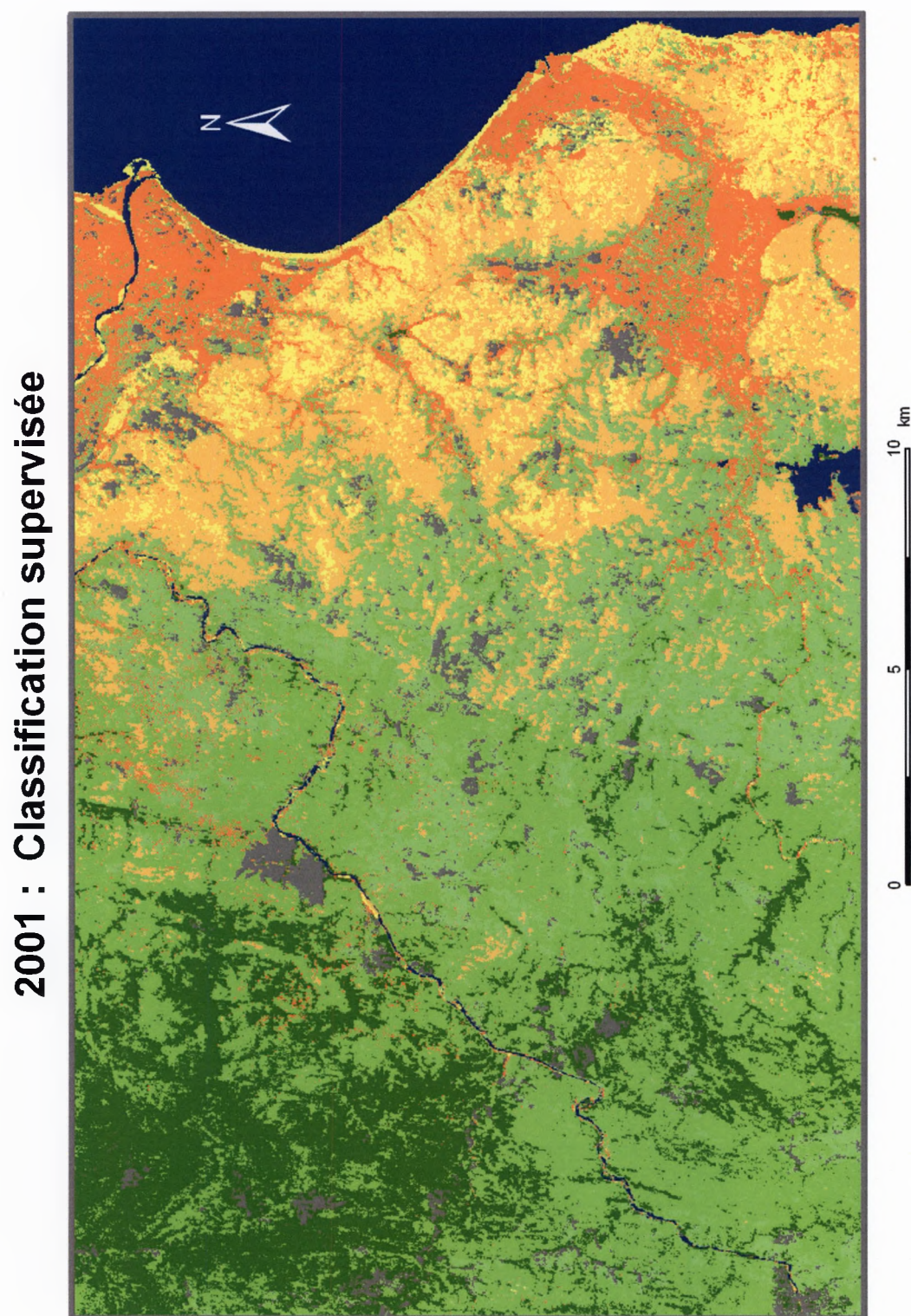


FIG. B.6 – Classification de l'image SPOT de 2001 – Méthode : *Maximum Likelihood Classification*

B.7 Évaluation de la précision

B.7.1 Formulaire (d'après Caloz et Collet, 2001)

B.7.1.1 Exemple d'une matrice de confusion

TAB. B.1 – Exemple d'une matrice de confusion

	N° de classes	Classes de test				Marge
		1	2	i	n	
Classes affectées	1	m_{11}	m_{12}	m_{1i}	m_{1n}	m_{1+}
	2	m_{21}	m_{22}	m_{2i}	m_{2n}	m_{2+}
	i	m_{i1}	m_{i2}	m_{ii}	m_{in}	m_{i+}
	n	m_{n1}	m_{n2}	m_{ni}	m_{nn}	m_{n+}
Marge	Total classés	m_{+1}	m_{+2}	m_{+i}	m_{+n}	$T_{classés}$
	Non classés	m_{x1}	m_{x2}	m_{xi}	m_{xn}	$T_{nonclassés}$
	Total	T_1	T_2	T_i	T_n	T

avec T : total des pixels échantillonnés, toute classe confondue ;

T_i : total des pixels échantillonnés, par classe ;

$T_{classés}$: total des pixels classés, toute classe confondue ;

m_{ii} : pixels de la classe i correctement classés ;

m_{ij} : $i \neq j$, pixels issus de l'échantillonnage, mais affectés de manière erronée à une autre classe (erreur de *commission*) ;

m_{xi} : pixels non classés de la classe i (erreur d'*omission*) ;

m_{i+} : valeur marginale de la ligne i (somme de la ligne) ;

m_{+i} : total des pixels classés devant appartenir à la classe i.

B.7.1.2 Indice de précision globale

Sa formule est :

$$PG = \frac{\sum m_{ii}}{T_{classés}} \quad (B.1)$$

avec m_{ii} : pixels de la classe i correctement classés ;

$T_{classés}$: total des pixels classés, toute classe confondue.

B.7.1.3 Indice Kappa

Sa formule est :

$$K = \frac{T_{classés} \cdot \sum m_{ii} - \sum [m_{i+} \cdot m_{+i}]}{T_{classés}^2 - \sum [m_{i+} \cdot m_{+i}]} \quad (B.2)$$

avec m_{ii} : pixels de la classe i correctement classés ;
 m_{i+} : valeur marginale de la ligne i (somme de la ligne) ;
 m_{+i} : total des pixels classés devant appartenir à la classe i ;
 $T_{classés}$: total des pixels classés, toute classe confondue ;

B.7.1.4 Précision de l'utilisateur et du producteur

La précision de l'utilisateur renseigne sur la probabilité qu'un pixel classé dans la classe A appartienne réellement à cette classe. Elle est définie pour chaque classe i par le rapport entre le nombre de pixels classés correctement et la fréquence marginale de la ligne i . La précision de l'utilisateur évalue l'erreur de *commission* et exprime la répartition d'une classe dans toutes les zones de référence définies dans l'image pour l'ensemble des classes. Cet indice évalue donc les confusions entre classes apparues lors de la classification.

Sa formule est :

$$U_i = \frac{m_{ii}}{m_{i+}} \quad (B.3)$$

avec m_{ii} : pixels de la classe i correctement classés ;
 m_{i+} : valeur marginale de la ligne i (somme de la ligne).

La précision du producteur, quant à elle, renseigne sur la probabilité qu'un pixel de référence soit bien classé. Elle est définie pour la classe i par le rapport entre le nombre de pixels classés correctement et la somme marginale de la colonne i , c'est à dire, le total des pixels classés de la classe d'échantillon i . La précision du producteur mesure l'erreur d'*omission* et met en évidence la dominance d'une classe dans sa zone de référence. Si l'indice P_i est faible, la zone de référence est hétérogène et contient différentes classes, ou, corollairement, la signature spectrale contient plusieurs modes.

Sa formule est :

$$P_i = \frac{m_{ii}}{m_{+i}} \quad (B.4)$$

avec m_{ii} : pixels de la classe i correctement classés ;
 m_{+i} : total des pixels classés devant appartenir à la classe i .

B.7.2 Matrices de confusion des classifications réalisées

Légende des matrices de confusion :

1. Large water bodies ;
2. Forest with tree cover of 50-80 % (Miombo) ;
3. Forest with tree cover > 80 % (riverine and very dense forest) ;
4. Areas with sparse grassy vegetation (fields) ;
5. Bare soils ;
6. Wetlands with low vegetation, including irrigated areas ;
7. Forest or savannah with tree cover < 50 % ;
8. Burnt or moist areas, included some irrigated fields.

Matrice de confusion 1986

1986	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
1	23								23
2		47	8				6		61
3		7	10			1			18
4				25	3		4		32
5				4	6				10
6	1			1		6		4	12
7		4		5		2	10		21
8		1		1		3		15	20
Total	24	59	18	36	9	12	20	19	197

Matrice de confusion 1991

1991	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
1	23								23
2		19	3	1			4	2	29
3		1	11					1	13
4				32	4	5	8		49
5		2	1	5	8				16
6		2		1		14		1	18
7		3	1	8			15	1	28
8		1		2				10	13
Total	23	28	16	49	12	19	27	15	189

Matrice de confusion 1996

1996	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
1	26								26
2		10	2	2	1	3	4		22
3		1	2						3
4		2	1	34	6		9	1	53
5				2	16	1	1	1	21
6	1	7	3	2	3	13	4		33
7		2		5	1		10	1	19
8	1	1	1			1	1	10	15
Total	28	23	9	45	27	18	29	13	192

Matrice de confusion 1999

1999	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
1	19					1			20
2		23	4			2	5	1	35
3		2	8						10
4				42	5	3	4	1	55
5				3	12				15
6		2		2		18	1	1	24
7		6	1	12			20		39
8	2			1				5	8
Total	21	33	13	60	17	24	30	8	206

Matrice de confusion 2001

2001	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
1	17								17
2		46	7			1	4		58
3		4	26				2	1	33
4				28	3	1	1		33
5					8	1			9
6		1				16		1	18
7		8		2		2	25	2	39
8	1					2	1	6	10
Total	18	59	33	30	11	23	33	10	217

B.7.3 Indices de précision des classifications réalisées

Indices généraux

	1986	1991	1996	1999	2001
Overall Accuracy (%)	74	69	63	72	77
Kappa Statistic (%)	70	67	56	68	73

Précision de l'utilisateur (%)

	1986	1991	1996	1999	2001
1	100	100	100	95	100
2	77	66	45	66	79
3	56	85	67	80	79
4	78	65	64	76	85
5	60	50	76	80	89
6	50	78	39	75	89
7	48	54	53	51	64
8	75	77	67	63	60

Précision du producteur (%)

	1986	1991	1996	1999	2001
1	96	100	93	90	94
2	80	68	43	70	78
3	56	69	22	62	79
4	69	65	76	70	93
5	67	67	59	71	73
6	50	74	72	75	70
7	50	56	34	67	76
8	79	67	77	63	60

Matthieu Leroy – 09/11/1982
Faubourg de Charleroi, 98A
1400 Nivelles
www.maleroy.be

– 23 août 2007 –