

FAO-RDC Coordination nationale REDD
N°UNJP/DRC /041/01/2009

**ANALYSE QUANTITATIVE DES CAUSES DE LA DEFORESTATION
ET DE LA DEGRADATION DES FORETS EN
REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO**

Rapport final

Pierre Defourny, Céline Delhage
et Jean-Paul Kibambe Lubamba



Décembre 2011



Ir. Céline Delhage

Ir. Jean-Paul Kibambe Lubamba

Professeur Pierre Defourny

UCL/ELI-Geomatics

Research Laboratory in Environmetrics and Geomatics

Earth and Life Institute – Environmental Sciences

Université catholique de Louvain

Croix du Sud, 2 bte 16
B-1348 Louvain-la-Neuve
Belgium

Phone : +32 (0)10 47 23 74 /36 81

Fax : +32 (0)10 47 88 98

E-mail : Pierre.Defourny@uclouvain.be

Préambule

Cette étude a été réalisée par le laboratoire de recherche en géomatique du Earth and Life Institute de l'Université catholique de Louvain (Louvain-la-Neuve, Belgique) dans le cadre du programme UN-REDD (Programme des Nations Unies sur la Réduction des Emissions résultant du Déboisement et de la Dégradation forestière dans les pays en développement) en RDCongo et financée par la FAO dans le cadre du protocole d'accord N°UNJP/DRC /041/01/2009. L'ensemble de la démarche s'inscrit à titre pilote dans le cadre de la coordination nationale REDD de la RDCongo afin de développer une compréhension commune des causes de la déforestation.

En raison de l'indisponibilité des données de déforestation et de dégradation pour les années 2000-2005, le développement méthodologique a pu d'abord être mené à partir des données 1990-2000 telles que traitées par l'équipe d'UCL/ELI-Géomatique dans le cadre de l'étude pilote financée par le Joint Research Center. Par la suite, la méthode développée a été expérimentée et appliquée sur les résultats de l'étude menée dans le cadre de l'Observatoire des Forêts d'Afrique centrale (projet EU FORAF) et le projet FP7-Geoland-2 comme prévu. Ces délais liés à la disponibilité des résultats ont modifiés sensiblement le calendrier de l'étude.

Enfin, à la demande de la coordination nationale, un protocole de validation sur le terrain a été conçu, présenté et révisé afin d'être proposé aux acteurs de terrain susceptibles menés les campagnes de collectes de données.

Les auteurs de l'étude remercient vivement les partenaires nationaux pour leur contribution à la validation de l'interprétation des données de télédétection dans le cadre de l'Observatoire des Forêts d'Afrique centrale et l'ensemble des partenaires qui ont par leurs réactions et commentaires contribué à cette étude et ce protocole de validation.

Le document est structuré en trois parties distinctes afin de pouvoir les examiner indépendamment :

1. Un résumé exécutif reprenant une synthèse des résultats obtenus
2. La partie 1 du document présentant l'ensemble de l'analyse des causes de la déforestation
3. La partie 2 reprenant le protocole de validation préalablement soumis pour commentaires et amendés dans ce sens.

Résumé exécutif

Dans le cadre du programme UN-REDD (Programme des Nations Unies sur la Réduction des Emissions résultant du Déboisement et de la Dégradation forestière dans les pays en développement), les causes de la déforestation et de la dégradation des forêts ont été étudiées à l'échelle nationale pour la période 1990-2000-2005 selon une analyse statistique quantitative et objective tenant compte de la dimension spatiale. En outre, un protocole de validation a été proposé pour structurer la collecte des données et les observations de terrain complémentaires.

L'étude des causes de la déforestation a d'abord procédé par une analyse statistique univariée pour identifier et quantifier l'influence des différentes variables expliquant les changements du couvert forestier pour la période 1990-2000-2005. Ensuite, une méthode statistique d'analyse multivariée a permis d'établir les modèles explicatifs combinant l'ensemble des informations disponibles. Afin d'améliorer la pertinence des modèles explicatifs, les analyses ont été réalisées à deux niveaux : d'une part à l'échelle nationale comme initialement prévu et, d'autre part, à l'échelle sous-nationale afin de mettre en évidence des spécificités locales. L'étude repose sur les estimations de déforestation et dégradation telles que fournies par les études réalisées dans le cadre de l'Observatoire des Forêts d'Afrique centrale (Ernst et al., 2011).

La méthodologie de modélisation a procédé en 5 étapes successives mobilisant un ensemble de données géoréférencées compilées à l'aide d'un système d'information géographique. Les 35 variables identifiées a priori comme causes potentielles de déforestation ou dégradation forestière en RDC ont été regroupées en 8 catégories de variables distinguant les causes directes des forces motrices : les infrastructures, l'agriculture, l'exploitation forestière, les facteurs économiques, les axes de transport, les facteurs démographiques, les facteurs socio-politiques et les facteurs biophysiques. Ces 35 variables ont été calculées pour chacun des 1365 échantillons concernant la période 1990-2000 et pour les 917 échantillons couvrant la période 2000-2005. Des différentes méthodes de sélection de variables ont été utilisées pour établir les modèles explicatifs par régression multivariée. L'ensemble des résultats sont présentés sous forme de synthèses cartographiques ou de tableaux permettant d'en tirer les conclusions suivantes.

Les variables sélectionnées pour représenter les facteurs de déforestation et de dégradation expliquent une proportion importante à très importante (entre 40 et 79 %) de la variabilité des superficies affectées par les deux processus. Certaines variables prises isolément peuvent expliquer jusqu'à 38% de la déforestation/dégradation pour 1990-2000 et 32% pour 2000-2005.

La majorité des résultats montrent **une certaine stabilité temporelle des facteurs dominants les processus de déforestation et de dégradation pour les deux périodes** 1990-2000 et 2000-2005, même si, d'une manière générale, les résultats pour 2000-2005 sont un peu moins élevés. Ainsi, ce sont les 5 mêmes variables qui sont les plus corrélées aux processus d'intérêt pour les 2 périodes : la superficie du complexe rural, l'augmentation de la population, la superficie de forêts dégradées,

la fragmentation de la forêt et l'importance du réseau routier. Il est très intéressant de noter que c'est avant tout l'importance de la population présente qui détermine la quantité de forêts affectées par la déforestation et la dégradation. Ces résultats très clairs contredisent plusieurs études plus locales qui ont souvent mis en avant la distance aux routes et l'importance des flux associés aux routes comme cause première de déforestation.

Les analyses menées à l'échelle sous-nationale permettent d'affiner ces résultats et d'augmenter très largement la part expliquée de la déforestation/dégradation (jusqu'à 79 % pour 1990-2000 et 64 % pour 2000-2005) par rapport à un modèle national unique (respectivement 47% et 38 %), démontrant **ainsi l'importance de la diversité spatiale des processus selon les régions**. Il convient de noter que cette très nette amélioration concerne environ la moitié des zones alors qu'en moyenne l'amélioration est moins significative (53% pour 1990-2000 et 48% pour 2000-2005). En raison des grandes différences observées d'une zone à l'autre, il est vivement recommandé de se référer à la figure 12 présentant les variables les plus corrélées pour chacune des 11 zones.

Enfin, il est important de relever que certaines variables jouent un rôle spécifique comme la présence des aires protégées qui est négativement corrélée à la déforestation/dégradation alors que la distance aux aires protégées est positivement corrélée. De manière plus inattendue, la présence d'une concession forestière et d'exploitation minières ne semble pas jouer un rôle dans la déforestation/ dégradation, du moins aux échelles nationales et sous-nationales étudiées.

Le second objectif de l'étude est le développement d'un protocole d'enquête de terrain pour la validation des principaux facteurs de déforestation et de dégradation identifiés par la modélisation spatiale et statistique. Ce protocole procède par étapes successives impliquant différents types d'acteurs. Les procédures et des exemples de formulaires sont également fournis afin de permettre une mise en œuvre aussi efficace que possible.

L'ensemble de ces résultats de cette étude constituent une source objective d'information quantitative susceptible d'éclairer les discussions des acteurs nationaux, de cibler les débats et d'approfondir la compréhension des éléments clés. Il convient de souligner que la qualité des résultats permet d'envisager un usage prédictif des modèles pour cartographier le risque de déforestation future.

Partie 1

**Analyse quantitative des causes de la déforestation
et de la dégradation des forêts en RDC**

TABLE DES MATIERES

1.	INTRODUCTION.....	1
2.	SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	2
3.	SITE D'ETUDE	4
4.	ESTIMATION DE LA DEFORESTATION	7
5.	DESCRIPTION DE LA METHODE DE MODELISATION	9
5.1	Identification des variables explicatives potentielles.....	9
5.2	Quantification des variables explicatives potentielles.....	9
5.3	Choix des échelles d'analyse.....	16
5.4	Sélection des échantillons Landsat	19
5.1	Sélection des variables et choix des modèles de régression	19
6.	RESULTATS.....	21
6.1	Résultats univariés.....	21
6.2	Résultats multivariés.....	32
A.	1990 - 2000.....	32
B.	2000 - 2005.....	37
C.	Analyse de stabilité entre 1990 - 2000 - 2005.....	44
7.	CONCLUSIONS.....	53
8.	REFERENCES.....	54

TABLEAUX

Tableau 1 - Taux de croissance par Province (source : de Saint Moulin, 2006)	14
Tableau 2 - Résultats de l'analyse univariée	22
Tableau 3 - Analyse de la corrélation entre déforestation et dégradation.....	23
Tableau 4 - Variables communes entre les différents modèles	29
Tableau 5 - Résultats de régressions multivariées par zone pour 1990 - 2000	32
Tableau 6 - Résultats de régressions multivariées avec permutation de variables pour 1990 - 2000	34
Tableau 7 - Occurrence des variables dans les modèles multivariés pour 1990 - 2000	35
Tableau 8 - Résultats de régressions multivariées par zone pour 2000 - 2005 avec les variables imposées.....	38
Tableau 9 - Résultats de régressions multivariées par zone pour 2000 - 2005	40
Tableau 10 - Résultats de régressions multivariées avec permutation de variables pour 2000 - 2005	41
Tableau 11 - Occurrence des variables dans les modèles multivariés pour 2000 - 2005	42

FIGURES

Figure 1 - Causes directes et forces motrices de la déforestation en général	2
Figure 2 - Répartition des échantillons Landsat de déforestation et de dégradation	5
Figure 3 - Répartition des forêts en RDC	6
Figure 4 - Estimation de la densité de population en RDC	7
Figure 5 - Causes directes et forces motrices de la déforestation	10
Figure 6 - Répartition des exploitations minières, concessions forestières et villes	12
Figure 7 - Réseau routier	13
Figure 8 - Répartition des aires protégées	15
Figure 9 - Ecorégion du WWF	17
Figure 10 - Délimitation des zones	18
Figure 11 - Exemple de résultats pour la sélection des variables	20
Figure 12 - Analyse univariée par zone pour la période 1990-2000	24
Figure 13 - Représentation spatiale des variables les plus corrélées à la déforestation/dégradation selon leur coefficient de corrélation par zone pour la période 1990-2000.....	26
Figure 14 - Analyse univariée par zone pour la période 2000-2005	27
Figure 15 - Listes des variables les plus corrélées à la déforestation/dégradation et leur coefficient de corrélation par zone pour la période 2000-2005.....	30
Figure 16 - Principales variables ressortant du modèle multivarié par zone pour 1990-2000	36
Figure 17 - Principales variables ressortant du modèle multivarié par zone pour 2000-2005	43
Figure 18 - Distribution des échantillons pour la zone 2.....	46
Figure 19 - Distribution des échantillons pour la zone 3.....	47
Figure 20 - Distribution des échantillons pour la zone 4.....	48
Figure 21 - Distribution des échantillons pour la zone 6.....	49
Figure 22 - Distribution des échantillons pour la zone 7.....	50
Figure 23 - Distribution des échantillons pour la zone 9.....	51
Figure 24 - Distribution des échantillons pour la zone 10.....	52

1. Introduction

Dans le cadre du programme UN-REDD (Programme des Nations Unies sur la Réduction des Emissions résultant du Déboisement et de la Dégradation forestière dans les pays en développement), une étude des causes de la déforestation et de la dégradation des forêts a été réalisée pour la période 1990-2000-2005.

L'objectif principal de cette étude spatiale et statistique est d'identifier et de quantifier l'influence des différentes variables expliquant les changements du couvert forestier pour la période 1990-2000-2005 sur le territoire de la République Démocratique du Congo. La démarche repose sur les résultats d'études menées en collaboration entre UCL/ELI-Géomatique et le Centre Commun de Recherche (EU, Ispra) sur l'estimation de la déforestation et de la dégradation en Afrique centrale pour les années 1990-2000 dans un premier temps (Duveiller *et al.*, 2008) et pour les années 1990, 2000 et 2005 dans un second temps dans le cadre de l'Observatoire des Forêts d'Afrique centrale (Ernst *et al.*, 2011). Ces estimations se basent sur un échantillonnage systématique de sites de 10 ou 20 km de côté répartis sur une grille de 0,5 degré. L'interprétation d'images satellites Landsat, sur base de segmentation par objet, a permis de distinguer jusqu'à 10 classes d'occupation du sol différentes et d'analyser les changements survenus entre ces 10 classes.

2. Synthèse bibliographique

De nombreux auteurs font la différence entre les causes directes (« proximate causes ») et les forces motrices (« driving forces » ou « underlying causes ») de la déforestation (Turner *et al.*, 1993a, 1996; Geist et Lambin, 2002). Une cause directe peut se définir comme étant une activité qui a pour conséquence immédiate des changements dans l'occupation et l'utilisation du sol. Tandis qu'une force motrice (ou cause indirecte) est un processus sous-jacent entraînant des actions qui affectent le paysage (Chowdhury, 2006). La figure 1 reprend une série de causes directes possibles ainsi que les forces motrices potentielles répertoriés de manière générique pour l'ensemble des régions tropicales.

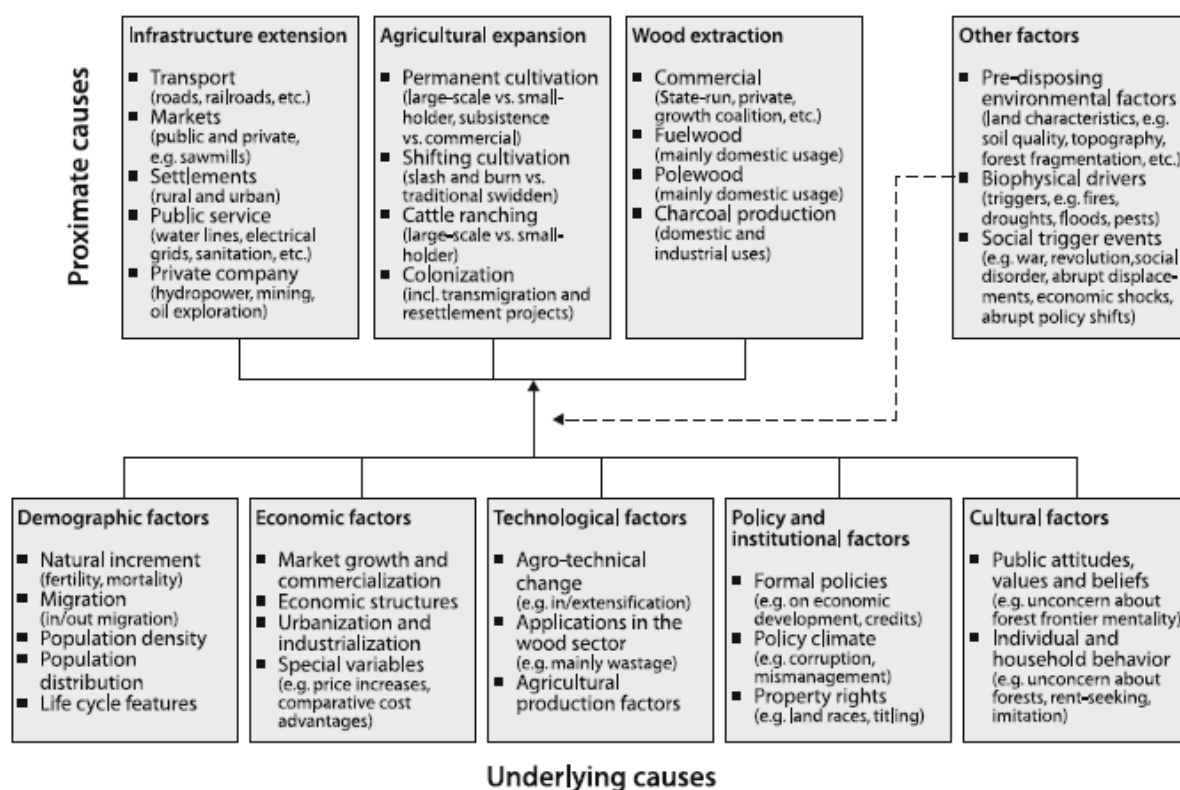


Figure 1 - Causes directes et forces motrices de la déforestation en général (Geist et Lambin, 2002)

La modélisation des changements du couvert forestier vise en général deux objectifs distincts, à savoir l'identification des causes de la déforestation et la prédiction des changements futurs au regard des tendances observées dans les causes identifiées.

D'une manière générale, trois grandes familles de modélisation des changements du couvert forestier sont présentés dans la littérature (Angelsen et Kaimowitz, 1999). Les modèles analytiques sont ceux qui, partant d'un fondement théorique entre la déforestation et ses facteurs sous-jacents, tentent de construire des scénarios possibles de déforestation. Les modèles de simulation utilisent, quant à eux, les valeurs observées avec des modèles théoriques pour simuler différents scénarios de

déforestation. Enfin, les modèles empiriques intègrent un grand nombre de données observées dans le but de déduire des relations entre les différents facteurs et la déforestation, en utilisant le plus souvent des méthodes statistiques de régression.

Ces grandes familles de modèles ont été mises à contribution dans un large éventail d'études liées à la compréhension et à la caractérisation du processus de déforestation. Certaines de ces études sont citées ci-dessous à titre illustratif. Celles-ci vont de l'usage des régressions logistiques en vue de déterminer l'importance et le rôle de chaque facteur préalablement identifié dans le processus de déforestation (Mertens et Lambin, 1997 ; Echeverria *et al.*, 2008 ; Roy Chowdhury, 2006) à la création des cartes de vulnérabilité à la déforestation sur base de différents critères (Hall *et al.*, 1995), en passant par l'usage des automates cellulaires pour prendre en compte les interactions spatiales des différents facteurs de la déforestation au sein de la zone d'étude via un effet de voisinage (Soares-Filho *et al.*, 2002). On peut aussi mentionner l'utilisation des réseaux de neurones (Mas *et al.*, 2004), qui permettent de mettre en relation différentes causes possibles de la déforestation avec une série temporelle d'images satellites. Des cartes de déforestation sont ainsi créées à partir des images satellites, permettant d'entraîner et de calibrer le réseau de neurones pour déterminer le risque de déforestation en fonction des variables explicatives. Il peut ainsi en résulter des cartes de risque de déforestation. Bien qu'offrant la possibilité de développer des modèles complexes et non linéaires, les réseaux de neurones ne permettent pas d'identifier et de quantifier clairement le rôle de chaque variable dans la déforestation.

Ceci étant, les régressions multivariées occupent une place prépondérante dans la détermination des forces motrices de la déforestation. Il s'agit d'une méthode statistique ayant pour objectif de déterminer la relation entre une variable dépendante (ici la déforestation) et une série de variables explicatives (causes de la déforestation), par le biais des coefficients de régression. Ainsi, plusieurs causes potentielles de la déforestation peuvent être testées à l'aide des outils de diagnostic de la régression multivariée (le signe des coefficients de régression, le coefficient de détermination, l'analyse des résidus, la significativité du modèle de régression, etc.).

Aussi, la plupart des modèles de régression appliqués à l'étude de la déforestation sont ceux de type probit ou logistique, étant donné que la variable dépendante est souvent disponible sous forme dichotomique (forêt/non forêt). Cependant, lorsque la déforestation a été préalablement quantifiée (en termes d'hectares par exemple), un modèle de régression multivariée est plus adapté. Par ailleurs, lorsqu'on suspecte une variation dans l'espace de l'influence des causes de la déforestation, on peut recourir à une variante des régressions multivariées, communément désignée sous le terme régression pondérée spatialement. Il en résulte que les coefficients de la régression correspondant à chacune des causes varient en fonction de la position dans l'espace (Pineda Jaimes *et al.*, 2010).

Au regard des données disponibles et de l'objectif de quantification des causes de la déforestation, la régression multivariée a été retenue dans le cadre cette étude.

3. Zone d'étude et données disponibles

Les forêts de la RDC couvrent environ 155,5 millions d'hectares (dont 99 millions ha de forêts denses humides) ce qui représente 67% du territoire national dont la superficie est de 2.329.374 km² (Etat des forêts, 2008).

L'estimation de la déforestation et de la dégradation pour les années 1990-2000 a d'abord été produite dans le cadre d'une collaboration entre UCL/ELI-Géomatique et le Centre Commun de Recherche (EU, Ispra) sur base d'un échantillonnage systématique de sites de 10 x 10 km répartis sur une grille de 0,5 degré (Duveiller *et al.*, 2008). Ces estimations ont seulement été utilisées pour développer la méthode de modélisation (Delhage et Defourny, 2010).

La démarche repose sur les estimations fournies récemment pour les années 1990, 2000 et 2005 par l'étude menée par UCL/ELI-Géomatique en étroite collaboration avec les spécialistes nationaux et le Centre Commun de Recherche (EU, Ispra) dans le cadre de l'Observatoire des Forêts d'Afrique centrale (Ernst *et al.*, 2011) et financé par le projet EU-FORAF et le projet FP7-Geoland 2. Tous les échantillons répartis sur une grille de 0,5 degré ont été traités pour autant que des images Landsat de bonne qualité présentant une couverture nuageuse réduite soient disponibles.

La variable dépendante retenue pour représenter la déforestation et la dégradation est la somme de la superficie défrichée (déforestation) et de la superficie de forêts dégradées (dégradataion) en hectares pour les périodes 1990-2000 et 2000-2005 obtenues par cette étude (Ernst *et al.*, 2011). La répartition des échantillons Landsat disponibles et les valeurs de déforestation et de dégradation forestière utilisées dans cette étude sont représentées à la figure 2.

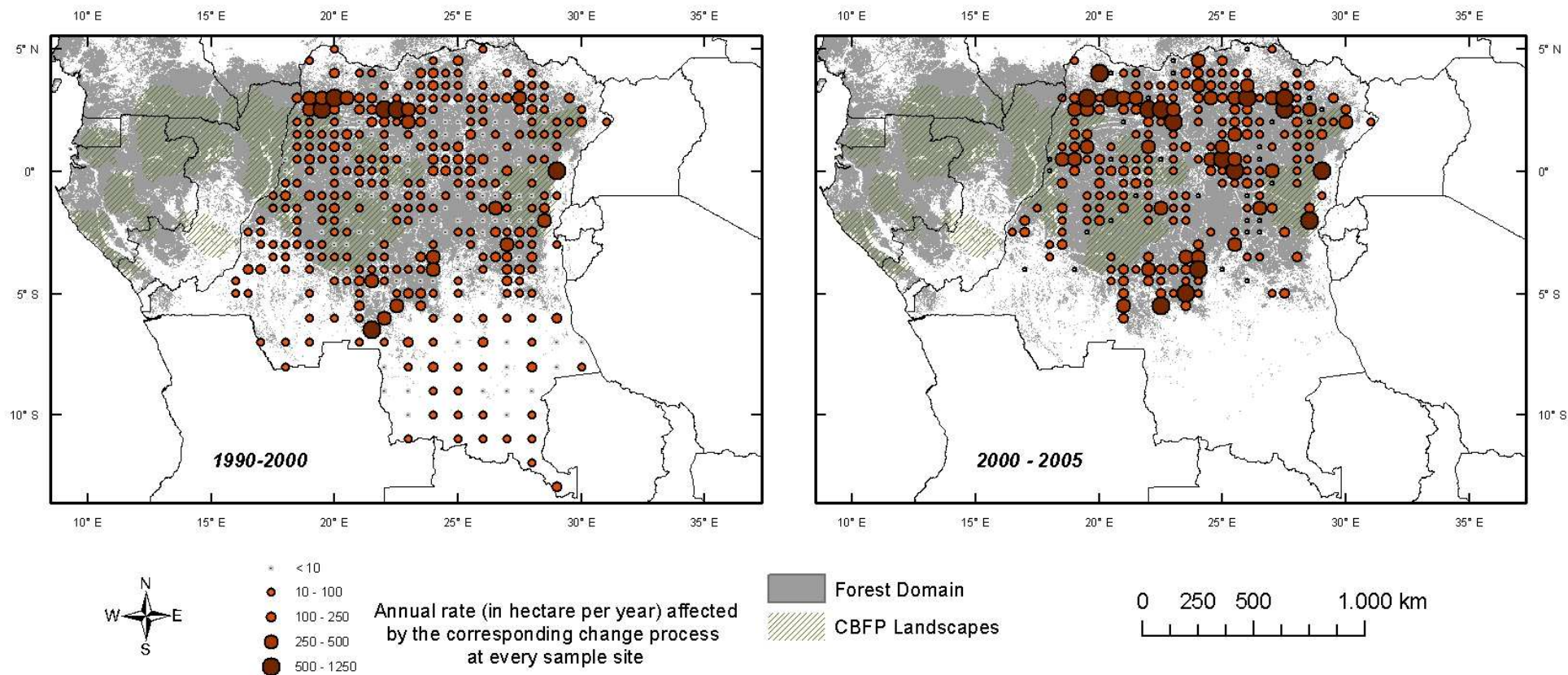


Figure 2 - Répartition des échantillons Landsat et estimation (en ha) de la superficie concernée annuellement par la déforestation et de la dégradation pour les deux périodes 1990-2000 et 2000-2005 (Ernst et al., 2011).

La carte d'occupation du sol de la RDC réalisée par l'UCL/ELI-Géomatique présente différents types de forêts. La forêt dense humide semi-décidue ou sempervirente est le type de forêt qui occupe la plus grande superficie du territoire (30% du territoire) (Vancutsem *et al.*, 2009). Les forêts de transition (1100-1750m) et de montagne (>1750m) se situent à l'est dans les provinces du Kivu. La forêt édaphique borde le fleuve Congo ainsi que ses principaux affluents. Les forêts secondaires vieilles, quant à elles, couvrent 6,6% de la superficie de la RDC (Vancutsem *et al.*, 2009). Les forêts secondaires jeunes se trouvent sur des terres qui ont été autrefois cultivées et se répartissent principalement le long du réseau routier et près des villages. Les forêts claires de type « Miombo » se situent au sud du pays (Figure 3).

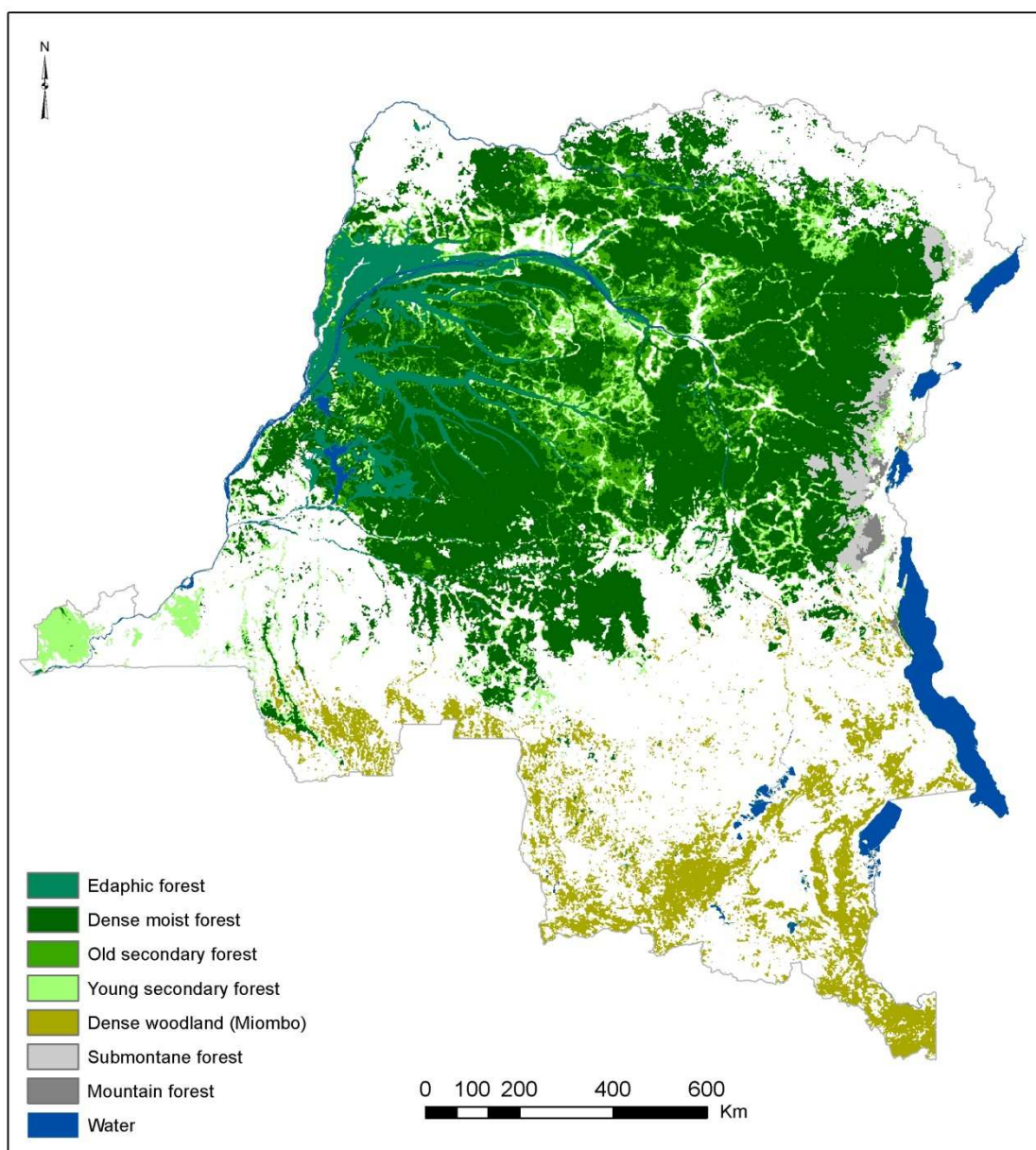


Figure 3 - Répartition des forêts en RDC (modifiée à partir de la Carte d'occupation du sol 1:3 000 000, Vancutsem *et al.*, 2009).

La population de la RDC est estimée à 58.741.000 habitants en 2005 (UNPP, 2006). Mis à part Kinshasa, la densité de population est plus élevée le long des axes de communication et à l'est du pays (Figure 4).

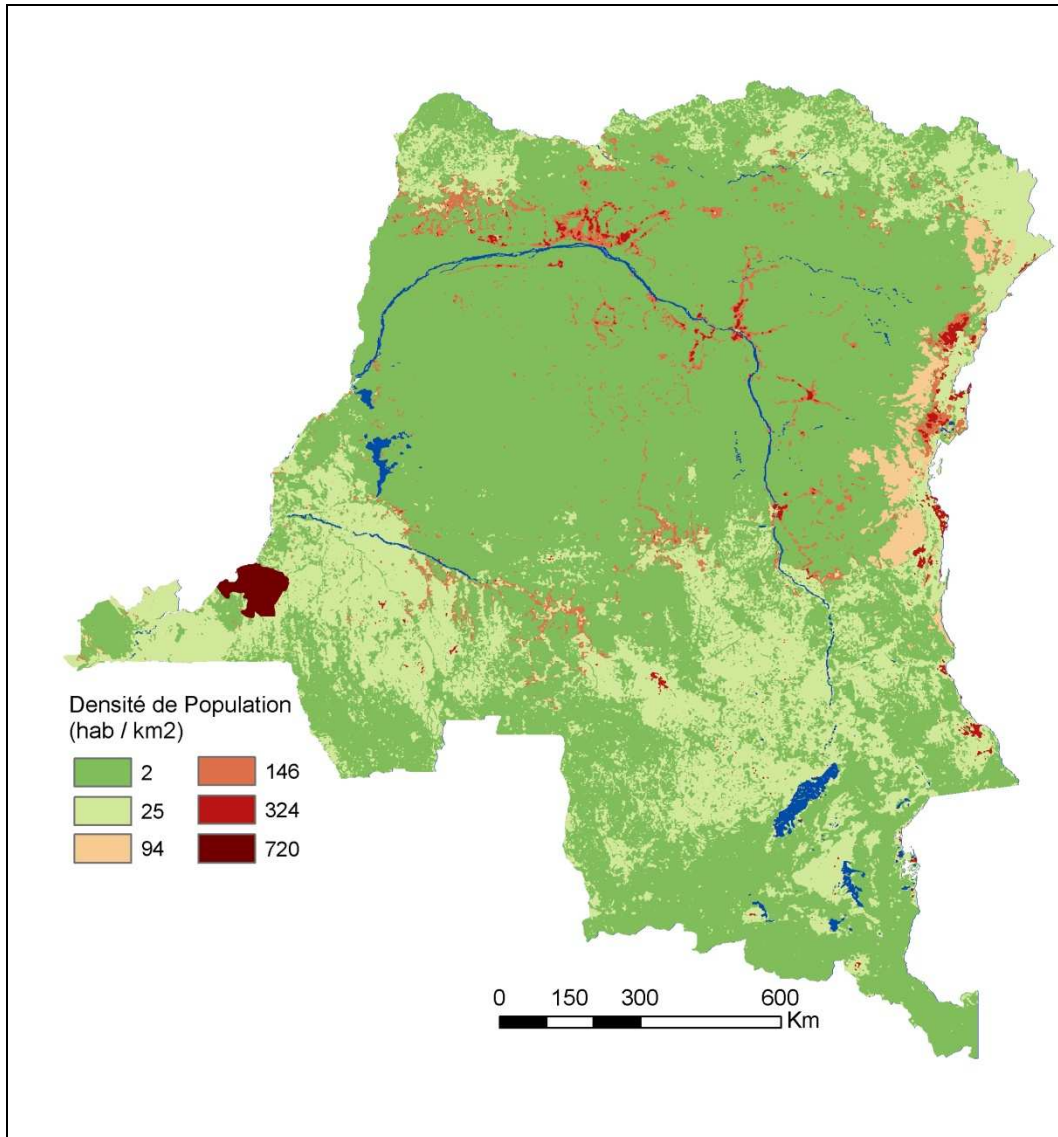


Figure 4 – Carte de distribution de la population en RDC (source : Kibambe Lubamba et Defourny, 2010)

4. Estimation de la déforestation

L'estimation des chiffres de déforestation et de dégradation forestière est le résultat de l'étude (Ernst et al., 2010, 2011) menée pour estimer les taux de changement forestier à l'échelle nationale à partir de 1000 échantillons d'images Landsat (30 m de résolution) pour l'ensemble de l'Afrique Centrale (tous les 0.5°). Les changements sont évalués sur deux intervalles de temps: entre 1990-2000 et entre

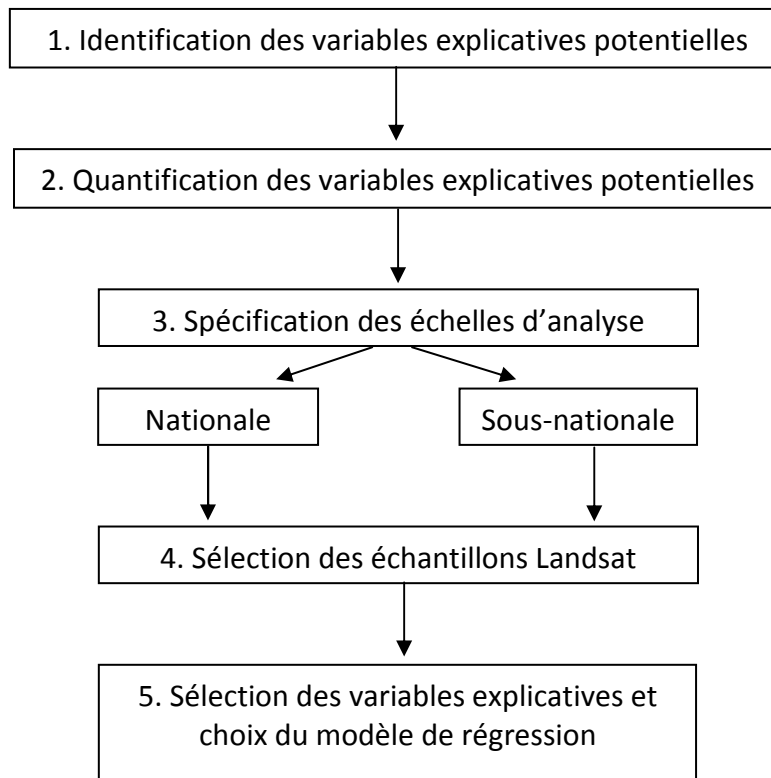
2000-2005. Une segmentation multi-temporelle et une classification non supervisée ont été appliquées sur chacun des échantillons. Six classes d'occupation du sol ont été pré-interprétées automatiquement par la chaîne de traitement. L'équipe de l'Observatoire des Forêts d'Afrique centrale en collaboration avec la FAO a invité 15 experts¹ nationaux à Kinshasa afin de valider la pré-interprétation automatique de l'occupation du sol et la détection des changements. Cet exercice unique a permis de calculer non seulement la déforestation et la reforestation mais également la dégradation et la régénération, phénomènes particulièrement importants dans le contexte du Bassin du Congo.

Afin de mieux tenir compte de la variabilité spatiale au sein de chaque échantillon et de veiller ainsi à une bonne représentativité des valeurs calculées pour chaque variable explicative, les échantillons de 20 x 20 km ont été subdivisés en 4. Les valeurs de déforestation et de dégradation ont donc été sommées pour chaque quart d'échantillon. Nous obtenons ainsi un jeu de données pour les années 1990-2000-2005 de 1365 échantillons.

¹ Pour les échantillons correspondant à la RDC, André Kondjo Shoko, Christophe Musampa et Héritier Koy Kondjo ont contribué très activement à l'amélioration de l'interprétation des échantillons.

5. Description de la méthode de modélisation

La méthode de modélisation des causes de la déforestation s'est déroulée en 5 grandes étapes successives schématisées ci-dessous et présentées ci-après.



5.1. Identification des variables explicatives potentielles

Une réflexion générale a été menée pour identifier, sur base de la littérature, les variables qui pourraient potentiellement expliquer la déforestation et la dégradation des forêts en RDC. Les 35 variables identifiées ont été regroupées en 8 catégories de variables : les infrastructures, l'agriculture, l'exploitation forestière, les facteurs économiques, les axes de transport, les facteurs démographiques, les facteurs socio-politiques et les facteurs biophysiques (Figure 5). On distingue également les causes directes de la déforestation et les force motrices qui jouent un rôle indirect dans les processus de déforestation et de dégradation. Faute de données disponibles, les variables en italique dans la figure 5 n'ont pas pu être intégrées dans l'analyse.

L'ensemble des données disponibles a été compilé dans un système d'informations géographiques (SIG) pour calculer les valeurs de chaque variable d'intérêt pour chaque échantillon (10 x 10 km).



Figure 5 - Causes directes possibles et forces motrices potentielles de la déforestation et de la dégradation en RDC.

- Les infrastructures

Les infrastructures peuvent avoir un rôle direct sur la déforestation et la dégradation forestières. Cette catégorie de variables représente les effets causés par l'extension et l'emprise directe des infrastructures sur les forêts. Ne disposant pas de données précises sur l'extension des routes, seule la variable *présence d'exploitations minières* est modélisée pour cette catégorie de variables.

- L'agriculture

De nombreuses zones boisées sont défrichées et utilisées pour l'agriculture itinérante de subsistance. La perte en fertilité des terres agricoles pousse également la population à défricher toujours plus de zones forestières pour subvenir à des besoins sans cesse grandissants. Les arbres abattus lors de la création de nouvelles parcelles agricoles sont collectés pour servir de bois de feu ou à la production de charbon de bois.

Les variables qui modélisent l'agriculture sont la *distance aux zones agricoles*, la *distance aux zones de complexe rural*, la *présence de zones agricoles* et la *présence de complexe rural* dans l'échantillon Landsat. Les données nécessaires à la construction de ces variables sont extraites de la carte d'occupation du sol de la RDC au 1 : 3 000 000 (Vancutsem *et al.*, 2009). Le complexe rural est une mosaïque de jachères forestières, de jardins de case, de cultures vivrières (manioc, maïs, arachide, bananes,...) et de plantations villageoises. Cette occupation du sol correspond aux zones à forte activité anthropique. Les zones agricoles comprennent les zones agricoles cultivées en permanence telles que les plantations industrielles de palmiers et de caféiers.

- L'exploitation forestière

L'exploitation forestière est une cause directe de la déforestation et la dégradation. L'exploitation forestière industrielle est modélisée par la *présence de concessions forestières*. Les concessions forestières peuvent avoir un impact direct (coupes d'arbres) et indirect sur la déforestation avec la construction de routes pour le transport de bois (ce qui rend également les zones plus accessibles à la population). Cet impact indirect sera modélisé par la variable *distance aux concessions forestières* appartenant à la catégorie des facteurs économiques. L'exploitation forestière locale indépendante des défrichements agricoles, qui concerne surtout la collecte de bois de chauffe, n'a pas pu être modélisée par manque de données.

- Les facteurs économiques

Le facteur économique principal qui influence la déforestation de manière indirecte est la demande croissante en produits forestiers et l'accessibilité aux marchés. La proximité aux villes peut également influencer la déforestation car la demande en denrées agricoles et en bois de chauffe y est plus importante.

En ce qui concerne l'exploitation commerciale du bois, l'impact direct est lié aux coupes de bois, cependant celles-ci peuvent être sélectives et, de ce fait, ne pas être nécessairement une cause de déforestation. Par contre, les concessions forestières ont un impact indirect potentiel par la construction et l'entretien d'infrastructures de transport permettant la colonisation de nouveaux espaces forestiers.

Un autre facteur qui influence la déforestation est la présence d'exploitations minières. Comme pour les concessions forestières, l'impact direct des exploitations minières est souvent très local alors que leur impact indirect via la construction de routes d'accès et la demande en main-d'œuvre, favorisant un regroupement de la population au sein des zones normalement peu accessibles (Yambayamba, 2009).

Les variables qui modélisent les facteurs économiques sont la *distance aux exploitations minières*, la *distance aux concessions forestières*, la *distance aux villes* et la *distance aux différents pays frontaliers* (Figure 6).

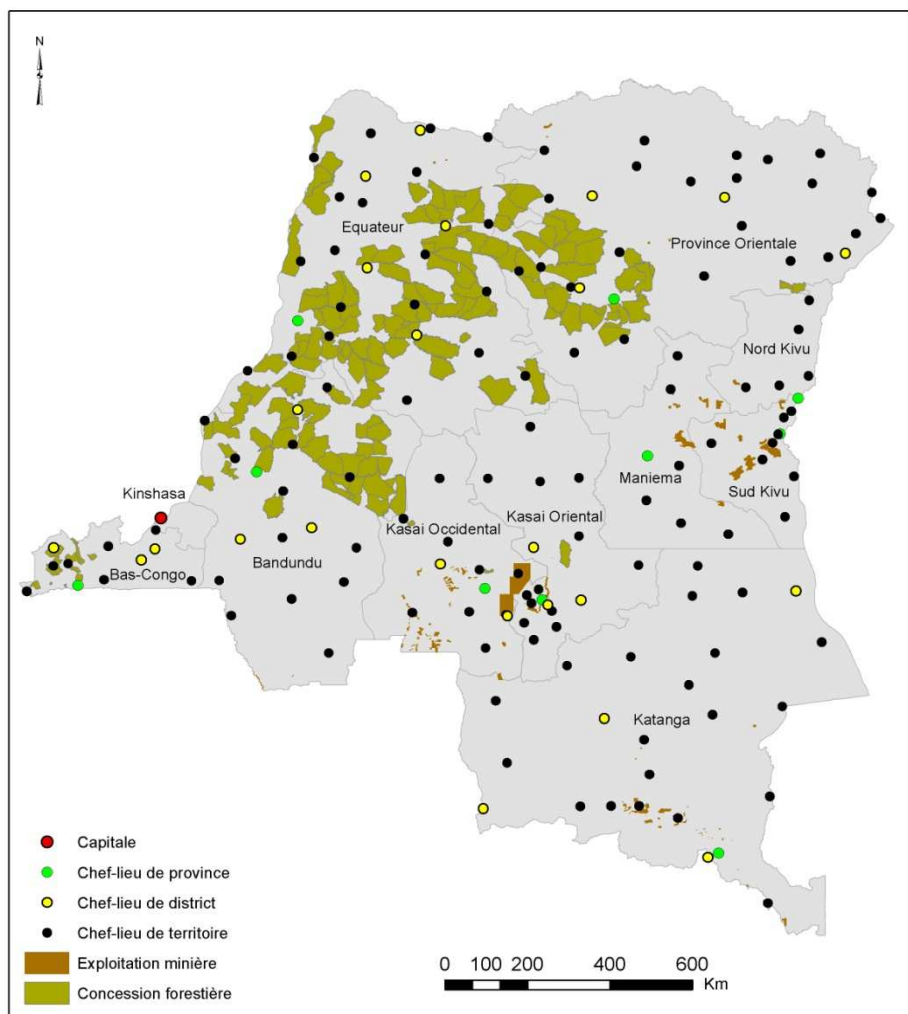


Figure 6 - Répartition des exploitations minières, concessions forestières et villes (source : Ministère de l'Environnement, Conservation de la Nature et Tourisme, RDC).

- Les infrastructures de transport

La présence de routes et l'ouverture de nouvelles routes rendent les forêts plus accessibles par la population. Une pression plus importante est donc attendue dans ces régions.

De même, la présence de rivières navigables permet d'accéder aux zones forestières et de transporter le bois vers les marchés.

Les variables qui modélisent les transports sont la *distance minimale aux différents types de route*, la *présence de routes* à l'intérieur de l'échantillon et la *distance aux axes navigables* (Figure 7).

Pour calculer ces variables, une distinction a été établie entre 3 types de routes (d'après la classification de la carte générale de la RDC (UCL, 2007)) :

- I. Les routes principales (routes asphaltées et routes de liaison)
- II. Les routes secondaires (routes et pistes peu fréquentées ou à circulation exceptionnelle)
- III. Les routes locales (dont les routes à l'intérieur des concessions forestières).

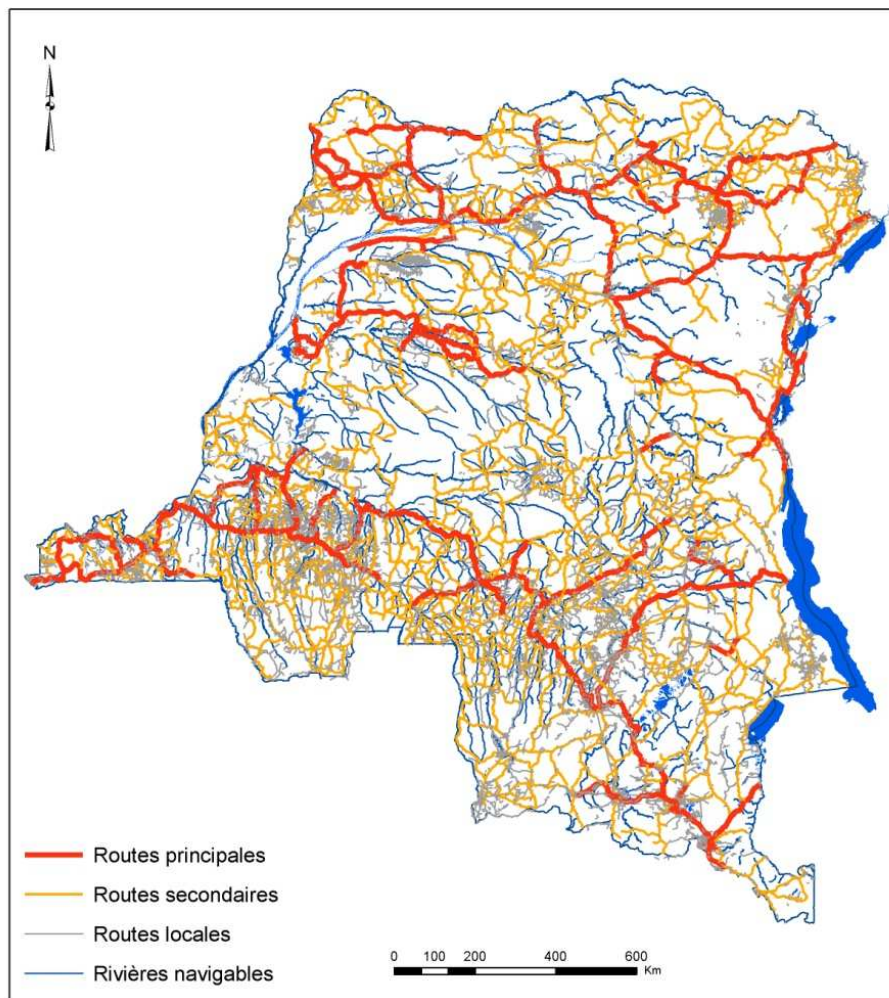


Figure 7 – Réseaux routier et de voies navigables (source : UCL, 2007).

- Les facteurs démographiques

La pression démographique est un facteur de la déforestation. Une population plus nombreuse entraîne un besoin plus important en terres agricoles et en bois de chauffage en raison de l'importance de l'économie de subsistance. Le taux de croissance annuel de la population congolaise est de l'ordre de 3,16 % (de Saint Moulin, 2006), l'augmentation de la population n'est pas uniforme sur tout le territoire de la RDC, le tableau 1 montre les différents taux de croissance pour chaque province (de Saint Moulin, 2006). Ces taux de croissance par Provinces ont été calculés sur base des données du recensement général de la population congolaise en 1984 ainsi que sur base des projections des données de population pour l'année 2005 réalisées par Léon de Saint Moulin. Ces taux de croissance combinés à la densité de population pour 2005 (Kibambe Lubamba et Defourny, 2010) ont été utilisés pour calculer l'augmentation de la population entre 1990-2000 et 2000-2005.

Tableau 1 - Taux de croissance par Province (source : de Saint Moulin, 2006)

<i>Provinces</i>	Taux de croissance [%]
Kinshasa	5,15
Bas-Congo	2,5
Bandundu	2,55
Equateur	2,75
Pr. Orientale	2,30
Maniema	2,15
Nord-Kivu	3,60
Sud-Kivu	3,60
Kantanga	3,30
Kasai Oriental	3,50
Kasai Occidental	2,60
National	3,16

Les facteurs démographiques sont représentés par les variables *augmentation de la population* et *densité de villages*.

- Les facteurs socio-politiques

Les aires protégées jouent un rôle important sur la protection des forêts (Figure 8) ; elles couvrent 11% de la superficie du territoire nationale. Il est à relever en outre que la RDC comprend cinq sites reconnus par le Patrimoine Mondial (Parc National des Virunga, Parc National de la Garamba, Parc National de Kahuzi-Biega, Parc National de la Salonga, Réserve de Faune à Okapi).

Le code forestier de la RDC a été promulgué en août 2005. Ses mesures d'application n'ont cependant été initiées qu'il y a quelques années. Ainsi, bien que constituant un outil juridique fort pour la gestion durable des forêts congolaises, le code forestier

de la RDC n'a sans doute pas encore eu l'impact attendu susceptible d'influer sur les dynamiques de déforestation et de dégradation forestière, en particulier pour les périodes de temps concernées.

Deux autres variables appartenant à cette catégorie sont les zones de conflits et les camps de réfugiés qui provoquent un afflux massif de population dans une même région, ce qui augmente le risque de déforestation. Les données pour modéliser ces variables étant insuffisantes, elles n'ont pas été incluses dans le modèle.

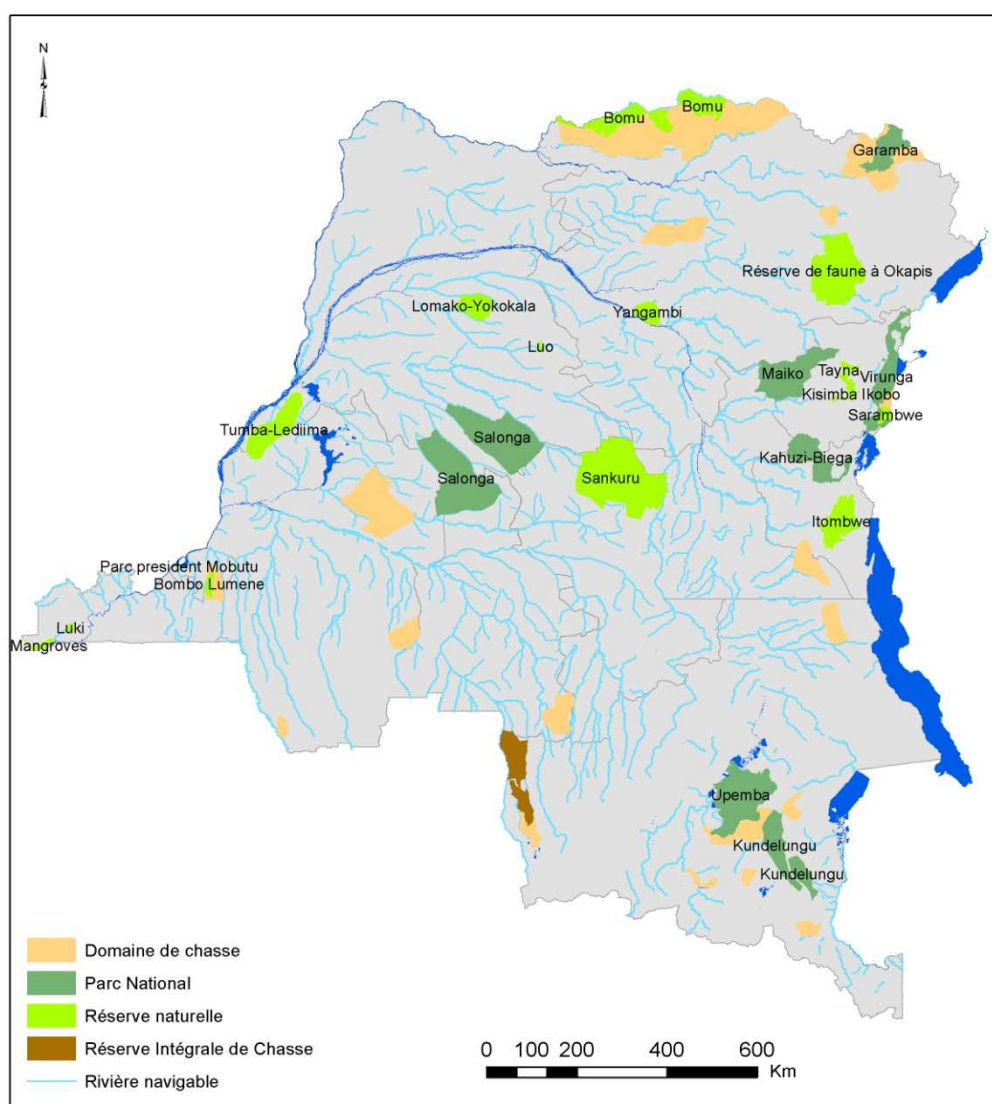


Figure 8 - Répartition des aires protégées (source : Observatoire des Forêts d'Afrique Centrale).

- Les facteurs biophysiques

Différents facteurs biophysiques peuvent jouer un rôle dans les processus de déforestation et de dégradation. La fragmentation du massif forestier et la présence de forêts dégradées rend la forêt plus facile d'accès et plus vulnérable à la dégradation et à la déforestation.

La présence de rivières et du fleuve peut ralentir la déforestation car les terres inondables sont moins accessibles, le défrichement de nouvelles terres sans grand intérêt et les coupes d'arbre difficiles sur ces sols hydromorphes.

Les variables qui modélisent les facteurs biophysiques sont la *présence de forêts dégradées*, la *présence de rivières navigables et de lac*, la *pente* et l'indice de fragmentation de Matheron (Matheron, 1970) pour la *fragmentation forestière* calculée selon la formule suivante :

$$M = \frac{N_{F-NF}}{\sqrt{N_F} \cdot \sqrt{N}}$$

où N_{F-NF} : le nombre de limites entre les pixels forêts et non forêts.

N_F : le nombre total de pixels en forêt

N : le nombre total de pixels

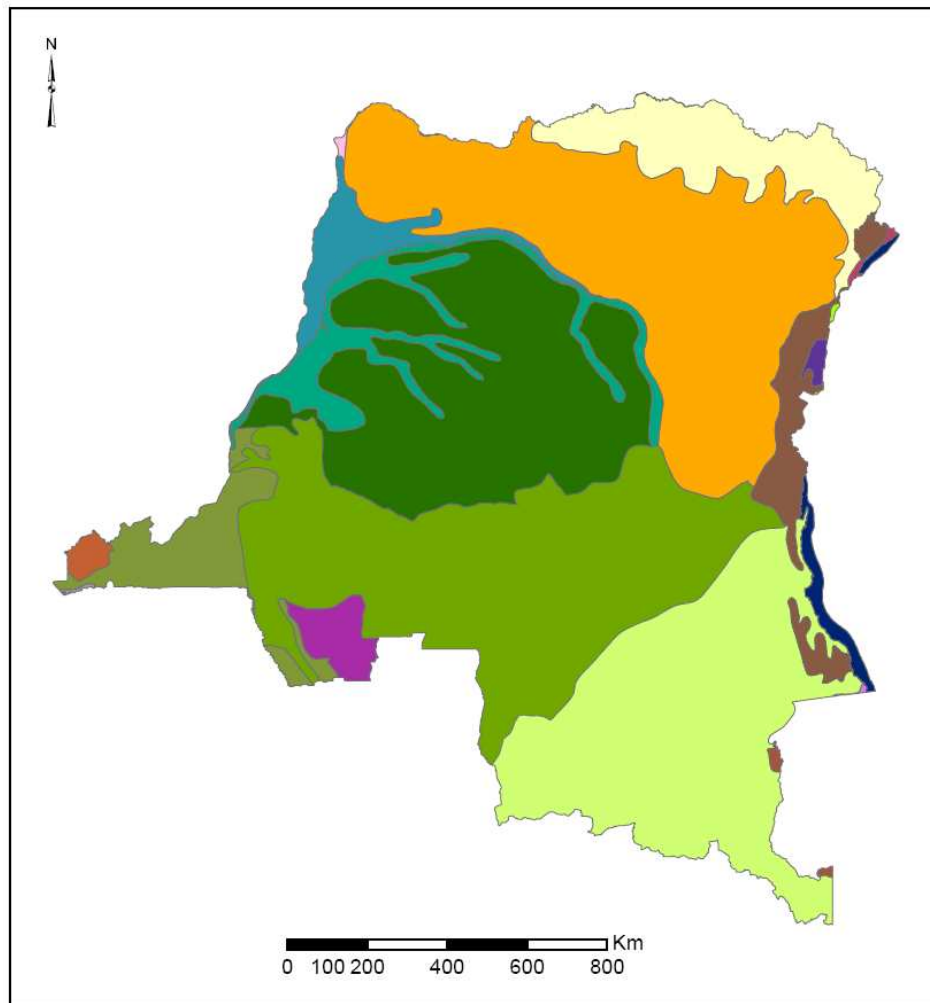
5.2. Quantification des variables explicatives potentielles

La deuxième étape consiste au calcul des différentes variables pouvant potentiellement expliquer la déforestation. Ces variables ont été calculées à l'aide d'outils SIG et à partir de données provenant principalement de la base de données UCL-Géomatique (UCL, 2007). Lorsque les données étaient disponibles, certaines variables ont été actualisées entre les périodes 1990-2000 et 2000-2005. C'est le cas pour les variables concernant la population, les exploitations minières, la fragmentation forestière et la présence de forêts dégradées. Chaque variable explicative calculée se rapporte à un quart d'image Landsat de 10x10 km de côté. Les variables de type « *distance à un objet* » (distance aux routes, distance aux villes, *etc.*) sont toujours calculées en prenant la plus petite distance existante entre cet objet et la surface de l'échantillon Landsat. Les variables de type « *présence d'un objet* » (présence d'exploitations minières, présence de routes, *etc.*) sont toujours calculées en prenant en compte la surface d'emprise de cet objet par rapport à la surface totale de l'échantillon.

5.3. Choix des échelles d'analyse

Afin de mieux prendre en compte la diversité et les caractéristiques locales du territoire de la RDC, deux échelles différentes ont été retenues pour la modélisation : l'échelle nationale couvrant l'entièreté du territoire nationale et

l'échelle sous-nationale qui correspond à 11 zones délimitées sur base des écorégions du WWF (Olson *et al.*, 2001) et de la carte d'occupation du sol au 1 : 3 000 000 (Vancutsem *et al.*, 2009). Pour délimiter ces 11 zones, le pays a été subdivisé en grands biomes sur base des écorégions du WWF (Figure 9). Ces zones ont ensuite été redécoupées à partir de la carte d'occupation du sol. Lors de délimitation de ces zones, il a aussi fallu veiller à avoir un nombre suffisant d'échantillons dans chaque zone, soit un minimum de 35 échantillons par zone pour la période 1990-2000.



Ecorégion	
	Northeastern Congolian lowland forests
	Northern Congolian forest-savanna mosaic
	Western Congolian swamp forests
	Eastern Congolian swamp forests
	Central Congolian lowland forests
	Southern Congolian forest-savanna mosaic
	Western Congolian forest-savanna mosaic
	Albertine Rift montane forests
	Central Zambesian Miombo woodlands
	Angolan Miombo woodlands
	East Sudanian savanna
	Rwenzori-Virunga montane moorlands
	Victoria Basin forest-savanna mosaic
	Central African mangroves
	Northwestern Congolian lowland forests
	Zambesian flooded grasslands
	Atlantic Equatorial coastal forests
	Itigi-Sumbu thicket
	Lake

Figure 9 – Cartographie des écorégions (source : Olson *et al.*, 2001).

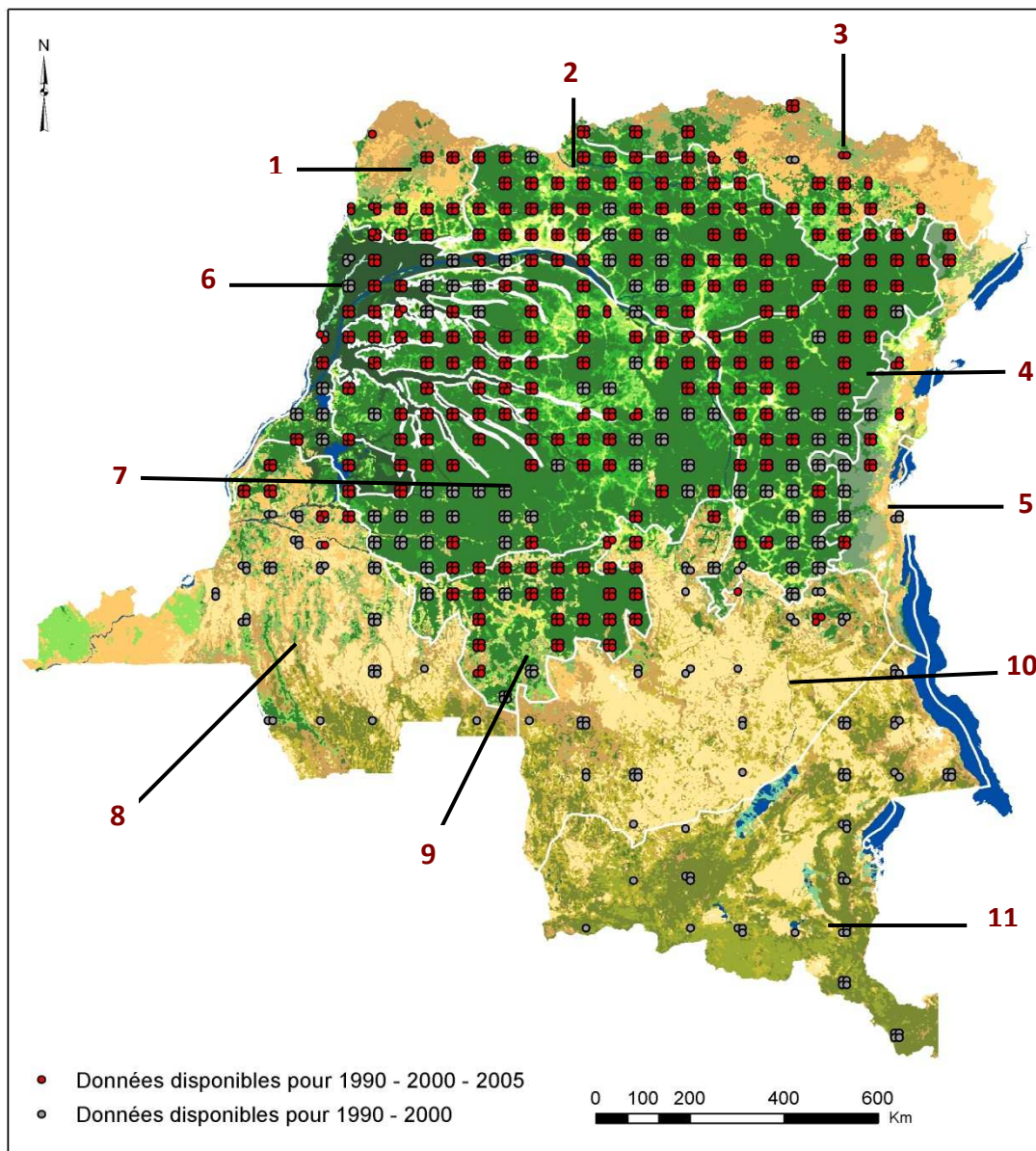


Figure 10 - Délimitation des 11 zones pour les analyses sous-nationales et disponibilité des estimations de déforestation et dégradation pour les deux périodes d'intérêt.

La figure 10 présente les différentes zones obtenues dénommées ci-après :

- zone 1 : mosaïque forêt – savane, au Nord-ouest
- zone 2 : transition forêt dense – forêt secondaire
- zone 3 : mosaïque forêt – savane, au Nord-est
- zone 4 : forêt dense humide, à l'Est
- zone 5 : forêt d'altitude
- zone 6 : forêt édaphique
- zone 7 : forêt dense humide, au centre
- zone 8 : mosaïque forêt – savane, au Sud-ouest
- zone 9 : transition forêt dense – forêt secondaire
- zone 10 : mosaïque forêt – savane, au Sud-est
- zone 11 : forêt claire de type Miombo.

5.4. Sélection des échantillons Landsat

Préalablement aux analyses statistiques, les échantillons Landsat ont été sélectionnés afin de ne retenir pour l'analyse que les échantillons qui sont effectivement situés en zone forestière. Les échantillons qui ont une superficie forestière inférieure à 25% de leur surface ont été éliminés de l'analyse car la qualité de l'estimation du taux de déforestation décroît avec la superficie forestière. Il serait néanmoins intéressant d'examiner spécifiquement l'impact de ce choix. Les échantillons utilisés dans l'analyse sont représentés à la figure 10.

5.5. Sélection des variables et choix du modèle de régression

Une analyse univariée exploratoire calculant la corrélation entre les variables explicatives et la déforestation/dégradation a d'abord été effectuée pour identifier les relations entre la déforestation/dégradation et chacune des variables explicatives. Afin de s'affranchir des problèmes de colinéarité entre les variables explicatives, il convient de veiller à ne pas combiner des variables trop corrélées lors de l'élaboration des modèles. Il a été décidé que les variables présentant un coefficient de corrélation supérieur à 0,60 (en valeur absolue) ne pourront se retrouver en même temps dans le modèle.

Quatre approches différentes ont été utilisées pour la sélection des variables explicatives. La première est une sélection de type *Stepwise*, qui part d'un modèle de base et, qui à chaque itération, peut ajouter ou enlever une variable du modèle et analyser l'effet de cet ajout ou retrait. Le nombre final de variables reprises dans le modèle n'est pas défini a priori.

Pour les trois autres approches, le nombre maximal de variables retenues par le modèle doit être précisé, celui-ci sera fonction du nombre d'échantillons disponibles pour l'analyse. La deuxième approche utilisée est la sélection *Forward* qui sélectionne les variables une à une, en commençant par la plus significative. La troisième méthode de sélection, de type *Backward*, part d'un modèle incluant toutes les variables et les élimine une par une en commençant par la moins significative. Et enfin, la quatrième approche est la recherche exhaustive qui analyse toutes les combinaisons possibles des variables. Ces analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel R version 2.9 grâce notamment aux outils développés dans le package Leaps² pour la sélection *Forward*, *Backward* et la recherche exhaustive. Sur base des résultats de cette analyse, on obtient les différentes combinaisons de variables qui donnent les meilleurs résultats.

² Leaps: regression subset selection, par T. Lumley.

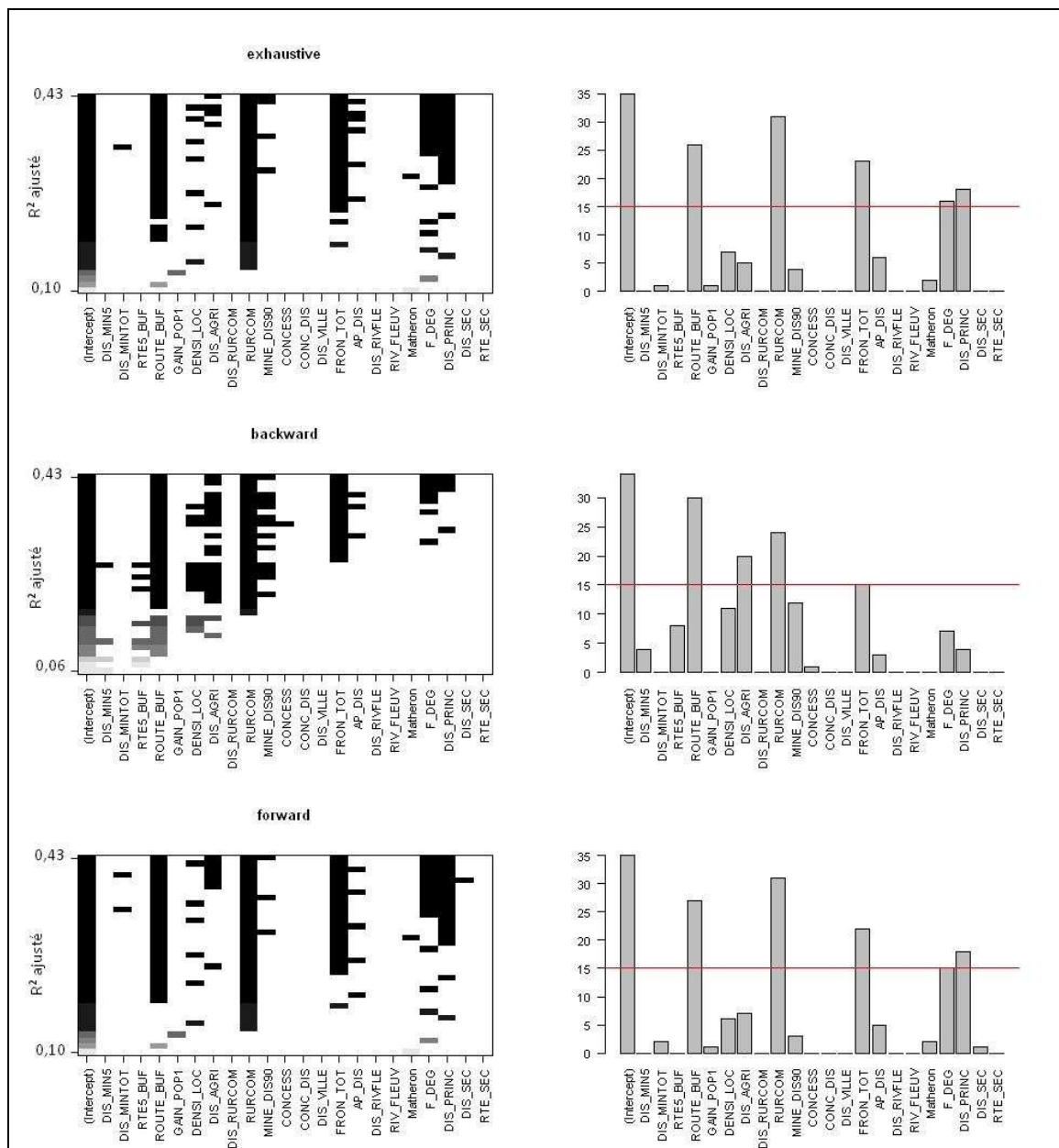


Figure 11 - Exemple de résultats pour la sélection des variables.

A titre d'exemple, la figure 11 présente le type de résultats obtenus par une telle approche mobilisant différentes méthodes. Les trois graphiques de la colonne de gauche (Figure 11) représentent les variables choisies par les trois dernières approches. Les graphiques de la colonne de droite indiquent la fréquence avec laquelle chaque variable est reprise dans les différents modèles. Sur base de ces graphiques, différentes combinaisons de variables sont testées dans des modèles de régressions multivariées. Ces modèles sont ensuite affinés en enlevant les variables corrélées entre elles ainsi que les éventuelles variables non significatives.

6. Résultats

Les résultats des analyses statistiques univariées sont présentées dans une première section en procédant d'abord à l'échelle nationale respectivement pour la période 1990-2000 et 2000-2005. Ensuite, les mêmes analyses sont répétées à l'échelle sous-nationale pour chacune des 11 zones séparément. Ces résultats permettent d'identifier les variables corrélées positivement aux processus de déforestation/dégradation et de quantifier l'intensité de la relation.

Dans une deuxième section, les modèles construits sur base des analyses multivariées sont établis d'abord pour l'échelle nationale et pour les périodes d'intérêt et, ensuite, pour les différentes zones correspondant à l'échelle sous-nationale afin de permettre aux spécificités locales d'être mises en évidence.

Enfin, sur base de ces différents résultats, la stabilité des modèles d'une période à l'autre et d'une zone à l'autre est discutée en détails.

6.1 Résultats univariés

Analyses univariées à l'échelle nationale

Le calcul des coefficients de corrélation de Pearson (r) au niveau national permet d'examiner l'existence d'une relation linéaire entre la variable à expliquer et chacune des variables potentiellement explicatives. Combiné à l'analyse du niveau de significativité de la relation (p -values $< 0,05$), cela fournit un premier niveau d'information concernant la dépendance de la déforestation/dégradation par rapport aux variables explicatives. Le tableau 2 présente les 5 variables les plus corrélées à la déforestation/dégradation au niveau national pour les deux périodes 1990-2000 et 2000-2005. Pour chaque période, toutes les relations présentées à la table 2 sont très hautement significatives (p -values $< 0,001$), la p -values ou $Pr(> t)$ indiquant la probabilité d'avoir rejeté l'hypothèse nulle, à savoir l'absence de dépendance entre les deux variables, par chance et non parce que la relation existe vraiment. Sur base de l'hypothèse d'une relation linéaire, le coefficient de détermination (r^2) peut être interpréter comme la proportion de la variance de la superficie affectée par la déforestation ou la dégradation qui peut être imputée à la variable explicative. Il convient de rappeler ici qu'une telle relation n'implique pas nécessairement une relation de causalité. Ainsi, sur base des résultats obtenus, il apparait que la présence du complexe rural explique à elle-seule 38 % de la variabilité de la superficie affectée par la déforestation ou la dégradation dans le pays entre 1990 et 2000.

En comparant les résultats de l'analyse univariée pour les deux périodes (Tableau 2, colonne de gauche), on remarque que les cinq variables avec les coefficients de corrélation les plus élevés sont strictement les mêmes. Elles apparaissent dans une ordre légèrement différent. Ainsi, la variable *complexe rural* est la plus corrélée ($r^2 = 0,38$) pour 1990-2000, tandis que c'est la *présence de forêts dégradées* qui est la plus corrélée pour 2000-2005.

Tableau 2 – Liste des variables les plus corrélées selon l’analyse univariée à l’échelle nationale.

		Déforestation et dégradation brute				Déforestation et dégradation nette			
1990 – 2000			r	r²	Pr(> t)		r	r²	Pr(> t)
		Complexe rural	0,61	0,38	0,0000	Complexe rural	0,52	0,26	0,0000
		Augmentation de la population	0,49	0,24	0,0000	Augmentation de la population	0,40	0,16	0,0000
		Forêts dégradées	0,47	0,22	0,0000	Forêts dégradées	0,37	0,14	0,0000
		Routes	0,41	0,17	0,0000	Routes	0,35	0,13	0,0000
		Fragmentation	0,32	0,10	0,0000	Densité de villages	0,29	0,09	0,0000
2000 – 2005			r	r²	Pr(> t)		r	r²	Pr(> t)
		Forêts dégradées	0,56	0,32	0,0000	Forêts dégradées	0,34	0,12	0,0000
		Augmentation de la population	0,41	0,17	0,0000	Complexe rural	0,29	0,08	0,0000
		Fragmentation	0,41	0,17	0,0000	Augmentation de la population	0,29	0,08	0,0000
		Complexe rural	0,40	0,16	0,0000	Routes	0,21	0,05	0,0000
		Routes	0,37	0,14	0,0000	Distance aux zones agricoles	-0,20	0,04	0,0000
						Densité de villages	0,19	0,04	0,0000
					Fragmentation	0,19	0,04	0,0000	

Deux approches différentes ont été testées dans la manière de calculer la variable représentant la déforestation et la dégradation. La partie de gauche du tableau 2 reprend les résultats en utilisant comme variable dépendante la somme de la superficie affectée par la déforestation ou par la dégradation (en ha). La partie de droite reprend les résultats en utilisant la somme de la déforestation nette et de la dégradation nette, c’est-à-dire que la superficie affectée par la déforestation moins celle concernée par la reforestation et de même avec la dégradation et la régénération forestière.

D’une manière générale, les mêmes variables ressortent comme étant corrélées de manière très hautement significative avec la variable dépendante. Cependant, les variables explicatives semblent moins bien corrélées avec la déforestation/dégradation nette, surtout pour la période 2000-2005 où la variable la plus corrélée possède un coefficient de corrélation de 0,34 contre 0,56 avec la déforestation/dégradation brute.

Le but de notre étude étant d’analyser les causes de la déforestation et de la dégradation d’un point de vue spatial, le choix de la variable dépendante s’est porté sur la déforestation/dégradation brute vu que les processus de reforestation et

régénération n'ont pas nécessairement lieu de manière concomitante avec ceux de déforestation et dégradation.

Certaines variables apparaissent corrélées négativement avec la déforestation/dégradation. Il s'agit de la *distance aux routes locales et secondaires*, la *présence d'aires protégées* et la *distance aux frontières*. D'autres variables apparaissent très peu corrélées ($r < 0,1$) avec la variable déforestation/dégradation. C'est le cas pour les variables *présence de concessions forestières*, *distance aux concessions forestières*, *présence d'axes navigables*, *distance aux axes navigables*, *présence d'exploitations minières* et *distance aux exploitations minières*.

La faible corrélation, au niveau national, de ces variables montre l'importance de travailler à deux échelles d'analyse différentes. En effet, certaines variables possèdent des corrélations plus élevées ($r > 0,25$) avec la déforestation/dégradation pour certains modèles sous-nationaux. C'est le cas notamment des variables *distance aux concessions forestières* pour les zones 1, 2 et 6 et *distance aux exploitations minières* pour les zones 4 et 9.

En revanche, la variable *présence d'exploitations minières* ne ressort jamais comme étant très corrélée avec la déforestation/dégradation et ce pour les deux échelles d'analyse, probablement en raison du caractère assez local de l'impact même très important de ces exploitations.

Un autre choix méthodologique a été d'additionner la déforestation avec la dégradation. Le tableau 3 montre la corrélation entre ces deux processus pour les deux périodes. Elle tourne autour de 0,6 ce qui montre que les deux processus tels qu'observés vont vraiment dans le même sens. En les additionnant, on peut considérer qu'on renforce le signal à expliquer.

Tableau 3 - Analyse de la corrélation entre déforestation et dégradation

	Dégradation 1990 - 2000	Dégradation 2000 - 2005
Déforestation 1990 - 2000	0,5874	/
Déforestation 2000 - 2005	/	0,6095

Analyse univariée pour la période 1990 – 2000 à l'échelle sous-nationale

La synthèse des cinq variables les plus corrélées au processus de déforestation ou dégradation pour chaque zone est présentée à la figure 12.

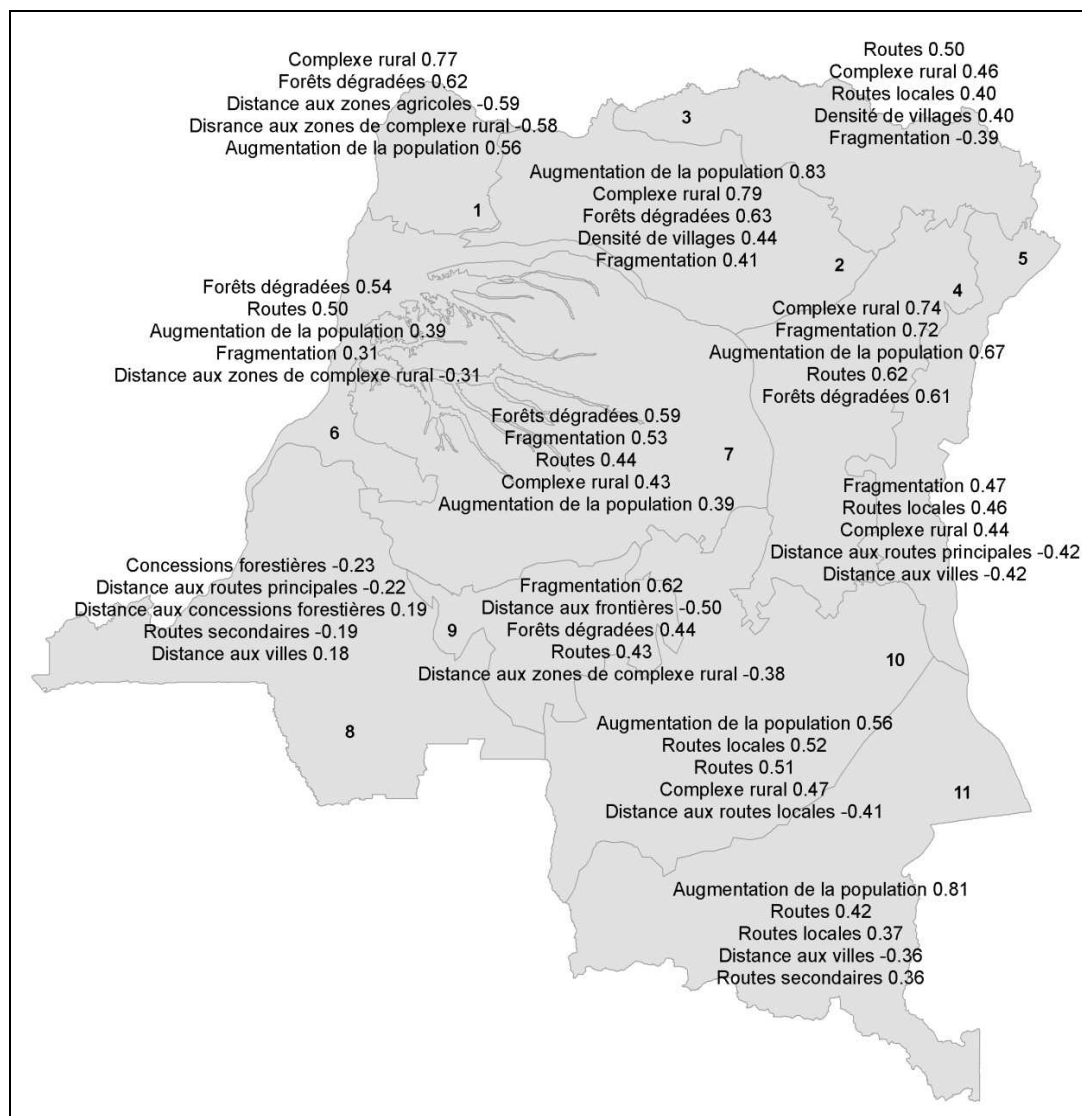


Figure 12 – Listes des variables les plus corrélées à la déforestation/dégradation et leur coefficient de corrélation par zone pour la période 1990-2000.

La comparaison des résultats de l'analyse univariée à l'échelle nationale avec celle par zones montre que certaines variables liées à la déforestation et à la dégradation forestière interviennent tant au niveau national que sous-national. La zone 8 ne présente pas de variable très corrélée avec la déforestation et la dégradation contrairement aux autres zones. Ceci peut s'expliquer par la mauvaise répartition des échantillons dans la zone (Figure 10), la faible densité forestière et l'effet de la capitale (Kinshasa) qui entraîne une forte polarité dans cette zone. C'est pourquoi cette zone sera exclue de l'analyse.

Dans les paragraphes qui suivent, les résultats de l'analyse univariée sont commentés pour chaque variable de manière succincte. Pour visualiser leur influence respective pour les différentes zones, la figure 13 représente dans l'espace les valeurs du coefficient de corrélation pour les variables les plus représentées. Cette figure illustre bien l'hétérogénéité spatiale des causes de déforestation et dégradation sur le territoire nationale.

La variable *complexe rural* présente une corrélation de 0,61 au niveau national, tandis que la corrélation par zones varie de 0,43 à 0,79 pour 7 zones. Les zones 1, 2 et 4 présentent la corrélation la plus élevée ($r > 0,70$). Cependant, cette même variable n'est pas corrélée à la déforestation et à la dégradation pour les zones 6, 9 et 11. Dans les zones 10 et 11, l'absence de corrélation s'explique par le fait que la classe d'occupation du sol complexe rural y est peu présente.

L'*augmentation de la population* présente un taux de corrélation de 0,49 avec la déforestation et la dégradation au niveau national. En revanche, pour les zones 2 et 11, cette corrélation s'élève à plus de 0,80. On observe une corrélation moyenne ($r = 0,60$) pour les zones 1, 4 et 10 et une faible corrélation ($r = 0,39$) pour les zones 6 et 7. Pour la zone 3, la variable *densité de villages* qui fait partie de la même catégorie de variables que *l'augmentation de la population* se retrouve parmi les cinq variables les plus corrélées. La déforestation et la dégradation forestière ne semblent pas corrélées à l'augmentation de la population pour la zone 5, sans doute du fait que la population y est déjà très nombreuse (possible saturation des terroirs).

Les zones 1, 2, 4, 6 et 7 présentent une corrélation supérieure à 0,50 pour la variable *présence de forêts dégradées*, alors que cette corrélation est de 0,47 au niveau national. Cependant, cette variable a moins d'influence dans les zones 3, 5 et 10 (coefficient de corrélation compris entre 0,20 et 0,37). Aucune corrélation n'est apparue pour la zone 11.

Le coefficient de corrélation pour la variable *présence de routes* varie entre 0,42 et 0,62 pour 7 zones sur 10 et est de 0,41 au niveau national. La zone 4 est celle où la présence de routes est la plus corrélée à la déforestation et la dégradation ($r = 0,62$). La variable *présence de route* n'apparaît pas de manière significative pour les zones 1, 2 et 5. Cependant, pour la zone 5, les variables *routes locales* et *distance aux routes principales* qui font partie de la même catégorie de variables que la *présence de route* se retrouvent parmi les cinq variables les plus corrélées au phénomène de déforestation et de dégradation forestière.

La variable *fragmentation* qui présente un coefficient de corrélation de 0,32 au niveau national, montre le même comportement pour 7 zones sur 10 avec un coefficient de corrélation qui varie de -0,39 à 0,72. Les zones 4 et 9 sont celles où la fragmentation et la déforestation/dégradation sont les plus corrélées (de 0,62 à 0,72). Les zones 2 et 6 présentent un coefficient moins élevé, autour de 0,35. Les zones 5 et 7 présentent un coefficient élevé, autour de 0,50. Pour la zone 3, la fragmentation est corrélée négativement avec la déforestation/dégradation, ceci signifie que les échantillons les plus fragmentés ne sont pas ceux qui possèdent une

déforestation ou dégradation élevée. Ceci peut s'expliquer par le fait que les échantillons très fragmentés ne possèdent plus beaucoup de forêt, et ne montrent donc pas une grande quantité de déforestation ou de dégradation. La variable *fragmentation* n'apparaît pas dans les zones 1, 10 et 11.

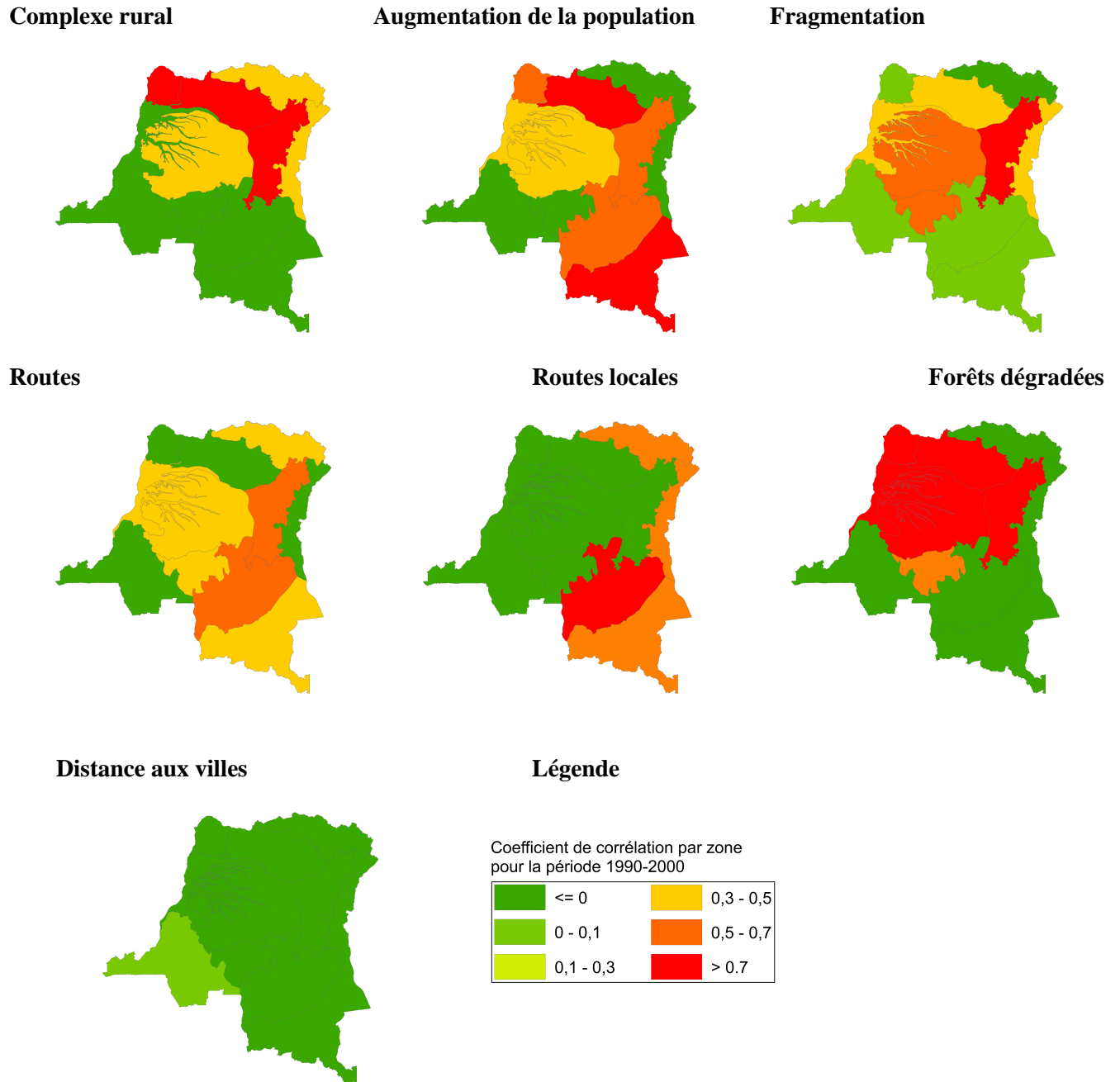


Figure 13 – Représentation spatiale des variables les plus corrélées à la déforestation/dégradation selon leur coefficient de corrélation par zone pour la période 1990-2000.

Analyse univariée pour la période 2000 – 2005 à l'échelle sous-nationale

La synthèse des cinq variables les plus corrélées au processus de déforestation ou dégradation pour la période 2000-2005 et pour chaque zone est présentée à la figure 14.

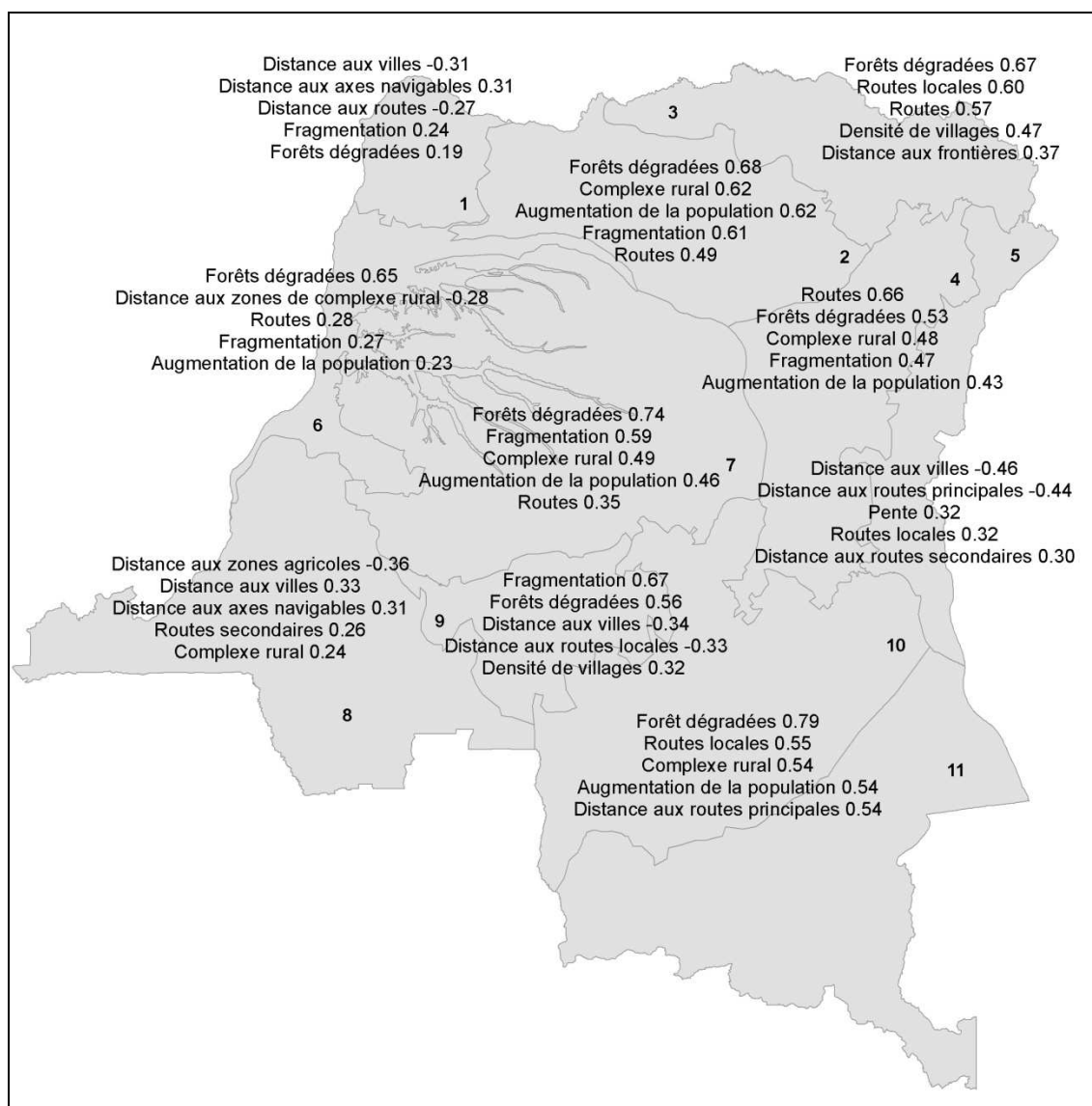


Figure 1413 - Listes des variables les plus corrélées à la déforestation/dégradation et leur coefficient de corrélation par zone pour la période 2000-2005

Si on compare les résultats de l'analyse univariée au niveau national avec les résultats par zone, on remarque tout de suite que certaines variables jouent un rôle important tant au niveau national que sous-national.

En comparant les résultats pour la période 2000-2005 avec la période 1990-2000, il ressort, d'une manière générale, que ce sont les mêmes variables qui sont le plus corrélées avec la déforestation et la dégradation pour les deux périodes. La comparaison des figures 13 et 15 permet d'apprécier les nuances entre les deux périodes.

Pour les zones 4, 6 et 7 les cinq variables les plus corrélées sont identiques d'une période à l'autre. Pour les zones 2, 3, 5 et 10, au moins trois variables sur 5 sont communes aux deux périodes, tandis que deux variables sont communes pour la zone 9. Pour la zone 1, seule la variable *forêts dégradées* est commune aux deux périodes. De plus, les coefficients de corrélation sont assez faibles (de 0,19 à 0,31, en valeur absolue). La zone 8 présente des coefficients de corrélation un peu plus élevés pour la période 2000-2005 (de 0,24 à 0,36, en valeur absolue) par rapport à 1990-2000. La zone 11, quant à elle, ne contient pas de points pour la période 2000-2005.

La variable *présence de forêts dégradées* qui possède un coefficient de corrélation de 0,56 au niveau national, présente le même comportement pour 8 zones sur 10 avec un coefficient de corrélation qui varie de 0,19 à 0,79. Les zones 3, 4, 6, 7 et 10 sont celles où la présence de forêts dégradées et la déforestation/dégradation sont les plus corrélées (plus de 0,65). Les zones 5 et 9 possèdent un coefficient un peu moins élevé, autour de 0,55. Le coefficient de corrélation pour la zone 1 est le moins élevé ($r=0,19$). La variable *forêts dégradées* n'apparaît pas dans les zones 5 et 8, ce qui peut être expliqué par le faible nombre d'échantillons dans ces zones pour cette période (25 et 20 respectivement).

La variable *augmentation de la population* qui présente un coefficient de corrélation de 0,49 au niveau national, montre le même comportement pour 5 zones sur 10 avec un coefficient de corrélation qui varie de 0,23 à 0,62. Les zones 2 et 10 sont celles où l'augmentation de la population et la déforestation/dégradation sont les plus corrélées (plus de 0,54). Les zones 4 et 7 ont un coefficient moins élevé, autour de 0,45. La zone 6 possède un coefficient plus faible de 0,23. La variable *augmentation de la population* n'apparaît pas dans les zones 1, 3, 5, 8 et 9. Cependant, pour les zones 3 et 9, la variable *densité de villages* qui fait partie de la même catégorie de variable que l'augmentation de la population se retrouve parmi les cinq variables les plus corrélées. Par ailleurs, et en contraste avec ce qui a été observé pour la période 1990-2000, l'augmentation de la population n'est pas corrélée avec la déforestation pour la zone 1 ($r = 0,06$ contre $r = 0,56$).

La variable *fragmentation* qui possède un coefficient de corrélation de 0,41 au niveau national, montre le même comportement pour 6 zones sur 10 (r variant de 0,24 à 0,67). Les zones 2, 7 et 9 sont celles où la fragmentation et la déforestation/dégradation sont les plus corrélées (de 0,59 à 0,67). Les zones 1 et 6 présentent un coefficient moins élevé, autour de 0,25. La zone 4 présente un coefficient de 0,47. La variable *fragmentation* n'apparaît pas dans les zones 3, 5, 8 et 10.

La variable *complexe rural* qui présente un coefficient de corrélation de 0,40 au niveau national, montre le même comportement pour 5 zones sur 10 (r variant de 0,24, à 0,62). La corrélation la plus élevée concerne la zone 2, alors que la moins élevée est observée dans la zone 8. La variable *complexe rural* n'apparaît pas dans les zones 1, 3, 5, 6 et 9. Cependant, pour la zone 6, la variable *distance aux zones de complexe rural* se retrouve parmi les cinq variables les plus corrélées. Les zones 3, 5 et 9 ont un coefficient de corrélation égal à 0,32 ; 0,17 et 0,14 respectivement. Le coefficient de corrélation pour la zone 1 est de 0,072, il est dix fois inférieur à ce qui a été observée pour la période 1990-2000 ($r = 0,77$).

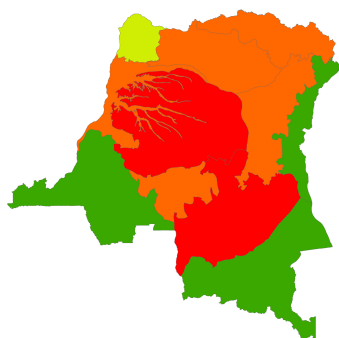
La variable *présence de routes* qui présente un coefficient de corrélation de 0,37 au niveau national, montre le même comportement pour 5 zones sur 10 avec un coefficient de corrélation qui varie de 0,28 (zones 6 et 7) à 0,66 (zone 4). Les zones 2 et 3 possèdent un coefficient élevé, autour de 0,50. La variable *présence de routes* n'apparaît pas dans les zones 1, 8, 9 et 10. Cependant, pour ces zones, des variables comme la *distance aux routes*, la *présence de routes locales* et la *présence de routes secondaires* qui font partie de la même catégorie de variables que la *présence de routes* se retrouvent parmi les cinq variables les plus corrélées. Pour les zones 9 et 10, le coefficient de corrélation entre la présence de routes et la déforestation/dégradation oscille autour de 0,35. La déforestation/dégradation dans les zones 5 et 8 n'est pas corrélée à la présence de routes, ceci est sans doute dû au faible nombre d'échantillons présents dans ces deux zones. Le coefficient de corrélation pour la zone 1 est de -0,01, ce qui n'est pas en cohérence avec ce qui avait été observé pour la période 1990-2000 où le coefficient était de 0,40.

Le tableau 4 ci-dessous résume le taux de présence des variables par zones pour les deux périodes 1990-2000 et 2000-2005.

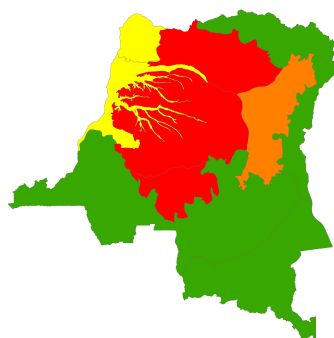
Tableau 4 - Variables communes entre les différents modèles

Zone	% de variables identiques au modèle national		% de variables identiques entre 1990-2000 et 2000-2005
	1990 - 2000	2000 - 2005	
1	60%	40%	20%
2	80%	100%	80%
3	60%	40%	60%
4	100%	100%	100%
5	40%	0%	60%
6	80%	80%	100%
7	100%	100%	100%
8	0%	20%	40%
9	60%	40%	40%
10	60%	60%	60%
11	40%	/	/

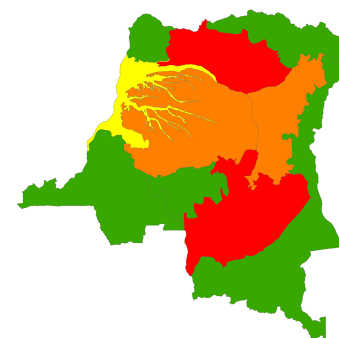
Forêts dégradées



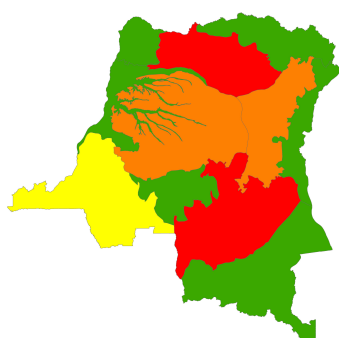
Fragmentation



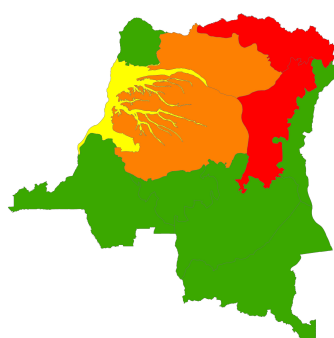
Augmentation de la population



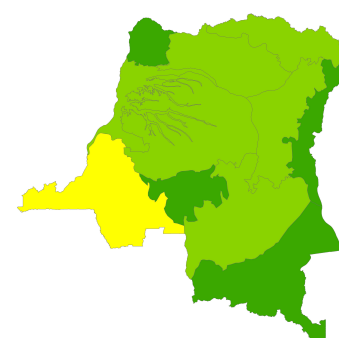
Complexe rural



Routes



Distances aux villes



Légende

Coefficient de corrélation par zone pour la période 2000 - 2005

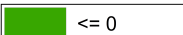

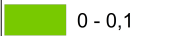

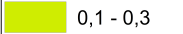

	<= 0		0,3 - 0,5
	0 - 0,1		0,5 - 0,7
	0,1 - 0,3		> 0,7

Figure 15 – Listes des variables les plus corrélées à la déforestation/dégradation et leur coefficient de corrélation par zone pour la période 2000-2005.

En comparant les résultats de l'analyse univariée pour les zones sous-nationales à l'analyse univariée au niveau national, on observe que 4 zones se comportent de manière identiques au modèle national (> 80% de 5 variables en commun), 4 zones sont semblables (60% de variables communes) et 3 zones ont moins de 40% de variables communes avec le résultat national. Ceci confirme que le passage à l'échelle sous-nationale permet de tenir compte de la variabilité spatiale et d'identifier de nouvelles variables qui n'apparaissent pas dans le modèle national.

Les résultats de l'analyse univariée à l'échelle sous-nationale montrent donc à la fois des similitudes et des divergences entre les zones ; cette discussion permet de proposer une typologie de situations.

Les zones forestières du centre du pays (zones 2, 4, 6, 7 et 9) présentent des ressemblances au niveau des cinq variables les plus corrélées avec la déforestation/dégradation. De plus, les résultats sont relativement stables dans le temps : plus de 80% (Tableau 4) des variables présentes pour la période 1990-2000 le sont aussi en 2000-2005 (excepté pour la zone 9).

Les zones 1, 3 et 10 manifestent une corrélation négative entre la fragmentation et la déforestation et dégradation ($r = -0.14$; $-0,39$ et $-0,01$ respectivement). Ceci s'explique par le fait que ce sont des zones déjà fortement dégradées et fragmentées. La majeure partie de la déforestation pour ces zones a lieu dans les échantillons moins fragmentés où la superficie de forêt est plus importante.

Le complexe rural, l'augmentation de la population (ou la densité de villages pour la zone 3), la présence de routes et la présence de forêts dégradées sont corrélées positivement avec la déforestation et la dégradation pour ces trois zones en 1990-2000. Les résultats sont similaires pour la période 2000-2005, excepté pour la zone 1 où il ne semble pas y avoir de cohérence entre les deux périodes. Les résultats pour la période 2000-2005 pour la zone 10 sont également à nuancer vu le faible nombre d'échantillons disponibles (18 au total).

La zone 11 apparaît plus spécifique puisque seules 2 variables sur 5 se retrouvent également dans le modèle national (les routes et l'augmentation de la population). La variable *complexe rural*, la *fragmentation* et la *présence des forêts dégradées* ne sont pas corrélées avec la déforestation et la dégradation.

De même, pour la zone 5, seules 2 variables sur 5 sont identiques au modèle national (la fragmentation et la présence de complexe rural). L'augmentation de la population n'est pas corrélée avec la déforestation/dégradation.

Ces observations à partir des analyses univariées ont permis de mettre en évidence un certain nombre de résultats et préparent une analyse multivariée dont les résultats sont présentés dans la section suivante.

6.2 Résultats multivariés

A. 1990 – 2000

Les résultats de l'analyse multivariée pour 1990-2000 sont présentés au tableau 5 pour les 2 échelles.

Tableau 5 - Résultats de l'analyse par régression multivariée pour l'échelle nationale et pour chaque zone sur la période 1990 - 2000

	1990 - 2000	Modèle national	Modèle sous-national										
			ZONE 1	ZONE 2	ZONE 3	ZONE 4	ZONE 5	ZONE 6	ZONE 7	ZONE 8	ZONE 9	ZONE 10	ZONE 11
Agriculture	Distance aux zones agricoles	**_					*_	°_	**_		-		
	Complexe rural	***+	***+		***+	***+						**+	
	Distance aux zones de complexe rural				*_	***_	°_				°_		
Facteurs économiques	Distance aux villes	**_								*+			
	Distance aux frontières	***_							***_	*_			
	Distance aux frontières de la Zambie												***_
	Distance aux frontières du Congo	*_											
	Distance aux frontières de la RCA			**_									
	Distance aux exploitations minières	*_			*_						*_		
	Distance aux concessions forestières			***_									
Transports	Routes	***+		***+				*+	*+			**+	
	Routes locales					**+							
	Distance aux routes locales											*_	
	Distance aux routes secondaires												°_
	Distance aux routes principales	***_		**_									
	Distance aux axes navigables			*+							*+	**+	
Facteurs démographiques	Augmentation de la population			***+				*+	***+				***+
	Densité de villages		*+	***+									**_
Facteurs sociopolitiques	Distance aux aires protégées									**+			***+
Facteurs biophysiques	Forêts dégradées	***+		***+				***+	***+				
	Fragmentation			***_	***+			**+	***+		***+		
	Axes navigables							**_					
	R²	0,47	0,74	0,77	0,52	0,70	0,41	0,45	0,48	0,11	0,42	0,51	0,79
	Nombre d'échantillons	1365	37	233	68	206	48	128	360	63	97	55	48

Significativité : '***' = $\Pr(>|t|) < 0,001$; '**' = $0,001 < \Pr(>|t|) < 0,01$; '*' = $0,01 < \Pr(>|t|) < 0,05$; '°' = $0,05 < \Pr(>|t|) < 0,1$; '' = $\Pr(>|t|) > 0,1$

Les signes « + » et « - » indiquent si la relation entre la variable explicative et la déforestation/dégradation est positive ou négative. Les « * » indiquent le degré de significativité de la relation (***) étant la valeur la plus significative).

Pour 4 zones sur 11, le coefficient de détermination (R^2) est supérieur ou égal à 0,7. Il est par contre compris entre 0,41 et 0,52 pour 6 zones.

Pour la zone 8, le R^2 est très faible (0,11) et le modèle n'est donc pas acceptable. Comme c'était le cas pour l'analyse univariée, il est préférable d'exclure cette zone de l'analyse des résultats.

Analyse de l'influence des différentes catégories de variables

Huit catégories de variables ont été définies lors de la création des variables potentielles (Figure 5). Le tableau 5, montre que six catégories de variables sur huit sont reprises par les modèles de régression multivariée. Seules les catégories de variables **Infrastructures** et **Exploitation forestière** ne ressortent pas dans l'analyse multivariée. Ces deux catégories sont caractérisées par les variables *présence d'exploitations minières* et *présence de concessions forestières* qui traduisent l'emprise au sol de ces deux activités. Ces variables à l'échelle nationale et sous-nationale n'expliquent pas la quantité de forêts défrichées et dégradées dans les échantillons. On remarque cependant que des variables comme la *distance aux exploitations minières* ou aux *concessions forestières* se retrouvent dans certains modèles multivariés ce qui signifie que les concessions forestières et les exploitations minières ont surtout un rôle indirect dans les processus de déforestation et de dégradation.

La catégorie de variables représentant **l'agriculture** est largement représentée dans les différents modèles puisque l'on retrouve au moins une variable de cette catégorie dans 80% des zones, ainsi que dans le modèle national.

La catégorie de variables représentant **les facteurs économiques** est présente dans 60% des zones, ainsi que dans le modèle national. La variable *distance aux concessions forestières* joue un rôle particulièrement important pour la zone 2.

La catégorie de variables représentant **les transports** est présente dans 80% des zones, ainsi que dans le modèle national.

La catégorie de variables représentant les **facteurs démographiques** est présente dans 50% des zones. Cela peut sembler peu comparé aux autres catégories. Cependant, après l'analyse de la corrélation entre les variables explicatives, on observe que la variable *augmentation de la population* est corrélée avec la variable *complexe rural* (dans 6 zones sur 10). Ces deux variables ne peuvent donc pas être présentes en même temps dans le modèle, pour éviter les problèmes de colinéarité. Des modèles alternatifs ont été testés afin de permuter certaines variables lorsqu'elles étaient corrélées. Les résultats sont présentés au tableau 6. Les variables

interchangées (en rouge) restent très significatives, elles jouent donc un rôle non négligeable dans l'explication de la déforestation et de la dégradation.

Tableau 6 - Résultats de régressions multivariées avec permutation de variables pour 1990 – 2000.

	1990 - 2000	Modèle national	Modèle sous national				
			ZONE 1	ZONE 2	ZONE 4	ZONE 7	ZONE 10
Agriculture	Distance aux zones agricoles	*** ₋				** ₋	
	Complexe rural			*** ₊		** ₊	
	Distance aux zones de complexe rural				** ₋		
Facteurs économiques	Distance aux villes		** ₋				
	Distance aux frontières	*** ₋				*** ₋	
	Distance aux frontières de la Zambie						
	Distance aux frontières du Congo		* ₋				
	Distance aux frontières de la RCA			** ₋			
	Distance aux exploitations minières						
	Distance aux concessions forestières			** ₋			
Transports	Routes	*** ₊				+ ₊	* ₊
	Routes locales						
	Distance aux routes locales						* ₋
	Distance aux routes secondaires						
	Distance aux routes principales	*** ₋		* ₋			
	Distance aux axes navigables						** ₊
Facteurs démographiques	Augmentation de la population	*** ₊	** ₊		*** ₊		*** ₊
	Densité de villages		** ₊	*** ₊			
Facteurs biophysiques	Forêts dégradées	*** ₊		*** ₊		*** ₊	
	Fragmentation				*** ₊	*** ₊	
	Axes navigables						
	R²	0,39	0,56	0,68	0,65	0,48	0,53

Significativité : '***' = Pr(>|t|) < 0,001 ; '**' = 0,001 < Pr(>|t|) < 0,01 ; '*' = 0,01 < Pr(>|t|) < 0,05 ; '.' = 0,05 < Pr(>|t|) < 0,1 ; '' = Pr(>|t|) > 0,1

Pour la catégorie de variables représentant **les facteurs socio-politiques**, seule la variable *distance aux aires protégées* est présente dans le modèle de la zone 11 (Tableau 5). Il faut rappeler que plusieurs facteurs socio-politiques n'ont pu être modélisés, par exemple les effets liés à l'application du nouveau code forestier ou la présence de zones de conflits.

Les variables appartenant à la catégorie **des facteurs biophysiques** apparaissent dans 60% des modèles, ainsi que dans le modèle national. Les deux variables les plus importantes de cette catégorie sont la *présence de forêts dégradées* et la *fragmentation*.

D'une manière générale on peut identifier les catégories de variables qui exercent une influence majeure sur la déforestation et la dégradation dans chaque zone : l'agriculture (zones 1, 3, 4 et 5), les facteurs biophysiques (zones 2, 4, 6, 7 et 9), les axes de transports (zones 3 et 10), les facteurs démographiques (zones 2, 7 et 11) et les facteurs économiques (zones 1 et 2).

Analyse de l'influence des variables

L'influence de chaque variable prise séparément est analysée de manière synthétique dans les paragraphes ci-dessous.

Tableau 7 - Occurrence des variables dans les modèles multivariés pour 1990 - 2000

	Occurrence
Fragmentation	5
Complexe rural	5
Augmentation de la population	6
Distance aux zones de complexe rural	4
Distance aux zones agricoles	4
Routes	6
Densité de villages	3
Forêts dégradées	7
Distance aux axes navigables	3
Distance aux exploitations minières	2
Distance aux villes	1
Distance aux frontières	1
Distance aux frontières de la Zambie	1
Distance aux frontières du Congo	1
Distance aux frontières de la RCA	1
Distance aux concessions forestières	1
Routes locales	1
Distance aux routes locales	1
Distance aux routes secondaires	1
Distance aux routes principales	1
Distance aux aires protégées	1
Axes navigables	1

Le tableau 7 reprend le nombre d'occurrence de chaque variable dans les différents modèles pour les 10 zones, en excluant la zone 8 dont le modèle possède un R^2 trop faible pour être pris en compte. La figure 16 montre les variables les plus significatives pour chaque zone. Les variables reprises entre parenthèses sont corrélées de manière significative avec une des variables du modèle.



Figure 16 - Principales variables ressortant du modèle multivarié par zone pour 1990-2000

La variable *fragmentation* apparaît dans 50% des modèles (zones 3, 4, 6, 7 et 9), toujours d'une manière très significative. Il faut cependant noter que la fragmentation a un effet négatif sur la déforestation/dégradation pour la zone 3. Cet effet a déjà été observé lors de l'analyse univariée.

Les variables *complexe rural* et *augmentation de la population* apparaissent non conjointement dans 40% des modèles. La variable *complexe rural* est présente dans les zones 1, 3, 4 et 10, avec possibilité de la permuter avec la variable *augmentation de la population* pour les zones 1, 4 et 10 (Tableau 6). Cette permutation n'est pas possible pour la zone 3. En effet, l'analyse univariée a montré que la variable *augmentation de la population* est peu corrélée avec la déforestation/dégradation en zone 3. La variable *augmentation de la population* est présente dans les zones 2, 6, 7 et 11, avec possibilité de la permuter avec la variable *complexe rural* pour les zones 2 et 7. Cette permutation n'est pas possible pour les zones 6 et 11 vu la faible présence de complexe rural dans ces deux zones.

Les variables *distance aux zones agricoles* et *distance aux zones de complexe rural* sont également présentes dans 40% des modèles. Pour les zones 5, 6 et 9, les deux variables sont présentes simultanément. Seule la variable *distance aux zones de complexe rural* est présente pour la zone 4.

La variable *présence de routes* apparaît dans 40% des modèles (zones 3, 6, 7 et 10) et est la plus significative pour les zones 3 et 10. Il faut aussi noter que cette variable est corrélée positivement avec la variable *fragmentation* pour les zones 4 et 9. La présence de route a donc une influence sur 60% des zones.

La variable *densité de villages* apparaît dans 30% des modèles (zone 1, 2 et 11) et est la plus significative pour la zone 2. Contrairement à ce qui est attendu, la densité de villages influence négativement la déforestation/dégradation pour la zone 11. Cet effet négatif est sans doute lié à la répartition non uniforme des échantillons dans cette zone (Annexe I, Figure I - 4).

La variable *présence de forêts dégradées* apparaît de manière significative dans 30% des modèles (zone 2, 6 et 7). Cette faible proportion en apparence doit être interprétée en tenant compte de la corrélation positive avec la variable *fragmentation* pour les zones 4 et 9, ainsi qu'avec la variable *complexe rural* pour la zone 1 et avec la variable *présence de routes* pour la zone 3. La variable *présence de forêts dégradées* a donc une influence globale dans 70% des zones.

La variable *distance aux axes navigables* est présente dans 30% des zones (zone 3, 9 et 10). Peut-être de manière contre intuitive, les axes navigables ne ressortent pas comme étant un facteur accélérant la déforestation. En effet, les coefficients déterminés par les régressions pour cette variable sont toujours positifs, ce qui signifie qu'au plus la distance aux axes navigables augmente, au plus la déforestation et dégradation est importante. Il est plausible que les sols hydromorphes jouxtant les axes navigables contribuent à atténuer la pression de la déforestation et de la dégradation, comme on l'observe au niveau des forêts inondables le long du fleuve.

La variable *distance aux exploitations minières* se retrouve dans les zones 4 et 9, ainsi que dans le modèle national.

B. 2000 - 2005

Afin de tester la robustesse du modèle entre les périodes 1990-2000 et 2000-2005, une première analyse multivariée a été réalisée en imposant les variables qui ressortent de l'analyse de 1990-2000, avec les valeurs de déforestation/dégradation de 2000-2005. Cette analyse fait l'hypothèse de l'absence de changements au niveau des dynamiques de déforestation et dégradation entre 1990 et 2005. Les résultats sont présentés au tableau 8.

Tableau 8 - Résultats de régressions multivariées par zone pour 2000 - 2005 avec les variables imposées

	2000 - 2005	Modèle national	Modèle sous-national										
			ZONE 1	ZONE 2	ZONE 3	ZONE 4	ZONE 5	ZONE 6	ZONE 7	ZONE 8	ZONE 9	ZONE 10	
Agriculture	Distance aux zones agricoles	*** ₋								° ₋		* ₋	
	Complexe rural	* ₊			° ₊	*** ₊							
	Distance aux zones de complexe rural					° ₋							
Facteurs économiques	Distance aux villes		° ₋										
	Distance aux frontières									*** ₋			
	Distance aux frontières de la RCA												
	Distance aux frontières du Congo												
	Distance aux exploitations minières												
	Distance aux concessions forestières			* ₋									
Transports	Routes	*** ₊			*** ₊								° ₊
	Routes locales						+						
	Distance aux routes locales												
	Distance aux routes principales	*** ₋		** ₋									
	Distance aux axes navigables				* ₊								+
Facteurs démographiques	Augmentation de la population							° ₋	*** ₊				
	Densité de villages			** ₊									
Facteurs biophysiques	Forêts dégradées	*** ₊		*** ₊				*** ₊					
	Fragmentation					*** ₊		* ₊	*** ₊		*** ₊		
	Axes navigables												
	R²	0,3671	0,0682	0,5305	0,386	0,3208	0,063	0,4589	0,4651		0,4683	0,1827	
	N	917	37	200	66	133	25	78	239	20	81	18	

Significativité : '****' = Pr(>|t|) < 0,001 ; '***' = 0,001 < Pr(>|t|) < 0,01 ; '**' = 0,01 < Pr(>|t|) < 0,05 ; '*' = 0,05 < Pr(>|t|) < 0,1 ; '' = Pr(>|t|) > 0,1

D'une manière générale, les coefficients de détermination pour la période 2000-2005 sont moins élevés que pour la période 1990-2000. De plus, certaines variables de 1990-2000 imposées ne sont plus significatives en 2000-2005 et n'apparaissent donc plus dans le modèle.

Les résultats de cette première analyse pour la période 2000-2005 montrent que les modèles ne se comportent pas de la même manière pour les deux périodes. Ceci est particulièrement évident pour les zones 1, 5 et 10 où le coefficient R^2 est inférieur à 0,20. Ce faible coefficient de détermination peut s'expliquer pour les zones 5 et 10 par le faible nombre d'échantillons disponibles pour la période 2000-2005 (25 et 18 échantillons respectivement). La zone 1 ne semble pas avoir de comportement identique entre les deux périodes, tel que souligné dans l'analyse univariée.

Après l'analyse de ces résultats, il s'est avéré nécessaire de refaire tourner le modèle d'analyse multivariée pour la période 2000-2005, en utilisant la même méthodologie que pour la période 1990-2000, sans imposer de variables.

Les résultats pour la période 2000-2005 (Tableau 9) montrent que 4 modèles sur 10 ont un R^2 supérieur ou égal à 0,60 (zones 2, 3, 7 et 10), deux modèles ont un R^2 autour de 0,55 (zones 4 et 8) et deux modèles ont un R^2 autour de 0,50 (zones 6 et 9). On remarque que les zones 1 et 5 n'ont pas de modèles acceptables. Pour la zone 5, ceci est dû au faible nombre d'échantillons disponibles pour la période 2000-2005. Pour la zone 1, le nombre d'échantillons est identique à la période 1990-2000, cependant le modèle affiche une moindre performance de manière identique à l'analyse univariée pour la période 2000-2005. Nous décidons donc de ne pas prendre en compte les résultats des zones 1 et 5 pour la suite de l'analyse.

Tableau 9 - Résultats de l'analyse par régression multivariée pour l'échelle nationale et pour chaque zone sur la période 2000 - 2005

	2000 - 2005	Modèle national	Modèle sous-national										
			ZONE 1	ZONE 2	ZONE 3	ZONE 4	ZONE 5	ZONE 6	ZONE 7	ZONE 8	ZONE 9	ZONE 10	
Agriculture	Distance aux zones agricoles	*** ₋		* ₋							-	° ₋	
	Complexe rural				** ₊	** ₊					* ₊		
	Distance aux zones de complexe rural			° ₋		° ₋							
Facteurs économiques	Distance aux villes						* ₋						
	Distance aux frontières									*** ₋			
	Distance aux frontières du Soudan				** ₊								
	Distance aux concessions forestières										° ₋		
Transports	Routes			** ₊		*** ₊							
	Routes locales	*** ₊											
	Routes secondaires										** ₊		
	Distance aux routes		* ₋										
	Distance aux routes principales	*** ₋		*** ₋									
	Distance aux axes navigables		* ₊		* ₊				° ₊		*** ₊		
Facteurs démographiques	Augmentation de la population	* ₊		*** ₊						*** ₊			
	Densité de villages										° ₊		
Facteurs sociopolitiques	Distance aux aires protégées				*** ₊	*** ₋			* ₊				
	Aires protégées					** ₋							
Facteurs biophysiques	Forêts dégradées	*** ₊			*** ₊	** ₊			*** ₊	*** ₊			*** ₊
	Fragmentation	** ₊	+	*** ₊					* ₊			*** ₊	
	R²	0,38	0,20	0,60	0,64	0,55	0,18	0,49	0,62	0,57	0,50	0,60	
	N	917	37	200	66	133	25	78	239	20	81	18	

Significativité : '***' = Pr(>|t|) < 0,001 ; '**' = 0,001 < Pr(>|t|) < 0,01 ; '*' = 0,01 < Pr(>|t|) < 0,05 ; '°' = 0,05 < Pr(>|t|) < 0,1 ; '' = Pr(>|t|) > 0,1

Analyse de l'influence des différentes catégories de variables

De manière identique à l'analyse multivariée pour la période 1990-2000, les six mêmes catégories de variables ressortent du modèle multivarié pour la période 2000-2005.

La catégorie de variables représentant l'**agriculture** est présente dans 5 zones sur 8 (zones 2, 3, 4, 8 et 9) ainsi que dans le modèle national. La catégorie de variables représentant **les facteurs économiques** est présente dans 3 zones sur 8 (zones 3, 7 et 9). La catégorie de variables représentant **les transports** est présente dans 5 zones sur 8 (zone 2, 3, 4, 6 et 8) ainsi que dans le modèle national.

La catégorie de variables représentant **les facteurs démographiques** est présente dans 3 zones sur 8 (zones 2, 7 et 9) ainsi que dans le modèle national. Comme pour la période 1990-2000, les variables *augmentation de la population* et la présence du complexe rural peuvent être permutés dans les modèles. Ces modèles alternatifs sont présentés au tableau 10.

La catégorie de variables représentant les **facteurs socio-politiques** est présente dans trois zones sur huit (zone 3, 4 et 6). La catégorie de variables représentant les **facteurs biophysiques** est présente dans sept zones sur huit, ainsi que dans le modèle national.

Tableau 10 - Résultats de régressions multivariées avec permutation de variables pour 2000 - 2005

	2000 - 2005	Modèle national	Modèle sous-national		
			ZONE 2	ZONE 7	ZONE 8
Agriculture	Distance aux zones agricoles	*** ₋	* ₋		-
	Complexe rural	* ₊	** ₊	*** ₊	
	Distance aux zones de complexe rural		° ₋		
Facteurs économiques	Distance aux villes				
	Distance aux frontières			*** ₋	
	Distance aux frontières du Soudan				
	Distance aux concessions forestières				
Transports	Routes		** ₊		
	Routes locales	*** ₊			
	Routes secondaires				** ₊
	Distance aux routes				
	Distance aux routes principales	*** ₋	*** ₋		
	Distance aux routes secondaires				
	Distance aux axes navigables				*** ₊
Facteurs démographiques	Augmentation de la population				° ₊
	Densité de villages				
Facteurs biophysiques	Forêts dégradées	*** ₊		*** ₊	
	Fragmentation	** ₊	*** ₊		
	R²	0,38	0,57	0,60	0,51
	N	917	200	239	20

Significativité : '***' = Pr(>|t|) < 0,001 ; '**' = 0,001 < Pr(>|t|) < 0,01 ; '*' = 0,01 < Pr(>|t|) < 0,05 ; '°' = 0,05 < Pr(>|t|) < 0,1 ; '' = Pr(>|t|) > 0,1

Analyse de l'influence des variables

L'influence de chaque variable prise séparément est analysée de manière synthétique dans les paragraphes ci-dessous.

Tableau 11 - Occurrence des variables dans les modèles multivariés pour 2000 - 2005

	Occurrence
Forêts dégradées	7
Fragmentation	4
Complexe rural	5
Distance aux zones agricoles	3
Distance aux axes navigables	3
Distance aux aires protégées	3
Augmentation de la population	3
Routes	4
Distance aux zones de complexe rural	2
Routes secondaires	1
Densité de villages	1
Aires protégées	2
Distance aux villes	1
Distance aux frontières	1
Distance aux frontières du Soudan	1
Distance aux concessions forestières	1
Distance aux routes principales	1

Le tableau 11 reprend le nombre d'occurrence de chaque variable dans les différents modèles pour les 8 zones. La figure 17 montre les variables les plus significatives pour chaque zone. Les variables reprises entre parenthèses sont corrélées de manière significative avec une des variables du modèle.

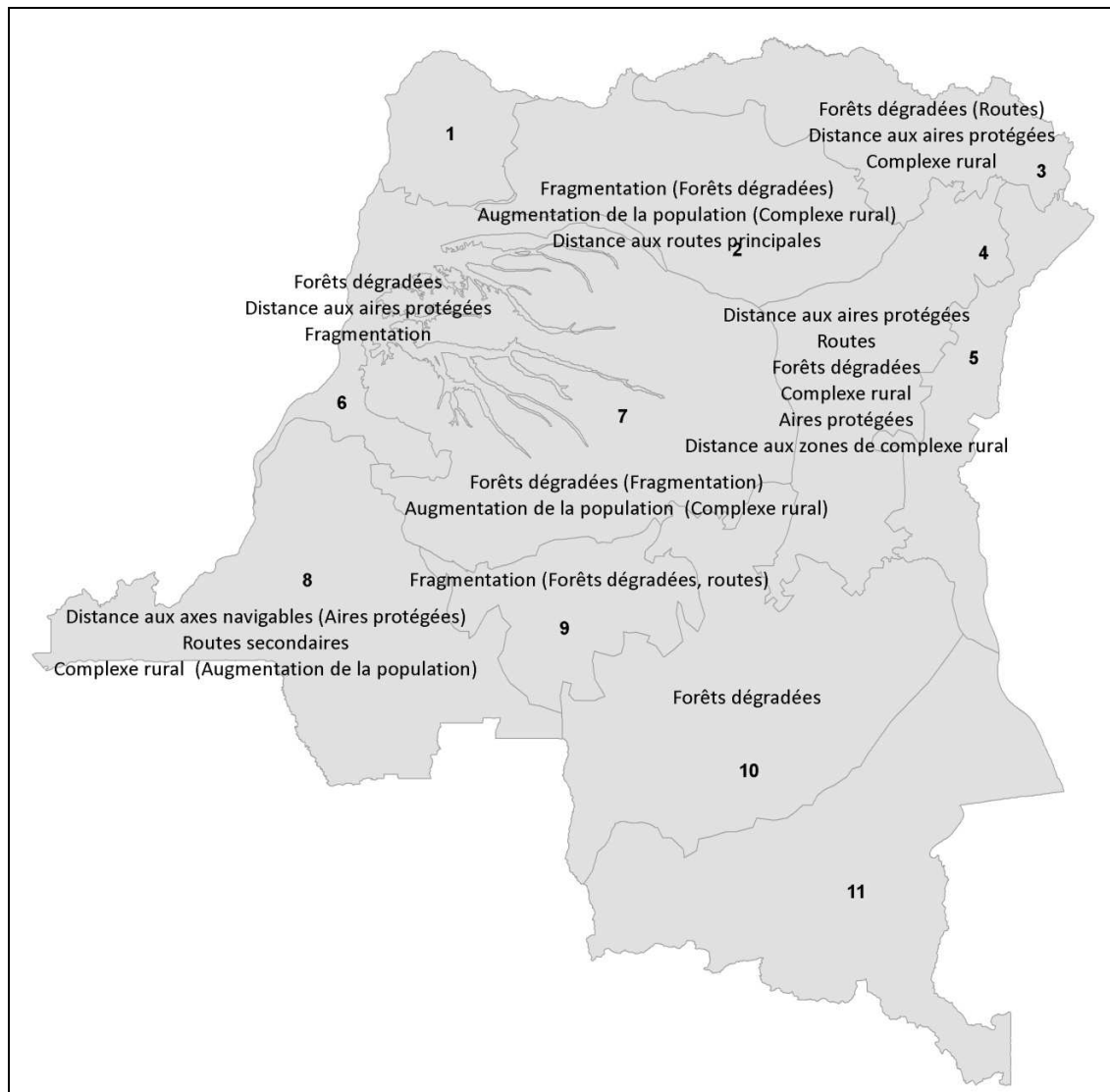


Figure 17 - Principales variables ressortant du modèle multivarié par zone pour 2000-2005

La variable *présence de forêts dégradées* apparaît de manière significative dans 5 zones sur 8 (zones 3, 4, 6, 7 et 10). De plus, pour les zones 2 et 9, la variable *forêts dégradées* est très corrélée avec la variable *fragmentation*. Cette variable joue donc un rôle important dans 7 zones sur 8.

La variable *fragmentation* apparaît dans 3 zones (zones 2, 6 et 9) et est fortement corrélée avec la variable *forêts dégradées* dans la zone 7.

La variable *complexe rural* apparaît dans 3 zones (zones 3, 4 et 8) et est fortement corrélée avec la variable *augmentation de la population* dans les zones 2 et 7. Cette variable joue donc un rôle important dans 5 zones sur 8.

La variable *distance aux zones agricoles* apparaît dans 3 zones (zones 2, 8 et 9). Sa significativité dans les modèles par zone est moins marquée que pour le modèle national où la variable est très significative.

La variable *distance aux axes navigables* est présente dans 3 zones (zones 3, 6 et 8). Elle est surtout significative pour la zone 8.

La variable *distance aux aires protégées* apparaît dans 3 zones (zones 3, 4 et 6). Pour la zone 4, elle a une influence négative sur la déforestation/dégradation, ce qui est contraire aux résultats attendus (au plus on est proche d'une aire protégées, au moins il y a de la déforestation). Ceci est sans doute dû à la distribution des échantillons dans la zone (Figure 20). De plus la variable *présence d'aires protégées* apparaît également de manière significative dans le modèle de la zone 4, et son coefficient négatif indique que la présence d'une aire protégée diminue la déforestation/dégradation.

La variable *augmentation de la population* est présente dans les zones 2 et 7 d'une manière très significative et est corrélée avec la variable *complexe rural* dans la zone 8.

La variable *présence de routes* apparait dans les zones 2 et 4, et est corrélées positivement avec la variable *forêts dégradées* pour la zone 3 et avec la variable *fragmentation* pour la zone 9.

C. Analyse de stabilité entre 1990 - 2000 - 2005

Pour cette analyse nous retenons uniquement les modèles performants pour les deux périodes. Nous excluons donc les zones 1, 5, 8 et 11.

Stabilité des variables

La catégorie de variables **Agriculture** est présente dans 86% des modèles en 1990-2000, contre 57% en 2000-2005. La catégorie de variables est présente pour les deux périodes dans les zones 3, 4 et 9. Par contre, elle n'est présente que pour une des deux périodes dans les zones 2, 6, 7 et 10. La variable *complexe rural* semble être la plus stable dans le temps, car elle est présente de manière très significative dans les zones 3 et 4 pour les deux périodes, par contre elle est uniquement présente pour la zone 10 en 1990-2000.

La catégorie de variables **Facteurs économiques** est présente dans 57% des modèles en 1990-2000, contre 43% en 2000-2005. La catégorie de variables est présente pour les deux périodes dans les zones 7 et 9. Elle ne se retrouve jamais dans les zones 6 et 10. Par contre, elle est uniquement présente pour une des deux périodes dans les zones 2, 3 et 4. La seule variable présente dans la même zone pour les deux périodes est la variable *distance aux frontières* (zone 7). Les variables *distance aux exploitations minières* et *distance aux concessions forestières* ne montrent pas beaucoup de stabilité. La variable *distance aux exploitations minières* qui était présente dans les zones 4 et 9 en 1990-2000, n'apparait plus pour la période 2000-2005. La variable *distance aux concessions forestières* qui était très significative dans la zone 2 en 1990-2000, ne l'est plus en 2000-2005 et apparait dans la zone 9 mais d'une manière moins significative.

La catégorie de variables **Transports** est présente dans 86% des modèles en 1990-2000, contre 57% en 2000-2005. La catégorie de variables est présente pour les deux périodes pour les zones 2, 3 et 6. Par contre, elle est uniquement présente pour une des deux périodes dans les zones 4, 7, 9 et 10. La variable *distance aux routes principales* est stable dans le temps, elle est présente pour les deux périodes dans la zone 2 et de manière très significative. La variable présence de *routes* ne montre pas beaucoup de stabilité entre les deux périodes. En 1990-2000, elle était présente dans les zones 3, 6, 7 et 8. En 2000-2005, elle est présente dans les zones 2 et 4.

La catégorie de variables **Facteurs démographiques** est présente dans 43% des modèles en 1990-2000 et en 2000-2005. La catégorie de variables est présente pour les deux périodes dans les zones 2 et 7. Elle n'est jamais présente dans les zones 3, 4 et 10. Par contre, elle est uniquement présente pour une des deux périodes pour les zones 6 et 9. La variable *augmentation de la population* montre une certaine stabilité, puisqu'elle est très significative pour les zones 2 et 7 en 1990-2000 et en 2000-2005. La variable *densité de village* ne montre pas de stabilité entre les deux périodes. Elle était très significative pour la zone 2 en 1990-2000, mais ne l'est plus en 2000-2005.

La catégorie de variables **Facteurs socio-politiques** est présente dans aucun des modèles pour 1990-2000, contre 43% pour 2000-2005. Elle apparaît dans les zones 3, 4 et 6 en 2000-2005. Cette différence notable entre les deux périodes d'étude s'explique probablement du fait d'une attention accrue aux aires protégées durant la période post-conflit (ici 2000-2005). Il s'agit notamment de l'attention accordée aux parcs nationaux de la Garamba (zone 3) et de Kahuzi-Biega (zone 4) avec un soutien tout particulier de la communauté internationale. Ces deux parcs nationaux faisant partie du patrimoine mondial de l'humanité selon l'UNESCO.

La catégorie de variables **Facteurs biophysiques** est présente dans 86% des modèles en 1990-2000, contre 100% en 2000-2005. La catégorie de variable est présente pour les deux périodes dans les zones 2, 3, 4, 6, 7 et 9. Elle est uniquement présente en 2000-2005 pour la zone 10. La variable *forêts dégradées* est très stable pour les zones 6 et 7 entre les deux périodes. La variable *fragmentation* est très stable pour les zones 6 et 9.

Stabilité des modèles par zone

▪ Zone 2

La figure 18 représente la déforestation et la dégradation pour la zone 2, pour les deux périodes. On remarque que dans l'ensemble, les échantillons sont bien distribués dans l'espace pour les deux périodes. Les modèles pour les deux périodes ont comme points communs la présence des catégories Transports, Facteurs démographiques et Facteurs biophysiques. Les facteurs socio-politiques sont absents pour les deux périodes. En 1990-2000, les facteurs économiques jouent un rôle important (*distance aux frontières de la RCA et distance aux concessions forestières*), mais ils n'apparaissent pas en 2000-2005. La catégorie Agriculture apparaît deux fois en 2000-2005 (*distance aux zones agricoles et distance aux zones de complexe rural*), mais jamais en 1990-2000.

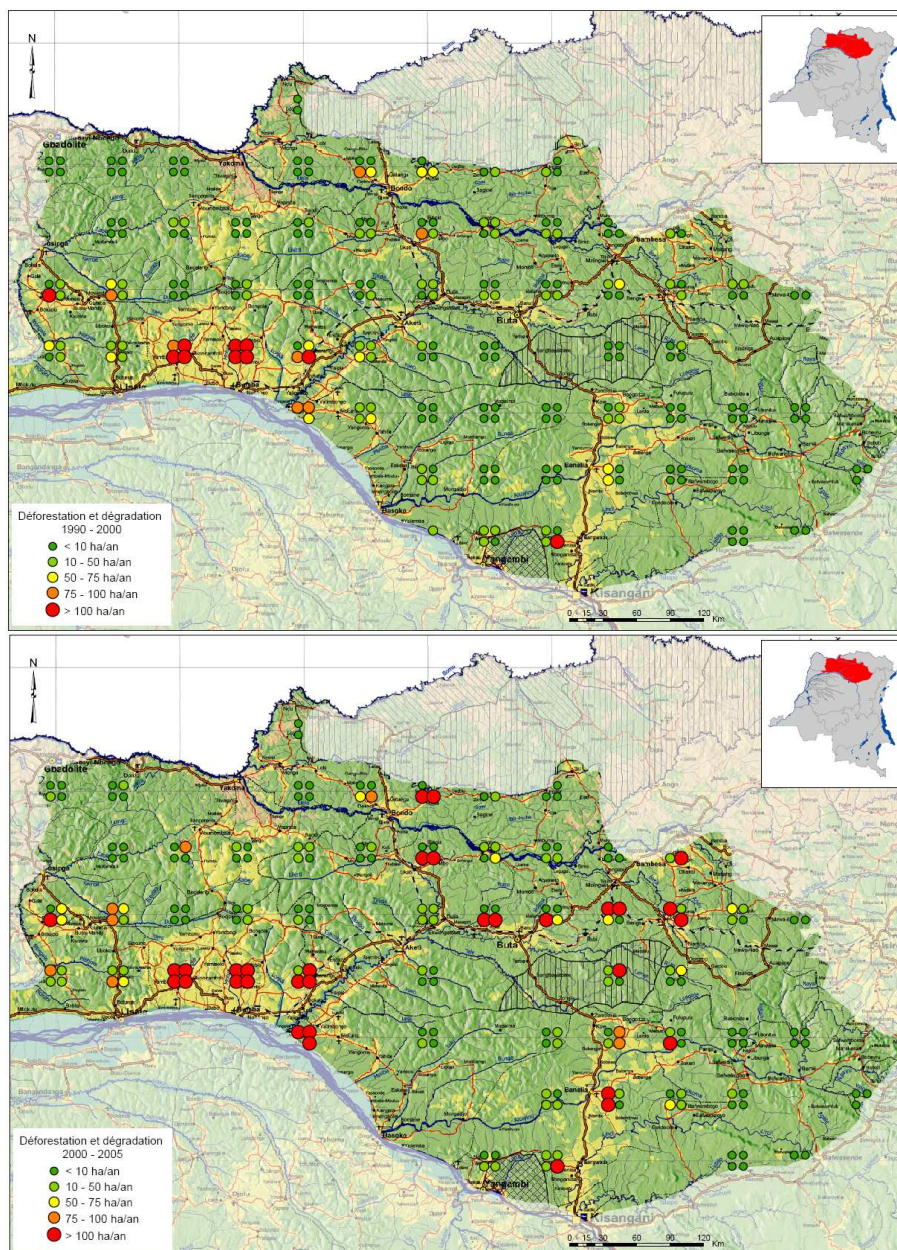


Figure 18 - Distribution des échantillons pour la zone 2

▪ Zone 3

La figure 19 représente la déforestation et la dégradation pour la zone 3, pour les deux périodes. Les échantillons de cette zone sont plus densément distribués dans la partie sud. Par contre leur nombre reste très proche d'une période à l'autre (68 échantillons en 1990-2000, contre 66 en 2000-2005). Pour les deux périodes, les catégories Agriculture, Transports et Facteurs biophysiques sont présents dans le modèle. Les facteurs démographiques sont absents des modèles pour les deux périodes.

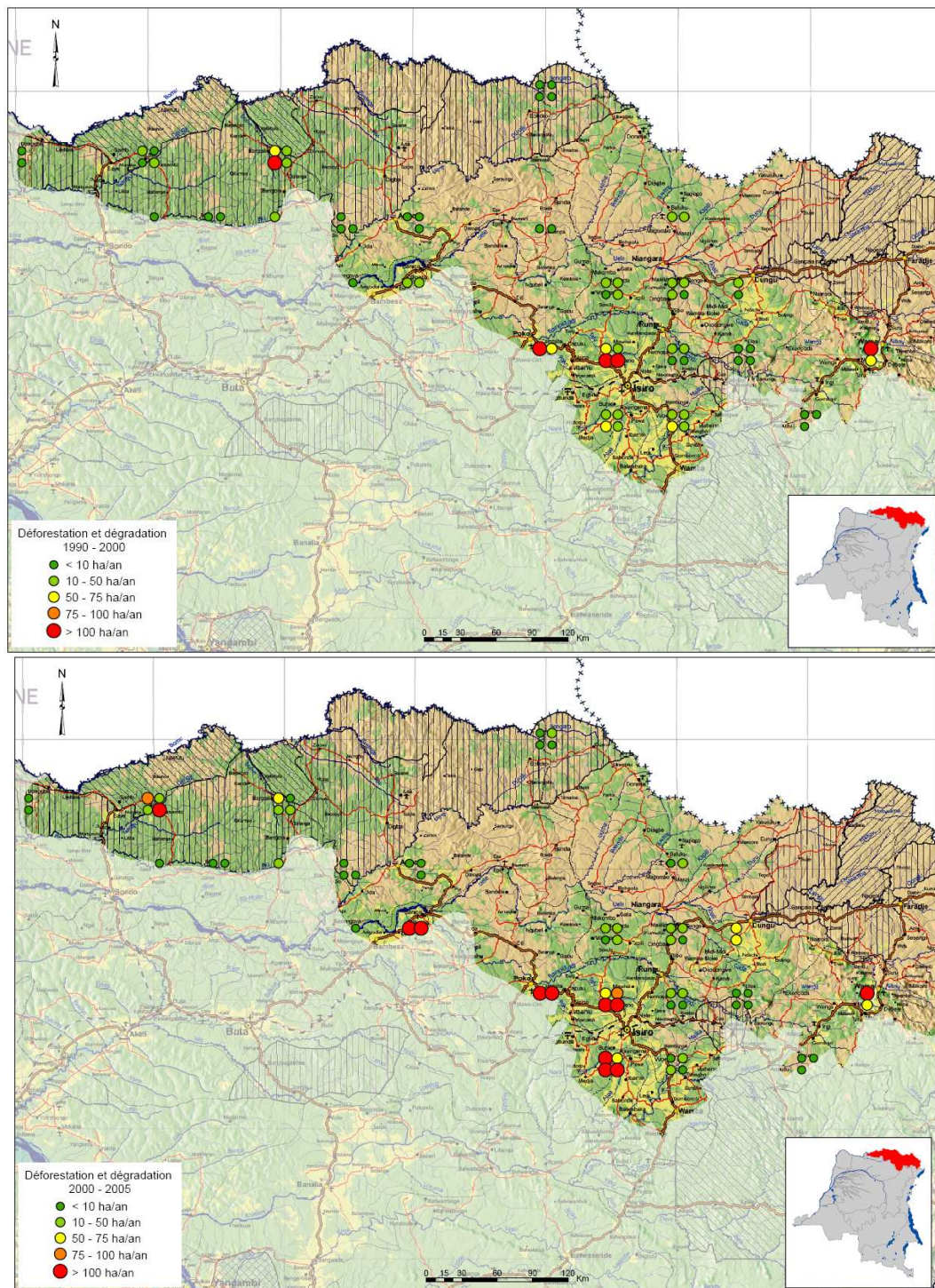


Figure 19 - Distribution des échantillons pour la zone 3

▪ Zone 4

Les échantillons de la zone 4 sont bien distribués dans l'espace pour la période 1990-2000. Par contre, comme le montre la figure 20, beaucoup d'échantillons situés dans la partie sud-est de cette zone ne sont pas disponibles en 2000-2005. Les catégories Agriculture et Facteurs biophysiques sont présentes pour les deux périodes. Les facteurs démographiques tels que disponibles pour cette étude sont absents des modèles des deux périodes.

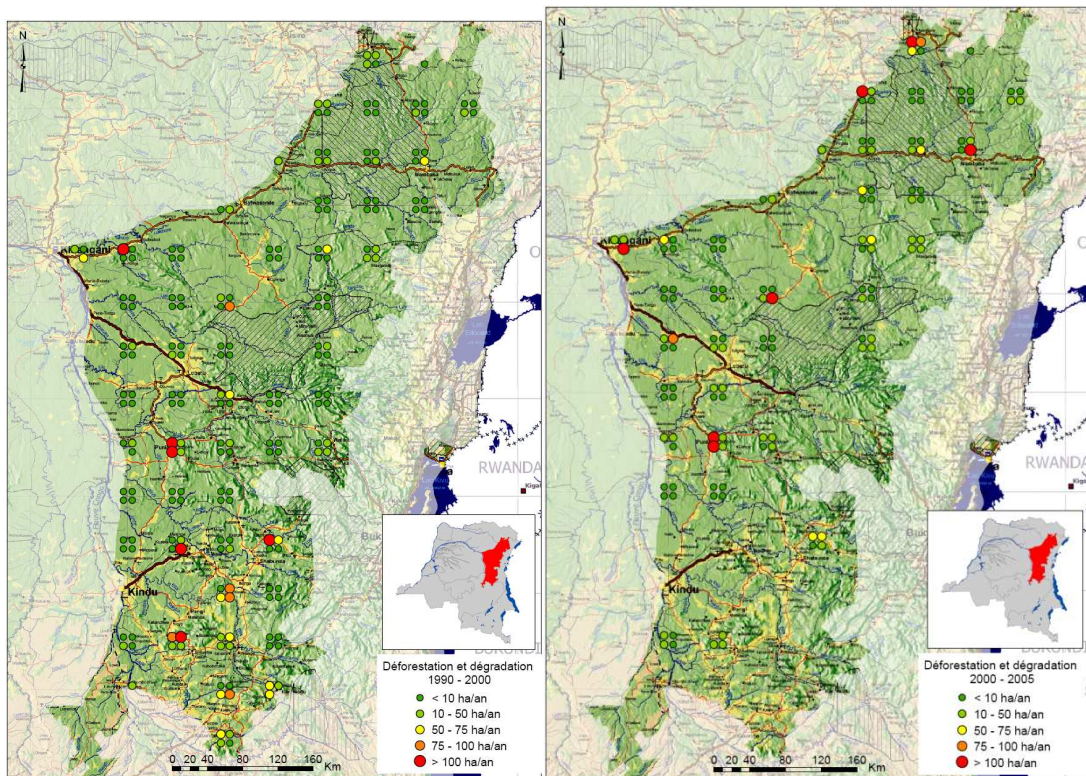


Figure 20 - Distribution des échantillons pour la zone 4

▪ Zone 6

Les échantillons de la zone 6 sont bien distribués spatialement. Cependant leur nombre diminue assez significativement entre les deux périodes. 128 échantillons sont disponibles pour la période 1990-2000 contre 78 pour 2000-2005. Les catégories Transports et Facteurs biophysiques sont présentes pour les deux périodes. Les facteurs économiques sont absents des modèles pour les deux périodes.

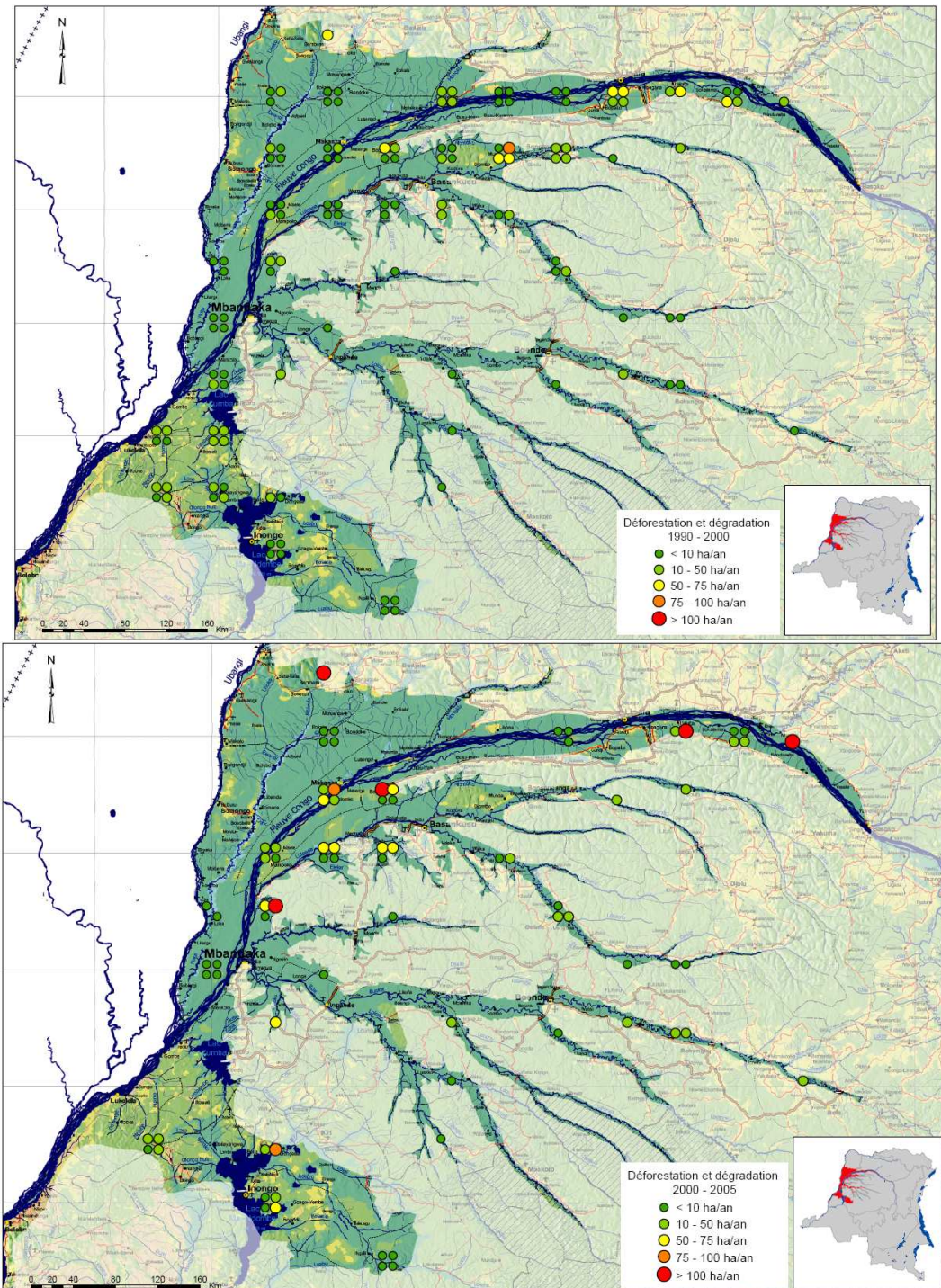


Figure 21 - Distribution des échantillons pour la zone 6

▪ Zone 7

La zone 7 est celle qui contient le plus d'échantillons, 360 en 1990-2000 contre 239 en 2000-2005. Les échantillons sont bien distribués spatialement pour 1990-2000 mais beaucoup d'échantillons situés au sud et à l'est de la zone sont indisponibles en 2000-2005 (Figure 22). Les catégories Facteurs économiques, Facteurs démographiques et Facteurs biophysiques se retrouvent dans les modèles pour les deux périodes. Les facteurs sociopolitiques sont absents pour les deux périodes.

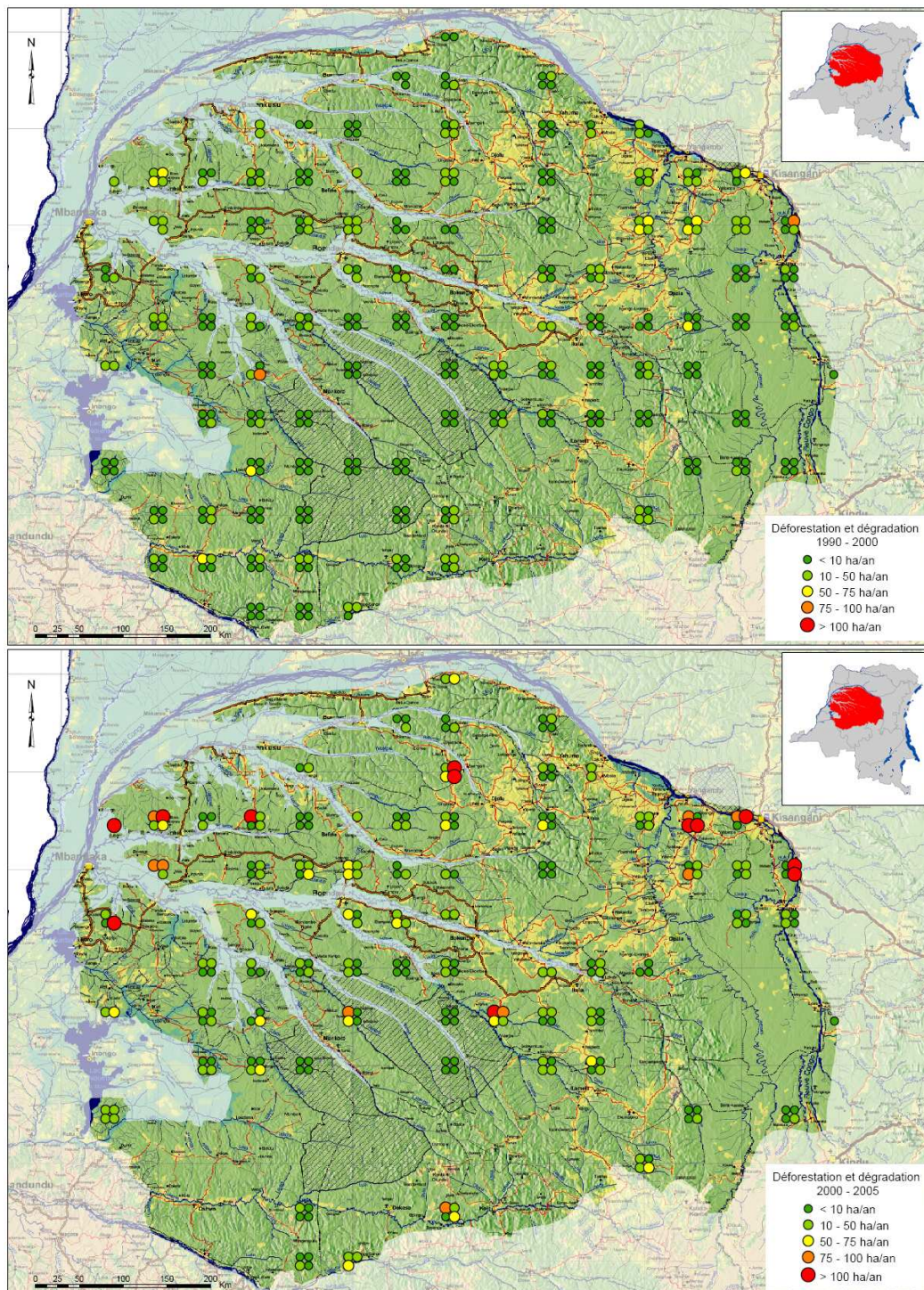


Figure 22 - Distribution des échantillons pour la zone 7

■ Zone 9

Les échantillons de la zone 9 sont bien distribués spatialement pour la période 1990-2000. Cependant pour 2000-2005, il y a moins d'échantillons au sud de la zone (Figure 23). Les catégories Agriculture, Facteurs économiques et Facteurs biophysiques sont présente pour les deux périodes. La catégorie Facteurs sociopolitiques est absente des modèles pour les deux périodes.

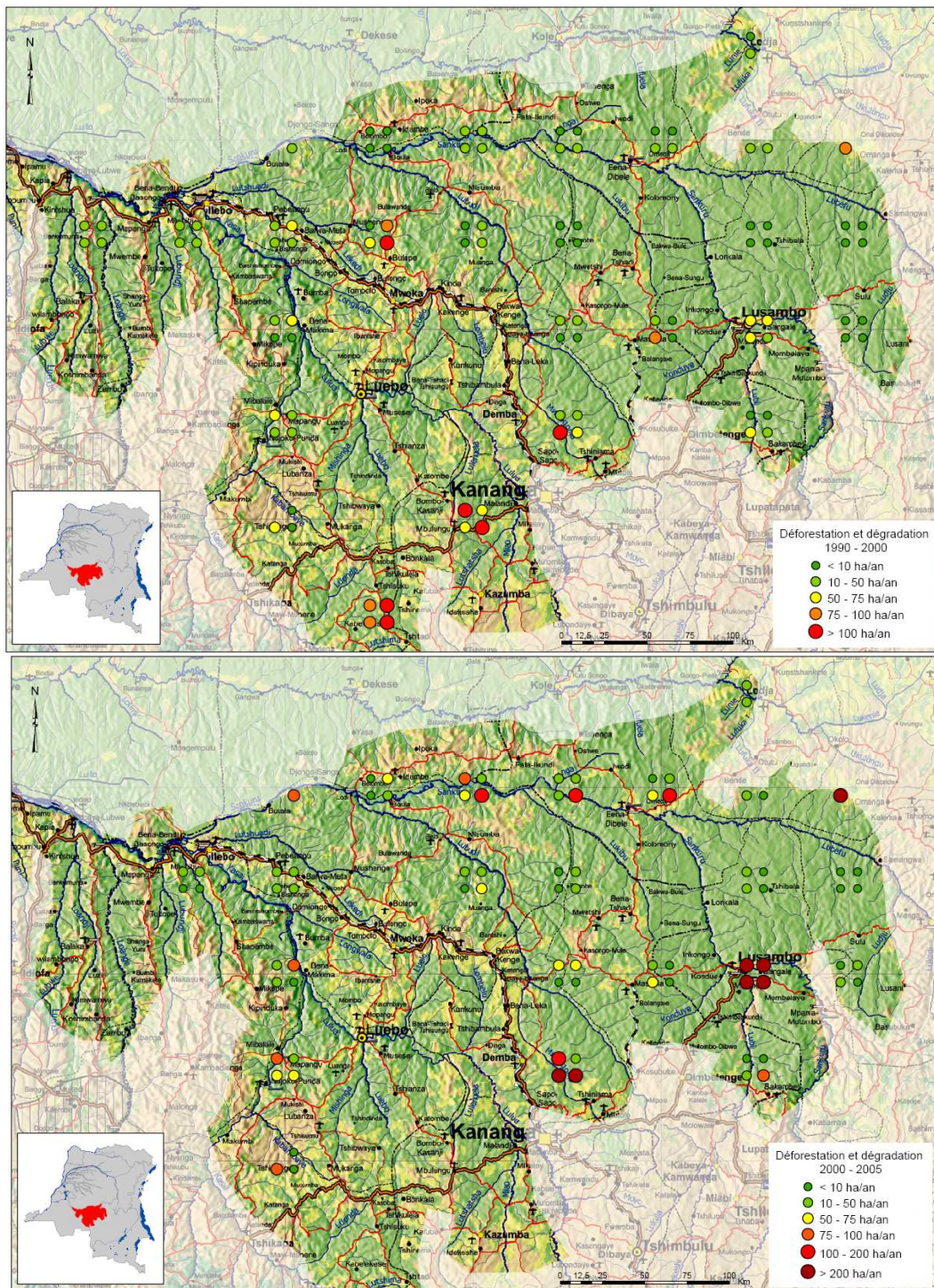


Figure 23 - Distribution des échantillons pour la zone 9

▪ Zone 10

Les échantillons de la zone 10 sont répartis plus densément au nord de la zone en 1990-2000. Pour la période 2000-2005, seuls 18 échantillons au nord sont présents. La comparaison de la stabilité des modèles sur les deux périodes à donc peu de sens.

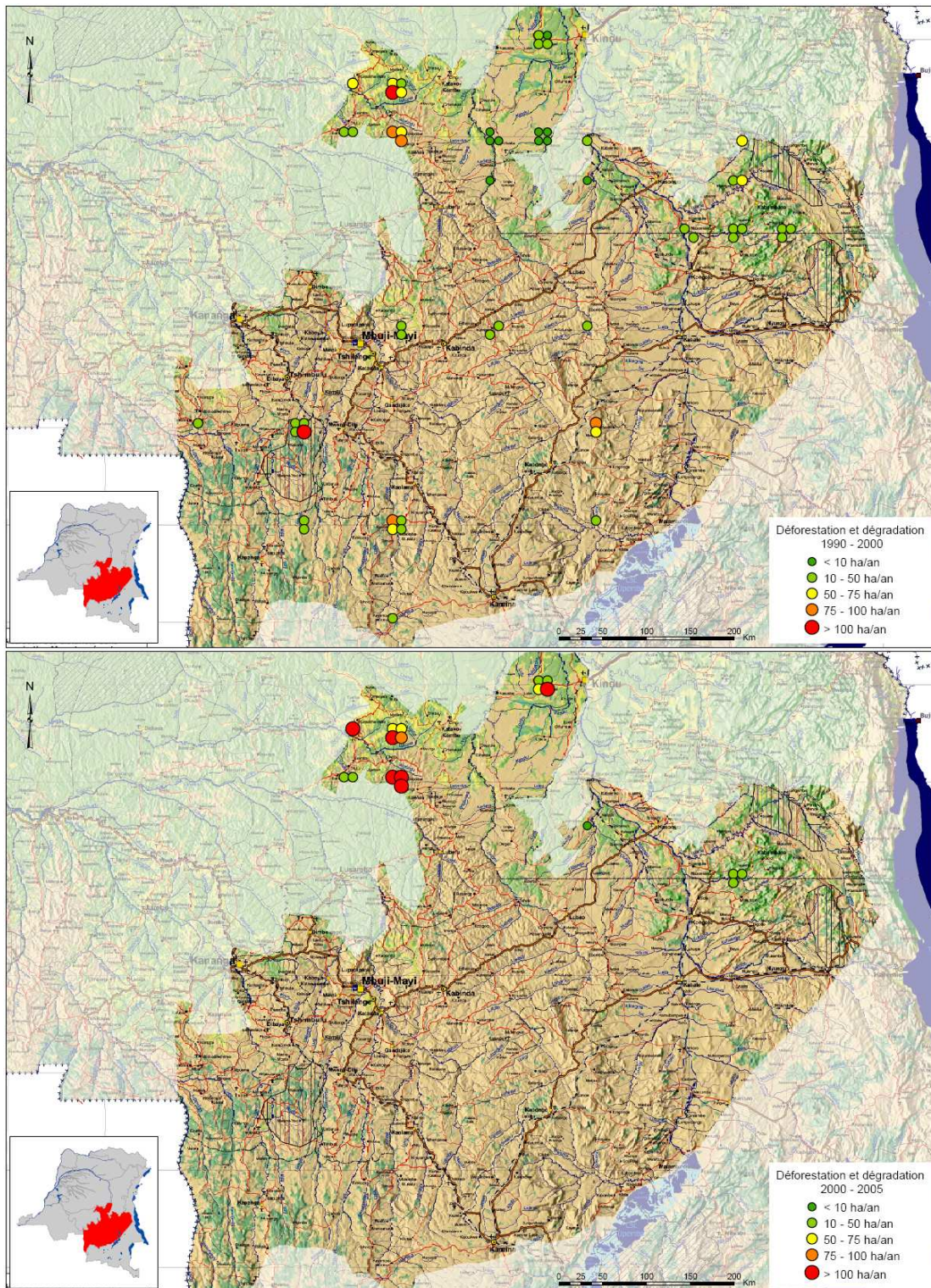


Figure 24 - Distribution des échantillons pour la zone 10

7. Conclusions

Par la mise en œuvre de différentes méthodes statistiques univariées et multivariées, cette étude a permis d'analyser de manière quantitative à partir d'un jeu de données exceptionnel les relations entre les causes présumées de la déforestation et de la dégradation et les estimations de celles-ci. Il en ressort des résultats particulièrement intéressants et quatre conclusions essentielles.

Les variables sélectionnées pour représenter les facteurs de déforestation et de dégradation expliquent **une proportion importante à très importante** (entre 40 et 79 %) de la variabilité des superficies affectées par les deux processus. Certaines variables prises isolément peuvent expliquer jusqu'à 38% de la déforestation/dégradation pour 1990-2000 et 32% pour 2000-2005.

La majorité des résultats montrent une **certaine stabilité temporelle** des facteurs dominants les processus de déforestation et de dégradation pour les deux périodes 1990-2000 et 2000-2005, même si, d'une manière générale, les résultats pour 2000-2005 sont un peu moins élevés. Ainsi, ce sont les 5 mêmes variables qui sont les plus corrélées aux processus d'intérêt pour les 2 périodes : la superficie du complexe rural, l'augmentation de la population, la superficie de forêts dégradées, la fragmentation de la forêt et l'importance du réseau routier. Il est très intéressant de noter que c'est avant tout l'importance de la population présente qui détermine la quantité de forêts affectées par la déforestation et la dégradation. Ces résultats très clairs contredisent plusieurs études plus locales qui ont souvent mis en avant la distance aux routes et l'importance des flux associés aux routes comme cause première de déforestation.

Les analyses menées à l'échelle sous-nationale permettent d'affiner ces résultats et d'augmenter très largement la part expliquée de la déforestation/dégradation (jusqu'à 79 % pour 1990-2000 et 64 % pour 2000-2005) par rapport à un modèle national unique (respectivement 47% et 38 %), démontrant ainsi l'importance de la **diversité spatiale des processus** selon les régions. Il convient de noter que cette très nette amélioration concerne environ la moitié des zones alors qu'en moyenne l'amélioration est moins significative (53% pour 1990-2000 et 48% pour 2000-2005). En raison des grandes différences observées d'une zone à l'autre, il est vivement recommandé de se référer à la figure 12 présentant les variables les plus corrélées pour chacune des 11 zones.

Enfin, il est important de relever que certaines variables jouent un rôle spécifique comme la présence des aires protégées qui est négativement corrélée à la déforestation/dégradation alors que la distance aux aires protégées est positivement corrélée. De manière plus inattendue, la présence d'une concession forestière et d'exploitation minières ne semble pas jouer un rôle dans la déforestation/ dégradation, du moins aux échelles nationales et sous-nationales étudiées.

L'ensemble de ces résultats présentés souvent sous forme de cartes ou tableaux semblent constituer une source objective d'information quantitative susceptible d'éclairer les discussions des acteurs nationaux, de cibler les débats et d'approfondir la compréhension des éléments clés. La qualité des résultats semble également permettre d'envisager un usage prédictif des modèles.

8. Références

Angelsen A., Kaimowitz D., 1999. *Rethinking the Causes of Deforestation: Lessons from Economic Models*. The World Bank Research Observer 14(1): 73-98.

Anselin L., 1988. *Spatial econometrics: Methods and models*. Kluwer, Dordrecht.

Bell K. P., Bockstael N.E. 2000. *Applying the generalized-moments estimation approach to spatial problems involving microlevel data*. Review of Economics and Statistics, 82: 72-82.

Brown S., Hall M., Andrasko K., Ruiz F., Marzoli W., Guerrero G., Masera O., Dushku A., DeJong B., Cornell J., 2007. *Baselines for land-use change in the tropics: Application to avoided deforestation projects*. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 12, pp 1001-1026.

De Saint Moulin L., 2006. *Analyse par territoire et ville des résultats de l'enrôlement des électeurs et du référendum sur le projet de constitution*. Congo-Afrique, Numéro Spécial 402-403, pp 9-29

Delhage C., Defourny P., 2010. *Quantitative Analysis of Deforestation Drivers in DR Congo: Preliminary Results*. In : Monitoring Forest Carbon Stocks and Fluxes in the Congo Basin. In : *Conference Report on Monitoring Forest Carbon Stocks and Fluxes in the Congo Basin - 24 February 2010*, Brady M. and de Wasseige C. éd., GOFC-GOLD Report No. 44., pp 39-44

Duveiller G., Defourny P., Desclée B., Mayaux P., 2008. *Deforestation in Central Africa : Estimates at regional, national and landscape levels by advanced processing of systematically-distributed Landsat extracts*. Remote Sensing of Environment, 112, p. 1969-1981.

Ernst C., Verhegghen A., Mayaux P., Hanssen M. and Defourny P., 2011 (in press). *Cartographie des forêts d'Afrique central et du changement du couvert forestier*. In : *L'Etat des Forêts d'Afrique centrale*, COMIFAC – éd. C. de Wasseige et al..

Ernst C., A. Verhegghen, C. Bodart, P. Mayaux, C. de Wasseige, A. Bararwandika, G. Begoto, F. Esono Mbaf, M. Ibarag, A. Kondjo Shokoh, H. Koy Kondjoh, JS. Makaki, JD. Menomo Biangj, C. Musampah, R. Ncogo Motogok, G. Neba Shul, B. Nkoumakalim, CB. Ouissikan and P. Defourny, 2010. *La cartographie forestière et le changement d'occupation et utilisation du sol: Description de la méthodologie*. In : *Conference Report on Monitoring Forest Carbon Stocks and Fluxes in the Congo Basin - 24 February 2010*, Brady M. and de Wasseige C. éd., GOFC-GOLD Report No. 44., p. 34-39.

Echeverria C., Coomes D. A., Hall M., Newton A., 2008. *Spatially Explicit Models to Analyze Forest Loss and Fragmentation Between 1976 and 2020 in Southern Chile*. Ecological Modelling, 212 (3-4), pp. 439-449.

Geist H., 2006. *Our Earth's Changing Land. An Encyclopedia of Land-Use and Land-Cover Change*. Westport, Connecticut, London: Greenwood Press.

Geist H., Lambin E.F., 2001. *What drives tropical deforestation? A meta-analysis of proximate causes and underlying sources of deforestation based on subnational scale case study evidence*. LUCR Report series n°4. UCL, Louvain-la-Neuve.

Geist H.J., Lambin E.F., 2002. *Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation*. BioScience, 52:143–150.

Guerrero G., Masera O., & Mas J-F., 2008. *Land use / Land cover change dynamics in the Mexican highlands: current situation and long term scenarios*. In Paegelow M., Camacho Olmedo M.T., (eds) Modelling Environmental Dynamics Advances in Geomatic Solutions. 57-76. Springer Berlin Heidelberg 57-76.

Hall C.A.S., Tian H., Qi Y., Pontius G., Cornell J., Uhlig J., 1995a. *Spatially explicit models of land use change and their application to the tropics*. DOE Research Summary, No. 31. CDIAC, Oak Ridge National Lab.

Hall C.A.S., Tian H., Qi Y., Pontius G., Cornell J., Uhlig J., 1995b. *Modeling spatial and temporal patterns of tropical land use change*. J. Biogeogr. 22, 753–757.

Kaimowitz D., Angelsen A., 1998. *Economic Models of Tropical Deforestation: A Review*. CIFOR, Bogor.

Kibambe Lubamba J-P., Defourny P., 2010. *Towards Land Use Dynamics Modeling : A Case Study of the Democratic Republic of the Congo*. In : Monitoring Forest Carbon Stocks and Fluxes in the Congo Basin, Conference Report 2-4 February 2010, Brazzaville, GOF-C-GOLD Report No. 44. Pp 105 - 110

Lambin E.F., 1994. *Modelling deforestation processes*. A review. TREES Series B, Research report n°1, EUR 15744 EN, European Commission, Luxembourg.

Lambin E.F., Turner II B.L., Geist H., Agbola S., Angelsen A., Bruce J.W., Coomes O., Dirzo R., Fischer G., Folke C., George P.S., Homewood K., Imbernon J., Laporte N.T., Stabach J.A., Grosch R., Lin T.S., Goetz S.J., 2007. *Expansion of Industrial Logging in Central Africa*, Science 316:1451.

Leemans R., Li X., Moran E.F., Mortimore M., Ramakrishnan P.S., Richards J.F., Skarnes H., Steffen W., Stone G.D., Svedin U., Veldkamp T., Vogel C., Xu J., 2001. *The causes of*

land-use and land-cover change: moving beyond the myths. Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions. 11: 261–269.

Les Forêts du Bassin du Congo – Etat des Forêts 2008. Eds : de Wasseige C., Devers D., de Marcken P., Eba'a Atyi R., Nasi R. et Mayaux Ph., 426 pages, ISBN 978-92-79-132 11-7, doi: 10.2788 /32456, Office des publications de l'Union européenne, 2009.

Matheron G., 1970. *La théorie des variables régionalisées et ses applications*. Les cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, Fasc. 5.

Mas J. F., Puig H., Palacio J. L., Sosa-Lopez A., 2004. *Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks*, Environmental Modelling & Software, Volume 19, Issue 5, Pages 461-471

Mertens B., Lambin E. F., 1997. *Spatial modelling of deforestation in southern Cameroon: spatial disaggregation of diverse deforestation processes*. Applied Geography 17(2): 143-162.

Olson D. M., Dinerstein E., Wikramanayake E.D., Burgess N.D., Powell G.V.N., Underwood E.C., D'amico J.A., Itoua I., Strand H.E., Morrison J.C., Loucks C.J., Allnutt T.F., Ricketts T.H., Kura Y., Lamoreux J.F., Wettengel W.W., Hedao P., Kassem K.R., 2001. *Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth*. BioScience, 51:933-938

Overmars K.P., De Koning G.H.J., Veldkamp A., 2003. *Spatial autocorrelation in multi-scale land use models*, Ecological Modelling 164 (2–3), pp. 257–270

Pineda Jaimes N. B., Bosque Sendra J., Gomez Delgado M., Franco Plata R., 2010. *Exploring the driving forces behind deforestation in the state of Mexico (Mexico) using geographically weighted regression*, Applied Geography, Volume 30, Issue 4, Climate Change and Applied Geography - Place, Policy, and Practice, Pages 576-591

Pontius R.G., 2000. *Quantification error versus location error in comparison of categorical maps*. Photogr. Eng. Remote Sens. 66, 1011–1016.

Pontius R.G., Cornell J., Hall C., 2001. *Modelling the spatial pattern of land-use change with GEOMOD2: application and validation for Costa Rica*. Agric. Ecosyst. Environ. 85, 191–203.

Roy Chowdhury R., 2006. *Driving forces of tropical deforestation: The role of remote sensing and spatial models*. Singapore Journal of Tropical Geography 27(1): 82-101

Schneider L., Pontius R.G., 2001. *Modeling land-use change in the Ipswich watershed, Massachusetts, USA*. Agric. Ecosyst. Environ. 85, 83–94.

Serneels S., Lambin E.F., 2001. *Proximate causes of land-use change in Narok District, Kenya: a spatial statistical model*. Agriculture, Ecosystems & Environment 85: 65–81.

Soares-Filho B. S., Coutinho Cerqueira G., Lopes Pennachin C., 2002. *A stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier*, Ecological Modelling, Volume 154, Issue 3, Pages 217-235,

Stephenne N., Lambin E.F., 2001a. *A dynamic simulation model of land-use changes in Sudano-sahelian countries of Africa (SALU)*. Agriculture, Ecosystems and Environment 85(1–3): 145–161.

Turner MG., Wear DN., Flamm RO., 1996. *Land ownership and land-cover change in the Southern Appalachian highlands and the Olympic peninsula*. Ecological Applications 6 (4), 1150–72.

Turner B.L. II, Moss R., Skole D., 1993. *Relating land use and global land-cover change: a proposal for the IGBP-HDP core project*. IGBP Report 24 and HDP Report 5, 65 pp.

UCL, 2007. *Carte générale de la République Démocratique du Congo 1: 2 000 000*, Presses Universitaires de Louvain, ISBN 2-87463-019-5, 2ème édition.

Vancutsem C., Pekel JF., Evrard C., Malaisse F., Defourny P., 2009. *Mapping and characterizing the vegetation types of the Democratic Republic of Congo using SPOT VEGETATION time series*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 11, (1), p. 62-76.

Verburg, P.H., Kok K., Pontius Jr. R.G., Veldkamp A., 2006. *Modelling Land-Use and Land-Cover Change*. In: Land-Use and Land-Cover Change. Local Processes and Global Impacts / Lambin E.F., Geist H.J., Dordrecht : Springer, (Global Change - IGBP Series)

Verburg P.H., Veldkamp A., Willemen L., Overmars K.P., Castella J.-P., 2004. *Landscape level analysis of the spatial and temporal complexity of land-use change*. In: De Vries, R and Houghton, R, Editors, 2004. AGU Monograph (in press).

Williams N.G., McDonnell M.J., Seager E., 2005. *Factors influencing the loss of an endangered ecosystem in an urbanizing landscape: a case study of native grasslands from Melbourne, Australia*. Landsc. Urban Plan. 71, 35–49.

Wilson K., Newton A., Echeverría C., Weston C., Burgman M., 2005. *A vulnerability analysis of the temperate forests of south central Chile*. Biol. Conserv. 122, 9–21.

Yambayamba N., 2009. *Revue de la littérature sur les causes et agents des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts en RDC*. 34 p.

Zhang Q., Justice CO., Jiang M., Brunner J., Wilkie DS., 2006. *A GIS-based assessment on the vulnerability and future extent of the tropical forests of the Congo Basin*. *Environ Monitor Assess* 114: 107–121.

Annexe I : Distribution des échantillons par zone

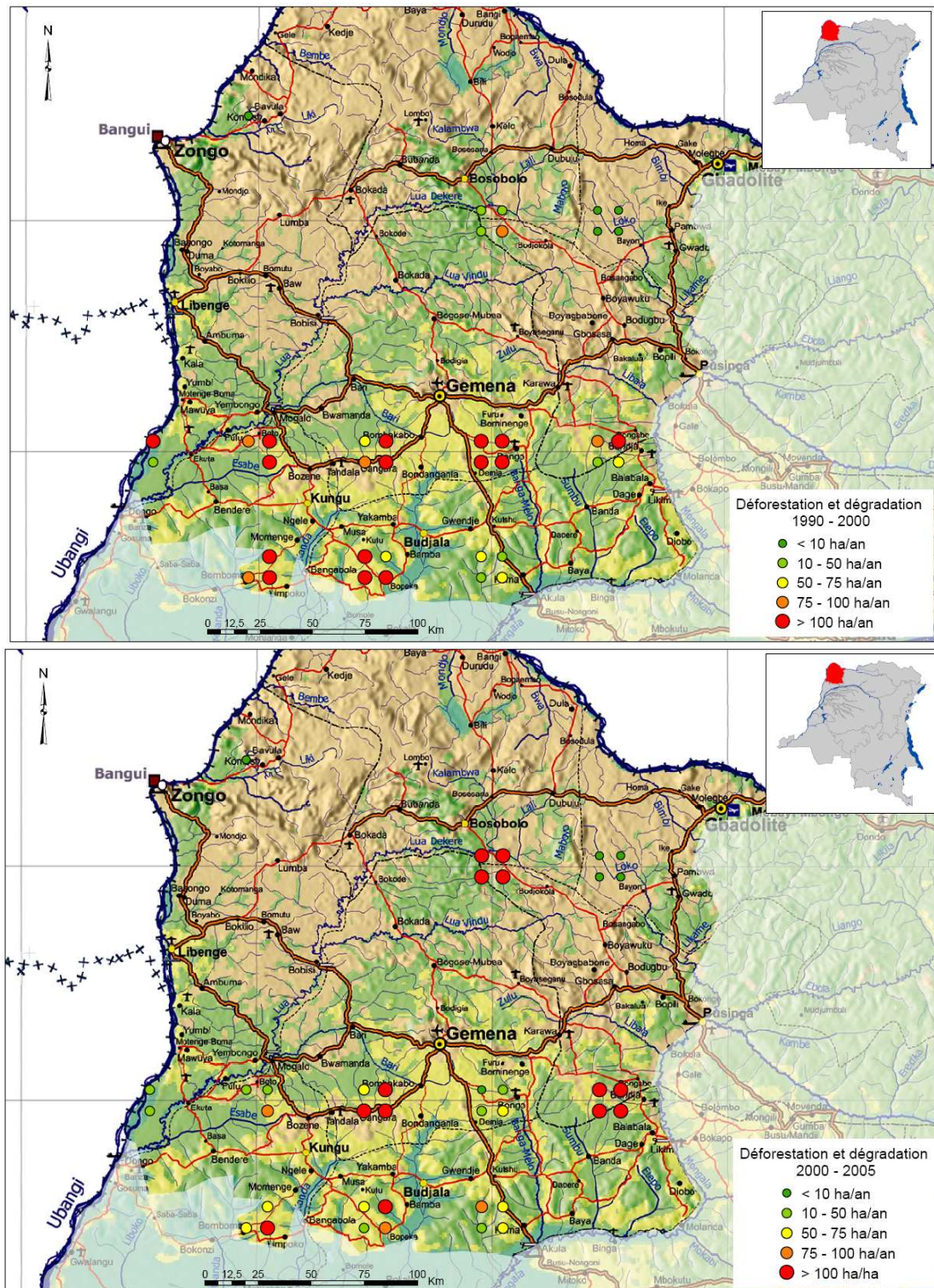


Figure I - 1 Distribution des échantillons pour la zone 1

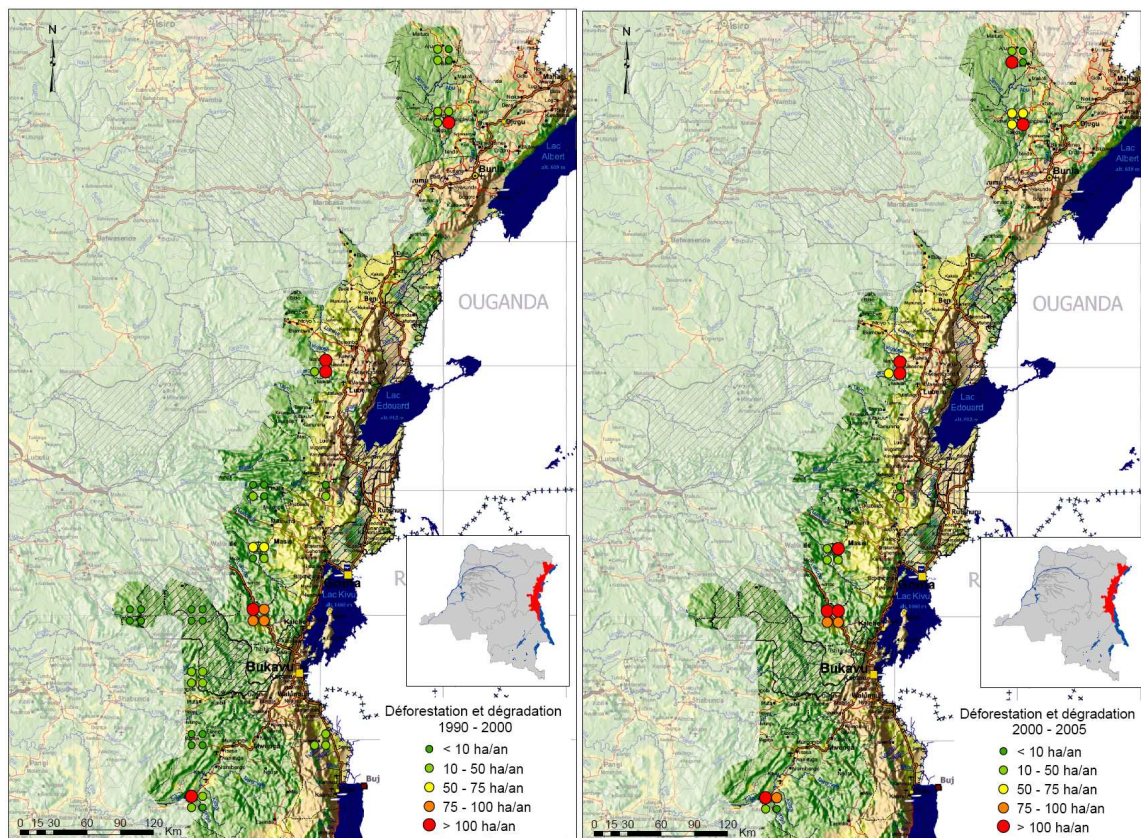


Figure 1 – 2 Distribution des échantillons pour la zone 5

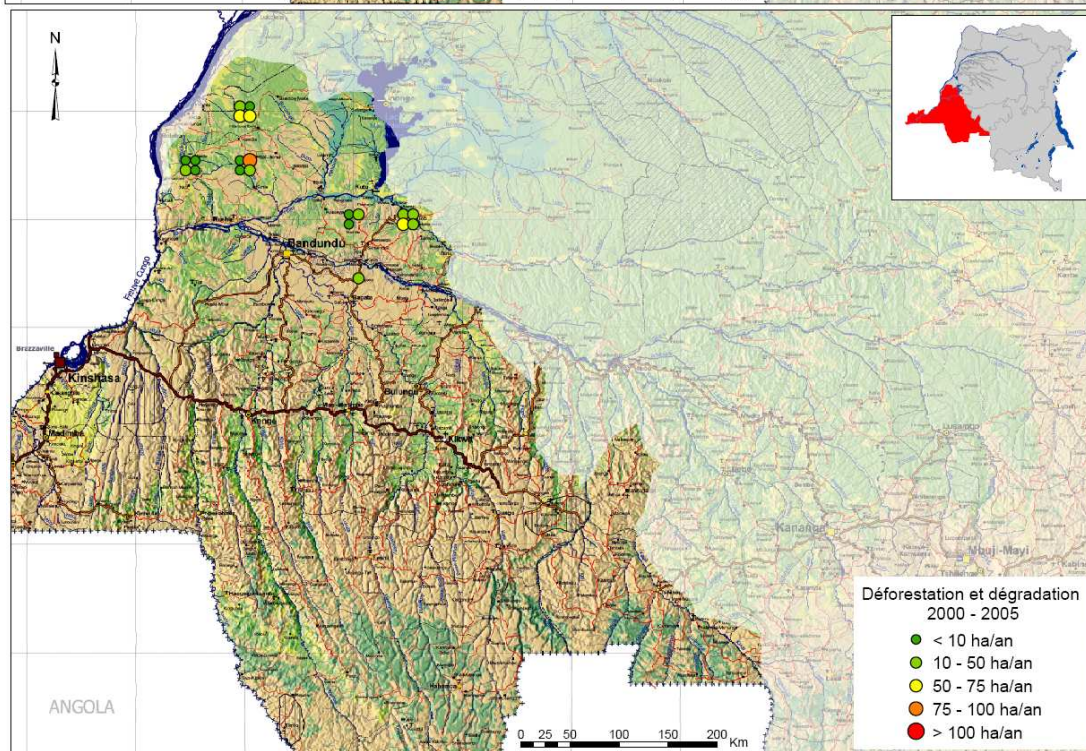
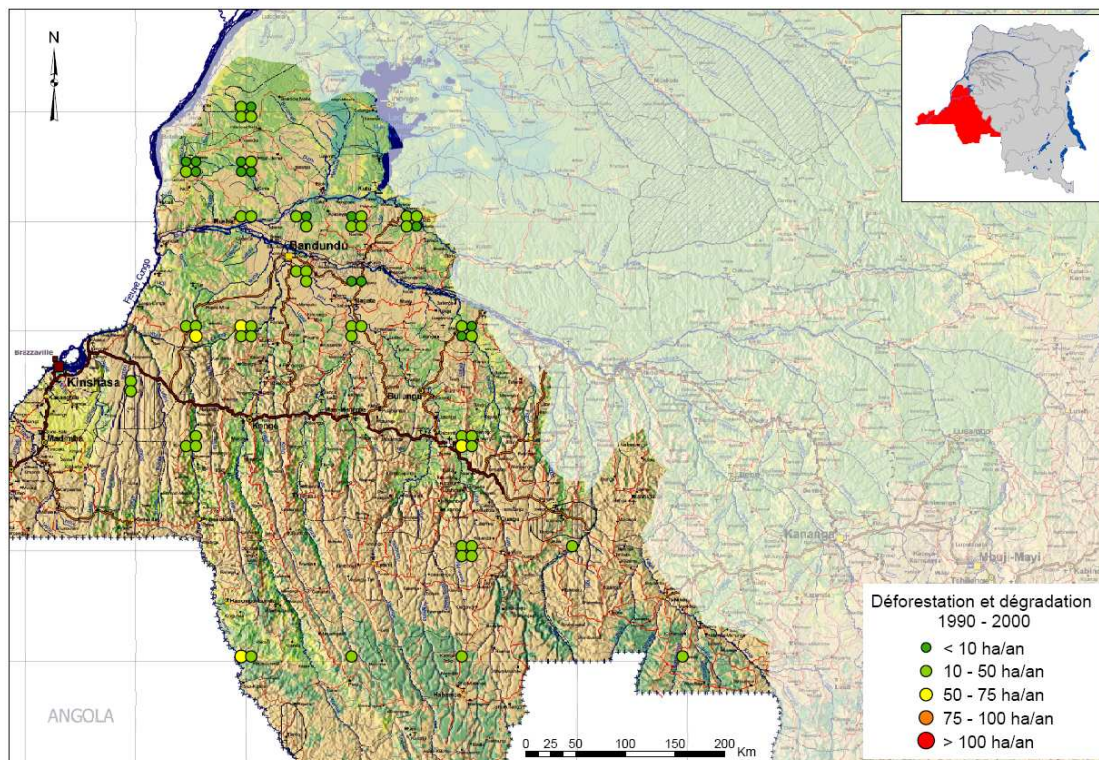


Figure I – 3 Distribution des échantillons pour la zone 8

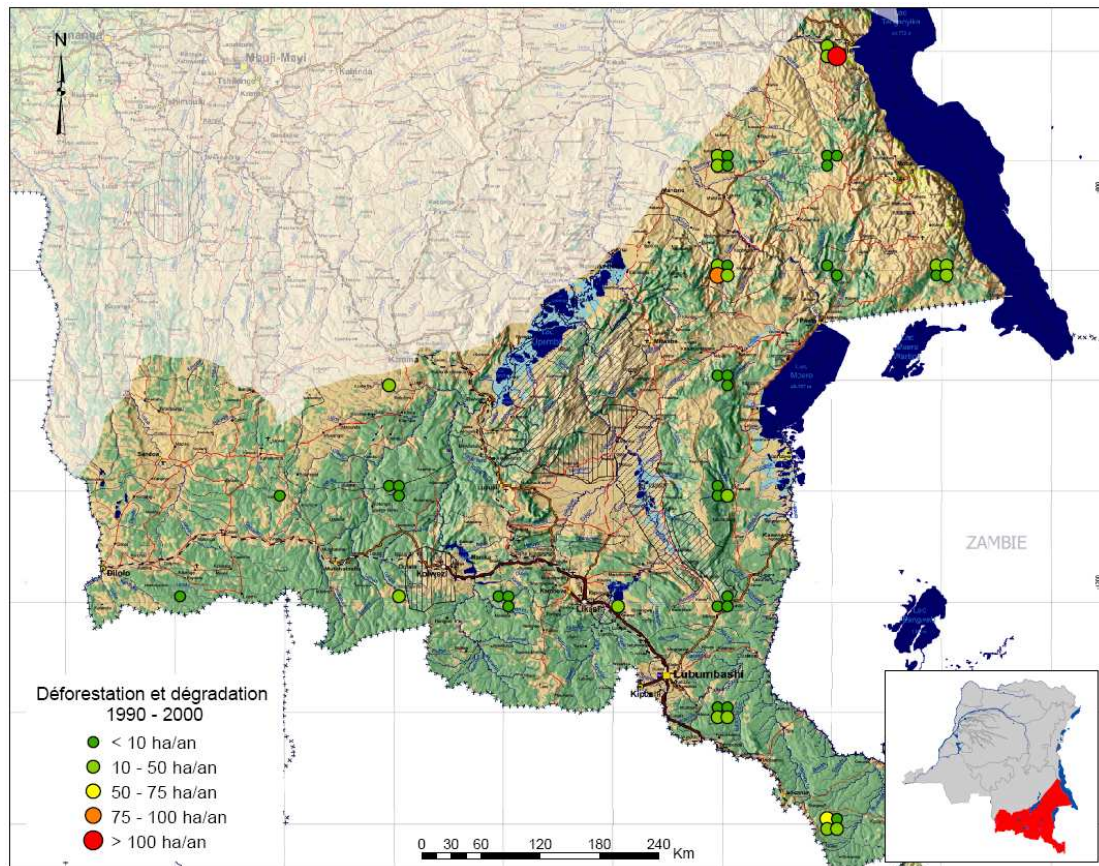


Figure I - 4 Distribution des échantillons pour la zone 11

Partie 2 :

Proposition de protocole de validation

Table des matières

Préambule	3
Objectif général	4
Description de la méthode de validation	6
Proposition de calendrier des activités	7
A/ Niveau sous-national	8
Délimitation des zones d'étude	8
Modalités de mise en œuvre	11
Etape 1 - Préparation de l'Expert Focus Group	12
Etape 2 - Expert Focus Group	14
B/ Niveau local : site représentatif	17
Modalités de mise en œuvre	17
Etape 1 - Sélection des sites d'enquête	17
Etape 2 - Préparation de l'enquête et formation des enquêteurs	17
Etape 3 – Enquête au niveau local	18
Etape 4 – Traitements des données	19
Synthèse de la validation	21

Préambule

Dans le cadre du programme UN-REDD (Programme des Nations unies sur la réduction des émissions résultant du déboisement et de la dégradation forestière dans les pays en développement), une étude des causes de la déforestation et de la dégradation des forêts est en cours de réalisation pour la période 1990-2000-2005. L'objectif principal de cette étude statistique est d'identifier et de quantifier l'influence des différentes variables expliquant les changements du couvert forestier pour la période 1990-2000-2005 sur le territoire de la République Démocratique du Congo. L'étude repose sur l'interprétation de l'ensemble des images Landsat disponibles selon un échantillonnage de zones de 20x20 km réparties régulièrement sur une maille de 0,5°. La cartographie de la déforestation et de la dégradation menée en collaboration avec les experts nationaux dans le cadre de l'Observatoire des Forêts d'Afrique centrale vient d'être compilée pour l'ensemble des échantillons et a été mis à la disposition de la présente étude (Figure 1). Le second objectif de l'étude est le développement d'un protocole d'enquête pour la validation des principaux facteurs de déforestation et de dégradation identifiés par le modèle statistique.

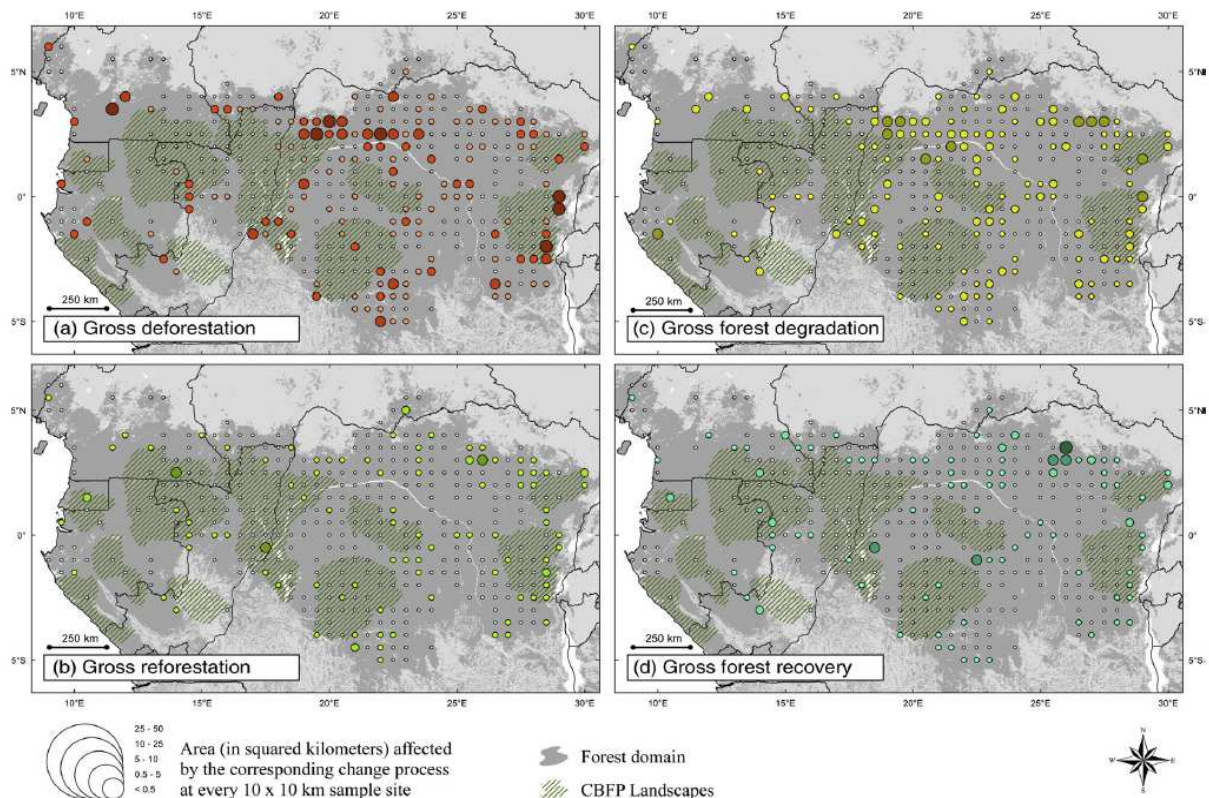


Figure 1 – Exemple de type de résultat concernant la distribution spatiale des processus de changement du couvert forestier qui se sont produits entre 1990 et 2000 dans la forêt du bassin du Congo (Duveiller et al. 2008).

Objectif général

Ce protocole d'enquête permettra de valider qualitativement et quantitativement les résultats obtenus par l'analyse des causes de la déforestation et de la dégradation à l'échelle de la République Démocratique du Congo. Cette démarche de validation a pour but de contribuer à la construction d'un consensus national concernant les dynamiques de déforestation et de dégradation. Actuellement, le cadre très général de Geist et Lambin (Figure 2) est considéré comme une référence pour l'énumération des causes et facteurs de la déforestation. Un des apports de la validation serait d'affiner ce cadre et de l'adapter au cas spécifique de la RDC.

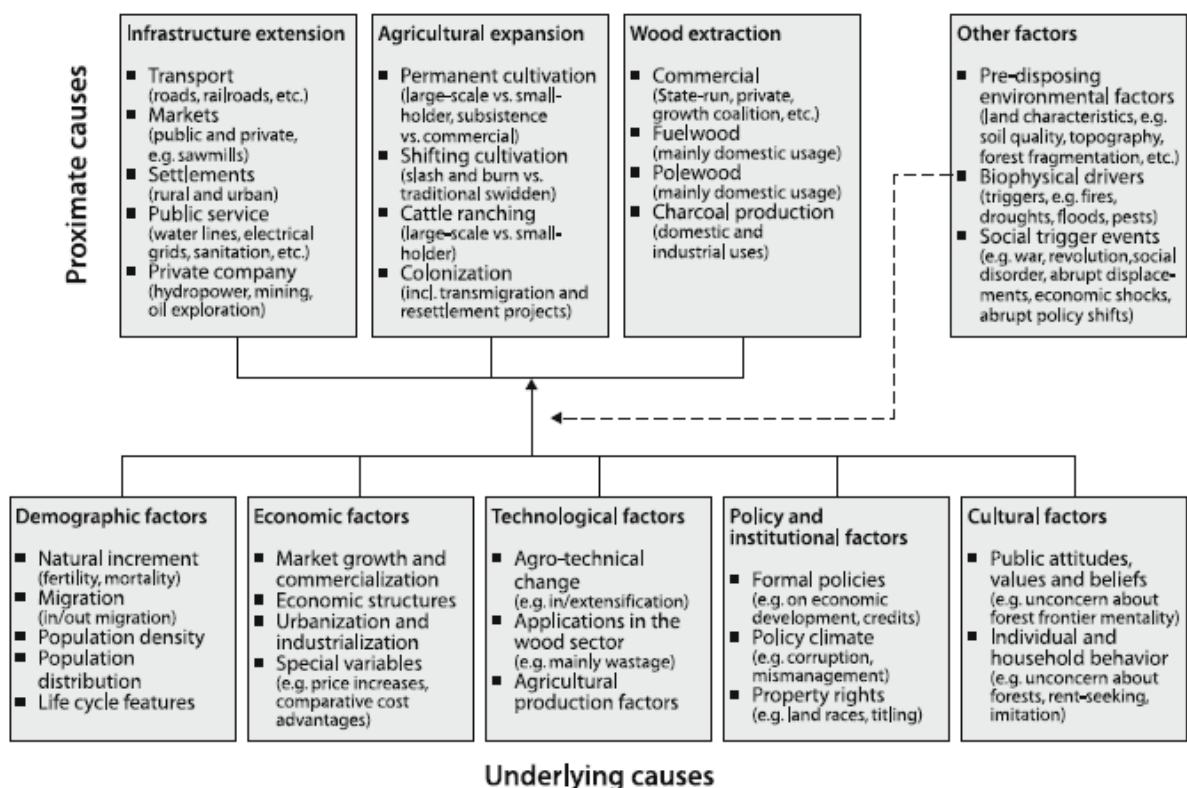


Figure 14 Causes proches et forces motrices de la déforestation (source: Geist and Lambin, 2002, p.144)

A l'image de la démarche de modélisation, deux niveaux complémentaires d'observation sont proposés pour procéder à la validation : l'échelle sous-nationale et l'échelle locale.

L'échelle sous-nationale correspond à un ensemble de zones délimitées en fonction de l'occupation du sol et des écorégions (telles que définies par le WWF). Au total onze zones ont été définies pour la RDC. L'analyse statistique des causes de la déforestation et de la dégradation est en cours de réalisation une première fois sur l'ensemble des onze zones (modèle national) et ensuite sur chacune des onze zones prises séparément

(modèle sous-national). Une première enquête au niveau sous-national auprès de différentes personnes ressources permettra d'obtenir une évaluation qualitative du modèle de déforestation et dégradation forestière. On entend par évaluation qualitative, une étude globale de la convergence du modèle avec ce qui est connu de la réalité. Ce ne sera pas une évaluation chiffrée en pourcentage d'erreur, mais plutôt une comparaison systématique entre la connaissance d'une série d'experts/personnes ressources interrogées et les résultats du modèle. Plusieurs questions précises seront étudiées, notamment le fait de vérifier si toutes les causes de la déforestation ont été identifiées par le modèle et dans quelle mesure les poids accordés à celles-ci par le modèle reflètent effectivement leur importance relative observée dans la réalité.

L'échelle locale correspond aux échantillons Landsat de 20 x 20 km. Quatre sites d'étude qui correspondent à quatre échantillons Landsat seront choisis pour chacune des onze zones. Chaque site devra être documenté à l'aide d'images satellites préparées sous forme de compositions colorées orthorectifiées et habillées par les toponymes importants (villages, rivières,...). Des mesures et enquêtes précises seront effectuées sur ces sites au niveau local afin de retracer la trajectoire de situations emblématiques et représentatives de déforestation et obtenir ainsi des mesures quantitatives plus détaillées. Cette deuxième partie est dite quantitative dans la mesure où les sites d'enquête sont choisis pour être les plus représentatifs possible des processus observés dans la zone (cas typique ou stéréotype) et des mesures quantitatives y seront effectuées pour pouvoir déterminer la part de chaque variable dans la déforestation.

Description de la méthode de validation

Le tableau ci-dessous résume à la fois l'articulation ainsi que les étapes relatives aux deux échelles d'observation qui sont détaillées par la suite.

Etapas		Objectifs	Résultats attendus
Niveau sous-national	Entretien individuel	Préparation des <i>Expert Focus Group</i> . Interview individuelle des experts de chaque zone.	Classification des causes de la déforestation. Elaboration de cartes représentant les processus de déforestation. Evolution des causes entre 1990-2000-2005.
	Expert Focus Group	Confrontation des opinions des experts et des modèles.	Classification des causes et élaboration de carte de drivers concertées entre experts. Confrontation avec les résultats du modèle.
	Sélection des sites d'enquête	Sélection des sites représentatifs sur base des résultats des <i>Expert Focus Group</i> .	Adaptation éventuelle des questionnaires en fonction des spécificités de chaque site, documentation cartographique des sites.
Niveau Local	Questionnaires	Etudes des processus de déforestation au niveau local auprès des personnes ressources.	Analyse des processus et de l'histoire du site d'enquête en termes de déforestation et dégradation.

Proposition de calendrier des activités

	Mois 1	Mois 2	Mois 3	Mois 3	Mois 3	Mois 4
Sélection des experts						
Phase de test, préparation des <i>Focus Group</i>						
Entretien individuel						
Expert Focus Group						
Sélection des sites d'enquête						
Synthèse et restitution des résultats						
Formation des enquêteurs						
Enquêtes locales						à préciser
Analyse et synthèse des résultats d'enquête						à préciser

L'identification des experts peut commencer dès fin janvier 2011. Une fois les experts sélectionnés, la phase de validation du modèle au niveau sous-national commencera à Kinshasa. Pour les experts déjà présents à Kinshasa, une première réunion d'introduction sera menée afin de présenter le projet plus en détails et de tester la méthodologie des *Focus Group* (phase de test/préparation). Ensuite, l'ensemble des experts seront invités à Kinshasa. Trois jours seront consacrés à chaque zone dont deux jours pour les entretiens individuels et 1 jour pour l'*Expert Focus Group* et la sélection des sites d'enquêtes. Il faudra donc un total de 33 homme.jours de travail pour les médiateurs. Afin de limiter les *Focus Group* dans le temps, quatre médiateurs seront présents pour animer les *Focus Group*. Une semaine au total sera donc consacrée au *Focus Group*.

A la fin de chaque *Experts Focus Group*, la synthèse et la restitution des résultats seront communiquées. Des recommandations pour les questionnaires du niveau local seront émises afin d'adapter chaque questionnaire aux spécificités de chaque site d'enquête sélectionné par le *Focus Group*. Des documents cartographiques devront être produits pour accompagner les enquêtes de terrain.

La formation des enquêteurs de terrain se tiendra après les *Focus Group*. Les enquêteurs seront invités à participer à la phase de synthèse et de restitution des résultats des *Focus Group*. Trois jours, seront ensuite consacrés à la formation des enquêteurs.

A/ Niveau sous-national

Une enquête au niveau sous-national sera réalisée à l'aide d'un *Expert Focus Group* rassemblant plusieurs experts de chaque zone d'étude.

Délimitation des zones d'étude

Onze zones ont été délimitées préalablement lors de la modélisation (Figure 4). Le pays a été divisé dans un premier temps en grands biomes sur base des écorégions du WWF (Figure 3). Ces zones ont ensuite été redécoupées à partir de la carte d'occupation du sol au 1 :3 000 000 (UCL). Onze zones ont donc été définies (Figure 4) en tenant compte à la fois de l'occupation du sol et des écorégions du WWF. Lors du découpage du pays, une attention particulière a été portée pour veiller à avoir un nombre suffisant d'échantillons dans chaque zone, soit un minimum de 40 échantillons par zone.

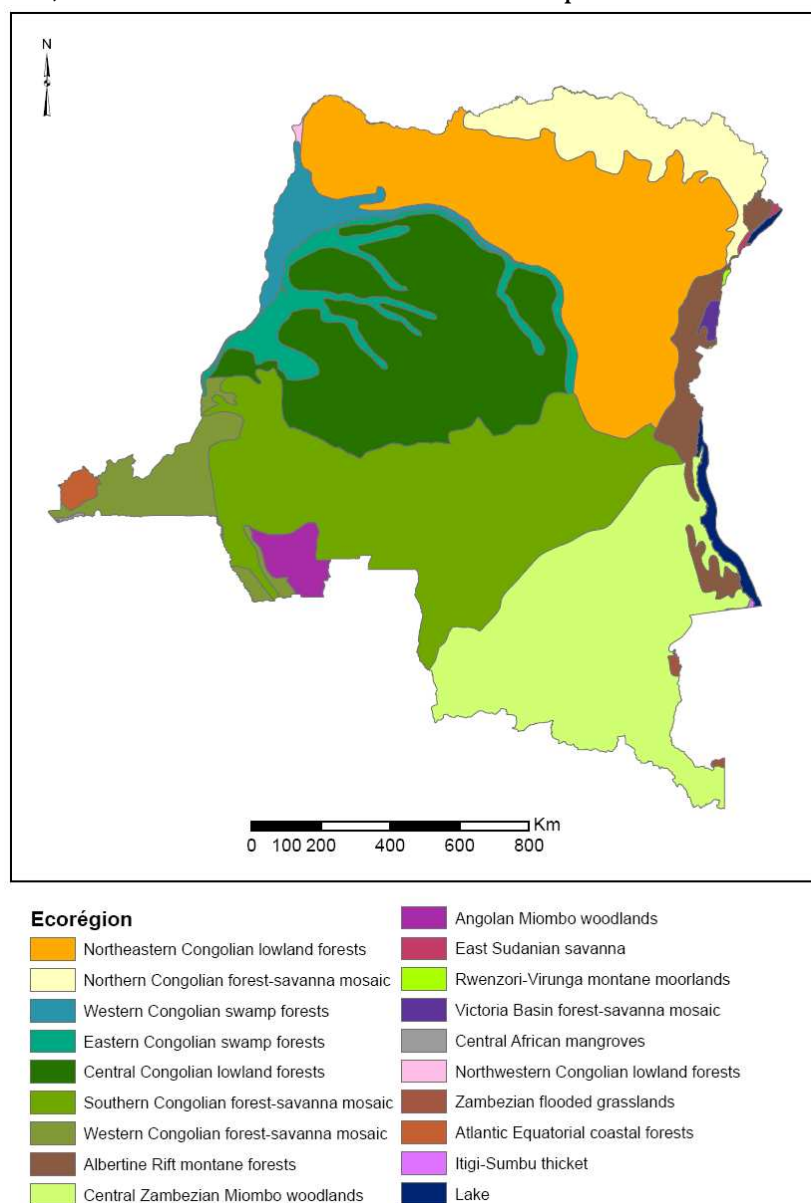


Figure 3 Ecorégion du WWF (source : Olson et al., 2001)

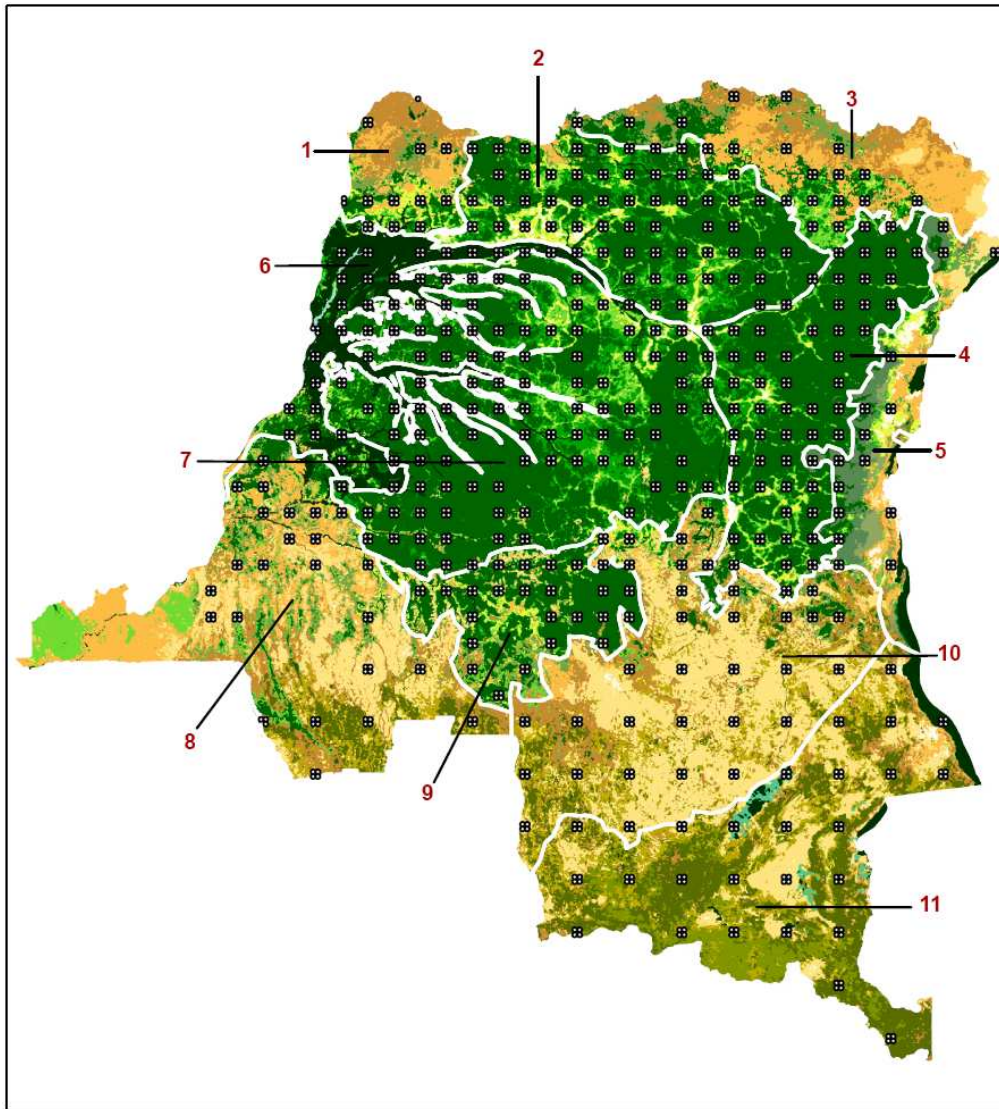


Figure 4 - Délimitation des zones (source : UCL-Géomatique).

Les zones obtenues sont donc les suivantes :

- zone 1 : mosaïque forêt – savane, au Nord-ouest
- zone 2 : transition forêt dense – forêt secondaire
- zone 3 : mosaïque forêt – savane, au Nord-est
- zone 4 : forêt dense humide, à l’Est
- zone 5 : forêt d’altitude
- zone 6 : forêt édaphique
- zone 7 : forêt dense humide, au centre
- zone 8 : mosaïque forêt – savane, au Sud-ouest
- zone 9 : transition forêt dense – forêt secondaire
- zone 10 : mosaïque forêt – savane, au Sud-est
- zone 11 : forêt claire de type Miombo

Modalités de mise en œuvre

Le *Focus Group* est un outil de collecte d'informations permettant de confronter directement les différents points de vue des experts et d'obtenir ainsi plusieurs sources d'informations différentes. Le *Focus Group* permet de débattre autour d'un problème particulier. Un minimum de trois experts par zone devra participer à ces *Focus Group*. Ces réunions permettront d'avoir une vue d'ensemble sur les processus de déforestation et de dégradation. Plusieurs experts d'une même zone seront réunis en même temps afin de confronter, confirmer et approfondir collectivement un certain nombre d'analyses et points de vue particuliers exprimés au préalable en entretiens individuels. Les informations recueillies lors du *Focus Group* sont d'ordre qualitatif.

Critères de sélection des experts

Les experts devront avoir une connaissance approfondie de la zone concernée. Ce sont des personnes qui ont une longue expérience de terrain et qui ont une bonne connaissance de la zone. Un minimum de 3 experts par zone est requis afin de pouvoir confronter différents point de vue.

Les experts devront autant que possible provenir de milieux et disciplines variés afin de prendre en compte les différentes spécificités de la zone. Les experts pourront par exemple appartenir aux différentes catégories suivantes (liste non exhaustive):

- Chargé de programme pour les ONG de conservation de la nature
- Agent de terrain pour les ONG de conservation de la nature
- Acteur institutionnel du Ministère de l'Environnement
- Expert FAO
- Représentants de la société civile
- Concessionnaire forestier
- Personnes ressources membres des communautés de la forêt
- Représentants des peuples autochtones
- ...

Etape 1 - Préparation de l'Expert Focus Group

Une rencontre individuelle préalable aura lieu avec chaque expert. Cet entretien permettra de prendre en compte tous les avis des experts. L'entretien individuel favorise la prise de parole de chaque expert sans influence des autres experts.

Plusieurs étapes seront effectuées durant cet entretien :

A - Classification des causes de la déforestation selon les experts

Cette étape sera réalisée en deux phases. Dans un premier temps chaque expert identifiera les causes de la déforestation liées à leur zone. Ils devront les classer par ordre d'importance et leur donner un poids. Ensuite, une carte de leur zone leur sera présentée (Figure 5), ils devront identifier si les causes précitées ont la même importance dans toute la zone ou si certaines parties présentent des particularités.

Si les causes de la déforestation ne sont pas homogènes dans leur zone, il leur sera demandé de délimiter des sous-ensembles sur la carte et d'expliquer les différences entre ces sous-ensembles en listant, par ordre d'importance, les causes de la déforestation.

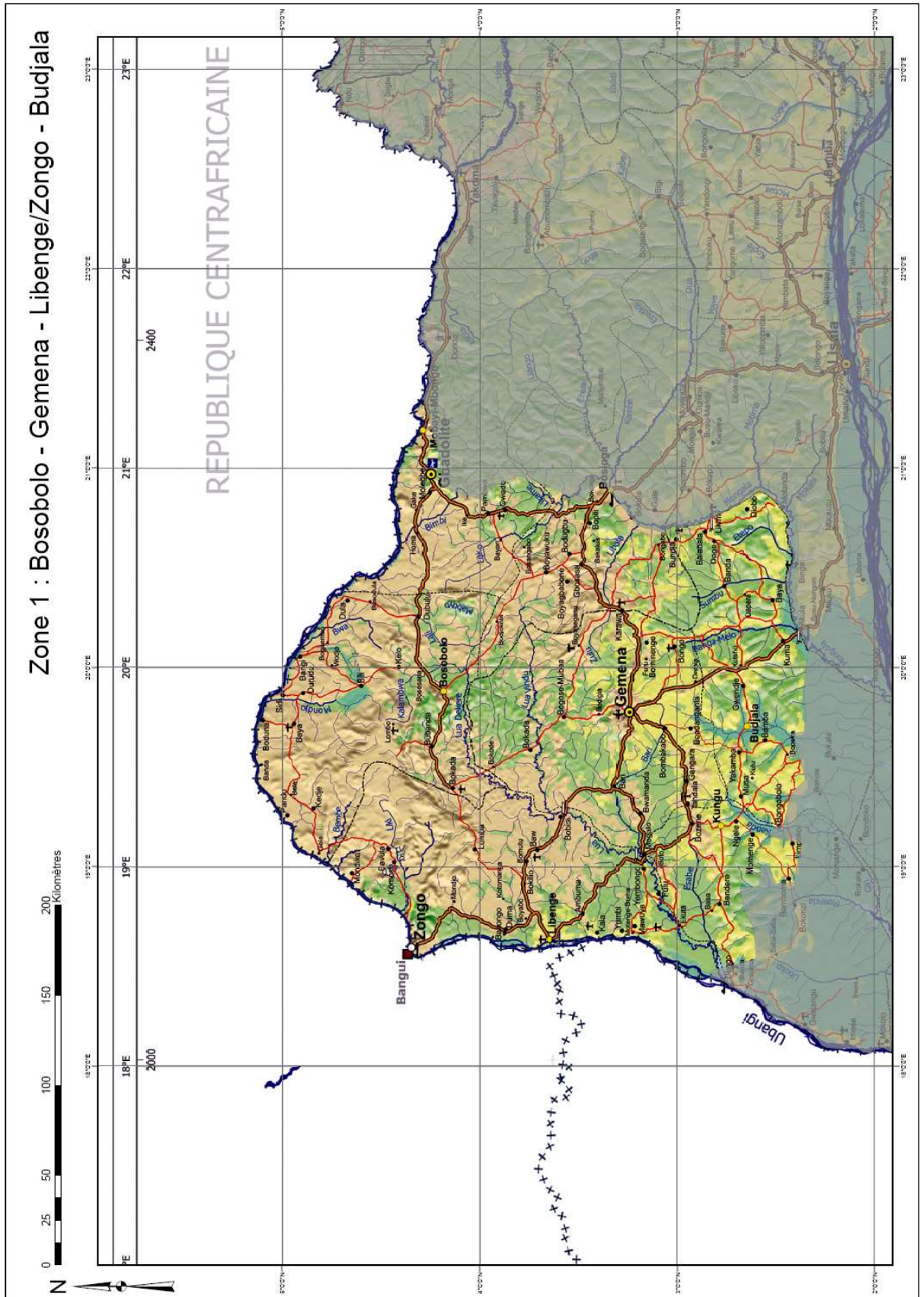


Figure 5 : Carte de base de la zone 1 (source : UCL-Géomatique)

B - Classification des variables du modèle

Cette deuxième étape est identique à l'étape A mais utilisera uniquement comme cause de la déforestation celles identifiées au préalable par le modèle. Les experts devront les classer par ordre d'importance en leur donnant un poids sans connaître la classification résultante du modèle.

C - Evolution des causes de la déforestation et de la dégradation entre 1990 et 2005 ?

Cette étape a pour but de retracer l'évolution des causes de la déforestation entre 1990 et 2005. Il sera demandé aux experts d'identifier les causes principales de changement du couvert forestier dans les années 1990. « Est-ce que ces causes sont les mêmes que dans les années 2000 et 2005 ? ». « Et aujourd'hui, vers quoi évolue-t-on ? »

Afin d'analyser les relations entre la déforestation et des événements passés, il sera demandé aux experts de situer, si possible, leurs propos par rapport à un événement historique (flux migratoires, guerres, premières offensives des ONG de conservation de la nature, etc.)

Etape 2 - Expert Focus Group

A - Objectif

Après la série d'entretien individuel, l'*Expert Focus Group* se réunira afin de confronter les différents points de vue et opinions des experts. Au préalable, une synthèse des entretiens individuels aura été effectuée afin de faciliter la comparaison des résultats.

B - Mode d'animation

Le *Focus Group* sera animé par un médiateur. Il aura pour mission de guider la discussion dans le groupe en veillant à ne pas prendre position. Son rôle consiste à animer la discussion, à poser les questions, à organiser la prise de parole, clarifier les éléments de consensus et de divergences, ...

Dans un premier temps, le médiateur présentera l'objectif de la réunion et procédera à un tour de table pour présenter tous les experts.

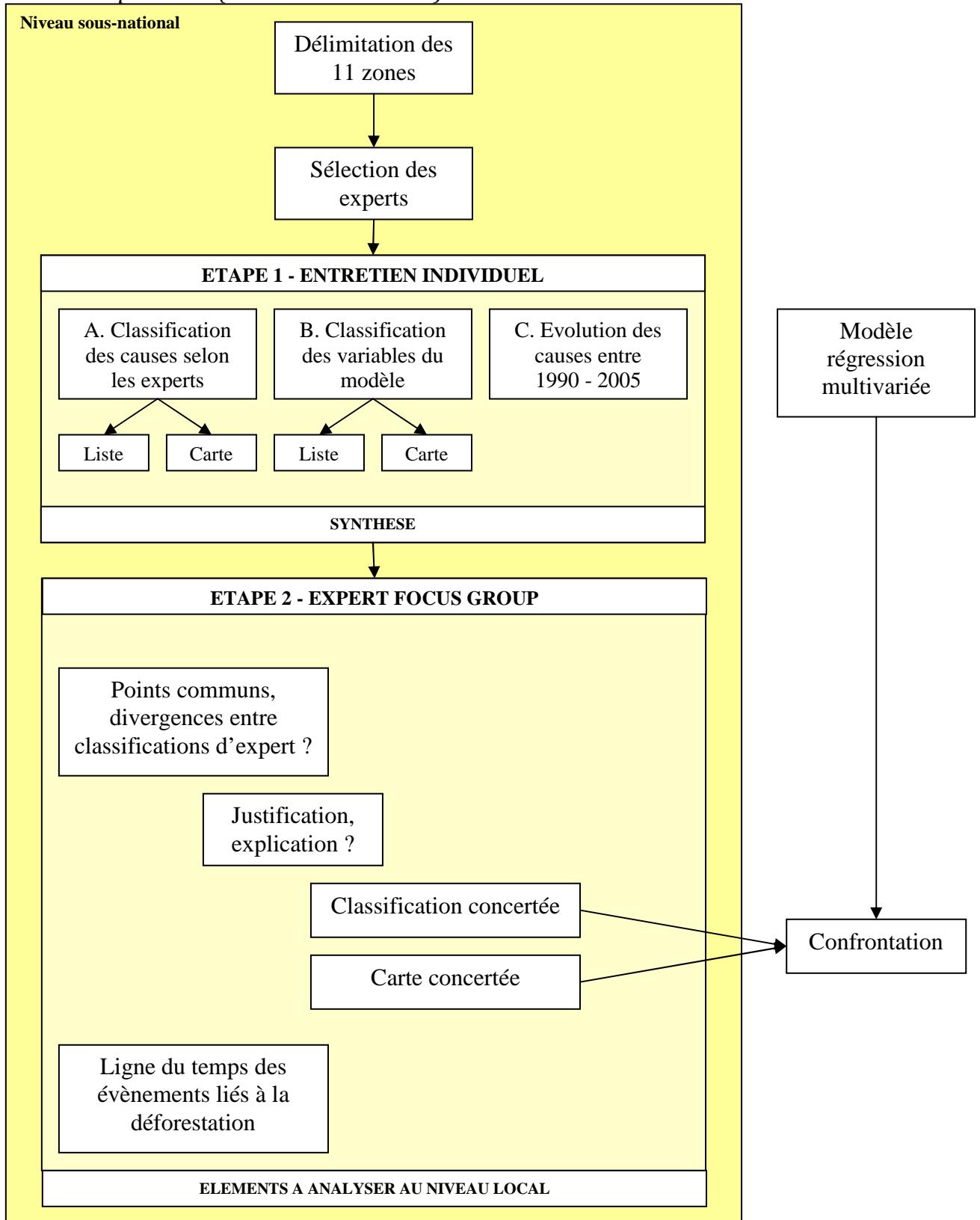
Au terme de la réunion, les questions suivantes devront être abordées :

- Quels sont les points communs et divergences des classifications des experts concernant les causes de la déforestation?
- Comment justifier/expliquer ces divergences ?
- Est-il possible de tendre vers une classification commune à tous les experts ?
- Quels éléments à considérer pour réaliser une carte concertée des différents processus de déforestation et dégradation ?
- Quel est le taux d'adéquation entre des résultats du modèle et la classification des experts ?
- Peut-on retracer sur une ligne du temps les différents événements liés à la déforestation ?
- Quels sont les points qui mériteraient d'être analysés sur le terrain (niveau local) ?
- Quels points spécifiques doivent être ajoutés aux questionnaires de base (niveau local) ?

C - Outils

Un tableau de synthèse servira de base pour la comparaison des résultats des entretiens individuels. Celui-ci reprendra les différentes classifications des experts et mettra en évidence les différences et points communs. Les différentes cartes réalisées lors des entretiens individuels seront mises côte à côte afin de visualiser les différentes visions des experts. Le médiateur aura à sa disposition une check-list pour vérifier que tous les sujets ont bien été abordés. Différents fonds de cartes serviront de support pour la réalisation des cartes concertées.

Schéma du protocole (niveau sous-national)



B/Niveau local : site représentatif

Objectif :

Cette deuxième partie du protocole a pour objectif d'obtenir un point de vue quantitatif sur l'importance des causes et acteurs de la déforestation. Elle se déroulera après l'analyse des résultats des *Expert Focus Group*.

Modalités de mise en œuvre

Etape 1 - Sélection des sites d'enquête :

Quatre sites d'enquête seront sélectionnés pour chacune des onze zones. Chaque site représentera un échantillon d'une image Landsat de 20x20 km de côté. Trois sites d'enquête seront choisis pour leur fort taux de déforestation et le quatrième site aura un taux de déforestation faible ou nul.

Les sites d'enquête envisagés devront être suffisamment représentatifs afin de rendre compte des différents cas de figures pouvant être rencontrés en RDC. Dans chaque zone, les sites d'enquête seront déterminés en concertation avec l'*Expert Focus Group*. Les sites auront comme caractéristiques de présenter un maximum d'éléments identifiés comme contribuant à la déforestation et dégradation (présence de routes, présence de zone agricole, présence de village, marché à proximité, concession et/ou mine à proximité,...).

D'un point de vue pratique, les sites accessibles et/ou disposant d'infrastructure d'accueil seront choisis. Ils devront aussi présenter une bonne répartition spatiale dans la zone. Une première présélection des sites potentiels sera effectuée par l'UCL sur base du critère d'accessibilité et du taux de déforestation. Les experts de chaque zone choisiront alors les 4 sites les plus adéquats.

Etape 2 - Préparation de l'enquête et formation des enquêteurs :

Un diagnostic local devra être effectué pour chaque site d'enquête. Il reprendra, de manière générale, le type de végétation qui prédomine, le nombre de villages, le type de système agraire, les routes présentes, la présence d'aires protégées, la présence de marchés,... Quand ils sont disponibles, tous ces éléments pourront être représentés sur une carte géo-référencée. Des spatiocartes réalisées à partir d'images satellites (SPOT et Landsat) représentant le site d'étude à différentes dates devront également être réalisées et imprimées afin d'avoir une vue d'ensemble du site à la fois dans l'espace et

dans le temps (Figure 6). Ces images comporteront également les noms de villes et villages présents sur le site d'étude.

Le questionnaire de base devra également être adapté à chaque site afin de cibler l'enquête sur les spécificités locales. De nouveaux questionnaires pourront également être établis si l'*Expert Focus Group* le juge utile (questionnaire pour les industriels présents sur le site, pour les administrations, ...). A cette fin, des recommandations pour la modification des questionnaires seront émises lors de la phase de restitutions et de synthèse des résultats des *Expert Focus Group*.

La formation des enquêteurs se déroulera à Kinshasa après les *Expert Focus Group*.

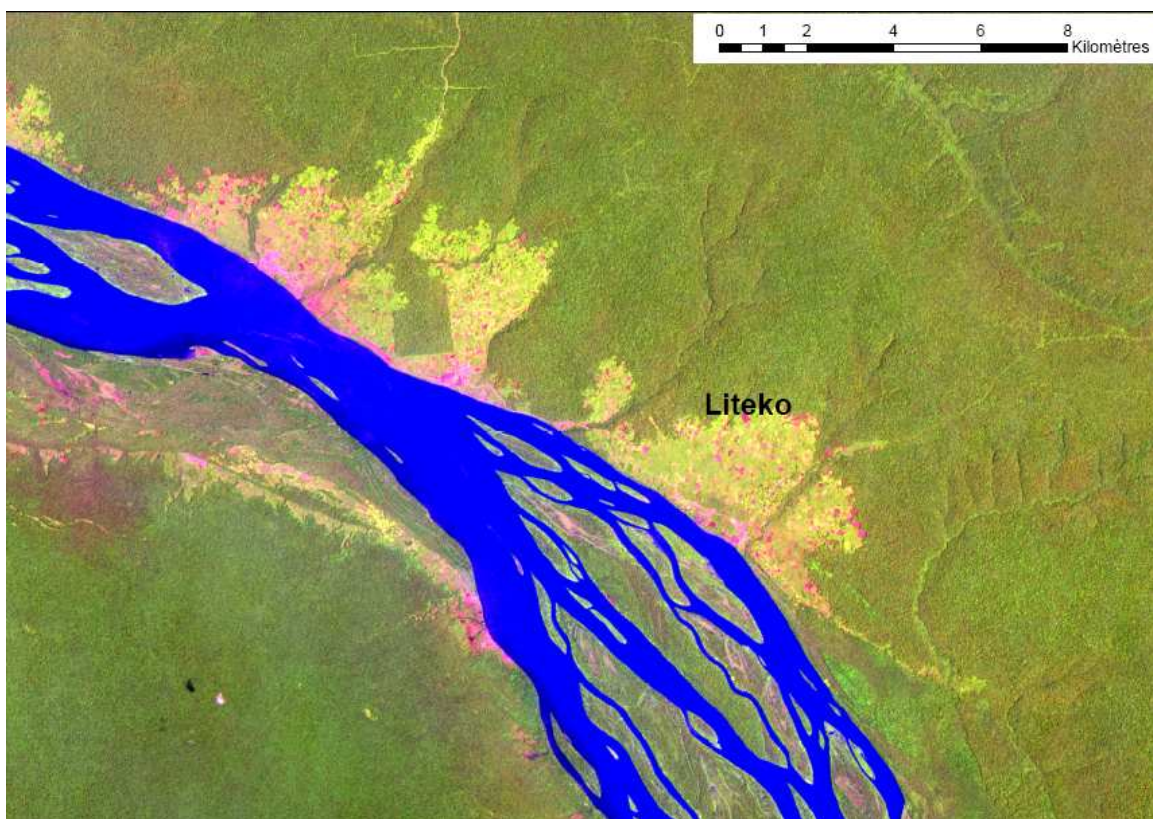


Figure 6 : Image SPOT du 15/02/2009

Etape 3 – Enquête au niveau local :

La première partie sera une enquête par questionnaire auprès des personnes ressources sélectionnées (chef de village et représentants des forces vives). Ce questionnaire comportera aussi bien des questions ouvertes que fermées. Lors de cette première étape, les images satellites du site seront présentées aux personnes ressources afin que celles-ci racontent l'histoire du site et pointent sur l'image les zones où l'on peut observer les différents processus et causes de déforestation et dégradation.

En fonction des sites d'études, d'autres campagnes de mesures ou enquêtes par questionnaires pourront être effectuées de manière optionnelle. Ce sera particulièrement le cas si des sites plus urbanisés sont retenus.

Un questionnaire d'enquête de base a été élaboré (cf. Annexe) et celui-ci pourra être détaillés par la suite à l'aide des résultats de l'*Expert Focus Group* qui aura permis d'identifier les grands axes et les éléments à analyser en priorité au niveau local.

Quatre sites d'enquête sont prévus pour chaque zone. Dans ces sites, l'enquête devra idéalement se dérouler dans 10 villages. Il y aura donc 40 villages enquêtés pour chaque zone. L'estimation du nombre d'homme.jours nécessaire varie largement d'une zone à l'autre. En considérant des équipes de 2 personnes disposant d'une moto, il est attendu qu'il faudrait environ 3 jours par site et environ 20 jours par zone en tenant compte des trajets entre sites. Des GPS seront mis à disposition des enquêteurs afin de pouvoir spatialiser les résultats de l'enquête.

Etape 4 – Traitements des données :

Les questions du formulaire de base (cf. Annexe) sont classées en 4 types afin de faciliter l'interprétation et la synthèse des enquêtes.

Type de question :

1. Question de *localisation* : localisation du site d'enquête dans l'espace.
2. Question de *contexte* : définition du contexte propre à chaque site.
3. Question d'*identification* : identification des variables pouvant expliquer le changement du couvert forestier.
4. Question de *quantification* : quantification des variables pouvant expliquer le changement du couvert forestier.

Un premier contrôle de cohérence des résultats devra être réalisé en comparant les réponses des questions du volet IX (cf. Annexe) avec le reste du questionnaire afin de détecter des contradictions, anomalies ou oublis.

L'interprétation des questions de type « identification » va permettre de valider les causes identifiées par le modèle.

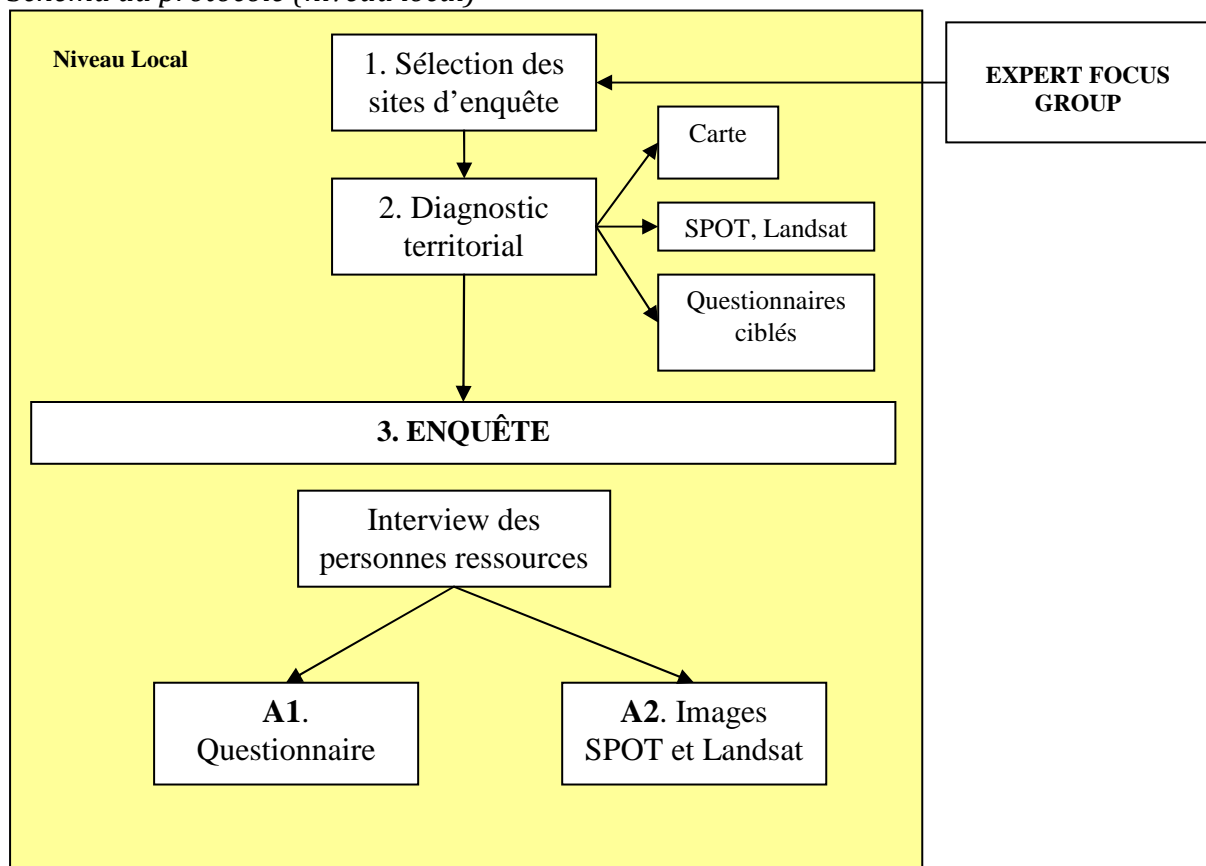
L'interprétation des questions de type « contexte » va permettre d'identifier les situations particulières présentes sur les sites d'étude.

L'interprétation des questions de type « quantification » va permettre de valider les variables identifiées par le modèle, par exemple la population ou la distance aux marchés. Le type de question « quantification » va aussi permettre de valider la valeur du taux de déforestation.

L'interprétation des questions de type « localisation » va permettre de replacer les résultats de l'enquête dans l'espace-temps et ainsi de reconstruire de manière narrative la trajectoire historique de la déforestation et dégradation pour un ou deux villages types pour chaque zone.

La synthèse des résultats des enquêtes pour une zone sera également représentée sous la forme d'un ou plusieurs chorèmes, éventuellement correspondant à différentes périodes. Un chorème est une représentation graphique et schématique de la réalité qui conceptualise les interactions avec la forêt à travers des éléments simples (convention graphique).

Schéma du protocole (niveau local)



Afin de conclure la validation, toutes les synthèses de résultats d'enquêtes pour chaque zone et les validations qui en sont dérivées seront compilées et agrégées à l'échelle nationale. L'assemblage des résultats de validation par zone permettra d'identifier les éléments de convergence et divergence entre l'analyse statistique quantitative, l'apport des Experts Focus Group et les enquêtes locales de terrain. Ces éléments seront examinés systématiquement dans l'espace et dans le temps pour les différentes périodes.

Des tables de contingences seront construites pour comparer la hiérarchisation des causes de déforestation et de dégradation pour chaque zone afin de dériver la validité du modèle à l'échelle nationale. Une analyse de corrélation entre les causes identifiées par l'approche statistique et les causes observées par les enquêtes de terrain devrait permettre également de quantifier la qualité des résultats obtenus.

La démarche de validation permettra de consolider et probablement de nuancer les résultats de l'analyse quantitative des causes de la déforestation et de la dégradation, notamment par l'enrichissement des informations issues du terrain. La mise en perspective de l'ensemble des résultats permettra de proposer une synthèse consolidée des dynamiques de déforestation et de dégradation à l'œuvre sur le territoire de la République démocratique du Congo.

Références bibliographiques

Duveiller G., Defourny P., Desclée B., Mayaux P., 2008. *Deforestation in Central Africa : Estimates at regional, national and landscape levels by advanced processing of systematically-distributed Landsat extracts*. Remote Sensing of Environment, 112, p. 1969-1981.

Geist HJ., Lambin EF., 2002. *Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation*. BioScience, 52:143–150.

Olson, D. M, E. Dinerstein, E.D. Wikramanayake, N.D. Burgess, G.V.N. Powell, E.C. Underwood, J.A. D'amico, I. Itoua, H.E. Strand, J.C. Morrison, C.J. Loucks, T.F. Allnutt, T.H. Ricketts, Y. Kura, J.F. Lamoreux, W.W. Wettengel, P. Hedao, & K.R. Kassem. 2001. *Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth*. BioScience, 51:933-938

Vancutsem C., Pekel JF., Evrard C., Malaisse F., Defourny P., 2009. *Mapping and characterizing the vegetation types of the Democratic Republic of Congo using SPOT VEGETATION time series*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 11, (1), p. 62-76.

République Démocratique du Congo
Etude des causes de la déforestation et de la dégradation des
forêts - questionnaire de base
FAO - UNREDD - UCL-Géomatique

I. Informations générales	Localisation	Contexte	Identification	Quantification
Date : __ / __ / ____ (jj/mm/aaaa)				
Enquêteur : Nom : _____				
Prénom : _____				
Heure de début de l'entretien : _____				
Heure de fin de l'entretien : _____				
Localisation : Province : _____				
Territoire : _____				
Nom du village : _____				
Coordonnées GPS (mesurez les coordonnées à l'église) : _____				
Personne(s) ressource(s) :				
1. Nom (facultatif) : _____				
Sexe* : F M Age : _____				
Profession : - principale : _____				
- secondaire : _____				
Statut : _____				
2. Nom (facultatif) : _____				
Sexe* : F M Age : _____				
Profession : - principale : _____				
- secondaire : _____				
Statut : _____				
3. Nom (facultatif) : _____				
Sexe* : F M Age : _____				
Profession : - principale : _____				
- secondaire : _____				
Statut : _____				
<i>(Si plus de trois personnes ressources, complétez au dos du questionnaire)</i>				

* Entourez la/les réponse(s)

II. Population	Localisation	Contexte	Identification	Quantification
1. En quelle année et/ou à quelle époque le village a-t-il été établi ? _____ _____				
2. Nombre de ménage dans le village : _____ 3. Nombre d'habitant : Homme (enfants inclus) : _____ Femme (enfants inclus): _____ Enfant (moins de 10 ans) : _____				
4. Existe-t-il différentes tribus dans le village ? Nom de la tribu : _____ Nombre de personne : _____ Nombre de ménage : _____ Nom de la tribu : _____ Nombre de personne : _____ Nombre de ménage : _____ Nom de la tribu : _____ Nombre de personne : _____ Nombre de ménage : _____				
5. Y a-t-il eu des périodes de migration ? En quelle année ? De quelle tribu? Année : _____ Nombre de personne : _____ Nom de la tribu : _____ Année : _____ Nombre de personne : _____ Nom de la tribu : _____ Année : _____ Nombre de personne : _____ Nom de la tribu : _____				
6. Nombre total d'habitant : a. En 1990 ? _____ b. En 2000 ? _____ c. En 2010 ? _____				

III. Activités/revenus	Localisation	Contexte	Identification	Quantification																		
	<p>1. Quelles sont les sources de revenu dominantes des ménages ? (listez par ordre d'importance) :</p> <p>a. -----</p> <p>b. -----</p> <p>c. -----</p> <p>d. -----</p> <p>Combien de ménages dans le village dépendent fortement de la forêt ? _____</p> <p>-----</p>																					
<p>2. Quelles étaient les sources de revenu dominantes des ménages il y a 15 ans ? (listez par ordre d'importance) :</p> <p>a. -----</p> <p>b. -----</p> <p>c. -----</p> <p>d. -----</p>																						
<p>3. Noms et localisation et type des marchés hebdomadaires* ?</p> <table border="1" data-bbox="199 1189 1240 1489"> <thead> <tr> <th data-bbox="199 1189 539 1350" rowspan="2">Nom</th> <th colspan="2" data-bbox="539 1189 887 1245">Distance au village</th> <th data-bbox="887 1189 1240 1350" rowspan="2">Principaux produits</th> </tr> <tr> <th data-bbox="539 1245 719 1350">Km</th> <th data-bbox="719 1245 887 1350">Temps à pieds</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="199 1350 539 1395"></td> <td data-bbox="539 1350 719 1395"></td> <td data-bbox="719 1350 887 1395"></td> <td data-bbox="887 1350 1240 1395"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="199 1395 539 1440"></td> <td data-bbox="539 1395 719 1440"></td> <td data-bbox="719 1395 887 1440"></td> <td data-bbox="887 1395 1240 1440"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="199 1440 539 1489"></td> <td data-bbox="539 1440 719 1489"></td> <td data-bbox="719 1440 887 1489"></td> <td data-bbox="887 1440 1240 1489"></td> </tr> </tbody> </table>	Nom	Distance au village		Principaux produits	Km	Temps à pieds																
Nom		Distance au village			Principaux produits																	
	Km	Temps à pieds																				
<p>4. Noms et localisation et type des principaux marchés pour les biens importés et manufacturés (ex : vélo)*?</p> <table border="1" data-bbox="199 1686 1240 1986"> <thead> <tr> <th data-bbox="199 1686 539 1848" rowspan="2">Nom</th> <th colspan="2" data-bbox="539 1686 887 1742">Distance au village</th> <th data-bbox="887 1686 1240 1848" rowspan="2">Principaux produits</th> </tr> <tr> <th data-bbox="539 1742 719 1848">Km</th> <th data-bbox="719 1742 887 1848">Temps à pieds</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="199 1848 539 1892"></td> <td data-bbox="539 1848 719 1892"></td> <td data-bbox="719 1848 887 1892"></td> <td data-bbox="887 1848 1240 1892"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="199 1892 539 1937"></td> <td data-bbox="539 1892 719 1937"></td> <td data-bbox="719 1892 887 1937"></td> <td data-bbox="887 1892 1240 1937"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="199 1937 539 1986"></td> <td data-bbox="539 1937 719 1986"></td> <td data-bbox="719 1937 887 1986"></td> <td data-bbox="887 1937 1240 1986"></td> </tr> </tbody> </table>	Nom	Distance au village		Principaux produits	Km	Temps à pieds																
Nom		Distance au village			Principaux produits																	
	Km	Temps à pieds																				

*Si plus de trois marchés, complétez au dos du questionnaire

	Localisation	Contexte	Identification	Quantification
IV. Agriculture				
1. Nombre moyen de champs par ménage* :				
1 2 3 plus de 3				
Surface moyenne des champs : _____ ha				
2. Nombre de nouveau(x) champ(s) en dehors de la forêt depuis 5 ans* :				
5 -10 10 -20 20 - 30				
Taille moyenne d'un nouveau champ en dehors de la forêt* :				
1 - 3 ha 3 -5 ha > 5 ha				
Occupation du sol avant* :				
- Couverture forestière (arbre > 5m)				
- Mosaique forêt (40 à 70%) - autre occupation (précisez) _____				
- Mosaique forêt (10 à 40%) - autre occupation (précisez) _____				
- Arbuste ou fourré				
- Autre occupation : _____				
3. Nombre de nouveau(x) champ(s) dans la forêt depuis 5 ans* :				
5 -10 10 -20 20 - 30				
Taille moyenne d'un nouveau champ en forêt* :				
1 - 3 ha 3 -5 ha > 5 ha				
Occupation du sol avant* :				
- Couverture forestière (arbre > 5m)				
- Mosaique forêt (40 à 70%) - autre occupation (précisez) _____				
- Mosaique forêt (10 à 40%) - autre occupation (précisez) _____				
- Arbuste ou fourré				
- Autre occupation : _____				
4. Quels facteurs influencent la localisation des nouveaux champs ? <i>Expliquez</i> _____ _____ _____				

*Entourez la/les réponses

V. Organisations communautaires	Localisation	Contexte	Identification	Quantification
	<p>1. Existe-t-il des projets gouvernementaux de développement dans le village* au cours des 20 dernières années ?</p> <p>Nom du projet : _____</p> <p>Responsable : _____ Période : _____</p> <p>Lien avec l'agriculture, l'élevage, l'environnement ou la forêt ? <i>(Soulignez et expliquez)</i> _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Nom du projet : _____</p> <p>Responsable : _____ Période : _____</p> <p>Lien avec l'agriculture, l'élevage, l'environnement ou la forêt ? <i>(Soulignez et expliquez)</i> _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>			
<p>2. Existe-t-il des projets non gouvernementaux de développement dans le village* au cours des 20 dernières années ??</p> <p>Nom du projet : _____</p> <p>Responsable : _____ Période : _____</p> <p>Lien avec l'agriculture, l'élevage, l'environnement ou la forêt ? <i>(Soulignez et expliquez)</i> _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Nom du projet : _____</p> <p>Responsable : _____ Période : _____</p> <p>Lien avec l'agriculture, l'élevage, l'environnement ou la forêt ? <i>(Soulignez et expliquez)</i> _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>				

*Si plus de deux projets, complétez au dos du questionnaire

VI. Utilisation des ressources forestières	Localisation	Contexte	Identification	Quantification
<p>1. La population du village utilise-t-elle la forêt pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> - L'exploitation forestière* ? OUI NON <ul style="list-style-type: none"> Si OUI : _____ % pour l'utilisation individuelle _____ % pour l'utilisation artisanale, vente au marché local _____ % pour la vente au grand centre urbain - La collecte de produits forestiers non ligneux* ? OUI NON <ul style="list-style-type: none"> Si OUI : _____ % pour l'utilisation individuelle _____ % pour la vente au marché local _____ % pour la vente au grand centre urbain - La viande de brousse*? OUI NON <ul style="list-style-type: none"> Si OUI : _____ % pour l'utilisation individuelle _____ % pour la vente au marché local _____ % pour la vente au grand centre urbain - L'agriculture*? OUI NON - Les activités pastorales*? OUI NON - Autre? Expliquez ----- 				
<p>2. Utilisation du bois de chauffe comme source d'énergie* ? OUI NON</p> <p>Provenance du bois de chauffe :</p> <p>Distance (en km et temps à pieds) _____ / _____</p> <p>Type de végétation* : - Couverture forestière (arbre > 5m)</p> <p>- Mosaïque forêt (40 à 70%) - autre occupation (précisez) -----</p> <p>- Mosaïque forêt (10 à 40%) - autre occupation (précisez) -----</p> <p>- Arbuste ou fourré</p> <p>- Autre : -----</p> <p>Moyen de transport : -----</p> <p>Pourquoi à cet endroit ? : -----</p> <p>-----</p> <p>-----</p> <p>-----</p> <p>Fréquence d'approvisionnement* :</p> <p>1 fois/semaine 2 fois/semaine</p> <p>3 fois/semaine Autre (précisez) ---</p> <p><i>*Entourez la/les réponses</i></p>				

VI. Utilisation des ressources forestières (suite)	Localisation	Contexte	Identification	Quantification
<p>3. Utilisation du bois de comme matériaux de construction* ? OUI NON</p> <p>Provenance du bois :</p> <p>Distance (en km et temps à pieds) _____ / _____</p> <p>Type de végétation* :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Couverture forestière (arbre > 5m) - Mosaïque forêt (40 à 70%) - autre occupation (précisez) _____ - Mosaïque forêt (10 à 40%) - autre occupation (précisez) _____ - Arbuste ou fourré - Autre : _____ <p>Moyen de transport : _____</p> <p>Pourquoi à cet endroit ? : _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Fréquence d'approvisionnement* :</p> <p>1 fois/mois 2 fois/mois</p> <p>3 fois/mois Autre (précisez) _____</p>				
<p>4. Utilisation du bois comme source de revenus* ? OUI NON</p> <p>Quel type de produit ? Précisez _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Provenance du bois :</p> <p>Distance (en km et temps à pieds) _____ / _____</p> <p>Type de végétation* :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Couverture forestière (arbre > 5m) - Mosaïque forêt (40 à 70%) - autre occupation (précisez) _____ - Mosaïque forêt (10 à 40%) - autre occupation (précisez) _____ - Arbuste ou fourré - Autre : _____ <p>Moyen de transport : _____</p> <p>Pourquoi à cet endroit ? : _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Fréquence d'approvisionnement* :</p> <p>1 fois/semaine 2 fois/semaine</p> <p>3 fois/semaine Autre (précisez) ___</p>				

VI. Utilisation des ressources forestières (suite)	Localisation	Contexte	Identification	Quantification
Exportation du produit : Vers où ? Nom du marché/village : _____ Distance (en km et temps à pieds) _____ / _____ Moyen de transport : _____ Quantité transportée par jour (en nombre de panier): _____				

**Entourez la/les réponses*

	Localisation	Contexte	Identification	Quantification
<p>VII. Industries</p> <p>1. Existe-t-il des industries à proximité ou présentes dans le village* ?</p> <p>Nom de l'industrie : _____</p> <p>Nombre de travailleur : Venant du village : _____ Autre : _____</p> <p>Date d'implantation : _____</p> <p>Type d'activité : _____</p> <p>Distance au village (en km) : _____</p> <p>Impacts sur l'environnement ou la forêt ? Expliquez : _____ _____ _____</p> <p>Nom de l'industrie : _____</p> <p>Nombre de travailleur : Venant du village : _____ Autre : _____</p> <p>Date d'implantation : _____</p> <p>Type d'activité : _____</p> <p>Distance au village (en km) : _____</p> <p>Impacts sur l'environnement ou la forêt ? Expliquez : _____ _____ _____</p>				
<p>2. L'installation de l'industrie a-t-elle eu un impact sur la population du village ? Le nombre d'habitant a-t-il augmenté ? _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____</p>				

*Si plus de deux industries, complétez au dos du questionnaire

	Localisation	Contexte	Identification	Quantification
VIII. Concessions forestières				
1. Existe-t-il des concessions à proximité ou présentes dans le village* ?				
Nom de la concession : _____				
Nombre de travailleur : _____ Venant du village : _____				
Autre : _____				
Date d'implantation : _____				
Surface forestière exploitée (ha) : _____				
Distance au village (en km) : _____				
Impacts sur l'environnement ou la forêt ? Expliquez : _____				

Nom de la concession : _____				
Nombre de travailleur : _____ Venant du village : _____				
Autre : _____				
Date d'implantation : _____				
Surface forestière exploitée (ha) : _____				
Distance au village (en km) : _____				
Impacts sur l'environnement ou la forêt ? Expliquez : _____				

2. La présence de la concession a-t-elle eu un impact sur la population du village ? Le nombre d'habitant a-t-il augmenté ? _____				

*Si plus de deux concessions, complétez au dos du questionnaire

IX. Causes du changement du couvert forestier

1. Quels sont les facteurs qui causent la déforestation? Classez les facteurs par ordre d'importance, du plus important au moins important.

Liste de facteurs à déterminer en fonction des résultats du Regional Expert Focus Group.

2. Quels sont les facteurs qui causent la dégradation des forêts? Classez les facteurs par ordre d'importance, du plus important au moins important.

Liste de facteurs à déterminer en fonction des résultats du Regional Expert Focus Group.

République Démocratique du Congo
**Etude des causes de la déforestation et de la dégradation des
forêts – campagne de mesure le long des routes (questionnaire optionnel)**
FAO – UNREDD – UCL-Géomatique

I. Informations générales

Date : __ / __ / ____ (jj/mm/aaaa)

Enquêteur : Nom : _____

Prénom : _____

Identification de la route: Province : _____

Territoire : _____

Nom village/ville le plus proche : _____

Coordonnées GPS : _____

Type de route* : Nationale Provinciale Desserte agricole
 Urbaine Autre (précisez) _____

Nom de la route/ Section : _____

Etat général* : Bon état Dégradée Autre (précisez) _____

Praticabilité* : Toute l'année En saison sèche Autre (précisez) _____

**Entourez la/les réponses*

II. Comptage véhicule et identification du chargement (à remplir à chaque passage de véhicule)	
<p>Heure de passage : ___ H ___ Min</p> <p>Type de véhicule* : <input type="checkbox"/> Camion <input type="checkbox"/> Camionnette <input type="checkbox"/> Voiture <input type="checkbox"/> Moto <input type="checkbox"/> Vélo <input type="checkbox"/> Piéton <input type="checkbox"/> Autre (précisez) _____</p> <p>Provenance (nom du village/ville) : _____</p> <p>Destination (nom du village/ville) : _____</p> <p>Chargement en bois* : <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON. Si OUI, précisez type de produit : _____ Quantité : _____</p> <p>Autre chargement : _____</p>	
<p>Heure de passage : ___ H ___ Min</p> <p>Type de véhicule* : <input type="checkbox"/> Camion <input type="checkbox"/> Camionnette <input type="checkbox"/> Voiture <input type="checkbox"/> Moto <input type="checkbox"/> Vélo <input type="checkbox"/> Piéton <input type="checkbox"/> Autre (précisez) _____</p> <p>Provenance (nom du village/ville) : _____</p> <p>Destination (nom du village/ville) : _____</p> <p>Chargement en bois* : <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON. Si OUI, précisez type de produit : _____ Quantité : _____</p> <p>Autre chargement : _____</p>	
<p>Heure de passage : ___ H ___ Min</p> <p>Type de véhicule* : <input type="checkbox"/> Camion <input type="checkbox"/> Camionnette <input type="checkbox"/> Voiture <input type="checkbox"/> Moto <input type="checkbox"/> Vélo <input type="checkbox"/> Piéton <input type="checkbox"/> Autre (précisez) _____</p> <p>Provenance (nom du village/ville) : _____</p> <p>Destination (nom du village/ville) : _____</p> <p>Chargement en bois* : <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON. Si OUI, précisez type de produit : _____ Quantité : _____</p> <p>Autre chargement : _____</p>	
<p>Heure de passage : ___ H ___ Min</p> <p>Type de véhicule* : <input type="checkbox"/> Camion <input type="checkbox"/> Camionnette <input type="checkbox"/> Voiture <input type="checkbox"/> Moto <input type="checkbox"/> Vélo <input type="checkbox"/> Piéton <input type="checkbox"/> Autre (précisez) _____</p> <p>Provenance (nom du village/ville) : _____</p> <p>Destination (nom du village/ville) : _____</p> <p>Chargement en bois* : <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON. Si OUI, précisez type de produit : _____ Quantité : _____</p> <p>Autre chargement : _____</p>	

*Entourez la/les réponses