

(Source : Müller et Suess, 2011)

Les observations de feux actifs faites par les satellites MODIS permettent de générer une gamme de produits dont les coordonnées géographiques (d'un feu) qui sont fournies en UTC (Coordinated Universal Time), la Puissance Radiative d'un feu exprimée en mégawatts (MW), la date et l'heure d'enregistrement du feu, etc.

Les données MCD14DL sont constituées des points de feux et sont disponibles sous plusieurs formats téléchargeables : TXT, SHP, KML, WMS mais seuls les fichiers TXT et SHP contiennent tous les attributs. Ces données sont également fournies par le biais des alertes e-mails de LANCE FIRMS Fire Email Alerts (Giglio *et al.*, 2018).

- **Données des zones brûlées**

Le produit MODIS Burned Area est disponible pour commander auprès du LP-DAAC à l'aide de l'EOS l'interface Web de la passerelle de données se trouvant à l'adresse <http://reverb.echo.nasa.gov>. De plus, un serveur ftp est maintenu par l'Université du Maryland, principalement pour fournir un support aux utilisateurs scientifiques qui ont besoin de télécharger systématiquement de gros volumes de données. Le système de fichiers sur le serveur ftp est structuré pour organiser les données hiérarchiquement par fenêtre, et ensuite par an. Toutes les données pour la même fenêtre de la même année sont localisées (pour les fichiers Geotiff et les fichiers shapefiles respectivement) dans un répertoire identifié comme : Collection51/TIF/WinXX/YYYYYY/ et Collection51/SHP/WinXX/YYYYYY/ où : XX est le numéro de la fenêtre YYYY est l'année (Boschetti *et al.*, 2015).

L'algorithme MODIS pour cartographier les zones brûlées prend de ces changements spectraux, temporels et structurels. L'algorithme détecte la date approximative de combustion à 500 m en localisant l'occurrence de changements rapides dans les données des séries chronologiques quotidiennes de réflectance de surface. Il s'agit d'une amélioration par rapport aux méthodes précédentes grâce à l'utilisation d'un modèle de réflectance bidirectionnelle pour traiter les variations angulaires trouvées dans les données satellitaires et l'utilisation d'une mesure statistique pour détecter la probabilité de changement à partir d'un état précédemment observé (Roy *et al.* 2005). L'algorithme cartographie l'étendue spatiale des incendies récents seulement et exclut les incendies qui se sont produits au cours des saisons ou des années précédentes.

L'algorithme de détection de changement basé sur un modèle de réflectance bidirectionnelle développé pour le produit MCD45 est une méthode générique de détection de changement qui

est appliquée indépendamment aux pixels géolocalisés sur une longue série temporelle (semaines à mois) d'observations de réflectance (Roy *et al.*, 2002, Roy *et al.*, 2005). La réflectance détectée dans une fenêtre temporelle d'un nombre fixe de jours est utilisée pour prédire la réflectance d'un jour suivant. Un calcul statistique est utilisé pour déterminer si la différence entre la réflectance prévue et la réflectance observée constitue un changement d'intérêt important. Plutôt que d'essayer de minimiser l'information directionnelle présente dans les données satellitaires à grand champ de vision par la composition ou par l'utilisation d'indices spectraux, cette information est utilisée pour modéliser la dépendance directionnelle de la réflectance. Il s'agit d'une méthode semi-physique permettant de prédire le changement de réflectance par rapport à l'état précédent (Roy *et al.*, 2008 ; Boschetti *et al.*, 2015).

1.1.3.2 Images Landsat

Le traitement numérique des images Landsat recourt à divers procédés dont le prétraitement, le traitement proprement dit qui comprend les opérations de classification et de post classification.

- **Prétraitement**

Les opérations de prétraitements permettent de fonctionner dans un environnement géo référencé et de pouvoir utiliser des images dépourvues de défauts visuels. Sous le terme de prétraitements, deux catégories d'opération sont regroupées, les transformations radiométriques et les transformations géométriques (Bonn et Rochon, 1992 ; Dolbec *et al.*, 2005). Il est nécessaire de corriger les images afin de permettre des comparaisons entre elles surtout lorsqu'elles sont prises par différents capteurs, à des dates et heures différentes ou lorsqu'on a besoin d'effectuer des mosaïques d'images (Barima, 2009).

Toutes les images de télédétection sont sujettes à des déformations géométriques (Stow et Chen, 2002) qui peuvent être causées par le mouvement du système de balayage et de la plateforme, l'orientation et la vitesse de celle-ci, l'altitude, le relief, la courbure et la rotation de la Terre, etc. Les corrections géométriques ont pour but d'atténuer ces distorsions afin de rapprocher le plus possible l'image de la réalité (Barima, 2009). Les grandes déformations géométriques ont été corrigées par le fournisseur des images acquises. Seules les corrections radiométriques ont été appliquées sur les images utilisées.

Une calibration radiométrique permettant la transformation des valeurs numérique a été accompagnée d'une correction atmosphérique rapide (QUAC) dans Envi. La méthode QUAC

effectue la correction atmosphérique sur des images multi et hyper spectrales couvrant tout ou partie du spectre de la gamme spectrale de l'infrarouge visible et du proche infrarouge à ondes courtes, ~400 - 2500 nm. Elle utilise une approche sur place, n'exigeant qu'une spécification approximative de l'emplacement de la bande du capteur (c.-à-d. les longueurs d'onde centrales) et de l'emplacement de l'antenne. Leur étalonnage radiométrique ; aucune métadonnée supplémentaire n'est requise. Parce que QUAC n'implique pas de calculs de transfert radiatif selon les principes de base, il s'agit d'une correction nettement plus rapide que les méthodes basées sur la physique approximative (Bernstein, 2012).

En effet, l'application de transformations radiométriques sur les images vise deux objectifs : le rehaussement de la qualité de l'image (la restauration) et la transformation du contenu de la scène en valeurs physiques quantifiables (la transformation radiométrique) (Dolbec et *al.*, 2005).

- **Classification des images**

Il est possible d'utiliser l'interprétation visuelle pour identifier des groupes homogènes de pixels qui représentent des classes de surfaces (Lillesand et *al.*, 2008). La classification numérique utilise l'information spectrale contenue dans les valeurs d'une ou de plusieurs bandes spectrales pour classer chaque pixel individuellement⁵ (Caloz et Collet, 2001). Ces deux méthodes, manuelle et automatique, ont pour but d'assigner une classe (classe d'information) particulière ou un thème (forêt, savane, eau, etc.) à chacun des pixels d'une image. L'image résultante, qui représente la classification, est composée d'une mosaïque de pixels (classe spectrale) appartenant chacun à un thème particulier et est essentiellement une représentation thématique de l'image originale. Une large classe d'information, par exemple la forêt, peut renfermer plusieurs sous-classes spectrales avec des variations spectrales définies (Barima, 2009).

Les méthodes de classification les plus communes sont regroupées en deux grandes catégories : les méthodes de classification supervisée et non supervisée (Bonn et Rochon, 1992 ; Girard, 1999 ; Lillesand et *al.*, 2008). Lors de l'utilisation de la méthode de classification supervisée, des échantillons assez homogènes de l'image, qui sont représentatifs de différents types de surfaces (classes d'information), sont identifiés et utilisés pour reconnaître sur la totalité de l'image des régions aux propriétés spectrales similaires. La classification supervisée

⁵ <https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-publications/imagerie-satellitaire-photos-aer/tutoriels-sur-la-teledetection/analyse-interpretation-dimages/classification-et-analyse-des-images/9362> consulté le 15/10/2019

commence donc par l'identification des classes d'information qui sont ensuite utilisées pour définir les classes spectrales les représentants. Dans le cas de la classification non-supervisée, les classes spectrales, basées sur l'information numérique des données sont d'abord créées. Ensuite, ces classes sont associées à des classes d'information. L'intervention humaine n'est donc pas totalement exempte de la classification non-supervisée. Toutefois, cette méthode ne débute pas avec un ensemble prédéfini de classes comme pour la classification supervisée (Barima, 2009).

- **Post-Classification**

Tous les logiciels de traitement d'images implémentent plusieurs méthodes de classification. Cependant, les spécialistes ne sont pas toujours satisfaits du résultat d'une classification (Pony *et al.*, 2000). En effet, celles-ci sont fondées sur l'analyse spectrale d'un pixel, et certains types de terrains ont des réponses spectrales voisines. De plus, de nombreux pixels isolés affectent la lisibilité de la carte. Ce sont soit des pixels mal classés soit des pixels dont la classe thématique n'a pu être déterminée et que l'on met dans une classe à part. Certains de ces pixels correspondent à un mélange de plusieurs types de terrain, ou sont affectés par un élément temporaire non prévu ou plus petit que la précision des capteurs. La régularisation est la procédure qui consiste à corriger une image classifiée pour obtenir une structure acceptable (Barima, 2009).

1.2 APPORTS DE LA TELEDETECTION

1.2.1 A l'étude des surfaces brûlées

D'importants progrès ont été réalisés au cours de la dernière décennie dans les résolutions spatiale et spectrale des capteurs embarqués à bord des satellites d'observation de la terre d'une part, et dans les développements algorithmiques pour la détection des feux de végétation d'autre part. Parallèlement, des données issues de divers satellites couvrant une partie ou la totalité du globe ont été produites et sont mises à contribution. De nombreux auteurs se sont consacrés à l'étude des combustions végétales par télédétection. Des exemples existent aux niveaux régional (Eva et Lambin, 1998 ; Eva *et al.*, 2003), continental (Koffi *et al.*, 1995) et plus récemment à l'échelle globale (Boschetti *et al.*, 2002 ; Tansey *et al.*, 2002). L'intérêt de ces études réside dans l'évaluation des émissions atmosphériques et de la dynamique des peuplements végétaux induites par les feux. La plupart de ces études se sont appuyées sur des enregistrements issus des satellites de faible résolution spatiale (NOAA-

AVHRR, ATSR, MODIS, SPOT VEGETATION, TRMM) présentant un double avantage : la grande fréquence de passage et la couverture de superficies importantes. Rapportés à l'étude des feux actifs à un niveau local, ces enregistrements présentent des limites au rang desquelles l'omission des feux dont la température ou l'extension spatiale est insuffisante pour marquer la radiométrie du pixel. Rapportés à la cartographie des superficies brûlées, ces données ne permettent pas de discrétiser efficacement les surfaces affectées par les feux. Leur validation dès lors, nécessite des mesures au sol ou l'exploitation de l'imagerie haute résolution spatiale (LANDSAT TM ou ETM, SPOT 4 ou 5, IKONOS). Depuis le lancement des satellites Terra et Aqua à partir des années 1999, des données sur les points de feu actifs sont fournies et permettent de suivre les incendies à n'importe quel point du globe et cela tous les jours (Giglio et *al.*, 2003)

1.2.2 Dans la gestion des ressources forestières

La télédétection satellitaire permet d'acquérir des données globales et répétitives sur la surface terrestre. Elle fournit par conséquent des informations très utiles sur l'environnement à des temps variables. Les données de télédétection se font généralement dans un ensemble de bandes spectrales, qui seules ou combinées, donnent des informations sur les caractéristiques des objets de la surface de la terre. Ces informations sont importantes à plusieurs égards et peuvent permettre d'identifier les différentes formations végétales, leur distribution spatiale, en fonction de plusieurs facteurs (Kemavo, 2012)

Selon la (FAO, 1998), la carte d'occupation peut être succinctement définie comme "la couverture (bio-) physique de la surface des terres émergées". Cette carte comprend la végétation (naturelle ou cultivée) et l'aménagement du territoire (habitat, bâtiment, routes) qui occupent la surface de la terre ainsi que l'hydrographie. Elle s'élabore essentiellement à partir des données de la télédétection, aérienne ou spatiale. La télédétection est ainsi considérée comme la source principale pour la réalisation des cartes d'occupation du sol. Les images satellitaires à haute résolution offrent une vision particulière de la surface terrestre ce qui permet d'obtenir un état des lieux d'une zone donnée, et donc de présenter simultanément de grandes superficies en détail (Musumba et Katcho, 2019). De plus, les images satellitaires peuvent être acquises pour la même zone à une fréquence élevée, cette répétitivité permet de comparer la couverture d'une région à des données équivalentes antérieures, ainsi que d'élaborer des analyses diachroniques des changements de couvertures du sol en utilisant des traitements d'images numériques.

La production de cartes d'occupation du sol constitue un enjeu très important pour beaucoup de travaux de recherche et pour de nombreux projets et applications opérationnelles au niveau mondial. Dans la littérature, les cartes d'occupation du sol sont largement utilisées dans l'étude de l'évolution de couverture du sol (FAO, 2015).

1.3 INCENDIES DANS LE MONDE

Tous les ans, des incendies se déclarent sur plusieurs centaines de millions d'hectares de forêts (*incendies de forêt*) et d'autres formations végétales à travers le monde. Les incendies de forêt et d'espaces naturels (terres boisées, brousses, herbages, savanes, steppes) sont communément appelés *feux de friches* ou *feux de végétation*. Les causes des incendies non maîtrisés (*incendies sauvages*) et les raisons de l'usage du feu comme outil de gestion dans les domaines agricole, pastoral et forestier (*incendies à usage agricole, brûlage dirigé*) sont liées aux conditions écologiques locales (climat, type de végétation) et aux habitudes, en particulier dans les domaines social et économique. La foudre est la principale cause naturelle des incendies sauvages, surtout dans les régions peu peuplées des forêts des hautes latitudes boréales et des savanes tropicales. Il n'empêche que dans la plupart des régions du monde ce sont les incendies causés par l'homme qui sont les plus lourds de conséquences. Les principales raisons en sont la négligence – notamment les feux à usage (Goldammer, 1990).

Bien que les incendies de végétation puissent se produire toute l'année en Afrique, comme c'est effectivement le cas, plus de 90 pour cent des incendies et plus de 99 pour cent de la superficie brûlée correspondent aux incendies de saison sèche. A cette époque, la végétation est soit morte (formations herbacées annuelles), soit dormante, et les arbres décidus ont perdu leurs feuilles, contribuant à l'accumulation de matériaux combustibles sur le sol. Les incendies se produisant pendant la saison humide sont peu fréquents et localisés. (Frost, ND)

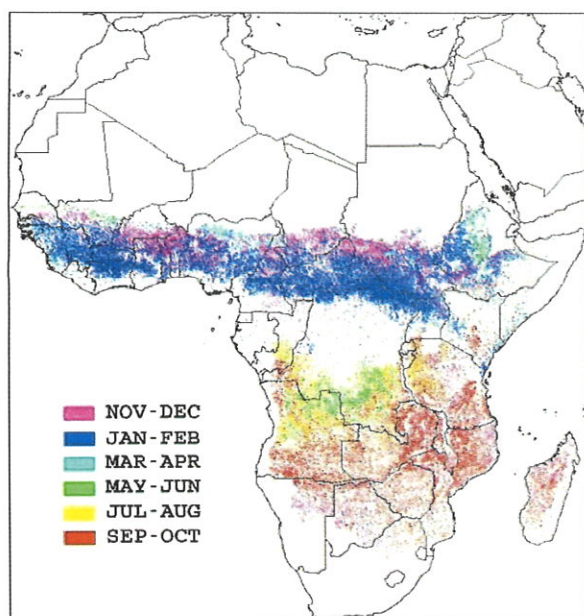


Figure 1.6: Répartition saisonnière des superficies brûlées en Afrique, de novembre 1990 à octobre 1991

Obtenue par analyse de séries de données AVHRR NOAA à faible résolution (Global Area Coverage) (5 km), selon une technique pluri-temporelle, multi-seuils pour l'identification des zones touchées par les incendies (IGBP-DIS 1997 cité par Frost (ND)).

Les incendies sauvages peuvent avoir sur la nature des effets tant positifs que négatifs. Dans certains écosystèmes, les incendies jouent un rôle écologiquement important dans le maintien des cycles biogéochimiques. C'est ainsi que de nombreuses savanes des régions tropicales et sous-tropicales brûlent annuellement ou selon des intervalles de plusieurs années (cycle court d'un à trois ans). Ces incendies sont importants pour régénérer le tapis herbacé et en stimuler la croissance ainsi que pour préserver les habitats d'importantes espèces de la faune sauvage et d'animaux domestiques. Ces savanes sujettes aux incendies sont hautement productives et abritent une importante diversité d'espèces animales et végétales. On rencontre des adaptations semblables dans les forêts naturelles boréales de conifères, qui ont un cycle de feu allant de plusieurs années ou décennies à plusieurs siècles. Il arrive aussi partout dans le monde que des incendies utiles visant à améliorer les conditions d'une agriculture durable soient allumés par des agriculteurs, des éleveurs et des chasseurs expérimentés (Goldammer, 1990).

Dans d'autres écosystèmes, en revanche, les incendies ont des effets extrêmement destructeurs. Les forêts tropicales ombrophiles sont très vulnérables durant les sécheresses extrêmes comme celles qui surviennent fréquemment pendant les années où sévit le phénomène « El Niño ». Durant ces longues périodes de sécheresse, les arbres de la forêt

ombrophile, pour se protéger contre la perte d'eau, se débarrassent de leurs feuilles. Par conséquent, le couvert forestier s'éclaircit, les rayons du soleil parviennent au tapis forestier où les feuilles mortes deviennent hautement inflammables. Ainsi, les flammes s'échappant des incendies de sites agricoles ou de pâturages peuvent s'étendre à la forêt et provoquer un appauvrissement de la biodiversité et/ou une dégradation durable du site. Au plus fort du phénomène « El Niño » de 1997-1998, de vastes superficies de forêts ombrophiles ont été détruites par le feu en Asie et dans les Amériques. Une des raisons majeures de ces incendies ravageurs était l'utilisation inadaptée du feu pour la transformation de la forêt ou de la végétation secondaire en plantations. (Goldammer, 1990 ; Shvidenko et Goldammer, 2001).

Dans les forêts tempérées et boréales, d'importants dommages surviennent dans les lieux d'habitation se trouvant à la limite entre les régions métropolitaines ou autres zones résidentielles et les terres couvertes de végétation, telles que les taillis ou les forêts. Ainsi, dans la quasi-totalité des régions du monde, les incendies sauvages survenant dans des conditions météorologiques extrêmes affectent l'économie, la santé et la sécurité, avec des conséquences dont l'envergure et la gravité sont comparables à celles des risques naturels majeurs. Les feux destructeurs sont à une vaste majorité causée par la négligence des hommes. C'est pourquoi, contrairement à la majorité des risques géologiques et hydrométéorologiques, les feux de végétation constituent un risque que l'on peut prédire, maîtriser et, très souvent, prévenir. (Goldammer, 1990).

1.3.1 Causes des feux

En RD Congo, il n'y a presque pas de causes naturelles (comme la foudre) aux incendies forestiers. La presque totalité des feux peut donc être attribuée à l'homme (Tanguy, 1995) qui est guidé par son inconscience et son fatalisme né de l'utopique illusion que donnent la puissance floristique et la capacité de colonisation des terrains incendiés de certaines essences de faible valeur économique comme les lianes, les pâtures et les arbustes. Ces feux de brousse de différentes origines répondent à des besoins spécifiques des populations⁶ (Otsuka, 2003).

Du point de vue social on peut distinguer plusieurs causes de feux :

⁶ <http://www.aac-mo.com/quelles-sont-les-causes-de-feux-de-brousse.html> consulté le 03/11/2019

1.3.1.1 Causes utilitaires

- **L'agriculture itinérante et la culture sur brûlis :** les feux étant utilisés comme auxiliaires nécessaires aux défrichements des terres destinées à l'agriculture (Tanguy, 1995). On brûle les tas constitués après abattage pour dégager le terrain, fertiliser les sols et obtenir une meilleure récolte. Ce genre de culture est ancré dans l'esprit des populations et peut difficilement être interdit dans les conditions actuelles. Les feux de défrichement ne sont pas toujours bien contrôlés, et bien souvent pour un petit champ défriché ce sont des milliers d'hectares qui partent en fumée (Otsuka, 2003).
- **Feux pastoraux :** ils sont volontairement allumés par les éleveurs pour la régénération des pâturages ou pour la lutte contre les parasites épizootiques. Pour les éleveurs, cette technique leur permet de se procurer des repousses d'herbes fraîches pour leurs animaux. Ainsi, les éleveurs ne sont plus obligés de se déplacer à la recherche de fourrage. La pratique des feux de brousse va aussi permettre de détruire dans la nature les parasites (tiques) qui s'y multiplient et s'attaquent au bétail. Néanmoins, trop souvent cette activité est pratiquée tardivement et provoque des dégâts irréparables à l'environnement (Otsuka, 2003).
- **Chasse :** les chasseurs, eux aussi, se servent des feux de brousse pour débusquer le gibier. Des espaces immenses sont embrasés pour capturer seulement quelques animaux sauvages. Après la chasse c'est toujours un spectacle de désolation.
- **Feux de production :** sont allumés pour produire du charbon de bois dans la forêt naturelle. Ils peuvent provenir des meules de charbon de bois mal surveillées. Les forêts sont également brûlées pour enfumer les abeilles afin de pouvoir récolter le miel et accélérer la floraison et la fructification des arbres fruitiers (Otsuka, 2003).

1.3.1.2 Les causes coutumières

La cendre des feux de brousse peut servir à certaines cérémonies rituelles. Ces feux sont mis par tradition (Otsuka, 2003).

1.3.1.3 Les causes criminelles

Ce sont des feux mis volontairement en vue de nuire. C'est un moyen qu'utilisent les populations pour leurs règlements de compte ou par vengeance. Certains paysans y ont recours pour détruire le pâturage et par la même occasion éliminer les risques de voir leurs champs broutés ou pour éviter de se faire concurrencer par les éleveurs nomades dans l'exploitation de certains produits comme les plantations (Otsuka, 2003).

Les contrebandiers en font parfois l'usage, sous forme de feux dissuasifs, pour échapper aux différentes barrières douanières. Les conflits entre les habitants et le gouvernement pourraient aussi aboutir à des incendies criminels. Ces feux répétés détruisent progressivement les arbres. La première année, le feu de brousse, même rampant, fait éclater le cambium des jeunes plants issus de la régénération naturelle. La deuxième année, comme les feux viennent toujours dans le même sens, ils attaquent les mêmes plants mais cette fois-ci plus en profondeur. Un début de carbonisation commence là où les plants avaient à peine guérie de leurs blessures. Même si certains peuvent survivre, leur croissance s'en trouve ralentie. De toute manière, ils ne feront jamais de beaux arbres. Petit à petit une grande partie de leurs branches va mourir et ils arriveront rarement à l'âge adulte. C'est ainsi que les forêts arborées de savane sont en train de disparaître. La plupart des arbres portent des traces plus ou moins marquées des passages répétés des feux de brousse. Les gros arbres finissent eux-mêmes par mourir. Des actions de conservation et de gestion participatives des forêts par les populations riveraines devraient se mettre en place pour arrêter au plus vite cette destruction préjudiciable à l'environnement et au climat de la planète (Otsuka, 2003).

1.3.2 Les impacts du feu

Les impacts des feux de végétation sont regroupés en trois catégories : humaines, économiques et environnementales.

- **Atteintes aux personnes** : résidents, promeneurs, intervenants, victimes, personnes blessées, brûlées, asphyxiées, sans-abri, déplacées, etc.
- **Atteintes aux biens** : destructions, détériorations et dommages aux plantations, au bétail ou à d'autres ressources naturelles, aux habitations, aux ouvrages, ainsi qu'à la paralysie des services publics avec l'endommagement ou la destruction des réseaux (électricité et téléphone).
- **Atteintes à l'environnement** : les étendues importantes de forêts détruites, chaque année, provoquent des dommages ; la destruction de la faune, de la

flore, la stérilisation des sols par appauvrissement de la couche arable, la raréfaction du couvert végétal aggravant l'érosion, la sécheresse et la désertification. Le terrain accidenté brûlé est enclin à réduire la fertilité des sols et la capacité de rétention d'eau en aval. Les incendies répétés entraînent, en amont, souvent l'érosion des sols et le débordement, ce qui aggrave la rétention de l'eau et la production agricole en aval. L'émission de fumées à grande échelle donne lieu à une diminution de la visibilité (Tanguy et *al.*, 1995 ; Otsuka 2003, Nasi, ND)

Parmi les ces impacts les plus importants sont :

1.3.2.1 Impacts sur l'atmosphère et l'écosystème

Les feux de végétation provoquent des émissions de gaz et de particules qui ont des incidences sur la composition et le fonctionnement de l'atmosphère globale. Les effets de ces émissions se conjuguent avec ceux issus de la combustion des fossiles et d'autres sources, qui sont les principales causes des changements climatiques anthropiques. Les longues périodes d'incendies et de fumées qu'ont connues l'Asie du Sud-Est et l'Amérique du Sud entre 1982 et 1998 ont démontré que les émissions de fumée provenant des incendies de végétation affectaient également la santé et entraînaient des pertes de vies humaines. Dans la seule Asie du Sud-Est, plus de 40 millions de personnes ont été exposées à de dangereux niveaux de pollution par la fumée, à la suite d'incendies qui avaient été allumés aux fins de la conservation des forêts et qui avaient duré des semaines, voire des mois (Goldammer, 1990 ; Frost, ND).

Les incendies de forêt influencent de nombreuses façons la diversité biologique. A l'échelle mondiale, ils sont une importante source d'émissions de carbone et contribuent au réchauffement de la planète, ce qui pourrait entraîner des changements dans la biodiversité. Aux niveaux régional et local, ils modifient le volume de la biomasse, altèrent le cycle hydrologique avec des retombées sur les systèmes marins comme les récifs coralliens, et influencent le cycle de vie des végétaux et des animaux. La fumée dégagée par les forêts en flammes peut réduire de façon notable l'activité photosynthétique et compromet souvent la santé des êtres humains et des animaux (Otsuka, 2003).

L'une des pires conséquences écologiques du feu est la probabilité accrue que surviennent de nouveaux incendies dans les années suivantes, à mesure que les arbres morts s'effondrent, créant des trouées dans la forêt à travers lesquelles le soleil pénètre et dessèche la végétation, et où les combustibles s'accumulent et les espèces vulnérables au feu, comme les graminées

pyrophytes, prolifèrent. Les feux répétés sont destructifs car ils représentent un facteur clé dans l'appauvrissement de la diversité biologique des écosystèmes de forêt ombrophile. Les incendies sont souvent suivis par la colonisation et l'infestation d'insectes qui perturbent l'équilibre écologique.

Le remplacement de vastes espaces forestiers par des tapis de graminées pyrophytes est l'un des impacts écologiques les plus négatifs des incendies sur les forêts tropicales ombrophiles. Ces processus ont déjà été observés dans certaines parties de l'Indonésie et de l'Amazonie. Ce qui jadis était une dense forêt sempervirente devient une forêt appauvrie, peuplée de rares espèces résistantes au feu et portant un couvert végétal formé d'adventices (Cochrane et *al.*, 1999, cité par Nasi et *al.*, ND). On considère que la combustion de la biomasse contribue de façon importante aux émissions de gaz à effet de serre et aux précurseurs de l'ozone troposphérique. On estime que la combustion de la biomasse dans le monde entier dégage environ 3460 Tg C de dioxyde de carbone, 350 Tg C de monoxyde de carbone, 38 Tg C de méthane, 24 Tg C d'hydrocarbures non méthaniques ($C_2 - C_{10}$), 8,5 Tg d'azote sous forme d'oxyde nitreux (NO), des quantités plus faibles mais non moins importantes d'autres gaz traces tels que le chlorure de méthyle, et 104 Tg de particules en suspension (Andreae, 1991). Le tableau 1 fournit des évaluations de la quantité de biomasse brûlée chaque année par les feux de savane, dans le monde entier et en Afrique. Le tableau 2 montre la part des émissions dues à ces incendies dans les émissions totales à l'échelon mondial. Il faut remarquer que les évaluations de la quantité de biomasse brûlée varient grandement, et le calcul des émissions est donc entaché d'une grande incertitude (Frost, ND).

1.3.2.2 Impacts sur les ressources naturelles et sur les moyens de subsistance des populations

La disparition de la canopée formée par les espèces ligneuses et la diminution de la biomasse ont pour conséquence inévitable une diminution des ressources naturelles pour les populations, mais on manque de données quantitatives sur le sujet. Si le feu augmente sans aucun doute le rendement et la qualité de certaines ressources, en particulier les herbes utilisées pour les pâturages, il entraîne en revanche la diminution d'autres ressources : bois et autres produits ligneux, chaumes pour la couverture des toits, habitats du gibier de chasse. Les effets sont à la fois directs, par des dommages aux plantes, et indirects, par suppression de la repousse et modification des conditions micro-environnementales pour l'installation et la croissance des plantes. L'exclusion du feu, qu'elle ait lieu de façon délibérée par la maîtrise

des incendies, ou par inadvertance en réduisant la quantité des combustibles dans les zones soumises à de fortes pressions de pâturage, peut aussi avoir des effets négatifs, en particulier la progression de la brousse, conduisant à une réduction de la capacité de pâturage. Les répercussions économiques, ou autres, de ces effets sur la subsistance des populations n'ont pas été évaluées de façon précise. Il est clair que compte tenu de l'utilisation répandue et fréquente du feu par les populations, les avantages perçus sembleraient supérieurs aux coûts, bien qu'il faille encore les quantifier et les évaluer (Frost, ND).

1.3.2.3 Impacts sur la diversité des plantes

Les feux de friches sont rares dans la plupart des hautes forêts tropicales ombrophiles non perturbées et au couvert fermé en raison de l'humidité du microclimat et des combustibles, de la faible vitesse des vents et de la fréquence des précipitations. Cependant, les forêts ombrophiles peuvent devenir plus vulnérables aux incendies pendant les sécheresses prolongées, comme on l'a vu pendant les années où sévissait le phénomène El Niño. Dans ces forêts, qui ne sont pas adaptées aux incendies, le feu peut tuer pratiquement toutes les plantules, les bourgeons, les lianes et les jeunes arbres qui ne sont pas protégés par une écorce épaisse. Les dommages causés au matériel génétique et aux plantules retardent la régénération des espèces indigènes (Woods, 1989). Le niveau de régénération et le besoin d'interventions de récupération dépendent de l'intensité du brûlage (Schindele, Thoma et Panzer, 1989).

Les forêts tropicales sont aussi sujettes aux incendies provoqués par l'homme lors des opérations de défrichage des terres agricoles. Les feux de déboisement, qui sont plus fréquents dans les forêts perturbées, peuvent varier en intensité et brûler des arbres sur pied, voire détruire entièrement la forêt et ne laisser que le sol dénudé. Des feux d'une très forte intensité ont eu un impact négatif considérable sur la diversité des plantes. Les espèces méridionales, qui sont à l'extrémité septentrionale de leur aire de répartition géographique, sont particulièrement vulnérables. C'est ainsi qu'à Primorsky Kray (Fédération de Russie), des feux d'origine humaine ont contribué à réduire de façon draconienne les populations de 60 espèces de plantes vasculaires, de 10 champignons, de huit lichens et de six espèces de mousses au cours des deux ou trois dernières décennies (Shvidenko et Goldammer, 2001. Nasi *et al.*, ND).

1.3.2.4 Impacts sur la faune

Dans les forêts où le feu ne constitue pas une perturbation naturelle, il peut avoir des effets dévastateurs sur les vertébrés et invertébrés vivant dans la forêt - non seulement en

provoquant directement leur mort, mais aussi par des effets indirects à plus long terme comme le stress et la perte d'habitat, de territoire, d'abri et d'aliments. La perte d'organismes clés dans les écosystèmes forestiers, comme les invertébrés, les pollinisateurs et les décomposeurs, peut ralentir considérablement la régénération de la forêt. D'après des estimations sur les incendies de 1998 fournies par la Fédération de Russie, les mammifères et les poissons ont été gravement atteints. La mortalité des écureuils et des belettes, évaluée immédiatement après les feux, était comprise entre 70 à 80 %; celle des sangliers entre 15 et 25 %; et celle des rongeurs atteignait 90 % (Nasi *et al.*, ND).

1.4 DISPOSITIONS LEGALES REGISSANT LA PROTECTION DES FORETS ET L'UTILISATION DU FEU EN RD CONGO

La réglementation sur la protection des forêts en RD Congo est régie par **Loi n° 011/2002 portant Code Forestier promulgué en 2002**. De l'article 52 à 54 sont donnés des réglementations quant à la protection des forêts. En effet, tout déboisement doit être compensé par un reboisement équivalent, en qualité et en superficie, au couvert forestier initial réalisé par l'auteur du déboisement ou à ses frais. L'article 53 continue en disant que toute personne qui, pour les besoins d'une activité minière, industrielle, urbaine, touristique, agricole ou autre, est contrainte de déboiser une portion de forêt, est tenue au préalable d'obtenir à cet effet un permis de déboisement. Pour les activités agricoles, ledit permis n'est exigé que lorsque le déboisement porte sur une superficie égale ou supérieure à 2 hectares. Ce permis de déboisement est délivré par le Gouverneur de province, lorsque la superficie à déboiser est égale ou inférieure à 10 hectares. Au-delà de cette superficie, il est délivré par le Ministre. Dans les deux cas, un avis préalable de l'administration forestière locale fondée sur une étude d'impact est requis. La délivrance dudit permis donne lieu à l'acquittement préalable d'une taxe de déboisement, dont l'assiette, le taux et les modalités sont fixés par un arrêté conjoint des Ministres ayant les forêts et les finances dans leurs attributions. Les recettes générées par cette taxe sont affectées à la reconstitution du capital forestier.

Ce même code forestier en ses articles (55-61) donne une réglementation quant au contrôle des feux de forêts et de brousse. En effet, c'est au gouverneur de province qu'il est reconnu le droit de fixer par arrêté pris sur proposition de l'administration provinciale des forêts, les dates et les conditions d'allumage des feux hâtifs. Ainsi, il est défendu de porter ou d'allumer un feu en dehors des habitations et des bâtiments d'exploitation situés à l'intérieur des forêts. Il est également interdit d'allumer un feu dans un rayon de 500 mètres autour des forêts situées

dans la savane ou en bordure de celle-ci ou en d'allumer un feu le long des routes et chemins qui traversent les forêts classées. L'article 61 continue en disant qu'il est absolument interdit dans les réserves naturelles intégrales et les parcs nationaux d'allumer le feu sauf pour les besoins d'aménagement. Afin de prévenir et de combattre les feux de forêts et de brousse, l'administration forestière ou les entités décentralisées doivent prendre notamment, les mesures suivantes : constituer, former et équiper des brigades chargées de la lutte contre les feux, ainsi que de la sensibilisation, de la formation et de l'encadrement des populations locales. Ils doivent également créer des postes d'observation dans certaines régions particulièrement celles menacées d'incendies. Il est interdit de provoquer ou d'abandonner un feu susceptible de se propager dans la forêt ou dans la brousse. Dans le domaine forestier, il est interdit d'abandonner un feu non éteint⁷.

1.5 PRINCIPAUX FACTEURS DEFORESTATION

Dans les zones tropicales et subtropicales, la déforestation est imputée à l'agriculture commerciale à grande échelle (40%), à l'agriculture de subsistance locale (33%), aux infrastructures (10%), à l'expansion urbaine (10%) et à l'extraction minière (7). Cependant des variations importantes selon les régions sont notées. L'agriculture de rente est responsable d'environ de 70% de la déforestation en Amérique latine, mais d'un tiers seulement en Afrique, où la déforestation est plus associée à l'agriculture à petite échelle (FAO, 2016).

Se basant de de la catégorisation des causes de la déforestation fournie par Geist et Lambin en 2002 (Figure 1.5), Hosomuma (2012) les catégorise en 5 principales catégories dont (i) l'Agriculture (commerciale) est la disparition de la forêt au profit des cultures, pâturage et plantation d'arbre; (ii) l'Agriculture de subsistance est disparition des forêts au bénéfice de l'agriculture de subsistance, souvent par les ménages; (iii) Une Mine est toute sorte de carrière minière; (iv) l'Infrastructure est l'ensemble des routes, chemins de fer, barrage hydro-électronique, etc; (v) l'Expansion urbaine concerne l'extension des milieux habités.

Le même auteur (Hosomuma, 2012) distingue 4 catégories de dégradation des forêts a savoir (i) la Coupe sélective des bois pour des besoins commerciaux et de subsistance que ce soit légal ou illégal ; (ii) le Feu incontrôlé qui est toute sorte de feu de forêt; (iii) le Bétail de toute sorte en grande et petite échelle; et (iv) la Coupe de bois pour usage domestique y compris la production de la braise.

⁷ Code forestier de la République Démocratique du Congo. Loi N°011/2002, 102(2002).

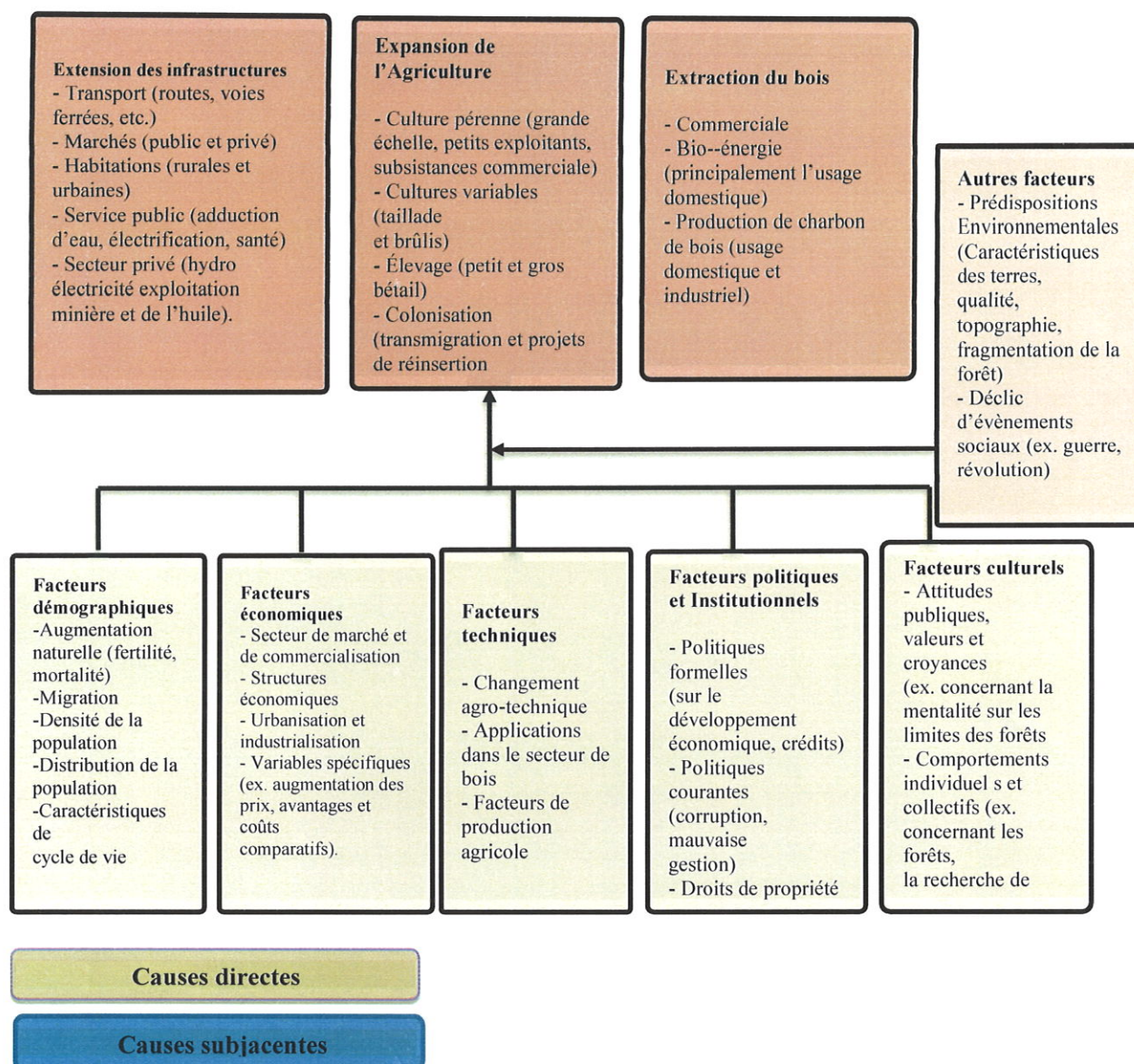


Figure 1.7: Causes directes et indirectes de la déforestation (Source : Gheist et al., 2002 adapté de Musumba et Katcho (2019))

• L'agriculture sur brûlis et son rôle dans le processus de déforestation

La régression forestière est consécutive à l'accroissement des activités humaines. Plusieurs publications (Ickowitz *et al.*, 2015 ; Patapov, 2012, Bamba, 2010) soutiennent cette hypothèse. Et parmi ces activités, l'agriculture itinérante occupe la première place en RD Congo (Ickowitz *et al.*, 2015). En RD Congo et plus particulièrement dans la province du Kongo central, le système cultural pratiqué dans cette région est l'agriculture itinérante sur brûlis (Figure 1.8). Les défrichements de la saison primaire sont partiels (certains arbres sont conservés) et on lieue en saison sèche. Les espaces déboisés sont ensuite brûlés avant de procéder à la préparation des champs et au semis qui se déroulent en Octobre pour la saison A

et en Février pour la saison B. Alors qu'il faut une vingtaine d'années pour une restauration de la forêt secondaire, bien souvent la mise en jachère aujourd'hui est inférieure à 7 ans (Ramade, 1984). Le raccourcissement de la durée de jachère accélère la détérioration des sols déjà si peu fertiles et empêche la régénération naturelle des forêts (Alongo, 2007).

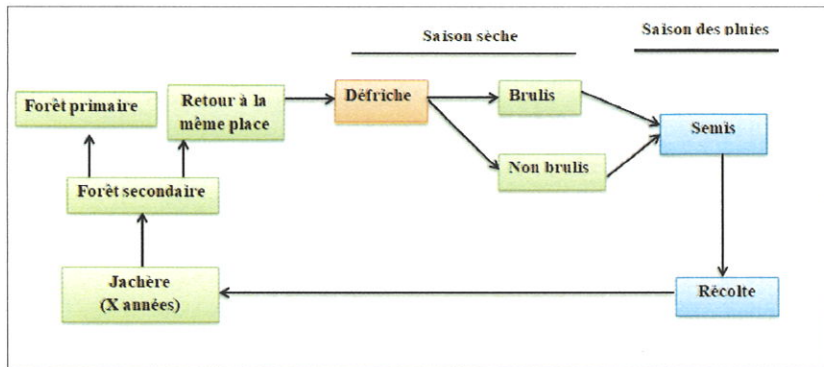


Figure 1.8: Modélisation du Système agricole pratiqué dans et autour de la RB de Luki
(Source : Adapté de Semeki et al., 2018)

Il y a plus d'un siècle, l'agriculture itinérante sur brûlis avec un poids démographique faible, ne constituait aucunement une menace pour les écosystèmes forestiers. Il fallait attendre parfois plus de cinq décennies pour revenir sur les espaces qui avaient été laissés en jachère. Mais l'augmentation rapide de la population, ainsi qu'une production tournée vers le marché extérieur, ne laissent plus assez de temps aux périodes de jachère pour reconstituer le couvert végétal. Cela a de fait transformé de nombreuses régions de forêts tropicales humides en forêts claires ou tout simplement en savane. Il s'avère qu'environ 5 % seulement de la population mondiale pratique l'agriculture itinérante sur brûlis et exploite environ 30 % de la surface agricole exploitable (Dounias, 2008). Ceci montre la forte pression de ce système agricole sur les milieux naturels.



CHAPITRE 2. MILIEU, MATERIELS ET METHODES

2.1 MILIEU D'ETUDE

2.1.1 Situation géographique

Créée le 12 janvier 1937 par l'ordonnance coloniale du Gouverneur Général n°05/AGRI, la réserve de Biosphère de Luki a une superficie de 32 710 ha. Elle est localisée en bordure méridionale du massif forestier du Mayumbe, dans la province du Bas-Congo en République Démocratique du Congo (Bernard et Gélina, 2014, WWF-RDC, 2011). Elle se trouve à environ 100 km à l'est de la côte Atlantique et à 30 km au nord de la ville de Boma et s'étend, de 13°10' à 13°13' de longitude Est et de 5°35' à 5°43' de latitude Sud, sur 3 Territoires : Lukula, Seke-Banza et Muanda. La Réserve de Luki est accessible directement par l'axe routier Matadi-Boma qui la traverse (Lubini, 1992 ; Bauwens, 2008).

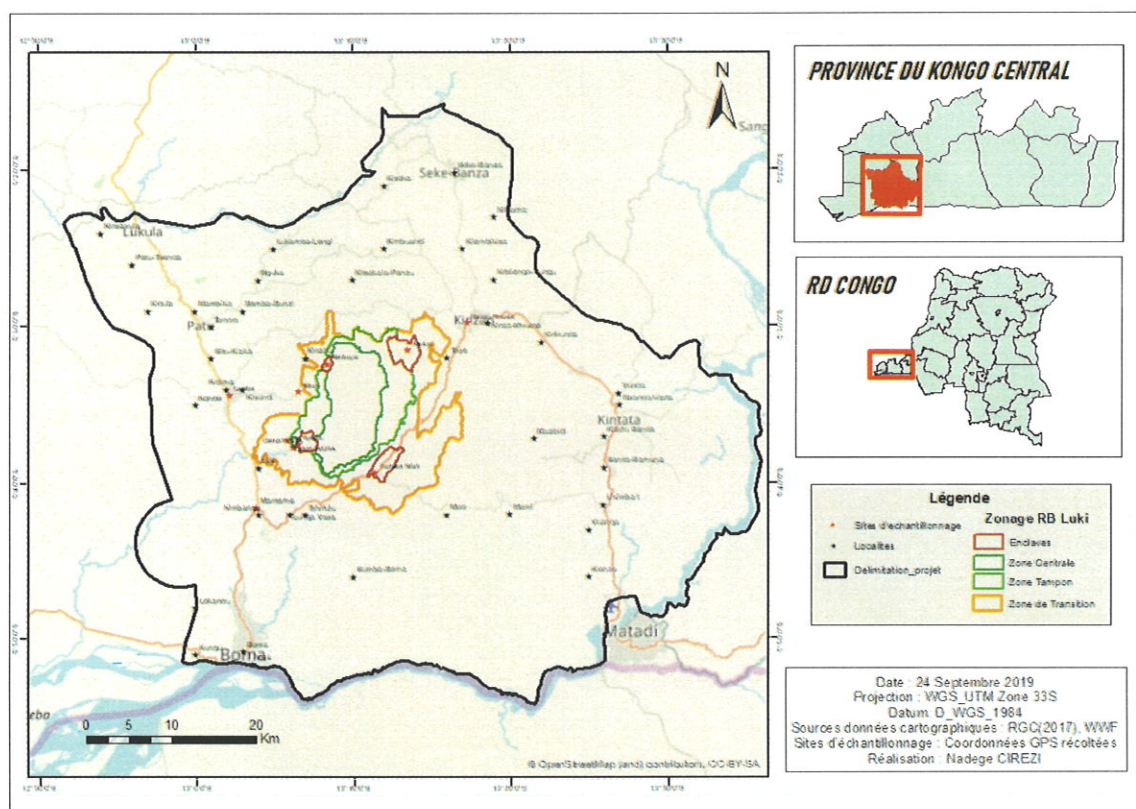


Figure 2.1: Localisation de la Réserve de Biosphère de Luki et de ses environs

La Réserve de Biosphère de Luki a été érigée comme réserve de Biosphère en mai 1979 (Monkoto et Maldague, 2005, WWF, 2011). Tel que défini par l'UNESCO, une réserve de biosphère est un site où on concilie à la fois la conservation de la biodiversité et le développement socioéconomique des communautés locales. Pour cette raison, la réserve

contient 3 zones. La première zone, localisée au centre, est une zone de zone de conservation intégrale (8000 ha) et où les activités humaines à l'exception des recherches non destructrices sont prohibées. La deuxième zone appelée zone tampon, est une zone où les activités éducatives et récréatives sont autorisées. La troisième zone, localisé à l'extérieur est la zone de transition ou zone de développement communautaire. Dans cette dernière, les communautés locales sont autorisées à mener les activités traditionnelles locales telles que l'agriculture, la pêche, la chasse, etc. (Bernard et Gélina, 2014).

2.1.2 Situation biophysique

2.1.2.1 Climat

La réserve de biosphère de Luki et ses environs est dominée par un climat tropical à deux saisons très contrastées : la saison des pluies allant de mi-octobre à mi-mai (soit 7 mois) avec des moyennes annuelles de 1 224 mm pour la période de 2002-2018 (Figure 2.2) et la saison sèche allant de mi-mai à mi-octobre et caractérisée par des précipitations presque nulles, par la nébulosité constante et par des feux fréquents (Ministère plan, 2015, WWF, 2011). Le climat est de type « Aw5 » avec des températures variant entre 21 et 27 °C pour la période de 2002 à 2018 (Figure 2.2). Les diagrammes ombrothermiques des différentes années étudiées (2002 à 2018) sont présentés en Annexe 1.

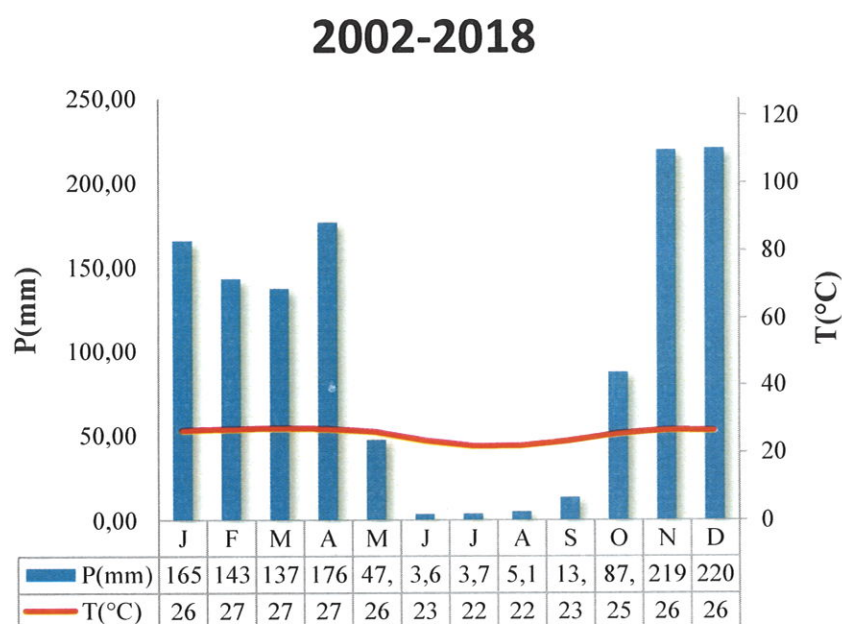


Figure 2.2: Courbe Ombrothermique (2002-2018)

Légende : P (mm) : Moyenne mensuelle des Précipitations en millimètres ; T (°C) : Moyenne mensuelle des températures en degré Celsius

Source : Nos analyses à partir des données de la station de L'INERA-LUKI (2002- 2018)

2.1.2.2 Végétation

Dans la RB de Luki la végétation est principalement une forêt dense humide semi-caducifoliée avec une biodiversité végétale importante. Elle compte environ 1096 espèces dominées essentiellement des plantes à fleurs (1055 angiospermes), parmi lesquelles on note approximativement 153 monocotylédones, 902 dicotylédones (Lubini, 1997). La végétation de la Réserve de Luki fait partie de la pointe extrême sud de la forêt guinéenne du Mayombe qui part du Gabon. Sa flore est très variée, suivant qu'elle pousse sur des sols hydromorphes ou sur terres jeunes mais aussi, selon les types de biotopes (fonds des vallées, savanes, lisières, forêts denses, rivières, clairières, champs) (Nsenga, 2004 ; WWF, 2011).

Du point de vue des associations végétales, on y rencontre principalement: la forêt à *Gossweilerodendron balsamiferum*; la forêt primaire à *Gilbertiodendron kisanuense* ; les forêts primaires remaniées à la suite de perturbations de nature anthropique; les forêts secondaires adultes à *Terminalia superba*, à *Hymenostegia floribunda*, à *Xylopia aethiopica* ; la forêt secondaire jeune ou recrû forestier à *Musanga cercropioides* ; la régénération post culturale, comprenant essentiellement des essences héliophiles (WWF, 2011). Sur les 33 000 hectares que compte la Réserve, on évalue à 3.000 ha environ de peuplement à *Terminalia superba*; 6000 ha de vieilles forêts à caractère primaire, 20.714 ha de forêts remaniées sous traitement UH ou UB et 3.000 ha de savanes. (Lubini, 1984).

2.1.2.3 Hydrographie

La réserve de Luki appartient entièrement au bassin hydrographique de la rivière Luki de laquelle elle tire son nom. Ce cours d'eau est un sous affluent de la Lukunga, affluent du fleuve Congo. Il traverse toute la réserve du nord-est au sud-ouest en décrivant une grande courbe. Plusieurs rivières se jettent dans la Luki et constituent ses sous affluents (WWF, 2011).

2.1.2.4 Sol

D'après les études menées, les principaux types de sols issus des différentes formations de recouvrement de la réserve sont les suivants : Les sols rouges, sur gneiss : Dans l'Ouest de la réserve ; Les sols rouges violacés, développés sur les amphibolites et se rencontrant dans la

zone centrale, les enclaves de Kisavu et de Kimbuya; Les sols jaunes sur **gneiss** et sur quartzites : dans l'Ouest et le sud de la réserve ; Les sols alluvionnaires, développés sur les alluvions récentes, ils sont réduits aux vallées de la Luki et le long des rivières (WWF, 2011).

2.1.2.5 Faune

La variété des biotopes présents dans la Réserve, représentés par les forêts denses humides de plaine, forêts secondaires, lisières, savanes, clairières et champs, rivières, fonds de vallées marécageuses ou temporairement inondés et sommets rocheux, devrait en principe constituer un dernier refuge de faune pour cette région. La traque de la faune par une chasse sauvage en a cependant très sensiblement réduit la présence des espèces qui y ont été inféodées. Les inventaires antérieurs de la faune renseignent néanmoins sur 17 espèces de mammifères parmi lesquelles: le céphalophe à bande dorsale noire (*Cephalophus dorsalis*), le Céphalophe de Grim (*Cephalophus grimmia*), le Céphalophe à front noir (*Cephalophus nigrifrons*), le Céphalophe bleu (*Cephalophus monticola*), le Guib harnaché (*Tragelaphus scriptus*), l'écureuil à pattes rousses (*Funisciurus pyrropus leonis*), le grand Ecureuil de Stanger (*Protoxerus stangeri*), l'athérure africain (*Atherurus africanus*), le rat géant d'Emin (*Cricetomys emini*), le daman d'arbre (*Dendrohyrax arboreus*), l'aulacode (*Thrynomys swinderianus*), la mangouste à longue queue (*Herpestes naso*), la civette d'Afrique (*Viverra civetta*), le pangolin à longue queue (*Manis tetradactyla*), le galago du Sénégal (*Galago senegalensis*), le potto de Bosman (*Perodictus potto*), le chimpanzé (*Pan troglodytes verus*), et d'autre part, les espèces ci-après parmi les oiseaux : le faisan bleu (*Corythaeola cristata*), le Touraco à gros bec (*Touraco macrorhynchus*), le grand calao à casque noir (*Ceratogymna atrata*), la caille bleue (*Coturnix coturnix*), le pigeon vert à front nu (*Treron australis*), et l'aigle pêcheur (*Haliaeetus vocifer*) (WWF, 2011).

2.1.2.6 Relief

Le relief de la Réserve de biosphère de Luki épouse globalement celui du Mayombe, lequel se relève progressivement de plateaux côtiers jusqu'aux monts Bangu, situés à 150 km de l'océan. L'amplitude moyenne entre les fonds des vallées et les sommets des collines environnantes est de l'ordre de 40 à 70 m. La géomorphologie est caractérisée par une série de collines de 300 à 500 m (Lubini, 1997). En général, le relief se présente sous forme de collines et de monts surélevés, de vallées hautes et basses sur lesquelles coulent, permanemment ou temporairement des eaux. Ce relief accidenté constitue aussi un obstacle à

la pénétration humaine, et devient indirectement un atout pour la conservation des ressources de la Réserve.

2.1.3 Situation socio-économique

2.1.3.1 Démographie et peuplement

Avant de devenir une Réserve Domaniale puis une Réserve de Biosphère, ce territoire était habité par les populations Bayombe. A la suite de la création de cette zone protégée, une partie de la population fut déplacée et installée hors de celle-ci, tandis que l'autre partie fut autorisée à y habiter dans des zones bien délimitées : les enclaves (Lubini, 1997). Ces enclaves sont au nombre de quatre : Kimbuya, Kisavu, Tshumba Kituti et Kiobo. Il y a également la Zone de la Station de recherche de Luki dans le sud-ouest de la Réserve qui est habitée par une centaine de ménages. A côté de cela, les camps de travailleurs des colons et des sociétés agricoles qui travaillaient dans la réserve sont restés après l'indépendance.

Au cours des dernières années, la population de Luki et de ses environs a évolué de manière significative. Nous basant d'une part sur les données présentées par Nsenga (2004) et tirées des synthèses des rapports administratifs des secteurs de Patu, Bundi et Boma Bungu pour les années 1993 (28590 habitants) et 2003 (83459 habitants) soit une augmentation de 292 % en 10 ans et d'autre part sur le taux d'accroissement annuel de la population rurale en RD Congo qui est d'en moyenne 2,18% (BM, 2019) ; l'évolution démographique dans la réserve et les villages environnants peut être estimée à 117849 habitants pour l'année 2019.

Cette projection a été obtenue sur base de la formule :

$$Pop_n = Pop_o \times (1 + t)^n \quad (1)$$

Avec : Pop_n : population pour l'année n ; Pop_o : population pour l'année de référence ;
t : taux de croissance de la population et n : Différence entre l'année ciblée et l'année de référence (Institut numérique, 2013).

Ce résultat renseigne sur la croissance réelle de la population dans et autour de la RB de Luki. Celle-ci est la conséquence de l'afflux massif des populations allochtones dans les villages traversés par les grands axes routiers Boma-Matadi et Boma-Tshela. Si la population continue à croître à ce rythme galopant la relique de la forêt de Mayombe court des grands risques.

En effet, la RBL est coupée en deux, sur 40 km, par la route nationale n° 1, ce qui provoque un fort accroissement des groupements traversés dont l'impact est sensible sur la Réserve. Un

important réseau (500 km) de routes d'exploitation forestière sillonne la Réserve. Une telle situation pourrait à terme conduire à sa fragmentation (Mankoto et Maldague, 2005)

Il est observé un enchaînement des villages sur ces deux axes qui traversent la Réserve au sud et à l'est ainsi que sur la route secondaire non revêtue qui relie Kinzau-Mvuete à Lemba (alias Kinsundi). Sur l'axe Boma-Tsela, entre Materne (alias Lovo) et Patu, dans un tronçon d'environ 30 km, on compte 10 villages et centres, soit une agglomération en moyenne tous les deux kilomètres. Sur l'axe Boma-Matadi, entre Materne (Lovo) et Kinzau-Mvuete, on rencontre 27 villages, camps et centres sur une distance d'environ 50 km, soit une moyenne d'une agglomération tous les deux kilomètres. Certaines de ces agglomérations ont été installées depuis la période coloniale et sont considérées comme des villages « réguliers ». D'autres par contre, ont été créées plus récemment ; après l'indépendance et la nationalisation des terres en vertu de la loi Bakadjika, promulguée en 1967 et modifiée en 1980 notamment par de migrants venus des districts voisins de Tshela et de Boma (Nsenga, 2004). Le nombre de ces « nouveaux villages », considérés comme « illicites » à l'intérieur de la Réserve, s'élevait à 21 en 2004 (WWF, 2011).

2.1.3.2 Activités économiques et de subsistance des populations

Les activités économiques exercées par les populations de Luki sont du type traditionnel et moderne. Dans le premier cas, c'est l'agriculture itinérante sur brûlis qui domine (bananes plantain et de table, manioc, taro, maïs, arachide, igname ; arbres fruitiers plantés : safoutiers, manguiers, avocats, etc.) (Figure 2.3). La population pratique également la chasse, la pêche et la cueillette, même dans l'aire centrale. Le petit élevage (caprins, porcins, ovins) et la volaille sont répandus dans les villages. Sur le plan énergétique, le prélèvement de bois de chauffe et la carbonisation sont très actifs (ravitaillement des villes de Boma et de Matadi). Le sciage de long : cette activité, également illégale, est omniprésente autour des villages et au niveau de la zone tampon de la Réserve (Nsenga, 2001 ; WWF-RDC, 2011 ;).

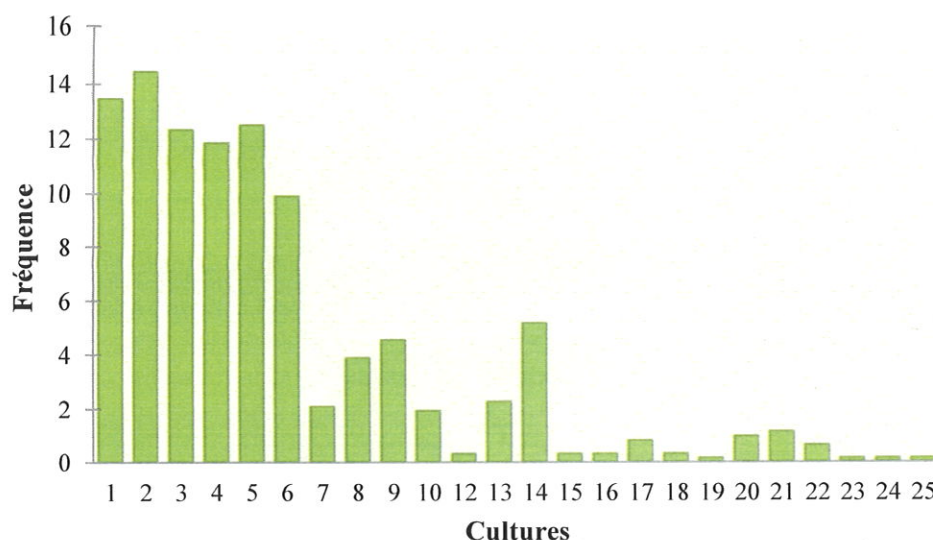


Figure 2.3: Cultures pratiquées dans et autour de Luki

(Source : Nos enquêtes)

Légende : 1:Maïs, 2: Manioc, 3: Taro, 4: Arachide, 5:Banancier 6 : Plantain 7 : Piment 8 : Igname 9 : Haricot 10 : Patate douce 11 : Pomme de terre 12 : Courge 13 : Fruitiers 14 :Niébé 15 :Tomates 16 :Aubergine 17 :Café 18 : Cacao 19 : Petits pois 20 : Riz 21 : Tabac 22 :Carbonisation 23 :vigne 24 : Potager 25 : Courges

Figure 2.3 : Cultures pratiquées dans et autour de Luki (Source : Nos enquêtes)

Les activités modernes portent sur les cultures industrielles (café, cacao), associées à l'exploitation du limba (*Terminalia superba*). Les exploitants forestiers viennent prélever, sélectivement, les essences précieuses à l'aide d'une machinerie lourde. De tels modes d'exploitation, très préjudiciables à la biodiversité, devraient être remplacés par des techniques d'abattage à faible impact, qui ne perturbent pas les sols (Nsenga, 2001).

Ces deux dernières activités sont terriblement destructrices. Dans toute la zone de transition, on assiste à un réel écrémage et même à une déforestation totale. Tous les blocs qui se trouvent à proximité des villages, principalement ceux qui longent la route Matadi-Materne, sont dans un état de dégradation plus ou moins avancée. L'effectif et les moyens restreints des écogardes de l'INERA et du MAB ne permettent pas d'enrayer cette destruction de la réserve. La carbonisation et le sciage de long restent encore des activités bien présentes (Bauwens, 2008).

2.2 MATERIELS

Les matériels qui ont servi à la réalisation de ce travail se composent des éléments suivants :

- Le logiciel d'interprétation et de traitement d'image Envi 5.1 : a été utilisé pour le prétraitement des images et leur classification ;
- Le logiciel de cartographie ArcGis 10.4.1 : utilisé pour la création, l'habillage et l'édition des cartes (points des feux, cartes des feux, masques des nuages, des cartes d'occupation du sol, cartes de changements) ;
- Logiciels bureautique et Microsoft Office Word pour la rédaction ; Excel et XLStat 2014 pour l'organisation des données, les analyses statistiques (calcul des fréquences, des moyennes, tests de corrélations...) ;
- Le logiciel MVSP 3.2 pour la classification hiérarchique des points de feu ;
- Le logiciel ZOTERO pour l'édition des références bibliographiques ;
- Autres matériels : GPS Garmin map 64S pour la prise des coordonnées géographiques, un appareil photo de marque Nikon Cool Pix S7000 pour la prise des vues et un téléphone de marque HUAWEI P20 pour l'enregistrement des entretiens.

2.3 METHODES

La démarche méthodologique utilisée dans cette étude est une approche intégrée associant la télédétection, la cartographie, la modélisation ainsi que les enquêtes de terrain.

2.3.1 Source des données

2.3.1.1 *Données des feux actifs et des zones brûlées*

Pour réaliser le suivi du feu dans la zone d'étude, les points de feux actifs (hotspots) fournies par MODIS et couvrant la période de Janvier 2002 à Juillet 2019 ont été exploités ainsi que les shapefiles des zones brûlées couvrant la période de 2001 à 2019. Actuellement, MODIS est l'une de sources de données les plus importantes pour la cartographie globale des sites d'incendies et des zones brûlées (Giglio et *al.*, 2003). Elle fournit des images à moindre résolution spatiale (250 m) mais avec plus grande fréquence d'acquisition (journalière). Les données sur les points des feux utilisées dans cette étude ont été téléchargées gratuitement en ligne sur le site <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>. (Giglio et *al.*, 2003, Müller et Suess, 2011). Celles des zones brûlées ont été téléchargées à partir du serveur de l'université de Maryland <ftp://ba1.geog.umd.edu> (Boschetti et *al.*, 2015). Ces données sont produites par l'Université de Maryland et fournies par la FIRMS (Fire Information for Resource

Management System) de la NASA (Niyongabo et Mbarushimana, 2019 ; Boshcetti et *al.*, 2015).

2.3.1.2 Données d'occupation du sol

Le suivi de la dynamique de l'occupation du sol dans et autour de la Réserve de Biosphère de Luki a été réalisé à partir d'images satellites issues du satellite à haute résolution spatiale Landsat. Ce dernier permet de bénéficier d'un large corpus de données disponibles depuis le début des années 1970 et permet d'avoir un suivi régulier sur les 40 dernières années. Afin d'analyser l'évolution du couvert végétal et élaborer la carte des changements au cours de la période 2002-2019 deux images Landsat acquises le 11 Avril 2002 et 18 Juin 2019 (Tableau 2.1) ont été utilisées. Ces images ont été téléchargées gratuitement à partir du site <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Tableau 2.1: Caractéristiques des images utilisées

Date d'acquisition	Type image	Path/Row	Datum	Projection	% des nuages	Résolution spatiale	Acquisition
MODIS (Produits feux 2002-2019)	Shapefiles dérivées des produits MOD14 et MYD14	-	WGS84	UTM 33S	-	500m	https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/
MODIS (Produits zones brûlées (200&-2019)	Shapefiles dérivées des produits MCD45	h19v9	WGS84	UTM 33S			ftp://ba1.geog.umd.edu
LANDSAT : 11 Avril 2002	Image LANDSAT 7 ETM+	183/64	WGS84	UTM 33S	<10%	30m	https://earthexplorer.usgs.gov/
LANDSAT : 18 Juin 2019	Image LANDSAT 8 OLI/TIRS	183/64	WGS84	UTM 33S	<5%	30m	https://earthexplorer.usgs.gov/

Les années 2002 et 2019 ont été choisies pour des raisons de disponibilité et la qualité des images par chance, en plus ces années couvrent bien la période où les modifications sont constatées et coïncident avec la période où l'acquisition des données sur les feux est possible. L'image de 2002 correspond à la période de transition entre la saison sèche et la saison des pluies et celle de 2019 correspond à la période de début de la saison sèche.

2.3.1.3 Données auxiliaires

Elles ont été obtenues lors de la mission de terrain. Ces données comprennent les points de contrôle terrain, les observations directes sur le terrain ainsi que des données d'enquêtes issues des échanges avec les communautés locales.

Les données auxiliaires contiennent également les données vectorielles obtenues de WWF-RDC (délimitation de la zone d'intervention du projet), de l'OSFAC (limites de la RB de Luki) et du référentiel géographique commun de la RD du Congo (limites administratives)⁸.

2.3.2 Traitement des données

2.3.2.1 Données sur les feux

- **Points des feux**

Dans le but d'obtenir d'une base de points des feux avéré, les points de feu avec une fiabilité inférieure à 30 % ont été supprimés car jugées peu fiables (Caillault *et al.*, 2010, Giglio, 2015). En effet, les PdF actifs sont classés sur une échelle de fiabilité de 1 à 100. Les niveaux de confiance sont basés sur les ajustements quantitatifs de l'algorithme dans le processus de détection. Ainsi, il peut être utile d'exclure les fausses occurrences positives des feux (Giglio *et al.*, 2003 ; Giglio, 2015, Giglio *et al.*, 2018).

Pour apprécier le pouvoir destructeur des feux observés et nous inspirant Giglio et ses collaborateurs (2006) ; les feux actifs ont été répartis en 4 catégories, en fonction de leur puissance radiative : les plus faibles (PR < 15 MW), les faibles (PR : 15 MW - 40 MW), les modérés (PR : 40 MW – 80 MW), les forts (80 MW – 600 MW).

L'analyse de la saisonnalité des feux dans une année a été effectuée par la méthode UPGMA (Unweighted Pair Group Methode with Arithmetic Mean). Par cette méthode sont regroupés de façon hiérarchique les différents mois de l'année selon la PR et la fréquence de feux. Le logiciel MVSP 3.2 (MultiVariate Statistical Package) (Kovach, 1997), grâce à son option Cluster Analysis (Analyse par regroupement), a été utilisé pour ce faire. Ainsi, un dendrogramme a été généré.

Pour réaliser ce regroupement hiérarchique, l'indice de similarité de Bray-Curtis (IB) a été choisi. L'expression de l'indice de Bray Curtis est reprise ci-dessous :

$$IB = \frac{\sum_{k=1}^n |X_{ik} - X_{jk}|}{\sum_{k=1}^n (X_{ik} + X_{jk})} \quad (2)$$

Où : i et j représentent les mois ; k représente la PR des feux ; X_{ik} représentent l'abondance de la PR k pour le mois i.

En tenant compte de leur puissance radiative, les dates et les heures d'enregistrement des feux actifs, les feux observés ont été groupés (en années, mois, heure de passage des feux selon le

⁸ www.rgc.cd

type de satellite, la Puissance Radiative (PR) des feux, ...). Ce regroupement a permis d'établir la saisonnalité et les heures d'occurrence des dits feux partant des points de feux enregistrées durant la période d'étude (2002-2019).

- **Zones brûlées**

Les données téléchargées couvrent la période de 2001 et 2019 et fournissent les superficies brûlées pour chacune de ces années. Les superficies brûlées fournies ont été regroupées pour les différentes années étudiées et leur superficie a été déterminée. Une carte des zones brûlées couvrant la période de 2001-2019 a été produite.

2.3.2.2 Données sur la couverture forestière

Deux images Landsat7 ETM+ du 11 Avril 2002 et Landsat du 18 Juin 2019 ont été analysées afin de déterminer les différents types d'occupation des sols pour les deux années et produire une carte de changement. Pour y arriver plusieurs étapes ont été prises en compte :

- **Prétraitement des images**

Les prétraitements sont des opérations effectuées sur les images, afin d'améliorer leurs aspects radiométrique et géométrique pour en extraire des informations significatives, notamment la préparation des images pour les contrôles sur le terrain et leur lecture visuelle (Barima, 2009).

Les images fournies sur le <http://earthexplorer.usgs.gov> sont d'avance corrigées géométriquement avec des pixels géo localisés de manière précise sur base de la projection UTM WGS84 zone 33S. Le prétraitement a consisté ainsi à un calibrage radiométrique qui a pour but de rendre possible la comparaison des images acquises sur une longue période et par des capteurs différents. Il permet de passer des valeurs numériques propres à chaque image aux valeurs physiques (réflectance) mesurées au niveau du capteur. Une correction atmosphérique basée sur la méthode QUAC (Quick Atmospheric correction) a ensuite été effectué dans Envi 5.1. Les images ont été ensuite filtrées pour la soustraction de l'obscurité (Dark subtraction) dans le même logiciel. Un masque de nuages (6% de couverture nuageuse) a été ensuite appliquée sur les deux images afin d'obtenir des images comparables pour les 2 années.

Après avoir réalisé les opérations élémentaires d'ajustement de contrastes (rehaussement de luminance) et de lissage, une composition colorée en fausse couleur a été élaborée. Cette dernière a consisté à associer la bande PIR avec le canal rouge, la bande Rouge avec le canal

vert et la bande verte avec le canal bleu. Sur l'image résultante (composition colorée), la végétation apparaît en rouge (forte réflectance dans le proche infra-rouge), les parcelles dénudées de végétation et les étendues sableuses apparaissent en blanc (forte réflectance dans les trois canaux) et les étendues d'eau en noir (faible réflectance dans les trois canaux). Dans ces bandes le contraste entre le sol et la végétation est le plus grand de même que la discrimination entre les unités végétales (Cottonnec et *al.*, 2005).

- **Etablissement de la nomenclature**

La nomenclature ou clef d'interprétation a pour but de définir les différentes classes d'occupation des sols et leurs caractéristiques spectrales avant toute classification. Ainsi, grâce à l'analyse des images à haute très haute résolution fournie par Google Earth (Annexe 2), aux visites de terrain et à la consultation des études antérieures sur la végétation associé à l'analyse des images et la composition colorée ; les thèmes présentés dans le tableau 2.2 ont été retenus.

Tableau 2.2: Identité et définition des unités retenues pour la classification

N°	Classes	Description	Apparence en composition colorée « Fausse couleur »
1	Forêt primaire (FP)	Forêt dense ou l'empreinte humaine n'est pas remarquable. Cette forêt est caractérisée par un peuplement fermé	Apparence Rouge foncé sur l'image
2	Forêt secondaire (FS)	Forêt dégradée (Où se pratiquent généralement les activités agricoles)	Apparence Rouge claire
3	Savanes (S)	Végétation principalement herbacée	Apparence rouge foncée mais avec une texture fine
4	Zones anthropisés (ZA)	Zones bâtis et sols nus	Apparence verdâtre
5	Eau	Cours d'eau (Fleuve, Rivières)	Noir

(Source : Nos analyses)

- **Classification supervisée des images**

Sur la base des connaissances avérées du terrain et après identification et reconnaissance spectrale des classes d'occupation du sol, nous avons opté pour la classification supervisée

avec l'algorithme du "maximum vraisemblance". Cet algorithme repose sur la règle de Bayes et utilise les statistiques des échantillons de parcelles d'entraînement pour calculer la probabilité d'appartenance de chaque pixel à l'une des classes d'occupation du sol qui a la plus forte probabilité (Robin et Rochon, 2002 ; Skupinski, 2009, Kadilamio, 2017, Musumba et Karume, 2019). Cela a permis de faire ressortir les différentes classes thématiques et de l'occupation du sol.

La démarche suivie se résume en quatre étapes dont l'interprétation visuelle des images satellitaires en se basant à la fois sur les caractéristiques des classes d'occupation du sol et notre connaissance du terrain ; la sélection d'un nombre de zone d'entraînement pour les classes voulues ainsi que l'évaluation de la fiabilité de notre classification et le contrôle du résultat obtenu. Pour les deux images (2002 et 2019), 5 classes ont été discriminées (Forêt Primaire, Forêt Secondaire, Savanes, Zones anthropisées, Eau).

Pour extraire les thèmes représentatifs des images issues de la classification, nous avons utilisé la technique de lissage des données (CCT, 2009) grâce à l'opérateur *Cleanup* du logiciel ENVI qui dissout les pixels isolés.

• Observations de terrain

La détection des différentes catégories d'occupation du sol à partir des seules images satellites reste difficile, c'est pourquoi il est nécessaire de s'appuyer sur des données terrain pour vérifier les phénomènes observés par télédétection (Sarr, 2009). Les travaux de terrain demeurent ainsi fondamentaux pour appuyer et corriger l'interprétation des images pré traitées par le logiciel (Bogaert et *al.*, 2018 ; Musumba et Katcho, 2019).

Ces données d'observation de terrain ont servi à initialiser et à orienter le traitement numérique des images satellitaires. Deux missions ont été effectuées la première effectuée de Juin à Juillet 2019 avait pour objectif d'identifier les objets correspondants aux classes issues de traitement automatique d'images et de prélever des échantillons pour une classification supervisée ainsi que de mener les entretiens avec les communautés pour comprendre le système général de gestion des feux et des causes de la dégradation du milieu. La seconde mission effectuée en Septembre 2019 s'est axée plus sur la vérification des traitements réalisés grâce aux données collectées durant la mission précédente.

Les données collectées ont permis de reconnaître et de définir les éléments paysagers de la zone d'étude et d'effectuer des relevés de points GPS représentatifs de chaque classe d'occupation du sol précédemment définies.

• Validation des classifications supervisées

Pour évaluer la fiabilité de notre classification, des comparaisons entre les zones d'entraînement de départ et les nouvelles zones de validation dans lesquelles sont vérifiées les statistiques des pixels bien classés ont été réalisées. Le choix des zones de validation a été faite selon la méthode d'échantillonnage aléatoire « Random points » et a méthodologie utilisée a été inspiré du travail fait à l'Université de Texas et publié depuis Juin 2016 sous le lien <https://www.youtube.com/watch?v=alkkJKWX7Ng>.

Pour chacune des images 200 points ont été générés au hasard et leurs classes ont été déterminées. Les points créés ont été convertis en raster produisant les pixels de vérification. Ceux-ci ont été ensuite combinés aux pixels des images classifiées afin de générer des matrices de confusion pour les 2 images.

La matrice de confusion ou tableau de contingence permet de mesurer la qualité d'un système de classification. A partir de cette matrice, le taux de pixels bien classés de la classe i ($Pu(i)$) a été déterminé avec l'équation :

$$Pu(i) = \frac{Mc(i)}{m1} \times 100 \quad (3)$$

Où $Mc(i)$ est le nombre de pixels de la classe i ayant effectivement été affectés à celle-ci après classification et $m1$ la somme des pixels de la classe i dans l'image. La précision du producteur $Pp(i)$ a été obtenue suivant l'équation :

$$Pp(i) = \frac{Mc(i)}{m2} \times 100 \quad (4)$$

Où $m2$ est le nombre de pixels appartenant effectivement à la classe i . Une valeur élevée de $Pp(i)$ indique que la classe a été peu affectée par les échantillons des autres classes. A l'inverse, un taux faible indique que cette classe a souvent été choisie à la place d'autres classes.

La précision globale qui est égale e au nombre total de pixels correctement classifiés (diagonale de la matrice de confusion) divisé par le nombre total de pixels de vérification MPCC (Skupinski et al., 2009).est donnée par l'équation :

$$MPCC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Pu(i) \quad (5)$$

n est le nombre total des pixels incluses dans la matrice.

L'indice de Kappa (Equation 6) est un estimateur de qualité qui tient compte des erreurs en lignes et en colonnes et varie de 0 à 1. Il indique comment les données à classer s'accordent aux données de référence. Il constitue une mesure fiable dans l'évaluation des

classifications thématiques car il examine tous les éléments dans la matrice de confusion et prend en compte à la fois des erreurs d'omissions et de commissions (Congalton, 1991) :

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1}^r M_c(i) - \sum_{i=1}^r m_1 m_2}{n^2 - \sum_{i=1}^r m_1 m_2} \times 100 \quad (6)$$

où r est le nombre de rangée de la matrice (Barima, 2009 ; Musumba et Katcho, 2019).

- **Analyse des changements**

Toutes les transformations d'une classe d'occupation du sol vers une autre sont appréciées à travers la réduction ou l'augmentation de la superficie de l'unité initiale. Ainsi un bilan peut être dégagé par unité ce qui permet une analyse fine de chaque changement opéré et son explication à partir de la localisation du changement. L'opération a consisté à superposer les données de 2002 avec celles de 2019. Les changements ont été mis en évidence à travers une matrice de transition qui a été créée pour identifier les fréquences de transition entre classes au cours de l'intervalle de temps étudié (Bamba et *al.*, 2008 ; Bogaert et *al.*, 2018).

La matrice de transition entre deux états (t_0 et t_1) est obtenue à partir des valeurs données par les logiciels de SIG et traitées dans Excel. Ces valeurs ainsi obtenues proviennent de la superposition des deux cartes grâce à un logiciel de SIG en vue de détecter les changements opérés dans l'occupation du sol entre deux périodes différentes (Bamba et *al.*, 2008). Cette matrice correspond à une matrice carrée qui décrit de manière condensée les changements d'état des éléments d'un système pendant une période bien déterminée (Schlaepfer, 2002 ; Bamba et *al.*, 2008 ; Bogaert, 2018). Les cellules de la matrice renferment la valeur d'une variable ayant passé d'une classe initiale i à une classe finale j pendant la période allant de t_0 à t_1 . Les valeurs des colonnes et des lignes représentent des proportions des aires occupées par chaque classe d'occupation du sol au temps correspondant (Bamba et *al.*, 2008 ; Bogaert, 2018). Ainsi, les colonnes de la matrice indiquent les états d'occupations des sols en 2019 et les lignes correspondent aux états en 1996.

2.3.2.3 *Corrélations entre les feux et les changements observés*

Nous servant des données des zones brûlées de l'année 2001 et celles de l'année 2018, le taux de couvert affecté par le feu par type d'occupation du sol ont été déterminés pour les années 2002 et 2019. Cela a permis de se rendre compte des types d'occupation les plus affectées par les feux pour les différentes années étudiées.

Afin d'établir la corrélation pouvant exister entre les feux et les changements observés ainsi que d'évaluer la part des feux dans les changements, les superficies affectées par les feux ont été déterminées en établissant l'intersection entre les zones brûlées ainsi que les changements observés dans les différentes classes de transition qui ont eu lieu dans le milieu.

D'une part, les superficies affectées par les feux pour les différents types de couvert ont été déterminées pour les années 2002 et 2019 et d'autre part, la part du feu dans les différents changements observés a été déterminée pour les différentes classes de transition pendant la période 2002-2019. Ces analyses ont permis d'orienter les actions à mener afin d'aboutir à une meilleure gestion des feux dans la zone étudiée.

2.3.2.4 Mission d'enquête auprès des communautés

Une enquête a été conduite auprès des communautés vivant dans et aux environs de la réserve de biosphère de Luki. Elle avait pour but de décrire les principaux éléments caractéristiques des systèmes d'exploitation des populations vivant au sein et autour de RBL ainsi que de caractériser les différents modes d'utilisation et de gestion des feux, que ça soit le feu utilisé pour les travaux agricoles ou les feux des savanes. Différentes informations ont été collectées telles que : les superficies moyennes exploitées par les populations, le système agricole pratiqué, le recours ou non au feu pour les travaux agricoles, les cultures concernées par l'incinération, la durée de jachère, la période et le moment propice de mis à feu, le mode de gestion des feux, les raisons de mis à feu, les effets positifs et négatifs des feux à la fois sur le sol, la végétation, la faune ainsi que sur la population vivant dans les environs, etc. Plus des détails quant aux éléments ayant fait l'objet de nos entretiens avec les communautés sont présentés dans la fiche d'enquête en annexes (Annexe 3). A ces enquêtes ont été couplées des observations et des entretiens semi-dirigés avec les communautés. Les images sur les différentes observations faites sur terrain sont présentées en annexes (Annexe 4).

- **Echantillonnage**

L'étude étant principalement qualitative, le calcul du taux d'échantillonnage a été basé sur la formule proposée par Dagnelie (Dagnelie, 1998) et selon laquelle :

$$N = \frac{z^2 * p * (1-p)}{d^2} \quad (7)$$

Où N : taille de l'échantillon, z : le nombre d'écarts standard d'une proportion donnée par rapport à la moyenne et correspond à 1,96 à un seuil d'erreur d de 5% ; p : proportion estimée de la population qui présente la caractéristique, $1-p$ = prévalence, d = marge d'erreur tolérée.

La proportion de la population connaissant et utilisant le feu a été obtenue lors d'une pré-enquête réalisée auprès d'un échantillon de 10 personnes choisies aléatoirement dans la population. Il en est sorti qu'environ 93,3% de la population connaît et recourt au feu.

Les informations de l'enquête proprement dite ont été obtenues auprès d'un échantillon de 96 individus obtenu par sondage aléatoire simple dans et autour de la RBL. Cet échantillon a été constitué des hommes en majeure partie, mariés avec un âge moyen de 31-45ans et un niveau d'étude primaire et secondaire. Ils ont comme activité principale l'agriculture et sont dans la zone depuis plus de 15 ans. Ils sont allochtones pour la majorité des cas et sont propriétaires de leurs terres (Annexe 5).

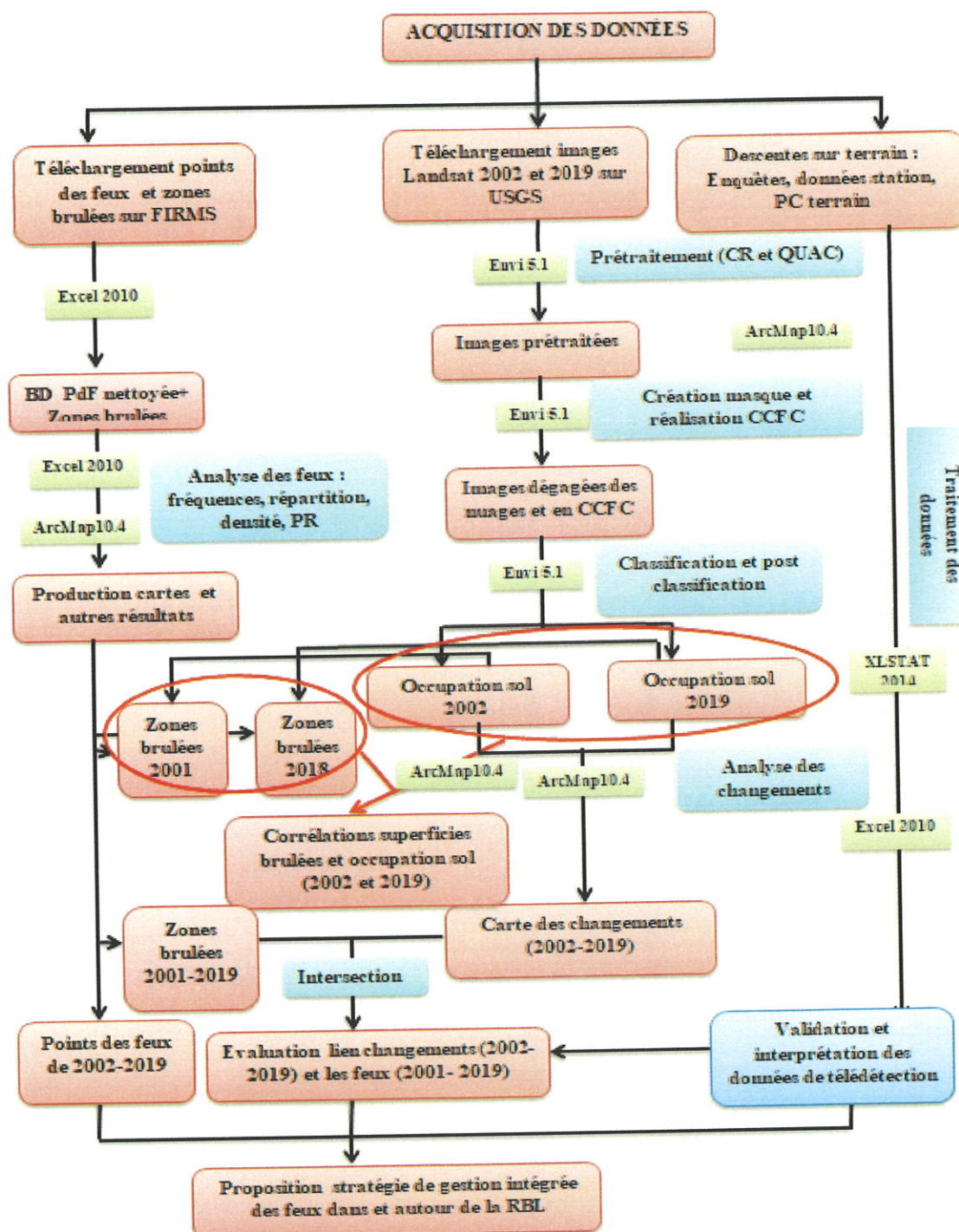


Figure 2.4: Synthèse méthodologie (Source : Notre conception)

Légende

- Opération réalisée
 - Résultat obtenu
 - Outil utilisé pour l'analyse
- CCFC : Composition colorée fausse couleur ; BD : Base des données

CHAPITRE 3. PRESENTATION DES RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 PRESENTATION DES RESULTATS

3.1.1 Caractérisation des feux

3.1.1.1 Organisation temporelle des feux enregistrés

Un total de 4477 points de feu ayant une fiabilité $> 30\%$ ont été enregistrés de 2002 à 2019 et repartis dans les différents mois constituant l'année (Annexe 6).

- Répartition annuelle des feux

La figure 3.1 ci-dessous nous présente la fréquence annuelle des feux enregistrés dans la zone d'étude entre Janvier 2002 et Juillet 2019.

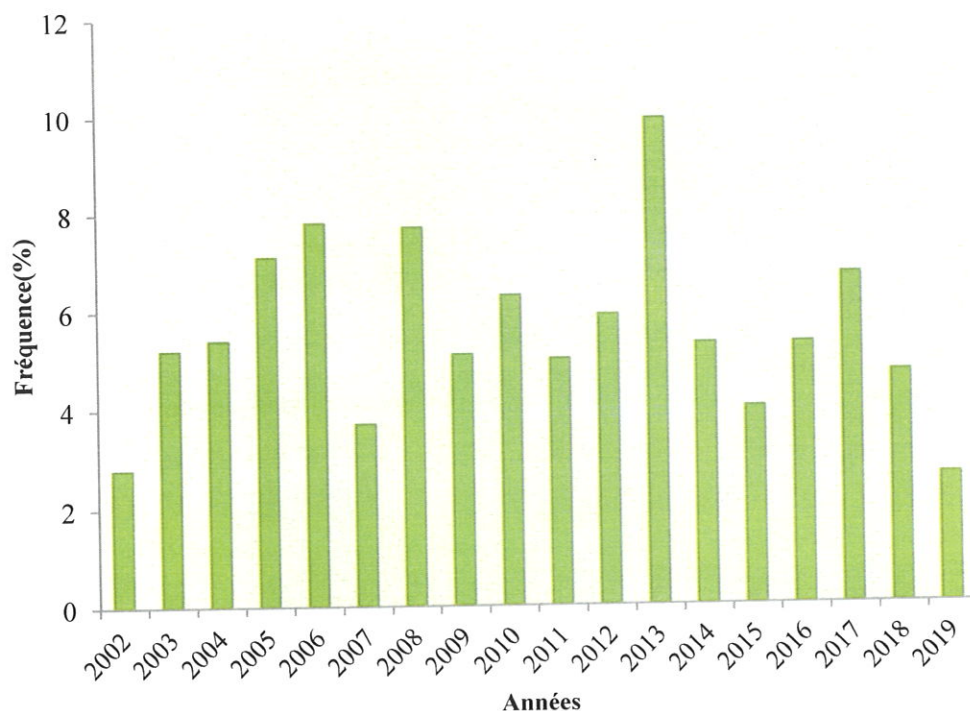


Figure 3.1: Répartition annuelle des feux enregistrés de 2002 à 2019
(Source : Nos analyses)

D'après les résultats de la figure 3.1, la répartition des feux pour les différentes années n'est pas homogène, l'année 2013 a enregistré le plus grand nombre de feux (9,9%) suivi de l'année 2006 (7,8%) et l'année 2008(7,7%). L'année 2002 a été la moins active en termes de feux (2,8%) suivie de l'année 2007(3,7%) des feux. Notons ici que la faible fréquence des feux en 2019 est liée à la période de prise des données qui s'arrête en Juillet.

• Répartition mensuelle des feux

La répartition mensuelle des feux est donnée sur la figure 3.2 ci-dessous.

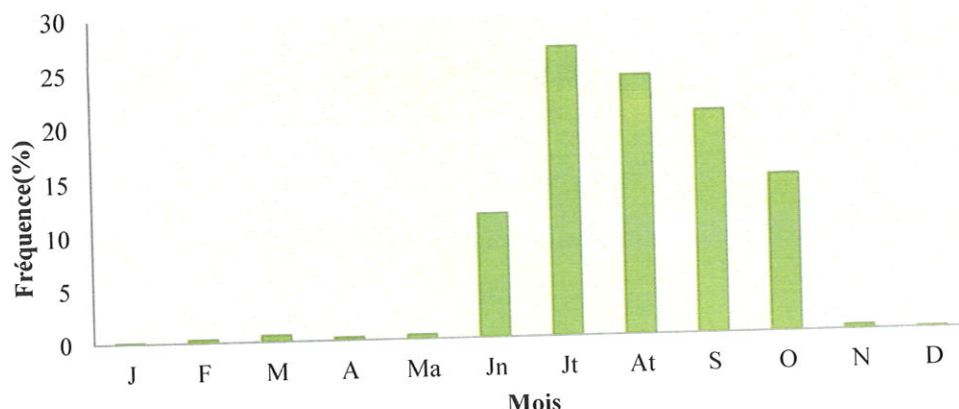


Figure 3.2: Répartition mensuelle des feux enregistrés (2002-2019)

(Source : Nos analyses)

Les feux sont inégalement répartis pour les différents mois. Le mois de Juillet (23,9%) est le plus actif en termes de feu. Il est suivi du mois d'Août (23,9%) et du mois Septembre (20,6 %). Ces mois correspondent aux mois secs tel qu'indiqué sur la figure 2.2 présentée dans le second chapitre. Les mois de Juin, Juillet, Août, septembre et Octobre correspondant aux mois secs et rassemblent 97, 5% des feux. Les mois de Janvier et Décembre (mois les plus pluvieux correspondent à la quasi-absence de feux avec seulement 0,1% de feux enregistrés pour chacun d'eux.

La comparaison de la fréquence des feux par année avec quantité des précipitations et la température moyenne (Annexes 7 et 8) a montré une forte dépendance de taux de brulis avec la quantité des précipitations et la température moyenne. Les résultats du test Z ont démontré que la fréquence des feux varie fortement en fonction de la quantité des pluies correspondant pour les différentes années (p-value <0,0001 au seuil de signification de 5%) mais également l'effet qu'à le brulis sur les valeurs de températures enregistrées (p-value <0,0001 au seuil de signification de 5%).

• Répartition journalière des feux enregistrés

Les résultats présentés dans le tableau 3.2 ci-dessous nous montrent la répartition journalière des feux en fonction des heures de la journée et du type de satellite qui collecte les informations.

Tableau 3.1: Répartition journalière des feux enregistrés

Satellite	[6h-12h]	[12h-18h]	[18h-00h]	[00h-6h]	Totaux/satellite	%
Satellite Aqua	0,0	4128,0	0,0	2,0	4130,0	92,2
Satellite-Terra	310,0	28,0	9,0	0,0	347,0	7,8
Totaux/période	310,0	4156,0	9,0	2,0	4477,0	100,0
%	6,9	92,8	0,2	0,0	100,0	

(Source : Nos analyses)

Les résultats du tableau 3.1 montrent que la répartition journalière des Feux est loin d'être aléatoire. En effet 92,8% des feux sont observés dans les après-midis soit entre 12h et 16h. Seulement un petit nombre de feux surgissent les avant midi (6,9%) et sont quasi absent pour les heures du soir : 0,2% et 0% respectivement de 18h à 00h et de 00h à 6h. La quasi-totalité de ceux-ci est observée par le Satellite Aqua (92,2%).

- **Puissance radiative (PR) des feux enregistrés en fonction des mois**

Les résultats du tableau 3.2 et 3.3 présentent l'analyse de la puissance radiative des Feux enregistrés et leur regroupement selon l'échelle proposée par Giglio *et al.*, 2006).

Tableau 3.2: Puissance radiative des points des feux (MW)

Mois	Nombre Feux	Min	Max	Moyenne± Ecart type
Janvier	3	6,9	59,4	26,1±29,9
Février	16	4,4	24,3	11,2±5,1
Mars	29	3,3	35,6	12,6±8,1
Avril	14	5,5	57,8	18,1±13,8
Mai	20	4,6	25,4	12,0±6,1
Juin	519	3,8	155,6	16,1±14,0
Juillet	1199	3,7	224,3	21,7±22,1
Aout	1074	3,8	331,9	25,9±28,8
Septembre	923	0,0	249,4	26,8±25,7
Octobre	655	5,2	339,9	25,3±24,3
Novembre	22	4,8	59,3	18,8±15,3
Décembre	3	8,5	13,9	11,0±2,7
Total	4477	0,0	339,9	23,5±23,3

(Source : Nos analyses)

Les résultats ci-haut présentés dans le tableau 3.2 montrent que la PR des feux enregistrés varie entre 0 et 339,9MW avec le pic de PR au mois d'Octobre. La PR moyenne de l'ensemble des Feux enregistrée est de 23,5 MW avec une importante variation autour de la moyenne d'une valeur de 23,3 MW. Le mois de Septembre a la plus grande moyenne (25,9 MW) de tous les Feux enregistrés suivie du mois d'Août (25,9 MW) et du mois d'Octobre (25,3MW). Les feux avec des PR plus faibles sont enregistrés aux mois de Décembre (11,0MW) et de Février (11,2MW).

Tableau 3.3: Regroupement des Feux selon leurs PR

Mois	Très faible (<15MW)	Faible (15-40MW)	Moyen (40-80MW)	Fort (80-600MW)	Totaux/mois	%
Janvier	2,0	0,0	1,0	0,0	3,0	0,1
Février	14,0	2,0	0,0	0,0	16,0	0,4
Mars	21,0	8,0	0,0	0,0	29,0	0,6
Avril	8,0	5,0	1,0	0,0	14,0	0,3
Mai	15,0	5,0	0,0	0,0	20,0	0,4
Juin	326,0	168,0	20,0	5,0	519,0	11,6
Juillet	623,0	432,0	116,0	28,0	1199,0	26,8
Aout	478,0	435,0	115,0	46,0	1074,0	24,0
Septembre	351,0	414,0	117,0	41,0	923,0	20,6
Octobre	249,0	302,0	91,0	13,0	655,0	14,6
Novembre	15,0	5,0	2,0	0,0	22,0	0,5
Décembre	15,0	5,0	2,0	0,0	22,0	0,5
Totaux/Classe	2105,0	1776,0	463,0	133,0	4477,0	100,0
%	47,0	39,7	10,3	3,0	100,0	

(Source : Nos analyses)

Il ressort du tableau 3.3 que la PR des feux varie des feux les plus faibles ($PR < 15$ MW) aux feux forts ($80 < PR < 600$ MW). La distribution des PR n'est pas uniforme, 47% des feux ont une PR très faibles suivi des ceux à un PR faible (39,7%). Seulement 10,3% des feux ont un

PR moyen et 3% un PR fort. La moyenne de la PR des 4477 Feux est 23,48 avec une forte variation autour de la moyenne. Il existe une dépendance de l'intensité des Feux en fonction des mois pour les différentes années (p-value <0,00001) (Tableaux A2 et A3 en annexes)

Pour bien discriminer la répartition des feux basée sur leur puissance radiative et leur fréquence en fonction des mois de l'année, une classification hiérarchique a été réalisée à partir des données sur les feux couvrant la période de 2002 à 2019 (Figure 3.3.)

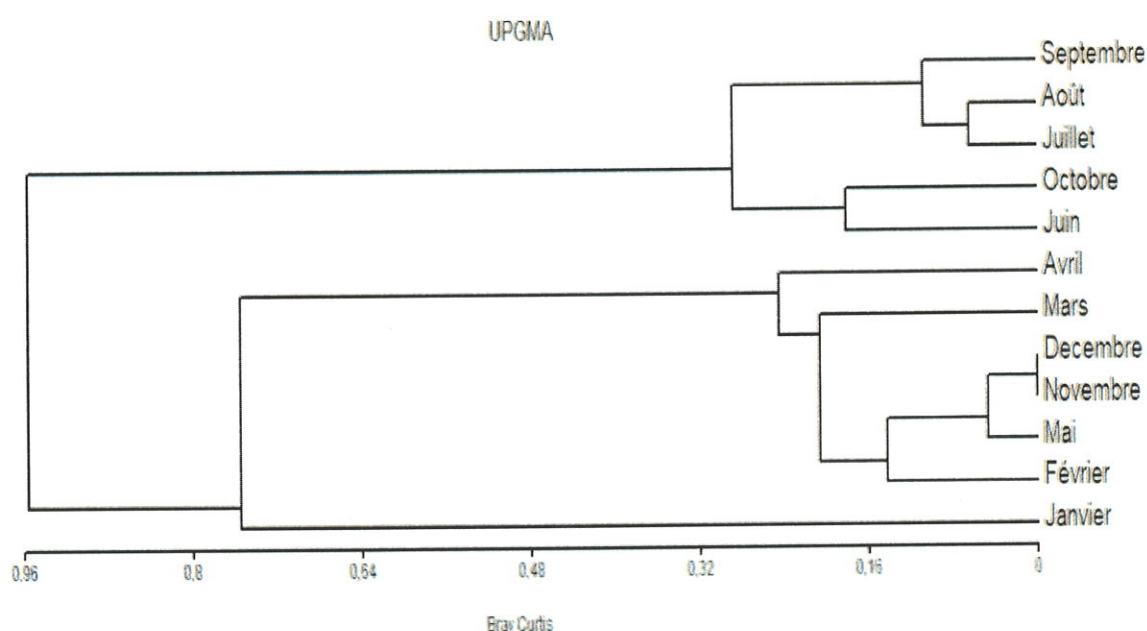


Figure 3.3: Classification hiérarchique des Feux en fonction de leur PR
(Source : Nos analyses)

La classification hiérarchique des feux au cours de l'année tenant compte de la PR et leur fréquence met en évidence deux principaux groupements correspondant à deux saisons climatiques connues dans la zone d'étude : une sèche et l'autre pluvieuse. Le premier grand groupe est constitué des mois secs (de Juin à Octobre 2019) et le Second des mois humides (de Janvier à Avril). La saison sèche est à son tour subdivisée en 2 groupes, un correspondant aux mois de début et de fin de la saison (Juin et Octobre) et l'autre correspondant au mois de milieu de la saison. La saison des pluies est à son tour subdivisée en deux sous-groupes, le mois de Janvier a son sous-groupe les autres mois sont regroupés dans un autre (Février-Mai et Novembre-Décembre).

3.1.1.2 Organisation spatiale des feux enregistrés

La répartition spatiale des Feux basée sur leur puissance radiative (Figure 3.4) nous a permis de générer une carte de densité (Densité de Kernel) présentée sur la Figure 3.5 ci- dessous.

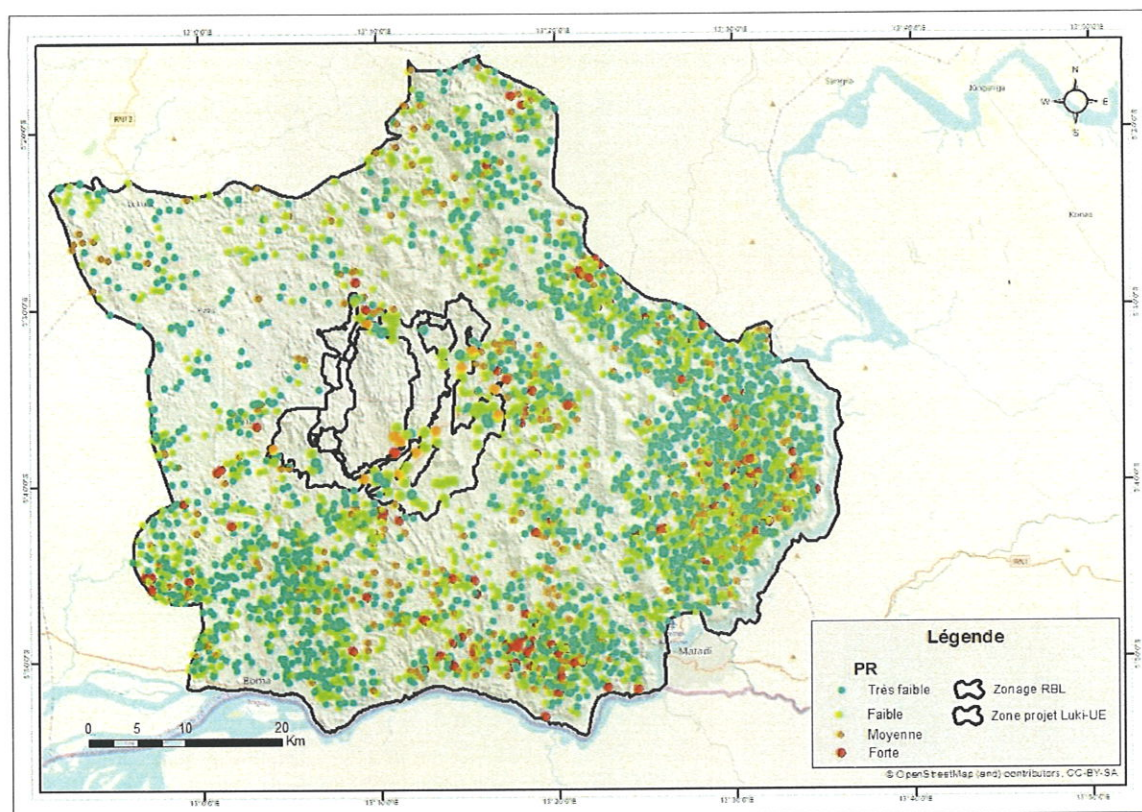


Figure 3.4: Répartition spatiale des Feux selon leur puissance radiative (PR)
(Source : Nos analyses)

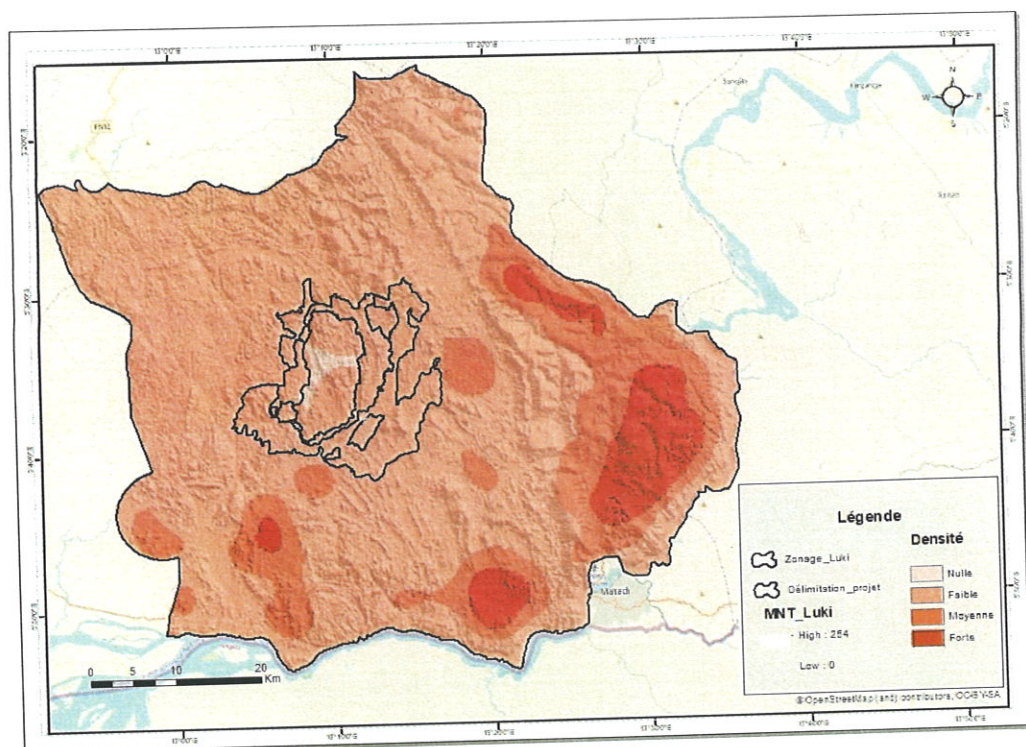


Figure 3.5: Densité des feux (Source : Nos analyses)

L'analyse des figures 3.4 et 3.5 montrent que le plus grand nombre des feux ont lieu dans la partie Sud-Est de la zone d'étude. Cette zone est la plus affectée par les feux sur toute la zone. La partie Nord-Est quant à elle semble être la moins touchée par les feux. La zone centrale de la RB de Luki la seule zone la moins exposée aux feux dans la zone d'étude.

- **Situation de la Réserve de Biosphère de Luki**

Un regard particulier sur la situation au sein de la Réserve de Biosphère de Luki nous donne les résultats présentés sur la figure 3.6.

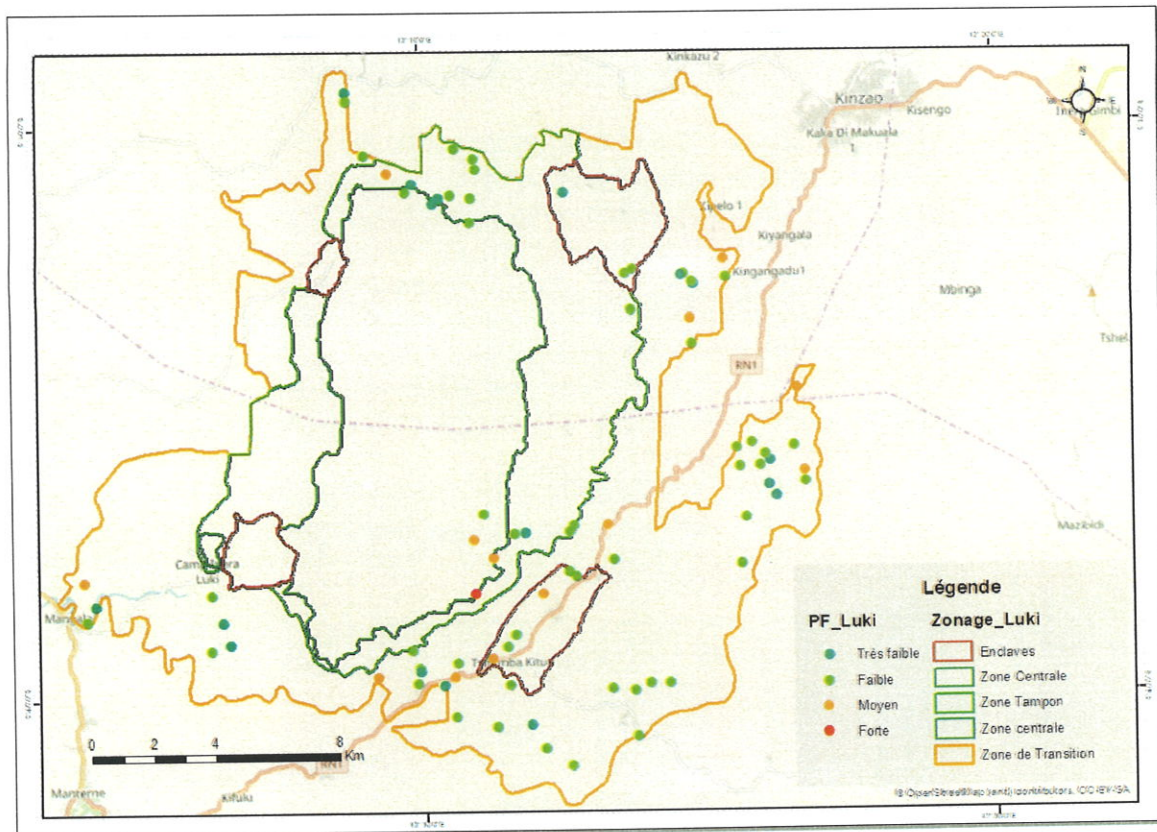


Figure 3.6: Répartition spatiale des feux dans la RB de Luki (2002-2019)
(Source : Nos analyses)

Sur les 4477 feux enregistrés de 2002 à 2019 dans la zone d'étude, 82 points sont localisés dans la RB de Luki soit 1,8% des feux. Ceux-ci sont principalement localisés dans la Zone de transition ainsi que dans les enclaves et la zone tampon. La zone centrale quant à elle, bien que préservée pour la majeure partie est en train d'être rongée dans la partie Nord-Est ainsi que du côté de l'enclave de Tshumba kituti. Quarante-deux virgule deux pour cent (42,2%) des feux sont enregistrés au mois d'octobre et de Septembre avec une fréquence de 42,6% pour chacun des deux mois. Soixante-deux virgule dix-neuf pour cent de ces points ont une PR faible (15-40NW) et respectivement 20%, 15% et 1% ont des PR très faible (40-80NW), moyennes (<15NW) et fortes (80-600NW).

3.1.2 Analyse de la dynamique d'occupation du sol

3.1.2.1 Dynamique d'occupation du sol

- **Cartographie de l'occupation du sol en 2002**

La répartition des classes d'occupation du sol pour l'année 2002 est présentée dans le tableau 3.4 ci-dessous :