



**ÉCOLE RÉGIONALE POST-UNIVERSITAIRE D'AMÉNAGEMENT ET DE GESTION
INTÉGRÉS DES FORÊTS ET TERRITOIRES TROPICAUX**

-ÉRAIFT-

MEMOIRE

**Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master Professionnel en
Gestion Des Aires Protégées**

**Suivi par télédétection des feux de brousse et du couvert forestier
dans et autour de la Réserve de Biosphère de Luki, Kongo central,
République Démocratique du Congo de 2002 à 2019**

Par

CIREZI CIZUNGU Nadège

Ir Agronome, Orientation Zootechnie

1^{ère} promotion Master professionnel en Gestion des Aires protégées

Promoteur : Professeur Yan BOGAERT

(Université de Liège, Belgique)

Co-promoteur : Professeur Raymond LUMBUENAMO

(Université de Kinshasa, RD Congo)



ANNÉE ACADÉMIQUE 2019-2020



**ÉCOLE RÉGIONALE POST-UNIVERSITAIRE D'AMÉNAGEMENT ET DE GESTION
INTÉGRÉS DES FORÊTS ET TERRITOIRES TROPICAUX**

-ÉRAIFT-

MEMOIRE

**Présente en vue de l'obtention du Diplôme de Master Professionnel en
Gestion Des Aires Protégées**

**Suivi par télédétection des feux de brousse et du couvert forestier
dans et autour de la Réserve de Biosphère de Luki, Kongo central,
République Démocratique du Congo de 2002 à 2019**

Par

CIREZI CIZUNGU Nadège

Ir Agronome, Orientation Zootechnie

1^{ère} promotion Master professionnel en Gestion des Aires protégées

Promoteur : Professeur Yan BOGAERT

(Université de Liège, Belgique)

Co-promoteur : Professeur Raymond LUMBUENAMO

(Université de Kinshasa, RD Congo)

Membres du Jury :

Professeur Dominique MWEZE, Président (ERAIFT)

Professeur Jean-Pierre MATE MWERU, Secrétaire (ERAIFT)

Professeur Tolérant LUBALEGA, Membre (INERA/LUKI)

Professeur Francis LELO NZUNZI, Membre (UNIKIN)

ANNÉE ACADEMIQUE 2019-2020

Université de Kinshasa, Commune de Lemba, - B.P. 15.373 - Kinshasa, République Démocratique du Congo ☎:
+243(0)972601761 /243(0)998181171- E-mail: info@eraift-rdc.org; Site : www.eraift-rdc.org

IN MEMORIAM

*En mémoire de ma très chère maman **Astride HENDWA MUJIJIMA** que la mort m'arracha brutalement avant qu'elle n'ait savouré le fruit de la plante qu'elle a vue pousser.*

Repose en paix éternelle maman !

DEDICACE

A tous ceux qui se dévouent à la conservation de la biodiversité et le bien-être des populations, puisse ce travail vous apporter un souffle de plus dans cette noble lutte !

A tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin durant la rédaction de ce mémoire !

A toutes les personnes que j'aime... !

Je vous dédie ce modeste travail !

REMERCIEMENTS

Louange à Dieu le clément, le miséricordieux, qui nous a guidé tout au long de notre vie et nous a donné le courage et la patience de mener à bien ce travail.

La réalisation du présent mémoire a impliqué la contribution de beaucoup de personnes et de contacts sur lesquels nous avons compté à travers leurs concours précieux. C'est pour nous un réel plaisir et un grand honneur de les remercier vivement.

Nous pensons en premier lieu à l'Union Européenne par le canal de l'Organisation de Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture « UNESCO » ainsi que la GIZ qui ont financé nos études à l'ERAIFT.

Que l'ERAIFT, à travers le Directeur de l'Ecole Professeur **Baudouin MICHEL** et toute l'administration, trouve à travers ces phrases nos sincères remerciements pour les sacrifices consentis pour que nous arrivions au bout de notre formation.

Nos sincères remerciements s'adressent aux Professeurs **Jan BOGAERT** et **Raymond LUMBUENAMO** qui ont assumés avec sollicitude la direction de ce mémoire malgré leurs multiples occupations. Que nos encadreurs Messieurs **MSc. Elvis TSHIBASU** et **MSc. Eric LUTETE** qui nous ont encadrés durant la rédaction de ce mémoire trouvent ici l'expression de notre gratitude.

Ce travail a bénéficié d'une bourse complémentaire de l'Union Européenne à travers le projet « Renforcement de la résilience au changement climatique des communautés locales de Luki et Mai-Ndombe en RDC » exécuté par l'ERAIFT en collaboration avec WWF/RDC. Qu'ils trouvent à travers ces mots notre profonde gratitude!

Nos remerciements vont à l'endroit de toute l'équipe du projet : Dr. Alain HUART, Dr. Isaac DIANSAMBU, MSc. Ernestine LONPI TIPI, MSc. Carine MAUWA, Ir. Ernest NTUMBA, Madame Eglesyas MBAKI KIMFUTA et tous les autres membres à travers leur accompagnement sur terrain.

Merci à nos guides de terrain, aux agents de l'INERA Luki et plus particulièrement au chef de station, le Professeur **Tolérant LUBALEGA** pour leur accompagnement.

Merci à tous les collègues de la Faculté des Sciences Agronomiques et de l'Environnement de l'Université Evangélique en Afrique et plus particulièrement à notre Doyen le Professeur **Katcho KARUME** pour ses orientations et ses encouragements.

Merci à tous les membres de ma famille pour leur présence dans ma vie et leur amour inconditionnel. Mes parents, mes frères, mes sœurs, mes neveux et nièces, mes beaux-frères et belles sœurs.

Merci à tous les collègues de la première promotion GAP et TAF avec lesquels nous avons cheminés.

Merci à tous les amis qui nous ont soutenu et appuyé pendant ce long parcours.

CIREZI CIZUNGU Nadège

TABLE DES MATIERES

IN MEMORIAM.....	i
DEDICACE.....	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIERES	v
SIGLES ET ABBREVIATIONS	vii
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES ANNEXES.....	xi
RESUME.....	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCTION.....	1
1.1 CONTEXTE	1
1.2 PROBLEMATIQUE	2
1.3 CHOIX ET INTERET DU SUJET.....	6
1.4 QUESTIONS DE RECHERCHE.....	8
1.5 OBJECTIFS.....	8
1.6 HYPOTHESES.....	9
1.7 PERTINENCE AVEC L'APPROCHE SYSTEMIQUE	9
1.8 SUBDIVISION DU TRAVAIL	11
CHAPITRE 1. APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE	12
1.1 CARACTERISTIQUES DES IMAGES SATELLITAIRES.....	12
1.1.1 Les principales caractéristiques des images satellitaires.....	12
1.1.2 Caractéristiques des images satellitaires utilisées	14
1.1.3 Traitement des images utilisées.....	24
1.2 APPORTS DE LA TELEDETECTION.....	28
1.2.1 A l'étude des surfaces brûlées	28
1.2.2 Dans la gestion des ressources forestières.....	29
1.3 INCENDIES DANS LE MONDE.....	30
1.3.1 Causes des feux	32
1.3.2 Les impacts du feu.....	34
1.4 DISPOSITIONS LEGALES REGISSANT LA PROTECTION DES FORETS ET L'UTILISATION DU FEU EN RD CONGO.....	38

1.5	PRINCIPAUX FACTEURS DEFORESTATION	39
CHAPITRE 2. MILIEU, MATERIELS ET METHODES		42
2.1	MILIEU D'ETUDE	42
2.1.1	Situation géographique.....	42
2.1.2	Situation biophysique	43
2.1.3	Situation socio-économique	46
2.2	MATERIELS	49
2.3	METHODES	49
2.3.1	Source des données	49
2.3.2	Traitement des données	51
CHAPITRE 3. PRESENTATION DES RESULTATS ET DISCUSSION		60
3.1	PRESENTATION DES RESULTATS	60
3.1.1	Caractérisation des feux	60
3.1.2	Analyse de la dynamique d'occupation du sol	67
3.1.3	Les impacts du feu sur le couvert végétal et les changements observés	75
3.1.4	Gestion des feux par les communautés	80
3.1.5	Perceptions paysannes sur les impacts des feux.....	86
3.2	DISCUSSION	88
3.2.1	Résultats de suivi du feu.....	88
3.2.2	Résultats de la dynamique d'occupation du sol	91
3.2.3	Les impacts du feu sur le couvert végétal et les changements observés	96
3.2.4	Proposition d'une stratégie de gestion intégrée des feux dans et autour de la RB de Luki	98
CONCLUSION ET SUGGESTIONS		104
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		107
REFERENCES WEBOGRAPHIQUES.....		121
ANNEXES		122

SIGLES ET ABBREVIATIONS

%	: pourcent
°C	: degré Celsius
µm	: micromètre
AVHRR	: Advanced Very-High-Resolution Radiometer
CCNUCC	: Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CCT	: Centre Canadien de Télédétection
CDB	: Convention sur la diversité biologique
CLD	: Comité Local de Développement
CLP	: Comité local de pilotage
Dr	: Docteur
ERAIFT	: Ecole Régionale Post Universitaire d'Aménagement et de Gestion : Intégrés des Forêts et Territoires Tropicaux
ERTS	: Earth Resources Technology Satellite
ESA	: Agence spatiale Européenne
ETM+	: Enhanced Thematic Mapper
FIRMS	: Fire Information for Resource Management System
GAP	: Gestion des aires protégées
GES	: Gaz à effet de serre
GIEC	: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GIS	: Geographic Information System
GIZ	: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
GPS	: Global Positioning System
IB	: Indice de Brillance
INERA	: Institut national d'Etudes et Recherches Agronomiques
LP-DAAC	: Land Processes Distributed Active Archive Center
MAB	: Man and Biosphere
MCD45	: MODIS global burned area product
MECNT	: Ministère de l'Environnement Conservation de la nature et Tourisme
MEDD	: Ministère de l'Environnement et Développement Durable
mm	: millimètres
MODIS	: Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer

Msc	: Master of Science
MSS	: Multi spectral Scanner System
MVSP	: MultiVariate Statistical Package
MW	: Megawatts
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
ND	: No date
NIR	: Near InfraRed
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration
ODD	: Objectif de Développement Durable
OLI	: Operational Land Imager
OSFAC	: Observatoire Satelitaire des Forêts d'Afrique centrale
PdF	: Pixel de feu
PR	: Puissance Radiative
PSE	: Payement pour Services Environnementaux
QUAC	: Quick Atmospheric Correction
RDC	: République Démocratique du Congo
RBL	: Réserve de Biosphère de Luki
Shp	: Shapefile
SIG	: Système d'Information Géographique
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission
SPOT	: Satellite d'Observation de la Terre
TAF	: Techniques d'Aménagement Forestier
TIRS	: Thermal InfraRed Sensor
UE	: Union Européenne
UICN	: Union mondiale pour la nature
UNCCD	: Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification
UNESCO	: Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture
UPGMA	: Unweighted Pair Group Methode with Arithmetic Mean)
USGS	: United States Geological Survey
UTM	: Universal Transverse Mercator
WGS	: World Geodesic System
WWF	: World Wide Found

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 0.1 : Cadre systémique de l'approche d'analyse utilisée</i>	11
<i>Figure 1.1 : Signature spectrale des principales surfaces</i>	12
<i>Figure 1.2: Schéma de carrelage MODIS (Boschetti et al., 2015)</i>	16
<i>Figure 1.3: Données vectorielles sur l'emplacement des incendies et des anomalies thermiques fournies par MODIS/Aqua+Terra 1 km FIRMS V006 NRT</i>	19
<i>Figure 1.4: Couverture des sous-ensembles Geotiff</i>	20
<i>Figure 1.5: Pixels de feu actif: Réalité de terrain et information enregistrée par les satellites MODIS</i>	24
<i>Figure 1.6: Répartition saisonnière des superficies brûlées en Afrique, de novembre 1990 à octobre 1991</i>	31
<i>Figure 1.7: Causes directes et indirectes de la déforestation (Source : Gheist et al., 2002)</i> ..	40
<i>Figure 1.8: Système agricole pratiqué dans et autour de la RB de Luki</i>	41
<i>Figure 2.1: Localisation de la Réserve de Biosphère de Luki et de ses environs</i>	42
<i>Figure 2.2: Courbe Ombrothermique (2002-2018)</i>	43
<i>Figure 2.3: Cultures pratiquées dans et autour de Luki</i>	48
<i>Figure 2.4: Synthèse méthodologie (Source : Notre conception)</i>	59
<i>Figure 3.1: Répartition annuelle des feux enregistrés de 2002 à 2019</i>	60
<i>Figure 3.2: Répartition mensuelle des feux enregistrés (2002-2019)</i>	61
<i>Figure 3.3: Classification hiérarchique des Feux en fonction de leur PR</i>	64
<i>Figure 3.4: Répartition spatiale des Feux selon leur puissance radiative(PR)</i>	65
<i>Figure 3.5: Densité des feux</i>	66
<i>Figure 3.6: Répartition spatiale des feux dans la RB de Luki (2002-2019)</i>	67
<i>Figure 3.7: Carte d'occupation du sol 2002</i>	69
<i>Figure 3.8: Carte d'occupation du sol 2019</i>	70
<i>Figure 3.9: Changements d'occupation du sol (2002-2019)</i>	75
<i>Figure 3.10: Répartition des zones brûlées (2002-2019)</i>	76
<i>Figure 3.11: Cultures faisant objet du brulis saisonnier</i>	83

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1.1: Spécification technique des données MODIS</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 1.2: Bandes spectrales des images MODIS</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 1.3: Description des données des points de feux (PdF)</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 1.4: Principales caractéristiques des missions LandSat</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 2.1: Caractéristiques des images utilisées</i>	<i>50</i>
<i>Tableau 2.2: Identité et définition des unités retenues pour la classification.....</i>	<i>53</i>
<i>Tableau 3.1: Répartition journalière des feux enregistrés</i>	<i>62</i>
<i>Tableau 3.2: Puissance radiative des points des feux (MW)</i>	<i>62</i>
<i>Tableau 3.3: Regroupement des Feux selon leurs PR.....</i>	<i>63</i>
<i>Tableau 3.4: Répartition des classes d'occupation du sol</i>	<i>68</i>
<i>Tableau 3.5: Répartition des classes d'occupation du sol en 2019</i>	<i>69</i>
<i>Tableau 3.6: Matrice de confusion de la classification de l'image 2002</i>	<i>71</i>
<i>Tableau 3.7: Matrice de confusion de la classification de l'image 2019</i>	<i>72</i>
<i>Tableau 3.8: Evolution spatiale des différentes unités d'occupation du sol de 2002 à 2019..</i>	<i>73</i>
<i>Tableau 3.9: Matrice de transition des classes entre 2002 et 2019.....</i>	<i>73</i>
<i>Tableau 3.10: Superficies brûlées par type d'occupation du sol</i>	<i>77</i>
<i>Tableau 3.11: Corrélation entre les zones brûlées et les gains dans l'occupation du sol</i>	<i>78</i>
<i>Tableau 3.12: Corrélation entre les zones brûlées et les pertes dans l'occupation du sol</i>	<i>79</i>
<i>Tableau 3.13: Caractérisation du système d'exploitation</i>	<i>80</i>
<i>Tableau 3.14: Caractérisation des feux d'usage agricole</i>	<i>81</i>
<i>Tableau 3.15: Mode gestion des feux d'usage agricole</i>	<i>83</i>
<i>Tableau 3.16: Caractérisation et mode de gestion des feux de savanes</i>	<i>85</i>
<i>Tableau 3.17: Impacts positifs des feux</i>	<i>86</i>
<i>Tableau 3.18: Impacts négatifs des feux</i>	<i>87</i>

LISTE DES ANNEXES

<i>Annexe 1: Diagrammes ombrothermiques des années 2002-2018</i>	123
<i>Annexe 2: Images Google Earth des classes d'occupation du sol</i>	126
<i>Annexe 3 : Questionnaire d'enquête sur le suivi du feu de brousse dans et autour la RB de Luki (Kongo Central)</i>	127
<i>Annexe 4: Quelques images de terrain</i>	131
<i>Annexe 5 : Caractérisation de l'échantillon d'étude</i>	133
<i>Annexe 6 : Répartition annuelle et mensuelle des feux</i>	135
<i>Annexe 7: Corrélation T° et Nombre de feux</i>	135
<i>Annexe 8: Corrélation entre les précipitations et le Nombre de Feux.....</i>	135
<i>Annexe 9 : Attestation de recherche</i>	136

RESUME

La présente étude a été réalisée dans le but de contribuer à la compréhension de la problématique de suivi des feux et de l'évolution du couvert forestier de 2002 à 2019 dans et autour de la RB de Luki. Pour atteindre les objectifs fixés, les points chauds ainsi que les zones brûlées extraits des images MODIS ont été utilisés pour le suivi des feux, les images Landsat 2002 et 2019 pour l'étude de la dynamique paysagère ainsi que les résultats des entretiens avec les communautés pour l'interprétation et la validation des résultats de télédétection. Les résultats obtenus ont montré que la problématique des feux est réelle dans et autour de Luki. Un total de 4477 feux d'une puissance radiative moyenne de $23,5 \pm 23,3$ MW ont été enregistrés. Environ 42,7% de la superficie étudiée a connu des feux et la dynamique paysagère a été plus marquée par la conversion des forêts primaires et savanes en forêt secondaire. La classe des savanes a été la plus affectée par les feux mais a été la moins vulnérable aux feux. Les feux sont à l'origine de 31,1% des pertes forestières et 43,9% de la superficie a connu des gains malgré le passage du feu. Les proportions dues aux autres causes sont respectivement de 68,9% et 56,1%. Les feux utilisés à Luki ont 2 buts : la mise à feu annuelle des savanes et brulis pour les travaux agricoles. La stratégie de gestion intégrée des feux proposée permettra d'atténuer les effets de ceux-ci sur l'environnement.

Mots clés : *Feu de Brousse, Télédétection, MODIS, LANDSAT, Couvert forestier, Stratégie de gestion intégrée, Réserve de Biosphère de Luki*

ABSTRACT

This study was carried out with the aim of contributing to the understanding of the problem of monitoring fires and the evolution of forest cover from 2002 to 2019 in and around the Luki RB. To achieve the objectives set, the hot spots and burned areas extracted from the MODIS images were used for fire monitoring, the Landsat 2002 and 2019 images for landscape dynamics studies and the results of community interviews for the interpretation and validation of remote sensing results. The results obtained showed that the problem of fires is real in and around Luki. A total of 4477 fire points with an average radiative power of 23.5 ± 23.3 MW were recorded. Approximately 42.7% of the studied area was affected by fires and the landscape dynamics was more marked by the conversion of primary and savannah forests into secondary forests. The savannah class was the most affected by fires but was the least vulnerable to fires. Fires are at the origin of 31.1% of forest losses and 43.9% of the area has seen gains despite the passage of fire. The proportions due to other causes are 68.9% and 56.1% respectively. The fires used in Luki have 2 purposes: the annual burning of savannas and slash burn agriculture. The proposed integrated fire management strategy will help to reduce the environmental impacts of fires.

Keywords: *Bushfire, Remote Sensing, MODIS, LANDSAT, Forest Cover, Integrated Management Strategy, Luki Biosphere Reserve*

INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

La dégradation des forêts et des terres est un grave problème, en particulier dans les pays en développement. En 2000, la superficie totale de forêts et de terres boisées dégradées dans 77 pays tropicaux était estimée à environ 800 millions d'hectares, dont quelques 500 millions de forêts primaires et secondaires (OIBT, 2002). Cette dégradation est liée à la conjugaison des impacts de la variabilité climatique, de l'accroissement de la population mondiale et des changements des habitudes sociales (Pain-Orcet *et al.*, 1998). Chacun de ces facteurs a des répercussions sur les exigences en matière d'utilisation des terres ayant à son tour des répercussions sur le couvert végétal naturel, la biodiversité, les écosystèmes, la stabilité socioéconomique ainsi que la sécurité alimentaire (Foley *et al.*, 2005). Dans les pays tropicaux il y'a eu une perte nette de la superficie forestière de 7 millions d'hectares par an entre 2000 et 2010 et un gain net de superficie des terres agricoles de 6 millions d'hectares par an pendant la même période (FAO, 2010 ; FAO, 2016). L'agriculture se présente ainsi comme le premier moteur de déforestation qu'elle soit industrielle comme c'est le cas en Amérique latine ou à petite échelle comme c'est le cas en Afrique où elle contribue à environ 33% à la déforestation (Simula, 2009 ; FAO, 2016).

La RDC est placée parmi les 10 pays qui perdent chaque année la surface boisée la plus importante (De Wasseige *et al.*, 2009 ; BM, 2012 ; De Wasseige *et al.*, 2012). Elle a un taux de déforestation le plus élevé du bassin du Congo évalué à 0,3% en moyenne soit 500,000 ha et cette déforestation est principalement associé au système d'agriculture itinérante, aux feux de forêt ainsi qu'à l'abattage industriel des arbres (Mastaki, 2005; Duveiller *et al.*, 2008; MECNT, 2012; FRA, 2015; FAO, 2016). Etant la première forme d'agriculture du pays, l'agriculture itinérante sur brulis est le principal moteur de la déforestation actuelle et future en RD Congo (Duveiller *et al.*, 2008 ; Ickowitz *et al.*, 2015) étant donné son évolution proportionnelle à l'évolution de la démographie accélérant ainsi le rythme des rotations agricoles (Ramade, 1984 ; Tchatchou *et al.*, 2015). Etant la 3^{ème} province la plus touchée par la croissance démographique en RD Congo, la province du Kongo central, n'échappe pas cette réalité à laquelle le pays est soumis. L'agriculture itinérante sur brulis soutenue par la forte croissance démographique demeure la cause directe de déforestation et de dégradation des forêts la plus importante dans cette partie du pays. Elle est suivie de l'agriculture industrielle et de l'exploitation artisanale du bois (MECNT, 2009, Rageade, 2014). Bamba et

al. (2008) affirment que dans la province du Kongo central la grande partie de la forêt en 1960 était transformée en jachère et en champs en 2005. En effet, cette pratique donne lieu à la création de petites clairières isolées dans les forêts intactes, conduisant à la fragmentation de l'habitat (Molinario et *al.*, 2015).

En effet, depuis les temps anciens, le feu a été utilisé dans les écosystèmes tropicaux comme outil de gestion des terres en agriculture et en aménagement des terroirs (Eva et *al.*, 2003 ; Kamau et Medley, 2014). C'est l'une des forces naturelles qui a influencé les communautés végétales au fil des siècles et, comme processus naturel, il exerce une importante fonction dans le maintien du fonctionnement de certains écosystèmes (Tillman et *al.*, 2000 ; Dennis et *al.*, 2001 ; Mayaux et *al.*, 2003 ; FAO, 2006). Le feu est un élément fondamental dans le fonctionnement de nombreux écosystèmes forestiers et joue un rôle important sur la productivité des biotopes. Dans leurs études Eva et *al.* (2003) et Poilecot et Loua (2009) rapportent que la plus grande partie de milieux africains a été façonnée et entretenue par la récurrence des feux et que la dynamique de la végétation ligneuse est en grande partie tributaire des feux (Achard et *al.*, 2002 ; Eva et *al.*, 2003 ; Inoussa et *al.*, 2014).

L'Afrique est souvent considérée comme le « continent de feu » en raison de la grande fréquence des feux de végétation qui l'affectent sur de grandes superficies (Kana et Etouna, 2006). Elle a une moyenne de plus de 28.000 feux par an la classant ainsi comme le continent le plus actif en matière de feu. La RD Congo figure parmi les 9 pays africains avec une fréquence de feux élevée, avec une moyenne de 2824 feux sur 5 années et une densité de 12 feux sur 1000 Km² (Eva et *al.*, 2003).

1.2 PROBLEMATIQUE

Bien que les feux de végétation jouent un rôle important dans l'équilibre des écosystèmes surtout en milieux savaniques (Mayaux et *al.*, 2003), ils sont figurés parmi les facteurs principaux de transformation et de dégradation du milieu naturel surtout dans les forêts dense s'ils sont répétés (Goldammer, 1990). L'impact d'un feu de savane, pour lequel l'essentiel du carbone sera réassimilé l'année suivante, est très différent de celui d'un feu de forêt humide qui nécessite au moins 50 ans ou plus pour se régénérer (Eva et *al.*, 2003). En effet, mal maîtrisé, le feu a un impact négatif sur le couvert végétal et sur l'équilibre et la production durable des écosystèmes (Devineau et *al.*, 2010 ; Kanvaly et *al.*, 2011).

Le feu de végétation peut avoir des multiples impacts à différents niveaux de l'environnement. Nombreuses études ont montrées que les feux de végétation sont une source considérable des traces de gaz (CO, CH₄, NMHC et NOX) et des aérosols qui affectent l'atmosphère globale en agissant comme GES (Crutzen et Andreae, 1990 ; Frost, ND; FAO, 2006). Ils provoquent plusieurs conséquences dont le réchauffement climatique par l'émission des gaz lors des brûlis (Mbow, 2009), des pertes en vies humaines, la désertification et la destruction des ressources naturelles (FAO, 2009 ; Sarr et *al.*, 2015). Au cours des 25 dernières années, la recherche a permis de mieux reconnaître le rôle important que joue la combustion de la biomasse dans le processus du cycle mondial de carbone et la production des traces de gaz et les émissions d'aérosols (Giglio et *al.*, 2006). On évalue actuellement la quantité de biomasse brûlée chaque année à 6230-8700 Tg₂₂ ms an⁻¹, dont environ 87 pour cent sous les tropiques. Sur ces derniers, près de la moitié (49 %) est attribuée aux feux de savanes, comprenant à la fois les incendies et les feux liés à l'utilisation des terres. Le reste correspond à la combustion du bois de feu, des résidus agricoles et des abattis de déforestation, en proportions à peu près égales (Andreae, 1991). Actuellement les impacts des incendies en Afrique représentent 25 à 35% des émissions annuelles totales de gaz à effet de serre dans l'atmosphère¹. L'échelle de ces impacts souligne l'importance des problèmes liés au brûlage incontrôlé (Frost, ND).

Les impacts des feux peuvent aller jusqu'à la disparition progressive du couvert végétal, la baisse de la fertilité des sols, le déficit du fourrage pour le bétail, l'accroissement du risque d'érosion, l'augmentation de la concentration du CO₂ dans la basse couche de l'atmosphère ainsi que la perte inestimable de la biodiversité tant animale que végétale (Schmitz et *al.*, 1996 ; Otsuka, 2003 ; Poilecot et Loua, 2009 ; FAO, 2009). Le feu est également considéré comme l'un des facteurs majeurs de changement de couverture du sol (Guerra et *al.*, 1998).

En RD Congo comme dans la plupart des pays subsahariens, la quasi-totalité des feux de brousse est d'origine anthropique (volontaire ou accidentelle). Ils sont dus aux activités domestiques telles que l'ouverture des champs pour l'agriculture, la récolte du miel, le débroussaillage, l'élevage et la chasse (FAO, 2010). Bien que les causes naturelles soient réelles (foudre, chute des pierres provoquant des étincelles), elles ne peuvent être à l'origine de feux parcourant annuellement de grandes superficies (Tanguy et *al.*, 1995 ; Otsuka, 2003, Poilecot et Loua, 2009).

¹ https://www.rtb.be/info/societe/detail_il-y-a-plus-d-incendies-en-ce-moment-en-afrique-subsaaharienne-qu-en-amazone?id=10298349 consulté le 06/11/2019

La croissance de la population est associée au taux croissant de conversion des milieux naturels en systèmes pastoraux et agricoles, au développement des zones résidentielles, des infrastructures et des réseaux de circulation (FAO, 2006). Du point de vue démographique, la RD Congo en connaît une forte croissance. En effet, la population est passée de 49 millions d'habitants en 2002 à près de 95 millions en 2019 (FAO, 2019) avec un taux de croissance estimé à environ 3.3% par an au cours de la même période (BM, 2019). Dans la province du Kongo central en particulier, la densité de sa population est passée de 52 habitants/km² en 2001 (Tshibangu, 2001) à environ 90 habitants au km² en 2015 (Ministère plan, 2015). Cette augmentation se traduit d'une part par une extension des terres cultivables et d'autres part par une extension des surfaces urbanisées et par conséquent, une accentuation de la dégradation de la végétation naturelle (MECNT, 2009 ; Iyongo, 2013). D'autres part, le taux de pauvreté, même s'il est légèrement inférieur à la moyenne nationale (71,3%), y est très élevé (69,8%). Ce taux de pauvreté élevé entraîne l'utilisation des techniques non appropriées ainsi qu'une utilisation inappropriée des ressources qui amplifient la dégradation par leur impact direct sur l'utilisation des terres et la configuration du paysage (Bamba et *al.*, 2008). Les processus naturels de succession des végétations sont alors perturbés par l'activité anthropique à travers l'exploitation du bois d'œuvre et les diverses techniques culturelles, principalement l'agriculture itinérante sur brulis (Vink, 1983). La forte croissance démographique couplée à la forte incidence de pauvreté, estimée à environ 57% pour la province du Kongo central (Ministère plan, 2015), pousse la population sans autre moyens de substance, à se tourner principalement vers les ressources naturelles pour la satisfaction des besoins en produits vivriers de première nécessité et en énergie domestique (Gaga, 1997 ; Lubalega et *al.* 2018). En effet, la situation de l'Afrique centrale en général et celle du Kongo central en particulier, est essentiellement marquée par l'absence de développement agricole, selon Lescuyer (2019) : «Aujourd'hui, les agriculteurs africains n'ont pas d'autres choix. Ils ne peuvent pas aller vers un autre modèle et passer sur un système intensif de l'exploitation. Ils n'ont pas accès aux fertilisants ou à du matériel développé. Beaucoup n'ont pas non plus accès à un savoir technique. Ils continuent à pratiquer l'agriculture itinérante sur brulis au détriment des écosystèmes naturels »².

Couvrant une superficie de 16,6%, la forêt du Kongo Central constitue la relique de la forêt de Mayombe de la partie congolaise, unique en son genre et en grande partie concentrée dans et

² https://www.lepoint.fr/afrique/afrique-subsaharienne-pourquoi-la-foret-brule-27-08-2019-2331995_3826.php
consulté le 28 Août 2019

autour de la RB de Luki (WWF-RDC, 2011 ; Nsenga, 2004). Cette forêt a été soumise à des décennies de dégradation sévère et d'utilisation abusive de ses ressources naturelles (Tamar, 2012). Une bonne partie de la RB de Luki est déjà dépourvue de grands mammifères, et de nombreuses zones forestières dégradées de manière significative (WWF, 2011, Gaga, 1997). Cette dégradation est le résultat de l'exploitation anarchique qui affecte le bois, la construction, le bois de chauffe et le charbon, ainsi que l'aménagement des zones pour l'exploitation agricole des ménages. L'impact de l'abattage des déchets et de la pratique de la culture sur brûlis est particulièrement alarmant, avec de nouvelles parcelles défrichées chaque année. Le drame est que cette pratique s'opère de plus en plus en pleine zone forestière (Tamar, 2012).

La Réserve de Biosphère de Luki est comptée parmi les aires protégées de la République Démocratique du Congo les plus soumises aux pressions anthropiques menaçant son intégrité (Pendje et Mbaya, 1992). Cela est dû à sa localisation géographique. En effet, elle est située au carrefour de deux grandes routes Matadi-Boma et Boma –Tshela et à proximité avec la mégapole ville de Kinshasa (Pendje et Mbaya, 1992 ; Nsenga, 2001; Bernard et Gélinas, 2014). Avec un taux d'accroissement démographique le plus élevé du pays, la population de la ville de Kinshasa et de ses environs représentent une menace sur la réserve de Biosphère de Luki qui est soumise à une recrudescence de déforestation et de dégradation (Misser, 2013).

Le maintien des taux actuels de croissance démographique occasionnerait un doublement de la population d'ici 25 à 30 ans. Population qui continuerait à présenter un niveau de pauvreté et de sous-développement élevé, ayant pour seuls moyens de survie l'agriculture vivrière et l'utilisation des produits offerts par la forêt. Le maintien du couvert forestier est donc le défi majeur des décennies à venir (FAO, 2009 ; De Wasseige et *al.*, 2009).

La compréhension du fonctionnement des aires protégées et l'optimisation de leur rôle exige une prise en compte de l'insertion de ces territoires voulus par les hommes au milieu des paysages déjà anthropisés. Une telle approche spatialisée peut aujourd'hui s'appuyer sur les outils d'observation de la terre et les systèmes d'information géographique (Eva *et al.*, 2003). Depuis plus d'une trentaine d'années, la télédétection spatiale a été appliquée à l'étude des écosystèmes africains dans divers domaines : suivi de la végétation, détection des feux, mesure de la dégradation forestière (Achard et *al.*, 2002). L'utilisation des données fournies par la télédétection permet de mettre en évidence la dynamique de l'occupation du sol dans des zones difficilement accessibles telles que les forêts denses tropicales (Chatelain, 1996 ;

Oszwald et *al.*, 2007). Elles permettent également de suivre la végétation sur de grandes surfaces et plusieurs fois sur la saison (Fourty et Baret, 1998). Les images de télédétection, combinées à d'autres données thématiques conventionnelles, peuvent renseigner sur la dynamique spatio-temporelle des événements de feu et de la végétation à l'échelle nationale et même locale (Mbow et *al.*, 2000 ; Eva et *al.*, 2003). Intégrées dans les systèmes d'information géographique, ces images permettent l'identification des stratégies appropriées pour mieux gérer l'état de l'utilisation des terres (Kpedenou et *al.*, 2017) ainsi que le développement des outils de prise de décision par les gestionnaires d'aires protégées (Eva et *al.*, 2003).

1.3 CHOIX ET INTERET DU SUJET

La réduction de la déforestation a attiré l'attention des gouvernants cette dernière décennie étant donné l'importance de cette problématique tant au niveau mondial, régional que local (Casey et *al.*, 2014). Pour y parvenir, des politiques et stratégies de gestion forestière conséquentes doivent être mises en place. Il est cependant remarqué que le manque d'informations précises et actualisées sur l'état et l'évolution du couvert forestier et les facteurs concourant à la dégradation en Afrique centrale constitue un obstacle majeur à l'élaboration des politiques de gestion forestière efficace dans la région (Ernst, 2010). La cartographie des surfaces brûlées ou traces de feux est un maillon essentiel dans la gestion des incendies de forêts. Son importance réside surtout dans l'inventaire des dégâts. Ce qui facilite la mise en place d'un programme de réhabilitation des zones touchées par les feux.

Etant un facteur postérieur aux pratiques agricoles et à la gestion des savanes, le feu de brousse a un rôle important à jouer dans la dégradation du couvert forestier. En effet, à la recherche des nouvelles terres, des espaces de forêt sont rongés chaque année pour y pratiquer l'agriculture de type itinérant sur brûlis, premier moteur de déforestation. Il est donc important d'étudier, les origines des feux, leur distribution spatio-temporelle et leurs fréquences afin d'optimiser les avantages découlant de cette pratique et d'orienter les stratégies pour leur gestion dans les aires protégées ainsi que leurs périphéries et plus particulièrement pour le cas de la réserve de Biosphère de Luki, dernière relique de la forêt de Mayumbe en RD du Congo qui nécessite une attention plus particulière.

La gestion des feux dans les aires protégées et leurs périphéries est un des outils de gestion et de protection des terres (Grégoire et *al.*, 2003). Elle requiert une attention particulière étant donné que les feux, qu'ils soient planifiés ou non, ont un impact considérable sur la faune sauvage et la végétation des espaces protégés. Il y a dès maintenant un besoin d'informations

précises et rapides sur l'activité des feux afin de garantir une gestion optimale des aires protégées et leurs périphéries (Eva *et al.*, 2003). Vue l'étendue de la RB de Luki et les difficultés de communication, la télédétection spatiale est probablement le meilleur outil pour faire l'inventaire régulier des événements de feu (emplacement, date, heure), contribuant ainsi à leur gestion journalière. Un accent particulier sera également mis sur l'évaluation des pertes que subit la forêt due notamment aux feux et à d'autres facteurs de dégradation.

Plusieurs études ont été documentées sur la gestion des feux et le suivi du couvert forestier par utilisation de la télédétection à la fois au niveau régional : Frost(ND) en Afrique Australe, Eva *et al.*, 2003 en Afrique Subsaharienne ainsi que dans certains pays Africains tels qu'au Burundi (Niyongabo et Mbarushimana, 2019), en Côte d'Ivoire (Kouakou *et al.*, 2013), au Sénégal (Sarr *et al.*, 2015), au Burkina Faso (Caillaut *et al.*, 2010), Au Togo (Afelu *et al.*, 2016), dans le parc W (Eva *et al.*, 2003).

Pour ce qui est du suivi des feux en RD Congo, une seule étude a été menée jusqu'à présent par Lutete et ses collaborateurs (2016). Elle a porté sur l'étude d'impacts des feux de brousse sur la biodiversité dans cinq aires protégées localisées dans les savanes soudanaises et zambéziennes de la RD Congo. La thématique de la dynamique du couvert forestier a été abordée par plusieurs auteurs en RD Congo tel que Bamba et ses collaborateurs (2008) dans la province du Kongo central, Musumba *et al.* (2019) dans la province du Nord Kivu, Kabonyi (2011) dans le parc National de Kahuzi Biega et bien d'autres.

En complément à ces travaux réalisés par différents auteurs et organisations, notre étude qui porte sur « le suivi des feux et du couvert forestier dans et autour de la Luki » aborde le problème par une méthodologie différente de celle des auteurs ci-haut cités. Il se propose comme approche d'évaluer la part des feux dans les changements de couvert forestier observés à Luki et ses environs ainsi que le comportement des différents types d'écosystèmes soumis au passage du feu. En complément de ces analyses une stratégie de gestion intégrée des feux a été proposée. Dans notre zone d'étude une telle étude n'a pas encore été conduite et c'est là que s'insère l'intérêt et l'originalité de cette étude.

Les mécanismes de gestion des feux mis en place par les communautés locales ont été également pris en compte dans le cadre de cette recherche afin de bien cerner, de manière plus globale et intégrée la problématique autour des feux, leurs impacts ainsi que leurs modes de gestion par les communautés.

1.4 QUESTIONS DE RECHERCHE

De ce qui précède, la question principale que sous-tend cette étude est : la télédétection permet-elle de réaliser un suivi des feux et du couvert forestier dans et autour de la RB de Luki ?

De manière spécifique notre étude répondra aux questions subsidiaires suivantes :

- **Q1** : Quelles ont été les caractéristiques des feux dans et autour de la RBL de 2002 à Mi-2019 ?
- **Q2** : La couverture forestière de la RBL a-t-elle subi des changements pendant la période de 2002 à 2019 ?
- **Q3** : Quels sont les impacts des feux sur le couvert forestier de la RBL et ses périphéries ?
- **Q4** : Quelles sont les origines des feux et quels sont les modes d'utilisation et de gestion des feux mis en place par les communautés ?
- **Q5** : La mise en place d'une stratégie de gestion des feux à Luki et ses environs est-elle pertinente ?

1.5 OBJECTIFS

Considérant que parmi les objectifs de la science se trouve celui de décrire, comprendre expliquer et interpréter le changement ; cette étude vise globalement à contribuer, par l'utilisation de la télédétection, à la gestion des ressources de la RB de Luki et ses environs à travers l'étude de la dynamique des feux de brousse et du couvert forestier dans et autour de la Réserve de Biosphère de Luki.

De façon spécifique, il sera question de :

- **OS1** : Déterminer les caractéristiques spatio-temporelles ainsi que l'ampleur des feux qui ont eu lieu à Luki et ses environs de 2002 à Mi-2019 ;
- **OS2** : Analyser le changement d'occupation des sols de la RB de Luki et ses périphéries entre 2002-2019 ;
- **OS3** : Déterminer les impacts des feux sur le couvert forestier de la RBL et ses environs ;
- **OS4** : Déterminer les origines et modes d'utilisation et de gestion des feux mis en place par les communautés ;

- **OS5** : Proposer un plan de gestion des feux dans et autour de la RBL.

1.6 HYPOTHESES

Ce travail se basera sur le postulat principal selon lequel l'utilisation de la télédétection est un moyen efficace de suivi des feux et du couvert forestier dans et autour de la RB de Luki. En effet, l'utilisation des données fournies par la télédétection permet de mettre en évidence la dynamique de l'occupation du sol et des phénomènes qui ont lieu sur la surface de la terre dans des zones difficilement accessibles telles que les forêts denses tropicales (Chatelain, 1996 ; Oszwald et *al.*, 2007).

De cette hypothèse découlent des hypothèses spécifiques suivantes :

- **H1** : la problématique des feux est réelle dans la RBL et ses périphéries durant la période de 2002-2019 ;
- **H2** : la couverture forestière de la RBL a subi des régressions pendant la période d'étude (2002-2019) ;
- **H3** : le feu de brousse constitue un des facteurs importants de dégradation de la forêt dans et autour de la RB de Luki ;
- **H4** : Les feux ont comme origine la mise à feu des savanes pour des raisons de chasse ainsi que l'agriculture itinérante sur brulis et les modes de gestion et d'utilisation varient selon le type de feux.
- **H5** : Une stratégie de gestion intégrée des feux dans et autour de la Réserve de Biosphère de Luki permettra de réduire les impacts négatifs de ces derniers.

1.7 PERTINENCE AVEC L'APPROCHE SYSTEMIQUE

La complexité des problèmes de gestion de la biosphère, d'aménagement intégré du territoire et de développement ne peuvent plus se satisfaire de l'approche sectorielle habituelle, largement responsable de la situation qui prévaut actuellement. L'alternative à privilégier est l'approche globale, intégrée et interdisciplinaire, ou, en la qualifiant de façon plus précise et rigoureuse, *l'approche (ou la stratégie) systémique* (Mankoto et Maldague, 2005). Il faut alors éviter les formes d'évaluation formelle en se basant sur une série d'hypothèses plus explicites que l'approche unilatérale traditionnellement admise (Maldague, 2003). Considérant l'ancrage de multiples secteurs sur le couvert forestier, la régulation de l'exploitation, et la diminution de la dégradation et de la destruction du couvert forestier nécessite une approche interinstitutionnelle. C'est ainsi que maximiser le potentiel des ressources naturelles en RDC

ne sera pas une voie unidirectionnelle. Une multitude de dimensions doit être prise en considération, pour garantir leurs contributions à la croissance, à l'emploi, tout en respectant le patrimoine environnemental et les conditions de vie des populations. Les meilleurs résultats ne pourront être atteints qu'en utilisant une approche intégrée qui permettrait une meilleure connaissance de la dynamique environnementale et une bonne maîtrise des paramètres indispensables à la prévention, à l'atténuation et à la lutte contre les menaces qui pèsent sur l'environnement.

Notre étude s'est déroulée dans un système constitué de la RB de Luki et sa périphérie et a pris en compte les différents acteurs agissant sur le système. Ceux-ci incluent les institutions et organisation présentes sur le site ainsi que populations vivant dans le milieu (Figure 0.1). Toutes les interactions entre les différents acteurs et le milieu doivent être considérées afin de bien cerner le problème de la forestière et proposer des mesures de gestion et d'atténuation efficaces. Cela a été le fil conducteur dans l'élaboration de la stratégie de gestion intégrée des feux à Luki et ses environs.

En effet, la pression accrue sur les ressources de la réserve de biosphère de Luki et de ses environs résulte de multiples causes dont l'évolution démographique, les progrès technologiques, l'augmentation des besoins et de carences au plan de la gestion et de l'aménagement intégrés. Ces causes sont à l'origine de multiples dégradations et atteintes à l'environnement (Nsenga, 2001). La problématique de la gestion des feux étant complexe, la politique suivie s'est reposée sur une approche globale et intégrée afin de décrire le système dans son ensemble en considérant ses différentes composantes en interaction. Cela permettra d'établir un juste équilibre et une attention appropriée pour mener à bien les différentes activités telles que la prévention des feux, l'alerte précoce, le monitoring et l'évaluation, la préparation adéquate et l'élimination des incendies ainsi que la réhabilitation des zones sinistrées (FAO, 2006).

Il est impossible de formuler et de mettre en œuvre correctement une politique d'utilisation du feu sans tenir compte des autres politiques touchant aux modes d'utilisation des terres et de leurs ressources. Pour être efficace, ces politiques doivent être élaborées conjointement avec les politiques plus générales portant sur l'utilisation des terres dans les secteurs agricole et forestier, et y être intégrées, afin d'éviter que les gains obtenus dans un secteur soient annulés par des événements contradictoires apparaissant dans les autres secteurs.

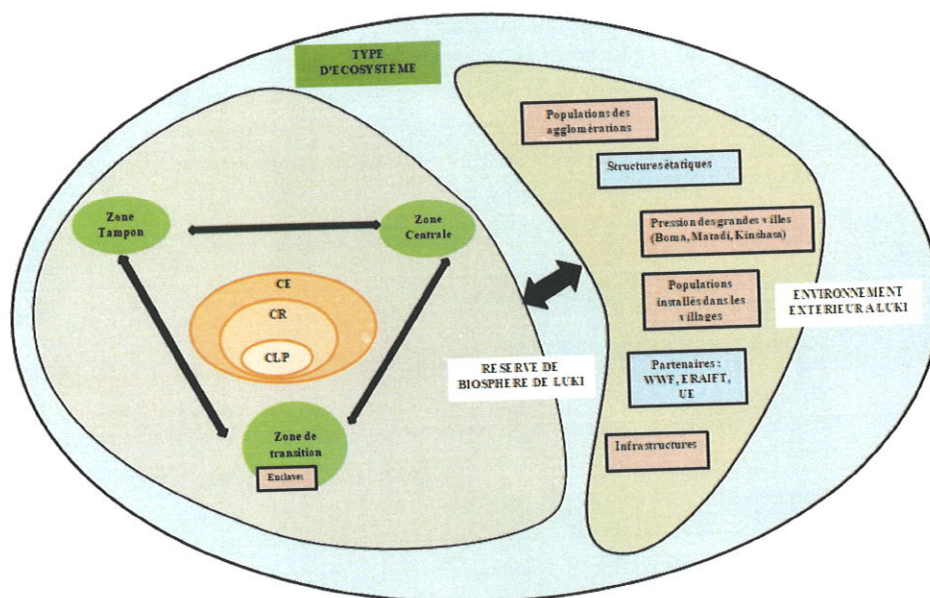


Figure 0.1 : Modélisation de l'approche systémique
(Source : Notre conception)

Légende

- ↔ Interactions entre les différents éléments constitutifs du système
 - Luki en tant que système selon l'approche MAB (constitué de 3 zones)
 - Environnement interagissant avec la RBL
 - Milieu physique support du système
- Acteurs impliqués dans la gestion de la RBL
- CLP (Comité local de pilotage) :** Président : INERA, Vice-Président : MAB(MEDD); ERAIFT, ONGDs, Représentants des
- CR (Comité restreint) :** INERA, MAB(MAB), Représentants des Communautés Locales
- CE (Comité Elargi) :** Comité restreint, chefs de 4 enclaves, chefs des agglomérations

1.8 SUBDIVISION DU TRAVAIL

Outre l'introduction générale et la conclusion, le présent travail comprend est subdivisé en trois chapitres. Le premier chapitre, décrit les généralités l'utilisation de la télédétection pour le suivi des feux et du couvert forestier dans et autour de la RB de Luki, le deuxième circonscrit la méthodologie utilisée pour réaliser ce suivi et le troisième présente les résultats obtenus.

CHAPITRE 1. APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 CARACTERISTIQUES DES IMAGES SATELLITAIRES

1.1.1 Les principales caractéristiques des images satellitaires

Pour différencier les différentes images ou produits, on utilise leurs caractéristiques principales parmi lesquelles :

- **Les bandes spectrales** : les bandes spectrales correspondent aux gammes de longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique utilisées pour véhiculer l'information de la surface observée vers le capteur. Cette information concerne les propriétés de réflexion et/ou d'émission des surfaces observées. En pratique, on connaît ces propriétés pour les grandes classes d'occupation du sol : la végétation, les sols nus, l'eau, etc. On parle alors de « signature spectrale » (Figure 1.1) comme l'ensemble des propriétés dans les différentes gammes de longueurs d'onde. Bien choisir les images satellite pour un problème donné implique avant tout de bien choisir les bandes spectrales capables de discriminer les types de surfaces de la zone d'étude en fonction de leurs signatures spectrales (Begue *et al.*, 2016).

Le nombre de bandes spectrales détermine la résolution spectrale d'une image. Celle-ci représente l'aptitude d'un capteur à employer de petites fenêtres de longueurs d'onde (Lee *et al.*, 1990). Les fenêtres des différents canaux du capteur deviennent étroites à mesure que la résolution spectrale est fine (Bonn et Rochon, 1992)

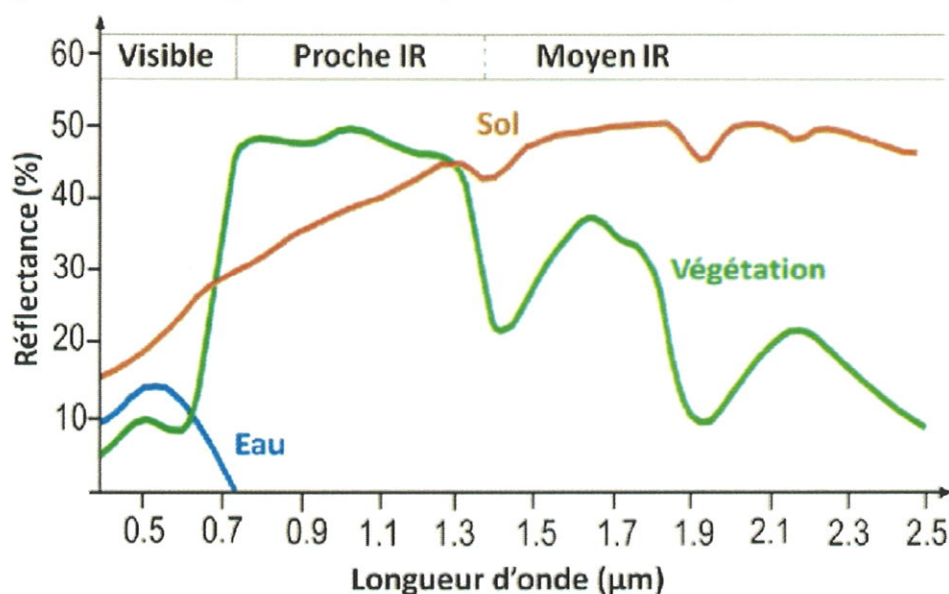


Figure 1.1 : Signature spectrale des principales surfaces

- **Les résolutions spatiales :** pour déterminer la résolution spatiale en télédétection on utilise la taille d'un pixel au sol, ce qui détermine la taille des objets que l'on peut espérer différencier dans les images. Afin de distinguer un élément de la surface observée, la taille de cet élément doit être supérieure ou égale à la cellule de résolution (Lillesand et *al.*, 2008) La meilleure résolution spatiale atteinte par les satellites civils actuels est de l'ordre de 30 cm pour le satellite WorldView3. On peut donc y distinguer facilement les arbres dans les parcelles de culture, et les haies autour (Begue et *al.*, 2016). Les utilisateurs emploient sans définition stricte les plages de résolutions suivantes :
 - **THRS :** La Très Haute Résolution Spatiale (métrique : pixels < 5 m) ;
 - **HRS :** La Haute Résolution Spatiale (décamétrique : pixels entre 5 m et 100 m): Ex : Landsat ;
 - **La moyenne résolution spatiale** (hectométrique : pixels entre 100 m et 5 km). Ex : MODIS
 - **La basse résolution spatiale** (kilométrique : pixels > 5 km)
- **Les fréquences d'acquisition des images ou résolution temporelle :** lorsque le phénomène que l'on souhaite étudier par télédétection est variable dans le temps, on se pose la question sur la fréquence d'acquisition de ces dernières La résolution temporelle est le temps que prend un satellite pour réaliser un cycle orbital complet (Bonn et Rochon, 1992). Elle est de l'ordre de l'heure pour les satellites météorologiques géostationnaires, de quelques jours pour les satellites de moyenne à basse résolution, de quelques semaines à quelques mois pour les satellites HRS, et de quelques mois à l'année pour les satellites THRS. Certains de ces satellites sont néanmoins agiles (capacité de viser à côté de la trace), ce qui permet de programmer plusieurs acquisitions ciblées sur une période de quelques jours (Begue et *al.*, 2016).
- **La surface couverte par chaque image :** Si l'échelle spatiale des objets étudiés détermine la résolution spatiale des images, il est nécessaire de vérifier si l'étendue de la zone d'étude est compatible avec la surface couverte par les images. En règle générale, plus la résolution spatiale de l'image est grande (taille du pixel plus petite), plus faible est la surface couverte par l'image (Begue et *al.*, 2016).

Il existe plusieurs types d'images résultant de différents satellites d'observation de la terre. Ces satellites et les images produites se différencient les uns des autres par leurs résolutions,

leurs étendues, etc., et surtout leurs applications (Barima, 2009). Deux types d'images ont été exploités dans le cadre de la présente étude : il s'agit des images MODIS ou ont été extraits des points des feux et des images LANDSAT qui ont servi pour le suivi du couvert végétal.

1.1.2 Caractéristiques des images satellitaires utilisées

1.1.2.1 Images MODIS

- **Caractéristiques générales**

Le spectroradiomètre imageur à résolution moyenne (MODIS) a été installé à bord des satellites Terra et Aqua fonctionnels respectivement depuis le 24 février 2000 et depuis le 04 mai 2002 (Giglio *et al.*, 2003 ; Dauriac, 2004 ; Barducci *et al.*, 2009). Les observations sont faites chaque jour à l'équateur, vers 10h20 sur le satellite TERRA et 14h20 sur le satellite AQUA. Les données MODIS sont disponibles gratuitement (Giglio *et al.*, 2003, Müller et Suess, 2011) et téléchargeables à partir du site de la NASA.

L'instrument MODIS a une largeur de fauchée de 2 330 km et permet de voir toute la surface de la Terre tous les jours ou tous les deux jours. Ses détecteurs mesurent 36 bandes spectrales (Tableau 1.2) dont la longueur d'onde varie entre 0,405 et 14,385 μm , et il acquiert des données à trois résolutions spatiales : 250m, 500m et 1 000m. Tous les produits MODIS sont identifiés par un code alphanumérique de trois lettres et deux lettres chiffres. Les trois lettres définissent la source de données, tandis que les deux chiffres ont une identité unique le produit. (Boschetti *et al.*, 2015 ; <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>, Consulté le 23/09/2019)

Les images MODIS sont fréquemment utilisées comme source de données environnementales dans nombreuses régions du monde. Les divers produits qui sont issus de MODIS décrivent les caractéristiques terrestres, océaniques et atmosphériques. Les satellites tournent continuellement autour de la Terre et servent à étudier les processus et tendances à toutes les échelles, du local au global (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>, Consulté le 23/09/2019).

Le retraitement de l'ensemble des archives de données MODIS est effectué périodiquement afin d'incorporer un meilleur étalonnage, des raffinements d'algorithmes et des données amont améliorées dans tous les produits MODIS. Les archives de données MODIS actualisées résultant de chaque retraitement sont appelées une collection. Les collections ultérieures remplacent toutes les collections antérieures (Boschetti *et al.*, 2015, Giglio *et al.*, 2018).

Pour la Terra MODIS, la Collection 1 était constituée des premiers produits générés après le lancement. Les données de Terra MODIS ont été retraitées pour la première fois en juin 2001 pour produire la collection 3 (à noter que ce premier retraitement a été numéroté collection 3

plutôt que, comme on pouvait s'y attendre, collection 2). Collection 3 a également été la première version produite pour les produits Aqua MODIS. Le retraitement de la collecte 4 a commencé en décembre 2002 et s'est terminé en décembre 2006. Production des produits de la Collection 5, qui a débuté au milieu de 2006, se poursuivra jusqu'à ce que la Collection 6 le retraitement soit terminé. Production de la collection "Tier-1" Collection 6 produits MODIS, qui comprend les produits d'incendie actif, a commencé en février 2015 (Giglio et *al.*, 2018). Les produits **MCD 45 « MODIS Burned areas »** ont été produits pour la première fois à partir de la collection 5 des produits MODIS (Boschetti et *al.*, 2015).

Les spécifications techniques des données MODIS sont données dans le tableau 1.1 ci-dessous :

Tableau 1.1: Spécification technique des données MODIS

Altitude	705 km
Résolution au sol	250 m - 1000 m
Largeur de fauchée	2330 km
Méthode de balayage	à faisceau transversal
Délai de ré-observation	1 à 2 jours

Source : <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>

Tableau 1.2: Bandes spectrales des images MODIS

Usage principale	Bandes	Largeur de bande (µm)	Résolution spatiale au nadir
Limites Terre/nuages	1	0.620 - 0.670	250 m
	2	0.841 - 0.876	
Propriétés Terre/nuages	3	0.459 - 0.479	500 m
	4	0.545 - 0.565	
	5	1.230 - 1.250	
	6	1.628 - 1.652	
	7	2.105 - 2.155	
Couleur des océans	8	0.405 - 0.420	1000 m
Phytoplancton	9	0.438 - 0.448	
Biogéochimie	10	0.483 - 0.493	
	11	0.526 - 0.536	
	12	0.546 - 0.556	
	13	0.662 - 0.672	
	14	0.673 - 0.683	
	15	0.743 - 0.753	
	16	0.862 - 0.877	
Vapeur d'eau	17	0.890 - 0.920	

atmosphérique	18	0.931 - 0.941
	19	0.915 - 0.965
Température surface/nuages	20	3.660 - 3.840
	21	3.929 - 3.989
	22	3.929 - 3.989
	23	4.020 - 4.080
Température atmosphérique	24	4.433 - 4.598
	25	4.482 - 4.549
Nuages Cirrus	26	1.360 - 1.390
Vapeur d'eau	27	6.535 - 6.895
	28	7.175 - 7.475
	29	8.400 - 8.700
Ozone	30	9.580 - 9.880
Température surface/nuages	31	10.780 - 11.280
	32	11.770 - 12.270
Altitude du couvert nuageux	33	13.185 - 13.485
	34	13.485 - 13.785
	35	13.785 - 14.085
	36	14.085 - 14.385

Source : <http://nilerak.hatfieldgroup.com/French/NRAK/EO/html/modis.html> consulté le 21/09/2019.

Les produits MODIS de niveau 2 et plus sont définis sur une grille globale sinusoïdale de 250 m, 500 m ou 1 km où la résolution spatiale est définie par les produits individuels (niveaux 0 et 1 sont à base de granules, un simple segment non projeté de la bande orbitale MODIS). Les grilles sont divisées en carreaux à surface fixe d'environ 10 degrés x 10 degrés. Chaque tuile est une coordonnée horizontale (h) et verticale (v) allant de 0 à 35 et de 0 à 17 respectivement (Figure 1.2). La tuile dans le coin supérieur gauche est désignée par h0, v0 (Boschetti et al., 2015).

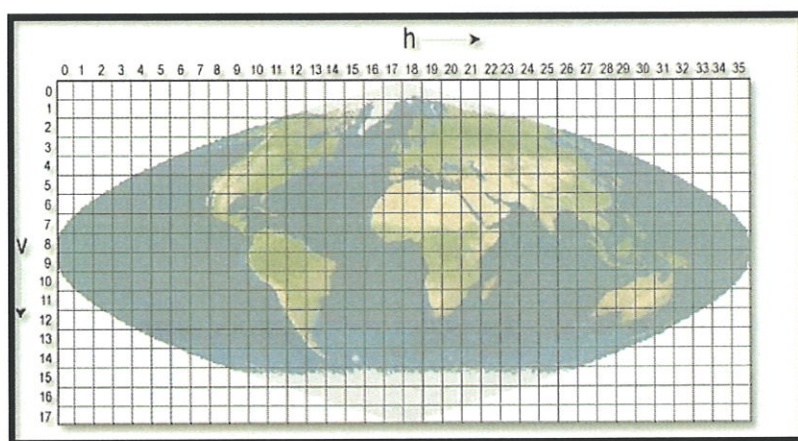


Figure 1.2: Schéma de carrelage MODIS (Boschetti et al., 2015)

• Produits des feux actifs

Il y a plusieurs produits MODIS concernant la détection de feux actifs. C'est la série de produit **MOD14** réalisée à partir des données du capteur Terra et **MYD14** à partir des données du capteur Aqua qui sont plus utilisés (Broucke, 2009). Ce sont des produits « Level 2 Fire products » (Boschetti et *al.*, 2015). Il y a trois types de produits tous ayant une résolution spatiale de 1 km :

- Un produit journalier **MOD14/MYD14** comprenant entre le masque du feu, la qualité de l'algorithme, la force de radiation du feu (FRP -Fire Radiative Power) ainsi que de nombreuses couches décrivant les attributs du pixel de feu.
- Le produit **MOD14A1/MYD14A1** comprend 8 jours de données sur le même fichier. Pour chaque jour un masque de feu est fourni, la force de radiation du feu maximal (maxFRP) est enregistrée ainsi que la qualité de l'algorithme. Le produit **MOD14A2/MYD14A2** est une synthèse sur 8 jours avec uniquement le masque de feu et la qualité de l'algorithme (Broucke, 2009, Boschetti et *al.*, 2015).

Dans cette étude nous nous sommes intéressés aux produits journaliers MOD14 et MYD14. En effet, ils proposent des données comportant suffisamment de détail sur chaque pixel de feu utiles pour les analyses de régimes de feu (Tableau 1.4). Le produit MOD14 est disponible sur la période de Février 2000 à maintenant. Le produit MYDA4A1 est disponible sur la période de Juillet 2002 à maintenant (Broucke, 2009, Boschetti et *al.*, 2015).

Tableau 1.3: Description des données des points de feux (PdF)

ID	Nom de la colonne	Unité de description
1	Id	Identifiant des points
2	LATITUDE	Latitude au centre du pixel de feu
3	LONGITUDE	Longitude au centre du pixel de feu
4	BRIGHTNESS	Luminosité
7	ACQ_DATE	Année UTC (AAAA), mois (MM) et jour (JJ)
8	ACQ_TIME	Heure UTC (HH) et minute (MM)
9	SATELLITE	Terra (T) ou Aqua (A)

10	INSTRUMENT	MODIS
11	CONFIDENCE	% Confiance de détection (plage de 0 à 100)
12	VERSION	Version de MODIS
13	BRIGHT	Lumière
14	FRP(MW)	Puissance radiative de feu en Mégawatts
15	DAYNIGHT	Moment de prise des ponts : Day (D) ou N(Nuit)

(Source : Giglio, 2003)

Le produit de niveau 2 contient plusieurs composantes dont :

- Un masque d'incendie actif qui signale les feux et autres pixels pertinents (Figure 1.3)
- Une image d'assurance de la qualité (AQ) au niveau des pixels qui comprend 19 bits d'information d'AQ pour chaque image pixel ;
- Une table des pixels de feu qui fournit 27 éléments d'information radiométrique et d'algorithme interne distincts pour chaque pixel de feu détecté à l'intérieur d'un granule ;
- De nombreuses métadonnées obligatoires et spécifiques aux produits ;
- Une couche de données liées au réseau pour simplifier la production du Climate Modeling Grid (CMG).

Les métadonnées spécifiques au produit d'incendie de niveau 2 comprennent le nombre de nuages, d'eau, de non-incendie, d'incendie, d'inconnu et d'autres pixels se produisant dans un granulat pour simplifier l'identification des éléments suivants granulés contenant de l'activité du feu (Giglio et al., 2015 ; Giglio et al., 2018).

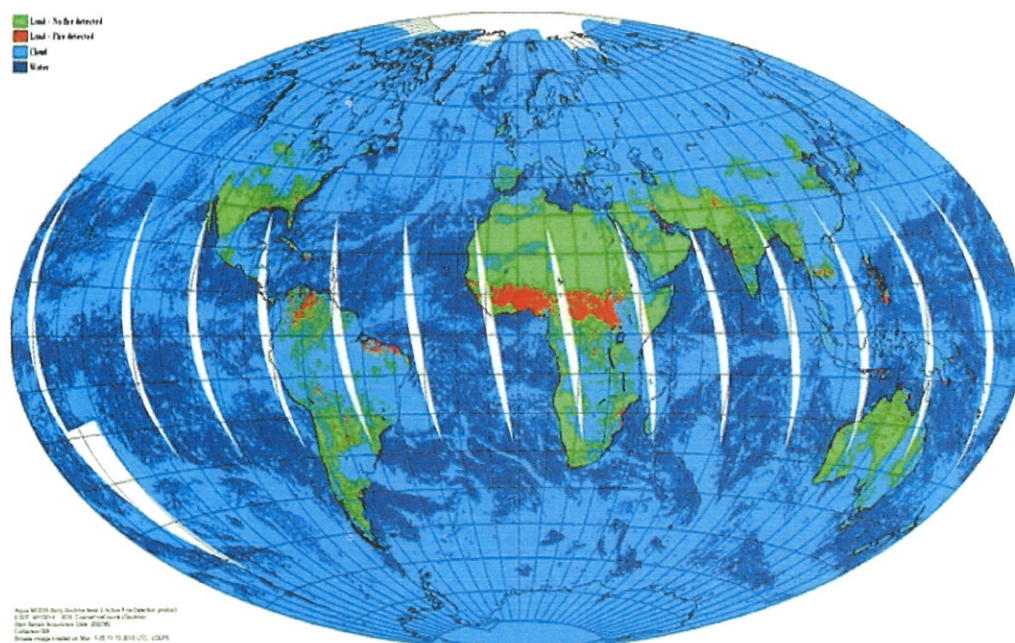


Figure 1.3: Données vectorielles sur l'emplacement des incendies et des anomalies thermiques fournies par MODIS/Aqua+Terra 1 km FIRMS V006 NRT
(Source : Giglio et al., 2018)

L'estimation de la confiance de détection par les produits de niveau 2 variant entre 0 % et 100 %, est utilisée pour attribuer l'une des trois classes d'incendie (incendie à faible confiance dont $0\% \leq C < 30\%$, dont $30\% \leq C < 80\%$ nominal et incendie à haute confiance dont $80\% \leq C \leq 100\%$) à tous les pixels du feu à l'intérieur du masque d'incendie (Giglio et al., 2018).

- **Produits des zones brûlées**

Le produit **MCD45** de MODIS fournit une détection des surfaces brûlées tous les mois avec une précision de 500m. L'algorithme développé pour ce produit utilise un modèle de réflectance bidirectionnelle (BRDF) basé sur l'approche de détection de changement ; il détecte la date approximative du feu en localisant des changements rapides dans les séries de données journalières de MODIS. L'algorithme cartographie les zones brûlées récemment et pas celle issues de feux des saisons ou d'années précédentes (Broucke, 2009). Les zones brûlées sont caractérisées par des dépôts de charbon de bois et de cendres, l'enlèvement de la végétation et la modification de la structure de la végétation (Roy et al. ; 1999).

Le produit surfaces brûlées MODIS est un produit de Niveau 3 sur une grille de 500m, produit dans le format standard tuilé de MODIS Land dans une projection sinusoïdale. Chaque tuile est localisée de manière fixe sur la surface du globe, couvrant approximativement 1200 x 1200 km. Le produit définit pour chaque pixel de 500m le jour approximatif du feu. C'est un

produit mensuel obtenu en combinant les données de réflectance de la surface du sol de MODIS Terra et Aqua à 500m.

Chaque produit contient les informations suivantes :

- Information par pixel comportant de la surface brûlée ;
- La date approximative du feu (1-366) ou 0 (pas de feu détecté) ;
- Un code indiquant si aucune décision n'a été prise pour cause de donnée manquante, mauvaise qualité ou données sous les nuages ;
- Information de qualité de la décision ;
- Des métadonnées obligatoires et spécifiques au produit Rapport sur l'évaluation du régime du feu par des moyens de télédétection et qualification des données.

Ce produit est disponible sur la période Avril 2000 à maintenant (Broucke, 2009).

Les données sont présentées en 4 sous versions : le MCD45A1 officiel au format HDF-EOS, disponible dans le cadre de la suite MODIS des produits terrestres mondiaux ; la version Geotiff mensuelle reproduite disponible à l'Université du Maryland, la version mensuelle reproduite du Shapefile disponible à l'Université du Maryland et le produit mensuel carrelé de niveau 3 : MCD45A1

La sous version shapefile a été utilisé pour la délimitation des zones brûlées. Elle est dérivée de la version mensuelle Geotiff par l'Université du Maryland. Les shapefiles sont disponibles avec la même projection (Plate-Carrée) et la même étendue géographique que les fenêtres du sous-continent Geotiff (Figure 1.4). La convention d'appellation des shapefiles est identique à la convention d'appellation Geotiff (Boschetti et al., 2015).

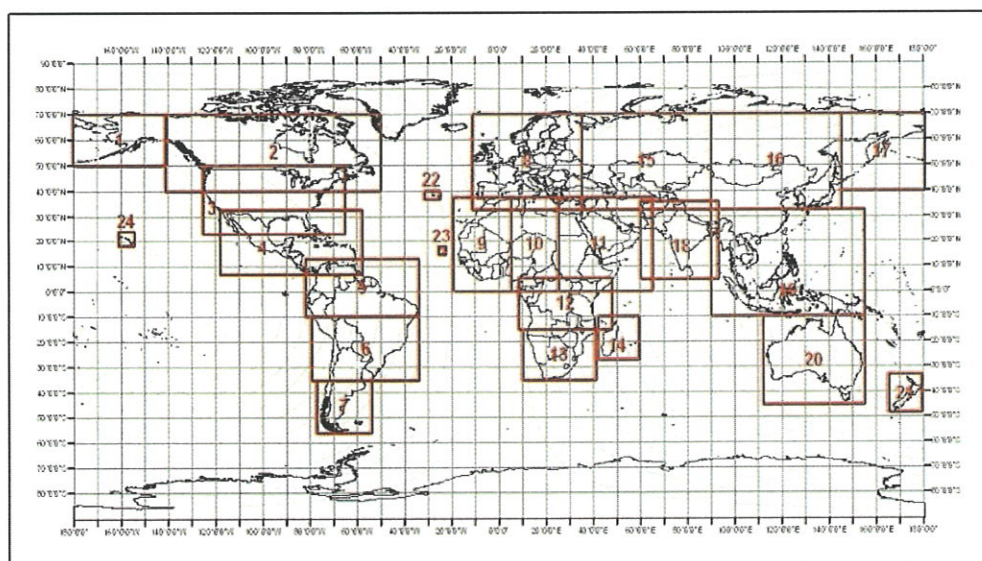


Figure 1.4: Couverture des sous-ensembles Geotiff
(Source : Boschetti et al., 2015)

1.1.2.2 Images Landsat

L'utilisation de l'imagerie satellitaire pour l'observation de la Terre remonte au début des années 70 avec le lancement par les Etats-Unis du premier satellite du programme Landsat en 1972 (Begue et *al.*, 2016). Le programme d'observation de la surface terrestre « Landsat » est le plus ancien des Etats-Unis avec notamment le capteur MSS : Multi Spectral Scanner. C'est le premier satellite d'observation de la terre civil. Connu à l'origine sous l'acronyme ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite). Landsat avait été conçu pour tester la faisabilité d'une plate-forme multispectrale d'observation de la Terre non habitée (CCT, 2009). Parmi les facteurs qui ont contribué au succès de Landsat, il faut mentionner une combinaison de capteurs avec des domaines spectraux façonnés pour l'observation de la Terre, une résolution spatiale fonctionnelle et une bonne couverture du globe. La longévité du programme a permis d'accumuler des archives de données volumineuses sur les ressources terrestres ; ce qui facilite la surveillance à long terme ainsi que le maintien des données historiques et de la recherche. Sept satellites ont été lancés dont six avec succès (le lancement de Landsat 6 ayant échoué). Ces satellites suivent une orbite quasi-polaires, définissant l'orientation de l'image en l'absence de correction géométrique, et héliosynchrone (l'enregistrement des images pour un même lieu se fait toujours à la même heure, de préférence au milieu de la matinée)³

Les données générées par les capteurs LANDSAT sont également très utilisées pour la détection des feux. Ce sont des satellites qui ont une résolution spatiale élevée (de 60m et 15m) et résolution temporelle de 16 à 18 jours. Les domaines spectraux explorés concernent le visible, l'infrarouge proche et moyen ainsi que l'infrarouge thermique⁴. Ces données offrent de bonnes possibilités pour la caractérisation des régimes de feu et leur impact sur la végétation par des moyens de télédétection. Il est malheureusement difficile d'obtenir une série temporelle avec une bonne résolution temporelle (Broucke, 2009). Les possibilités sont plutôt de l'ordre de quelques images sur l'ensemble de la période 1975 à maintenant. Pour une étude sur le régime du feu, il faudrait des images avec une régularité mensuelle au minimum. Ce type de résolution peut permettre de détecter les surfaces brûlées et faire un suivi de la végétation après un feu. Cette régularité existe pour les images LANDSAT, cependant nos recherches n'ont pas permis de trouver de données répondant à ces conditions.

³ <https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-publications/imagerie-satellitaire-photos-aer/tutoriels-sur-la-teledetection/plates-formes-capteurs/observation-de-la-terre/9376> consulté le 22 septembre 2019

⁴ <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/univers-landsat-3738/> consulté le 22 septembre 2019

Tableau 1.4: Principales caractéristiques des missions LandSat

Caractéristiques	Landsat-1 à 3	Landsat-4 et 5	Landsat-6	Landsat-7	LDCM
Début et fin de mission	Landsat-1 : 1972-1978 Landsat-2 : 1975-1981 Landsat-3 : 1978-1983	Landsat-4 : 1982-1993 Landsat-5 : 1984-2013	1993 (échec)	1999-	2013-
Statut satellite	Achevée	Achevée (L-4) Fonctionne en mode dégradé (L-5)	Echec au lancement	Actif	Actif
Masse	816-960 kg	1 938-1 961 kg	-	2 200 kg	2 600 kg
Instruments	MSS : radiomètre RVB : caméra vidéo	MSS et TM : radiomètre	MSS et TM : radiomètre	ETM+ : radiomètre	OLI et TIRS : radiomètre
Bandes spectrales	0,5-0,6 μm 0,6-0,7 μm 0,7-0,8 μm 0,8-1,1 μm	0,45-0,52 μm 0,52-0,6 μm 0,63-0,69 μm 0,76-0,9 μm 1,55-1,75 μm 2,08-2,35 μm		0,45-0,52 μm 0,53-0,61 μm 0,63-0,69 μm 0,78-0,9 μm 1,55-1,75 μm 2,09-2,35 μm	0,433-0,453 μm 0,45-0,515 μm 0,525-0,6 μm 0,63-0,68 μm 0,845-0,885 μm 1,56-1,66 μm 1,36-1,39 μm 2,1-2,3 μm
Infrarouge thermique	-	10,4-12,5 μm	-	10,4-12,5 μm	10,3-11,3 μm 11,5-12,5 μm
Panchromatique	-	-	-	0,52-0,9 μm	0,5-0,68 μm

Résolution	Générale : 79 m	Générale : 30 m Infrarouge thermique : 120 m	-	Générale : 30 m Panchromatique : 15 m Infrarouge thermique : 100 m	Générale : 30 m Panchromatique : 15 m Infrarouge thermique : 60 m
Technique de prise d'image	Whiskbroom	Whiskbroom	-	Whiskbroom	Pushbroom
Orbite	Altitude : 907–915 km cycle : 18 jours heure : 9 h 45	Altitude : 705 km cycle : 16 jours heure : 9 h 30-10 h	-	Altitude : 705 km cycle : 16 jours heure : 10 h-10 h 15	Altitude : 705 km cycle : 16 jours heure : 10 h

Source : <http://nilerak.hatfieldgroup.com/French/NRAK/EO/html/landsat.html> consulté le 21/09/2019

1.1.3 Traitement des images utilisées

1.1.3.1 Images MODIS

- **Données des feux actifs**

Le système FIRMS (Fire Information for Resource Management System) de la NASA distribue les données d'incendie actives en temps quasi réel (NRT) dans les 3 heures suivant le passage supérieur du satellite à partir du spectroradiomètre imageur à résolution modérée (MODIS) de la NASA (Giglio *et al.*, 2013 ; Giglio *et al.*, 2018). La détection du feu est effectuée à l'aide d'un algorithme contextuel qui exploite la forte émission de feux dans le rayonnement proche infrarouge et qui est basé sur la température de luminosité des canaux 4 et 11 (Giglio *et al.*, 2003).

La détection des points de feux par les satellites MODIS est entièrement automatisée (Giglio *et al.*, 2003 ; Caillault *et al.*, 2010) et permet la production d'informations sur les feux quotidiens sur la terre entière. Les produits à feu actif MODIS NRT (MCD14DL) sont traités en utilisant le produit standard MOD14/MYD14 Fire and Thermal Anomalies.

Chaque emplacement d'incendie actif MODIS représente le centre d'un pixel de 1 km qui est marqué par l'algorithme comme contenant un ou plusieurs incendies dans le pixel. Le produit d'incendie actif MODIS détecte les incendies en pixels de 1 km qui brûlent au moment du passage supérieur dans des conditions relativement exemptes de nuages en utilisant un algorithme contextuel (Figure 1.3) (Müller et Suess, 2011 ; Giglio *et al.*, 2003). La probabilité de détection d'un feu dépend fortement de sa température, de la surface sur laquelle s'étend le feu et de l'angle de vision du satellite par rapport au nadir. Par ailleurs, les conditions météorologiques locales influencent aussi cette probabilité (Giglio *et al.*, 2003, Giglio *et al.*, 2018).

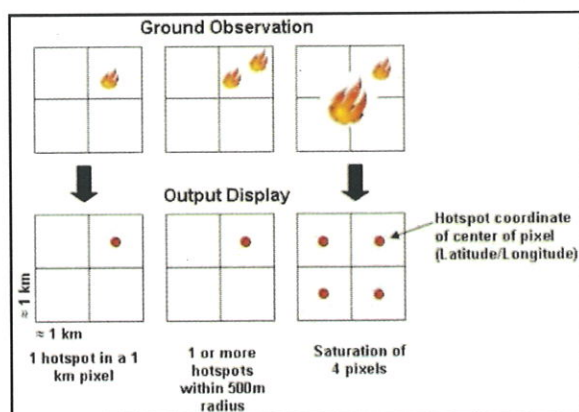


Figure 1.5: Pixels de feu actif : Réalité de terrain et information enregistrée par les satellites MODIS