



**HAL**  
open science

## Apport de la télédétection à la mise en place de prévention et suivi d'incendies des tourbières forestières

Dieumerci Eluo, Hervé Parmentier, Hervé Cubizolle

### ► To cite this version:

Dieumerci Eluo, Hervé Parmentier, Hervé Cubizolle. Apport de la télédétection à la mise en place de prévention et suivi d'incendies des tourbières forestières. " Progrès en développement durable " la science et le génie au service de la transition écologique et énergétique., Université du Québec à Chicoutimi - Saguenay.; University of Quebec in Chicoutimi - Saguenay., Oct 2024, Chicoutimi - Saguenay., Canada. hal-04755755

**HAL Id: hal-04755755**

**<https://hal.science/hal-04755755v1>**

Submitted on 28 Oct 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License



# ***Apport de la télédétection à la mise en place de prévention et suivi d'incendies des tourbières forestières***

***(Forêt tourbeuse du bassin du Congo de Lokolama en RDC )***

***Par : Dieu Merci ELUO***

1 ELUO Dieu Merci, Géographe, Doctorant Université Jean Monnet de Saint Étienne, UMR 5600 CNRS Environnement, Ville, Société, 6 rue Basse des Rives, 42023 Saint-Etienne cedex 2 ;  
[eludieumerci@gmail.com](mailto:eludieumerci@gmail.com)

2 PARMENTIER Hervé, Géographe, IGE en sciences de l'information géographique, École Normale Supérieure de Lyon, Pôle de la Recherche, plateforme Ingénierie Spatiale, Image et Géomatique (ISIG) ;  
[herve.parmenier@ens-lyon.fr](mailto:herve.parmenier@ens-lyon.fr)

3 CUBIZOLLE Hervé, Géographe, Pr. des Universités, Université Jean Monnet de Saint Étienne, UMR 5600 CNRS Environnement, Ville, Société, 6 rue Basse des Rives, 42023 Saint-Étienne cedex 2 ;  
[herve.cubizolle@univ-st-etienne.fr](mailto:herve.cubizolle@univ-st-etienne.fr)

# SOMMAIRE

1

Introduction

2

Contexte / zone d'étude

3

Méthodes et données

4

Spatialisation du triangle de feu

5

Résultats

6

Perspectives et conclusion

# Introduction

D'une superficie de 172 millions d'hectares, les forêts tropicales du bassin du Congo constituent le deuxième plus grand massif de forêts tropicales humides de la planète, après la forêt amazonienne. Elles cristallisent les discussions internationales sur la question du climat en raison notamment de la réserve de carbone qu'elles abritent sous forme des tourbières. Ces dernières produisent d'importantes réserves de carbone estimées à 40 milliards de tonnes représentant environ trois ans d'émission mondiale de CO<sub>2</sub>, soit 20 ans d'émission de gaz à effets de serre des États –Unis d'Amérique. L'importante réserve de carbone dégagé par ces tourbières contribue à réguler significativement le réchauffement climatique, alors qu'en cas de relargage dans l'atmosphère, la quantité de carbone qui serait libérée pourrait entraîner une hausse de température de 3°C à 4° C à l'échelle planétaire.

Si certaines formations végétales sont connues pour être régulièrement affectées, les forêts denses humides n'ont pas cette réputation et ne semblent présenter aucune propension particulière à s'enflammer dans des conditions climatiques normales. Mais en dépit de la faible propension à s'enflammer qu'on leur prête, il demeure néanmoins un fait que certaines d'entre elles en ont été victimes si bien que les effets désastreux des feux sur les écosystèmes forestiers ont posé la question de la responsabilité de ces sinistres : climat ? homme ? action conjuguée des deux ? Il faut dans tous les cas affirmer que la fragilité de cette forêt tropicale, du moins en ce qui concerne son inflammabilité potentielle, est confirmée et la compréhension des processus qui conduisent ou participent à cet état de fait apparaît primordiale sont au demeurant devenus un enjeu socio-écosystémique.

L'objet de la présente étude est d'identifier les zones potentiellement exposées aux risques d'incendies des tourbières forestières de la R.D.C dans la perspective d'une démarche d'élaboration d'un plan de prévention et de sensibilisation.

Pour ce faire, la méthode envisagée est basée sur la technique de télédétection qui met en évidence des indicateurs spatiaux, conceptualisés sous forme de triangle de feu. L'estimation du potentiel d'incendie est donnée selon l'équation de la régression linéaire.

# Contexte / zone d'étude

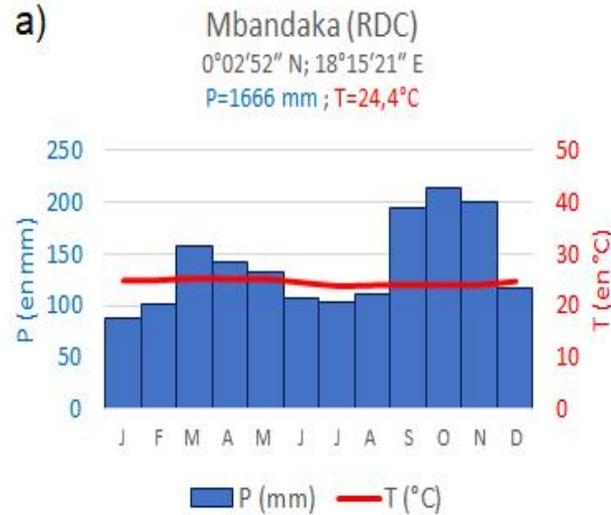
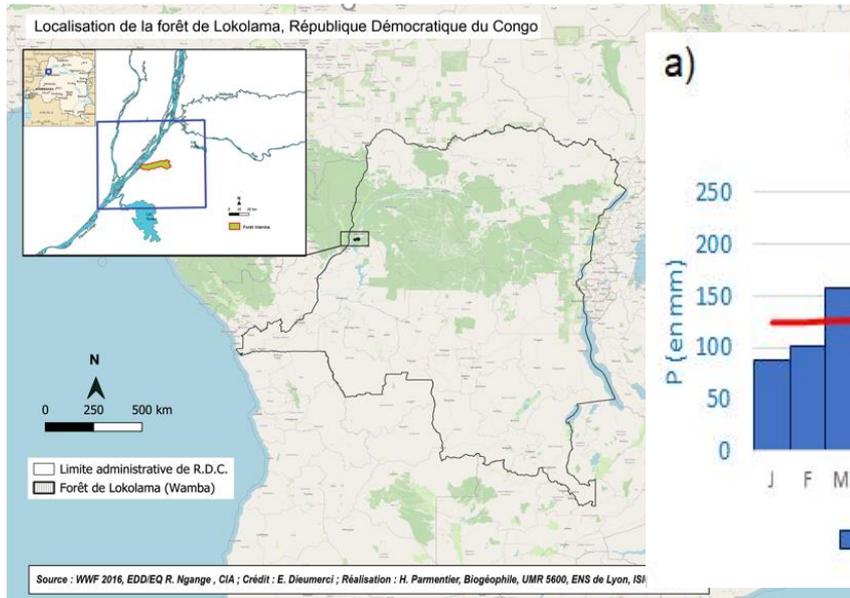
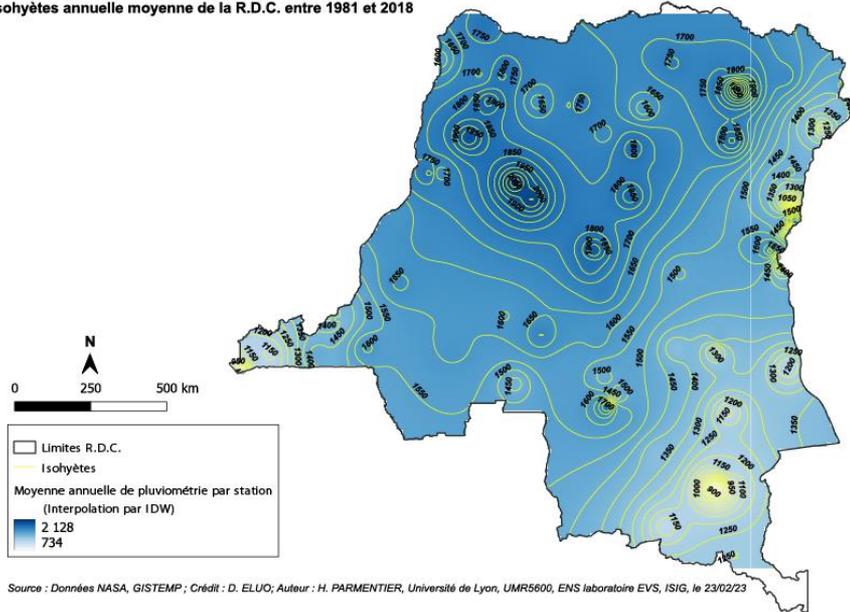


Figure. Contexte du lieu étudié : a) Diagramme ombrothermique de Mbandaka (1981 et 2018), b) Population pygmée de Lokolama (cliché : Eluo, 2021).

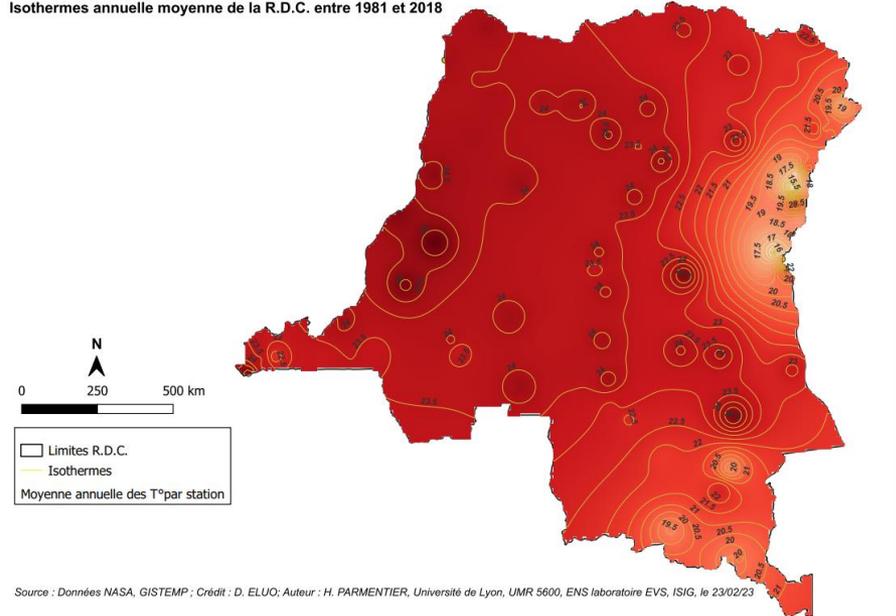
Deux périodes relativement « sèches » (DJF = 305 mm et JJA = 321 mm d'eau) et deux périodes humides (SON = 608 mm et MAM = 432 mm) rythment ce climat équatorial, associées au double passage de la Zone de Convergence intertropicale (ZCIT) ; les précipitations de saison humide sont très importantes pour le maintien notamment de la forêt tourbeuse et pour la survie des populations locales.

# Contexte / zone d'étude

Isohyètes annuelle moyenne de la R.D.C. entre 1981 et 2018



Isothermes annuelle moyenne de la R.D.C. entre 1981 et 2018



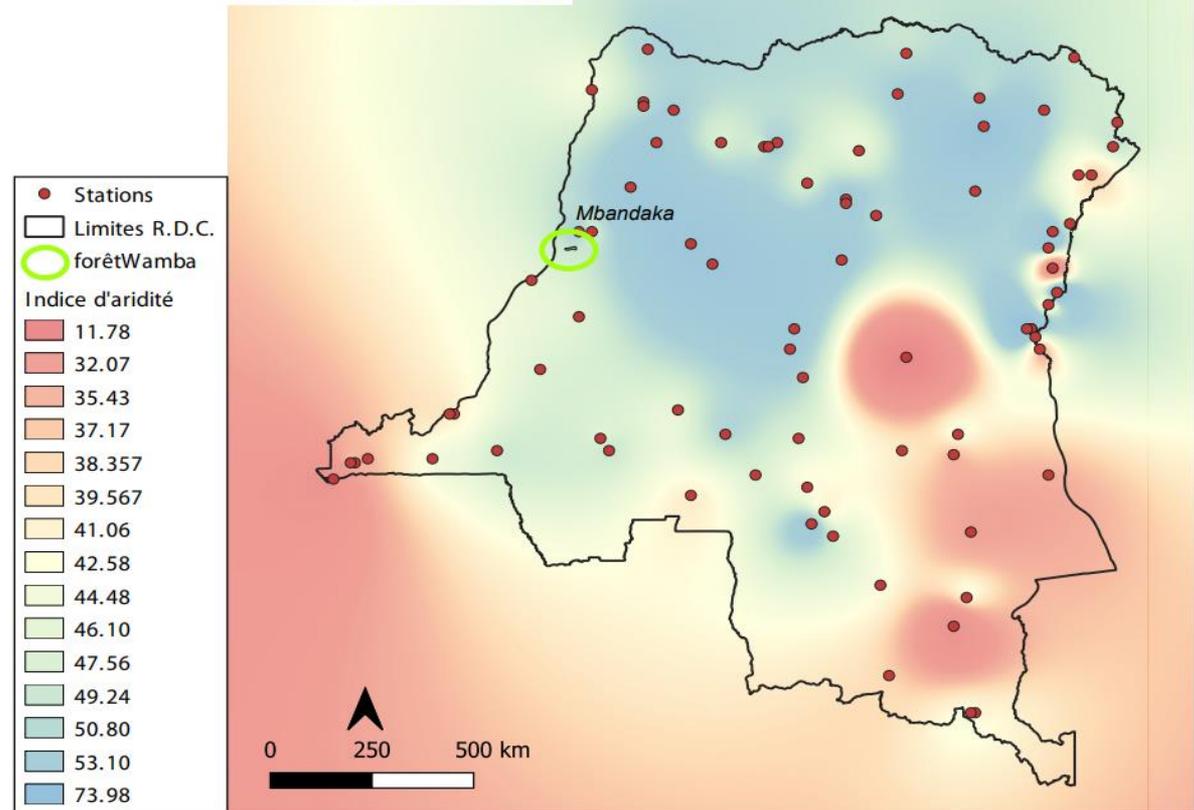
Les données bioclimatiques relevées de 81 stations météorologiques de la R.D.C. ont été utilisées en 2023 pour une première étude. Ces données proviennent d'une base de données de la NASA, GISTEMP 4,0, qui estime le changement de la température de surface globale. Les chroniques pluviométriques mensuelles couvrent la période de 1981 à 2018 pour toutes les stations.

# Contexte / zone d'étude

L'Indice d'aridité de **Martonne** (1926) (rapport annuel entre les précipitations totales (**P** en mm) et les températures (**T** en °C) auxquelles sont ajoutées une constante de 10 degrés, soit **IM= P/T+10**)

*L'étude des valeurs moyennes de pluviométrie et de températures montre à priori une progression de l'aridité vers le centre-est du pays, vers des espaces de forêts pluviales de plus en plus fragmentés et fragilisés par l'implantation et les activités humaines de prospections minières principalement, mais aussi pétrolières et de concessions forestières.*

Répartition de l'indice d'aridité moyen de la R.D.C. entre 1981 et 2018  
(Méthode d'interpolation multilevel B-Spline)



Source : Données NASA, GISTEMP ; Crédits : D. ELUO ; Auteur : H. PARMENTIER, Université de Lyon, UMR 5600, ENS laboratoire EVS, le 23/02/23



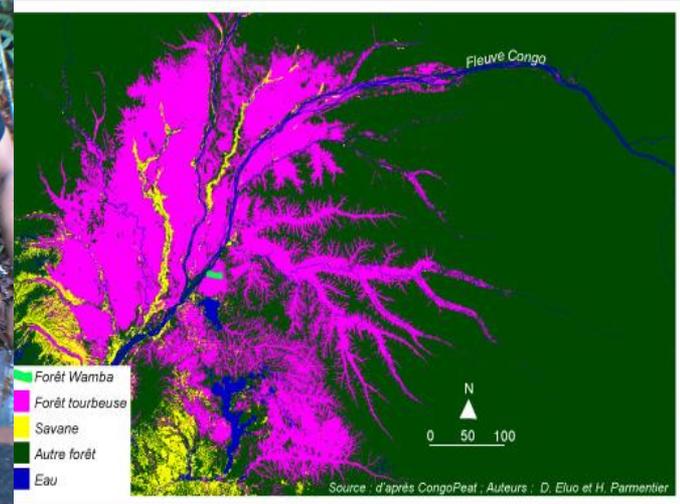
# Contexte / zone d'étude

Régulation climatique par le stockage carbone sous forme de tourbe.



Carotte de tourbe après extraction.

© D.E



Source : D'après Congo Peat ;  
Adaptation : H. Parmentier, ENS de Lyon, Biogéophile

Une tourbière comme une zone humide caractérisée par une saturation en eau des sols permanente ou quasi permanente, ce qui permet la mise en place de conditions anoxiques indispensables à l'accumulation de tourbe et à la formation d'un sol très spécifique, l'Histosol (CUBIZOLLE, Hervé. Plaidoyer pour les tourbières. 2024).

Les tourbières congolaises, d'une superficie d'environ 142.000 km<sup>2</sup>, et 40 milliards de tonnes CO<sub>2</sub> stockés, représentant 3 ans d'émission mondiale de CO<sub>2</sub> (20 ans d'émission de Etats –Unis d'Amérique). la quantité de carbone qui serait libérée pourrait entraîner une hausse de température de 3°C à 4° C à l'échelle planétaire.

# Contexte / zone d'étude

De nombreuses espèces spécifiques aux forêts d'Afrique centrale, telles que l'okapi, le bongo, la genette aquatique, le gorille et le bonobo ou encore quelques petits primates et antilopes sont autant indissociables de ces forêts. En plus de l'endémique paon du Congo, les forêts abritent au total plus de 400 espèces de mammifères, 1 000 espèces d'oiseaux et 700 espèces de poissons ont trouvé refuge dans la zone.

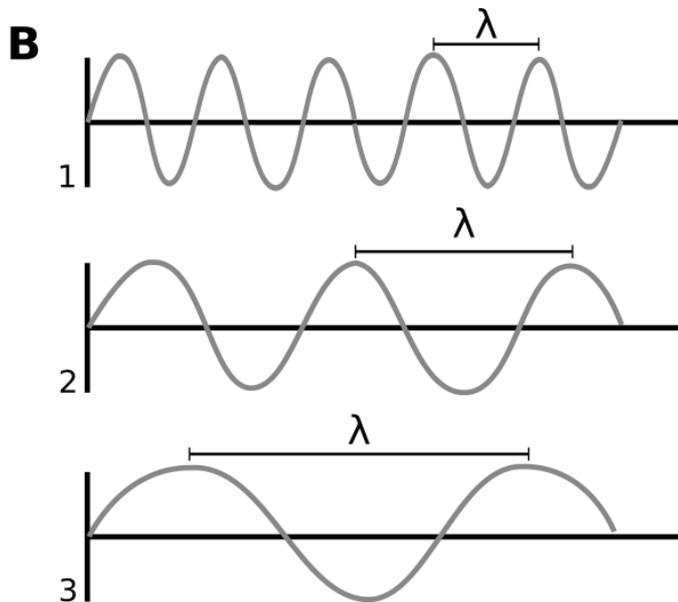


Union internationale pour la conservation de la nature 2010

# Méthodes et données

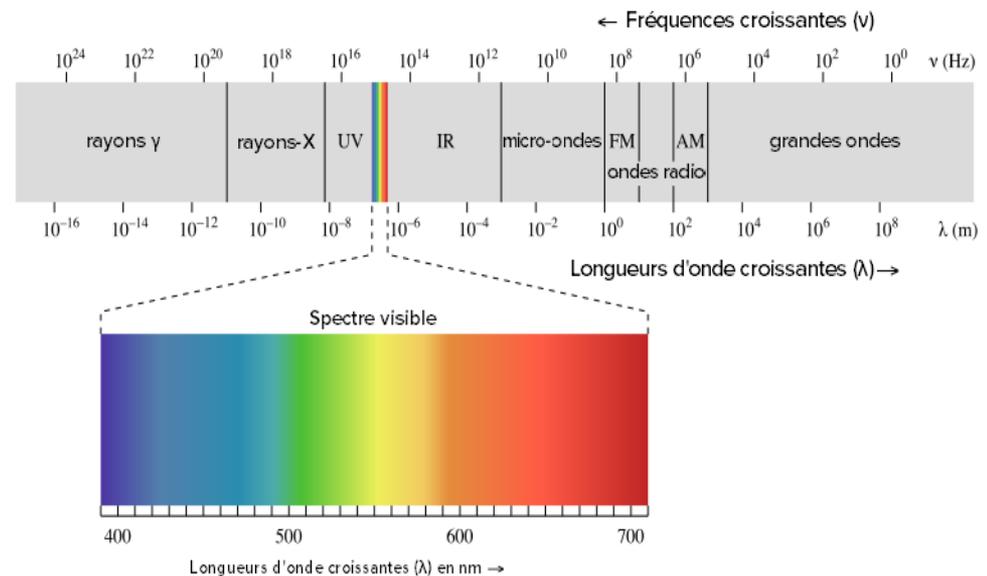
❑ **Téledétection** : Technique d'acquisition à distance d'informations sur la surface terrestre, fondée sur l'analyse d'images obtenues dans *différentes gammes de longueurs d'onde*.

❑ **Onde et longueur** : représente la longueur séparant deux points identiques de l'onde, chaque onde est repérée dans ce que nous appelons *le spectre électromagnétique*



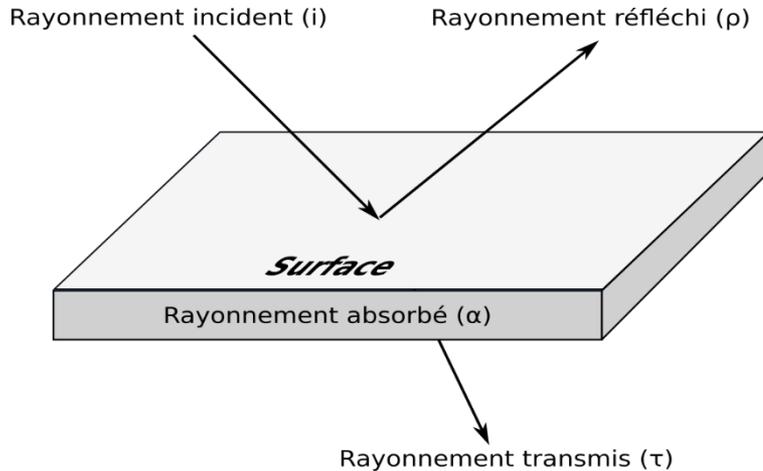
*Déplacement d'une onde dans un champ électromagnétique la plus petite à la plus grande (B1 – B3), Paul Passy*

## ❑ Spectre électromagnétique

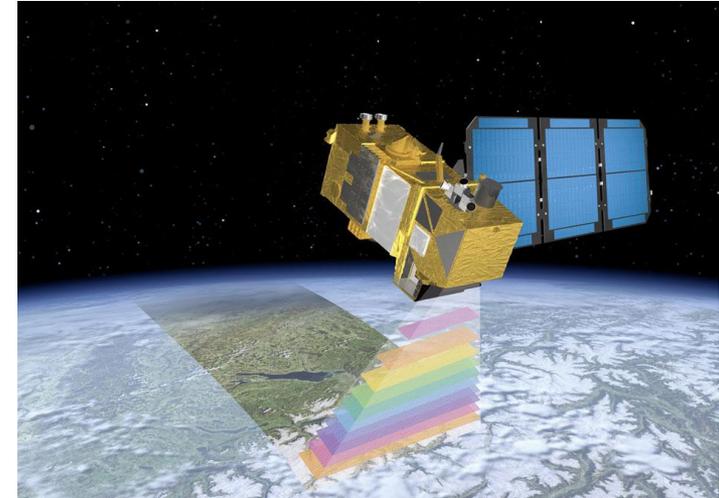


# Méthodes et données

❑ **Signature spectrale** : est l'émission ou l'absorption de rayonnement électromagnétique à des longueurs d'onde caractéristiques d'un objet



❑ **Satellite Sentinelles** : mises en orbite en 2015. Comportent 13 bandes spectrales du visible au proche infrarouge avec une résolution spatiale comprise entre 10 et 20 mètres, une fauchée de 290 km, et une répétitivité sur les mêmes zones de 5 jours.



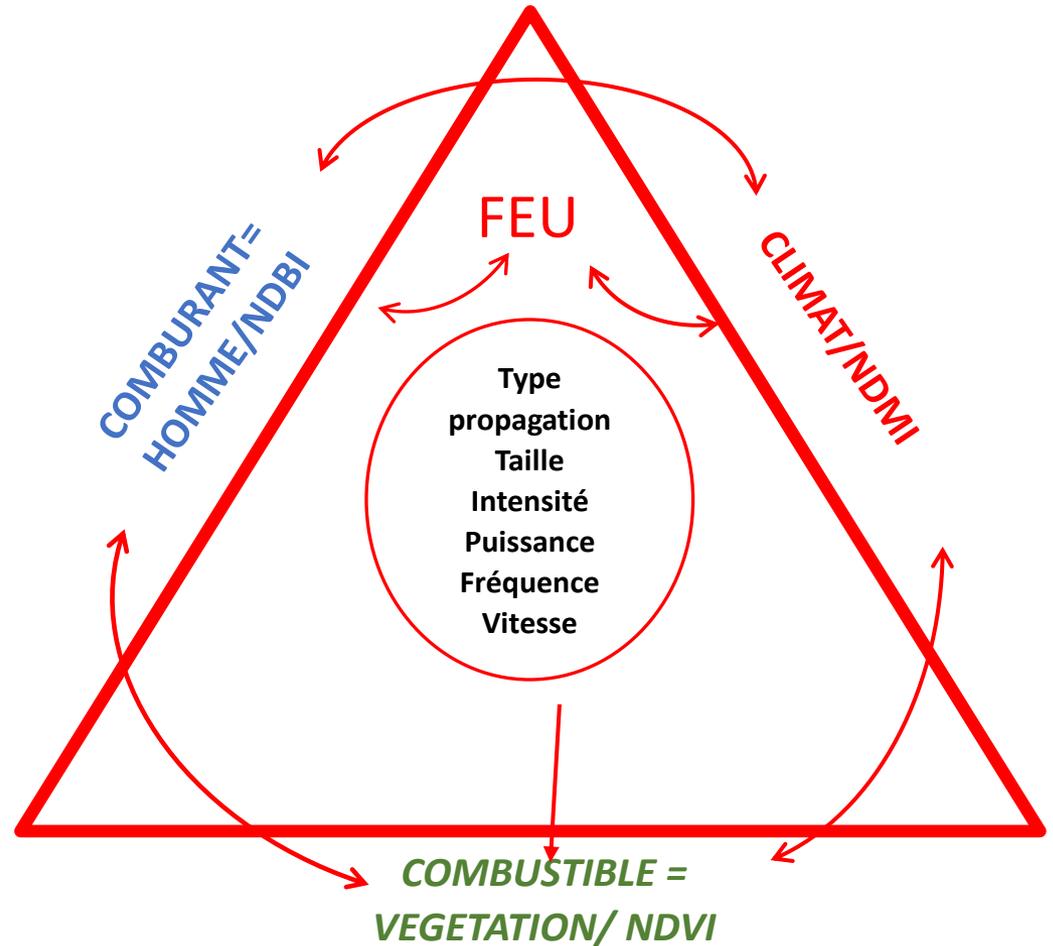
❑ **Les indices** : font partie des méthodes de traitement que l'on appelle les transformations multispectrales. Ils consistent à convertir les luminances mesurées au niveau du capteur satellitaire en grandeurs ayant une signification dans le domaine de l'environnement.

SURFACE ÉTUDIÉE	INDICE	FORMULE
INDICE D'HUMIDITE	NDMI	Proche infrarouge et infrarouge à onde courte $= (NIR - SWIR 1) / (NIR + SWIR 1)$
INDICE DU BÂTI	NDBI	Infrarouge à onde courte et proche infrarouge $= (SWIR 1 - NIR) / (SWIR 1 + NIR)$
INDICE DE VÉGÉTATION	NDVI	Proche infrarouge et rouge = $(NIR - R) / (NIR + R)$

# Spatialisation du triangle de feu de la forêt

Les trois composantes du triangle de feu sont :

- **Combustible** = végétation, d'un point de vue spatial ce paramètre pourrait être estimé par **NDVI**
- **Comburant** : est considéré comme comburant toutes activités de dégradation forestière par l'homme (agriculture itinérante sur brûlis, pâturages, production de charbons...)/ **NDBI**
- **Climat** : **NDMI**, indice d'aridité...



*Spatialisation du triangle de feu forestier, Auteur : D. ELUO, 2024*

## □ *Modèle de régression linéaire*

Le modèle de régression linéaire cherche à établir une relation linéaire entre une variable dépendante et une ou plusieurs variables indépendantes.

Dans le cadre du concept de spatialisation du triangle de feu, la variable dépendante correspond à l'indice de risque de feu (IR), il s'agit de variable à estimer à partir des variables indépendantes qui sont notamment les index de la végétation (*NDVI, NDMI, NDBI*).

Les coefficients *K1, K2 et K3* représentent les pentes de la droite de régression. Ces coefficients permettent de mesurer l'impact des indexes sur l'indice du risque de feu par combinaison des facteurs d'influences ou des variables indépendantes des index spatiaux de la végétation à travers le test de significative.

La formule peut être exprimée de la manière suivante :

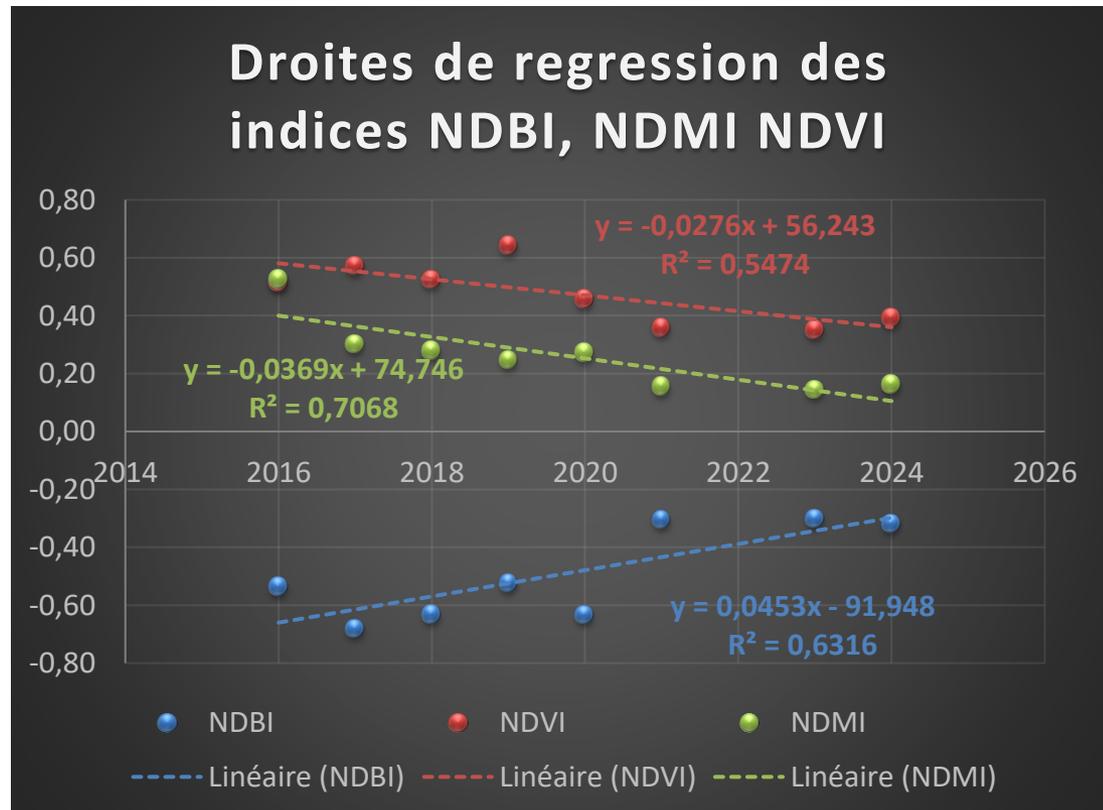
$$IR = (K1. NDVI) + (K2. NDMI) + (K3. NDBI)$$

# Résultats

## ☐ Droites de régression des index de la zone d'étude

	NDBI	NDVI	NDMI
2016	-0,54	0,52	0,53
2017	-0,68	0,57	0,30
2018	-0,63	0,52	0,28
2019	-0,52	0,64	0,25
2020	-0,63	0,46	0,27
2021	-0,30	0,36	0,16
2023	-0,30	0,35	0,15
2024	-0,32	0,39	0,16

Statistique	NDBI	NDVI	NDMI
Nb. d'observations	8	8	8
Minimum	-0,680	0,352	0,145
Maximum	-0,300	0,643	0,527
1er Quartile	-0,631	0,385	0,162
Médiane	-0,529	0,487	0,261
3ème Quartile	-0,314	0,537	0,285
Moyenne	-0,490	0,477	0,262
Variance (n-1)	0,026	0,011	0,015
Ecart-type (n-1)	0,160	0,105	0,124

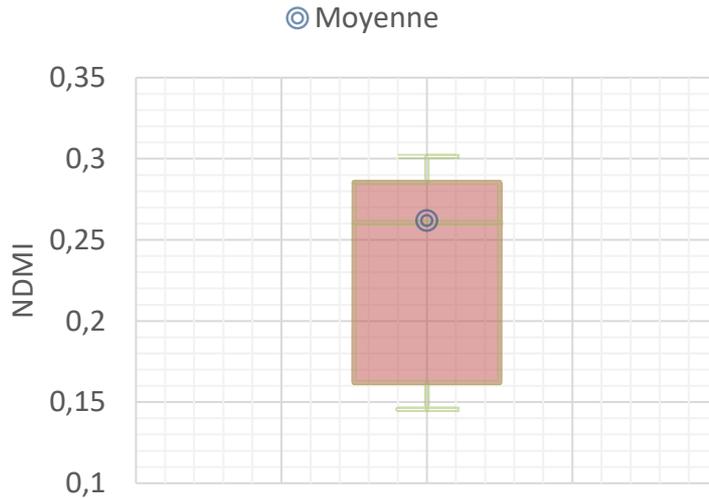


Les droites de régression des indices **NDVI** et **NDMI** indiquent une **diminution globale entre 2016 et 2024 (-0,20 pour le NDVI)**. Inversement le **NDBI augmente et gagne 0,35 entre 2016 et 2024**. Ceci traduit une diminution des surfaces forestières, et une augmentation de la présence et des activités humaines, ainsi qu'un assèchement de surface de la végétation qui reçoit normalement en mars des pluies relativement abondantes.

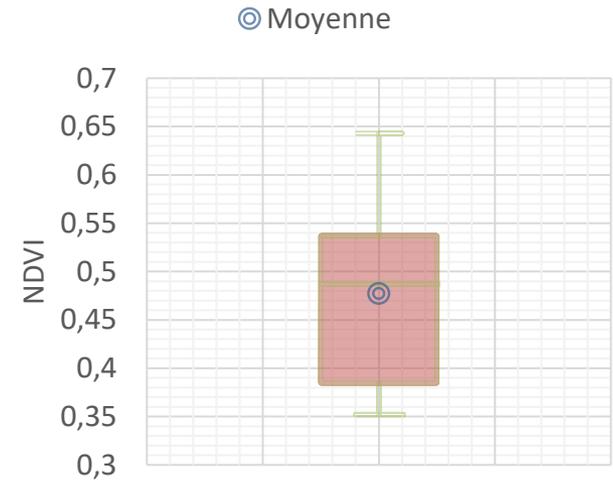
# Résultats

## Box plot

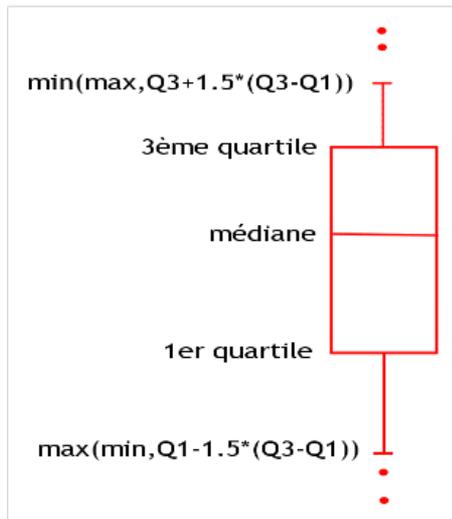
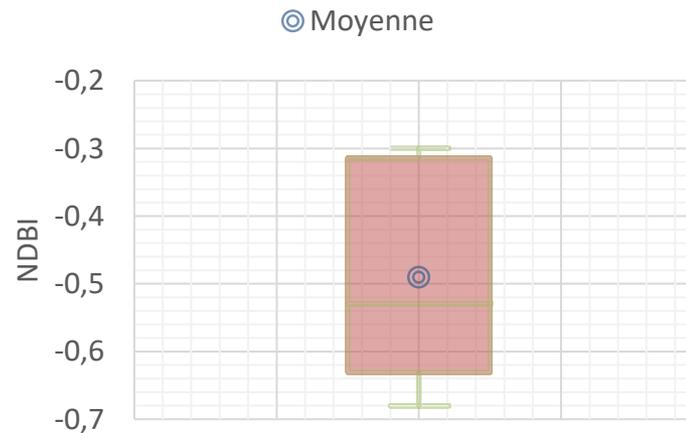
### Box plot 1 (NDMI)



### Box plot 2 (NDVI)



### Box plot 3 (NDBI)



# Résultats

## □ *Indice de risque de feu forestier (tourbière de Lokolama)*

$$IR = (K1. NDVI) + (K2. NDMI) + (K3. NDBI)$$

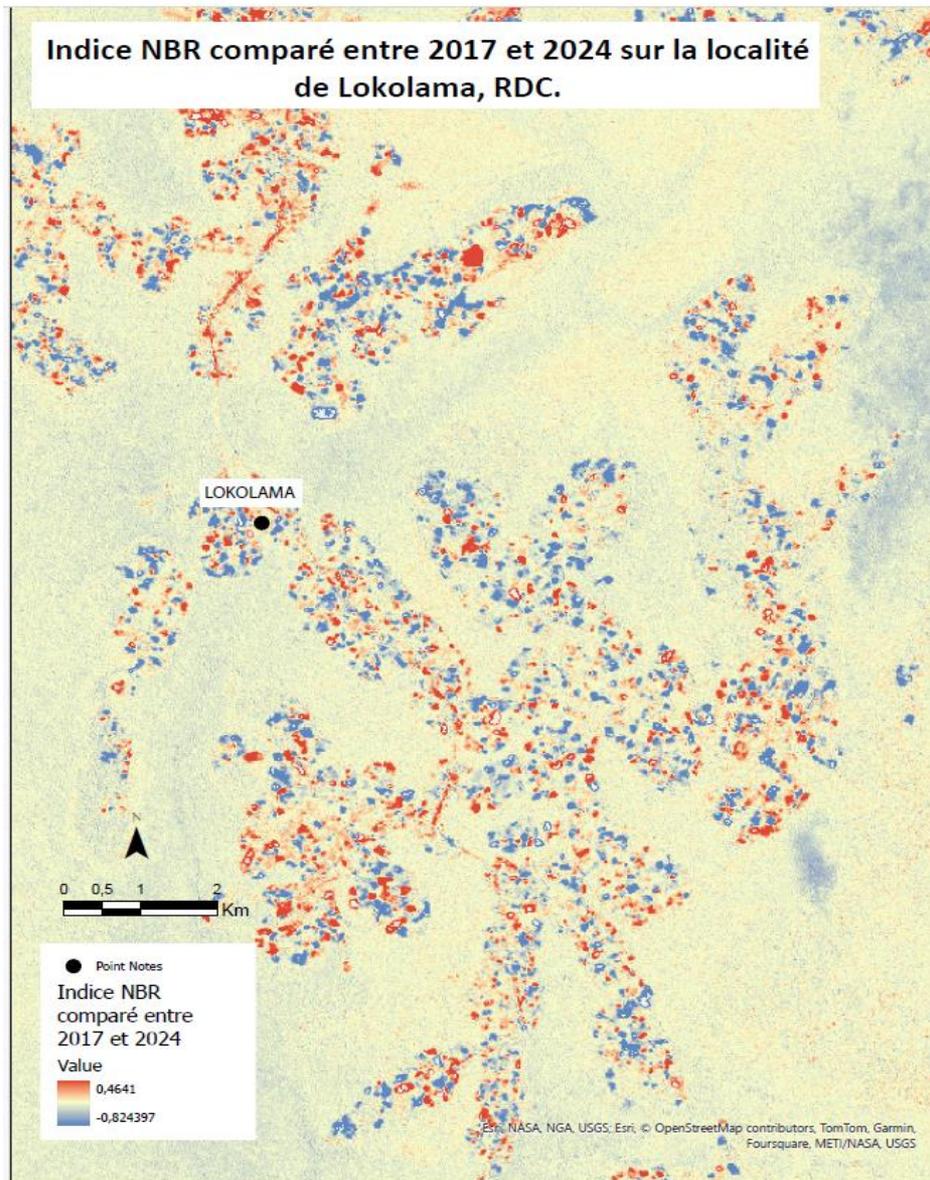
	Coefficients (K1, K2, K3)	Variables indépendantes (NDVI, NDMI, NDBI)
NDVI	-0,0276	0,48
NDMI	-0,0369	-0,49
NDBI	0,0453	0,26
	<b>IR</b>	<b>0,016611</b>

NIVEAU DE SEVERITE	INTERVALLES DE IR
Régénération accrue élevée	$IR < -0,25$
Régénération accrue faible	$-0,25 \leq IR < -0,10$
Non brûlé	$-0,10 \leq IR < 0,10$
Sévérité faible	$0,10 \leq IR < 0,27$
Sévérité faible à modérée	$0,27 \leq IR < 0,44$
Sévérité modérée à élevée	$0,44 \leq IR < 0,66$
Sévérité élevée	$0,66 \leq IR$

Classification des niveaux de sévérité du feu en fonction des intervalles de valeurs de l'indice (tableau adapté de Key et Benson, 2006)

# Résultats

## ❑ Carte d'indice de risque de feu forestier (tourbière de Lokolama)



### Contexte historique

Développé à partir d'images satellitaires, le NBR a joué un rôle essentiel dans le suivi et l'analyse des effets post-incendie et la récupération de la végétation sur de vastes zones géographiques. Il permet des évaluations précises et efficaces de la sévérité des brûlures, contribuant à la gestion et à la réhabilitation des écosystèmes touchés.

Le NBR est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{NBR} = \frac{(\text{NIR} - \text{SWIR})}{(\text{NIR} + \text{SWIR})}$$

où :

NIR est la valeur de réflectance dans le spectre proche infrarouge,  
SWIR est la valeur de réflectance dans le spectre infrarouge à ondes courtes.

# ***Perspectives et conclusion***

Les résultats ont permis de démontrer l'efficacité de la méthode dans l'évaluation spatiale du feu de forêt tourbeuse de Lokolama, il est certain que le risque d'incendie est très faible. La zone équatoriale de convergence intertropicale où est située cette forêt est très humide pour ce risque, ceci quand bien même l'action humaine génératrice de feux des brousses aux fins des usages économique, alimentaire, culturel et social peut être constatée.

A la différence d'estimation directe de l'index NBR ; cette approche méthodologique de triangle de feu permet la combinaison des plusieurs paramètres spatiaux. Dans le cadre de la mise en place d'un plan de prévention, il sera nécessaire de réaliser les suivis des paramètres les plus significatifs au sens statistique du terme. Pour cela, des tests des significativités pourraient être effectués pour chaque index spatiaux afin de mesurer l'impact de ceux-ci sur l'indice de risque qui est considéré comme variable dépendante. Les paramètres spatiaux peu significatifs pourraient être écartés dans l'équation de la régression linéaire.

Ainsi, par convention dans les régressions linéaires, il y a trois seuils de significativité : 1%, 5%, 10%. Plus la significativité est proche de 0, plus la conclusion sur l'impact du coefficient est certaine. Ainsi un coefficient significatif au seuil de 1% signifie que le résultat obtenu pour le coefficient a moins de 1 % de chances d'être obtenu.

# Bibliographie

CUBIZOLLE H. (2019). Les tourbières et la tourbe. Lavoisier-Tec and Doc, Paris, France.

CUBIZOLLE H. (2024). Plaidoyer pour les tourbières. Editions Actes Sud, Arles, France.

DARGIE G. C., LEWIS, S.L., and al. Age, extent and carbon storage of the central Congo Basin peatland complex. *Nature*, 2017, vol. 542, no 7639, p. 86-90.

ELUO, Dieumerci, PARMENTIER, Hervé, et CUBIZOLLE, Hervé. Étude de la variabilité spatio-temporelle climatique de la forêt tropicale humide tourbeuse de Lokolama. In : *36ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC). Climat, eau et société: changements et défis*,. Transversal Publishing House, Târgoviște, Romania. ISBN 978-606-605-229-0, 2023.

EZZINE, Hicham, SAIDI, Mariam, CASANOVA, José Lois, et al. Conception et mise en place d'un système à base de données NOAA-AVHRR, pour la prévention et le suivi des incendies de forêts au Maroc. *Geo observateur*, 2005, vol. 14.

Key, C. H. et Benson, N. C. (2006). *Landscape Assessment (LA)*.

PARMENTIER Hervé. Calcul d'indices avec QGIS sur image Sentinelle 2A. De l'indice de végétation (NDVI) à celui de la construction de différence normalisée (NDBI). *Naturagis.fr*, 2022

SOPHIE, SAUVAGNARGUES. *Incendies de forêts: défis et perspectives*. Lavoisier, 2012.

STRUSKI Nicolas. Compréhension du système feu : imagerie thermique , *TheBookEdition.com*, 2021

TARDY, C., VERNET, J. L., SERVANT, Michel, *et al.* Feux, sols et écosystèmes forestiers tropicaux. *Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux*. IRD, Paris, 2000, p. 343-348.