

## Mémoire

**Auteur :** Courbe, Louise

**Promoteur(s) :** Vanmaercke, Matthias; Hubert, Aurelia

**Faculté :** Faculté des Sciences

**Diplôme :** Master en sciences géographiques, orientation global change, à finalité approfondie

**Année académique :** 2022-2023

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/18671>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---



**LIÈGE université**  
**Sciences**

Université de Liège

Faculté des Sciences

Département de Géographie

# Etude du développement des ravins urbains à Kinshasa à l'aide d'images satellites.

Mémoire présenté par **Louise Courbe**

Pour l'obtention du titre de

Master en sciences géographiques,

Orientation Global Change à finalité géomorphologie et risques naturels

Année académique :

**2022 - 2023**

Défense :

**Septembre 2023**

Président du jury :

**Pr. Xavier FETTWEIS**

Promoteur :

**Pr. Matthias WANMAERCKE**

Co-promoteur :

**Pr. Aurélia HUBERT-FERRARI**

Jury de lecture :

**Pr. Roland BILLEN**

**Pr. Andrea NASCETTI**

## Remerciements

Par ces quelques lignes je souhaite remercier mon promoteur, le professeur Matthias Vanamercke ainsi que ma co-promotrice, le professeur Aurélia Hubert-Ferrari, qui m'ont, durant toute cette année, aidée et encouragée. Je souhaite les remercier pour le temps investi et le travail réalisé. De même je remercie la doctorante Elise Dujardin qui m'a suivie au jour le jour et aidée à améliorer mon mémoire. Merci également au jury de lecture qui prendra le temps de lire ce travail.

Je souhaite également remercier mes parents, qui m'ont aidée durant toutes mes années d'études ainsi que mes frères et sœurs. Plus particulièrement mon grand-frère et mon copain qui m'ont aidée tout au long de ce mémoire à donner le meilleur de moi-même. Je remercie toutes les personnes qui ont relu les parties de ce travail afin de me donner un retour constructif pour l'améliorer.

Bien sûr, l'aboutissement de mon parcours universitaire ne serait rien si je ne l'avais pas partagé toutes ces années avec mes amis de géographie et de l'ESN. Je suis reconnaissante de les avoir rencontrés et d'avoir partagé tant de moments fabuleux avec eux.

## Résumé

La problématique des ravins urbains dans les villes d'Afrique centrale gagne de l'importance d'année en année. Il est primordial de s'y intéresser afin de comprendre comment ces ravins se développent dans le but de prévenir tout préjudice socio-économique.

La ville de Kinshasa est un laboratoire d'étude adapté pour ces ravins urbains de par sa localisation et sa démographie grandissante qui augmentent la pression subie par la zone. Le nombre de ravins urbains, qui se sont développés suite à l'urbanisation non-planifiée, augmente continuellement. Ces ravins impactent tous les ans les populations locales qui doivent faire face à ce risque meurtrier durant la saison des pluies. Les fortes précipitations combinées à une urbanisation massive causent un fort ruissellement axial le long des voiries et des chemins, ce qui conduit au développement des ravins. De plus, l'intensité des précipitations étant censée s'accroître dans les années à venir, il y a un risque supplémentaire d'augmentation du ravinement.

Nous avons utilisé des images satellites afin de numériser le développement des ravins. Des indices pluviométriques ont été étudiés afin de mettre en évidence le plus pertinent dans le développement des ravins. Nous avons également mis en évidence l'importance de l'âge du ravin dans son développement. Pour finir nous avons réalisé des modèles qui permettent de prédire la taille relative des ravins en fonction des précipitations cumulées au-dessus du seuil de 13 mm et/ou de leur âge. Une bonne prédiction de leur taille relative permettra de mieux appréhender leur développement futur.

## Summary

The issue of urban gullies in Central African cities is gaining significance year by year. It is essential to tackle this issue with the goal of understanding the development of these gullies, aiming to prevent any negative socio-economic consequences.

The city of Kinshasa presents itself as an appropriate research setting for studying these urban gullies, given its geographical location and expanding population that amplify the challenges faced in the region. The number of urban gullies, resulting from unplanned urbanization, is continuously on the rise. These gullies impact the local populations every year, who must confront this deadly risk during the rainy season. Heavy rainfall, combined with extensive urbanization, leads to substantial axial runoff along roads and pathways, resulting in the formation of gullies. Furthermore, with the projected increase in precipitation intensity in the coming years, there is an additional risk of heightened gully formation.

We utilized satellite imagery to digitally map the development of these gullies. We examined rainfall indicators to emphasize the primary factor contributing to gully formation. Additionally, we emphasized the significance of the gully's age in its evolution. Finally, we developed models to forecast the proportional dimensions of gullies based on accumulated precipitation above the 13 mm threshold and/or their age. Precise predictions of their proportional dimensions will enhance our comprehension of their prospective evolution.



Remerciements.....	1
Résumé .....	2
Summary.....	3
Liste des Figures.....	9
I. Introduction .....	11
I. 1. Contexte général.....	11
I. 2. Contenu du mémoire.....	12
II. État de l’art .....	13
II. 1. L’érosion par ruissellement .....	13
II. 2. Processus de Ravinement .....	14
II. 2. 1. Ravin : Définition.....	14
II. 2. 2. Développement d’un ravin .....	14
II. 2. 2. (i) La formation.....	14
II. 2. 2. (ii) Le développement .....	14
II. 2. 2. (iii) Guérison.....	16
II. 2. 2. (iv) Stabilisation.....	17
II. 2. 3. Classification et Géométrie.....	17
II. 2. 4. Facteurs du ravinement .....	18
II. 2. 4. (i) Topographie.....	18
II. 2. 4. (ii) Type de sol .....	18
II. 2. 4. (iii) Précipitations et Indices.....	19
II. 2. 4. (iv) Couverture et occupation du sol .....	20
II. 3. Les ravins urbains.....	21
III. Contexte de la zone d’étude : Kinshasa .....	22
III. 1. Kinshasa .....	22
III. 1. 1. Géographie urbaine .....	22
III. 1. 2. Géographie physique et Géologie .....	26

III. 2. Le ravinement à Kinshasa .....	30
III. 2. 1. Ravins urbains à Kinshasa et leurs caractéristiques .....	30
III. 2. 2. Causes naturelles .....	30
III. 2. 3. Causes anthropiques .....	31
III. 3. Conséquences de ces ravins : un enjeu humain et socio-économique et solutions mises en place .....	32
IV. Questions de recherche .....	35
V. Méthodologie.....	37
V. 1. Données satellitaires.....	37
V. 2. Numérisation des ravins .....	42
V. 3. Aire des ravins.....	46
V. 4. Pluviométrie.....	47
V. 4. 1. Données .....	47
V. 4. 2. Indices .....	49
V. 5. Traitement des données sous Python .....	50
V. 5. 1. Âge des ravins .....	51
V. 5. 2. Taille relative .....	52
V. 5. 3. Taux d'expansion normalisé.....	52
V. 5. 4. Période de stabilisation et d'expansion .....	52
V. 5. 5. Quatre indices pluviométriques .....	53
V. 5. 6. Modèle et validation.....	54
VI. Résultats.....	55
VI. 1. Cartographie .....	55
VI. 2. Âge et taille .....	55
VI. 3. Evolution des ravins .....	57
VI. 4. Expansion.....	59
VI. 5. Relation précipitations-évolution des ravins .....	60
VI. 6. Développement du modèle .....	64



VI. 6. 1. Régressions sur l'ensemble des données des modèles .....	64
VI. 6. 2. Deux familles et exclusion des ravins 12 et 15 .....	66
VI. 7. Validation des modèles.....	69
VII. Discussion .....	72
VII. 1. Cartographie .....	72
VII. 2. Expansions des ravins jeunes.....	72
VII. 3. Indices pluviométriques .....	73
VII. 4. Modèle et validation.....	74
VII. 5. Limites de l'approche .....	75
VIII. Conclusion .....	76
IX. Bibliographie .....	77
X. Annexes.....	83



## Liste des Figures

- Figure 1.** [Succession des différents types d'érosion jusqu'au développement de ravins](#)
- Figure 2.** [Erosion en cascade à la tête du ravin](#)
- Figure 3.** [Retrait annuel de 45 ravins sur base d'informations de terrain](#)
- Figure 4.** [Corrélation entre le taux de retrait volumique et le jour de pluie normal](#)
- Figure 5.** [Carte de la RDC et localisation de Kinshasa](#)
- Figure 6.** [Carte topographique de Kinshasa](#)
- Figure 7.** [Evolution de l'agglomération morphologique de Kinshasa entre 1979 et 2015](#)
- Figure 8.** [Graphique des précipitations mensuelles cumulées de 2000 à 2022](#)
- Figure 9.** [Graphique des précipitations cumulées pour chaque mois de novembre](#)
- Figure 10.** [Stratigraphie détaillée de la région de Kinshasa](#)
- Figure 11.** [Carte géologique de Kinshasa](#)
- Figure 12.** [Mesures prises en 2011 et 2012 à la tête du méga ravin de Laloux](#)
- Figure 13.** [Comparaison entre les images Planet et Google Earth Pro](#)
- Figure 14.** [Méga ravin urbain cartographié à Kinshasa](#)
- Figure 15.** [Carte de localisation des 30 ravins urbains numérisés à Kinshasa](#)
- Figure 16.** [Pixels pluviométriques des données GPM IMERG et les 30 ravins urbains digitalisés](#)
- Figure 17.** [Matrice de corrélation des différents pixels pluviométriques et de la moyenne](#)
- Figure 18.** [Diagramme schématique des différentes étapes du travail](#)
- Figure 19.** [L'aire des ravins \(m<sup>2</sup>\) selon âge](#)
- Figure 20.** [Taille relative des 24 ravins selon leur âge](#)
- Figure 21.** [Taille relative des ravins en fonction des précipitations journalières cumulées](#)

**Figure 22.** [Taille relative des ravins en fonction des précipitations cumulées au-dessus du seuil de 13 mm](#)

**Figure 23.** [Taille relative des ravins selon le taux d'expansion normalisé en %](#)

**Figure 24.** [Boîtes à moustaches des phases d'expansion et de stabilisation](#)

**Figure 25.** [Boîtes à moustaches des phases d'expansion et stabilisation, ravins de moins de 5 ans](#)

**Figure 26.** [Boîtes à moustaches des phases d'expansion et stabilisation, ravin de 5 à 10 ans](#)

**Figure 27.** [Boîtes à moustaches des phases d'expansion et stabilisation, ravin de 10 à 15 ans](#)

**Figure 28.** [Boîtes à moustaches des phases d'expansion et stabilisation, ravin de plus de 15 ans](#)

**Figure 29.** [Régressions linéaires par partie basées sur l'âge allant de 5 ans en 5 ans](#)

**Figure 30.** [Régressions logarithmiques basée sur l'âge](#)

**Figure 31.** [Régressions linéaires par partie basées sur l'âge et les 2 familles](#)

**Figure 32.** [Régressions linéaires basées sur les 2 familles](#)

**Figure 33.** [Régressions logarithmiques basées sur les deux familles](#)

**Figure 34.** [Validation du modèle 2](#)

**Figure 35.** [Validation du modèle 1](#)

**Figure 36.** [Validation du modèle 3](#)

**Tableau 1.** [Comparaison des sources de données Planet et Google Earth Pro](#)

**Tableau 2.** [Âge maximum et minimum des ravins](#)

# I. Introduction

## I. 1. Contexte général

Le ravinement est un des processus d'érosion les plus importants au monde. Il affecte de nombreuses régions rurales mais également urbaines. L'urbanisation conduit à l'imperméabilisation et à la compaction du sol dues à la construction de routes et d'habitats (Makanzu Imwangana *et al.*, 2014 ; Vanmaercke *et al.*, 2016). Comme les ravins sont sensibles à l'occupation du sol, l'urbanisation a pour effet d'augmenter la probabilité de ravinement, provoquant le développement de ravins urbains (Wouters & Wolff, 2010 ; Makanzu Imwangana *et al.*, 2014, 2015 ; Lutete Landu *et al.*, 2023).

Kinshasa, la capitale de la République Démocratique du Congo, est un véritable laboratoire pour l'étude de ces ravins urbains, la ville étant soumise à une urbanisation massive depuis la fin des années 1960 (Davies, 2015 ; Lutete Landu *et al.*, 2023). De plus, Kinshasa a un climat de savane tropicale avec une saison des pluies caractérisée par une pluviométrie importante durant laquelle les inondations sont fréquentes (Davies, 2015 ; Makanzu Imwangana *et al.*, 2023).

Les ravins urbains à Kinshasa sont nombreux, on en recense au moins 500 ; leur nombre et leur longueur grandissent exponentiellement depuis la fin des années 1960 (Makanzu Imwangana *et al.*, 2014, 2015 ; Lutete Landu *et al.*, 2023).

Le ruissellement durant les fortes précipitations n'est pas diffus mais axial le long des routes et des chemins favorisant le ruissellement concentré, facteur déclencheur du ravinement (Makanzu Imwangana *et al.*, 2014). A Kinshasa environ 90% des têtes de ravin sont directement « nourries » par le ruissellement des routes ou des pistes (Makanzu Imwangana *et al.*, 2014). Les précipitations, surtout celles de forte intensité, sont donc une variable clé dans le développement des ravins car elles jouent un rôle important dans le ruissellement (Vanmaercke *et al.*, 2016 ; De Geeter *et al.*, 2023).

L'impact de ces ravins urbains n'est que peu quantifié. Cependant, il est estimé que, chaque année, environ 4000 personnes perdent leur maison en République Démocratique du Congo à cause de ces ravins urbains et que 1,2 million de personnes sont actuellement en

danger ou risquent de subir un grave préjudice (Ilombe Mawe *et al.*, 2021). Il est donc important de s'intéresser à cette problématique.

Le but de ce travail est de numériser l'évolution d'une trentaine de ravins urbains à Kinshasa afin de comprendre à quel point le facteur pluviométrique est impactant dans le développement des ravins et s'il est possible de prédire leur expansion.

## I. 2. Contenu du mémoire

Ce travail de fin d'études s'articule en plusieurs parties distinctes. Le chapitre 1 introduit le sujet, puis le chapitre 2 offre un état de l'art sur les ravins urbains. Le but est de comprendre ce qu'est le ravinement, et le développement d'un ravin. Le chapitre 3 présente la zone d'étude, la ville de Kinshasa, en décrivant ses caractéristiques ainsi que les causes et conséquences des ravins urbains dans cette ville. Le chapitre 4 introduit les questions de recherche. Le chapitre 5 présente la méthodologie adoptée. Le chapitre 6 présente les résultats obtenus tout au long de notre travail et une première interprétation de ces derniers. Dans le chapitre 7, la discussion, nous interprétons nos résultats et nous poussons notre raisonnement jusqu'à ses limites. Pour finir, le chapitre 8 présente la conclusion de notre travail.

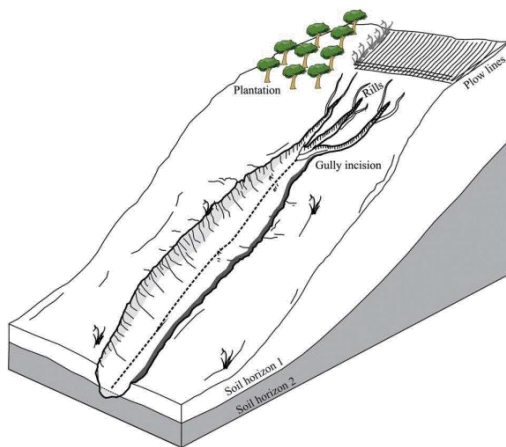
## II. État de l'art

Dans cette partie, le processus de ravinement est détaillé pour mettre en évidence les problématiques liées aux ravins urbains.

### II. 1. L'érosion par ruissellement

Tous les sols sont soumis à l'érosion. C'est le processus de mobilisation d'éléments minéraux ou organiques (érosion mécanique) ou des substances dissoutes (érosion chimique) (Gaillardet & Valentin, 2019). Les principaux agents de l'érosion sont la glace, le vent et l'eau (Gaillardet & Valentin, 2019). Ce dernier comprend l'érosion par ruissellement qui est le phénomène étudié dans ce papier.

Il existe différents types d'érosion du sol par ruissellement de l'eau. L'érosion en nappe (« sheet erosion ») réside dans l'élimination de la fine couche végétale due au choc des gouttes de pluie et au ruissellement. L'érosion en rigole (« rills ») consiste en une concentration des eaux de ruissellement qui forment un filet, ou rigole. Les forces de frottement avec le sol vont diminuer et le ruissellement va acquérir une énergie abrasive propre qui va provoquer une augmentation de la profondeur des rigoles (Roose, 1985). L'érosion par ravinement est un stade avancé de l'érosion en rigole. C'est une érosion



hydrique plus intense (Ontario, 2012 ; Amangabara G.,2014) qui possède assez d'énergie pour arracher puis transporter une grande quantité de sédiments (Millecamps, 2020). La quantité d'énergie nécessaire est généralement atteinte lors de précipitations intenses (Poesen *et al.*, 1996) durant lesquelles le sol est profondément entaillé.

**Figure 1.** Succession des différents types d'érosion jusqu'au développement de ravins (Shruthi, 2015)

Ces trois processus d'érosion causés par l'eau sont des processus consécutifs et continus ([Figure 1](#)). Il y a tout d'abord une zone sans érosion, puis, à partir d'un seuil critique, il y a une augmentation rapide du transport de sédiments et les différents types d'érosion se succèdent.

## II. 2. Processus de ravinement

### II. 2. 1. Ravin : définition

Il existe plusieurs définitions du terme « ravin », car le processus de formation n'est pas encore complètement connu. En anglais, le mot « gully » viendrait en réalité du français « goulet » désignant une entrée étroite, un passage ou une ouverture (Thwaites *et al.*, 2022). Dans ce travail, il a été décidé d'utiliser le mot ravin (« gully ») et la définition fournie par Amangabara (2014) selon Poesen *et al.* (2003) : un ravin est comme un chenal à flancs escarpés, souvent avec une forte pente et une érosion active de la tête, causée par l'érosion due à l'écoulement intermittent de l'eau, généralement pendant et immédiatement après de fortes pluies (Poesen *et al.*, 2003 ; Amangabara G., 2014). Cette définition correspond bien à notre problématique selon laquelle le développement du ravin va dépendre de l'intensité des précipitations.

### II. 2. 2. Développement d'un ravin

L'évolution des ravins se produit en quatre étapes : la formation, le développement, la guérison et la stabilisation (Agri Learner, 2022).

#### II. 2. 2. (i) La formation

La phase de formation dépend directement du ruissellement sur le versant. Au fur et à mesure que l'eau de ruissellement se concentre, son débit augmente, entraînant l'augmentation de sa capacité de transport et le cisaillement qu'elle exerce sur le sol. Il y a par conséquent une érosion de la surface du sol dans le sens de la pente.

#### II. 2. 2. (ii) Le développement

Le développement des ravins est dû principalement à deux mécanismes : l'érosion en cascade de la tête du ravin et l'érosion du chenal. Souvent, le développement initial du ravin est caractérisé par une expansion rapide de sa longueur dans le bassin versant. Ce processus est connu sous le nom de "retrait de la tête du ravin" et peut être rapide dans les premiers stades de développement (Roberts *et al.*, 2022). La tête de ravin, qui reçoit les eaux de

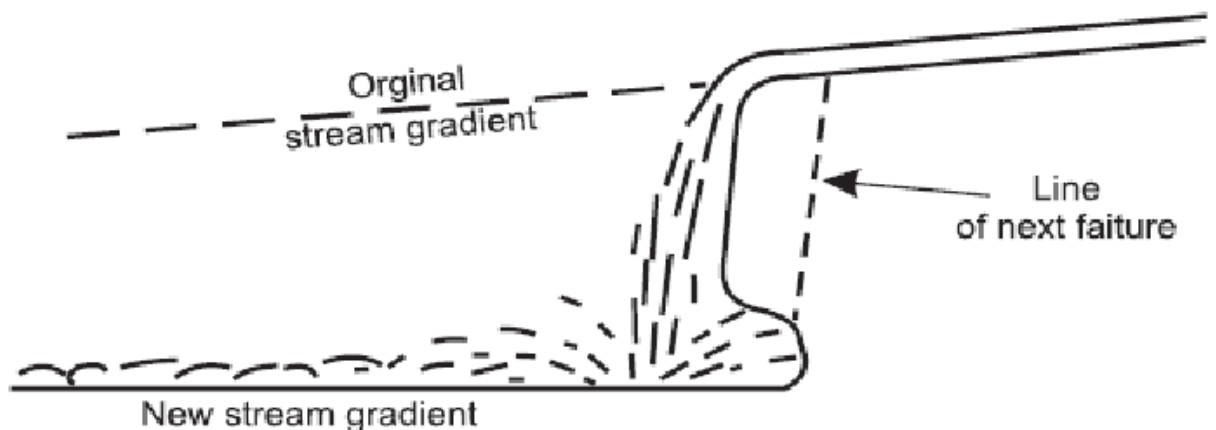


ruissellement, est une chute d'eau naturelle quasiment verticale dans le chenal du ravin (Vanmaercke *et al.*, 2016). Au niveau de la tête, ces eaux de ruissellement agissent comme une cascade et un bassin profond se forme au niveau de la chute, comme on peut le voir sur la [Figure 2](#). La chute d'eau va découper les parois de la tête du ravin et va éroder les sédiments qui sont transportés par la pente (Roberts *et al.*, 2022).

Le ruissellement va ensuite se déplacer à travers le chenal du ravin, récurant le sol, découpant et déstabilisant ses murs par saturation. Cela va entraîner un élargissement et un approfondissement du ravin. Le ruissellement, ainsi chargé de sédiments, va traverser le ravin ([Figure 2](#)). Une partie de ces sédiments va se déposer au niveau du sol et lors d'événements de ruissellement exceptionnels, ils vont être mobilisés d'un coup (Roberts *et al.*, 2022).

L'érosion des parois au niveau de la tête et du chenal peut déclencher un effondrement gravitationnel ou des mouvements de masse, entraînant le transport de grands volumes de sédiments le long de la pente (Roberts *et al.*, 2022).

Ainsi, lors de la phase de développement, la tête du ravin se déplace vers l'amont du versant et le ravin s'étend en profondeur et en largeur. Les matériaux issus de cette érosion sont emportés vers l'aval. Selon Makanzu Imwangana *et al.* (2015), le développement est rapide durant les premières années et s'estompe progressivement par la suite.



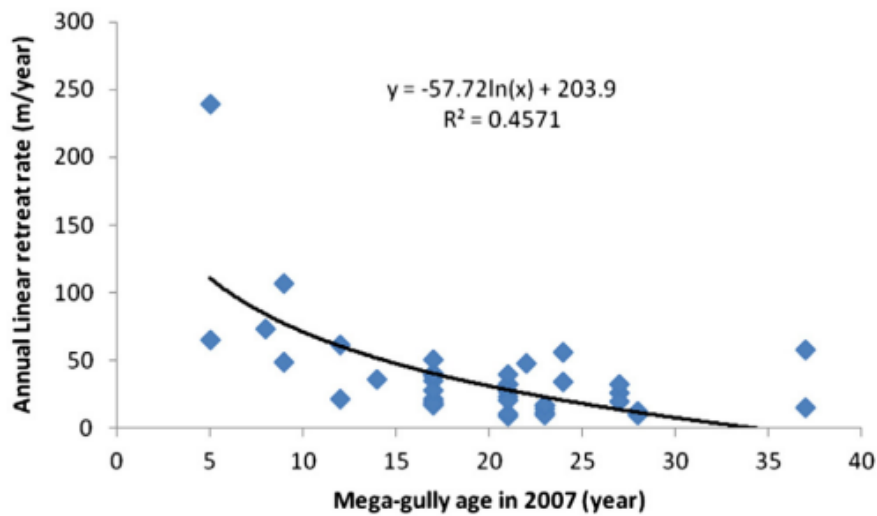
**Figure 2.** Erosion en cascade à la tête du ravin (Shit & Maiti, 2014)

### II. 2. 2. (iii) Guérison

Avec le temps, sans événement catastrophique, le taux d'érosion du ravin va diminuer. Lors de cette phase, appelée la guérison, la végétation commence à grandir dans le ravin.

Le ralentissement de cette croissance a été montré dans plusieurs études, liant ainsi le développement du ravin avec son âge (Vanwalleghem *et al.*, 2005 ; Makanzu Imwangana *et al.*, 2015 ; Vanmaercke *et al.*, 2016). En effet, les ravins semblent fortement évoluer peu après leur apparition, puis, avec l'âge, tendent à se stabiliser ([Figure 3](#)). Sur le graphique ci-dessous, on retrouve l'évolution de 45 ravins urbains à Kinshasa. On peut bien observer une décroissance du retrait des ravins (Makanzu Imwangana *et al.*, 2015). Au fur et à mesure que le ravin s'étend, la pente de la surface du sol au niveau de la tête du ravin et dans la zone de drainage va diminuer. Cette diminution de la pente va avoir pour effet une réduction de l'érosivité du ruissellement. De plus, le développement de la végétation au niveau du chenal et de la tête de ravin ainsi que les interventions humaines vont permettre de stabiliser le ravin (Vanmaercke *et al.*, 2016). Selon Vanmaercke *et al.* (2016), c'est pour ces raisons que l'on peut s'attendre à ce que le taux de retrait de la tête de ravin diminue avec son âge.

Cependant, l'effet du temps sur le retrait de la tête de ravin reste peu quantifié en raison du manque de données sur le long terme. Ces recherches sont généralement limitées à de petites zones d'étude en raison du travail de terrain considérable que ces recherches demandent (Vanmaercke *et al.*, 2021).



**Figure 3.** Retrait annuel de 45 ravins sur base d'informations de terrain (Makanzu Imwangana *et al.*, 2015)

#### II. 2. 2. (iv) Stabilisation

Pour finir, lors du processus de stabilisation, l'ensemble des pentes du ravin se stabilise. L'équilibre entre la résistance d'érosion des sédiments et la puissance du ruissellement est retrouvé. Une couverture végétale suffisante se développe, le régolithe n'est plus mobilisable et une nouvelle couche superficielle se forme (Bhat *et al.*, 2019 ; Agri Learner, 2022 ; Roberts *et al.*, 2022).

#### II. 2. 3. Classification et géométrie

Les ravins possèdent des aspects différents. Afin de les catégoriser, plusieurs classifications ont été proposées : l'une d'entre elles notamment se base sur leurs dimensions. Selon elle, il y a les ravins de très petite taille qui ont une profondeur allant jusqu'à 3 mètres et une largeur n'excédant pas 18 mètres ; les petits ravins qui ont une profondeur de 3 mètres et une largeur supérieure à 18 mètres ; les ravins moyens qui ont une profondeur comprise entre 3 et 9 mètres et une largeur d'au moins 18 mètres et les ravins profonds et étroits qui ont une profondeur de 3 à 9 mètres et une largeur inférieure à 18 mètres ou une profondeur supérieure à 9 mètres et une largeur variable (Bhat *et al.*, 2019). Nous verrons par la suite que nous aurons à faire à des grands ravins généralement profonds et avec une largeur variable.

#### II. 2. 4. Facteurs du ravinement

La localisation des ravins, ainsi que la vitesse de développement, dépend de plusieurs facteurs : la topographie, le type de sol, les précipitations, la couverture et l'occupation du sol (Bhat *et al.*, 2019 ; Agri Learner, 2022 ; De Geeter *et al.*, 2023). Ci-dessous seront détaillés ces différents facteurs.

##### II. 2. 4. (i) Topographie

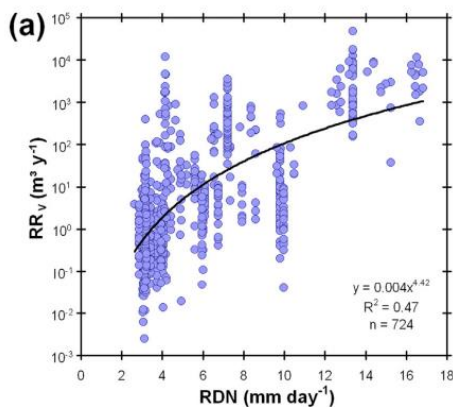
L'érosion va dépendre en partie de la topographie locale qui définit la zone de drainage et le gradient de la pente local (De Geeter *et al.*, 2023 ; Torri & Poesen, 2014). Le but du papier de Torri & Poesen (2014) est d'examiner toutes les publications sur le développement des têtes de ravin et de proposer une marche à suivre afin de développer un nouveau modèle. Le gradient de la pente va directement contrôler l'érosivité du ruissellement, ce qui va faire de la topographie un facteur érosif (Knapen & Poesen, 2010). Il se peut que la topographie soit principalement à l'origine de la formation du ravin et moins de son développement (Poesen *et al.*, 2003 ; Vanmaercke *et al.*, 2016).

##### II. 2. 4. (ii) Type de sol

Le type de sol est un des facteurs qui entre en compte dans la vulnérabilité du sol au ravinement. Ainsi Borrelli *et al.* (2022) montrent que la texture du sol a un impact sur le développement des ravins. Les classes argiles, argilo-limoneuses et limoneuses sont les plus favorables au ruissellement tandis que les sables et argiles sablo-limoneux y sont moins favorables (Borrelli *et al.*, 2022). En plus de la texture, une autre caractéristique est importante : la cohésion (Millecamps, 2020). C'est la propriété la plus influente dans le ravinement du sol car les sols cohésifs sont moins sensibles à l'érosion que les sols non cohésifs (Vanmaercke *et al.*, 2016 ; Millecamps, 2020). Plus la cohésion est faible, plus le ravinement potentiel est fort puisque la résistance du régalithe est faible. Par exemple, comme le sable est perméable le ruissellement est moindre. Cependant la cohésion est faible ce qui va engendrer un retrait plus facile des têtes de ravins. Ainsi, la cohésion est le facteur principal qui permet de mesurer la résistance d'un sol (Vanmaercke *et al.*, 2016 ; Millecamps, 2020).

### II. 2. 4. (iii) Précipitations et Indices

Les précipitations, surtout celles de forte intensité, sont une variable clé dans le développement des ravins car elles jouent un rôle important dans le ruissellement (Vanmaercke *et al.*, 2016 ; De Geeter *et al.*, 2023). Vanmaercke *et al.* (2016) ont réalisé un modèle sur 70 sites à travers le monde. Dans ce modèle le taux de retrait des têtes de ravin est très sensible à l'intensité des précipitations, par exemple la somme des événements pluviométriques qui excède un certain seuil d'intensité. L'intensité des précipitations étant



**Figure 4.** Nuage de points montrant la corrélation entre le taux de retrait volumique (RRv) et le jour de pluie normal (RDN) pour les ravins analysés (Vanmaercke *et al.*, 2016).

considérées s'accroître dans les années à venir, il y a un risque d'augmentation du ravinement (Vanmaercke *et al.*, 2016 ; Lutete Landu *et al.*, 2023). Sur la [Figure 4](#) extraite de l'analyse de Vanmaercke *et al.* (2016), l'intensité des précipitations exprimé par le RDN (c'est-à-dire la moyenne annuelle des précipitations à long terme divisé par le nombre moyen de jours de pluie) montre une énorme influence sur le taux de retrait des têtes de ravin.

Hayas *et al.* (2019), ont réalisé une étude en Espagne sur l'élargissement des ravins. Ils ont mesuré cinq indices de précipitation différents afin d'étudier la relation entre le taux d'élargissement des ravins et les précipitations. Ces cinq indices sont :

- (a) le maximum pluviométrique journalier
- (b) la moyenne pluviométrique annuelle
- (c) le nombre de jours avec des précipitations quotidiennes au-dessus de 13 mm
- (d) le nombre de jours avec des précipitations quotidiennes au-dessus de 20 mm
- (e) les jours de pluie normaux

L'indice (c) a été choisi selon la proposition de Wischmeier and Smith (1978) qui considèrent 13mm comme étant le minimum pluviométrique capable d'engendrer une érosion des sols

pour les loess. L'indice (d), quant à lui, a été choisi selon la proposition de Poesen *et al.* (2003) qui considèrent 20mm comme étant la hauteur de pluie critique nécessaire au développement des têtes de ravin dans les terres cultivées sur des sols argileux, et qui émettent l'hypothèse que le processus d'élargissement des ravins se reproduit de la même manière. Le dernier indice (e) est calculé en divisant le total annuel de pluie par le nombre de jour de pluies pour une année précise. Selon Antonio Hayas *et al.* (2019), l'indice des 13 mm semble être le meilleur indicateur pour estimer au mieux le taux d'élargissement des ravins. Grâce à l'indice (c), à savoir le nombre de jours avec des précipitations quotidiennes au-dessus de 13mm, ils ont pu estimer au mieux le taux d'élargissement des ravins. Selon eux, cet indice pourrait être utilisé pour expliquer l'évolution de la largeur des ravins dans différents scénarios climatiques (Antonio Hayas *et al.*,2019).

#### *II. 2. 4. (iv) Couverture et occupation du sol*

La couverture et les caractéristiques du sol affectent l'infiltration des eaux de pluie et donc le ruissellement provoquant le ravinement (Makanzu Imwangana *et al.*, 2014). Borelli *et al.* (2022) ont ainsi classé la récurrence des ravins en fonction de la couverture et de l'occupation du sol. Le plus grand nombre de sites de ravin répertoriés se trouvaient dans des terres cultivées (33%), ensuite dans les bois (28%) et pour finir dans les prairies (17%) (Borrelli *et al.*, 2022). Cependant, en raison du peu de terres ayant une végétation d'arbustes ou de sols nus présent dans l'étude, il faut relativiser ces résultats. En effet, il convient, non pas d'analyser le nombre absolu de site de ravins, mais bien le nombre de sites de ravins par rapport aux nombres de sites couverture du sol, car certaines couvertures de sol sont surreprésentées par rapport à d'autres. Les ravins dans les terres ayant une végétation d'arbustes ont une occurrence de 3,4%, alors que dans les terres cultivées l'occurrence est seulement de 0,73%. Ainsi, les terres ayant une végétation d'arbustes et celles dont le sol est nu sont proportionnellement les types de couverture du sol qui ont le plus de sites de ravin (Borrelli *et al.*, 2022).

Le changement d'occupation du sol joue un rôle important dans le développement des ravins à cause de l'urbanisation. En effet, celle-ci entraîne inéluctablement une compaction et une imperméabilisation du sol due à la construction de routes et d'habitation (Vanmaercke *et al.*, 2016 ; Makanzu Imwangana *et al.*, 2014). Le rôle de ces convoyeurs axiaux dans notre zone d'étude sera expliqué par la suite.

### II. 3. Les ravins urbains

Comme les ravins sont sensibles à l'occupation du sol, l'urbanisation augmente la probabilité de ravinement. De nombreuses études considèrent que les villes sont plus affectées par les ravins que les zones rurales (Wouters & Wolff, 2010 ; Makanzu Imwangana *et al.*, 2014, 2015 ; Lutete Landu *et al.*, 2023). L'étalement urbain conduit souvent à l'augmentation spectaculaire du pic et du coefficient de ruissellement (Poesen, 2011). Le pic de ruissellement est le ruissellement maximum atteint à un instant donné tandis que le coefficient de ruissellement est le rapport entre la hauteur d'eau ruisselante sur une surface donnée et la hauteur des précipitations (Poesen, 2011). En effet le ruissellement augmente en ville en raison des surfaces pas ou peu perméables tels que les immeubles et les routes. De plus les routes et les fossés perturbent et remplacent le schéma de drainage naturel ce qui entraîne une concentration du ruissellement à des endroits exemptés de problème auparavant (Makanzu Imwangana *et al.*, 2015). Cette imperméabilité du sol et la modification du drainage va conduire à un ruissellement plus important et plus concentré. Quand il excède un certain seuil, celui-ci va engendrer un ravinement. Sur une grande partie de la surface de la Terre, et plus particulièrement dans le tiers monde, cela conduit à un développement rapide de grands ravins, appelés ravins urbains, provoquant des dégâts aux infrastructures et menaçant la population (Poesen, 2011). Ce sont ces grands ravins urbains auxquels nous allons nous intéresser dans cette étude.

La ville de Kinshasa est un laboratoire pour l'étude de ces ravinements urbains. Les recherches menées à Kinshasa traitent de divers sujets telle que la localisation des ravins, leur formation, le taux de retrait de leur tête ou bien l'efficacité des mesures de stabilisation. Une cartographie exhaustive des ravins urbains à Kinshasa existe déjà, répertoriant à l'heure actuelle plus de 500 d'entre eux (Lutete Landu *et al.*, 2023). Néanmoins, aucune étude ne s'intéresse à l'expansion des ravins depuis leur formation jusqu'à aujourd'hui. Il semblait donc pertinent de combler cette lacune.

### III. Contexte de la zone d'étude : Kinshasa

La zone d'étude est centrée sur la ville de Kinshasa, un cas intéressant pour l'étude des ravins urbains, comme explicité ci-dessus. Nous présenterons d'une part les causes de la formation des ravins dans cette ville, à savoir les précipitations intenses, la géologie et la pression urbaine et d'autre part les conséquences engendrées.

#### III. 1. Kinshasa

##### III. 1. 1. Géographie urbaine

Kinshasa, la capitale de la République Démocratique du Congo (RDC) (Figure 5), a connu une croissance démographique exceptionnelle ces dernières décennies. Entre 1957 et 2007, la population de Kinshasa a augmenté par un facteur 20 pour atteindre huit millions d'habitants. En 2016, sa population est estimée à 10,6 millions d'habitants avec un taux moyen de croissance de 5,1%. En 2021, elle atteint quasiment 16 millions d'habitants (Lutete Landu *et al.*, 2023). Au vu de l'explosion démographique dans le pays, il est tout naturel de retrouver

une augmentation significative de la population à Kinshasa. En effet, à l'échelle nationale, la population augmente en moyenne de 3,2% par an et le taux de fertilité est de 6,20 (Unesco, 2021). Par conséquent, elle a été multipliée par 6 en soixante ans. La part de population urbaine est estimée à 43% de la population totale en 2016, ce qui fait de la RDC le troisième pays avec le plus fort taux de population urbaine d'Afrique subsaharienne. Kinshasa pourrait devenir la ville la plus peuplée d'Afrique d'ici 2030 (World Bank, 2018).

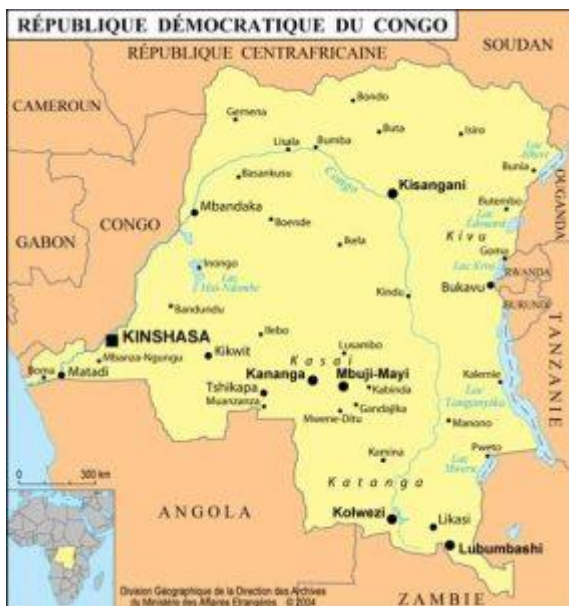
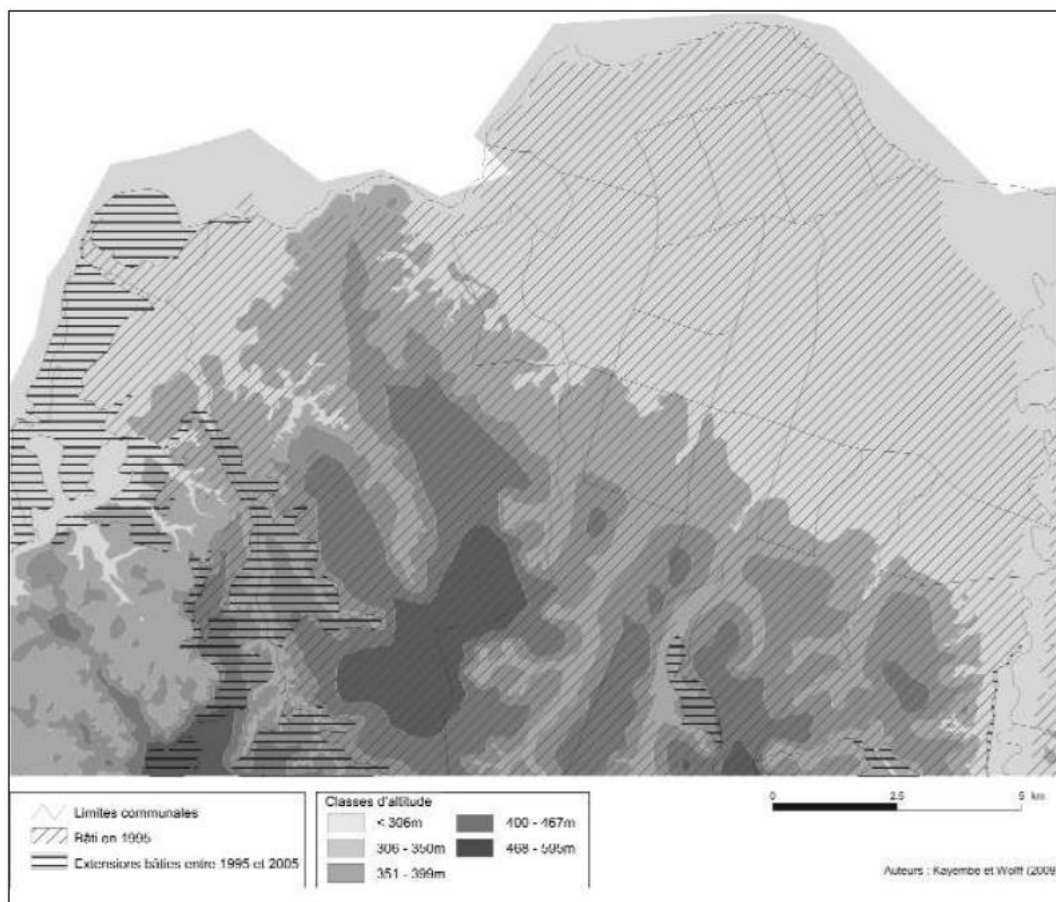


Figure 5. Carte de la RDC et localisation de Kinshasa (Mappemonde, 2023)



La ville historique se situe sur la rive gauche du fleuve Congo, à l'endroit où celui-ci forme un cercle circulaire en forme de croissant appelé le Malebo Pool. A l'origine, Kinshasa a été construite à ce niveau sur une large plaine alluviale. Sa zone urbaine est estimée à environ 600km<sup>2</sup> (Davies, 2015). Makanzu Imwangana *et al.* (2023) compare le site d'implantation de la ville à un gigantesque amphithéâtre : le pool étant la scène, et les collines allant d'Ouest en l'Est les tribunes. L'altitude de la ville varie entre 300 et 675 mètres (Figure 6) (Lutete Landu *et al.*, 2023).



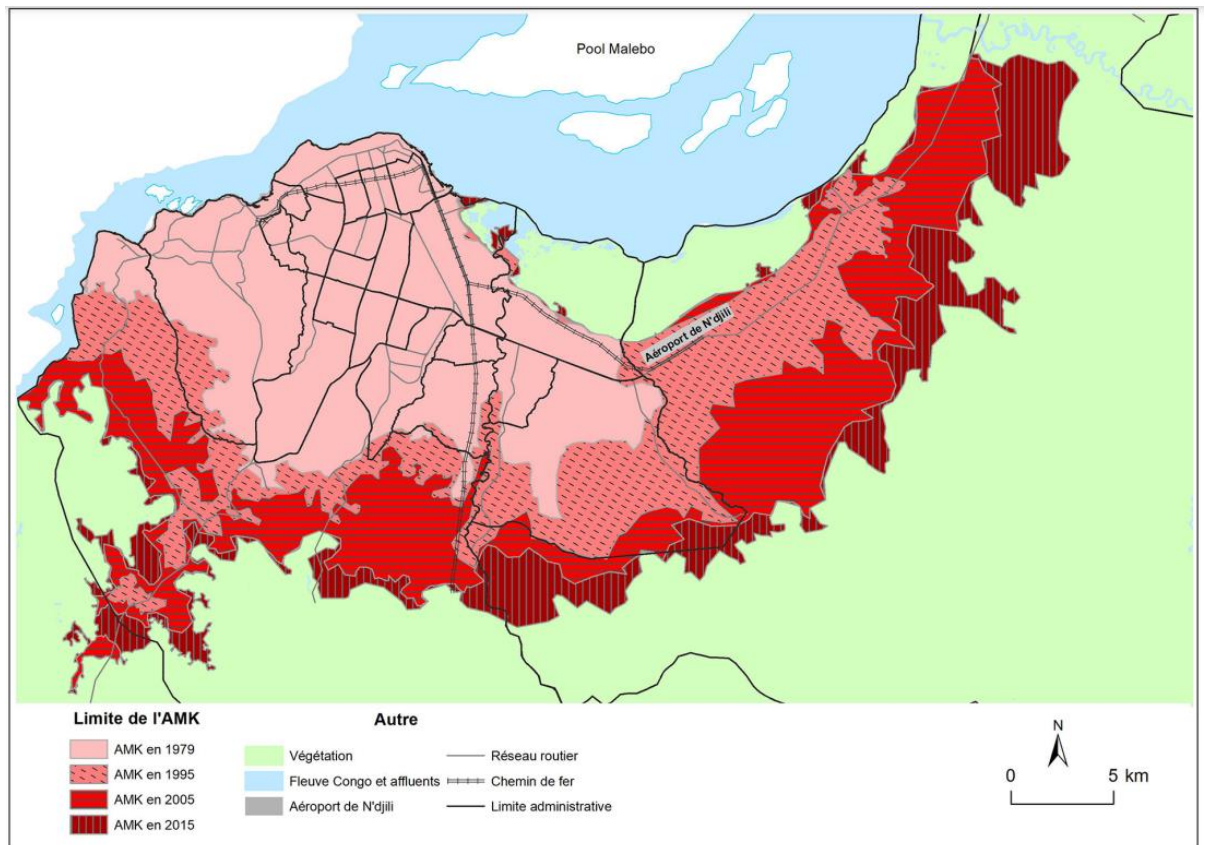
**Figure 6.** Carte topographique de Kinshasa (selon Kayembe Wa Kayembe *et al.*, 2009)

Le modèle d'urbanisation de Kinshasa vient à l'origine du modèle dit colonial ou bien métropolitain caractérisé par un centre historique entouré de cités. Après l'indépendance de la RDC, ce modèle a persisté (Wouters & Wolff, 2010). Puis, faute de moyens, l'état a, de moins en moins, accompagné la croissance urbaine laissant alors place à une urbanisation spontanée. A la fin des années 60 la plaine le long du fleuve était entièrement urbanisée. Les prix élevés de l'immobilier dans le centre historique de Kinshasa ont poussé les plus démunis en périphérie. La ville s'est alors étendue vers le sud-ouest, le long de la route menant au Bas-Congo, ainsi que vers l'est, en direction de l'aéroport de N'djili et même au-delà ([Figure 7](#)). Entre 1957 et 2007 l'espace urbanisé est passé de 94 à 443 km<sup>2</sup>.

Les premiers phénomènes de ravinement urbain sont initiés dans les années 70 coïncidant avec l'expansion de la ville sur les versants des collines sableuses situées au sud (Wouters & Wolff, 2010 ; Makanzu Imwangana *et al.*, 2012). Actuellement, l'urbanisation de Kinshasa consiste en un phénomène non planifié, radioconcentrique, du noyau de la ville, situé sur la rive du fleuve, jusqu'aux hauteurs de plus en plus éloignées des principaux réseaux et équipements urbains (Wouters & Wolff, 2010).

La ville est divisée en 3 zones socio-urbaines. La première, le centre-ville qui s'étend de Ngaliema à l'ouest jusqu'au fleuve Congo au nord et jusqu'au Malebo Pool à l'est. Dans ce centre, on trouve les populations aisées. La seconde, les quartiers populaires, dites cité, se situe dans la partie méridionale de la ville. C'est au sein ces quartiers que réside la majeure partie de la population ayant un faible revenu. La troisième, les cités périphériques, aussi appelées les bidonvilles. Ces dernières occupent une vaste étendue sur les collines du sud et l'est de la plaine. Ces communautés vivant dans la précarité sont un excellent témoin du développement spatial chaotique non planifié de Kinshasa (Davies, 2015).

Les principaux axes de communication autour de Kinshasa sont des routes goudronnées, parsemées de nids-de-poule dus à un mauvais entretien. Les routes intra-urbaines, quant à elles, n'ont généralement pas de revêtement et sont couvertes de boue et de déchets (Davies, 2015).

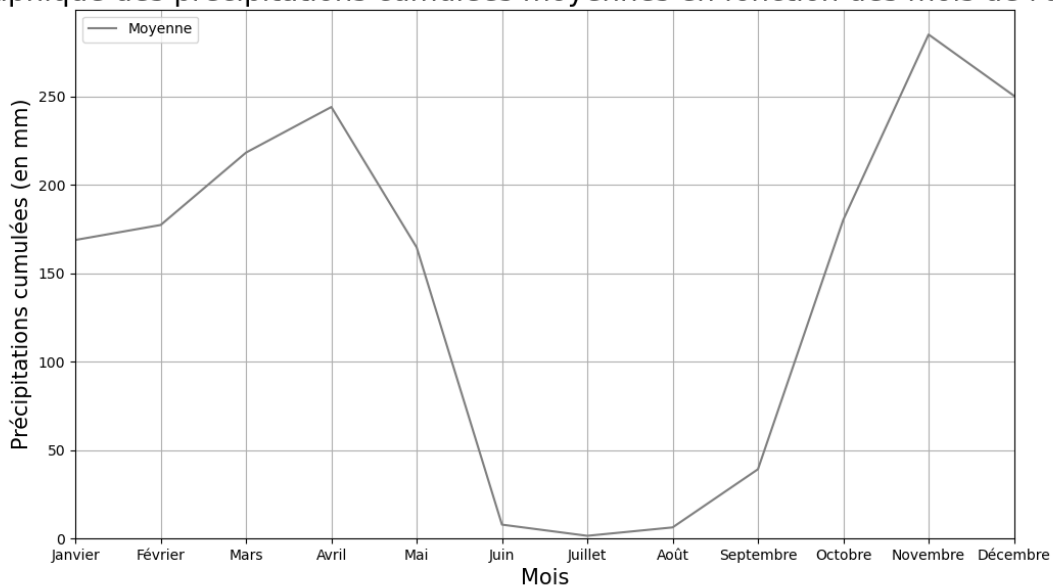


**Figure 7.** Évolution de l'agglomération morphologique de Kinshasa (AMK) entre 1979 et 2015 Le centre historique de Kinshasa est la zone en rouge clair au bord du fleuve Congo. L'expansion urbaine se déroule depuis ce centre historique vers l'ouest et le sud le long du réseau routier (Messina Ndzomo d'après Landsat (SRC : UTM zone 33S)).

### III. 1. 2. Géographie physique et Géologie

Kinshasa présente un climat de savane tropicale à saison sèche (Aw) avec des précipitations annuelles moyennes d'environ 1500 mm. La saison sèche s'étend sur trois à quatre mois, allant de juin à septembre. Le mois le plus sec reçoit en moyenne moins de 60 mm d'eau. La saison des pluies occupe le reste de l'année au cours de laquelle la pluviométrie est nettement plus importante. Sur le graphique ci-dessous on peut voir la moyenne des précipitations cumulées par mois sur une période de 22 ans ; illustrant bien la différence de précipitations entre les mois ([Figure 8](#)).

Graphique des précipitations cumulées moyennes en fonction des mois de l'année

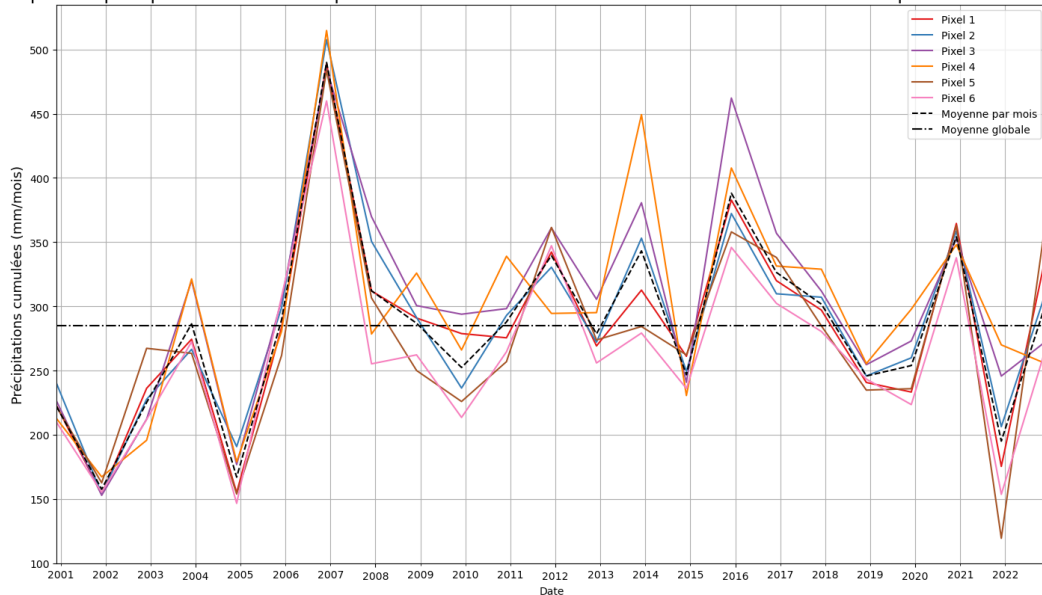


**Figure 8.** Graphique des précipitations mensuelles cumulées de 2000 à 2022 (Courbe, 2023).

Novembre apparaît comme le mois le plus pluvieux avec une hauteur de précipitations de plus de 200 mm. Au cours de ces épisodes de fortes pluies, les inondations sont fréquentes et peuvent endommager des immeubles et des routes (Davies, 2015 ; Makanzu Imwangana *et al.*, 2023). Sur le graphique de la [Figure 9](#) on peut voir les variations moyennes du cumul de précipitation pour chaque mois de novembre dans la zone de Kinshasa sur une période de 22 ans. Ces variations, entre les années sont considérables et on note une moyenne de 290

mm/mois pour novembre. Les valeurs moyennes extrêmes de 20 et 27°C sont enregistrées en juillet et novembre.

Graphique des précipitations cumulées pour les mois de novembre de 2000 à 2022 des différentes pixels et de leur moyenne



**Figure 9.** Graphique des précipitations cumulées pour chaque mois de novembre de 2000 à 2022, c'est à dire la période pour laquelle nous disposons de données relatives aux précipitations. Les pixels correspondent aux lieux de localisations des ravins étudiés dans ce travail (Courbe, 2023).

Aux abords de la ville s'étend une forêt humide, semi-décidue subéquatoriale et péri-guinéenne, constitué d'une végétation herbacée. La végétation a été modifiée par l'homme par le défrichement pour la récolte du bois ou encore l'urbanisation massive non contrôlée. La végétation localisée sur les collines qui bordent la ville correspond à une savane ouverte sub-steppe dégradée (Makanzu Imwangana *et al.*, 2023 ; Lutete Landu *et al.*, 2023 ; Wouters & Wolf, 2010). La superficie des forêts a diminué, passant de 46% des terres en 1960 à 36% en 1982, et puis à 15% en 1987 (Makanzu Imwangana *et al.*, 2023).

La région de Kinshasa est située dans la ceinture de l'Ouest Congo, formée à l'Orogenèse panafricaine. La collision entre le craton de Sao Francisco et celui du Congo a eu lieu du Néoprotérozoïque au début du Paléozoïque, avant l'ouverture de l'océan Atlantique. Dans le sous-groupe Ouest-Congolien du Néoprotérozoïque se retrouve des roches sédimentaires siliciclastiques à grains grossiers sus-jacent (Inkisi). L'Inkisi est présent à Kinshasa avec une épaisseur variant de 600 à 1000 mètres. Il est recouvert par des dépôts du post-Karoo caractérisé par des roches gréseuses et carbonatées. La série débute par des grès marneux du Jurassique sur une dizaine de mètres. Ensuite, se trouve des grès tendres à sables quartzeux du Crétacé (Figure 10). Au Paléogène il y a des grès polymorphes composés de sables éoliens et de lentilles de calcaire ou bien d'argile. L'Holocène (quaternaire), se caractérise quant à elle, par des dépôts d'alluvions. Il s'agit principalement de sables et de limons (Mango-Itulamy, 2015).

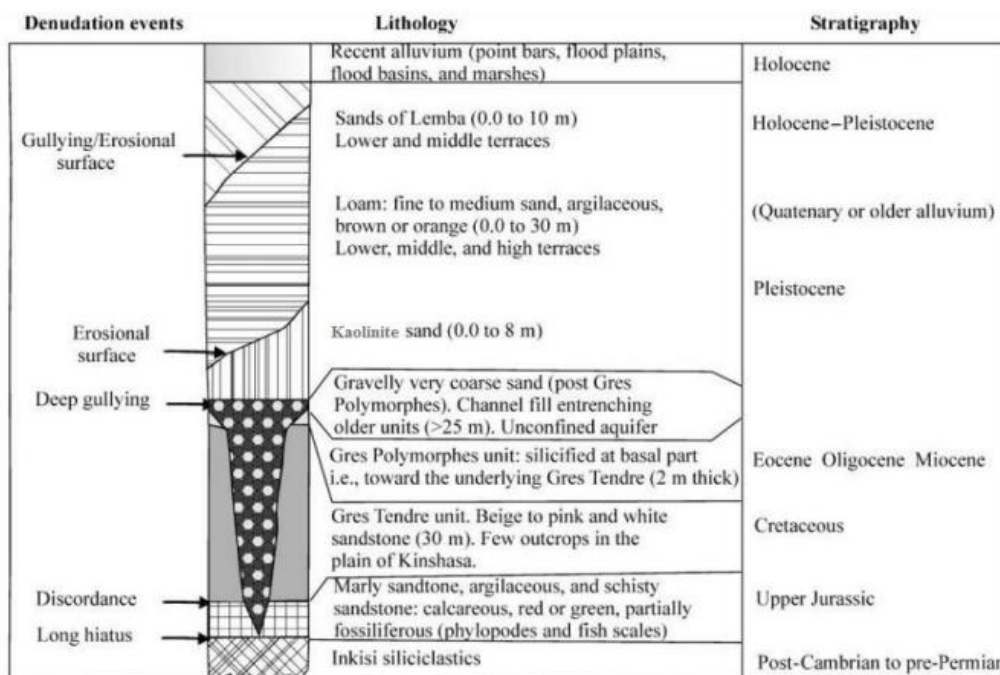
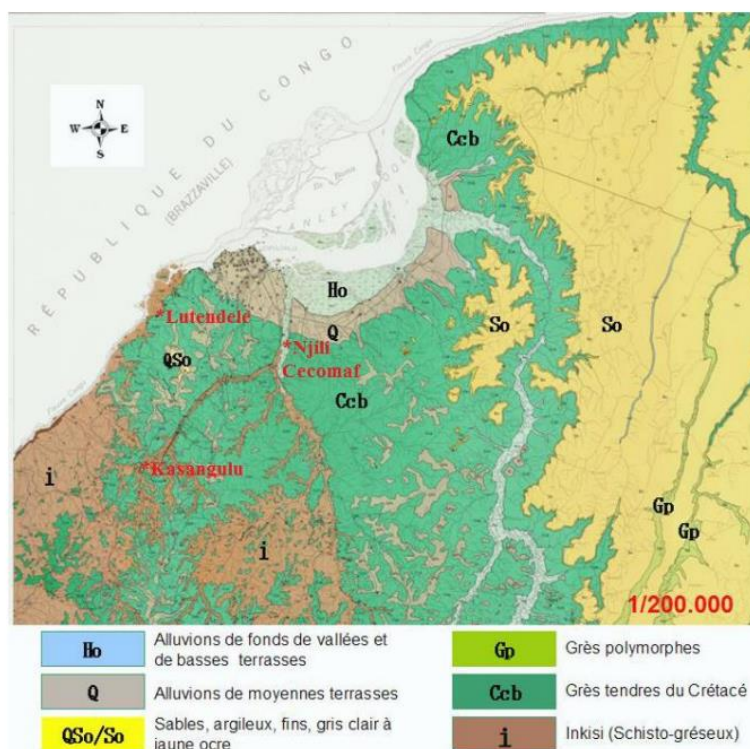


Figure 10. Stratigraphie détaillée de la région de Kinshasa (Lateef *et al.*, 2010).

En comparant avec les trois zones socio-urbaines mentionnées précédemment, la première (c'est-à-dire le centre-ville) est localisée sur les terrasses où se trouvent des alluvions ([Figure 11](#)). La deuxième zone, (c'est-à-dire les cités) qui se trouve au sud du centre-ville, est localisée au niveau des collines. Ces collines sont constituées de grès tendres altérés du crétacé recouvert par endroits de sable argileux. Les formes des collines convexes sont gravées dans ces sables (Davies, 2015 ; Mango-Itulamya, 2015). La troisième zone, représentant les bidonvilles, s'étend à l'est et au sud de Kinshasa sur les grès polymorphes recouverts de sables fins (Mango-Itulamya, 2015).



**Figure 11.** Carté géologique de Kinshasa (Modifié par Mango Italomaya d'après Le musée d'Afrique centrale, 1963)

### III. 2. Le ravinement à Kinshasa

#### III. 2. 1. Ravins urbains à Kinshasa et leurs caractéristiques

Makanzu Imwangana *et al.* (2015) ont constaté que le nombre total et la longueur des larges ravins de Kinshasa grandissent exponentiellement depuis la fin des années 1960. En 308 ravins urbains étaient recensés pour une longueur cumulée de 94.7 km. Ils présentent généralement une largeur trois fois supérieure à leur profondeur (Makanzu Imwangana *et al.*, 2014). Les données de Lutete Landu *et al.* (2023) pour 2020 montrent que la croissance exponentielle du nombre de ravins est loin d'être finie. Entre 2007 et 2020, le nombre de ravins urbains a augmenté de 88% et la longueur totale de 74%. Ces ravins sont des ravins en U, profonds et larges. La largeur du ravin peut dépasser 30 mètres et faire jusque 10 mètres de profondeur (Lutete Landu *et al.*, 2023). Ces ravins peuvent être qualifiés de méga-ravins au vu de leur taille exceptionnelle ([Sec. II. 2. 3](#)). Le ravin de Mataba situé dans la commune de Ngaliema est un exemple notable en raison de sa taille considérable : 1 km de long, 10 m de profondeur et 300 m de large. Ces dimensions inhabituelles réduisent toutes possibilité de stabilisation (Wouters & Wolff, 2010).

Les causes du développement des ravins sont multiples. Il y a des causes naturelles et des causes anthropiques. Plusieurs de ces facteurs peuvent être identifiés.

#### III. 2. 2. Causes naturelles

Dans le cas de Kinshasa, le sol et les fortes précipitations sont déjà deux facteurs explicatifs naturels. Les sols de la ville de Kinshasa sont des arénosols qui ont la caractéristique d'avoir une forte proportion de sable (Berding, 2010). De ce fait, ces sols ne sont pas fertiles, ce qui rend leur culture compliquée (Davies, 2015). Comme mentionné précédemment ce sont les sables qui recouvrent les collines de Kinshasa, les rendant susceptibles au ravinement. Makanzu Imwangana *et al.* (2014) ont mesuré la perméabilité au moyen d'un infiltromètre à anneau cylindrique. Ils ont montré que la conductivité hydraulique des sables de Kinshasa dépasse souvent 0,354 m h<sup>-1</sup>. Cela permet d'absorber les fortes précipitations qu'il y a dans la région et donc d'éviter le ruissellement. Or nous avons vu précédemment que le sable est perméable est donc le ruissellement est moindre, mais la cohésion est faible, ce qui va engendrer un retrait plus facile des têtes de ravins. Les conditions anthropiques qui favorisent



la production de ruissellement va donc jouer un rôle dans le développement des ravins urbains. Dans des conditions naturelles, la génération de ruissellement serait plus limitée.

### III. 2. 3. Causes anthropiques

La cause principale du développement des ravins urbains est anthropique et reliée à l'urbanisation incessante en augmentation exponentielle. Comme dit précédemment, le phénomène de ravinement est initié dans les années 70 qui correspond au développement de la ville de Kinshasa sur les versants des collines sableuses situées au sud (Makanzu Imwangana *et al.*, 2012). Ce développement se poursuit toujours plus haut sur ces collines.

Le changement d'occupation du sol limite l'infiltration de l'eau et augmente le ruissellement sur des terrains peu cohésifs. A Kinshasa, la présence de ravins est souvent liée à l'occurrence de route et d'autres convoyeurs de ruissellement (Makanzu Imwangana *et al.*, 2014). Au cours des fortes précipitations, ce ruissellement n'est pas diffus mais axial et se concentre sur les routes, les rues, les pistes, les fossés etc... La concentration de l'eau le long des axes est principalement dû à la faible capacité d'infiltration du macadam, des surfaces pavées et des routes en terre très compactée. En plus de l'imperméabilisation des sols ce sont donc ces convoyeurs axiaux qui vont favoriser le ruissellement concentré, qui est, comme vu précédemment, le facteur déclencheur du ravinement. Ainsi, à Kinshasa, 91% des têtes des méga ravins sont directement « nourries » par les routes ou les pistes (Makanzu Imwangana *et al.*, 2014).

Dans une étude réalisée sur 308 ravins par Makanzu Imwangana *et al.*, (2012), 139 d'entre eux sont liés aux infrastructures routières et aux pistes piétonnières et 54 au débordement de la voirie et au drainage. Seuls 5% de ces 308 ravins n'ont pas d'étroite relation avec des infrastructures anthropiques. Sans l'urbanisation de ces collines, le développement des ravins serait très limité. C'est l'urbanisation non-contrôlée qui engendre un défrichement, une imperméabilisation des sols et une concentration du ruissellement lors des forts épisodes pluvieux qui va être la cause principale du développement de ces ravins. Ainsi, la modification du drainage naturel du sol augmente l'aléa dans cette région où il était déjà présent (Makanzu Imwangana *et al.*, 2012).

### III. 3. Conséquences de ces ravins : un enjeu humain et socio-économique et solutions mises en place

Au vu de leurs grandes tailles, de leur rapide développement et de leur localisation au sein de zones densément peuplées, les ravins urbains provoquent la destruction de routes, de propriétés privées et de diverses infrastructures. Ils sont également la cause de nombreux accidents et de pertes humaines. Les pertes d'habitats et déménagements forcés augmentent la pauvreté et l'insécurité sociale. Les personnes habitants autour des ravins sont confrontés à un dilemme : d'un côté leur maison ne vaut plus rien sur le marché de l'immobilier car les ravins présentent un danger et, d'un autre côté, un déménagement dans un autre logement demande des ressources financières considérables. De ce fait, des familles se retrouvent à vivre dans le danger constant, leur vie dépendant de l'expansion de ces ravins (Adediji *et al.*, 2013 ; Ilombe Mawe *et al.*, 2021 ; Lutete Landu *et al.* 2023).

De plus, les ravins, qui sont souvent une source majeure de sédiments à l'échelle du bassin versant, peuvent fortement augmenter la connectivité sédimentaire du bassin versant et peuvent avoir des impacts fortement négatifs sur leur fonctionnement hydrologique (Shellberg *et al.*, 2013). Lorsque les sédiments s'accumulent ils acquièrent la fonction de barrage et lorsque celui-ci se rompt, les répercussions sur les populations qui habitent en aval peuvent-être désastreuses.

L'impact de ces ravins urbains ne sont que peu quantifiés. Ilombe Mawe *et al.* (2021) ont récemment fait une étude sur la quantification de l'impact des ravins urbains en RDC où ils estiment qu'un total de 133000 personnes ont perdu leur maison à cause de la formation et de l'expansion des ravins urbains. Selon leur estimation, environ 4000 personnes perdent leurs maisons chaque année à cause des ravins urbains en RDC. En prenant en compte les personnes vivant à proximité des ravins c'est-à-dire à moins de 100 mètres, ils estiment qu'environ 1.2 million de personnes en RDC sont actuellement en danger ou risquent de subir un grave préjudice dans les années à venir. Bien que cette étude soit un premier pas vers la compréhension de l'impact des ravins urbains, d'autres études sont nécessaires afin de bien comprendre les dommages causés par les ravins ainsi que de les prévenir et les atténuer.

Afin de remédier à ces problèmes, différentes solutions plus ou moins efficaces ont été mises en place (Makanzu Imwangana *et al.*, 2015 ; Lutete Landu *et al.* 2023). Les solutions

utilisant la végétation sont les plus courantes. La végétation est connue pour favoriser l'infiltration de l'eau et préserver le sol de l'érosion. Les racines des plantes vont réduire l'érosion et améliorer les propriétés physiques du sol concernant la stabilité structurelle et l'infiltration. De plus, il a été démontré dans le cas des loess européens que la densité de racines est corrélée à une diminution du taux d'érosion par écoulement concentré (Lutete Landu *et al.*, 2023). D'autres solutions qu'un seul recours à la végétation ont été employées. En RDC, Lutete Landu *et al.* (2023) ont réalisé une étude sur l'efficacité des différentes mesures visant à stabiliser les ravins urbains dans les villes tropicales. Ils ont constaté un gros effort de stabilisation des ravins actifs. Sur les trois villes qu'ils ont analysées (dont Kinshasa), au moins 85% des ravins qu'ils ont visités avaient au moins un système de stabilisation mis en place. Ils ont répertorié 13 moyens différents de stabilisation dans le ravin ou à la tête. Certains ont demandé un travail d'ingénierie important tel que la construction de canalisations dans la zone en amont, le renforcement des parois des ravins et la construction d'un canal renforcé dans le fond de ravin. Mais bien sûr de tel travaux sont onéreux. La réhabilitation de 70 ravins urbains à Kinshasa entre 1990 et 2003 a ainsi coûté environ 100 millions d'euros. Ce prix explique pourquoi des travaux de tel ampleur ne sont pas entrepris à une plus grande échelle. Bien que, les mesures permettant de dévier le ruissellement sont celles qui montrent une réduction significative du taux d'expansion, ce sont les initiatives locales ([Figure 12](#)) qui sont le plus souvent mises en place pour arrêter le développement de ces ravins urbains. La population utilise des débris, de la végétation, des sacs de sables etc. Ces techniques sont connues et employées par les communautés habitant à proximité des ravins, pourtant elles ne sont pas assez efficaces. Leur incapacité à ralentir l'expansion des ravins semble donc principalement liée à la taille exceptionnellement grande de ceux-ci (Lutete Landu *et al.* 2023)



**Figure 12.** Mesures prises en 2011 et 2012 à la tête du méga ravin de Laloux. En 2011 on peut y voir qu'un nombre insuffisant de sacs de sables ont été placé à la tête du ravin. En 2012 une construction plus pérenne a été construite : un escalier qui agit comme une gouttière (Makanzu Imwangana *et al.*, 2014)

## IV. Questions de recherche

Ayant mis en évidence le problème que cause le ravinement urbain dans notre site d'étude, mon travail va chercher à obtenir une meilleure compréhension de l'expansion des ravins urbains en fonction des précipitations pour la ville de Kinshasa. Pour cela, notre recherche a été subdivisée en 3 questions auxquelles j'essayerais de répondre :

- 1- Est-il possible d'avoir des informations sur l'historique de l'extension de ravins urbains à Kinshasa grâce aux images satellitaires ?

Notre hypothèse est qu'il est possible de cartographier l'expansion des ravins fréquemment, c'est-à-dire plusieurs fois par an grâce à des images satellitaires disponibles en suffisance pour créer des séries temporelles qui s'étendent sur plusieurs années.

- 2- Comment l'expansion d'un ravin varie t'il en fonction de son âge ?

Nous nous attendons à ce que l'analyse des données d'extension des ravins démontre un lien entre l'âge et le taux d'expansion des ravins. Ce taux d'expansion devrait-être plus important pour les ravins plus jeunes.

- 3- Quel est l'impact des précipitations sur le développement des ravins et quel lien y a-t-il avec l'âge ?

Nous nous attendons à ce que l'analyse des données démontre un lien entre les précipitations et le développement des ravins. Nous nous attendons également à ce que les précipitations soient un facteur déterminant surtout dans les premières années de vie du ravin. Nous allons essayer de déterminer l'indicateur pluviométrique le plus approprié pour expliquer le développement des ravins.

Nous avons créé des modèles de prédiction de la taille relative des ravins urbains et nous nous demanderons donc :

4- Les modèles développés sont-ils performant ? Quelles améliorations peuvent être envisagées pour les améliorer ?

Afin de répondre à ces questions de recherche nous avons numérisé 30 ravins urbains à Kinshasa et tenté de corrélérer leurs âges avec les précipitations. Le but de ce mémoire est de mettre en relation les précipitations et le développement des ravins urbains de Kinshasa en fonction de leurs âges.

## V. Méthodologie

Nous allons ici présenter les différentes étapes de notre méthodologie pour notre analyse. Cette méthodologie n'est pas tirée de la littérature. Il s'agit d'une approche itérative.

### V. 1. Données satellitaires

Afin de répondre à nos questions de recherches nous avons cartographié des ravins urbains à Kinshasa. Cette cartographie est faite via une photo-interprétation de 30 ravins urbains. Ce chiffre de 30 nous a permis d'avoir un échantillon représentatif sur lequel nous avons effectué des analyses statistiques sur leur évolution. Au sein de cet échantillon nous avons choisi des ravins d'âge différents. Cela a permis de caractériser la réponse des ravins aux précipitations en fonction de leur âge. Le but est d'avoir une série d'image qui met en évidence l'évolution du ravin. On a cherché à avoir environ 8-9 images temporelles en moyenne, ceci variant en fonction des images disponibles et de l'âge du ravin.

La qualité des données est primordiale. Il faut donc sélectionner les données les mieux adaptées à notre étude, c'est-à-dire au suivi du développement des ravins urbains à Kinshasa. Afin que cela soit possible il faut avoir un grand nombre d'images à des dates différentes et que l'on puisse distinguer tous changements du ravin sur l'image. C'est pourquoi nos critères de sélection des images porteront entre autres sur la résolution spatiale, la résolution temporelle, la couverture nuageuse, afin de pouvoir voir les ravins, ainsi que la date de la première image disponible en fonction du développement du ravin. La facilité d'accès des données sera également un facteur à prendre en compte.

La résolution spatiale est le critère principal de sélection des données. Avec une résolution spatiale faible on ne pourra pas discerner avec suffisamment d'exactitude l'évolution du ravin. Par exemple, les données des missions Copernicus et Landsat fournissent des données facilement accessibles mais avec une résolution spatiale dans le visible (respectivement 10 et 30 mètres) insuffisante. Elles ont donc directement été éliminées de notre choix. La plateforme Google Earth Pro fournit gratuitement des données à haute résolution spatiale. Mais, pour un même lieu, celles-ci ont une récurrence temporelle longue, c'est-à-dire une période de plusieurs mois entre les images disponibles. Il nous a alors paru intéressant de chercher des données ayant à la fois une bonne résolution spatiale et temporelle.

Nous nous sommes tournés vers les données Planet. En effet, de nouvelles missions avec des satellites plus légers et moins coûteux voient le jour et il est donc intéressant d'essayer de tirer profit de ces nouvelles sources d'informations que nous offre les secteurs privé et public. Planet a trois missions différentes.

- sArchive qui utilise les satellites Rapideye : cette mission date de 2009. Ils ont 5 bandes dans le visible et le proche infrarouge et une résolution spatiale de 5 mètres (Planet, 2021).
- PlanetScope qui utilise 200 satellites Dove CubeSat : Ces satellites ont 8 bandes dans le visible et proche infrarouge et une résolution spatiale de 3 mètres. Le but de cette mission est de comprendre les changements au jour le jour (Planet, 2021).
- Planet Tasking avec 21 satellites Skysat : Ces satellites ont 5 bandes dans le visible, proche infrarouge et panchromatique, une résolution spatiale de 0,5 mètres et une revisite tous les 5 à 7 fois par jours (Planet, 2021). L'utilisation de ces données Planet Tasking semble être une solution adéquate pour constituer une base de données et répondre à nos questions de recherche.

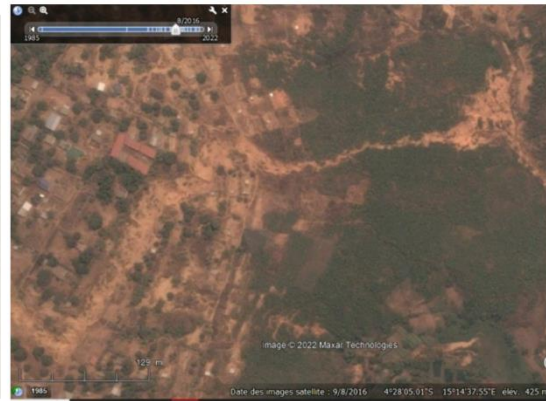
Afin de décider quelles données utiliser nous avons comparé les données que la plateforme Planet nous propose aux données Google Earth Pro.

Concernant les données Planet, il faut créer un compte sur leur site. Ces comptes, normalement payants, sont gratuits pour les étudiants et les chercheurs grâce au programme « Education & Research ». La création du compte est facile et une fois celui-ci validé nous avons accès aux données. Les données sont téléchargeables ou peuvent être directement visionnées sur le site. Malheureusement ce compte gratuit a un désavantage de taille : les données téléchargées ne doivent pas excéder 5000 km<sup>2</sup> par mois. Le but étant d'avoir assez d'images pour reconstruire l'évolution des ravins, il est donc normal que nous soyons amenés à télécharger un grand nombre d'images et donc les km<sup>2</sup> téléchargés augmentent rapidement. Au-delà de cette limite de 5000 km<sup>2</sup>, le compte devient payant (Planet, 2021). Au vu de quelques téléchargements réalisés nous aurions pu cartographier environ 7 ravins. Cette limite est le premier problème rencontré avec les données Planet.



Ensuite, comme dit précédemment la résolution spatiale est un des éléments clé à la bonne réussite de la numérisation des ravins. Les données Google Earth ont généralement une très haute résolution spatiale ( $<1\text{m}^2$ ). Grâce à ces données, on peut clairement numériser les ravins. Pour les données Planet, la résolution spatiale varie en fonction des missions. La mission sArchive avec une résolution spatiale de 5 mètres ne permet pas de distinguer suffisamment les bords des ravins. La mission PlanetScope commence en 2016 seulement et réduit donc les années d'observations à six ans. De plus, bien que la résolution spatiale soit meilleure que pour la mission sArchive ces données ne sont toujours pas à haute résolution spatiale. C'est la mission Planet Tasking qui fournit ces données à hautes résolution. Malheureusement le compte « Education & Research » est limité aux images de la mission PlanetScope avec une résolution spatiale de 3 mètres. Il nous est donc impossible d'avoir accès à ces données hautes résolutions fournies par Planet. De plus, cette mission est récente et ne couvre pas toute la Terre.

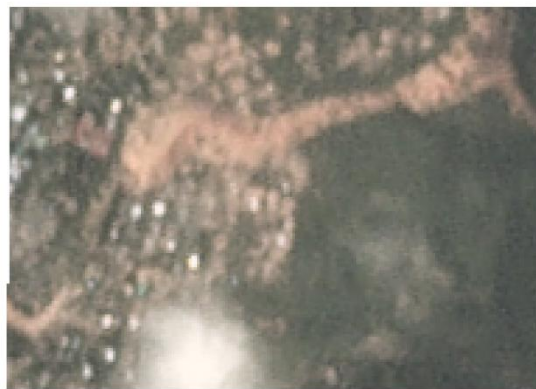
Voici un exemple de ravin urbain ([Figure 13](#)). Les quatre premières images sont issues de Google Earth Pro et les 4 autres de Planet. La différence de résolutions spatiales entre Google Earth et Planet est clairement visible. Les données Planet ne permettent pas de numériser précisément les ravins urbains.



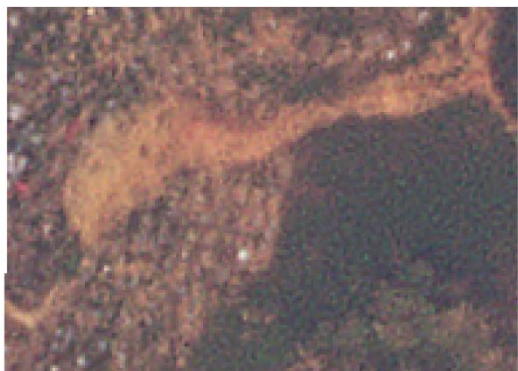
Août 2016



Mars 2019



Avril 2020



Juillet 2021

**Figure 13.** Comparaison entre les images Planet (gauche) et celles à Google Earth Pro (droite) pour différentes dates. Données Google Earth Pro ont une meilleure résolution spatiale.

Cependant, les données que la plateforme Planet proposent ont une meilleure résolution temporelle, c'est-à-dire de quelques jours par rapport à Google Earth où l'intervalle de temps entre deux 2 images peut être supérieur à 6 mois. De plus, sur le site Planet il est possible de prendre en compte plusieurs paramètres tel que la couverture nuageuse afin d'avoir les données les plus optimales. Toutefois le désavantage des données Planet auxquelles nous avons accès, c'est-à-dire celles de la mission PlanetScope, est qu'elles ne commencent qu'en 2016.

Pour finir, les données Planet sont moins faciles à traiter et analyser. Il faut faire les demandes de téléchargement, attendre qu'elles soient validées puis télécharger les données afin de les afficher dans Qgis pour numériser les ravins. Alors que sur Google Earth Pro, il est directement possible de numériser puis d'exporter les polygones sur Qgis.

En conclusion, les Google Earth Pro permet d'avoir des données à très haute résolution spatiale, qui commencent au plus tard en 2008 et qui sont facilement utilisables. Les données Planet fournissent des données avec une bonne résolution temporelle mais la résolution spatiale des données proposées gratuitement n'est pas suffisante que pour permettre une numérisation des ravins urbains précise nécessaire à ce travail.

Bien sûr, d'autres satellites permettent d'avoir des images à hautes résolutions mais les prix sont onéreux. Par exemple pour Pléiade, les images coutent 1,42€ au km<sup>2</sup> (Airbus, 2023).

Grâce à cette comparaison des données disponibles ([Tableau 1](#)). La décision a été prise d'utiliser les données libres d'accès Google Earth Pro qui permettent une numérisation précise des ravins urbains. Nous avons donc des images satellitaires qui vont nous permettre de digitaliser les ravins urbains à Kinshasa.

**Tableau 1.** Comparaison des deux sources de données Planet et Google Earth Pro afin de déterminer quelles données sont les plus appropriés à la numérisation des ravins urbain à Kinshasa. Les données Google Earth Pro ont été choisies.

	Planet	Google Earth Pro
Disponibilité des données	Disponible sur le site Planet avec le program 'Education and Research'	Disponible sur l'application Google Earth Pro
Prix	Gratuit jusqu'à 5000 km <sup>2</sup> puis payant	Gratuit
Utilisation	Téléchargement des tous les produits	Numérisation des ravins directement sur l'application
Résolution spatiale	Avec les données dont nous disposons : 3 m	Variable en fonction des images, environ entre 0,5 m et 1m.
Résolution temporelle	Plusieurs fois par mois	Entre 1 et 4 fois par an

## V. 2. Numérisation des ravins

Une fois le choix des données réalisé, nous avons pu cartographier les ravins urbains dans la zone urbaine de Kinshasa où l'expansion urbaine est grandissante et l'érosion progresse sans cesse. La première étape est la sélection des ravins à étudier. Un ravin intéressant pour notre analyse est un ravin dont la morphologie évolue entre les images dont nous disposons. En effet l'extension d'un ravin au cours de quelques mois est un phénomène intéressant car nous pourrons relier ce développement avec les indices pluviométriques que nous verrons par la suite. Un ravin est également intéressant s'il a une longue période de stabilisation durant la période d'analyse. On va pouvoir regarder les précipitations maximales qu'il y a eu durant cette période et essayer de corrélérer cela avec l'âge du ravin afin de comprendre pourquoi celui-ci n'a pas évolué. La date d'apparition du ravin est également un élément intéressant. Nous avons choisi des ravins ayant des dates d'apparition différentes afin d'avoir un échantillon représentatif pour tous les âges (IV .3.). Pour finir les ravins pour

lesquels peu d'images étaient disponibles où pour lesquels les images présentaient une couverture nuageuse trop importantes ont été écartés.

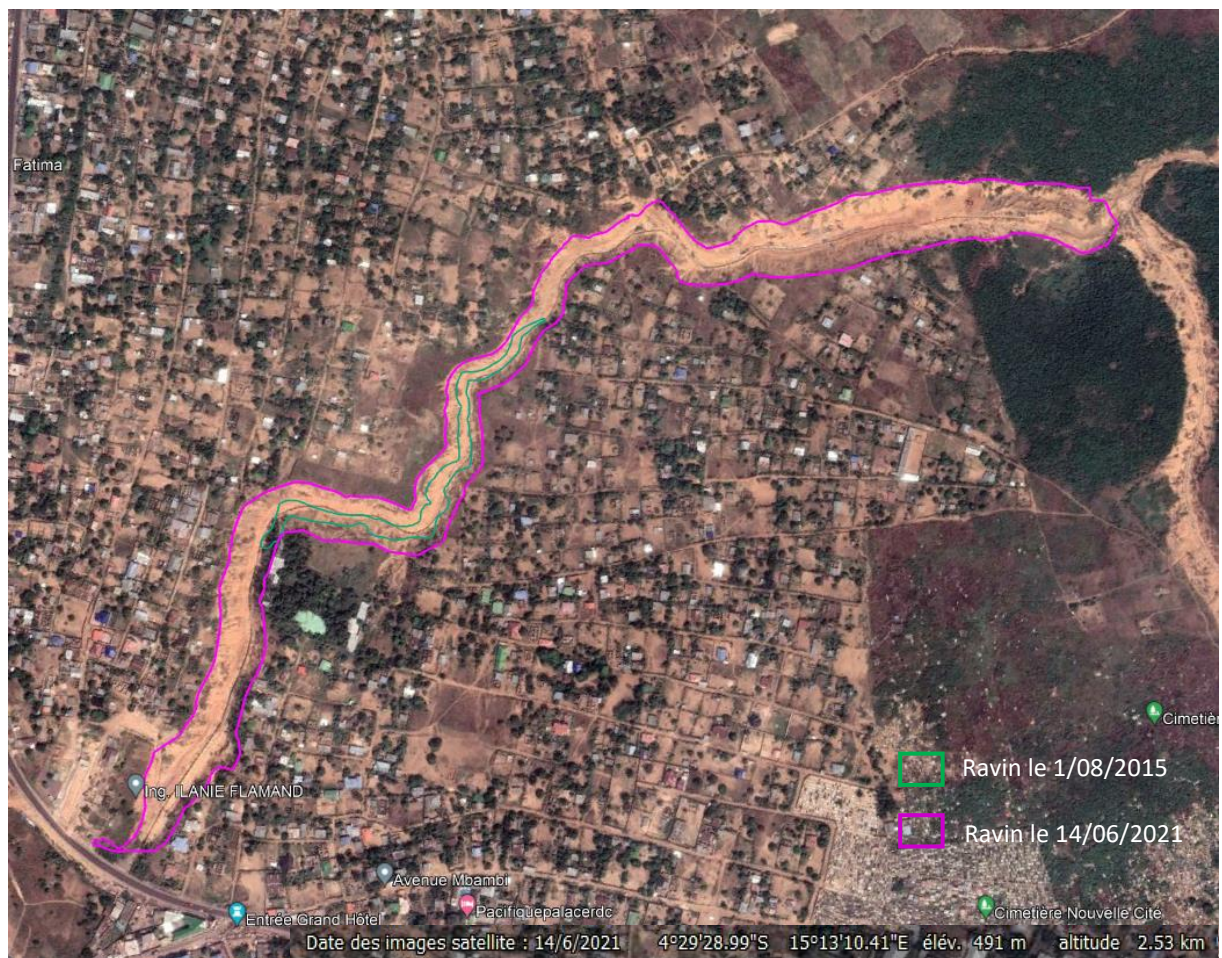
La digitalisation des ravins se fait via une interprétation visuelle des images. C'est pourquoi nous avons besoin d'images de qualité. Certaines images n'ont pas permis la numérisation à cause de la présence de nuages. L'interprétation de ces images est un moment clé durant lequel il faut faire attention aux moindres détails. Il est important de définir un critère unique pour définir les limites de ravin afin d'assurer une cohérence de l'interprétation. Le choix a été fait de prendre comme limite la zone d'affaissement du ravin, c'est-à-dire la zone où on voyait visuellement l'affaissement du sol à cause du ravin.

Lors de la numérisation des photos nous avons constaté des erreurs de géoréférencement. En fonction des années, surtout pour les images les plus vieilles, il y a un décalage. Bien que ce décalage ne soit jamais supérieur à 5 mètres, cela a compliqué les choses pour notre géoréférencement. Lorsque les images sont décalées, il est plus difficile de faire une bonne comparaison de l'évolution du ravin : d'une part la numérisation de la photo précédente ne coïncide plus avec le ravin à la nouvelle date si celui-ci est resté identique. D'autre part s'il a évolué il est bien plus compliqué de bien appréhender les endroits où il s'est développé. Nous avons été confrontés à cette situation à raison de 1 à 2 fois par ravins.

Grâce à l'option remonter le temps disponible sur Google Earth Pro, nous avons étudié la formation des ravins. C'est le but de cette première partie, retrouver la date d'apparition du ravin et suivre son développement. En fonction de la zone où l'on se trouve à Kinshasa les premières images avec une résolution spatiale suffisante datent de 2004 à 2010. Pour les ravins anciens, nous ne disposons donc pas de leur date d'apparition et du début de leur développement. Pour les ravins apparus après 2004, nous avons observé la dernière image sans ravins, la première image après formation et son développement jusqu'à la dernière image disponible. On a ainsi pu noter la date à laquelle le ravin apparaît, puis sa date de développement et on l'a numérisé grâce à l'option « nouveau polygone » disponible sur Google Earth Pro. Si le ravin montre des périodes de stabilité entre certaines photos, nous n'avons pas pu digitaliser une nouvelle image, nous avons alors indiqué les dates pour lesquelles le ravin est resté stable. Nous avons répété cette méthodologie pour toutes les photos disponibles jusqu'à arriver à la plus récente, c'est-à-dire au maximum juillet 2022.

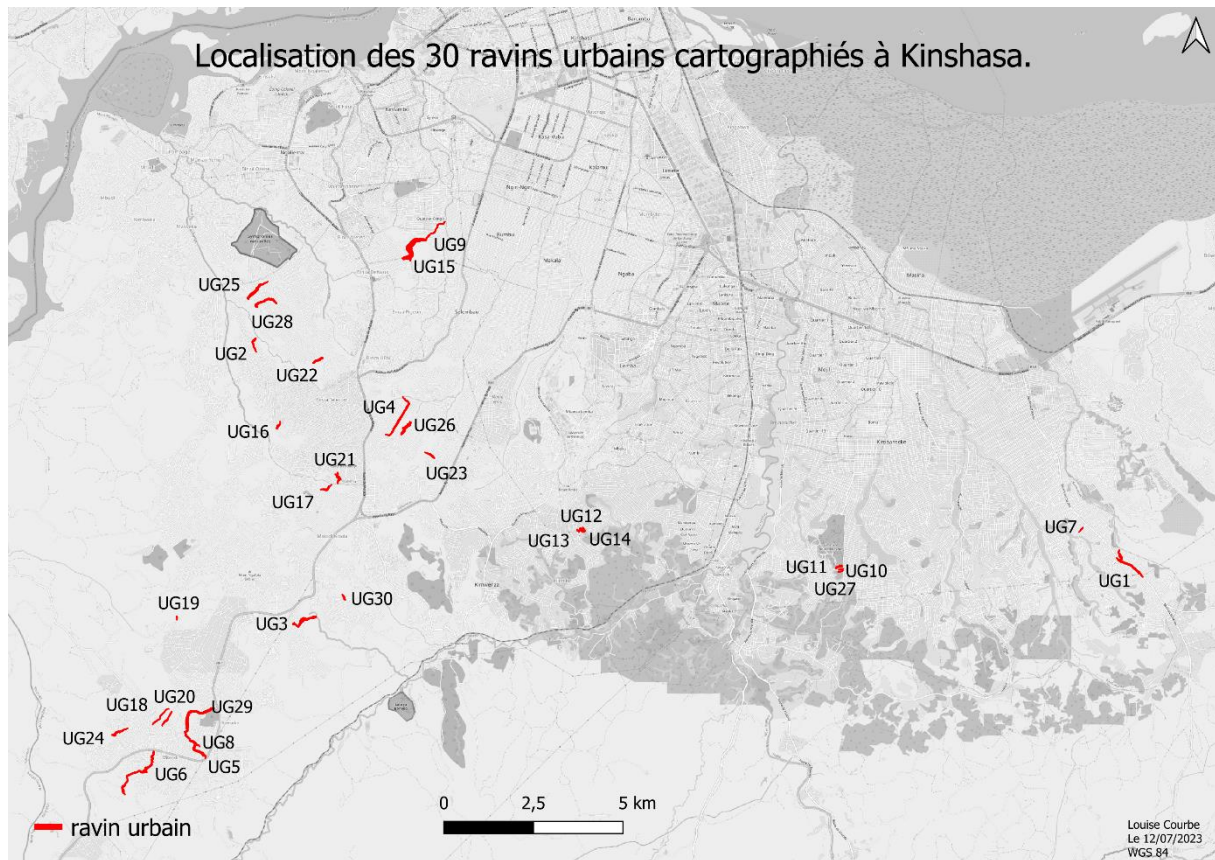
Nous avons ainsi obtenu une numérisation de l'expansion des ravins en fonction des dates des photos disponibles. Ce processus est réalisé pour tous les ravins. Les informations concernant les dates de formation, de développement ou de stabilité sont mises dans un fichier Excel. Ce fichier est ensuite complété avec les aires des ravins. L'initiative a été prise de faire un tableau à double entrée avec les dates de photos numérisées en colonne et les ravins numérisés en ligne. Ce système de classification s'est révélé efficace et a été conservé pour la suite de l'étude. La numérisation de tous les ravins est une grosse partie du travail réalisé ; nous avons créé la base de données sur laquelle toutes nos analyses sont fondées (Annexe).

Ci-dessous une photographie satellitaire de Google Earth Pro datant du 14 juin 2021 ([Figure 14](#)). On peut voir que le ravin a bien évolué entre la première date où il est apparu sur la photo de Google Earth Pro (vert) et juin 2021 (fuchsia).



**Figure 14.** Méga ravin urbain cartographié à Kinshasa. Visualisation de la première (vert) numérisation sur une image du 1/08/2015 et de la dernière (fuchsia) sur une image du 14/06/2021.

Une fois tous les ravins numérisés nous avons obtenus une carte de localisation des 30 ravins (Figure15).



**Figure 15.** Carte de localisation des 30 ravins urbains numérisés à Kinshasa. Numérotation des ravins (UG = Urban Gully + numéro). Fond de carte OpenStreetMap niveau de gris (Courbe, 2023).

### V. 3. Aire des ravins

Une fois la numérisation réalisée, nous disposons donc des cartographies des différents ravins. Le géoréférencement n'étant pas exact les numérisations des ravins ne se superposent pas exactement en fonction des dates. Mais cela n'a que peu d'importance pour nous car nous travaillons essentiellement sur l'évolution des dimensions des surfaces numérisés et non de l'évolution de leur forme ou emplacement. Afin de calculer les aires des ravins nous avons ouvert nos numérisations avec Qgis. Cela a été réalisé pour toutes les séries temporelles de chaque ravin et, grâce à la calculatrice de champ, nous avons calculé l'aire pour chaque date. Une fois ces aires obtenues, nous avons complété le tableau Excel réalisé à l'étape précédente. Nous avons donc obtenu un fichier dans lequel était répertoriées toutes les dates des images satellitaires et les aires des ravins associés. Il est important de noter que nous n'avions pas les mêmes dates pour tous les ravins.

Pour finir, nous avons obtenu un fichier Excel avec les aires de ravins et les dates correspondants aux phases d'expansion et de stabilisation. Ce fichier nous servira à importer pour chaque ravins les dates et les aires correspondantes. Il y a d'une part les dates des images durant lesquels il n'y a pas de modifications de l'aire et donc l'aire des ravins. Il a été considéré que l'âge 0 du ravin était la date de l'image juste avant celle que le ravin apparaisse. Pour les ravins les plus vieux nous n'avons malheureusement pas la date de début du ravin. Nous avons d'une part cherché dans les références existant déjà dans les travaux faits à la KU Leuven. D'autre part pour les ravins où nous disposions seulement d'une fourchette pour la date de naissance nous avons choisi de manière délibérée de prendre l'année 2000, c'est-à-dire la date à partir de laquelle nous avons des informations pluviométriques. En tout cela représente 6 ravins. Nous n'avons pas utilisé ces données pour nos analyses dans la tranche d'âge entre 0 et 15 ans. Nous les utiliserons seulement pour les analyses dans la tranche d'âge de 15 ans et plus, car nous sommes sur qu'ils ont au moins 15 ans.



## V. 4. Pluviométrie

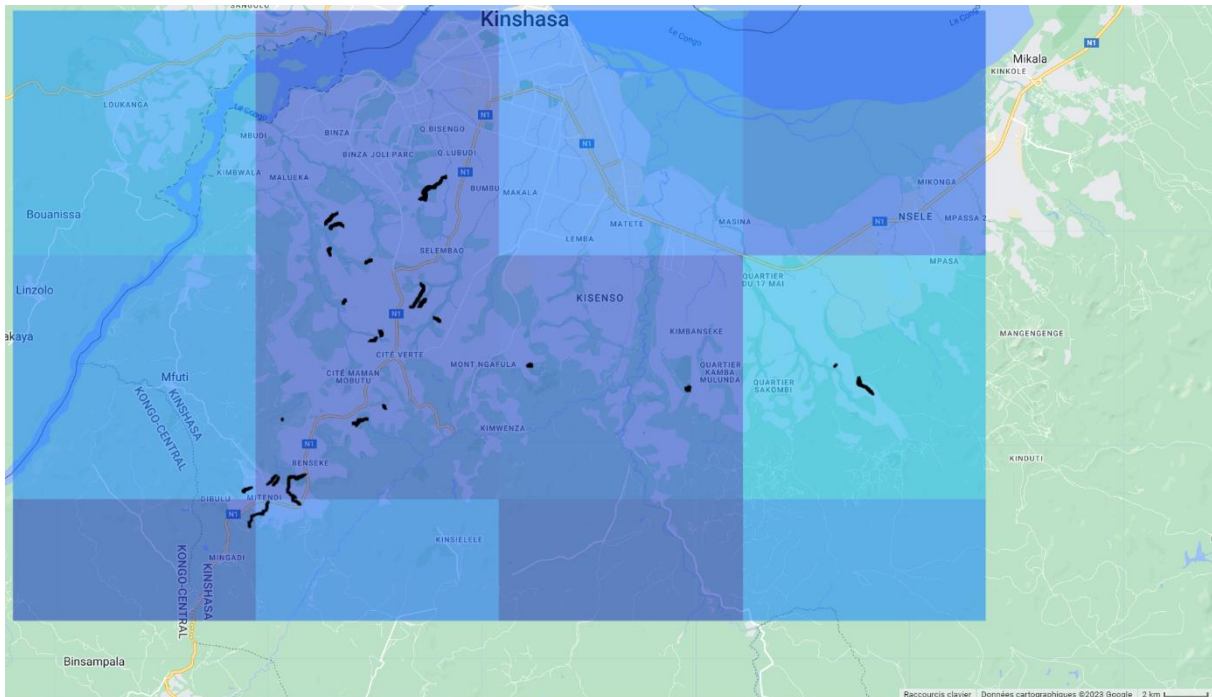
### V. 4. 1. Données

Afin de corrélérer le développement des ravins aux précipitations, des données sur la pluviométrie de la région étaient nécessaires. Il fallait également définir l'intervalle de temps sur lequel travailler. Celui-ci s'étend de la date de capture de la plus ancienne image utilisée pour digitaliser les ravins, à celle de la plus récente, soit de Juin 2000 et Décembre 2022.

Cependant, aucune station météorologique n'a relevé suffisamment de données pour couvrir l'intégralité de cette période. C'est pourquoi, des images satellitaires ont été utilisées. Dans son étude, Elise Monsieurs (2019) s'est servie des données pluviométriques TRMM Multisatellite Precipitation Analysis 3B42 Real-Time product, version 7, afin de les mettre en corrélation avec des glissements de terrain. Ce choix s'est avéré judicieux puisque ces données se sont révélées appropriées pour son travail qui, tout comme celui-ci, traite de phénomènes naturels. En effet, elles présentent de faibles erreurs absolues et ont démontré leur fiabilité lors des épisodes pluviométriques intenses (Monsieurs *et al.*, 2019).

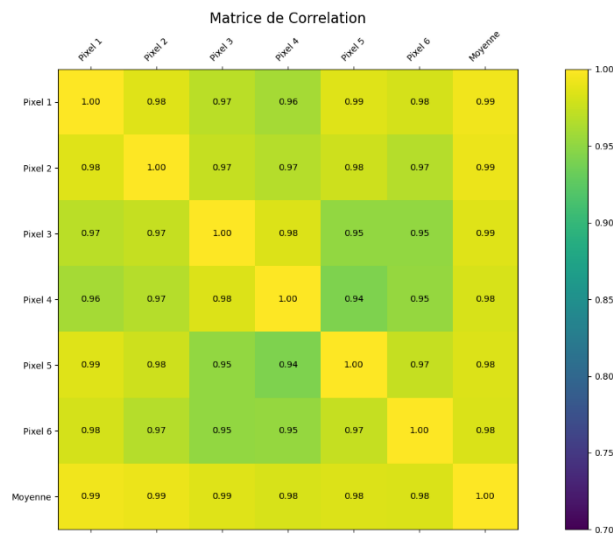
Ces données ne sont malheureusement plus actualisées depuis la fin de l'année 2019. Par conséquent, la Nasa préconise l'utilisation données IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM), GPM signifiant « Global Precipitation Measurement » (Huffman *et al.*, 2019). Pour cette étude, les données GPM IMERG Late Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06 (GPM – 3IMERGHHL) seront utilisées. Elles offrent une résolution temporelle de 30 minutes, spatiale de 0,1° x 0,1° et sont disponibles depuis juin 2000 (Huffman *et al.*, 2019).

Pour les récupérer, la plateforme de Google Earth Engine a permis de les télécharger rapidement. L'intervalle de 30 minutes entre chaque relevé pluviométrique permet une grande précision, mais cela implique un gros volume de données. Les données pluviométriques issues de GPM IMERG ont une résolution spatiale de 10x10 km environ. Ces surfaces seront appelées « pixels » par la suite pour plus de clarté. Kinshasa étant une grande ville, un pixel n'était pas suffisant pour couvrir la zone d'étude (Huffman *et al.*, 2019). Le choix de ne pas faire une moyenne des précipitations des pixels recouvrant la zone s'explique par la volonté de conserver la précision des données. Nous avons donc corrélé chaque ravin à un pixel (Figure 16). Une fois les différents pixels repérés, ils ont été téléchargés les uns après les autres. Au total 6 pixels furent téléchargés et associés aux ravins correspondants. Dans un fichier Excel, formant notre base de données, il a été inscrit le pixel de précipitation correspondant à chaque ravin (Annexe).



**Figure 16.** Pixels pluviométriques des données GPM IMERG et les 30 ravins urbains digitalisé ; au total 6 pixels ont été nécessaire pour avoir les données pluviométriques correspondant à chaque ravin (Courbe, 2023).

Lorsqu'on regarde les précipitations par mois sur la période pour tous les pixels, on voit que la différence entre chacun d'entre eux n'est pas très marquée ([Annexe 1](#)). La matrice de corrélation ([Figure 17](#)) nous montre bien une relation forte entre les pixels et la moyenne. Le pixel 4 est celui qui a une corrélation à la moyenne plus faible que les autres. Cependant ces différences restent marginales et peuvent toujours être dues à des erreurs de mesure. Mais cette variation dans les précipitations mensuelles laisse apercevoir l'importance d'associer à chaque ravin les précipitations du pixel correspondant et non la moyenne de l'ensemble de la zone car on s'intéresse à des événements pluviométriques marquants.



**Figure 17.** Matrice de corrélation des différents pixels pluviométriques et de la moyenne. Corrélation très forte (Courbe, 2023)

#### V. 4. 2. Indices

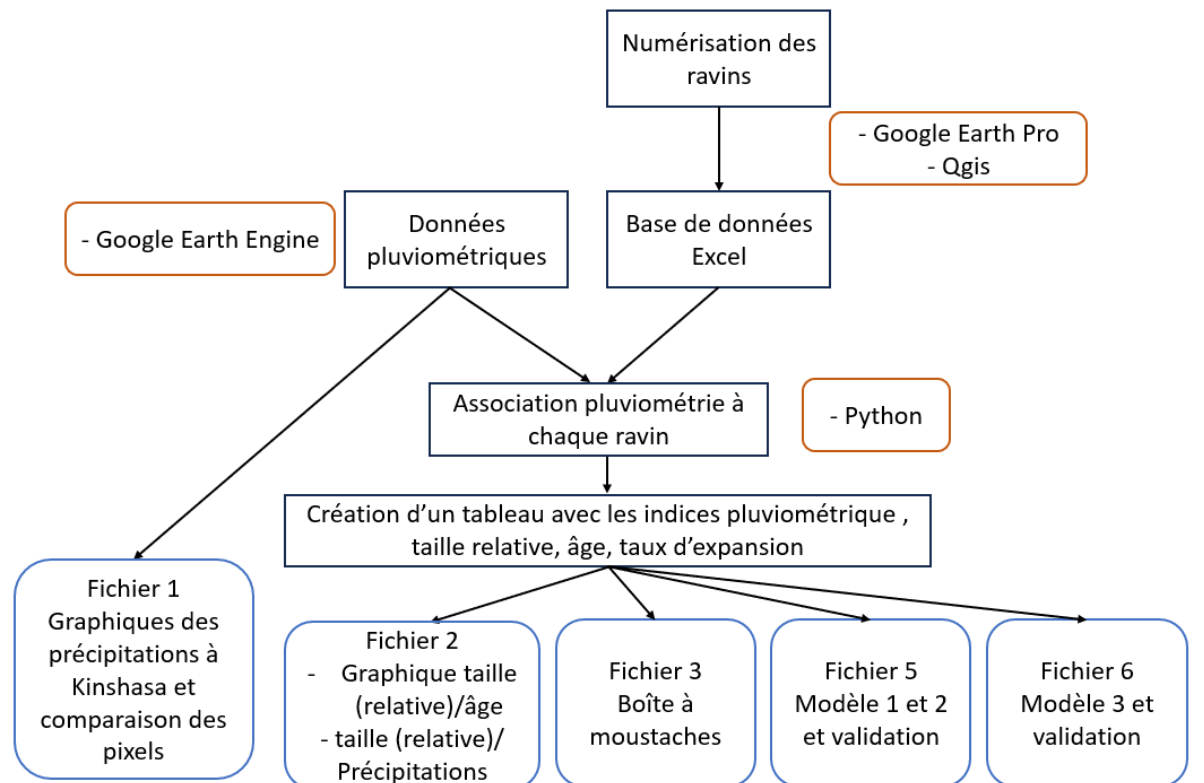
Une fois ces données téléchargées et associées à chaque ravin nous avons créé quatre indices pluviométriques qui seront détaillée dans la partie suivante ([V.5.5](#)).

## V. 5. Traitement des données sous Python

La dernière étape consiste à rassembler et corrélérer toutes les informations dont nous disposons, c'est-à-dire : les phases de développement et de stabilisation des ravins, les aires des ravins en fonction des dates et de leur âge, les précipitations en fonction des pixels et les pixels pluviométriques en fonction de la localisation des ravins.

Pour cela nous avons fait un code en langage Python. Une fois les données importées, le but de ce code est de réaliser des graphiques permettant une corrélation visuelle entre les précipitations et les ravins. L'apprentissage du langage Python ainsi que la réalisation de ce code a été une des parties les plus longues de ce travail. Le diagramme ci-dessous ([Figure 18](#)) met en évidence les principales étapes réalisées de la numérisation des ravins à l'obtention des résultats. Le code réalisé a été séparé en 5 fichiers distinct dans le but d'une meilleure compréhension de ce qu'il a été fait (Annexe).

Ces différents graphiques seront présentés dans la partie « [VI. Résultats](#) ». Ici, les différentes parties concernant le traitement de ces données sont expliquées.



**Figure 18.** Diagramme schématisant des différentes étapes du travail de la numérisation des ravins aux créations des graphiques et les outils utilisés pour y parvenir.

### V. 5. 1. Âge des ravins

L'âge du ravin a été calculé à partir de la date de capture de l'image précédant celle sur laquelle, on peut observer le ravin pour la première fois. A cette date, on considère que le ravin à l'âge 0. Or, pour certains ravins il peut y avoir une différence de 1 an entre la première image d'expansion et l'image où le ravin n'est pas encore visible. Il y a donc des incertitudes non négligeables concernant cet âge. Mais dans certains cas, cette différence est encore plus grande. C'est le cas pour les 6 ravins pour lesquels nous ne disposons pas d'image précédant leur naissance. Nous savons seulement qu'ils ont vu le jour après 1900, 1950 ou 1987. Pour ces 6 ravins, nous ne les considérerons pas lorsque nous nous intéresserons aux âges des ravins, sauf pour nos analyses sur la tranche d'âge de plus de 15 ans.

### V. 5. 2. Taille relative

Lors de l'importation des données, la première chose que nous avons remarqué est la différence entre les grandeurs des aires des ravins. Cela va compliquer toute comparaison entre les ravins. Afin de palier à ce problème, une échelle relative a été réalisée selon la formule suivant :

$$Taille\ relative\ (t) = \frac{Aire\ (t)}{Aire\ maximale}$$

avec t, la date pour laquelle on veut la taille relative du ravin

### V. 5. 3. Taux d'expansion normalisé

Le taux d'expansion normalisé des ravins, c'est-à-dire la différence d'aire du ravin entre deux dates par rapport à l'aire finale, a été calculé.

$$Taux\ d'expansion\ normalisé\ (t) = \frac{Aire(t) - Aire(t - 1)}{Aire\ maximale}$$

avec t, la date pour laquelle l'expansion est calculée et t-1 la date précédente.

### V. 5. 4. Période de stabilisation et d'expansion

Nous disposons dans notre base de données Excel des dates pour lesquels une aire du ravin est disponible. Si le ravin n'a pas évolué, son aire restera la même durant au moins deux dates consécutives. Nous avons dénommé cet intervalle de temps, une période de stabilisation du ravin. Au contraire, si pour deux dates consécutives l'aire du ravin a changé, ce sera une période d'expansion. Grâce à cela, nous avons pu séparer et comparer l'expansion et la stabilisation des ravins, et de comparer la pluviométrie entre les deux. Cette comparaison a été faite à l'aide de plusieurs indices pluviométriques que nous allons détailler.

#### V. 5. 5. Quatre indices pluviométriques

Les indices pluviométriques calculés sont les suivants :

- Précipitations maximales journalières en 30 min (mm/30min) : Il s'agit des 30 minutes consécutives les plus pluvieuses de la journée.
- Précipitations journalières (mm/jour) : Il s'agit des précipitations cumulées sur 24 heures avec un début de la journée à minuit.
- Cumul des précipitations avec un seuil à 13 mm : L'indice de précipitation avec un seuil pluviométrique de 13mm prend seulement en compte les jours pour lesquels les précipitations journalières sont supérieures à 13 mm. Le choix d'un indice de 13 mm vient de Wischmeier and Smith (1978) qui considèrent 13mm comme étant le minimum pluviométrique capable d'engendrer une érosion des sols pour les loess. Cet indice a permis à Hayas *et al.* (2019) d'estimer au mieux le taux d'élargissement des ravins en Espagne ([Sec. II.2.5](#))
- Cumul des précipitations avec un seuil à 20 mm : L'indice de précipitation avec un seuil pluviométrique de 20 mm prend en compte seulement les jours pour lesquels les précipitations journalières sont supérieures à 20 mm. Le choix d'un indice de 20 mm provient du travail de Poesen *et al.* (2003) qui considèrent 20mm comme étant la hauteur de pluie critique nécessaire au développement de la tête de ravin dans les terres cultivées sur des sols argileux ([Sec. II.2.5](#)).

#### V. 5. 6. Modèle et validation

Nous avons réalisé 3 modèles statistiques finaux comprenant 25 des 30 ravins dont le but est de prédire la taille des ravins à l'aide des précipitations et de leur âge. Le choix a été fait de prendre en compte un indice pluviométrique. L'indice dont nous nous servirons pour ces modèles est les précipitations cumulées au-dessus du seuil de 13 mm.

- Modèle 1 : Le premier modèle est linéaire, il comprend 25 ravins et prend en compte seulement les précipitations cumulées au-dessus du seuil de 13 mm.
- Modèle 2 : Le deuxième modèle est linéaire, il comprend 25 ravins et prend en compte les précipitations cumulées au-dessus du seuil de 13 mm et l'âge.
- Modèle 3 : Le troisième modèle est logarithmique, il comprend 25 ravins et prend en compte seulement les précipitations cumulées au-dessus du seuil de 13 mm.

Ces trois modèles sont ensuite validés grâce aux 5 ravins restant. Le but de la validation est de voir si les tailles relatives prédites par les modèles sont bien celles que l'on retrouve dans la base de données pour ces 5 ravins. Si le modèle est performant, les tailles relatives prédites par les modèles seront les mêmes que les tailles relatives de la base de données. Sinon, il y aura une sur ou une sous-estimation de la taille relative des ravins.



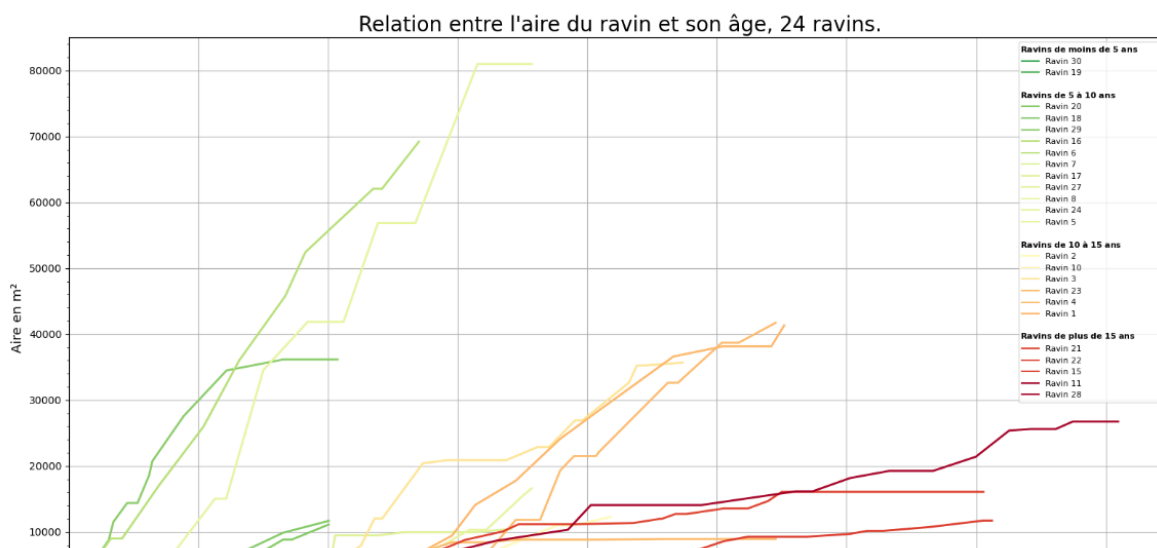
## VI. Résultats

### VI. 1. Cartographie

Lors de la cartographie de ces 30 ravins nous avons obtenu au total 116 phases de stabilisation et 234 phases d'expansion. En moyenne nous avons pu numériser 8 à 9 images par ravin. Le plus gros problème lors de la numérisation des ravins a été l'absence de données anciennes, qui nous a empêché de remonter avant les années 2000. Ce manque d'information est à la source de problèmes d'exactitude concernant l'âge qui auront une répercussion dans notre analyse.

### VI. 2. Âge et taille

Lors de notre cartographie nous avons choisi des ravins de tailles et d'âges différents afin d'avoir un échantillon représentatif. Le graphique de la [Figure 19](#) représente seulement 24 ravins sur les 30 cartographiés. Les ravins non représentés sont ceux dont nous ignorons la date d'initiation du processus, faute d'images assez anciennes ([Tableau 2](#)). L'aire des ravins varie grandement laissant apercevoir la nécessité de trouver une variable plus adaptée pour la comparaison des ravins : la taille relative ([V.5.2](#)).



**Figure 19.** Graphique de la relation entre l'aire des ravins (m<sup>2</sup>) et leur âge pour les 24 ravins pour lesquels on dispose d'une bonne approximation de l'âge. La déclinaison de couleur va du vert, les ravins les plus jeunes, au rouge, les ravins les plus anciens (Courbe, 2023).

Le [Tableau 2](#) représente l'âge d'apparition des ravins et l'incertitude, comme dit précédemment dans la [Section V.5.1](#). La date à laquelle le ravin est apparu n'est qu'une approximation, souvent d'environ 1 ou 2 ans mais dans le pire des cas cette différence peut aller jusque plus de 70 ans ([Tableau 2](#)).

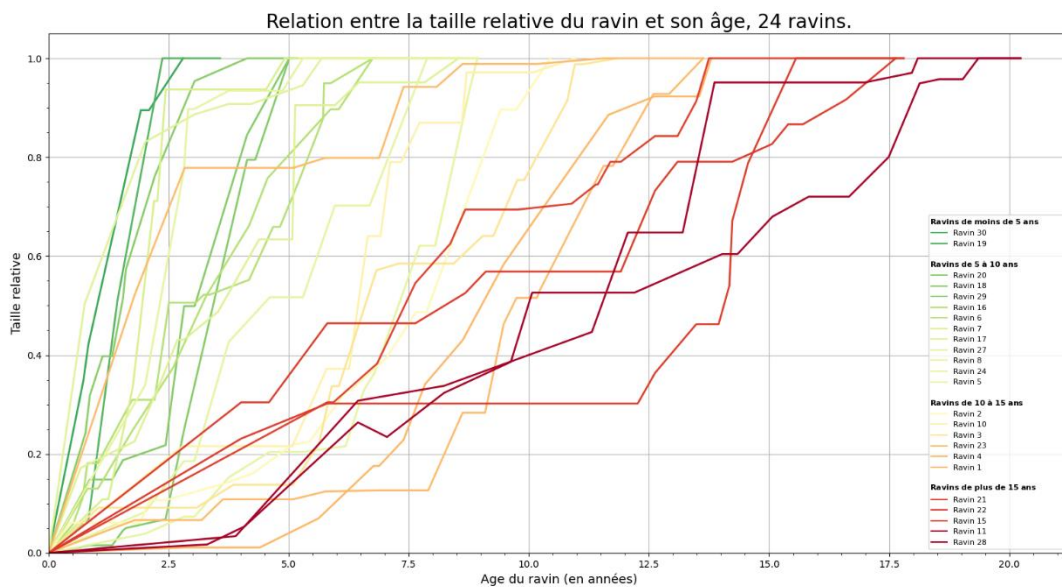
**Tableau 2.** Âges minimum et maximum des ravins arrondis en année et incertitudes associées. Pour les 6 ravins les plus vieux, l'incertitude est indiquée en rouge.

Ravins	Age minimale	Age maximale	Incertitude
UG1	11	13	2
UG2	10	11	1
UG3	11	12	1
UG4	12	14	2
UG5	7	9	2
UG6	6	7	1
UG7	8	8	0
UG8	7	9	2
<b>UG9</b>	18	35	<b>17</b>
UG10	8	11	3
UG11	22	26	4
<b>UG12</b>	12	72	<b>60</b>
<b>UG13</b>	12	72	<b>60</b>
<b>UG14</b>	12	72	<b>60</b>
UG15	14	18	4
UG16	6	7	1
UG17	8	9	1
UG18	4	5	1
UG19	3	4	1
UG20	4	5	1
UG21	12	18	6
UG22	14	18	4
UG23	12	15	3
UG24	7	9	2
<b>UG25</b>	17	122	<b>105</b>
<b>UG26</b>	12	72	<b>60</b>
UG27	8	9	1
UG28	17	20	3
UG29	4	5	1
UG30	2	3	1

### VI. 3. Evolution des ravins

Au vu des aires fortement différentes des ravins, nous avons décidé d'utiliser la taille relative ([Section V.5.2](#)) afin de pouvoir les comparer entre eux.

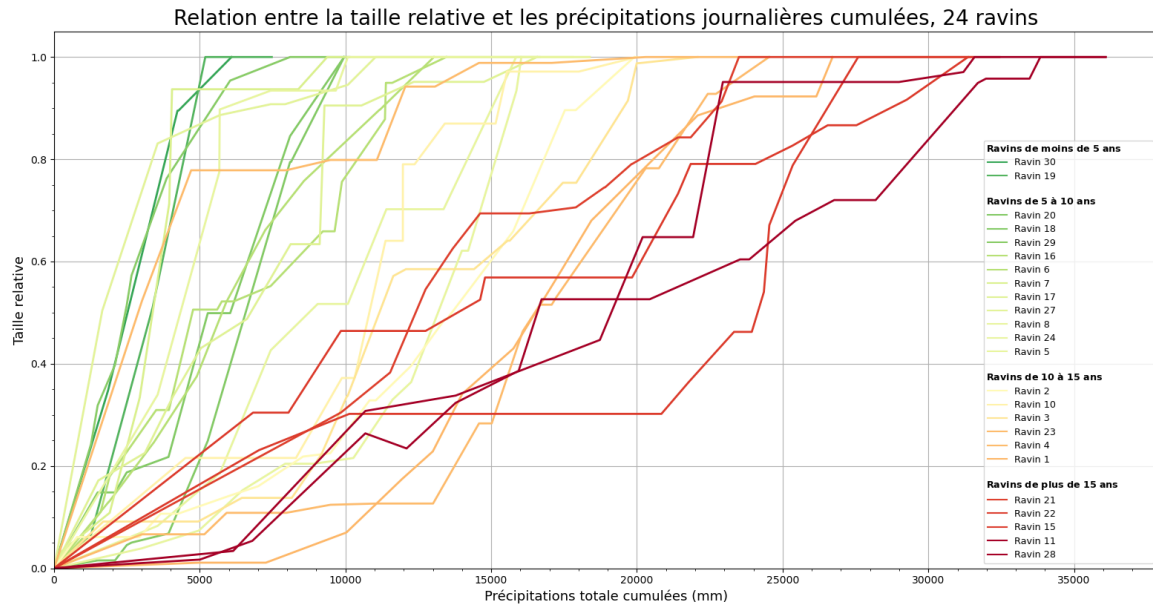
Sur le graphique de la [Figure 20](#), la taille relative des ravins est représentée en fonction de leur âge. Cette représentation permet de mieux se rendre compte des différents âges des ravins et de leurs évolutions. Comme pour le graphique de la [Figure 19](#) seuls 24 ravins sont représentés ici et dans les figures suivantes.



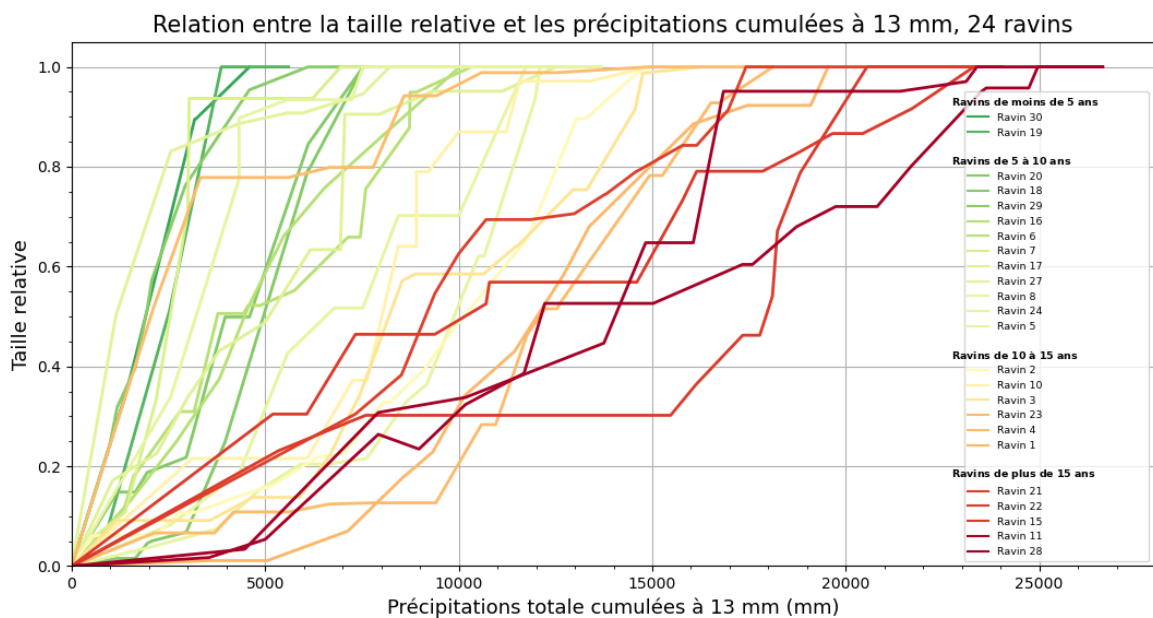
**Figure 20.** Taille relative des 24 ravins selon leur âge. La déclinaison de couleurs va du vert, les ravins les plus jeunes, au rouge, les ravins les plus anciens (Courbe, 2023).

Les deux graphiques suivants ([Figure 21](#) et [22](#)) décrivent l'évolution de la taille relative des ravins en fonction des précipitations. Le premier ([Figure 21](#)) montre la taille relative en fonction des précipitations cumulées. Le second ([Figure 22](#)) montre la taille relative en fonction des précipitations cumulées au-dessus du seuil journalier de 13 mm.

Il ressort de ces deux graphiques que les tendances des courbes sont similaires mais que l'échelle des abscisses change. Les faibles précipitations semblent bien avoir une moindre importance dans la tendance générale de l'évolution du ravin.



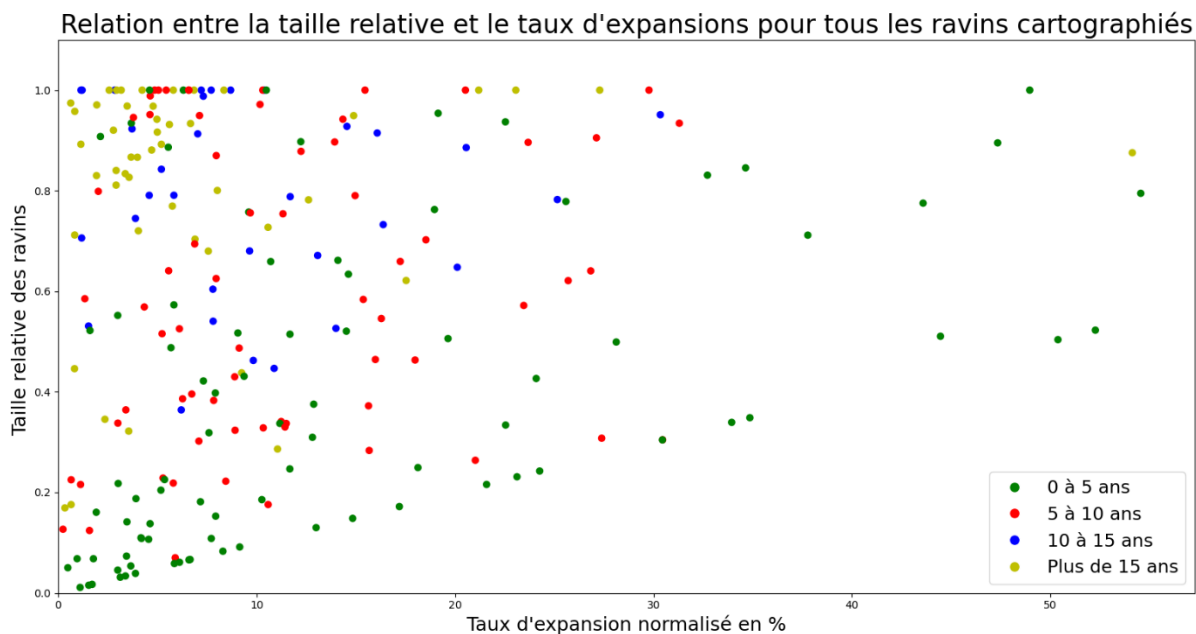
**Figure 21.** Graphique de la taille relative des ravins en fonction des précipitations journalières cumulées en mm pour les 24 ravins dont on dispose des dates de début (Courbe, 2023).



**Figure 22.** Graphique de la taille relative des ravins en fonction du cumul des précipitations au-dessus de 13 mm pour les 24 ravins dont on dispose des dates de début (Courbe, 2023).

## VI. 4. Expansion

Le graphique de la [Figure 23](#) montre la relation entre la taille relative et le taux d'expansion normalisé pour les 30 ravins cartographiés. Pour les 6 ravins dont la date de début est antérieure à l'an 2000, seule la tranche d'âge 15 ans et plus sera représentée. Le taux d'expansion normalisé est l'expansion du ravin entre 2 images consécutives divisé par la taille de la dernière image disponible ([V.5.3](#)). Les expansions ont été colorées en fonction de l'âge du ravin. Globalement la première tranche d'âge montre une taille relative basse et un taux d'expansion relativement élevé alors que la dernière tranche d'âge montre une taille relative élevée et un faible taux d'expansion.



**Figure 23.** Graphique de la relation entre la taille relative des ravins et le taux d'expansions normalisé en % pour tous les ravins cartographiés (Courbe, 2023).

## VI. 5. Relation précipitations-évolution des ravins

Nous nous sommes posé les questions suivantes : Est-il possible de montrer que l'expansion des ravins urbains dépend des précipitations ? Quel indicateur va le mieux expliquer l'expansion des ravins ? Quelle est l'importance de l'âge dans la relation entre le développement des ravins et la pluviométrie ?

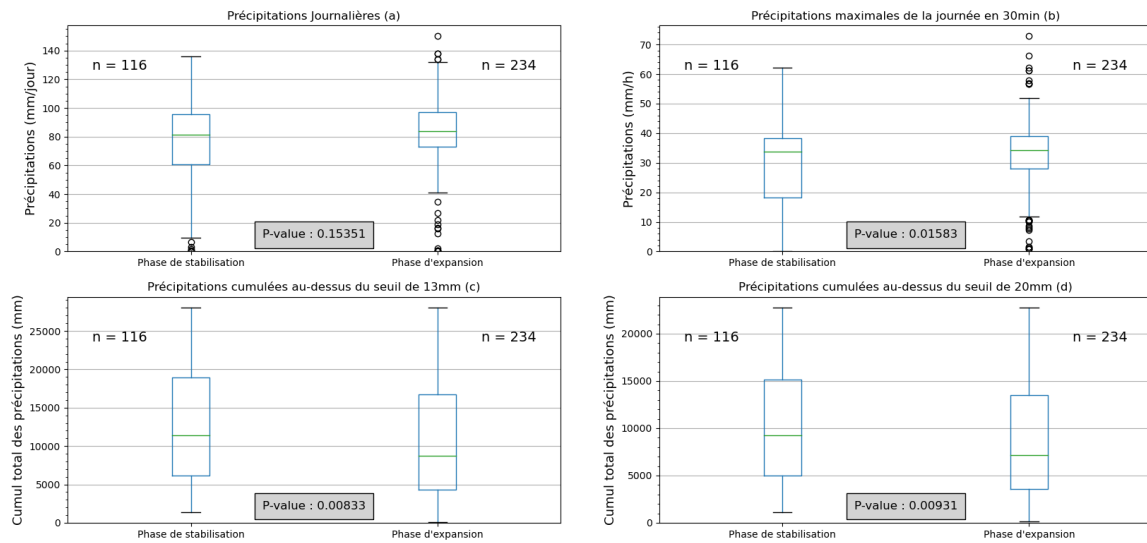
Afin de répondre à ces questions, des boîtes à moustaches ont été réalisées. Le but est de comparer les indicateurs pluviométriques d'une part durant les phases d'expansions d'autre part durant les phases de stabilisation.

Le test statistique de Mann-Whitney a été réalisé afin de vérifier s'il existe une différence entre les phases de stabilisations d'expansions pour chaque indice. Nous avons utilisé ce test car il ne nécessite pas que les données soient distribuées normalement. Il est basé sur une différence de tendance centrale.

- Hypothèse nulle (H0) : Il n'y a pas de différence de tendance centrale entre les deux phases, ce qui veut dire que les valeurs des indices pluviométriques ne sont pas significativement différentes entre les phases d'expansion et de stabilisation.
- Hypothèse alternative : Il existe une différence de tendance centrale entre les deux phases, ce qui veut dire que les valeurs des indices pluviométriques sont différentes entre les phases d'expansion et de stabilisation.

La [Figure 24](#) représente les boites à moustaches pour tous les ravins cartographiés, tout âge confondu. La p-valeur est  $>0.05$  seulement pour la [Figure 24](#) (a), c'est-à-dire pour l'indice pluviométrique représentant le cumul maximum de précipitations sur la journée. Pour les 3 autres indices pluviométrique cela veut dire que l'hypothèse nulle est rejetée et donc qu'il y a une différence de tendance centrale entre les phases de stabilisation et d'expansion.

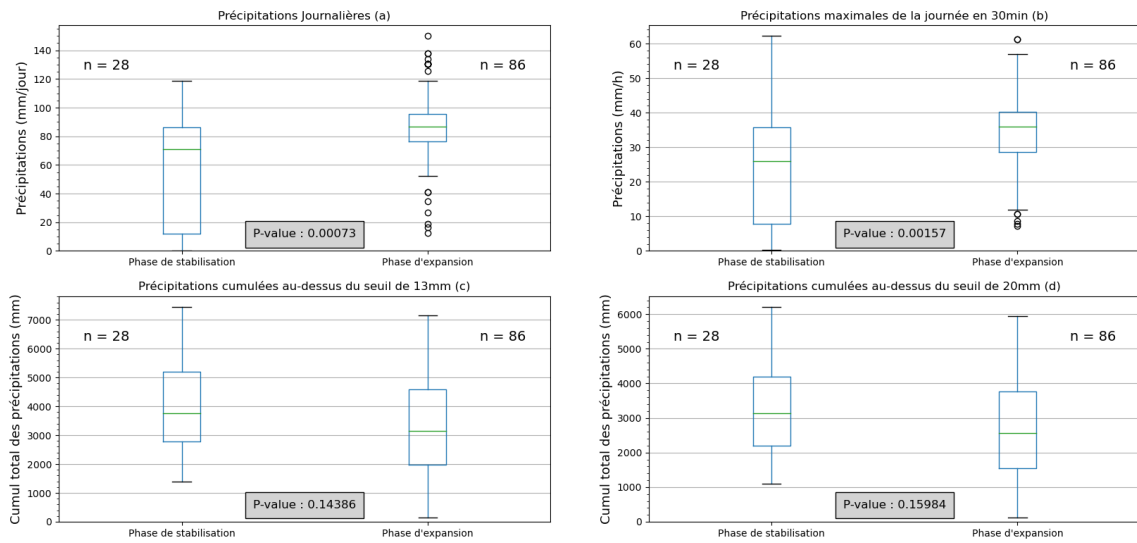
Boîtes à moustaches pour les 30 ravins.



**Figure 24.** Boîtes à moustaches pour les 30 ravins cartographiés des phases d'expansion et de stabilisation. (a) Précipitations journalières en mm. (b) Précipitations maximales tombées en 30 minutes. (c) Cumul des précipitations au-dessus d'un seuil de 13 mm. (d) Cumul des précipitations au-dessus d'un seuil de 20 mm. (Courbe, 2023).

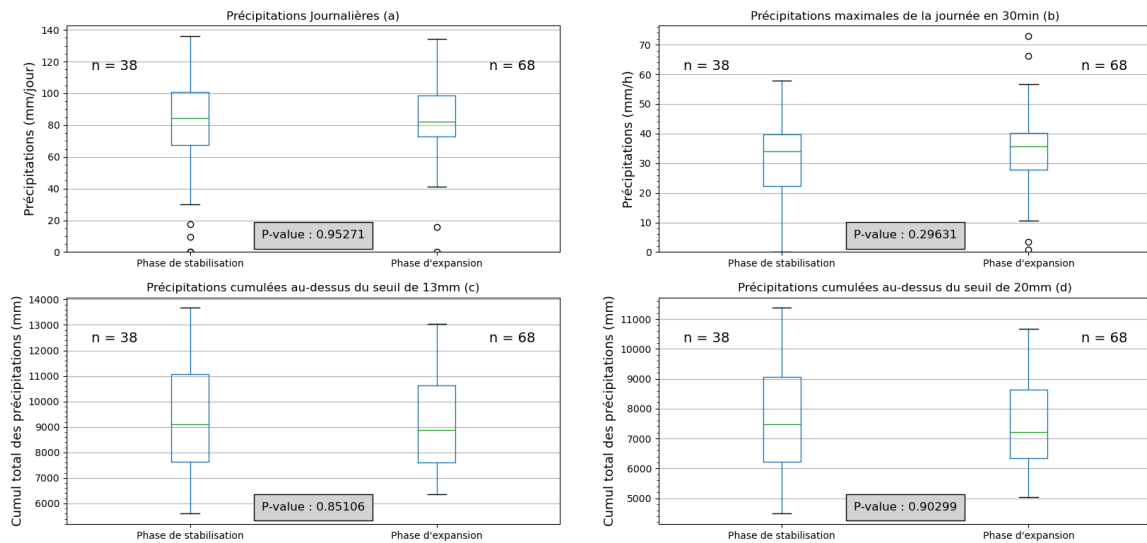
Considérons maintenant nos données selon des tranches d'âges de 5 ans (Figure 25, 26, 27 et 28). Seulement pour la tranche d'âge des ravins de moins de 5 ans, la p-valeur est significative pour le cumul maximal de précipitations sur la journée et les précipitations maximales en 30 minutes. L'influence des précipitations serait donc beaucoup plus marquante en début de vie des ravins.

Boîtes à moustaches pour les ravins de moins de 5 ans



**Figure 25.** Boîte à moustaches pour les 30 ravins cartographiés des phases d'expansion et de stabilisation lorsque les ravins ont entre 0 et 5 ans. (a) Précipitations journalières en mm. (b) Précipitations maximales tombées en 30 minutes. (c) Cumul des précipitations au-dessus d'un seuil de 13 mm. (d) Cumul des précipitations au-dessus d'un seuil de 20 mm. (Courbe, 2023).

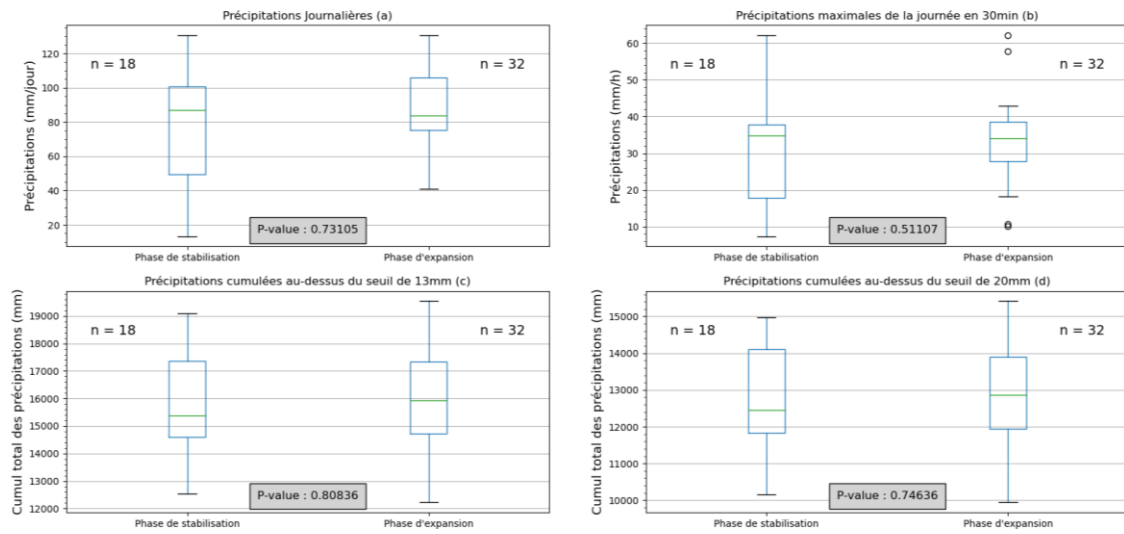
Boîtes à moustaches pour les ravins de 5 à 10 ans



**Figure 26.** Boîte à moustaches pour les 30 ravins cartographiés des phases d'expansion et de stabilisation lorsque les ravins ont entre 5 et 10 ans. (a) Précipitations journalières en mm. (b) Précipitations maximales tombées en 30 minutes. (c) Cumul des précipitations au-dessus d'un seuil de 13 mm. (d) Cumul des précipitations au-dessus d'un seuil de 20 mm. (Courbe, 2023).

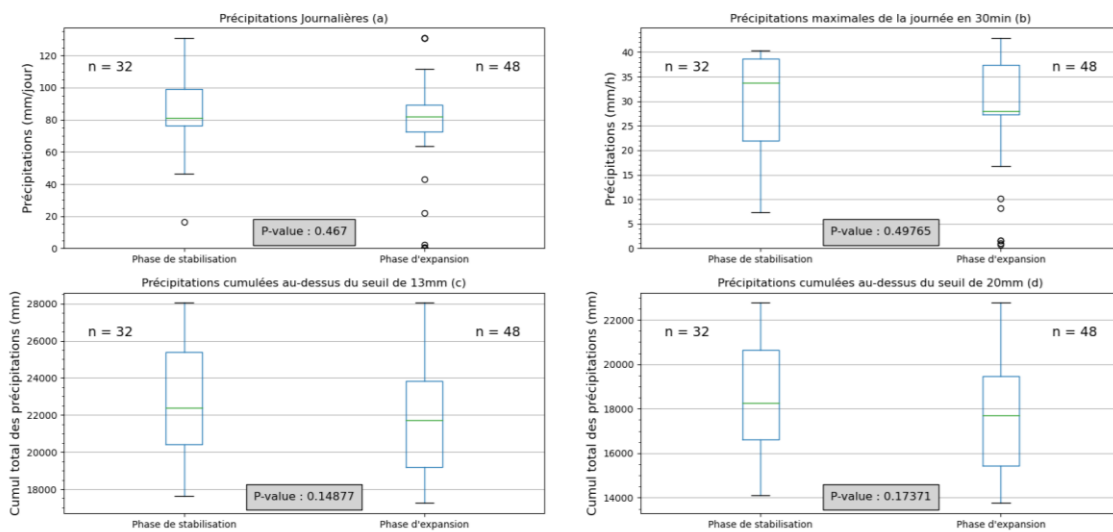


Boîtes à moustaches pour les ravins de 10 à 15 ans



**Figure 27.** Boîte à moustaches pour les 30 ravins cartographiés des phases d'expansion et de stabilisation lorsque les ravins ont entre 10 et 15 ans. (a) Précipitations journalières en mm. (b) Précipitations maximales tombées en 30 minutes. (c) Cumul des précipitations au-dessus d'un seuil de 13 mm. (d) Cumul des précipitations au-dessus d'un seuil de 20 mm. (Courbe, 2023).

Boîtes à moustaches pour les ravins de plus de 15 ans



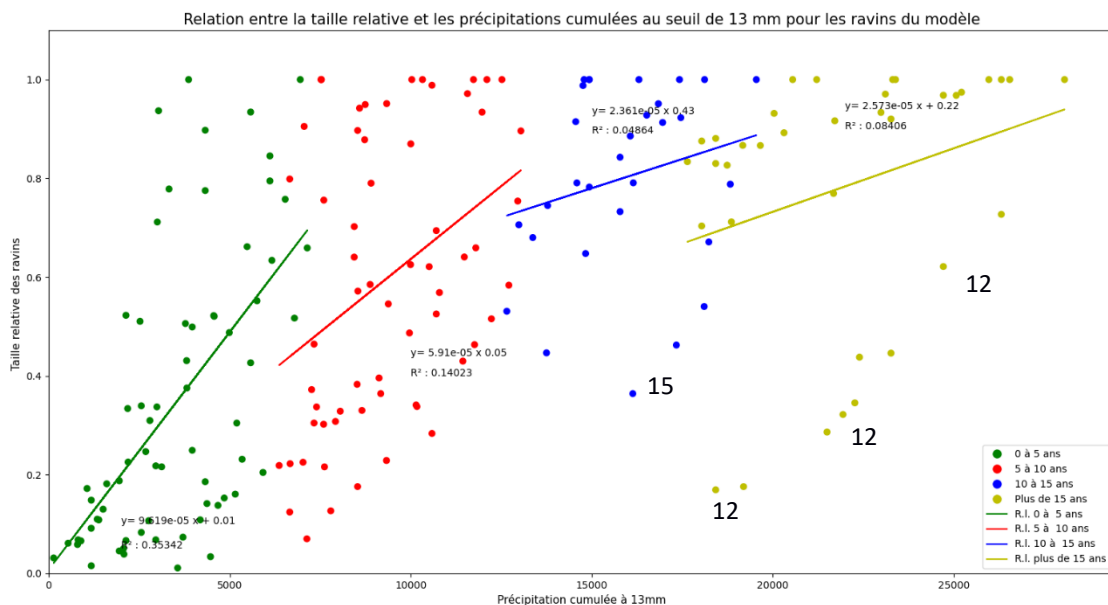
**Figure 28.** Boîte à moustaches pour les 30 ravins cartographiés des phases d'expansion et de stabilisation lorsque les ravins ont plus de 15 ans. (a) Précipitations journalières en mm. (b) Précipitations maximales tombées en 30 minutes. (c) Cumul des précipitations au-dessus d'un seuil de 13 mm. (d) Cumul des précipitations au-dessus d'un seuil de 20 mm. (Courbe, 2023).

## VI. 6. Développement du modèle

Comme mentionné précédemment ([V.5.5](#)) nous avons créé des modèles de régression basés sur 25 des 30 ravins cartographiés. Les 5 autres ravins servent à valider les modèles. Ces modèles ont pour but de prédire la taille des ravins en fonction des précipitations et de l'âge. Ci-dessous nous comparons le modèle de régression linéaire 1 et le modèle logarithmique 3.

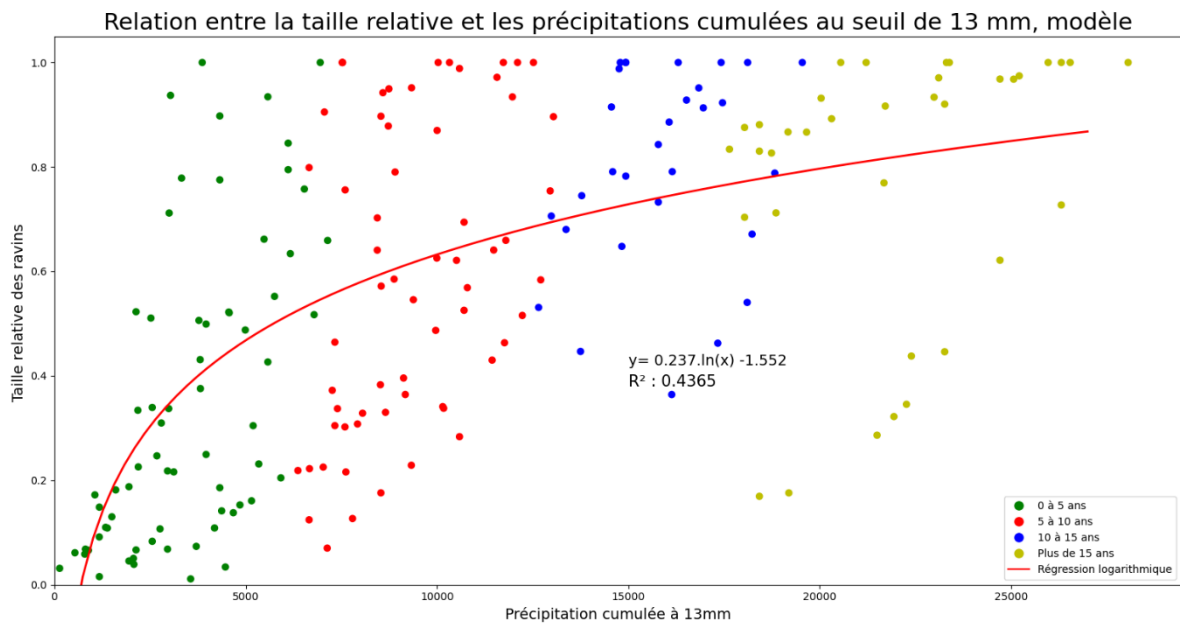
### VI. 6. 1. Régressions sur l'ensemble des données des modèles

Des régressions linéaires ont été faites pour les tranches d'âges de 5 ans. Le  $R^2$  pour la régression de la tranche d'âge de 0 à 5 ans est de 0,35. Les autres sont inférieure à 0,15. ([Figure 29](#)).



**Figure 29.** Nuage de points de la taille relative des ravins en fonction des précipitations cumulées à 13 mm pour les phases d'expansion. Couleurs en fonction de l'âge du ravin par tranche d'âge allant de 5 en 5 ans. Régressions linéaires par partie basées sur l'âge. Les ravins 12 et 15 se distinguent des autres par une taille relative plus petite pour un cumul de précipitations au dessus du seuil de 13 mm élevé. R.I. = Régression linéaire (Courbe, 2023).

Lors de cette réalisation nous avons soupçonné un comportement logarithmique des données. Nous avons donc décidé de réaliser une régression logarithmique sur l'ensemble des points ([Figure 30](#)).



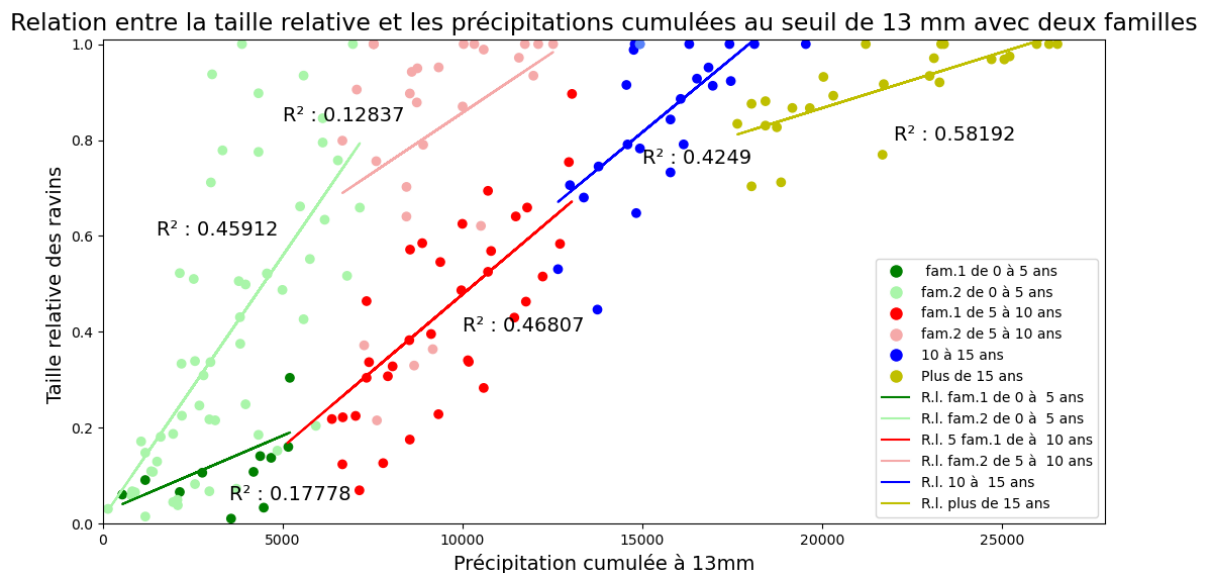
**Figure 30.** Nuage de points de la taille relative des ravins en fonction des précipitations cumulées à 13 mm pour les phases d'expansion. Couleurs en fonction de l'âge du ravin par tranche d'âge allant de 5 en 5 ans. Régression logarithmique basée sur l'âge (Courbe, 2023).

Les graphiques des figures [29](#) et [30](#) laissent apercevoir deux choses :

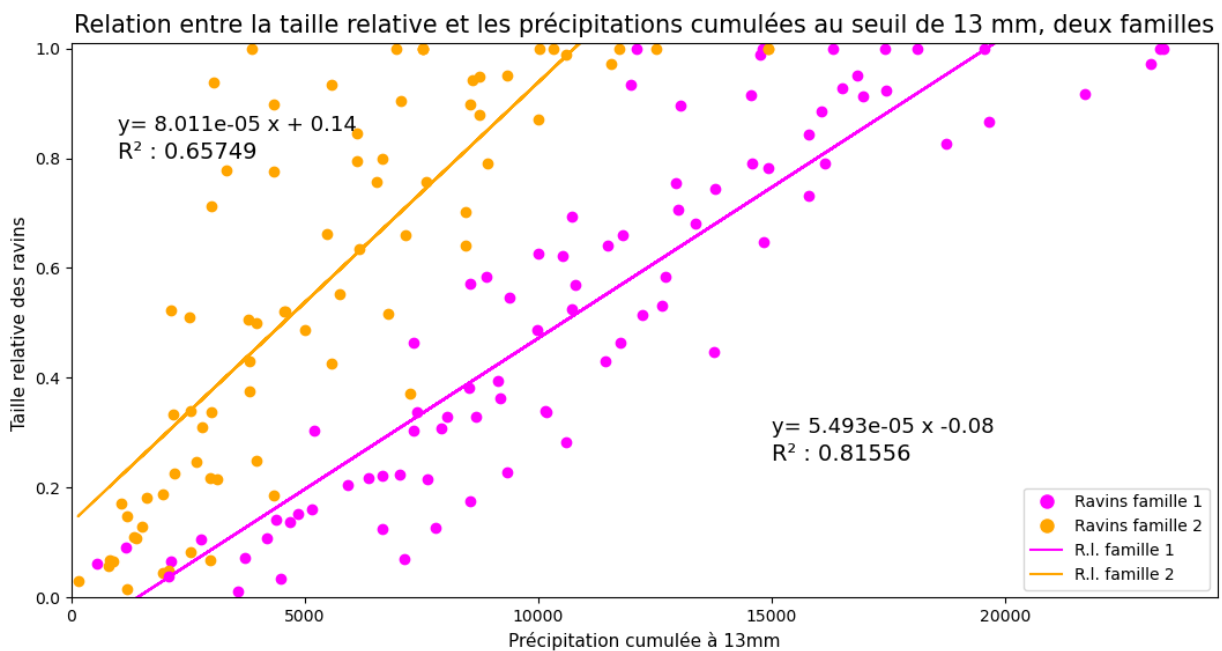
- Les ravins 12 et 15 se distinguent visuellement des autres ravins : Ils ont une taille relative plus petite que les autres pour un cumul de précipitation au-dessus du seuil de 13 mm plus élevé.
- On peut distinguer deux familles de ravins : Les ravins ayant un âge maximal supérieur à 10 ans et les ravins ayant un âge maximal de 10 ans.

## VI. 6. 2. Deux familles et exclusion des ravins 12 et 15

Nous avons réalisé différents graphiques qui permettent de se rendre compte de ces deux observations. Pour le graphique de la [Figure 31](#), qui représente les ravins des différentes familles et exclut les ravins 12 et 15, les  $R^2$  des régressions linéaires par parties sont meilleures que ceux de la [Figure 29](#). Pour les deux dernières tranches d'âge, le  $R^2$  évolue fortement positivement, mettant en avant l'influence de l'exclusion des ravins 12 et 15 lors de la construction du modèle.

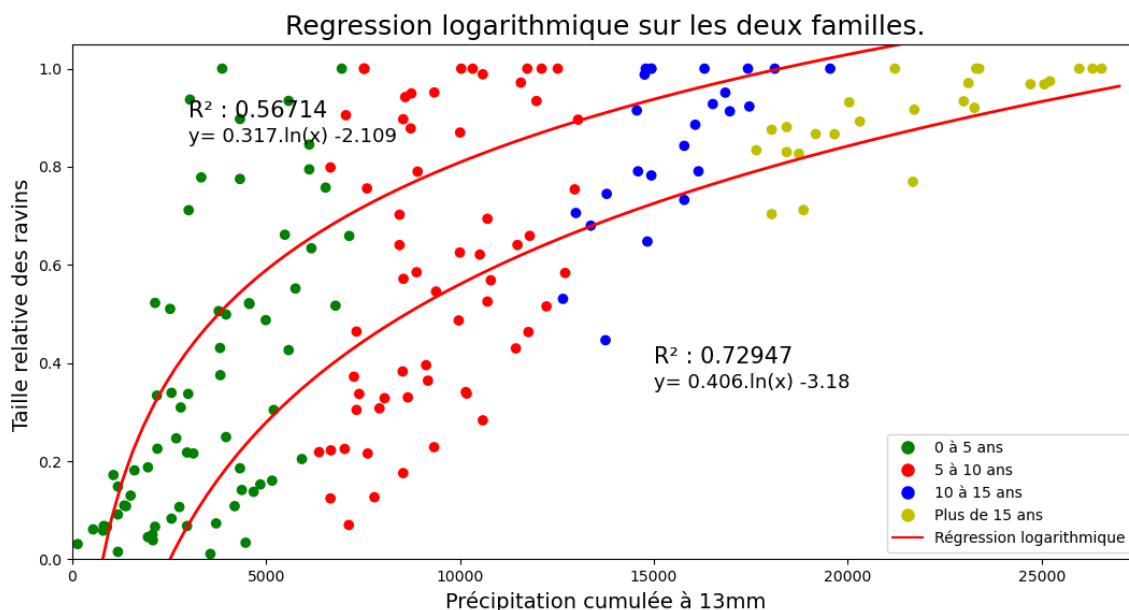


**Figure 31.** Nuage de points de la taille relative des ravins sans les ravins 12 et le 15 en fonction des précipitations cumulées à 13 mm pour les phases d'expansion. Régressions linéaires par parties et couleurs en fonction de l'âge des ravins par tranche d'âge allant de 5 en 5 ans et des 2 familles. R.I. = Régression linéaire et fam. = famille (Courbe, 2023).



**Figure 32.** Nuage de points de la taille relative des ravins sans les ravins 12 et le 15 en fonction des précipitations cumulées à 13 mm pour les phases d'expansion. Régressions linéaires et couleurs basées sur les 2 familles. Fort  $R^2$  pour la famille de ravin 1. R.I. = Régression linéaire et fam. = famille (Courbe, 2023).

Sur la [Figure 32](#) qui représente les ravins des deux familles et exclut les ravins 12 et 15, les  $R^2$  des régressions linéaires sur l'ensemble de chaque famille sont très bons, surtout pour la première famille. Les deux graphiques ci-dessus montrent à la fois le poids des ravins 12 et 15 sur la base de données et les deux familles qui se distinguent. Nous avons aussi réalisé une régression logarithmique pour les deux familles ([Figure 33](#)).



**Figure 33.** Nuage de points de la taille relative des ravins sans le 12 et le 15 en fonction des précipitations cumulées à 13 mm pour les phases d'expansion. Régressions logarithmiques et couleurs basées sur les deux familles.  $R^2$  relativement bon (Courbe, 2023).

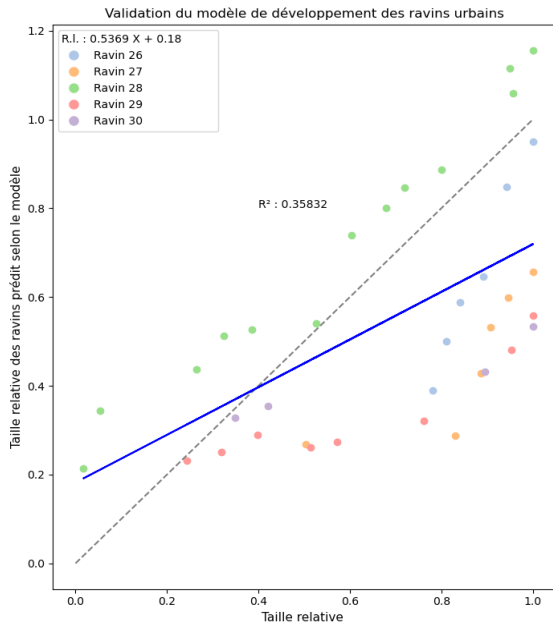
Tout comme pour les régressions linéaires, les ravins 12 et 15 influencent grandement la régression logarithmique ([Annexe 3](#)). L'importance de ces deux ravins sur la collection est donc bien visible. Le ravin 12 et le 15 ([Annexe 4](#)) sont tous les deux des ravins de petite taille (70 m et 200 m de long environ). Le ravin 15 commence au niveau du ravin 9 et il s'enfonce dans un quartier densément urbanisé ; les populations locales ont mis en place des initiatives pour limiter sa propagation. On peut donc raisonnablement penser que la différence d'évolution de ce ravin provient des fortes interventions humaines mises en place pour empêcher son expansion. Pour le ravin 12, la première image dont nous disposons date de 2010. Nous n'avons pas d'information quant à sa date de début et il pourrait bien n'avoir pas plus de 12 ans ([Tableau 2](#)), ce qui expliquerait son taux de développement important. Nous n'avons pas identifié d'autres particularités concernant ces ravins susceptibles d'expliquer la singularité de leur comportement.

Lorsque l'on compare le graphique de l'[Annexe 2](#) et le graphique de la [Figure 32](#), pour les régressions linéaires ou bien ceux des [Figure 30](#) et [33](#), pour les régressions logarithmiques, il est clair que séparer les données en deux familles augmente significativement le  $R^2$ . Cette différence laisse percevoir l'influence de l'âge dans les modèles développés.

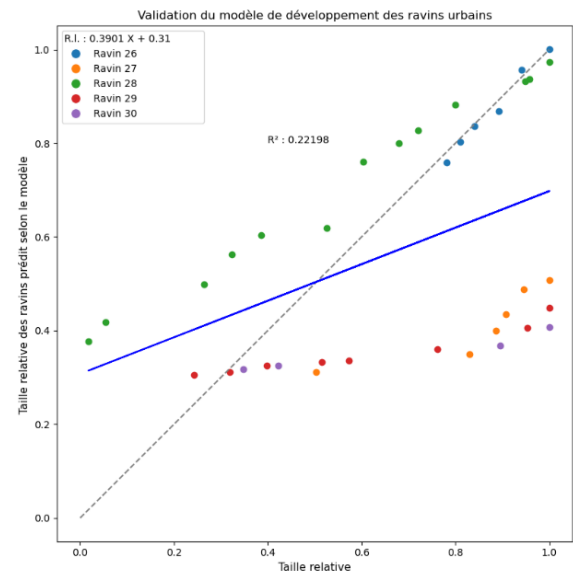
## VI. 7. Validation des modèles

Nous avons réalisé une régression linéaire (modèle 1, [Annexe 2](#)) puis logarithmique (modèle 3, [Figure 30](#)) entre la taille relative des ravins et les précipitations cumulées à 13 mm, sur les phases d'expansions des 25 ravins d'entraînement des modèles. Nous avons mis en évidence l'importance de l'âge, ce qui nous a donné l'idée de réaliser un modèle de régression linéaire qui dépend non seulement des précipitations cumulées au-dessus du seuil de 13mm mais également de l'âge (modèle 2). Pour la validation de ces modèles de régression, les 5 ravins restants ont été utilisés pour tester la fiabilité des modèles ([Figures 34, 35, 36](#)).

Le modèle ayant le meilleur  $R^2$  est celui pour lequel on a inclut l'âge (modèle 2, [Figure 35](#)). Dans ce cas, on a une corrélation positive claire entre la taille relative prédite et la taille relative numérisée. Pour les deux modèles de régression linéaire ([Figures 34 et 35](#)), le ravin 28 est celui qui se rapproche le plus de la droite en pointillé indiquant une parfaite correspondance entre les valeurs modélisées et les données. Les ravins 27, 29 et 30 quant à eux se trouvent les deux fois en dessous de la droite de régression, les valeurs prédites sont inférieures aux valeurs des données. Pour le modèle 1, [Figure 35](#), le ravin 26 suit la droite en pointillé, ayant ainsi des valeurs prédites et réelles identiques.

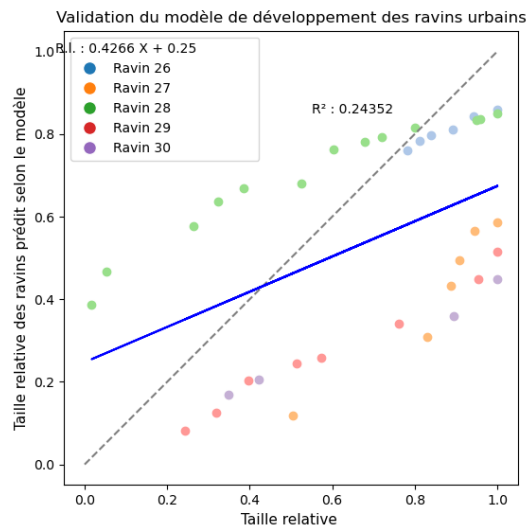


**Figure 34.** Validation du modèle 2 de développement des ravins en comparant la taille relative prédite par le modèle 2 avec la taille relative des 5 ravins de validation (en abscisse). Les précipitations cumulées au-dessus du seuil de 13 mm et l'âge sont pris en compte. Le  $R^2$  est meilleure que pour le modèle 1 (Courbe, 2023).



**Figure 35.** Validation du modèle 1 de développement des ravins en comparant la taille relative prédite par le modèle 1 avec la taille relative des 5 ravins de validation (en abscisse). Seules les précipitations cumulées au-dessus du seuil de 13 mm sont prises en compte (Courbe, 2023).





**Figure 36.** Validation du modèle 3 de développement des ravins en comparant la taille relative prédite par le modèle 3 avec la taille relative des 5 ravins de validation (en abscisse).  $R^2$  moins bon que pour la régression linéaire multiple montrant l'importance de l'âge dans la prédiction de la taille relative (Courbe, 2023).

Au vu des résultats obtenus, nous avons voulu séparer les ravins de validations en fonction de l'âge afin de les associer aux deux familles distinguées précédemment. Les ravins 26 et 28 ont un âge maximal supérieur à 10 ans (famille 1) et les ravins 27,29 et 30 un âge maximal inférieur à 10 ans (famille 2). Cependant les résultats obtenus n'offrent rien de concluant (Annexes 5 à 7). Nous supposons que cela est dû au manque de données, car nous séparons notre échantillon en 2 familles et nous essayons de valider un modèle à l'aide de seulement 2 ou 3 ravins et donc une vingtaine de valeurs.

## VII. Discussion

### VII. 1. Cartographie

Est-il possible de numériser l'évolution des aires des ravins à Kinshasa ? Oui, la numérisation de l'évolution des aires des ravins a été faite à l'aide des images satellites disponibles sur Google Earth Pro. Même si ces images en libre-service se sont révélées être les meilleures pour notre étude elles ont plusieurs limites :

- Les premières images disponibles sont entre 2002 et 2004, posant ainsi problème pour les ravins plus anciens où la cartographie n'est pas possible.
- L'intervalle de temps entre deux images n'est pas constant et peut être long, c'est-à-dire supérieur à 6 mois.
- Les images ne sont pas toutes de même qualité, certaines peuvent poser des problèmes pour une numérisation exacte des aires de ravins.

De plus, la numérisation est un travail d'interprétation qui a forcément laissé une place à la subjectivité lors du travail réalisé.

### VII. 2. Expansions des ravins jeunes

Le graphique de la [Figure 20](#) montre que la taille relative des ravins augmente plus rapidement quand les ravins sont jeunes. Cette observation est corrélée par le graphique de la [Figure 23](#) où les premières tranches d'âges sont celles où le taux d'expansion normalisé est le plus élevé. Pour la tranche d'âge entre 0 et 5 ans, les ravins ont une taille relative petite mais un taux d'expansion élevé. En revanche pour la tranche de 15 ans et plus, la taille relative des ravins est proche de 1 et le taux d'expansion est rarement supérieur à 10%. Ainsi sur les données collectées, les ravins se développent plus rapidement quand ils sont jeunes puis leur développement décroît et ils se stabilisent surtout après 15 ans et plus.

Le ralentissement de la croissance des ravins a été démontré dans plusieurs études, liant ainsi le développement du ravin avec son âge (Vanwalleghem *et al.*, 2005 ; Makanzu Imwangana *et al.*, 2015 ; Vanmaercke *et al.*, 2016). En effet, sur la [Figure 3](#) on voit bien que les ravins évoluent après leur apparition puis, avec l'âge, tendent à se stabiliser (Makanzu Imwangana *et al.*, 2015). Nos observations permettent d'affirmer les observations des études réalisées sur

le sujet ([II.2.2.\(iii\)](#)) et notre hypothèse selon laquelle le taux d'expansion attendu est plus important lorsque les ravins sont jeunes ([Section IV](#)).

### VII. 3. Indices pluviométriques

Les boîtes à moustaches pour la tranche d'âge de 0 à 5 ans (a) et (b) ([Figure 25](#)) montrent une distribution différente pour les phases de stabilisation et d'expansion. La médiane est plus élevée pour les phases d'expansion que pour celles de stabilisation et la valeur minimale pour les phases d'expansion est largement supérieure à celles de stabilisation. De plus la p-valeur est significative et donc l'hypothèse nulle est rejetée, montrant une différence entre les deux phases. Ces résultats indiquent ainsi que pour les ravins en début de vie, les précipitations sont un facteur important pour les phases d'expansion. Les précipitations maximales sur 30 min et le cumul des précipitations journalières sont les 2 indices pour lesquels le résultat est probant. Cela laisse supposer que ce sont les précipitations importantes qui ont le plus d'effet sur le développement des ravins. Cette observation est contraire aux considérations de Wischmeier et Smith (1978) qui considèrent 13mm comme étant le minimum pluviométrique capable d'engendrer une érosion des sols pour les loess ou celles de Poesen *et al.* (2003) qui considèrent 20mm comme étant la hauteur de pluie critique nécessaire au développement des têtes de ravin dans les terres cultivées sur des sols argileux.

Pour les autres tranches d'âges la p-valeur n'est pas significative et la distribution des boîtes à moustaches ne montre pas une différence importante entre les phases d'expansion et de stabilisation. De ce fait, les premières années d'existence du ravin sont celles durant lesquelles le développement est le plus lié aux précipitations. Ces observations permettent d'affirmer l'hypothèse dans la section [IV](#) selon laquelle les précipitations sont un facteur déterminant surtout dans les premières années de vie du ravin

#### VII. 4. Modèle et validation

Trois types de régression ont été réalisées sur notre jeu de données : 2 linéaires et 1 logarithmique. La régression logarithmique permet de mettre en évidence une augmentation rapide de la taille relative puis une stabilisation (Vanwalleghem *et al.*, 2005 ; Makanzu Imwangana *et al.*, 2015 ; Vanmaercke *et al.*, 2016). Lors de notre analyse on a vu deux familles apparaître pour les deux premières tranches d'âges. La raison n'est pas la localisation mais l'âge. La première famille comprend les ravins dont l'âge maximum ne dépasse pas 10 ans. La seconde est celle des ravins dont l'âge est supérieur à 10 ans. Lorsque l'on fait une régression linéaire ou logarithmique séparée pour les deux familles, on obtient un  $R^2$  bien meilleur. Cette observation va dans le sens selon lequel l'âge est un facteur clé pour le développement des ravins ([II.2.2.\(iii\)](#)).

Une validation du premier modèle, celui qui ne prend en compte que les précipitations cumulées au-dessus du seuil de 13 mm a été réalisée. Le  $R^2$  n'est pas très élevé, aussi bien pour celui basé sur la régression linéaire que pour celui basé sur la régression logarithmique (respectivement 0,22 et 0,24) et on voit que les points sont dispersés (Figures [35](#) et [36](#)). Lorsque l'on prend en compte non seulement les précipitations cumulées au-dessus du seuil de 13 mm mais aussi l'âge, le  $R^2$  devient meilleur et surtout l'ensemble des points se rapprochent globalement de la droite en pointillé ([Figure 34](#)). Encore une fois l'âge se révèle être un paramètre essentiel dans la compréhension de l'évolution du développement des ravins. Cependant le  $R^2$  pourrait être meilleur et cela en améliorant le modèle en introduisant d'autres variables tel que la taille du bassin versant, l'occupation du sol qui influence l'imperméabilisation ou encore la topographie ([II.2.4](#)). On pourrait également exploiter les deux familles distinguées, qui semblent être une bonne voie à suivre au vu des résultats obtenus, en ajoutant des données au sein de ces deux familles et en validant le modèle avec plus de données.

## VII. 5. Limites de l'approche

Lors de notre travail nous avons rencontré différents types de limites outre celles liées à la cartographie, que nous récapitulerons brièvement ci-dessous :

- Limites statistiques : limites dues au nombre de données insuffisant dans toutes les tranches d'âges de l'échantillonnage. Cette limite est due au temps que demande la numérisation du développement des ravins ([V.2](#)). Lorsque l'on considère toutes les phases d'expansion et de stabilisation le nombre de données est suffisant pour que les tests soient fiables mais pas lorsque l'on découpe en sous catégories en fonction de l'âge. Pour les phases de stabilisation pour la période entre 10 et 15 ans il y a seulement 18 données ce qui n'est pas suffisant. Ce manque de données pour certaines tranches d'âges dans les périodes de stabilisation a pour conséquence que les tests statistiques sont peu fiables et fortement influencés par valeurs extrêmes.
- Âge : Il peut y avoir une grande incertitude sur l'âge de certains ravins ([Tableau 2](#)).
- Facteurs anthropiques : Les populations locales mettent en place différentes initiatives pour limiter l'expansion des ravins ([III.3](#)) (Lutete Landu *et al.*, 2023). Ainsi leur développement naturel est entravé, ce qui peut avoir une conséquence sur nos résultats, comme on l'a observé pour le ravin 15.
- Facteurs pris en compte : Nous n'avons pris en compte que le facteur pluviométrique et l'âge comme explication au développement des ravins. Cependant ce ne sont pas les seuls facteurs explicatifs. Le modèle peut être amélioré en tenant compte de la taille du bassin versant, la topographie, les installations mises en place pour limiter l'extension des ravins ([II.2.4](#) et [III.3](#)). De plus, on pourrait imaginer améliorer les données météo pour les dernières années en prenant en compte les stations locales.

## VIII. Conclusion

Les ravins urbains menacent les populations urbaines en Afrique ((Adediji *et al.*, 2013 ; Lutete Landu *et al.* 2023). En RDC on estime que 1,2 million de personnes sont actuellement en danger ou risquent de subir un grave préjudice dans les années à venir (Ilombe Mawe *et al.*, 2021). Face à cette situation alarmante des initiatives doivent être mises en place. Pour cela une bonne compréhension des causes et de la façon dont le développement des ravins se produit est primordial (Lutete Landu *et al.* 2023).

Nous avons numérisé l'évolution de 30 ravins grâce à des photographies satellites Google Earth Pro. Les données pluviométriques de la région ont été téléchargées et associées aux ravins. Un code a été réalisé afin de traiter les données obtenues et de les corrélérer à l'aide de plusieurs indices.

Il ressort de nos résultats que la numérisation de l'évolution des ravins urbains à l'aide d'images satellites est possible. On constate que les ravins ont tendance à grandir plus vite lors de leurs premières années de vie. De même, les analyses réalisées avec les indices pluviométriques montrent que les premières années de vie des ravins sont celles durant lesquelles les précipitations sont un facteur significatif du développement des ravins. Plus le ravin vieillit, moins les précipitations semblent significatives pour prédire leur développement.

La prédiction de la taille des ravins à l'aide d'un modèle uniquement basé sur les précipitations s'est révélée peu performante. En ajoutant le facteur âge le modèle se précise, laissant apercevoir la possibilité d'une amélioration de la prédiction à l'aide d'autres facteurs tels que la zone contributive ou le pourcentage de zone imperméabilisée (Poesen, 2011 ; Vanmaercke *et al.*, 2016 ; Makanzu Imwangana *et al.*, 2014).

## IX. Bibliographie

Adediji, A., Jeje, L. K., Ibitoye, M. O. (2013). Urban development and informal drainage patterns: Gully dynamics in Southwestern Nigeria. *Applied Geography*, 40, 90–102. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.01.012>.

Agri learner. (2022). Gully classification and control measures. *Agri learner*. <http://www.agrilearner.com/gully-classification-control-measures/>. Consulté le 24 mars 2023.

Airbus. (2023). Pléiades: Spot the detail thanks to our very-high resolution satellite imagery. *Airbus*. <https://www.intelligence-airbusds.com/imagery/constellation/pleiades/>. Consulté le 5 mai 2023.

Amangabara, G. (2014). Understanding Effective Gully Control Measures in Imo State, Nigeri. *Canadian Open Soil and Erosion Journal*, 1(1), 1–9. [https://www.researchgate.net/publication/263087967\\_Understanding\\_Effective\\_Gully\\_Control\\_Measures\\_in\\_Imo\\_State\\_Nigeri](https://www.researchgate.net/publication/263087967_Understanding_Effective_Gully_Control_Measures_in_Imo_State_Nigeri). Consulté le 5 août 2023.

Berding, F. (2010). Référentiel Pédologique 2008 - by Baize, D. & Girard, M.-C. *European Journal of Soil Science*, 61(1), 153–154. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01196.x>.

Bhat, S.A., Dar, M.U.D., Meerna, R. S. (2019). Soil Erosion and Management Strategies. In Meena, R., Kumar, S., Bohra, J., Jat, M. (eds), *Sustainable Management of Soil and Environment*. Singapore: Springer Singapore Pte Limited, 73–122. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-8832-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8832-3_3)

Borrelli, P., Poesen, J., Vanmaercke, M., Ballabio, C., Hervás, J., Maerker, M., Scarpa, S., Panagos, P. (2022). Monitoring gully erosion in the European Union: a novel approach based on the Land Use/Cover Area frame survey (LUCAS). *International Soil Water Conservation Research*, 10(1), 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.09.002> .

Davies, T. C. (2015). Urban geology of African megacities. *Journal of African Earth Sciences*, 110, 188–226. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.06.012> .

De Geeter, S., Verstraeten, G., Poesen, J., Campforts, B., Vanmaercke, M. (2023). A data driven gully head susceptibility map of Africa at 30 m resolution. *Environmental Research*, 224, 115573. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115573> .

Gaillardet, J. (2019). Pour enfin se mettre d'accord sur la définition de l'altération et de l'érosion. Ressources scientifiques pour l'enseignement des sciences de la Terre et de l'Univers. Dequinsey, O. Consulté le 26 avril 2023. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/alteration-erosion.xml> .

Hayas, A., Pena, A., & Vanwalleghem, T. (2019). Predicting gully width and widening rates from upstream contribution area and rainfall; a case study in SW Spain. *Geomorphology*, 341, 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.05.017> .

Huffman, G.J., Stocker, E.F., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J., Tan, J. (2019). GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). [10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/06](https://doi.org/10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/06).

Ilombe Mawe, G., Lutete Landu, E., Makanzu Imwangana, F., Nzolang, C., Wazi Nandefo, R., Poesen, J., Biolders, C., Dewitte, O., and Vanmaercke, M. (2021). Quantifying the impacts of urban gully erosion at the scale of the Democratic Republic of Congo. In Copernicus GmbH (*Goettingen*), EGU General Assembly 2021, 19–30 avril 2021, en ligne, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-8831>.

Kayembe Wa Kayembe, M., De Maeyer, M., Wolff, E. (2009). Cartographie de la croissance urbaine de Kinshasa (R.D. Congo) entre 1995 et 2005 par télédétection satellitaire à haute résolution. *Belgeo*, 3, 439–456. <https://doi.org/10.4000/belgeo.7349>.

Knapen, A., & Poesen, J. (2010). Soil erosion resistance effects on rill and gully initiation points and dimensions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(2), 217–228. <https://doi.org/10.1002/esp.1911>.

Lateef, A.S.A., Fernandez-Alonso, M., Tack, L., Delvaux, D. (2010). Geological constraints on urban sustainability, Kinshasa City, Democratic Republic of Congo. *Environmental Geosciences*, 17(1),17–35. <https://doi.org/10.1306/eg.04080908007>.



Lutete Landu, E., Ilombe Mawe, G., Makanzu Imwangana, F., Biolders, C., Dewitte, O., Poesen, J., Hubert, A., & Vanmaercke, M. (2023). Effectiveness of measures aiming to stabilize urban gullies in tropical cities: Results from field surveys across D.R. Congo. *International Soil and Water Conservation Research*, 11(1), 14–29. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.10.003> .

Makanzu Imwangana, F., Ozer, P., Moeyersons, J., Vandecasteele, I., Trefois, P., & Ntombi, M. (2012). Kinshasa en proie à l'érosion en ravine : inventaire cartographique et impact socioéconomique. In *Colloque international "Géomatique et gestion des risques naturels" en hommage au Professeur André Ozer - Livre de résumés*, 27. <https://hdl.handle.net/2268/115485> .

Makanzu Imwangana, F., Dewitte, O., Ntombi, M., Moeyersons, J. (2014). Topographic and road control of mega-gullies in Kinshasa (DR Congo). *Geomorphology*, 217, 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.021> .

Makanzu Imwangana, F., Vandecasteele, I., Trefois, P., Ozer, P., Moeyersons, J. (2015). The origin and control of mega-gullies in Kinshasa (D.R. Congo). *Catena*, 125, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.019> .

Makanzu Imwangana, F., Kamosi Zola, B., Lele Nyami, B., Munongo Iyabidila, M., Ntombi Muen Kabeya, M., Phuati Phuati, G., & Ozer, P. (2023). Évolution récente et détermination de la saison de pluies dans la région de Kinshasa (RDC) de 1961 et 2010. *Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture*, 6(2), 13–27. <https://hdl.handle.net/2268/302109> .

Mango-Itulamya, L. A. (2015). *Valorisation des géoressources argileuses de la région de Kinshasa pour améliorer la qualité et la durabilité des matériaux de construction utilisés dans l'habitat périurbain*. Mémoire, Liège, ULiège - Université de Liège, inédit, 91. <https://hdl.handle.net/2268/226234> .

Mappemonde. (2023). Carte Congo : informations géographiques et démographiques. *Mappemonde*. <https://www.mappemonde.net/carte-afrique/carte-congo/>. Consulté le 10 mai 2023.

Messina Ndzomo, J. P., Sambieni, K. R., Mbevo Fendoung, P., MATE MWERU, J.-P., Bogaert, J., & Halleux, J.-M. (2019). La croissance de l'urbanisation morphologique à Kinshasa entre 1979 et 2015 : analyse densimétrique et de la fragmentation du bâti. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 73, 85–103. <https://doi.org/10.25518/0770-7576.5937>.

Millecamps, R. (2020). *Les espèces végétales dans la lutte contre le ravinement à Kinshasa : caractérisation et évaluation de l'efficacité*. Master : bioingénieur en sciences et technologies de l'environnement, Louvain, Université catholique de Louvain, inédit, 118. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:25304>.

Monsieurs, E., Dewitte, O., & Demoulin, A. (2019). A susceptibility-based rainfall threshold approach for landslide occurrence. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 19, 775–789, <https://doi.org/10.5194/nhess-19-775-2019>.

Ontario. (2012). L'érosion du Sol : causes et effets. *Ontario*. <https://www.ontario.ca/fr/page/lerosion-du-sol-causes-et-effets#section-9>. Consulté le 8 mars 2023.

Planet. (2022). *Explore Planet Product*. Planet. <https://www.planet.com/products/>. Consulté le 5 août 2023.

Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., Valentin, C. (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50(2), 91–133. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1).

Poesen, J. (2011). Challenges in gully erosion research. *Landforme Analysis*, 17, 5–9. [https://www.researchgate.net/publication/265875998\\_Challenges\\_in\\_gully\\_erosion\\_research](https://www.researchgate.net/publication/265875998_Challenges_in_gully_erosion_research). Consulté le 5 août 2023.

Poesen, J., Torri, D., Vanwalleghem, T. (2011). Gully erosion: procedures to adopt when modelling soil erosion in landscapes affected by Gullying. In Morgan, R., Nearing, M. (eds), *Handbook of Erosion Modelling*. Blackwell Publishing Ltd., 360–386. <https://doi.org/10.1002/9781444328455.ch19>.

Roberts, M. E., Burrows, R. M., Thwaites, R. N., & Hamilton, D. P. (2022). Modelling classical gullies – A review. *Geomorphology*, 407, 108216–. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108216>.

Roose, E. (1985). Causes et facteurs de l'érosion hydrique sous climat tropical. Conséquences sur Les méthodes antiérosives. *Machinisme Agricole Tropical*, 87. [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/pleins\\_textes\\_5/b\\_fdi\\_12-13/17180.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_12-13/17180.pdf). Consulté le 5 août 2023.

Shellberg, J. G., Brooks, A. P., & Rose, C. W. (2013). Sediment production and yield from an alluvial gully in northern Queensland, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(15), 1765–1778. <https://doi.org/10.1002/esp.3414>.

Shit, P., Maiti, R. (2014). Gully Erosion Control: Lateritic Soil Region of West Bengal. *Indian Science Cruiser*, 28(3), 54–61. <https://www.researchgate.net/publication/268152349>. Consulté le 5 août 2023.

Shruthi, R.B.V. (2015). *Towards improving gully erosion assessment: coupling object - based image analysis and spatially dynamic erosion modelling*. Thèse de doctorat, Enschede, Université de Twente, 166.

Sidorchuk, A. (2001). GULTEM – The Model to predict Gully Thermoerosion and Erosion (Theoretical Framework). In Stott, D.E., Mohtar, R.H., Steinhardt, G.C (eds) *Sustaining the Global Farm. Selected Papers from the 10th International Soil Conservation Organisation Meeting held May 24–29, 1999 at the Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory*. [https://www.fluvial-systems.net/present\\_en/isco1999\\_P162.pdf](https://www.fluvial-systems.net/present_en/isco1999_P162.pdf).

Thwaites, R.N., Brooks, A.P., Pietsch, T.J., & Spencer, J.R. (2022). What Type of Gully is That? The Need for a Classification of Gullies. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(1), 109-128. <https://doi.org/10.1002/esp.5291>.

Torri, D. & Poesen, J. (2014). A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments. *Earth-Science Reviews*, 130, 73–85. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.12.006>.

Unesco. (2021). Democratic Republic of the Congo. Unesco.

<https://uis.unesco.org/en/country/cd>. Consulté le 5 août 2023.

Vanmaercke, M., Poesen, J., Van Mele, B., Demuzere, M., Bruynseels, A., Golosov, V., Bezerra, J.F.R., Bolysov, S., Dvinskih, A., Frankl, A., Fuseina, Y., Guerra, A.J.T., Haregeweyn, N., Ionita, I., Makanzu Imwangana, F., Moeyersons, J., Moshe, I., Nazari Samani, A., Niacsu, L., Nyssen, J., Otsuki, Y., Radoane, M., Rysin, I., Ryzhov, Y.V., Yermolaev,, O. (2016). How fast do gully headcuts retreat? *Earth-Science Reviews*, 154, 336–355.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.009> .

Vanwalleghem, T., Bork, H.R., Poesen, J., Schmidtchen, G., Dotterweich, M., Nachtergaele, J., Bork, H., Deckers, J., Brüsck, B., Bungeneers, J., De Bie, M. (2005). Rapid development and infilling of a buried gully under cropland, Central Belgium. *Catena*, 63 (2), 221–243. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.005> .

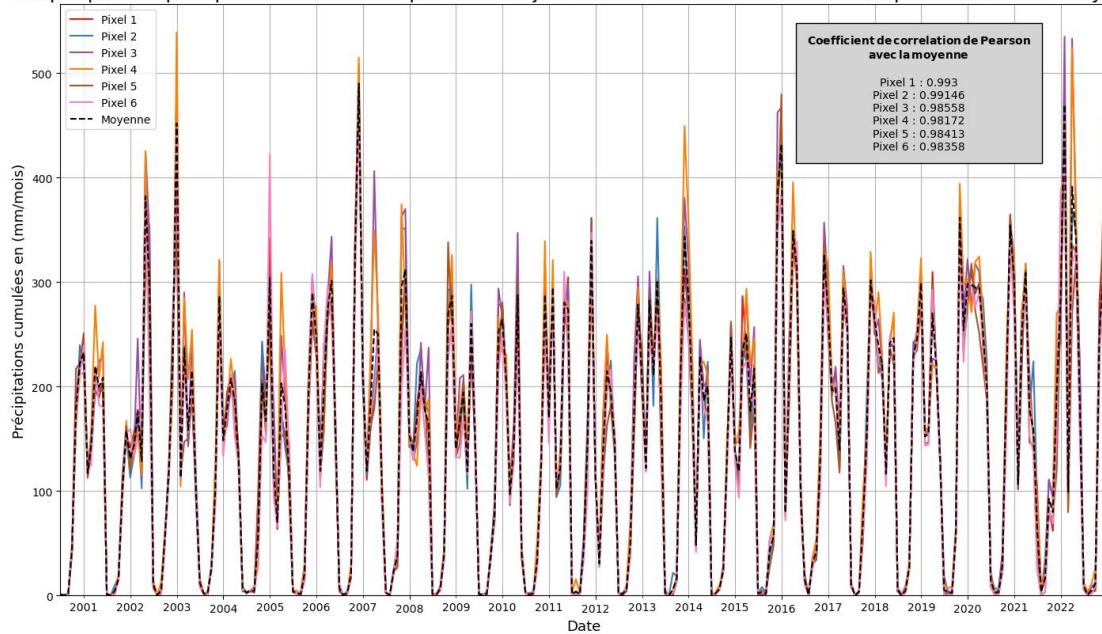
Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. (1978) *Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning*. United States Department of Agriculture, Agricultural Handbook, 537, 58. <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>. Consulté le 5 août 2023.

World Banks. (2018). *Revue de l'urbanisation en République démocratique du Congo : Des villes productives et inclusives pour l'émergence de la République démocratique du Congo*. World Bank, Directions du Développement - Environnement et Développement Durable. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1205-7>.

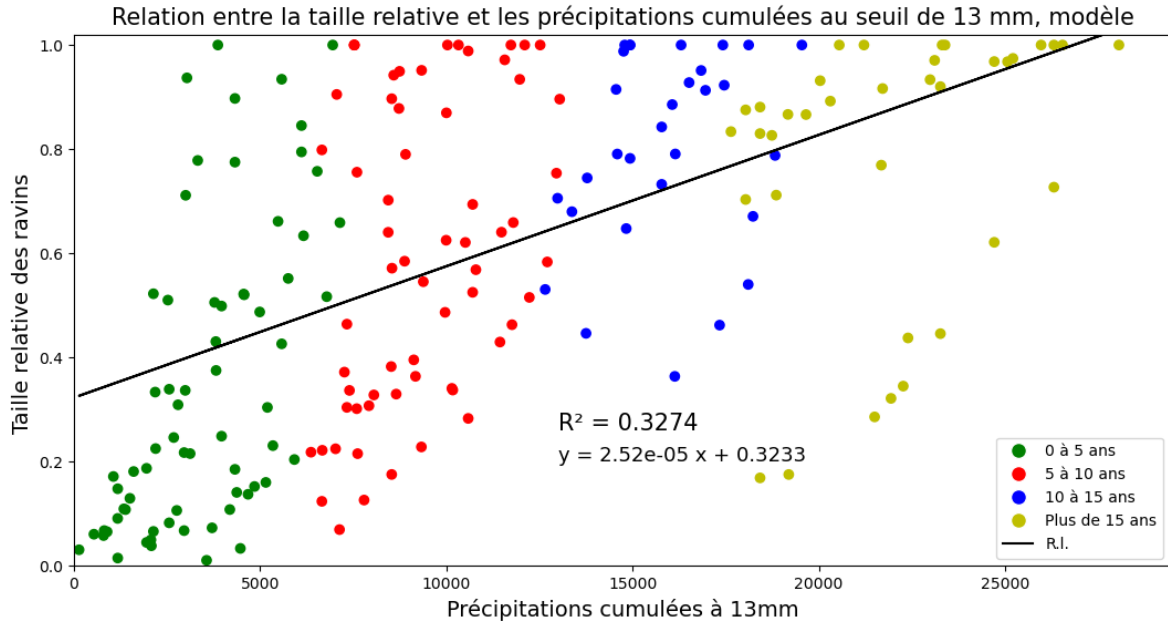
Wouters, T., & Wolff, E. (2010). Contribution à l'analyse de l'érosion intra-urbaine à Kinshasa (R.D.C.). *Belgeo*, 293–314. <https://doi.org/10.4000/belgeo.6477>.

## X. Annexes

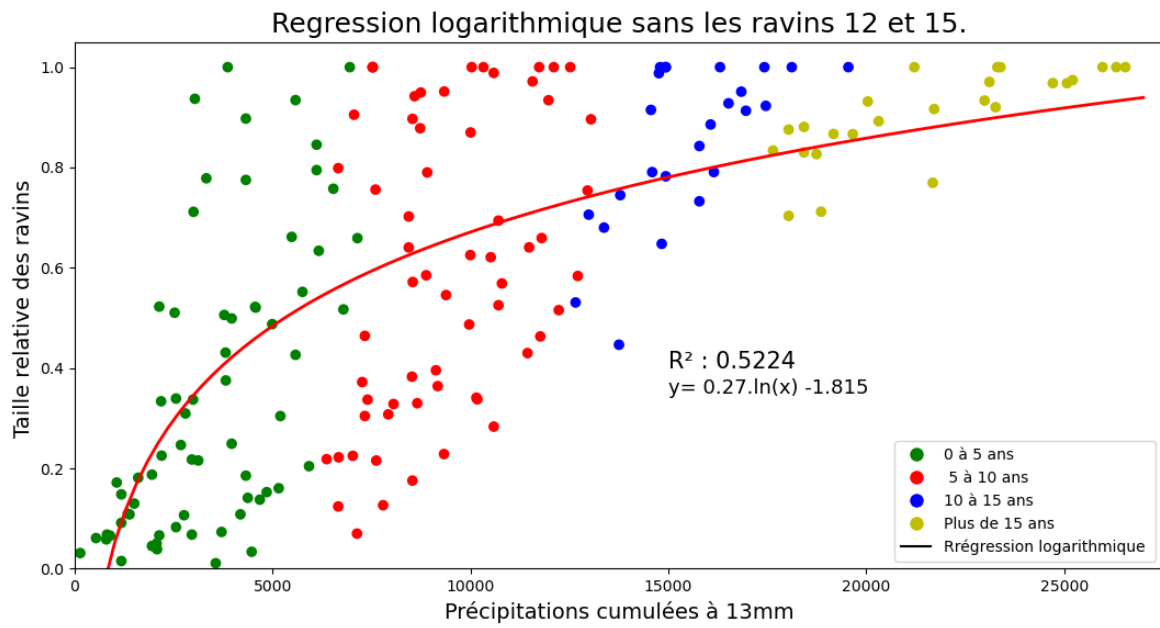
Graphique des précipitations cumulées par mois de juin 2000 à fin 2022 des différents pixels et de leur moyenne



**Annexe 1.** Précipitations cumulées par mois pour la période d'étude de juin 2020 à fin 2022 des différents pixels et de leur moyenne (Courbe, 2023).



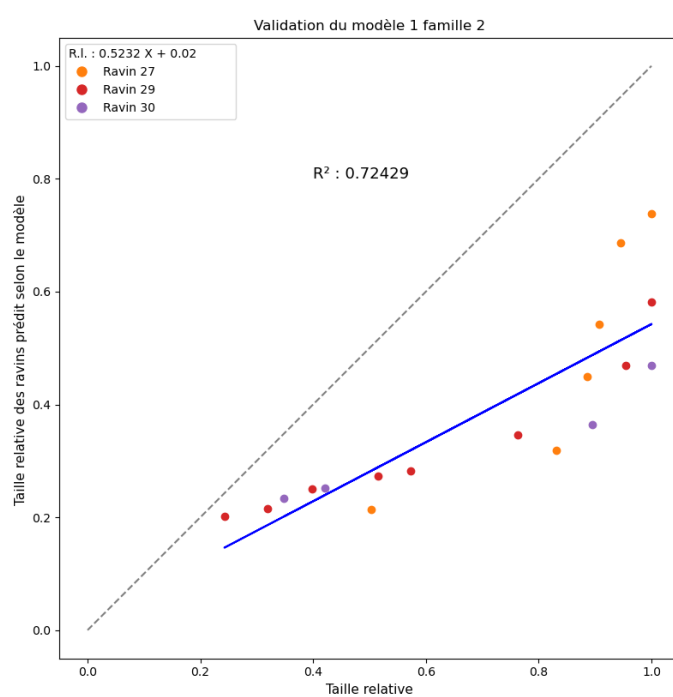
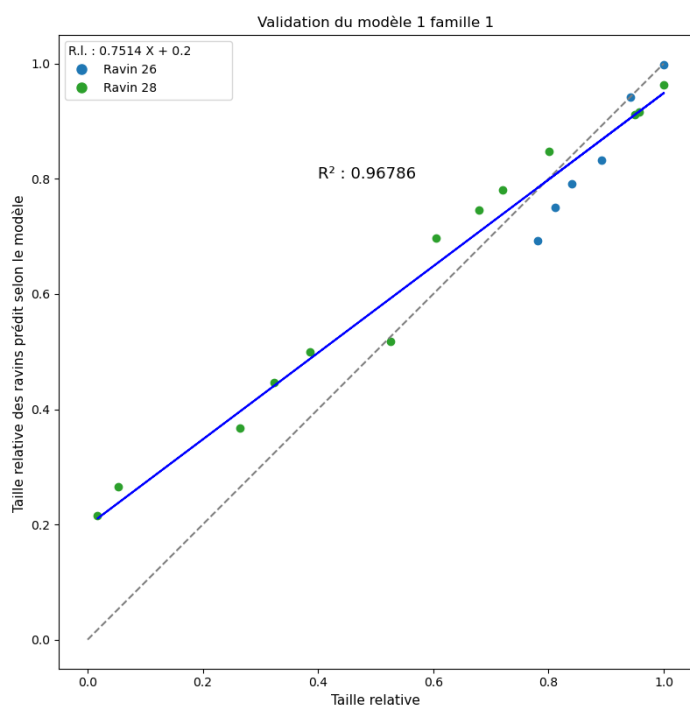
**Annexe 2.** Nuage de point de la taille relative des ravins sans le 12 et le 15 en fonction des précipitations cumulées à 13 mm pour les phases d'expansion. Régression linéaire sur tous les points.  $R^2$  pas très élevé (Courbe, 2023).



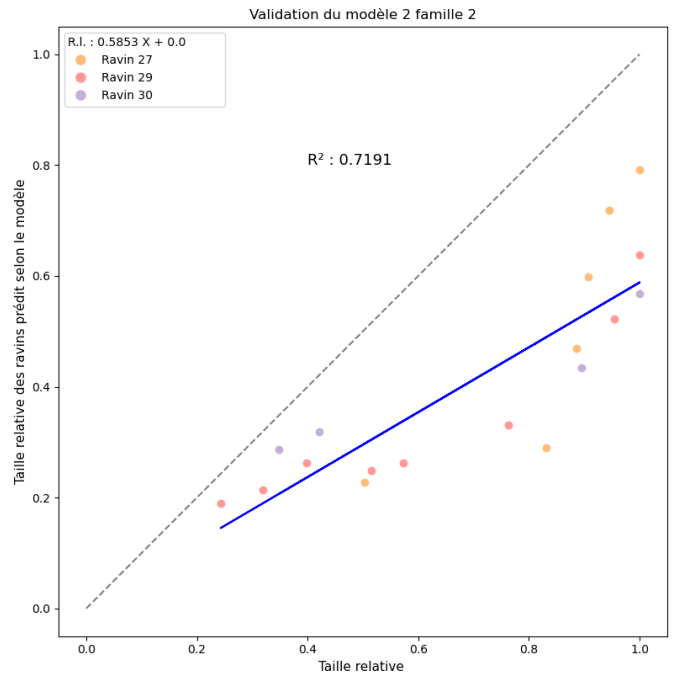
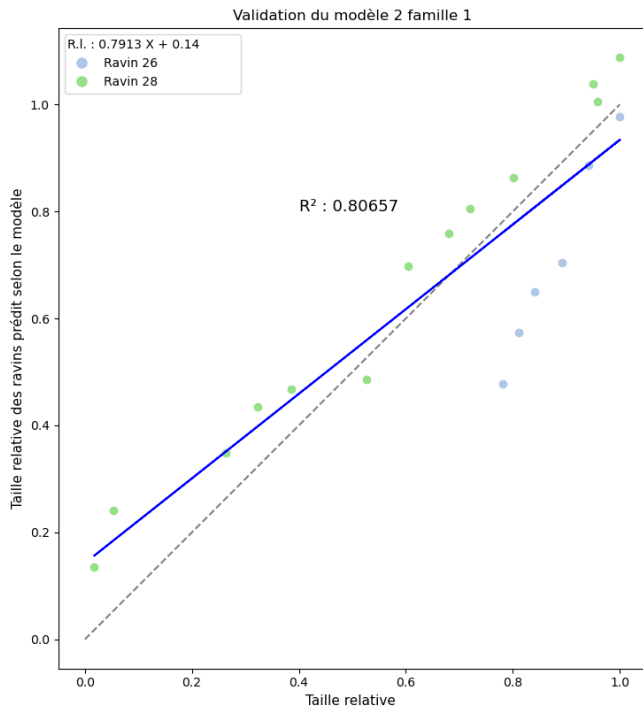
**Annexe 3.** Nuage de point de la taille relative des ravins sans le 12 et le 15 en fonction des précipitations cumulées à 13 mm pour les phases d'expansion. Régression logarithmique sur tout le modèle sauf les ravins 12 et 15 (Courbe,2023).



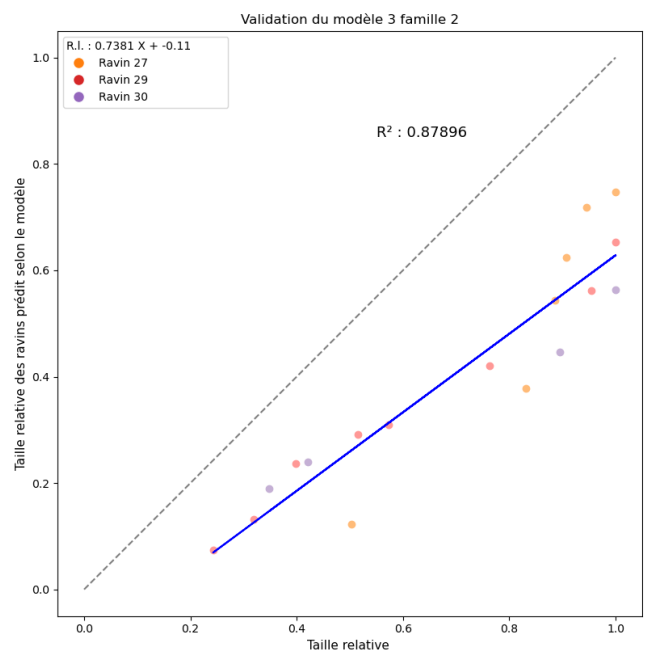
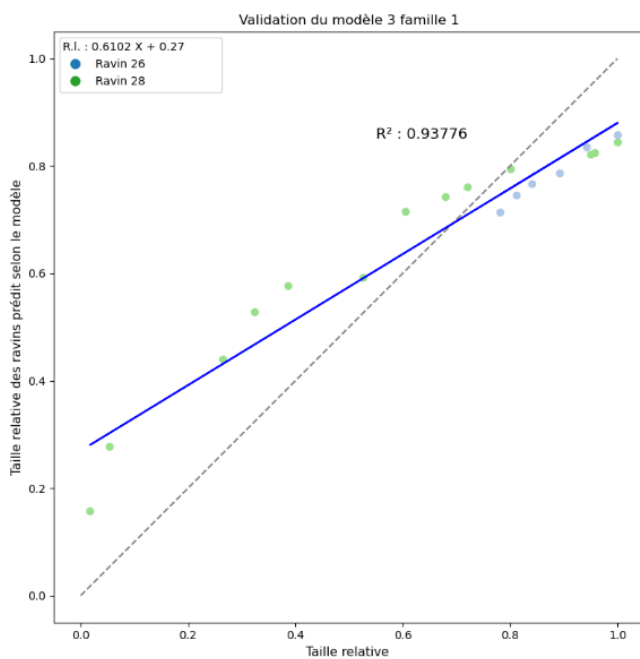
**Annexe 4.** Photographie Google Earth Pro des ravins 12 (gauche) et 15 (droite).



**Annexe 5.** Validation du modèle 1 pour les deux familles : à gauche pour la famille 1 et à droite pour la famille 2 (Courbe, 2023).



**Annexe 6.** Validation du modèle 2 pour les deux familles : à gauche pour la famille 1 et à droite pour la famille 2 (Courbe, 2023).



**Annexe 7.** Validation du modèle 3 pour les deux familles : à gauche pour la famille 1 et à droite pour la famille 2 (Courbe, 2023).



Dans le dossier Annexe disponible en téléchargement, vous pouvez trouver la base de données (fichier Excel), le fichier des pixels (Excel), les données pluviométriques (Excel) et les 5 fichiers codes Python.