

## Contribution à la cartographie de l'aléa inondation dans le bassin versant du Mfoundi à Yaoundé (Cameroun) par l'Analyse Multi Critère (AMC) basée sur le Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP)

### *Contribution to flood hazard mapping in the Mfoundi catchment in Yaoundé (Cameroon) through Multi Criteria Analysis (MCA) based on the Hierarchical Analysis Process (AHP)*

Alex ONANA NTOUDA<sup>1\*</sup>, Olivier LEUMBE<sup>1</sup>, Willy LEMOTIO<sup>2,3</sup>, Sandjong JUDICAE KANDA<sup>1</sup> & Paul GAUTIER KAMTO<sup>2,3</sup>

1. Laboratoire de Recherche sur les Risques naturels (LRRN), Institut National de Cartographie (LAREG), BP : 157, Yaoundé, Cameroun (\*onanantouda@yahoo.fr).
2. Laboratoire de Géophysique et Géo-exploration (INC), Département de Physique, Université de Yaoundé 1, BP : 812, Yaoundé, Cameroun (willylemotio@gmail.com).
3. Laboratoire de Recherche de Géodésie, Institut National de Cartographie (INC), BP : 157, Yaoundé, Cameroun

**Résumé.** L'inondation est un phénomène naturel très fréquent dans les villes africaines. Elle correspond à une submersion ponctuelle d'une zone habituellement sèche par des eaux douces ou salées à la suite d'une crue ou de la rupture d'un barrage. L'objectif de cette contribution est de produire la carte de l'aléa inondation dans le bassin versant du Mfoundi à Yaoundé. La méthode utilisée est fondée sur l'analyse multicritères à l'aide de l'outil d'attribution de poids de Thomas Saaty (Processus d'Analyse Hiérarchique AHP). Pour ce faire, un outil SIG a permis de modéliser les paramètres d'entrées à savoir : la pente, l'altitude, l'indice d'humidité topographique et la vitesse d'écoulement des eaux. Ensuite chaque facteur a été multiplié par son poids, et la somme a permis d'obtenir la carte de l'aléa. Il en ressort que dans le bassin versant du Mfoundi, trois zones essentielles se dégagent : les zones inondées ou marécageuses couvrant une superficie de 975 hectares, les zones inondables avec 814 hectares et les zones sèches avec une superficie de 3743 hectares.

**Mots clés :** Aléa, Inondation, Bassin versant, Mfoundi, Yaoundé, Analyse multicritère, AHP.

**Abstract.** Flooding is a very frequent natural hazard in African cities. It corresponds to the punctual submersion of a usually dry area with fresh or salt water following a flood. The objective of this work is to produce the flood hazard map of the Mfoundi catchment area in Yaoundé. The method used is based on multi-criteria analysis, using the Thomas Saaty's weighting tool (Analytical hierarchy process AHP). To do this, the Arc Gis software was used to model the input parameters, namely: slope, altitude, topographical humidity index and water flow speed. Then each factor was multiplied by its weight and their sum was used to obtain the hazard map. It emerges that in the Mfoundi watershed, three essential areas emerge: flooded or marshy areas covering an area of 975 hectares, flood zones with 814 hectares and dry areas with an area of 3743 hectares.

**Keywords:** Hazard, Flood, Catchment area, Mfoundi, Yaoundé, multi-criteria analysis, AHP.

#### Abridged English version

The science of risk or cyndinics (Wackermann 2005) is recent; risk mapping is even more recent. Since the end of the 60s, the rise of computer science in geography has led to the development of a new type of tool called Geographic Information Systems (GIS) (Tomlinson 2007). With this tool, scientists and experts can measure, calculate and quantify risks (Cornélis & Billen 2001). According to (Meyer *et al.* 2001), remote sensing and GIS are particularly effective tools for the study of natural hazards. In fact, depending on the size of the area studied, the availability of spatial data and the targeted objectives, one or the other approach can be used to map risks. In this case, we used GIS for our flood study. The aim of this work is to show the possibilities offered by GIS for flood risk management by mapping the flood hazard based on ArcGIS software, and to integrate into the study a new and little used concept of Saaty's weight allocation.

The methodology used throughout this study was mainly based on a 30 m resolution Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Using the tools provided by the ArcGIS software, we produced a set of thematic layers and maps. Thus the combination of these layers with the weights obtained by the AHP method of (Saaty 1980), allowed us to map the flood

hazard in the Mfoundi catchment area. More precisely, the methodology is based on one concept: multi-criteria analysis (MCA) by the Saaty's AHP weighting method.

The multi-criteria analysis was based on the study of four factors predisposed to flooding, namely:

- The slope (F1): this is a factor that provides information on the mobility of surface water (direction of flow and even speed of flow). The more the slope tends to zero, the greater the risk of flooding.
- Altitude (F2): this provides information on the lowland areas of the catchment area.
- The flow velocity (F3): two key notions are used to find this factor, the length of the flow called flow length and the time. The flow length tool is essentially used to calculate the length of the longest flow path in a given catchment area. This tool can also be used to create diagrams representing surface distances for precipitation and runoff forecasts. This parameter was used in this study as the distance or length of storm water runoff. It is determined using the flow direction with the digital terrain model (DTM). The flow velocity is therefore the ratio between flow length and time. The time

corresponds to the immersion of the water after the flood. This data was obtained in the field. It is set at four hours.

- The topographical humidity index (F4): is a classic index used to quantify the effect of topography on hydrological processes (among others, waterlogging). It highlights relatively flat and naturally humid areas due to their position in the catchment area.

Subsequently, the four predisposing factors were subdivided into five (5) classes. The very low class with zero susceptibility to flooding. The low class covering an area with a susceptibility of ] 0 – 25 %]. The moderate class covering an area with a susceptibility of ] 25 – 50 %]. The high class has a flood susceptibility of ] 50 – 75 %] and the very high class has a percentage of susceptibility of ] 75 – 100 %].

Saaty (1980) developed the AHP method in the 1970s. It consists firstly of constructing the pair-wise comparison matrix (or judgment matrix) of factors studied based on Saaty's weighted task importance scale. This matrix consists of comparing two factors (i and j two predisposing factors) and a numerical value  $\alpha(i; j)$  is assigned to this comparison representing an assessment of the relative preference between factor i and factor j. If factor i is preferred to factor j we will have  $\alpha(i; j) > 1$ ; otherwise we will have  $0 < \alpha(i; j) < 1$  unless both factors are found to be equivalent, in which case we have  $\alpha(i; j) = 1$ . The binary comparison matrix of predisposing factors is presented in Table 3. The second step

is to determine the weight of the factors through a series of operations (Tab. 5). The results are: weight of slopes (P1) (54.77 %), altitudes (P2) (25.59 %), flow velocity (P3) (14.48 %) and topographic humidity index (P4) (5.16 %). Before using its weights, it is necessary to evaluate the coherence of the matrix. If the matrix is consistent, then the weights assigned to the factors are usable; otherwise, the matrix would have to be revised. The judgment matrix is coherent if the Coherence Ratio (CR) is strictly less than 0.1 or 10 %. The Coherence Ratio gave 0.092.

To conclude, the methodology of the model is based on the formula (Fig. 2):

$$\text{Flood Hazard} = \sum (F_i \times P_i)$$

F for flood predisposition factor and P the weight corresponding to each factor.

The main search result is the flood hazard map. The hazard map for the Mfoundi catchment area is presented in three (3) classes (Fig. 7). Flooded or marshy areas cover an area of 975 hectares, flood zones with 814 hectares and dry areas with an area of 3743 hectares.

Finally, we proceeded with a series of checks to validate the hazard map. This validation is based on the superimposition of flood points on the hazard layer. If there is correlation the result is accepted, otherwise, it is rejected (Fig. 8).

## INTRODUCTION

Les inondations sont des catastrophes naturelles, les plus récurrentes, les plus dommageables et les plus mortelles (Pulvirenti *et al.* 2011). Elles sont la source de près de la moitié des décès causés par les catastrophes naturelles au cours des 50 dernières années, et sont responsables du tiers des pertes économiques au niveau mondial (James 2008). Entre 1980 et 2017, on dénombre 987 cas d'inondation en Afrique, ce qui a entraîné les pertes économiques d'environ 973 milliards de dollars US (Bruckmann *et al.* 2019). Au Soudan, les inondations de septembre 2020 ont fait des dizaines de morts et plus de 800 000 déplacés (France 24 Télévisions du 26 Septembre 2020). Le Cameroun n'est pas épargné par ce phénomène. Les inondations ont affecté 367 276 personnes entre 2007 et 2015, particulièrement dans les zones urbaines (Zogning Moffo *et al.* 2017). Dans sa capitale Yaoundé, la croissance démographique est évaluée aujourd'hui 4,5 % par an et sa topographie accidentée accroît le risque d'inondation (Mougoue & Laurentine 2021). Face à ce risque, le gouvernement Camerounais a mis sur pied plusieurs programmes dont le plan directeur d'urbanisation (PDU) horizon 2020 et le plan d'assainissement et développement de la ville de Yaoundé (PADY). Malgré tous ces efforts, le problème persiste et perdure car Yaoundé enregistre toujours des inondations en saison pluvieuse. Celles du 10 septembre 2020 aux quartiers Etam-bafia et à la Poste centrale en sont des parfaites illustrations. Les hypothèses de recherche sont nombreuses et l'une d'elles est la connaissance limitée des surfaces inondables. Pour y répondre, les Systèmes d'information géographique (SIG) peuvent être mis à contribution. Ainsi deux questions se soulèvent, à savoir : Quel est l'apport des systèmes d'information géographique dans la cartographie de l'inondation? Quelles sont les zones naturellement favorables aux inondations dans le bassin versant du Mfoundi? Ce travail de recherche met en évidence

l'aléa inondation dans son sens premier du terme qui est un phénomène naturel sans intégrer les causes anthropiques qui sont un facteur aggravant du phénomène. L'intérêt de cette étude est la lutte contre le risque d'inondations en intégrant la méthode d'attribution des poids de Saaty aux facteurs naturels du milieu, en vue de la détermination de l'aléa. L'objectif est de produire la carte de l'aléa inondation dans le bassin versant du Mfoundi.

## ZONE D'ÉTUDE

Située à 250 km de l'Océan Atlantique, entre les longitudes 11°10' E et 11°45' E, et les latitudes 3°47' N et 3°56' N (Fig. 1), Yaoundé, la capitale politique du Cameroun, couvre une superficie d'environ 287,98 km<sup>2</sup>. Le bassin versant du Mfoundi, site de cette étude, est un sous bassin versant de la Mefou, et le cours d'eau Mfoundi est son principal collecteur. Le climat de la zone est de type équatorial. Il y règne 4 saisons dont 2 pluvieuses (une petite de Mars à Juin et une grande de Septembre à Novembre) et 2 sèches (une petite de Juillet à Août et une grande de Décembre à Février). Les saisons pluvieuses d'inégales longueurs sont caractérisées par de fortes averses. La pluviométrie moyenne annuelle est de 1564,7 mm/an (Lienou *et al.* 2008). Le bassin versant est situé sur un site collinaire, d'altitude variant entre 600 et 1200 mètres. Les sols de la région de Yaoundé sont de type ferralitique (Bachelier 1954).

## MATERIEL ET METHODES

Pour la cartographie de l'aléa inondation, l'image SRTM d'une résolution planimétrique de 30 m et les données vectrices ont été utilisées sous le logiciel Arc-Gis 10.3.1. Celles-ci ont permis de générer des couches thématiques et des cartes de différents facteurs d'inondations. Par la suite, ces facteurs ont été croisés en fonction de leur poids afin d'obtenir la carte de l'aléa inondation (Fig. 2).

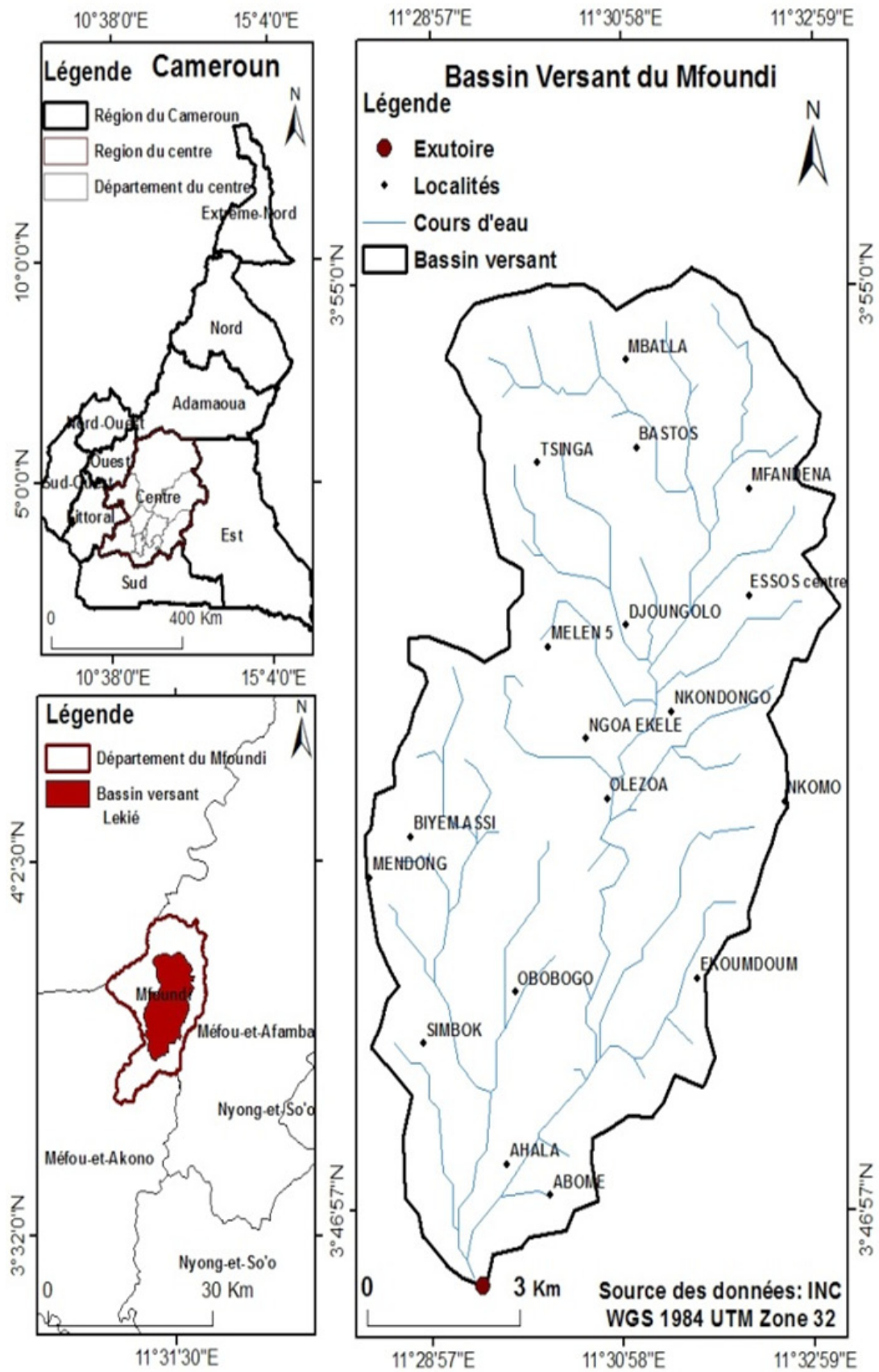


Figure 1. Localisation du bassin versant du Mfoundi.  
 Figure 1. Location of the Mfoundi watershed.

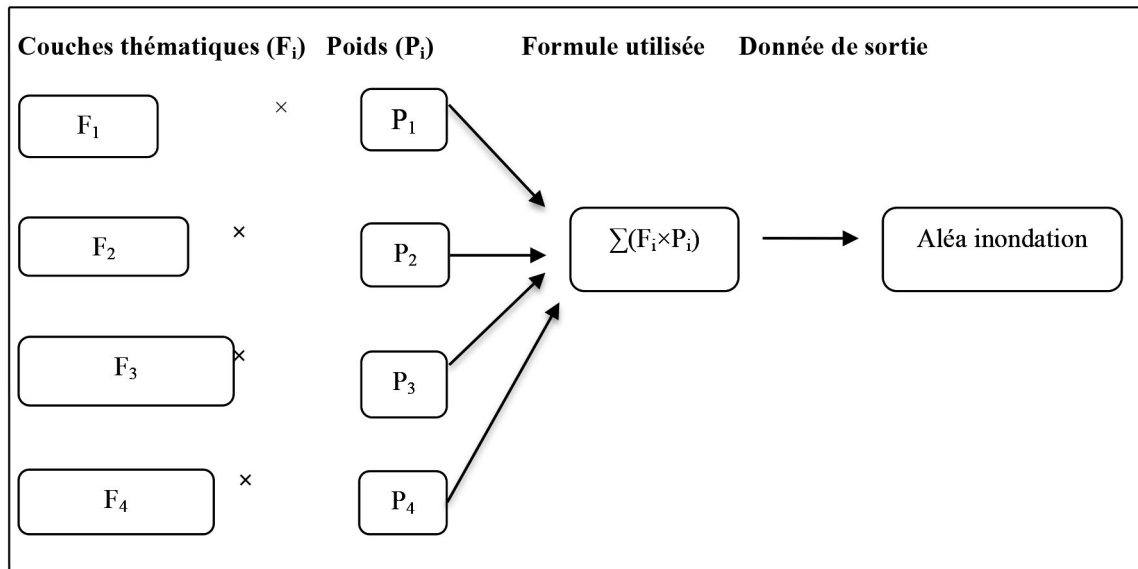


Figure 2. Modèle utilisé.

Figure 2. Model used.

F = Facteur de l'aléa ; P= le poids correspondant à chaque facteur.

### Définition des facteurs de l'aléa

Par définition, les événements historiques sont un bon indicateur de la susceptibilité d'une zone donnée à un phénomène dommageable. Le choix des facteurs de prédisposition basé sur les informations continues dans l'espace s'est fait suivant quatre paramètres suivants :

- La pente

La pente est un facteur très important dans le processus d'inondation. Elle influence la mobilité des eaux de pluie (stagnation, sens d'écoulement, direction des eaux et même la vitesse des eaux).

- L'altitude

L'altitude permet de déterminer les zones de vallées peu perchées au-dessus de leurs thalwegs et donc facilement submersibles.

- L'indice d'humidité topographique

Le facteur d'humidité topographique (TWI) est un indice classique qui sert à quantifier l'effet de la topographie sur les processus hydrologiques (entre autres, l'engorgement des sols). Il fait ressortir les zones relativement plates et naturellement humides de par leur position dans le bassin versant. Ce facteur est dérivé du modèle numérique de terrain (MNT).

- La Vitesse d'écoulement

Deux éléments clés sont nécessaires pour déterminer la vitesse d'écoulement : la longueur de flux appelé « flow length » et le temps.

L'outil longueur de flux permet de calculer le chemin de flux le plus long dans un bassin versant donné. On peut aussi employer cet outil pour créer des diagrammes représentant les distances-surfaces relatives aux précipitations et aux écoulements prévisionnels. Dans le cadre de ce travail de recherche, il représente le facteur distance en mètre des

écoulements des eaux pluviales. Cette couche se détermine à l'aide du « flow direction ». La donnée d'entrée est le MNT. Le facteur temps est fixé à 4 heures. Il a été collecté sur le terrain des points preuves d'inondation qui à chacun d'eux a été relié une question aux autochtones (5 foyers par point) sur le temps d'immersion des eaux pendant une inondation. Il en ressort que ce dernier fait 4 heures en moyennes (Tab. 18). La vitesse d'écoulement est donc égale au rapport du « flow length » sur le temps.

Dans le cadre de cette étude, cinq (5) classes de susceptibilité sont utilisées pour quantifier les facteurs de prédispositions. Très faible pour les zones dont la susceptibilité des inondations est nulle, faible pour une susceptibilité de ]0 - 25 %], modérée de ]25 - 50 %], élevée de ]50 - 75 %] et très élevée ]75 - 100 %].

### Attribution des poids par le processus d'analyse hiérarchique (Saaty 1980)

La méthode d'aide à la décision multicritère AHP a été conçue par Saaty (1980). Elle consiste premièrement à construire la matrice de comparaison par paires (ou matrice de jugement) des facteurs étudiés en se basant sur l'échelle d'importance de tâche pondérée de Saaty (Tab. 2). Pour établir cette correspondance (Tab. 2), Saaty (1980) a procédé à des expérimentations au cours desquelles les participants avaient à évaluer à l'aide de l'échelle verbale (Tab. 1), des grandeurs relatives liées à des phénomènes dont les mesures étaient connues. Saaty s'est inspiré des travaux de Thurstone, de Weber et de Fechner sur la mesure des perceptions sensorielles pour construire l'échelle verbale. Il découle de ce travail sept (7) principaux degrés d'importance.

Par la suite Saaty a mis en correspondance les jugements exprimés par les participants avec 27 échelles numériques différentes et calculé l'erreur d'estimation (RMS) avec les distances réelles (Saaty 1980). À la suite de ces expérimentations, Saaty a retenu une échelle linéaire constituée des nombres de 1 à 9 (valeur numérique).



Tableau 1. Échelle verbale.  
Table 1. Verbal scale.

Expression	Valeur numérique	Explication
Importance égale	1	Les deux activités contribuent à l'objectif de façon équivalente
Importance modérée	3	L'expérience et le jugement favorisent une activité plutôt que l'autre
Importance forte	5	L'expérience et le jugement favorisent fortement une activité plutôt que l'autre
Importance très forte	7	Une activité est fortement favorisée et sa dominance est démontrée dans la pratique
Importance extrême ou absolue	9	L'évidence favorisant une activité plutôt que l'autre est du plus haut ordre d'affirmation possible
Degré d'importance intermédiaire	2 ; 4 ; 6 ; 8	Lorsqu'un compromis entre deux expressions est requis
Importance réciproque	1/2 ; 1/3 ; 1/4 ; 1/5 ; ... ; 1/9	La réciproque des 5 premiers degrés

Tableau 2. Échelle d'importance de tâche pondérée de Saaty (Saaty 1980).  
Table 2. Saaty's Weighted Task Importance Scale (Saaty 1980).

Intensité de la préférence	Valeur associée
Importance égale des deux facteurs	1
Un facteur a une importance modérée comparativement à l'autre	3
Un facteur a une importance forte que l'autre	5
Un facteur a une importance très forte que l'autre	7
Un facteur a une importance absolue sur l'autre	9
On préfère un peu moins le premier facteur que le second	1/3
On préfère moins le premier facteur que le second	1/5
On préfère beaucoup le second facteur au premier	1/7
On préfère beaucoup moins le premier facteur au second	1/9

Tableau 3. Matrice de comparaison binaire.  
Table 3. Binary comparison matrix.

	Pente	Altitude	Vitesse d'écoulement	Indice d'humidité topographique
Pente	<b>1</b>	3	5	7
Altitude	1/3	<b>1</b>	3	5
Vitesse d'écoulement	1/5	1/3	<b>1</b>	5
Indice d'humidité topographique	1/7	1/5	1/5	<b>1</b>
Somme par colonne	<b>1,6762</b>	<b>4,5333</b>	<b>9,2</b>	<b>18</b>

Tableau 4. Modèle de calcul de la matrice de jugement.  
Table 4. Model for the computation of the judgment matrix.

	Pente	Altitude	Somme par ligne
Pente	A/S1	B/S2	$\sum ((A/S1) + (B/S2) + \dots) = K1$
Altitude	C/S1	A/S2	$\sum ((C/S1) + (A/S2) + \dots) = K2$

Par définition mathématique, soit une matrice de comparaisons par paires de dimensions  $n \times n$ , dans laquelle la case à l'intersection de la rangée  $i$  et de la colonne  $j$  est identifiée par la paire  $i, j$ .

Soient  $i$  et  $j$  deux facteurs appartenant à  $n$  facteurs et  $\alpha$  la valeur associée.

$A = \{\alpha(i, j)\}$  tel que  $\alpha(i, j)$  est un nombre positif réel exprimant un ratio de dominance du facteur  $i$  sur le facteur  $j$ , et ce  $\forall i, j \in \{1, \dots, n\}$ .

Dans le processus d'analyse hiérarchique (AHP), lorsque l'on compare deux facteurs et qu'on assigne une valeur numérique  $\alpha(i, j)$  à cette comparaison, celle-ci représente une évaluation de la préférence relative entre le facteur  $i$  et le facteur  $j$ . Si le facteur  $i$  est préféré au facteur  $j$ , on aura  $\alpha(i, j) > 1$ , sinon on aura  $0 < \alpha(i, j) < 1$  à moins que les deux facteurs soient jugés équivalents, auquel cas nous aurons  $\alpha(i, j) = 1$ .

Pour chaque jugement correspondant à la case de rangée  $i$ , colonne  $j$ , on forme la matrice numérique en assignant les valeurs :

- $\alpha(i, j)$  = la valeur numérique correspondant au jugement;
- $\alpha(j, i) = 1/\alpha(i, j)$ , qui est la valeur réciproque.

Pour la cartographie de l'aléa inondation dans le bassin versant du Mfoundi, quatre (04) paramètres ont été mis

à contribution ; il s'agit de la pente, l'altitude, la vitesse d'écoulement et l'indice d'humidité topographique.

La matrice de comparaison binaire de ces paramètres est présentée dans le Tableau 3.

Les éléments de la matrice de jugement sont obtenus en divisant la valeur de chaque cellule par la somme des valeurs appartenant à cette colonne (Tab. 5).

Pour illustration des formules, la pente et l'altitude ont été utilisés. Ce processus s'appliquera sur tout le reste des facteurs.

Enfin, pour obtenir les poids, la somme par ligne obtenue du Tableau 5 correspondant à chaque facteur a été divisée par la somme totale des lignes du dit Tableau (Tab. 7).

#### Évaluation de la cohérence de la matrice

Avant l'usage des poids, il est primordial d'évaluer la cohérence de la matrice. L'étude consiste à déterminer et à comparer le Ratio de cohérence (RC) afin de voir si la matrice est suffisamment cohérente ou non. Elle est cohérente si  $RC < 0,1$  car dans le cas contraire il faudra réviser la matrice de jugement. L'évaluation de la cohérence des jugements (Tab. 9) s'est effectuée en multipliant colonne par colonne la valeur associée de la matrice de comparaison binaire (Tab. 3) par le poids du facteur correspondant. Ensuite la cohérence a été calculée (Tab. 11) en divisant chaque somme des lignes du résultat de l'évaluation de la cohérence des jugements (Tab. 6) par le poids correspondant au facteur.

Tableau 5. Résultat de la matrice de jugement.

Table 5. Result of the judgment matrix.

	Pente	Altitude	Vitesse d'écoulement	Indice d'humidité topographique	Somme par ligne
Pente	0,5966	0,6618	0,5435	0,3889	<b>2,1908</b>
Altitude	0,1988	0,2206	0,3261	0,2778	<b>1,0233</b>
Vitesse d'écoulement	0,1193	0,0735	0,1087	0,2778	<b>0,5793</b>
Indice d'humidité topographique	0,0852	0,0441	0,0217	0,0555	<b>0,2065</b>
<b>Somme totale des lignes (K)</b>					<b>3,9999</b>

Tableau 6. Modèle de calcul des poids.

Table 6. Model for the computation of the weights.

	Pente	Altitude
Poids	<b>K1/K=P1</b>	<b>K2/K=P2</b>

Tableau 7. Résultats du poids des facteurs.

Table 7. Results of factor weights.

Facteurs	Pente	Altitude	Vitesse d'écoulement	Indice d'humidité topographique
Poids des critères	0,5478	0,2558	0,1448	0,0516
<b>En pourcentage (%)</b>	<b>54,78</b>	<b>25,58</b>	<b>14,48</b>	<b>5,16</b>
	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>

Tableau 8. Évaluation de la cohérence des jugements.

Table 8. Evaluation of the consistency of judgments.

	Pente	Altitude	Somme des lignes
Pente	$A \times P1$	$B \times P2$	$\sum ((A \times P1) + (B \times P2) + \dots) = W1$
Altitude	$C \times P1$	$A \times P2$	$W2$

Tableau 9. Résultats de l'évaluation cohérence des jugements.  
 Table 9. Results of the assessment consistency of judgments.

	Pente	Altitude	Vitesse d'écoulement	Indice d'humidité topographique	Somme Par ligne
Pente	0,5478	0,7674	0,724	0,3612	<b>2,4004</b>
Altitude	0,1826	0,2558	0,4344	0,258	<b>1,1308</b>
Vitesse d'écoulement	0,1096	0,0853	0,1448	0,258	<b>0,5977</b>
Indice d'humidité topographique	0,0783	0,0512	0,0290	0,0516	<b>0,2101</b>

Tableau 10. Calcul des cohérences.  
 Table 10. Calculation of consistency.

	Pente	Altitude	Vitesse d'écoulement	Indice d'humidité
Cohérence	W1/P1	W2/P2	W3/P3	W4/P4

Tableau 11. Les cohérences.  
 Table 11. Consistencies.

Critères	Pente	Altitude	Vitesse d'écoulement	Indice d'humidité topographique
Cohérence	<b>4,3819</b>	<b>4,4206</b>	<b>4,1278</b>	<b>4,0717</b>

Tableau 12. Indice Aléatoire (Saaty 1980).  
 Table 12. Random Index (Saaty 1980).

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IA	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Enfin, nous devons déterminer :

$$IC = \frac{Y_{max} - n}{n - 1} = 0,0835$$

$$Y_{max} = \frac{\sum Cohérence}{4} = 4,2505$$

$$RC = \frac{IC}{IA} = 0,093$$

Dans cette formule  $Y_{max}$  représente la valeur propre max, et le chiffre 4 du dénominateur représente le nombre de critère. Dans les formules suivantes n représente le nombre de facteurs ; IC représente l'Indice de Cohérence ; IA représente l'Indice Aléatoire lié au nombre de facteurs (Tab. 12) et RC le Ratio de Cohérence.

0,093 < 0,1 donc la matrice est suffisamment cohérente.

## RÉSULTATS

L'inondation se produit généralement dans une zone lorsque l'eau issue des pluies est en excès et ne peut plus être évacuée.

### Les pentes

La figure 3 présente cinq (5) classes de pente. La classe [25 - 75,72[ représente une zone à susceptibilité d'inondation très faible couvrant une superficie de 387 hectares avec une susceptibilité d'inondation de 0 %. La classe [15 - 25[ quant à elle représente une zone à susceptibilité faible aux inondations avec une superficie de 3772 hectares et un pourcentage de susceptibilité ]0 - 25%]. La classe à susceptibilité modérée [25 - 50%] se situe sur une zone de pente [10 - 15[ ayant une

surface de 3912 hectares de susceptibilité. D'une superficie de 1081 hectares, la classe à susceptibilité élevée aux inondations ]50 - 75%] a une pente [5 - 10[. La classe [0 - 5[ couvre une zone de susceptibilité très élevée aux inondations ]25 - 100%] (Tab. 13).

### Les altitudes

Les altitudes ont été regroupées en cinq (5) classes (Fig. 4) et elles varient entre 669 et 1072 m. La classe de susceptibilité très faible [874 - 1072[ couvre une surface égale à 102 hectares, elle est constituée de colline et sa susceptibilité aux inondations est de 0 %. Celle qui la suit [779 - 874[ à susceptibilité faible couvre une surface de 816 hectares et a un pourcentage de susceptibilité ]0 - 25%]. La classe à susceptibilité modérée [740 - 779[ couvre une superficie de 2229 hectares avec une susceptibilité au risque de ]25 - 50%]. La classe à susceptibilité élevée [708 - 740[ couvre 1982 hectares pour un pourcentage de susceptibilité aux inondations ]50 - 75%]. Quant à la classe à susceptibilité très élevée au risque [669 - 708[, elle couvre une superficie de 1521 hectares et une susceptibilité aux inondations de ]75 - 100%] (Tab. 14).

### Vitesse d'écoulement des eaux

La vitesse d'écoulement des eaux superficielles (Fig. 5) varie de 0 à 1,62 m par seconde dans le bassin versant du Mfoundi. Elle est subdivisée en 05 classes. La classe [1,2 - 1,62[ à susceptibilité très faible aux inondations couvre une surface de 1 042 hectares à un pourcentage de risque de 0%. La classe [0,9 - 1,2[ quant à elle représente une zone à susceptibilité faible aux inondations avec une superficie de 1 814 hectares et un pourcentage de

susceptibilité de ]0 - 25%]. La classe à susceptibilité modérée se trouve sur une zone de vitesse [0,6 - 0,9[ ayant une surface de 882 hectares de susceptibilité aux inondations ]25 - 50%]. La classe à susceptibilité élevée [0,3 - 0,6[ couvre une surface de 960 hectares et un pourcentage de susceptibilité de ]50 - 75 %]. La classe à susceptibilité très élevée [0 - 0,3[ a une superficie de 672 hectares et un pourcentage de susceptibilité aux inondations de ]75 - 100%] (Tab. 15).

**Indice d'humidité topographique**

Plus l'indice est grand plus la zone est humide et plus la susceptibilité aux inondations est grande (Fig. 6). La classe à susceptibilité très faible aux inondations [4,75 - 7,6[ couvre une superficie de 1500 hectares et un pourcentage à susceptibilité aux inondations de 0%. La classe [7,6 - 9,5[ à susceptibilité faible couvre une zone de 1241 hectares et un pourcentage à risque de ]0 - 25%]. La classe [9,5 - 12,1[ à susceptibilité modérée couvre une surface de 1005 hectares avec un pourcentage à susceptibilité de ]25 -50%]. La classe à susceptibilité élevée [12,1 - 15,1[ couvre une surface de 647 hectares et une susceptibilité aux inondations de ]50 - 75%]. Enfin la classe à risque très élevée est de [15,1 - 20,73] et couvre 903 hectares et a un pourcentage de susceptibilité de ]75 - 100 %].

**Détermination de la carte de l'aléa aux inondations**

La cartographie de l'aléa inondation dans le bassin versant du Mfoundi est présentée en trois (3) classes de zone (Fig. 7) :

La zone inondée ou zone marécageuse couvre une superficie de 975 hectares. Elle est considérée comme étant une zone toujours immergée dans de l'eau dans la quasi-totalité de l'année, exceptée en cas de grande et longue saison sèche.

La zone inondable quant à elle représente une zone susceptible d'être inondée. Au cours de l'année, cette zone est habituellement sèche mais en cas de forte pluie combinée à d'autres facteurs, elle peut être immergée. Elle couvre une superficie de 814 hectares.

Concernant la zone sèche, au cours de l'année, en période de pluie ou pas, le risque d'avoir une inondation est très faible. Cette zone est favorable à la construction de bâtiments des travaux publiques. Elle couvre une superficie de 3743 hectares (Fig. 7).

**Validation de la carte de l'aléa**

La vérification de la carte de l'aléa inondation s'est faite à l'aide des points preuves d'inondation collectés sur le terrain. Ces points preuves correspondent aux zones où le phénomène d'inondation s'est déjà réalisé. L'objectif est de superposer ces points sur la carte de l'aléa. Si la majorité des points corrént avec la couche de l'aléa, alors le résultat est bon, mais dans le cas contraire la méthodologie est à revoir (Fig. 8).

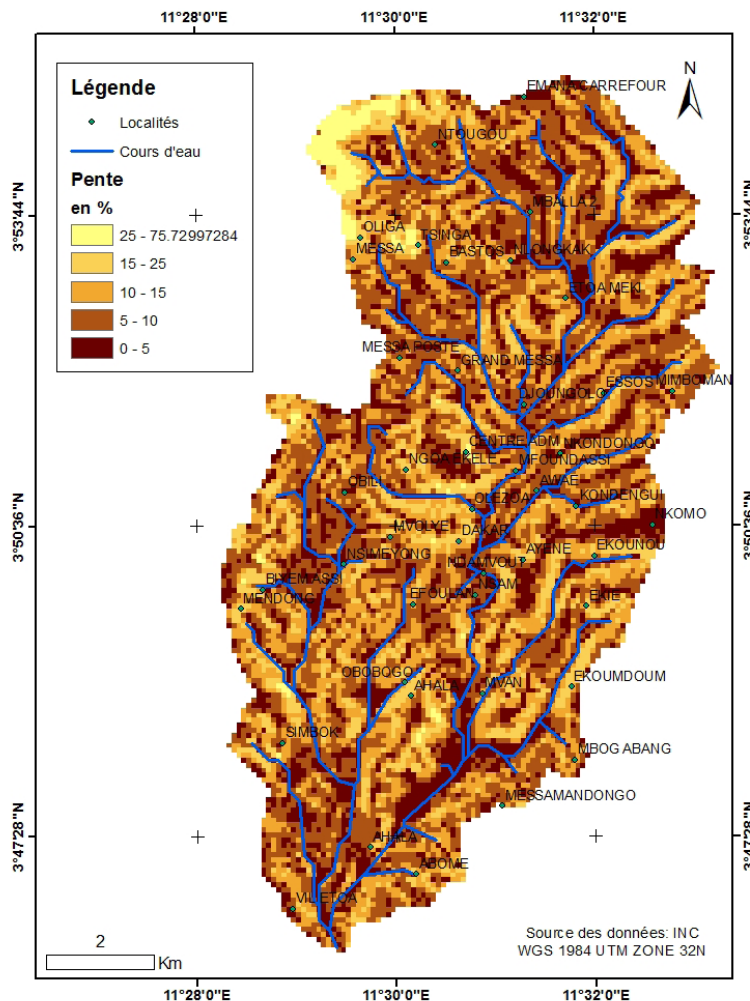


Figure 3. Les pentes dans le bassin versant du Mfoundi.  
Figure 3. Slope in the Mfoundi watershed.



Tableau 13. Analyse des pentes.  
 Table 13. Slope analysis.

Classes (en pourcentage)	Zone à inondation	Superficie en hectare	Susceptibilité à l'inondation (%)
[25 - 76[	Très faible	387	0
[15 - 25[	Faible	3772	]0 - 25]
[10 - 15[	Modérée	3912	]25 - 50]
[5 - 10[	Élevée	1081	]50 - 75]
[0 - 5[	Très élevée	702	]75 - 100]

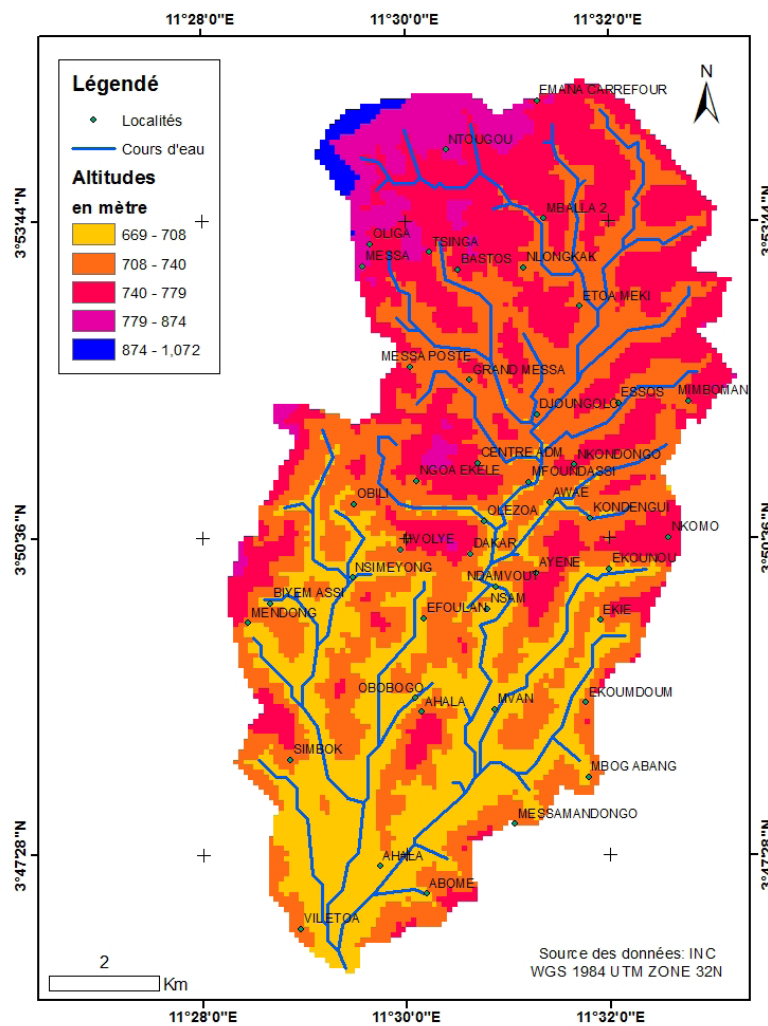


Figure 4. Les altitudes dans le bassin versant du Mfoundi.  
 Figure 4. Altitudes in the Mfoundi watershed.

Tableau 14. Répartition des altitudes.  
 Table 14. Altitude distribution.

Classes (en mètre)	Zone à inondation	Superficie en hectare	Susceptibilité à l'inondation (%)
[874 - 1072[	Très faible	102	0
[779 - 874[	Faible	816	]0 - 25]
[740 - 779[	Modérée	2229	]25 - 50]
[708 - 740[	Élevée	1982	]50 - 75]
[669 - 708[	Très élevée	1521	]75 - 100]

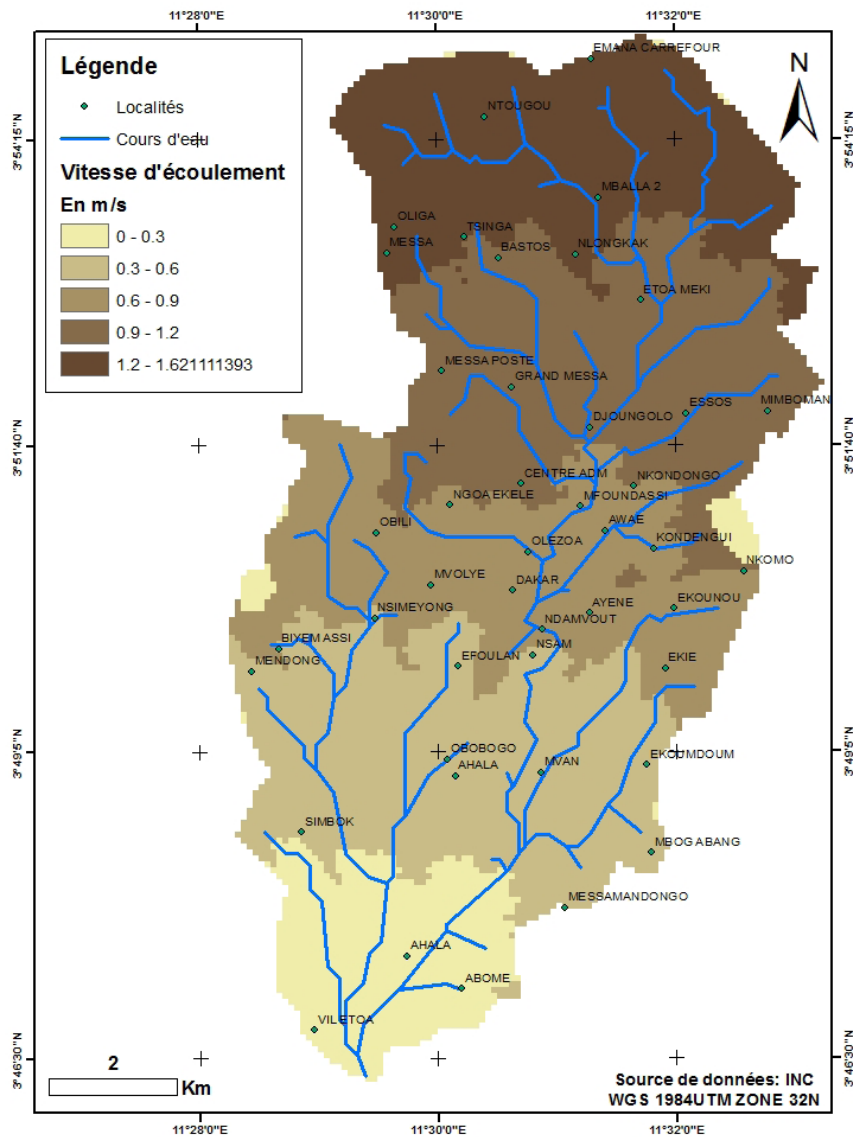


Figure 5. Vitesse d'écoulement dans le bassin versant Mfoundi.  
Figure 5. Flow velocity in the Mfoundi watershed.

Tableau15. Vitesse d'écoulement des eaux.  
Table 15. Water flow velocity.

Classes (en mètre par seconde)	Zone à inondation	Superficie en hectare	Susceptibilité à l'inondation (%)
[1,2 - 1,62[	Très faible	1042	0
[0,9 - 1,2[	Faible	1814	]0 - 25]
[0,6 - 0,9[	Modérée	882	]25 - 50]
[0,3 - 0,6[	Élevée	960	]50 - 75]
[0 - 0,3[	Très élevée	672	]75 - 100]

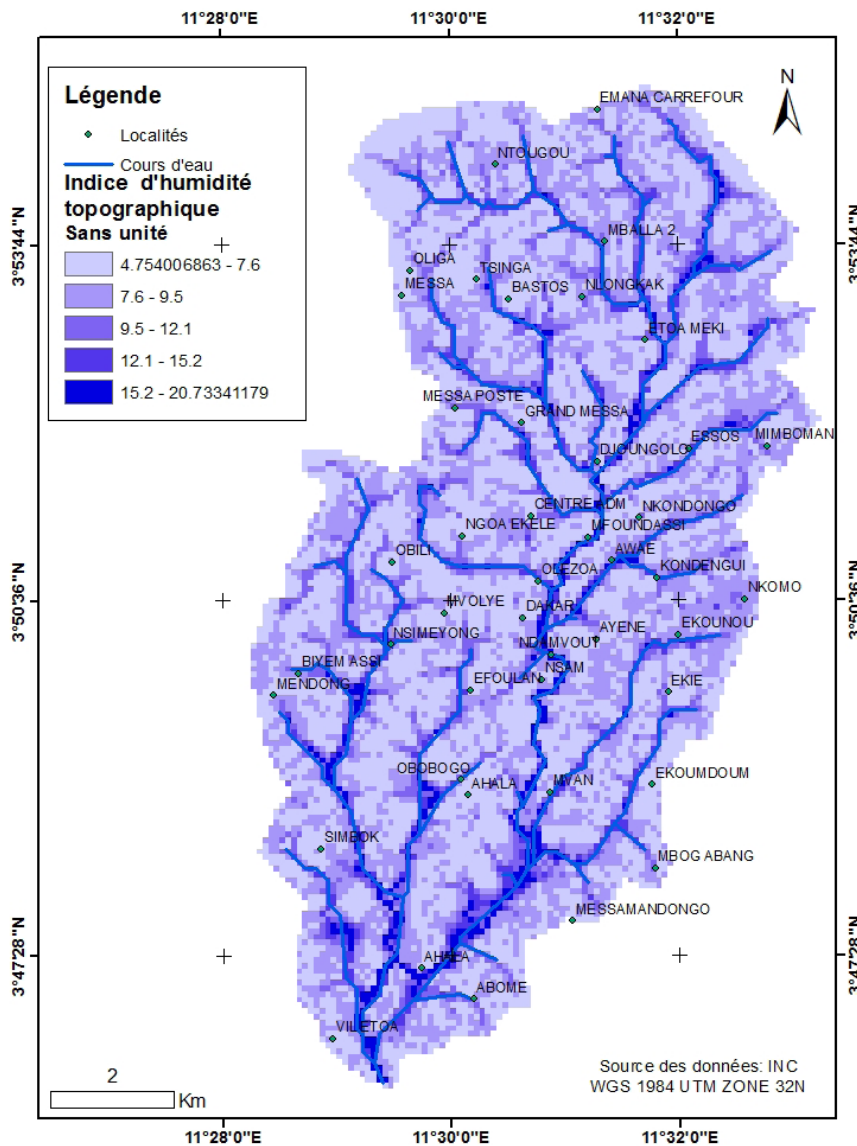


Figure 6. Indice d'humidité topographique dans le bassin versant du Mfoundi.  
 Figure 6. Topographic humidity index in the Mfoundi watershed.

Tableau 16. Variation de l'indice d'humidité topographique.  
 Table 16. Variation in the topographical humidity index.

Classes (en mètre par seconde)	Zone à inondation	Superficie en hectare	Susceptibilité à l'inondation (%)
[4,75 - 7,6[	Très faible	1500	0
[7,6 - 9,5[	Faible	1241	]0 - 25]
[9,5 - 12,1[	Modérée	1005	]25 - 50]
[12,1 - 15,1[	Élevée	647	]50 - 75]
[15,1 - 20,73[	Très élevée	903	]75 - 100]

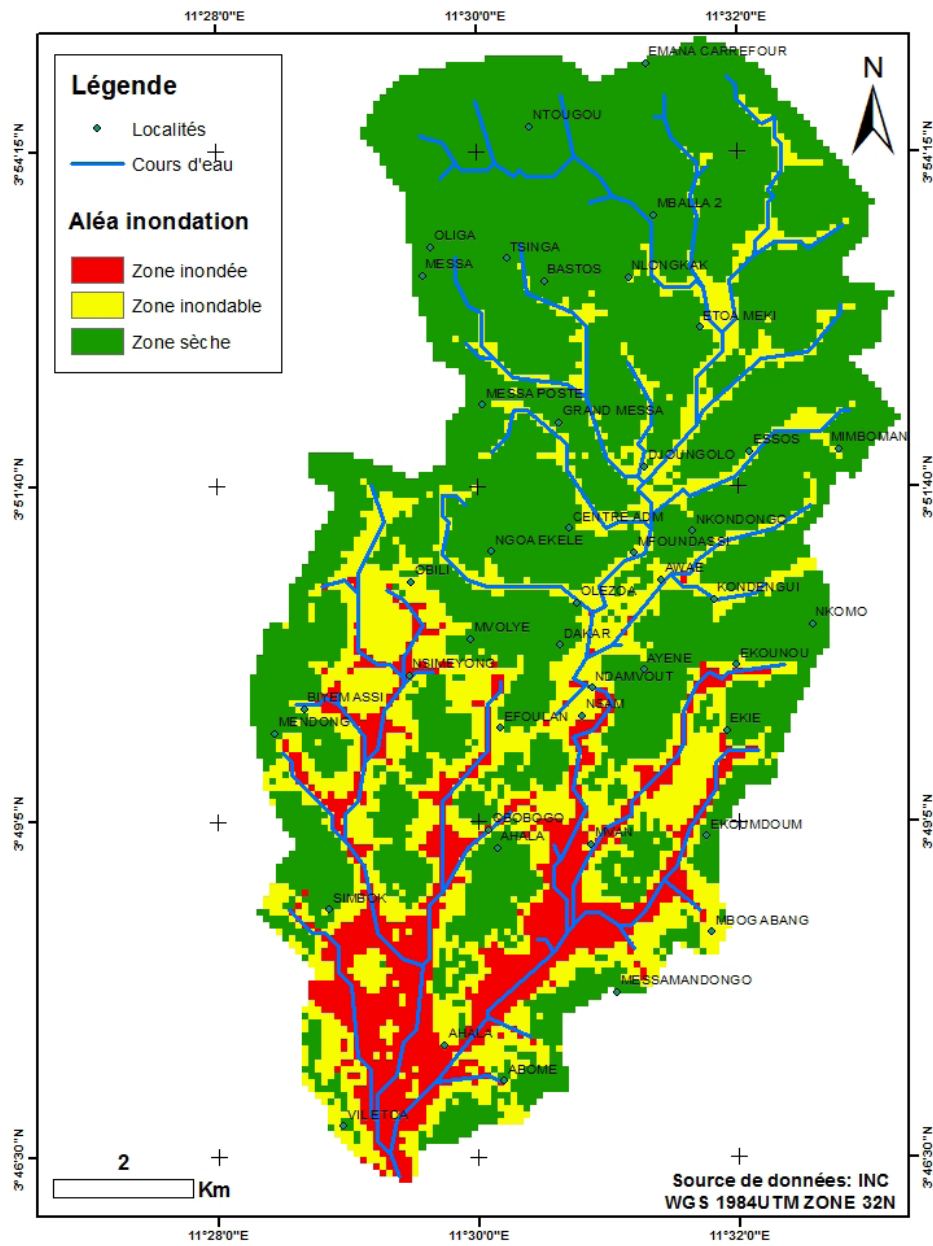


Figure 7. Classes des inondations après une pluie.  
 Figure 7. Classes of floods after a rain.

Tableau 17. Classification de la carte de l'aléa.  
 Table 1. Classification of the hazard map.

Classes d'inondation	Superficie (ha)	Pourcentage de couverture sur le bassin (%)
Zone inondée	975	17,62
Zone inondable	814	14,71
Zone sèche	3743	67,67



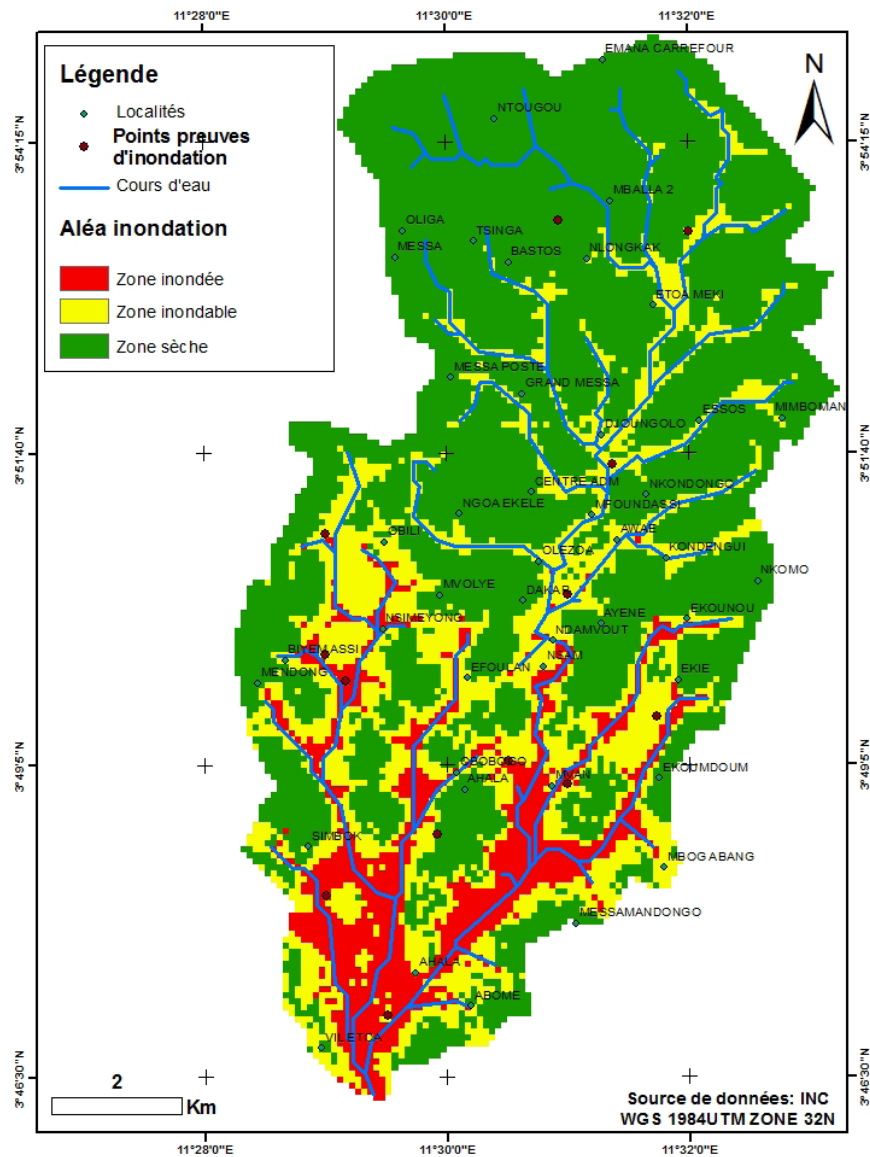


Figure 8. Carte de validation de l'inondation avec les points preuves.  
 Figure 8. Flood validation map with evidence points.

Tableau 18. Données collectées sur terrain.  
 Table 18. Data collected in the field.

N°	Coordonnées points preuves	Temps d'immersion (en heure)					Moyenne de temps
		1	2	3	4	5	
1	3°50'00"N 11°29'00"E	6	3	5	3	5	4,4
2	3°49'52"N 11°27'12"E	5	7	5	3	3	4,6
3	3°48'00"N 11°25'00"E	3	2	1	6	4	3,2
4	3°47'00"N 11°29'30"E	Ne connaît pas					
5	3°48'30"N 11°30'59"E	4	3	5	2	6	4
6	3°49'10"N 11°30'31"E	5	5	5	5	5	5
7	3°48'27"N 11°31'02"E	3	4	3	5	4	3,8
8	3°49'30"N 11°32'46"E	Ne connaît pas					
9	3°51'00"N 11°29'00"E	Ne connaît pas					
10	3°50'35"N 11°31'28"E	4	4	4	4	4	4
11	3°53'10"N 11°30'57"E	Ne connaît pas					
12	3°53'31"N 11°32'01"E	Ne connaît pas					

## DISCUSSION

### Le plan méthodologique

Au cours ces dernières décennies, différentes méthodes d'analyses multi critères ont été utilisées par de nombreux scientifiques pour la caractérisation et la gestion des risques naturels (Bi *et al.* 2014; Frédéric 2019; Leumbe *et al.* 2015; Zogning Moffo *et al.* 2017)). L'utilisation de ces approches se sont avérées efficaces en raison des surfaces relativement étendues qui peuvent être observées, et du nombre de facteurs naturels du milieu qui sont mis à contribution.

Étant donné que tous les facteurs du milieu n'ont pas la même incidence sur le risque étudié, la méthode AHP d'attribution des poids de Thomas Saaty offre l'avantage que les différents facteurs ont des poids variables, et ceci rend mieux compte de la réalité de l'aléa (Salomon & Montevechi 2001).

### Les facteurs de prédispositions

**Les pentes :** l'analyse de la pente révèle que les classes  $[0 - 1^\circ]$  et  $[1 - 2^\circ]$  représentent les zones de convergence et de stagnation des eaux. Ces faibles pentes sont concentrées pour la plupart autour des cours d'eau montrant la vulnérabilité élevée des bas-fonds marécageux aux risques d'inondation (Fig. 3). Ce résultat est similaire à celui de Zogning Moffo *et al.* (2017) qui démontre qu'au niveau de la Poste centrale de Yaoundé, l'inclinaison est très faible voire nulle, favorisant l'effet de rétention des eaux et occasionnant les inondations spectaculaires qui caractérisent ce site. Le travail de Leumbe *et al.* (2015) dans la région de l'extrême Nord du Cameroun à Maga établit des zones identiques comme vulnérables aux risques d'inondation.

**Les altitudes :** L'institut de prévention des sinistres catastrophiques du Canada révèle dans son ouvrage intitulé « Gros Plan sur la cartographie des inondations au Canada », l'importance des altitudes dans l'étude des inondations, une bonne connaissance des altitudes permet de cerner et atténuer les risques d'inondations. Dans le cadre de cette étude dans le bassin versant du Mfoundi, les altitudes occupent la deuxième place d'implication aux inondations soit 25,58% montrant ainsi l'importance attribuée à ce facteur sur le phénomène. La carte d'altitude de la zone d'étude montre que les zones à aléa fort et très fort se situent entre 669 m et 740 m, et sont concentrés sur la deuxième moitié du bassin versant couvrant les localités de Biyem-Assi, Olézoa, Simbok, Obobogo, Ekoumdoum, Ahala. Les travaux de Frédéric (2019) et Zogning Moffo *et al.* (2017) ont démontré que les zones basses de Yaoundé sont concentrées à une altitude comprise entre 600 et 720 m et constituent des points de convergence des différents cours d'eau favorisant ainsi les inondations.

**La vitesse d'écoulement des eaux et l'indice d'humidité topographique :** De nombreux cas de disparition suite aux inondations ont été mentionnées par les médias, elles sont dues à la vitesse d'écoulement des eaux. Au total, dans le bassin versant du Mfoundi, 53 personnes ont signalé la disparition d'un proche. 14 cas de disparition ont été signalés dans le bassin versant du Ntem, 11 cas dans l'Ewé et 8 dans l'Abiergué ekozoa. Ces eaux s'écoulant des hautes altitudes vers les basses altitudes, entraînent un déversement important dans les bas-fonds, et du fait que la vitesse d'écoulement qui devient très faible dans ces zones, il y'a stagnation puis débordement des eaux qui créent des inondations. Il serait

donc judicieux d'installer un exutoire artificiel au supplément de l'exutoire naturel pour permettre une évacuation de ces eaux, et donc limiter le risque d'inondation, ou exploiter ces eaux dans l'irrigation des cultures.

L'analyse de l'indice d'humidité topographique révèle que les zones humides dans le bassin versant du Mfoundi sont situées à proximité des cours d'eau.

### La carte de l'aléa

La carte d'aléa montre que les zones inondables s'organisent autour des cours d'eau qui les traversent et sont majoritairement représentées à la deuxième moitié du bassin versant. En effet, le bassin versant du Mfoundi se caractérise par des inondations par débordement du lit du cours d'eau (Frédéric 2019, Zogning Moffo *et al.* 2017). 814 hectares représentent la surface susceptible d'être inondée dans le bassin versant du Mfoundi soit 14,71 % de sa surface totale. Ce résultat est de loin supérieur à celui obtenu par Zogning Moffo *et al.* (2017), qui a obtenu 479 hectares, donc une différence de 338 hectares. Les hypothèses liées à cette différence de surface sont nombreuses. L'une d'entre elles est que dans notre étude la limite du bassin s'étend jusqu'à Ahala, tandis que celle de Zogning Moffo *et al.* (2017) s'étend juste au niveau de Nkoldongo, rendant la surface du bassin versant du Mfoundi utilisée dans ce document plus grande que celle utilisée par Zogning Moffo *et al.* (2017). Il y a aussi la distinction qui se fait clairement dans ce document de zone inondée et de zone inondable qui constitue une piste importante pour comprendre l'écart de superficie qui existe entre les deux résultats.

## CONCLUSION

La contribution à la cartographie de l'aléa inondation dans le bassin versant du Mfoundi a permis de distinguer cinq catégories de zone d'aléa ; zones à aléa très faible, faible, modéré, élevé et très élevé, rappelant que l'aléa inondation est la conjonction de plusieurs facteurs intensifiés par leur poids. De par leur position dans le bassin versant, les quartiers de Simbok, Ahala, Biyem assi, Obobogo et Olezoa sont potentiellement à risque si les mesures ne sont pas prises. Le défi majeur serait donc que les pouvoirs publics et les municipalités adoptent des mesures drastiques afin que certains événements tragiques ne se produisent pas. La mise sur pied effective du plan directeur d'urbanisation (PDU) horizon 2020 et du plan d'assainissement et développement de la ville de Yaoundé (PADY) a atténué l'occurrence des inondations mais beaucoup reste à faire. Pour cela, il est important de comprendre que nous vivons dans un écosystème régi par des règles et phénomènes dont l'inondation fait partie. À travers la migration de l'Homme vers les zones inondables, ce phénomène qui est naturel se convertit en un phénomène dangereux. Pour éviter la survenue d'un événement tragique dans les localités susmentionnées, il est important que le gouvernement circoncrive les zones à aléa élevé et très élevé et y empêche aux citoyens la construction et le développement d'une quelconque activité.

## REMERCIEMENTS

Nos remerciements partent à l'endroit de la famille des chercheurs du Laboratoire de Recherche sur les Risques Naturels (LRRN) et Laboratoire de Recherche en Géodésie (LAREG) à l'Institut National de Cartographie (INC), à l'éditeur Hamid Slimani et aux deux rapporteurs Mohamed Elmeïdi Saidi et Michel Tchotsoua.

## REFERENCES

- Bachelier, G. 1954. Etude pédologique sur l'immersion des sols de bas-fonds à Yaoundé. Office de la Recherche Scientifique et Technique Outer-Mer, N° 1630, 9 p.
- Bi V.H.N., Saley B., Wade S. *et al.* 2014. Cartographie du risque d'inondation par une approche couplée de la Télédétection et des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) dans le département de sinfra (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 10(2), 170–191.
- Bruckmann L., Amanjieu A., Moffo M.O.Z. *et al.* 2019. Analyse géohistorique de l'évolution spatio-temporelle du risque d'inondation et de sa gestion dans la zone urbaine de Douala (Cameroun). *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, 13, 91–113.
- Cornélis B. & Billen R. 2001. La cartographie des risques et les risques de la cartographie. Risque et systèmes complexes: les enjeux de la communication, 207–222.
- Frédéric S. 2019. Economic instruments for mitigating climate change in Cameroon. *Geo-Eco-Trop*, 43(1), 89–102.
- James B. 2008. La prévention des catastrophes : Le rôle de l'UNESCO. Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la culture, Paris.
- Leumbe O., Bitom D., Mamdem L. *et al.* 2015. Cartographie des zones à risques d'inondation en zone soudano-sahélienne : Cas de Maga et ses environs dans la région de l'extrême-nord Cameroun. *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 11(3), 45–61.
- Lienou G., Mahé G., Paturel J.E. *et al.* 2008. Evolution des régimes hydrologiques en région équatoriale camerounaise : Un impact de la variabilité climatique en Afrique équatoriale? *Hydrological Sciences Journal*, 53(4), 789–801.
- Meyer C., Geldreich P. & Yesou H. 2001. Apport des données simulées SPOT 5 pour l'évaluation des dégâts de tempête dans la forêt : Cas de la forêt de Haguenau (Alsace, France). *Bulletin-Société française de photogrammétrie et de télédétection*, 164-5, 162–173.
- Mougoue B., & Laurentine N.E. 2021. Croissance de la ville de Yaoundé et résiliences aux pandémies. *Espace Géographique et Société Marocaine*, 43-44, 339–353.
- Pulvirenti L., Pierdicca N., Chini M. *et al.* 2011. An algorithm for operational flood mapping from Synthetic Aperture Radar (SAR) data using fuzzy logic. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(2), 529–540.
- Saaty T.L. 1980. The analytic hierarchy process McGraw-Hill. New York, 324 p.
- Salomon V.A. & Montevechi J.A.B. 2001. A compilation of comparisons on the analytic hierarchy process and others multiple criteria decision making methods: Some cases developed in Brazil. 6th International Symposium on the Analytic Hierarchy Process, Bern.
- Tomlinson R.F. 2007. Thinking about GIS: Geographic information system planning for managers (Vol. 1). ESRI, Inc.
- Wackermann G. 2005. La géographie des risques dans le monde. Ellipses.
- Zogning Moffo M.O., Ozer P. & Dewals B. 2017. Contribution des Systèmes d'Information Géographique pour la cartographie des zones à risques d'inondation à Yaoundé. Poster, Université de Liège, Belgium.

Manuscrit reçu 27/05/2021

Version révisée acceptée le 27/06/2022

Version finale reçue le 29/06/2022

Mise en ligne le 30/06/2022