

Facteurs physiques du ruissellement à Kigali (Rwanda)

Physical factors of runoff in Kigali (Rwanda)

¹L. ILUNGA et ²A. TSINDA

Abstract: Kigali City (2°S), with an altitude average equivalent to 1,500m, is located in the equatorial region. Its tropical climate is characterized by a long dry season (A_{wd}) and by relatively low temperatures as a consequence of its altitude.

Its relatively low pluvial annual module (996,6 mm) and clayey sandy soils implies a relatively low runoff; however, an impervious character resulting from an uncontrolled urban development induces an important potential of flow. The low Gravelius' coefficients as well as the centrifugal aspect of its hydrographic network suggest a relatively high rate of water concentration with, consequently, floods in the suburbs of the city.

Key words : Rwanda - Kigali - runoff

Résumé: D'altitude moyenne de 1500 m, la ville de Kigali (2°S) est située dans la zone équatoriale. Elle jouit d'un climat tropical à long hivernage (A_{wd}) dont les températures sont tempérées par l'altitude.

Son module pluviométrique annuel plutôt modeste (996,6 mm) et ses sols sablo - argileux impliquent un ruissellement relativement faible mais ce dernier est accentué par l'imperméabilisation consécutive à un aménagement urbain largement incontrôlé. Les faibles coefficients de Gravelius ainsi que le caractère centrifuge du réseau hydrographique suggèrent une grande vitesse de concentration des eaux entraînant, en conséquence, des inondations périurbaines

Mots-clés : Rwanda - Kigali - ruissellement

INTRODUCTION

Depuis 2000, la ville de Kigali abrite 604.966 habitants sur une superficie de 349 km² (Schéma Directeur d'Aménagement Urbain, 2020). Elle se trouve ainsi de plus en plus confrontée à de sérieux problèmes d'évacuation des eaux usées et pluviales.

En effet, l'enquête de l'Experco International Itée (E.I.I) faite en 2003 a révélé que la plupart des quartiers de la ville de Kigali ne sont pas du tout assainis et que seuls environ 20% des eaux usées subissent un certain traitement ; le reste est rejeté dans la nature, dans les parcelles ou sur les voies publiques. Un réseau d'évacuation des eaux usées a été installé dans une petite partie de la ville. Il conduit, directement et sans traitement, les eaux usées vers les rivières Ruganwa et Nyabugogo (fig.4). A ce système de vidange est connecté seulement un nombre restreint d'habitants. La plupart décharge ses eaux usées dans des fosses septiques, dans les arrières cours, sur les rues, les places ouvertes ou dans des canalisations.

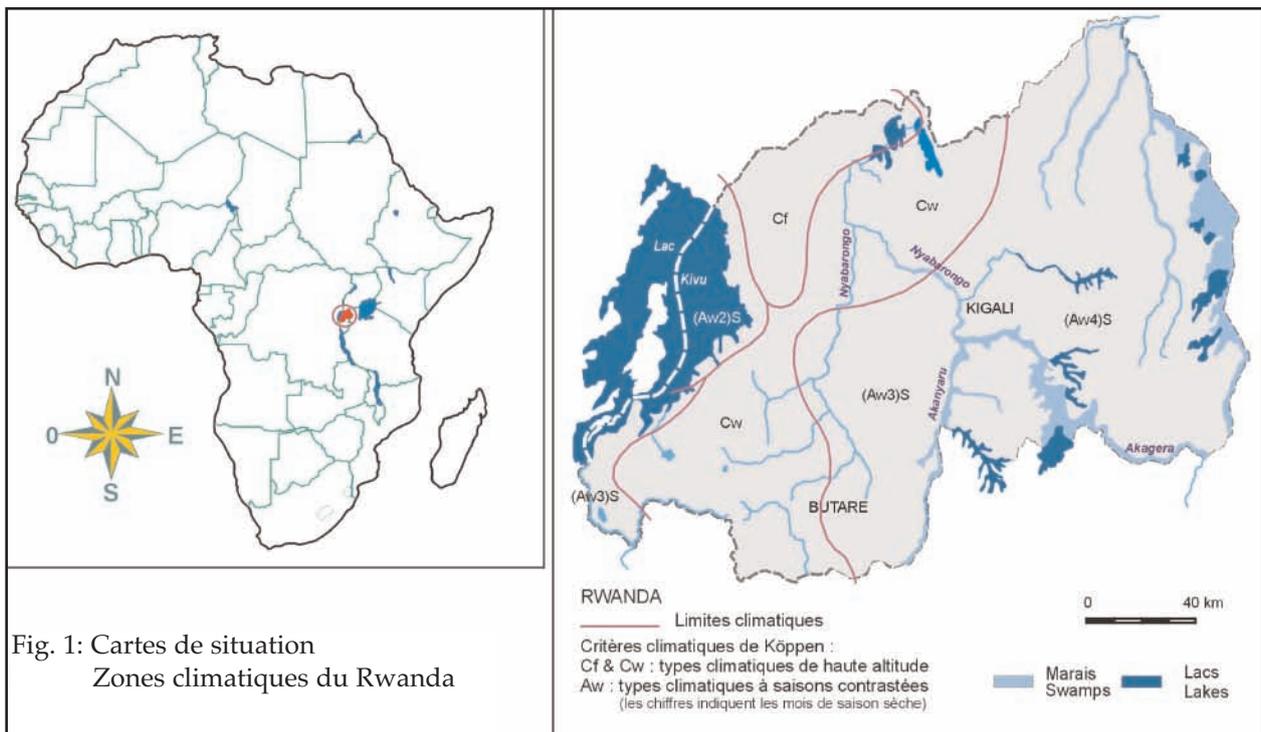
Quant au ruissellement, ce dernier constitue un aspect négatif du cycle hydrologique qu'il faut veiller à réduire dans la mesure du possible. La ville de Kigali, comme tout milieu urbain, se caractérise par une importante proportion de surfaces imperméables, lesquelles sont à la base d'une

¹ Kigali Institute of Education, B.P. 5039 Kigali, Rwanda, e-mail : ilungalutum@yahoo.fr

² C/O Pr. ILUNGA L. P, K.I.E. B.P. 5039 Kigali, Rwanda, e-mail: tsindaime@yahoo.fr

forte concentration des eaux pluviales et, consécutivement, d'un ruissellement intense. Cette situation est encore aggravée par le mauvais fonctionnement des ouvrages prévus pour l'évacuation des eaux. Leur fonctionnement est entravé notamment par le bouchage par les terres d'érosion, l'habitat anarchique et les débris de toutes sortes que la population n'hésite pas à y déverser (ordures, animaux morts, matelas, carcasses d'appareils,...). La situation est devenue si préoccupante qu'une opération d'entretien des caniveaux par la population sous forme d' « Umuganda » (travaux communautaires) a été lancée par le gouvernement.

Le but de la présente note est de contribuer à une meilleure connaissance des facteurs physiques responsables de ces eaux de ruissellement. Nous passerons en revue successivement la géologie - géomorphologie, le climat, le bilan hydrique et les caractéristiques physiques et morphologiques des bassins versants.



GEOLOGIE - GEOMORPHOLOGIE

La ville de Kigali est bâtie essentiellement sur la surface d'aplanissement de la Kagera (fin Tertiaire) située entre 1400 et 1600 m que bordent les massifs montagneux allongés résiduels des surfaces de Butare, mi-Tertiaire (1700 - 1800 m) et de Byumba, fin Crétacé (1900 et 2100 m) (Rossi, 1981). La géologie de ces massifs est constituée des roches plus résistantes faites de bancs de quartzites et de grès fins de la Formation de Nduba (150 - 200 m) d'après la compilation de K. Theunissen, M. Hanon et M. Fernandez (1991). Quant à la surface de la Kagera, elle est constituée essentiellement de granitoïdes divers généralement foliés présentant des enclaves métasédimentaires souvent mylonitisées. En bordure des massifs montagneux, on observe des roches des Formations Musha (Mh) faites de schistes homogènes et Nyabugogo (Ng) à bancs de quartzites fins à très grossiers et à alternances de lits de grès fins et de schistes. La surface couverte par les granitoïdes représente plus de 60 % du total et est constituée par d'épaisses altérites sablo - argileuses plus perméables.

CLIMAT

Par ses coordonnées de 1°53' et 2° 00 de latitude sud et de 30°01' et 30° 08' de longitude est, la ville de Kigali se situe entièrement dans la zone équatoriale. Son altitude moyenne d'environ 1500 m tempère les températures dont les moyennes mensuelles extrêmes vont de 20,2° C en juin à 21,3° C en août . Son amplitude thermique annuelle est ainsi très faible (1,1° C) et son climat de type Aw4 de Köppen. Le tableau I donne la distribution des températures et des précipitations à la station de Kigali - Aéroport.

Tableau I : Distribution des températures et des précipitations à la station de Kigali- Aéroport.	
Station de Kigali - Aéroport	
Température 1971 – 2003 (33 ans)	Précipitations 1964 – 2003 (40 ans)
t1 = 20,5 décembre	p1 = 10,7 mm juillet
t2 = 20,5 mai	p2 = 22,3 mm juin
t3 = 20,5 juin	p3 = 32,6 mm août
t4 = 20,5 novembre	p4 = 71,9 mm septembre
t5 = 20,7 avril	p5 = 72,5 mm janvier
t6 = 20,7 juillet	p6 = 85,5 mm décembre
t7 = 20,8 janvier	p7 = 96,8 mm mai
t8 = 20,9 mars	p8 = 97,5 mm février
t9 = 21,1 février	p9 = 99,9 mm octobre
t10 = 21,2 octobre	p10 = 120,2 mm mars
t11 = 21,6 août	p11 = 123,8 mm novembre
t12 = 21,6 septembre	p12 = 162,9 mm avril
t moyenne = 20,6	p annuelle = 996,6 mm

Tableau II: Détermination des mois secs et humides à la station de Kigali					
Mois	De Martonne	Gausson	Moral	Birot	Synthèse
Janvier	+	+	+	-	(+)
Février	+	+	+	+	+
Mars	+	+	+	+	+
Avril	+	+	+	+	+
Mai	+	+	+	+	+
Juin	-	-	-	-	-
Juillet	-	-	-	-	-
Août	-	-	-	-	-
Septembre	+	+	+	-	(-)
Octobre	+	+	+	+	+
Novembre	+	+	+	+	+
Décembre	+	+	+	+	+

+ = mois humide (+)=mois de transition de tendance humide
 - = mois sec (-)=mois de transition de tendance sèche

Comme on peut le voir, à l'opposé des températures qui sont pratiquement constantes autour de 20°C, les précipitations, par contre, présentent de fortes variations. Les moyennes pluviométriques mensuelles les plus basses sont celles de juillet (10,7mm) et les plus élevées sont celles d'avril (162,9mm).

Quatre méthodes de calcul des indices d'aridité (Ch. P. PEGUY, 1970) ont été utilisées pour la détermination des mois secs et humides. Il s'agit des méthodes de DE MARTONNE, de GAUSSEN, de MORAL et de BIROT (tableau II).

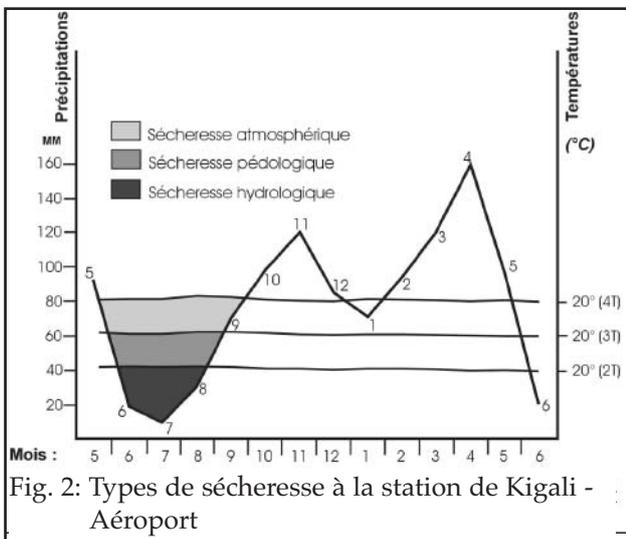
D'après ce tableau, les trois premières méthodes ont conduit aux résultats convergents à savoir trois mois secs : juin, juillet, août et neuf mois humides (le reste). Seule la méthode plus sévère de Birot mais plus appropriée à la zone chaude a conduit à cinq mois secs (janvier, juin, juillet, août et septembre) et à sept mois humides (le reste).

L'utilisation des courbes P/4T, P/3T et P/2T a permis de distinguer 3 types de sécheresse (R. LAMBERT, 1979) : atmosphérique (4T), pédologique (3T) et hydrologique (2T). Leur interprétation a conduit aux résultats ci-après (Fig. 2) :

-la sécheresse atmosphérique concernerait 5 mois : juin, juillet, août, septembre et janvier ;

-les deux autres sécheresses pédologique et hydrologique ne concerneraient que 3 mois : juin, juillet et août ; ils représenteraient la véritable sécheresse;

-les mois de janvier et de septembre ne connaîtraient pas les véritables sécheresses pédologique et hydrologique qui affectent plus sérieusement la végétation ; ils pourraient être classés comme les mois de transition entre les mois secs et humides. Toutefois le mois de janvier étant placé au milieu d'une longue période humide qui va d'octobre à mai peut être considéré comme mois humide (la réserve d'eau du sol serait légèrement affectée) tandis que le mois de septembre placé à la fin de la période sèche (juin, juillet, août) peut être considéré comme mois sec puisque subissant les effets négatifs des mois précédents.



La conclusion que l'on peut tirer de tout ce qui précède est qu'avec son module pluviométrique annuel de 996,6 mm, le climat de Kigali serait donc un climat tropical à long hivernage (8 mois) avec une saison sèche de 4 mois s'étendant de juin à septembre. La saison des pluies va d'octobre à mai et présente une indentation plus sèche (petite saison sèche) visible en janvier mais dont la manifestation peut, partiellement, commencer en décembre et se terminer en février.

BILAN HYDRIQUE

La méthode de calcul de bilan hydrique utilisée ici est celle de Thornthwaite (Ch.P.PEGUY, 1970) où l'on peut retrouver les symboles ci - après :

ETP = Evapotranspiration potentielle ;

P = module pluviométrique annuel ;

P - ETP = précipitations utiles ;

s des déficits = somme des déficits pluviométriques ;

RU = réserve utile ;

d RU = différence des réserves utiles mensuelles successives ;

ETR = évapotranspiration réelle ;

ETP - ETR = déficience ou déficit agricole ;

S = surplus qui constitue l'écoulement des eaux.

La réserve utile est estimée ici à 100 mm d'eau ; elle représente le seuil de saturation du sol au - delà duquel tout excédent de pluie est disponible pour l'écoulement et la percolation (A. KERGREIS et J. CLAUDE, 1991).

L'application de cette méthode à la Station de Kigali-Aéroport a abouti aux résultats figurés dans le tableau III :

L'analyse de ces résultats a conduit aux conclusions suivantes (Fig. 3) :

Tableau III: bilan d'eau à la station Kigali - Aéroport

°	Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
1.	T°	20°5	21°	20°5	20°4	20°3	20°3	20°4	21°3	21°3	21°1	20°3	20°0	20°6
2.	i	8,47	8,78	8,40	8,40	8,34	8,34	8,40	8,97	8,97	8,84	8,34	8,16	102,48
3.	etp	2,65	2,8	2,65	2,62	2,59	2,59	2,62	2,89	2,89	2,83	2,59	2,5	
4.	K	30,96	28,02	31,14	30,42	31,44	30,6	31,44	31,38	30,36	31,08	30,12	30,9	
5.	ETP	82,04	78,45	82,52	79,7	81,42	79,25	82,37	90,68	87,7	87,9	78,01	77,25	987,29
6.	P	72,5	97,5	120,2	162,9	96,8	22,3	10,7	32,6	71,9	99,9	123,8	85,5	996,6
7.	P-ETP	-9,54	19,05	37,68	83,2	15,38	-56,95	-71,67	-58,08	-15,8	12	45,79	8,25	9,31
8.	Σ deficit	9,54					66,49	138,16	196,24	212,04				
9.	R.U	90,46	100	100	100	100	33,51	24,4	13,5	11,1	23,1	68,89	77,14	
10.	d RU	-13,32	0	0	0	0	66,49	9,11	10,9	2,4	-12	-45,79	-8,25	
11.	ETR	59,18	78,48	82,52	79,7	81,42	79,25	19,81	43,5	74,3	87,9	78,01	77,25	850,83
12.	ETP-ETR	22,86	0	0	0	0	0	62,56	47,18	13,4	0	0	0	136,46
13.	S		9,51	37,68	83,2	15,38								145,77

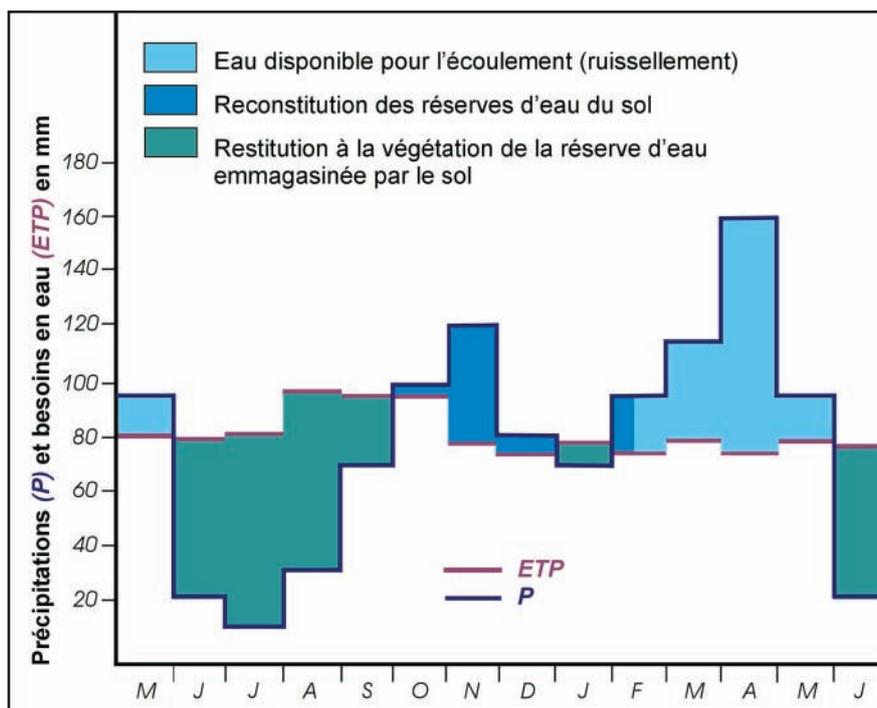


Fig. 3: bilan hydrique à Kigali

La comparaison des P et ETP (bilan hydrique) montre des excédents d'eau du sol pendant sept mois de l'année et des déficits pendant cinq mois (sécheresse atmosphérique) comme on l'a déduit grâce à la courbe P/4T (LAMBERT, 1979). Les excédents les plus importants sont observés au cours des mois d'avril (83,2 mm) et de novembre (45,8 mm). Ils sont suivis par ceux des mois de mars (37,7 mm) et de février (19 mm). Quant aux déficits, ils sont plus prononcés en juillet (71,7 mm), en août (58,1 mm) et en juin (57 mm). Le déficit cumulé annuel est de 212 mm, ce qui implique une nette sollicitation des eaux de la R.U.

En ce qui concerne l'évolution de cette dernière, elle est importante et saturée pendant 4 mois de l'année qui vont de février à mai. Elle diminue nettement à partir de juin (33,5 mm) jusqu'en septembre où elle atteint sa valeur minimale de 11,1 mm ; septembre pourrait donc être considéré comme un mois sec. Elle commence à se reconstituer en octobre (23,1 mm), atteint 68,9 mm en novembre, 77,1 mm en décembre, 90,5 mm en janvier avant d'atteindre la réserve estimée de 100 mm en février. Comme on peut le voir, la RU n'est pas totalement épuisée. Sa valeur élevée en janvier de 90,5 mm sur les 100 mm de réserve estimés nous permet d'écarter ce mois de la catégorie des mois secs et de le considérer comme une simple indentation plus sèche dans un ensemble humide.

Pour ce qui est de la déficience (ETP - ETR) ou le déficit agricole, elle n'apparaît que pendant la saison sèche, de juillet à septembre avec des valeurs respectives de 62,6 mm (juillet), 47,2 mm (août) et 13,4 mm (septembre). Le mois de juin n'en connaît pas grâce à sa réserve d'eau du sol héritée du mois de mai. A nouveau, le mois de septembre paraît comme pouvant être considéré comme un mois sec car un tel déficit agricole nécessiterait un apport d'eau sous forme d'irrigation en cas de cultures (mois de semailles).

Quant au surplus représentant l'écoulement des eaux, il est observable pendant la grande saison des pluies qui va de février à mai : il est maximal en avril (83,2 mm), de 37,7 mm en mars, 15,3 mm en mai et de 9,51 en février, soit un total annuel de 145,8 mm.

A partir de ce surplus, on peut conclure que le ruissellement ne serait attendu à Kigali que pendant la grande saison humide qui va de février à mai. La petite saison des pluies qui va d'octobre à décembre serait donc moins concernée par les eaux de ruissellement.

Cette situation qui aurait dû être favorable pour Kigali serait malheureusement anéantie par le caractère brutal et court des averses dont le ruissellement peut être très élevé en cas des pluies torrentielles. Ces conditions climatiques sont accentuées par les facteurs anthropiques tels que la densification de l'habitat, la dégradation et le revêtement artificiel des sols. En effet, une parcelle occupée totalement par des constructions, à l'exemple des quartiers populaires, présente une forte imperméabilisation susceptible d'entraîner des ruissellements même pour des faibles pluies occasionnant ainsi de fortes pertes de terre par érosion. Ces dernières ont été estimées à $884,1\text{t}/\text{km}^2/\text{an}$ selon la méthode de FOURNIER (1960). Cette valeur de dégradation est conforme à celle figurée sur la carte mondiale des taux d'érosion de cet auteur, laquelle est comprise entre 600 et $1000\text{t}/\text{km}^2/\text{an}$.

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MORPHOLOGIQUES DES BASSINS VERSANTS (BV)

Le réseau hydrographique de la ville de Kigali (Fig. 4) est constitué par la Nyabarongo qui pratiquement ceinture la ville dans sa partie méridionale et occidentale et par ses deux affluents, la Nyabugogo et la Mulindi qui respectivement forment les ceintures septentrionale et orientale de la ville.

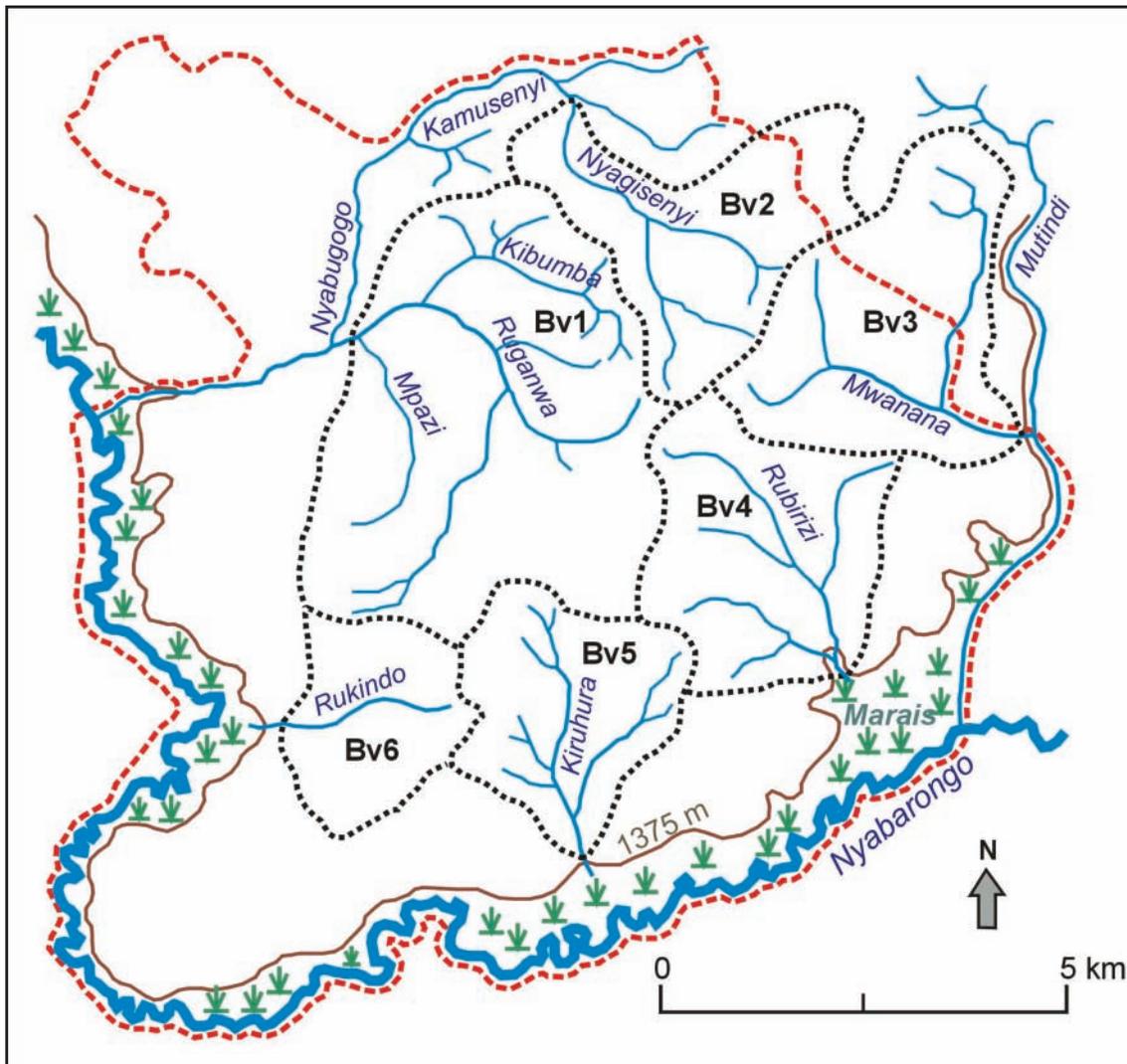


Fig. 4: les bassins versants majeurs (BV) de la ville de Kigali.

Tableau IV: caractéristiques physiques et morphologiques des bassins versants majeurs de la ville de Kigali

Bassins	1	2	3	4	5	6
Périmètre en km	31,5	25	22,5	21,5	18	15,5
Superficie en km ²	53,9	22,75	26,13	22,4	17,6	12,97
L longueur en km (plus long parcours)	11	7,7	8	7	6	4
K (compacité de Gravelius)	1,2	1,47	1,23	1,27	1,2	1,2
a (allongement de Caquot)	1,5	1,6	1,6	1,5	1,4	1,1

Leurs affluents majeurs, au nombre de 6, drainent toute la ville et présentent un réseau centrifuge.

Deux de ces affluents s'écoulent globalement vers le NW. Il s'agit de la Ruganwa (BV1) et de la Nyagisenyi (BV2). Des quatre autres affluents, un seul, la Rukindo (BV6), s'écoule vers l'ouest, tandis que les trois autres ont une orientation soit vers le SSE, la Kiruhura (BV5) et la Rubirizi (BV4), soit vers l'est, la Mwanana qui se jette dans la Mulindi, et constituent la ceinture orientale de la ville. Les caractéristiques de ces 6 bassins versants sont données dans le tableau IV :

L'analyse de ce tableau montre qu'il s'agit bien de petits bassins versants dont les superficies varient de 12,97 km² (BV6) à 53,9 km² (BV1). Le bassin versant 3 vient en deuxième position en superficie (26,13 km²) mais occupe la troisième place quant à son périmètre avec 22,5 km. Le plus long parcours est détenu par la Ruganwa (BV1) avec 11 km suivi en cela respectivement par la Mwanana (BV3) avec 8,0 km et la Nyagisenyi (BV2) avec 7,7 km.

L'allongement de Caquot (1) varie de 1,1 (BV6) à 1,6 (BV2 et BV3) tandis que les coefficients de compacité de Gravelius (2) présentent un net mode à 1,2 ; seul le BV2 fait exception avec sa valeur de 1,47. Ces faibles valeurs des coefficients de Gravelius dénotent d'une plus grande compacité, c'est-à-dire d'une plus grande vitesse de concentration des eaux de ruissellement aux exutoires. En effet, d'après CHUZEVILLE (1990), le coefficient de Gravelius est égal à 1 pour un bassin versant circulaire et croît d'autant plus que la compacité diminue. En d'autres termes, plus ce coefficient est faible, plus l'eau ruisselée atteint rapidement l'exutoire, ce qui entraîne une plus grande possibilité de crues. C'est cette situation qui prévaut à Kigali.

$$(1) : \text{allongement de Caquot} : a = L/\sqrt{S}$$

L : plus long parcours des eaux
S : surface du bassin versant

$$(2) : \text{coefficient de Gravelius} : K = P/2 \times \sqrt{3,14 \times S} > K = 0,28 \times P/\sqrt{S}$$

P : périmètre du bassin versant
S : surface du bassin versant

CONCLUSIONS

Au terme de cette étude, il ressort que la ville de Kigali, d'altitude moyenne de 1500 m, est bâtie essentiellement sur la surface d'aplanissement de la Kagera (1400 - 1600 m) que ceinturent au nord la rivière Nyabugogo, au sud et à l'ouest la rivière Nyabarongo et à l'est la rivière Mulindi.

La détermination des mois secs par diverses méthodes, a révélé l'existence d'une saison sèche de 4 mois (juin, juillet, août et septembre) et d'une longue saison humide de 8 mois. Cette dernière présente une petite saison sèche en janvier, laquelle permet de mettre en évidence une petite et une grande saison des pluies.

Sa géologie principalement faite de granitoïdes aux sols sablo-argileux de même que son module pluviométrique annuel relativement faible de 996,6 mm seraient en défaveur d'un important ruissellement. Ce dernier, quand il existe, s'expliquerait par l'imperméabilisation du terrain consécutif à l'aménagement urbain en grande partie incontrôlé.

Enfin, concernant les caractéristiques physiques et morphologiques des bassins versants, les faibles valeurs des coefficients de Gravelius associées au caractère centrifuge du réseau hydrographique suggèrent une grande vitesse de concentration des eaux de ruissellement, entraînant des inondations périurbaines (Nyabarongo et Nyabugogo)

BIBLIOGRAPHIE

- CHUZEVILLE, B., 1990. Hydrologie tropicale et appliquée en Afrique Subsaharienne. Collection maîtrise de l'eau, Ministère de la Coopération et du Développement, Ouagadougou, 275 p.
- EXPERCO INTERNATIONAL ITEE, 2003. Programme de développement urbain de la ville de Kigali. Drummondville, Québec, inédit.
- FOURNIER, F., 1960. Climat et érosion : la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. P.U.F, Paris, 201p.
- KERGREIS, A., et CLAUDE, J., 1991. Utilisation rationnelle de l'eau des petits versants en zones arides. Ed. AUPELF - UREF. John Libley Eurotext. Paris, 139 - 161.
- LAMBERT, R., 1979. Cours d'hydrologie. ISP/BUKAVU, inédit.
- PEGUY, Ch. P., 1970. Précis de climatologie. Masson, Paris, 468 p.
- ROSSI, G., 1981. Tectonique, surfaces d'aplanissement et problèmes de drainage au Rwanda - Burundi. Rev. Géom. Dyn, 29 : 81 - 100, Paris.
- THEUNISSEN, K., HANON, M. et FERNANDEZ, M., 1991. Carte géologique du Rwanda au 1/250.000. Musée Royal de l'Afrique Centrale. Tervuren, Belgique.