

ESTIMATION DE L'ÉROSION DANS UN BASSIN-VERSANT URBAIN EN REGION TROPICALE HUMIDE (LUBUMBASHI - ZAIRE)

MIJ R., MBENZA M. et ALONI K.*

Mots-clés : Bassin-versant, érosion, sédiments en suspension, dénudation.

Résumé

Au cours d'une saison des pluies, la charge en suspension a été étudiée dans un petit bassin-versant (1,92 km²) situé quasi au centre de la ville de Lubumbashi. A cause de l'urbanisation et de la forte densité humaine, les concentrations de sédiment en suspension y sont plus élevées que dans des bassins avoisinants moins perturbés par l'homme. Les valeurs maximales de concentration observées sont comprises entre 4000 et 5000 mg.l⁻¹. Des relations sont établies entre le transport de sédiments en suspension d'une part, et le débit et la lame d'eau précipitée d'autre part, à partir desquelles est calculée la charge totale évacuée. La quantité totale estimée de sédiments exportés du bassin correspond à un taux d'érosion de 8.5 t.ha⁻¹.an⁻¹ dans ce bassin-versant. Des variations spatiales dans l'érosion sont mises en évidence; elles sont contrôlées par l'occupation du sol. Le rôle protecteur d'un couvert herbeux se trouve une fois de plus confirmé dans cette étude.

Abstract

Estimating soil erosion in an urban humid tropical watershed (Lubumbashi - Zaïre)

During a rainy season suspended sediment transport has been studied in a small watershed (1.92 km²) situated in the heart of Lubumbashi city. Because of the urbanization and a high human density, suspended sediment concentrations in the watershed are higher than in less disturbed neighbour basins. The observed maximum concentration values range between 4000 et 5000 mg.l⁻¹. Relationship between suspended sediment and either discharge or rainfall are established to calculate the total yield. The estimated total load represents a soil loss of 8.5 t.ha⁻¹.yr⁻¹ in the watershed. Space variations in sediment yield are related to the land use. The protection effect of a grass cover is demonstrated.

I. INTRODUCTION

Jusque tout récemment, les études menées au Zaïre sur l'érosion s'étaient surtout attachées:

- soit à décrire les différentes formes et processus du phénomène et à montrer leur ampleur grâce à l'observation de leurs manifestations dans le milieu (ALEXANDRE, J. et S., 1964; DE PLOEY et ROELS, 1965; DE PLOEY, 1967; ALEXANDRE, 1967; ALEXANDRE-PYRE, 1978; KABULO, 1983; ILUNGA, 1978; MBUYU et SOYER, 1981);
- soit à quantifier l'érosion par le splash sous différents types de milieux (SOYER *et al.*, 1982; MITI *et al.*, 1984) ou encore l'érosion linéaire et en nappe sur des versants nus ou cultivés (LOOTENS, 1982, 1983).

Parmi ces études, seulement deux concernent des milieux urbains (ILUNGA, 1978; MBUYU et SOYER, 1981). Ces deux travaux ont bien montré que l'érosion accélérée constituait un grave problème dans certaines villes zaïroises et ont proposé quelques remèdes à ce problème. Cependant, ils n'ont pu fournir aucune évaluation chiffrée des pertes de sol, leur approche du phénomène d'érosion ayant été essentiellement descriptive.

Un pas pour combler cette lacune a été franchi avec l'étude de LOOTENS et LUMBU (1986). Cette étude a été effectuée dans un bassin-versant situé à la périphérie nord-ouest de la ville de Lubumbashi. Il s'agit du bassin de la Lubwe, dont la superficie est de 8.5 km². La méthode utilisée par

* Département de Géographie, Université de Lubumbashi, P.O. 1020, Lubumbashi, Zaïre. Téléchargé depuis www.bmg.lg.be

ces auteurs était basée, comme dans le présent travail, sur la mesure des sédiments en suspension du cours d'eau drainant le bassin-versant (FOURNIER, 1966). Ils ont obtenu pour ce bassin-versant un taux d'érosion de 12.7 t.km².an⁻¹.

Etant donné que le bassin-versant étudié par LOOTENS et LUMBU (1986) ne comprenait qu'une petite portion urbanisée (moins de 25 % de sa superficie), il nous a paru intéressant de pouvoir comparer leurs résultats avec l'érosion mesurée dans une aire plus représentative de l'environnement urbain de la région. Le bassin-versant du drain Kamalondo, localisé entièrement dans la ville de Lubumbashi (fig.1) remplit cette condition. En effet, avec plus de 25.000 habitants, la densité de la population y est particulièrement élevée (BRUNEAU et LOOTENS-DE MUYNCK, 1985) et ce bassin comporte à la fois des zones d'habitat ancien et planifié, une zone d'habitat récent apparue sans aucun contrôle, des équipements collectifs et des espaces verts. Il constitue le champ d'investigation de la présente étude.

Dans ce bassin-versant, dont la superficie n'est que de 1.92 km², les pentes les plus fréquentes sont comprises entre 0 et 2 degrés. Au cours de la saison des pluies 1986-1987, le total pluviométrique a été de 1077.6 mm d'eau.

II. METHODE

L'érosion considérée dans cette étude a été mesurée au cours d'une campagne d'observations qui a couvert une saison des pluies (1986-1987). Ces mesures ont porté essentiellement sur la charge en suspension et le débit des eaux de ruissellement, selon un programme de prélèvements non réguliers comprenant les seuls jours où il avait été possible de se rendre sur le terrain au moment d'une pluie.

Les échantillons de sédiments en suspension ont été prélevés à l'aide de bouteilles en plastique d'un litre, plongées horizontalement jusqu'au tiers de la profondeur de l'eau, le goulot tourné vers l'amont. Le prélèvement a eu généralement lieu au point de sortie du bassin-versant (point A, sur la fig. 2). Mais, dans le souci de rechercher une éventuelle incidence de l'affectation du sol ou de l'aménagement sur la charge en suspension, quelques prélèvements ont également été effectués plus en amont, sur le collecteur principal (au point C) et dans un chenal qui déverse dans le collecteur principal les eaux issues de la majeure partie de la zone d'habitat ancien (au point B).

Recueillis au laboratoire sur filtre Whatman en fibres de verre, et après destruction des matières organiques par un traitement à l'eau oxygénée (H₂O₂), les sédiments ont été séchés à l'étuve à 90°C, puis pesés à l'aide d'une balance analytique. Cela nous a donné une mesure de la concentration des sédiments en suspension.

Quant aux débits, ils ont été mesurés grâce à des jaugeages au flotteur et à des relevés du niveau de l'eau. Pour quelques averses, les mesures ont pu être répétées à moins de cinq minutes d'intervalle, de sorte qu'il a été possible d'établir des hydrogrammes (fig. 3). Nous devons cependant reconnaître qu'un certain lissage a dû être effectué dans la reconstitution de ces hydrogrammes, tout au moins pour les phases de décrue.

Des mesures réalisées à l'aide de plaques de sédimentation de 1 dm², aux endroits signalés par les chiffres 1, 2 et 3 sur la figure 2 ont permis d'estimer la quantité de sol érodée sur certains versants, plus précisément dans le secteur nord-ouest du bassin. Installées sur une banquette bordant le canal collecteur près de la voie ferrée, les plaques du point n°4 ont eu, quant à elles, pour but de mesurer l'importance du dépôt qui s'y effectue au moment des crues, lorsque les eaux sont fortement chargées de sédiments et débordent du chenal.

La charge totale transportée après une averse a été déterminée en appliquant des relations charge-débit aux données de l'écoulement (MILLER, 1951; PIEST, 1964; LOUGHRAN, 1976; WALLING, 1977 et 1978). Pour les estimations à l'échelle saisonnière, on s'est servi, vu l'insuffisance des enregistrements de l'écoulement, de relations simples établies pour prédire directement la charge évacuée en fonction des lames d'eau tombée.

Enfin, étant donné certaines contraintes, il n'a pas été possible d'installer un pluviographe sur le terrain. Néanmoins, nous avons pu recueillir les données, que résume la figure 4, d'une station pluviométrique située à environ 1 kilomètre seulement du bassin-versant. On retiendra aussi que la délimitation de ce dernier a été le résultat d'observations minutieuses sur le terrain, en sorte que toute hypothèse d'apports extérieurs d'eau ou de sédiments est à exclure. Le sens d'écoulement des eaux de ruissellement (fig. 2) est contrôlé par le réseau de canalisations dans la zone d'habitat planifié et, ailleurs, par la ligne de plus grande pente.

III. RESULTATS

A. Concentration des sédiments en suspension

La concentration des sédiments en suspension a été considérée tout d'abord dans ses rapports avec le débit. Des échantillons-témoins prélevés au cours des jours sans pluie ont présenté de très faibles valeurs de concentration (moins de 20 mg.l⁻¹), encore que pour ces échantillons, la matière organique n'avait pas été éliminée avant les mesures et constituait l'essentiel des matières en suspension. Par contre, il apparaît qu'à la suite d'une averse les concentrations augmentent considérablement.

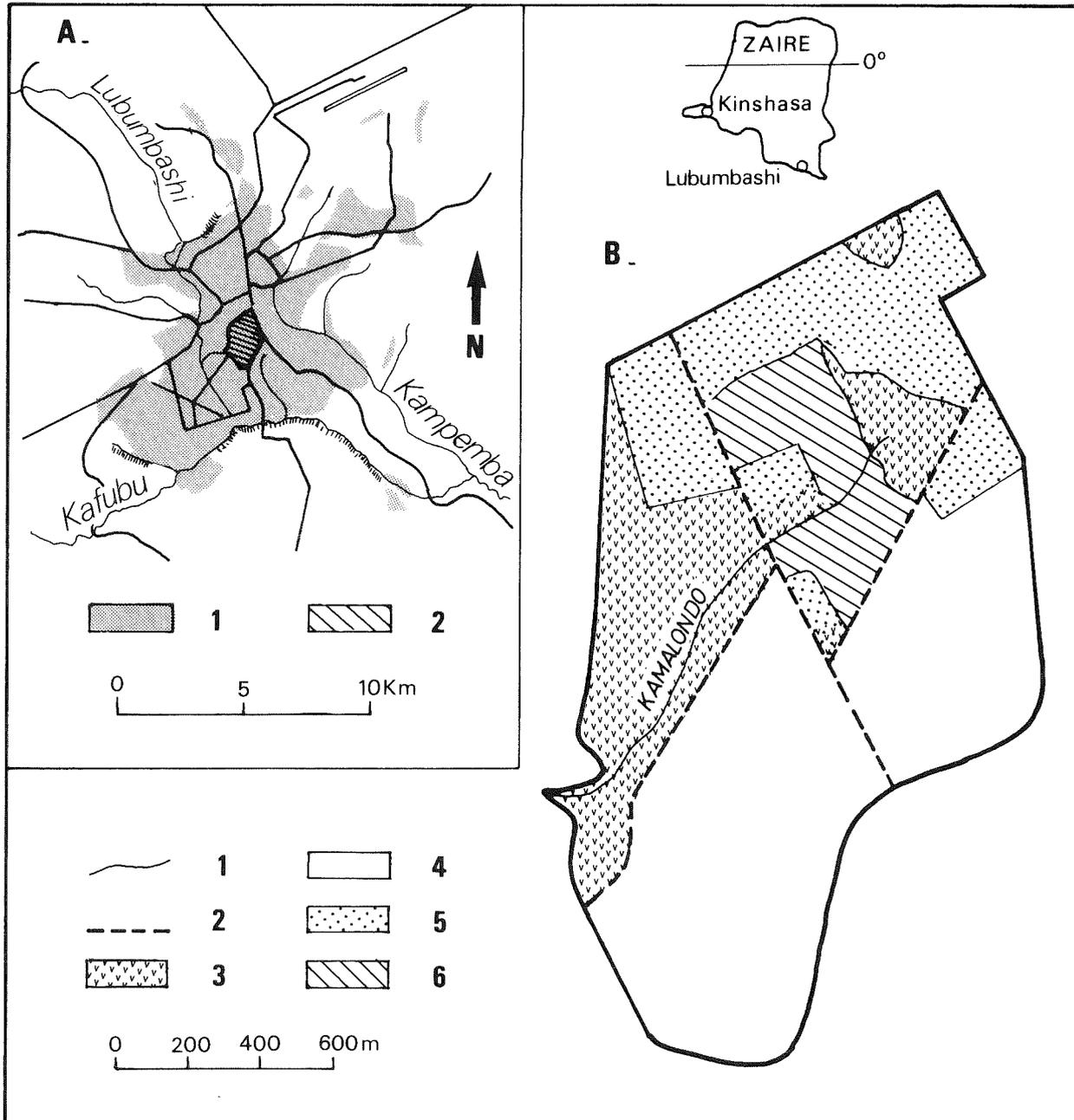


Figure 1. -A.1 : extension maximale de l'espace urbanisé; 2 : aire d'étude.

B. 1 : cours d'eau; 2 : artère principale; 3 : Végétation; 4 : habitat ancien planifié; 5 : équipements collectifs; 6 : habitat récent d'auto-construction.

Lors des plus grosses crues (débits de pointe supérieurs à $2.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), elles atteignent facilement des valeurs supérieures à 3000 et même 4000 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$.

Toutefois, une mesure a montré pour un faible débit de $0,454 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, une concentration de sédiments très élevée de l'ordre de $4590 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. Cette disproportion entre la charge et le débit peut étonner à première vue. Elle s'explique cependant si l'on tient compte du fait suivant. La mesure a été effectuée lors de la dernière phase d'une averse de faible intensité qui était tombée par intermittence le 5 janvier 1987, en fournissant 3.5 mm d'eau. On peut alors

penser que les phases précédentes avaient servi à humidifier le sol et à préparer une quantité non négligeable de sédiments que le ruissellement, bien qu'assez faible, s'est chargé de mobiliser au cours de la dernière phase. Cette observation fait apparaître l'intérêt qu'il y aurait à bien connaître également les caractéristiques des averses pour l'analyse du transport des sédiments dans un petit bassin-versant (GUY, 1964).

Les exemples cités ci-après, tirés des courbes de la figure 5, montrent que la variation de la concentration serait plus rapide pendant la montée des eaux que lors de la décrue.

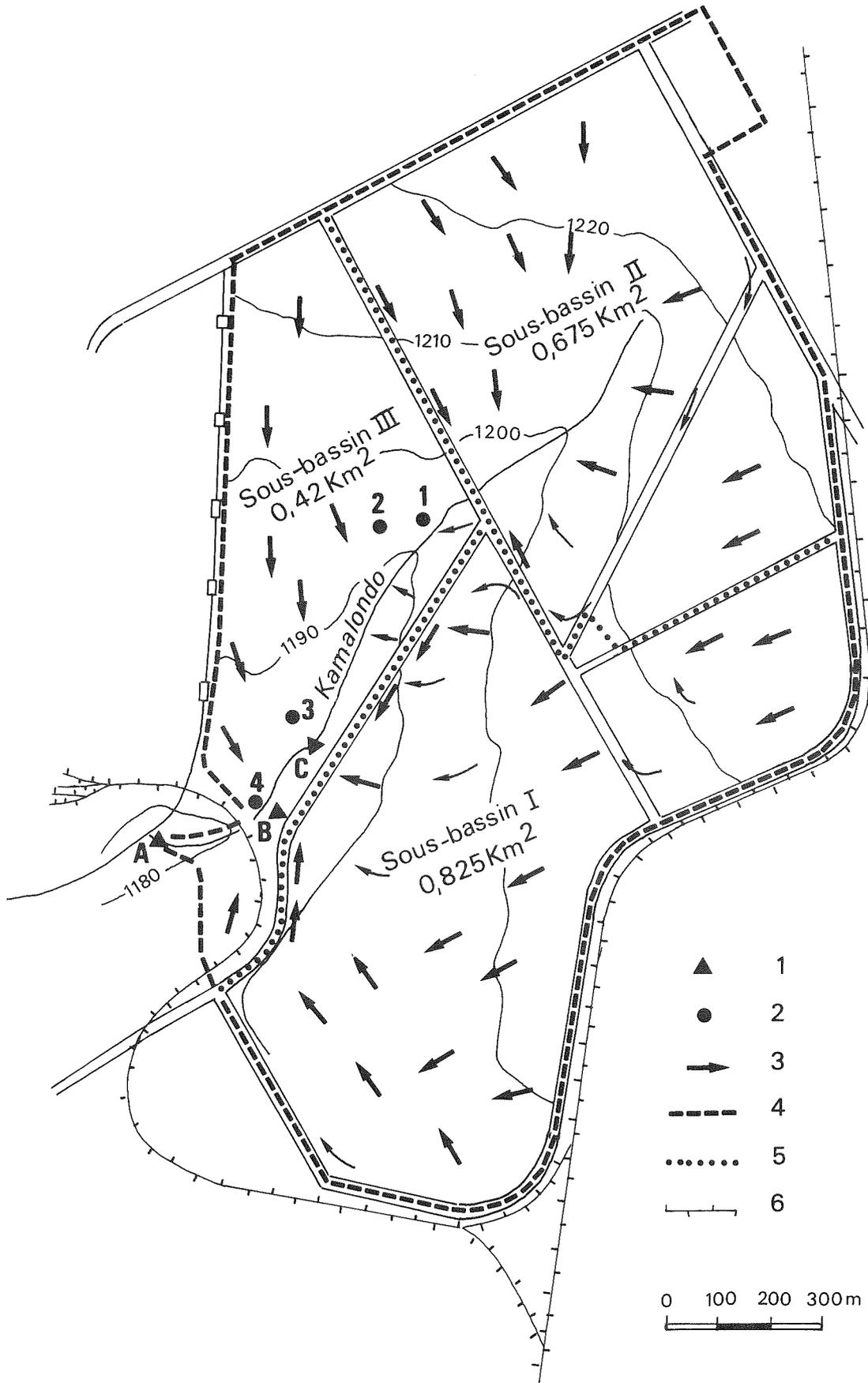


Figure 2. - 1 : station d'échantillonnage; 2 : emplacement des plaques de sédimentation; 3 : sens de l'écoulement superficiel; 4 : limite du bassin versant; 5 : limite de sous-bassin; 6 : voie ferrée.

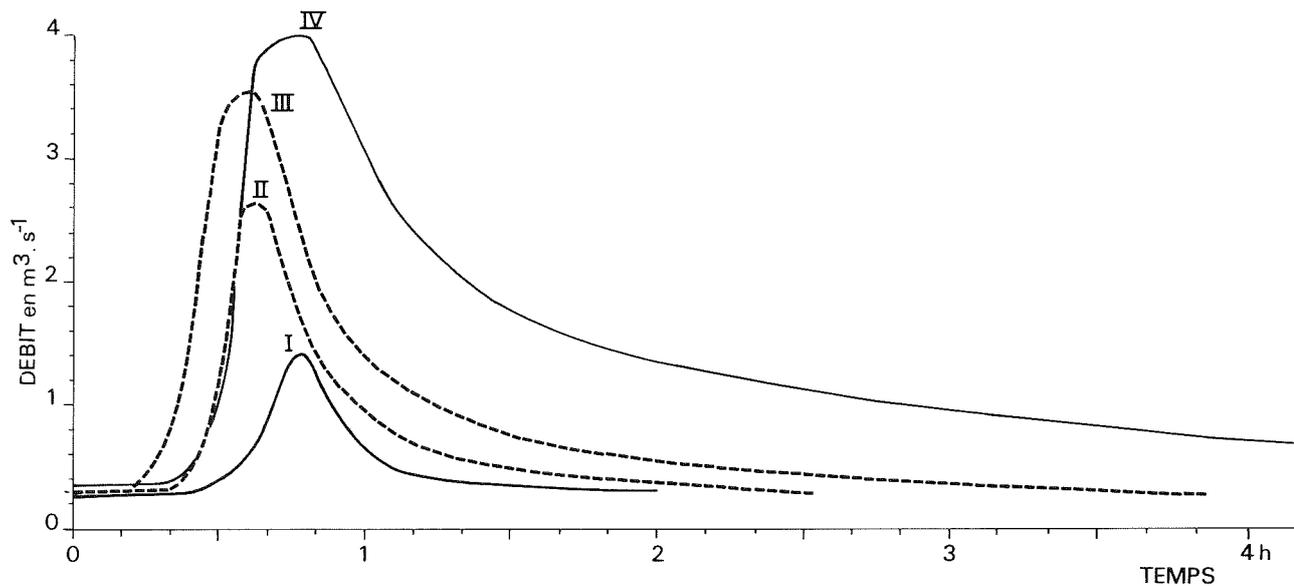


Figure 3. - I: Averse du 25 décembre 1986: 8.3 mm en 20 minutes;
 II: Averse du 7 janvier 1987 : 8.8 mm en 35 minutes;
 III: Averse du 25 mars 1987 : 12.5 mm en 20 minutes;
 IV: Averse du 12 mars 1987 : 23.3 mm en 25 minutes.

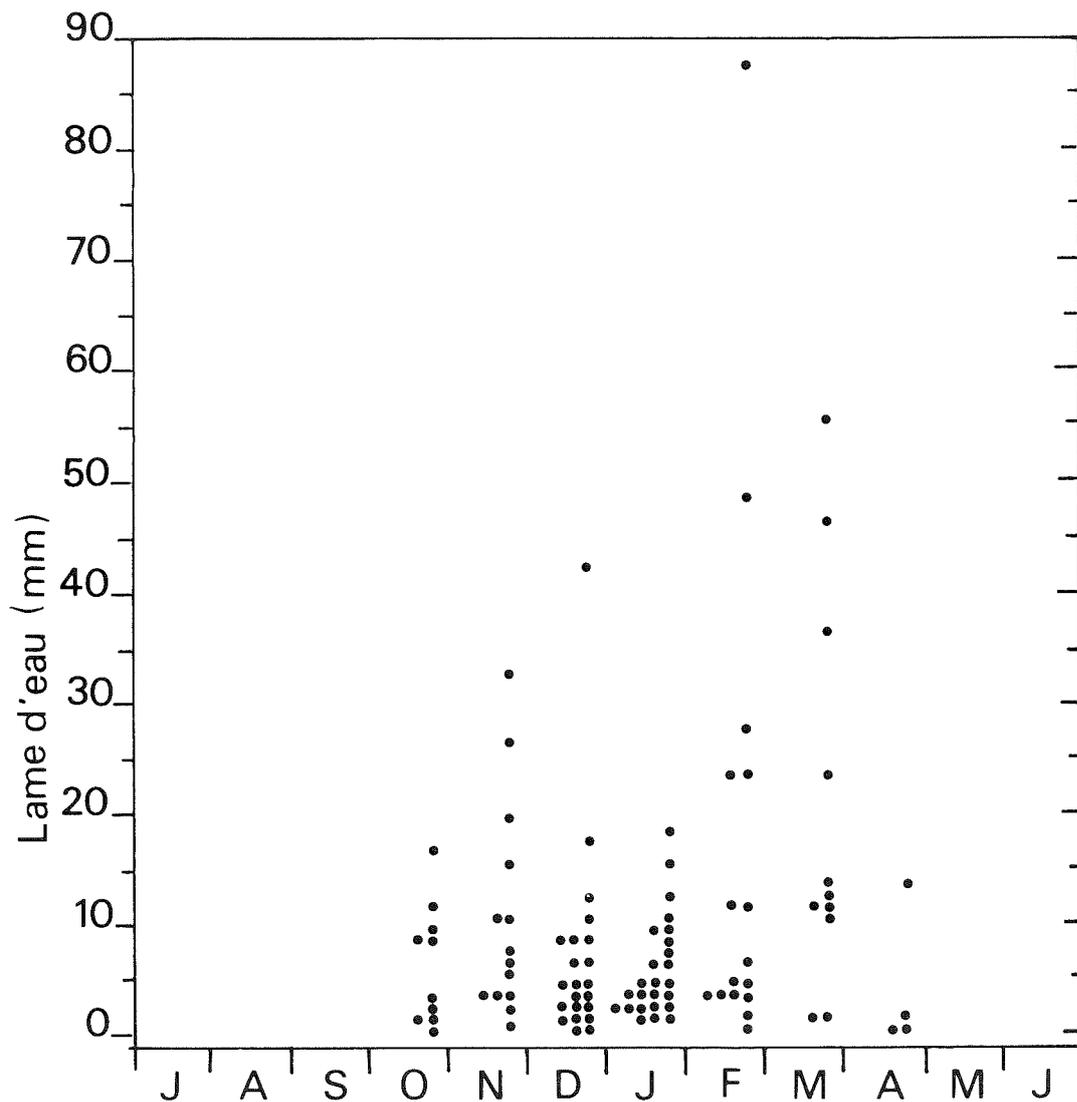


Figure 4. - Répartition mensuelle des pluies journalières de différentes hauteurs de lame au cours de la saison des pluies 1986-1987.

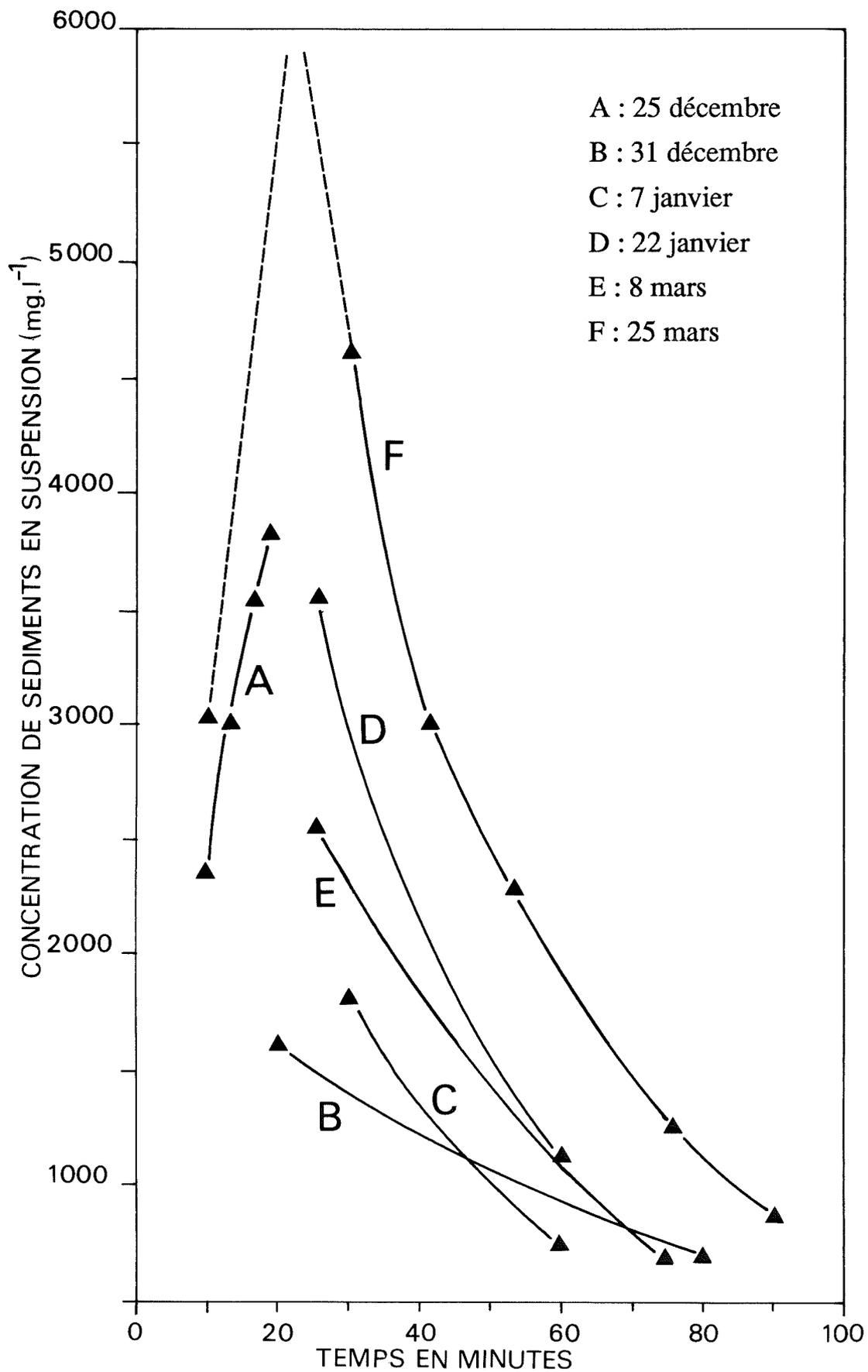


FIG. 5. - Variation de la concentration dans le temps au cours de quelques crues. En traits discontinus : courbe extrapolée .

Tableau 1. Concentrations des sédiments en suspension (en mg.l⁻¹) mesurées simultanément à différents endroits du bassin.

Date	Point A	Point B	Point C
20/12/86	835	-	721
25/12/86	2330	3808	-
31/12/86	1617	2808	769
05/01/87	4590	5452	-
07/01/87	1815	1326	1077
22/01/87	1117	2056	1087
Moyenne	2051	3106	914

Tableau 2. Quelques relations estimant le transport en suspension au cours des averses en fonction du débit et des précipitations.

Equations de régression	Coefficient de corrélation	n
$C = 2350 Q^{0.526}$ (1)	0.76	23
$C = 1170 Q^{0.526}$ (2)	0.74	17
$Qs = 2.417 P - 13.21$ (3)	0.99	4
$Qs = 0.077 P^{2.054}$ (4)	0.93	4

C = concentration des sédiments en suspension (mg.l⁻¹)

Q = débit (m³.s⁻¹)

Qs = charge transportée hors du bassin (tonnes)

P = lame d'eau précipitée au cours d'une averse (mm)

Au cours de l'averse du 25 décembre 1986, quatre prélèvements effectués en phase de montée ont montré que la concentration est passée de 2330 à 3800 mg.l⁻¹ en 9 minutes seulement, soit une augmentation de 63 % environ. Par contre, en se basant sur les observations du 31 décembre 1986 et du 7 janvier 1987, une diminution du même ordre (- 59 %) ne s'est réalisée en phase de décrue qu'au bout de 30 et 60 minutes respectivement.

Faute de mesures continues, il est impossible d'affirmer si le maximum de concentration coïncidait dans le temps avec celui du débit. Quoiqu'il en soit, la figure 5 semble

au moins suggérer que les concentrations maximales sont généralement survenues entre 10 et 25 minutes après le début de la montée des eaux à l'exutoire du bassin, donc soit pendant ou peu avant le débit de pointe puisque, d'après les hydrogrammes (fig. 3), ce dernier se produit souvent entre 15 et 25 minutes après le début de la montée des eaux.

Nous pouvons, par contre, affirmer avec certitude la non-occurrence des concentrations maximales après le débit de pointe, tout au moins dans le cas des pluies ayant engendré de fortes crues. En effet, il a été fréquemment observé

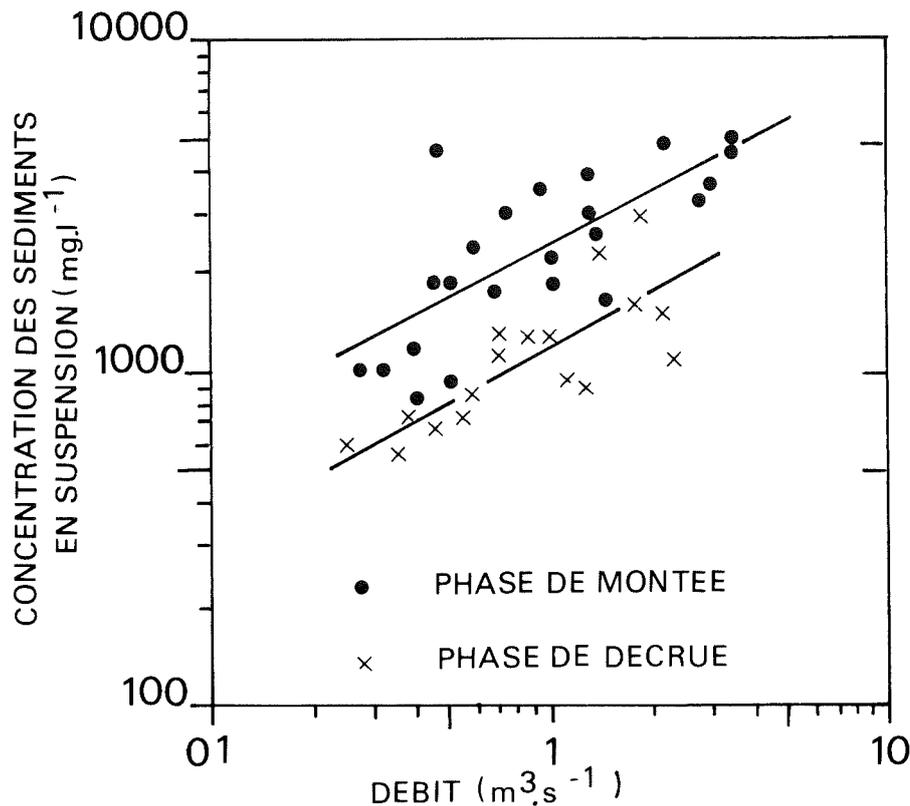


Figure 6. - Diagramme de dispersion de la concentration des sédiments en suspension en fonction du débit.

pendant les pointes de crues que les eaux s'épandent sur les rebords du chenal dans sa section aval, de part et d'autre de la voie ferrée (fig. 2) et subissaient, de ce fait, un effet de peigne exercé par le tapis herbacé dense présent sur ces rebords. Un tel phénomène, pensons-nous, occasionnait une baisse sensible, sinon brutale, des concentrations immédiatement après la période de pointe de l'écoulement. Dans ce même ordre d'idées, il est intéressant d'observer que la courbe représentant les mesures du 25 mars, sur la figure 5, suggère que la baisse de la concentration a été plus rapide dans les premiers moments de la décrue que par la suite.

Le dépôt résultant de cet effet de peigne et mesuré par des plaques de sédimentation a été évalué à environ 20 kg/m²/mois, valeur qu'il faudrait cependant mettre en rapport avec des précipitations cumulées de l'ordre de 200 mm. Nous reviendrons plus loin sur l'importance qu'il convient d'attribuer à ce dépôt par rapport à la quantité de terre totale évacuée du bassin.

L'influence de l'affectation du sol sur la production de sédiments est mise en évidence en comparant des valeurs de concentration mesurées respectivement aux points A, B et C du bassin-versant (fig. 2). Ces valeurs sont reprises au tableau 1. Comme on pouvait s'y attendre, les concentrations ont été plus élevées au point B, qui recueille les eaux de ruissellement issues de la zone

d'habitat ancien (voir fig. 2), laquelle présente beaucoup de surfaces nues et se trouve soumise à une forte pression humaine. Les plus faibles valeurs ont été mesurées en C, dans des eaux provenant essentiellement de la zone occupée par l'habitat non planifié et les équipements collectifs, qui est moins affectée par le poids de la population et, surtout, est encore protégée par endroits par une végétation herbacée. Les valeurs intermédiaires observées en A (exutoire du bassin) sont évidemment le résultat d'un effet de dilution dû au mélange des eaux passant respectivement par B et C. On notera, de plus, que lors des averses, les espaces à couvert herbacé plus ou moins continu n'ont que très peu contribué au ruissellement, et pratiquement pas du tout à la production des sédiments transportés en suspension hors du bassin.

Enfin, les équations (1) et (2), contenues dans le tableau 2, ont été formulées pour tenter d'estimer la concentration de sédiments en suspension en fonction du débit, respectivement pour la phase de montée et celle de décrue. Les droites de régression correspondantes sont présentées à la figure 6. Les coefficients de corrélation ne sont pas très élevés mais plutôt moyens (valeurs de r autour de 0.75), à cause probablement de la taille assez réduite de l'échantillon. Mais, en dépit de ce fait, les tests de STUDENT et de FISCHER sur le coefficient de régression linéaire et sur les variances ont montré que ces relations étaient significatives au niveau 1 %.

Tableau 3. Quelques exemples de charges en suspension instantanées observées au cours des pointes de crues.

Date	Débit (m ³ /s)	Concentration (mg/l)	Charge en suspension (kg/s)
22/01/87	3.0	3500	10.5
12/03/87	3.5	4750	16.6
25/03/87	3.5	4600	16.1

Tableau 4. Fréquence probable de quelques averses de la saison des pluies 1986-1987, d'après les courbes intensité-durée-fréquence établies par KALOMBO (1979).

Date	Lame d'eau (mm)	Durée (minutes)	Intensité moyenne (mm/h)	Fréquence sur 3 ans
20/12/86	12.5	10	75.0	3 x
25/12/86	8.3	20	24.9	20 x
31/12/86	8.6	20	25.8	20 x
07/01/87	8.8	35	15.1	20 x
22/01/87	12.5	45	16.7	10 x
12/03/87	23.3	25	55.9	2 x
25/03/87	12.5	20	37.5	5 x

x = fois

Tableau 5. Quantité mesurée des sédiments en suspension exportés hors du bassin au cours de quelques averses d'intensité variable.

Date	Précipitation (mm)	Durée (minutes)	Débit de pointe (m ³ /s)	Charges transportées (tonnes)
25/12/86	8.3	20	1.43	3.9
07/01/87	8.8	35	2.60	8.2
12/03/87	23.3	25	4.00	42.0
25/03/87	12.5	20	3.50	20.9

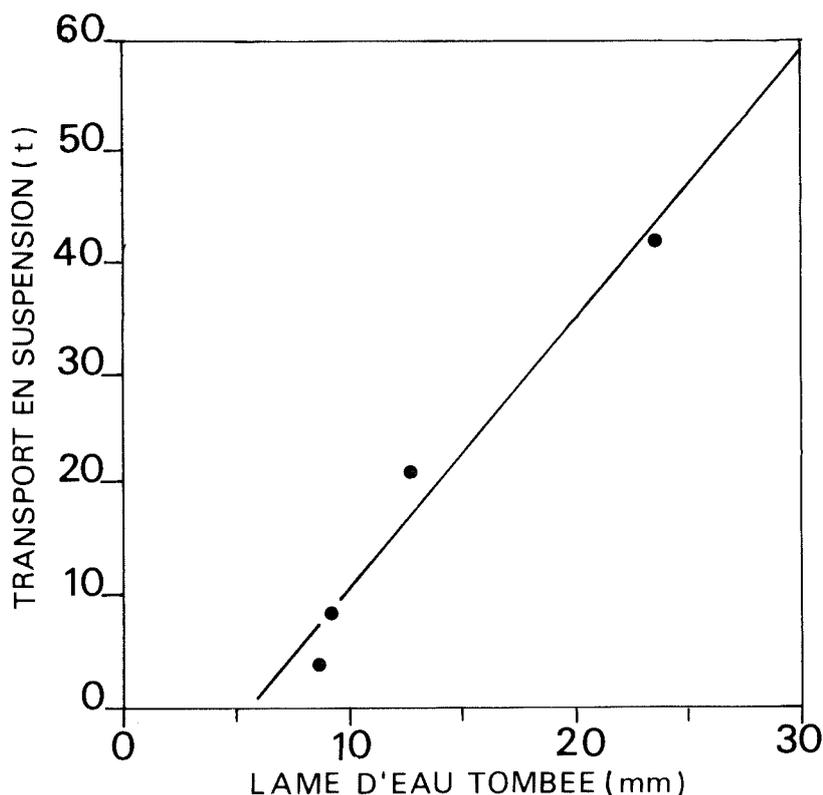


Figure. 7. - Relation entre la charge en suspension transportée au cours d'averses et la lame d'eau précipitée.

B. Estimation de la charge en suspension

Le débit solide a été calculé à l'aide de la formule suivante: $Q_s = CQ/1000$ (GREGORY et WALLING, 1973; MORGAN, 1978), dans laquelle Q_s est la charge en suspension par unité de temps (en $kg.s^{-1}$), C la concentration des sédiments en suspension (en $mg.l^{-1}$) et Q le débit liquide (en $m^3.s^{-1}$). Le cours d'eau ayant 2 mètres de large seulement, les valeurs élevées obtenues pour la période de pointe de l'écoulement (tableau 3) témoignent manifestement de la sévérité de l'érosion qui a lieu dans le bassin-versant. On peut noter que ces valeurs de charge de pointe se rapportent à des pluies ayant eu respectivement une intensité moyenne de $16.7 mm.h^{-1}$ (22/1/87), $55.9 mm.h^{-1}$ (12/3/87) et $37.5 mm.h^{-1}$ (25/3/87). Il est montré, au tableau 4, la fréquence que peuvent avoir de telles averses à Lubumbashi. Cette fréquence a été déduite des courbes intensité-durée-fréquence établies par KALOMBO (1979).

Effectuée à l'aide des relations (1) et (2) (tableau 2), la reconstitution de la charge en suspension totale exportée du bassin au cours de quelques épisodes pluvieux a donné les résultats qui sont présentés au tableau 5.

En corrélant ces résultats avec la lame d'eau tombée, on a pu formuler une équation susceptible de prédire la charge totale évacuée au cours d'averses individuelles. Il s'agit de l'équation (3), figurant dans le tableau 2. A première vue, on peut hésiter à utiliser cette équation basée sur un échantillon de quatre individus seulement. Mais nous

avons des raisons de ne pas la rejeter. En effet, d'une part la corrélation est excellente (fig. 7) et d'autre part, le test de STUDENT sur le coefficient de la droite de régression ainsi que celui de FISCHER sur les variances ont montré que cette équation était significative au niveau 5 %, malgré la petitesse de n . Toutefois, de par sa forme même, elle est inadaptée pour toutes les pluies de lame d'eau inférieure à 5.5 mm, auxquelles elle attribue purement et simplement une charge nulle. Or, un tel résultat n'est pas conforme à la réalité puisque, précédemment, nous avons montré par exemple qu'à la suite d'une averse de 3.5 mm seulement, des concentrations très élevées de sédiments en suspension ont été observées. C'est pour cette raison que nous avons développé l'équation (4), qui n'est pas linéaire, mais une fonction de puissance (tableau 2). Fort imprécise quand on l'applique aux lames d'eau plus importantes, elle a cependant l'avantage de ne pas attribuer une érosion nulle aux faibles pluies et nous paraît donc pouvoir être utilisable pour prédire l'érosion occasionnée par les pluies de moins de 6 mm. Cette catégorie a constitué environ la moitié des pluies de la saison 1986-1987, mais n'a contribué que pour 14 % au volume pluviométrique total.

Dans ces équations, il faudrait voir à travers la lame d'eau tombée, non seulement l'influence du volume du ruissellement produit par les averses, mais aussi celle de l'intensité des précipitations puisqu'il semble exister une nette corrélation positive entre cette dernière variable et la hauteur des précipitations (fig. 8).

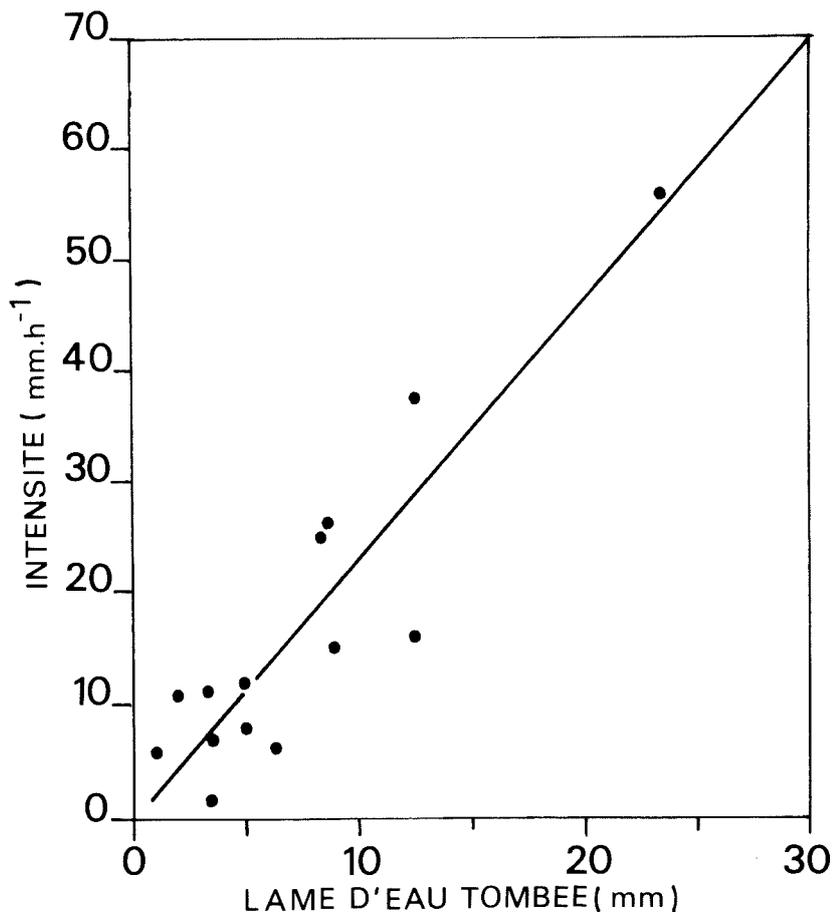


Figure. 8. - Relation entre la lame d'eau et l'intensité des précipitations pour 14 averses.

C. Erosion annuelle

En appliquant les équations de prédiction dont il vient d'être discuté ci-dessus, il a été obtenu, par cumul des charges journalières, les valeurs d'érosion mensuelle et annuelle rapportées au tableau 6.

Il résulte que la charge totale annuelle estimée est de 1624 tonnes, ce qui, pour une superficie totale de 1.92 km², représente un taux d'érosion moyen de 8.5 t.ha⁻¹.an⁻¹ pour le bassin-versant (tableau 7).

En réalité, ce taux ne représenté pas toute l'érosion causée sur les versants, mais seulement la quantité de sédiments ayant été exportée du bassin. De plus, ces sédiments sont ceux fournis seulement par une partie du bassin, puisque les terres érodées dans le secteur nord-ouest, par exemple, ont généralement été piégées par la végétation sans qu'elles ne puissent atteindre le cours d'eau. Pour cette zone du bassin, les estimations à l'aide des mesures réalisées sur plaques de sédimentation ont donné respectivement un taux d'érosion de 7.4 t.ha⁻¹.an⁻¹ sur une portion de versant protégée à près de 50 % par des *Cynodon dactylon* et occupée par un complexe scolaire, et un taux d'érosion de 0.1 t.ha⁻¹.an⁻¹ seulement sur les versants à tapis végétal plus dense. Celui-ci se compose

principalement d'*Imperata* et de *Cynodon dactylon*, avec localement, là où règne l'hydromorphie, des *Typha*.

Quant aux sédiments piégés sur les berges lors des crues, dans la section aval du bassin, leur quantité totale a été évaluée à environ 23 tonnes. Cette valeur ne représente que 1.4 % du transport en suspension total. En gros, si l'on prenait également en compte les dépôts restés au fond de certaines canalisations et en amont du collecteur principal, la quantité de sédiments mobilisée par le ruissellement et piégée sur les versants représenterait un peu moins de 10 % de la quantité de sédiments évacués du bassin.

L'aire pour laquelle le taux de 7.4 t.ha⁻¹.an⁻¹ a été obtenu, présente une physionomie assez proche de la zone où se trouvent les équipements collectifs (école, centre hospitalier, laboratoires de recherche, ...). Si donc on admet pour cette dernière zone ce même taux d'érosion, on en arrive à estimer, pour la seule zone d'habitat ancien planifié, un taux d'érosion de 12.8 t.ha⁻¹.an⁻¹. Un tel taux signifie, en fait, que cette zone d'habitat planifié contribue pour trois quarts à la quantité totale de sédiments exportés du bassin, même si son aire ne constitue que la moitié du bassin-versant. L'essentiel de tout ce qui vient d'être dit se trouve résumé au tableau 7.

Tableau 6. Précipitations et charges estimées mensuelles au cours de la saison des pluies 1986-1987.

Mois	Nombre de jours de pluie	Précipitations (mm)	Charge totale (tonnes)
Octobre	10	63.5	66
Novembre	14	148.1	211
Décembre	22	159.7	188
Janvier	26	198.6	239
Février	16	265.8	483
Mars	11	225.5	418
Avril	4	16.4	19
Année	103	1077.6	1624

Tableau 7. Taux d'érosion estimés au sein du bassin-versant

	Aire (ha)	Taux d'érosion (t.ha ⁻¹ .an ⁻¹)
1. Versants recouverts par un tapis herbacé dense	30.0	0.1
2. Versants localement couverts par des herbes et occupés par les équipements collectifs et l'habitat récent d'autoconstruction	66.7	7.4
3. Versants occupés par l'habitat ancien planifié	95.3	12.8
4. Bassin-versant entier	192.0	8.5

IV. DISCUSSION

Dans le bassin suburbain de la Lubwe (8.5 km²), étudié par LOOTENS et LUMBU (1986), la valeur maximale de concentration observée a été de 1392 mg.l⁻¹, tandis que dans le bassin plus étendu de la Kafubu supérieure (1540 km²) - où se trouve incluse l'agglomération de Lubumbashi - les valeurs de concentration observées ont rarement dépassé 100 mg.l⁻¹ (LOOTENS et KISHIMBI, 1986). De telles valeurs sont nettement inférieures à celles obtenues dans cette étude pour le bassin intra-urbain de la Kamalondo (1.92 km²). On aboutit à cette même conclusion en comparant les taux d'érosion annuels: 12.7 t.km⁻².an⁻¹ pour le bassin de la Lubwe (LOOTENS, et LUMBU, 1986) contre 850 t.km⁻².an⁻¹ pour le bassin de la

Kamalondo, soit une érosion de près de 70 fois plus élevée dans le second bassin.

LOOTENS et LUMBU (1986) ont eux-mêmes reconnu la faiblesse de ce taux de 12.7 t.km⁻².an⁻¹ qui, en effet, relève plus des conditions naturelles que d'un milieu suburbain (DOUGLAS, 1969 et 1972; DUNNE, 1979). Au nombre des raisons évoquées pour expliquer ce faible résultat figuraient notamment le rôle de piège à sédiments joué par les marécages du bassin, les faibles pentes ainsi que l'insuffisance des échantillonnages au cours de la phase de montée des eaux. Sans vouloir rejeter ces explications, nous imputons l'énorme différence d'érosion observée entre les trois bassins-versants (Lubwe, Kafubu et Kamalondo) à deux facteurs principaux.

Il s'agit tout d'abord du degré d'urbanisation, c'est-à-dire d'occupation et d'utilisation du sol par l'homme. On sait par exemple que l'urbanisation conduit souvent à un accroissement des surfaces nues et, partant, des risques d'érosion. De plus, elle peut également influencer sur les processus hydrologiques (KINOSHITA et SONDA, 1967; DOUGLAS, 1978; WALLING, 1981), non pas seulement en augmentant le ruissellement, mais aussi en facilitant, à cause de certains aménagements, l'évacuation des eaux, voire des sédiments érodés sur les versants. C'est le cas dans notre bassin d'étude où le chenal principal, bien bétonné, possède un gradient propice à un écoulement rapide des eaux. Or, dans le bassin de la Kafubu par exemple, c'est justement la faiblesse du gradient et la lenteur de l'écoulement, en plus des marécages et de la méandration, qui sont rendues responsables des faibles concentrations observées, parce qu'elles créeraient et augmenteraient les possibilités de sédimentation des matériaux transportés (LOOTENS et KISHIMBI, 1986, LEQUARRE, 1978). D'autre part, alors qu'il a été mis en exergue pour le bassin de la Lubwe, l'impact de la faiblesse des pentes sur l'évacuation des sédiments est, sans être négligé cependant, quelque peu amoindri dans le bassin de la Kamalondo du fait de l'existence d'un réseau aménagé de canalisations sur au moins une partie du bassin-versant. En somme, les résultats d'érosion obtenus dans cette étude sont analogues à ceux trouvés pour d'autres rivières tropicales subissant l'impact de l'urbanisation (DOUGLAS, 1978) et traduisant bel et bien les effets de cette dernière.

L'autre facteur est l'aire du bassin. En effet, plusieurs auteurs ont déjà mis en évidence la diminution des taux d'érosion avec l'augmentation de la superficie (FOURNIER, 1966; WALLING, 1983; LOOTENS et KISHIMBI, 1986). Nous pouvons donc admettre que le taux d'érosion élevé trouvé dans le bassin de la Kamalondo s'explique en partie par la petitesse de ce bassin, notamment si l'on considère que celle-ci contribue à réduire le temps de réponse et accroît la probabilité pour les sédiments d'atteindre le point de sortie du bassin-versant.

Quant aux variations de l'érosion à l'intérieur du bassin, elles sont, comme l'ont montré plusieurs exemples, essentiellement le résultat des variations dans l'affectation du sol. Les variations dans la distribution spatiale des précipitations que pourrait causer le caractère local des averses, démontré par MALAISSE *et al.* (1978) et SOYER et NTOMBI (1982), sont certainement à minimiser ici, compte tenu de la petitesse du bassin.

D'autre part, on pourrait s'interroger sur la représentativité de l'année étudiée. En se basant sur le régime pluviométrique, il apparaît que l'année hydrologique 1986-1987 a été une année peu pluvieuse car elle a bénéficié de 1077.6 mm de précipitations seulement, alors que la moyenne annuelle calculée sur

plus de 60 ans est de 1237.5 mm, avec un écart-type de 180 mm (SOYER et NTOMBI, 1982). Le déficit de précipitations a le plus affecté les mois de décembre et janvier. Toutefois, il importe de remarquer que si en février et en mars 1987 il est tombé presque autant d'eau que d'ordinaire, le nombre de jours de pluie a, quant à lui, diminué. Cette remarque suggère que durant ces deux mois les précipitations ont eu un caractère particulièrement concentré, dont on connaît si bien l'impact sur l'intensité de l'érosion (FOURNIER, 1960). D'ailleurs, l'indice de FOURNIER calculé pour la saison 1986-1987 est très élevé car il vaut 65.5, alors qu'en le calculant sur base des moyennes de précipitations enregistrées à long terme, établies par SOYER et NTOMBI (1982), cet indice vaut 57.3.

De tout ceci, il faut retenir que s'il est vrai que la saison des pluies 1986-1987 a présenté une faible pluviosité, il n'est pas exclu qu'une partie des pluies de cette année ait pu avoir une agressivité exceptionnelle.

Un taux d'érosion moyen de 8.5 t.ha⁻¹.an⁻¹ a été obtenu au niveau du bassin-versant. Des études du splash effectuées dans la région ont montré sur sol nu des taux de détachement de 181 à 284 t.ha⁻¹.an⁻¹ dans un milieu péri-urbain fortement marqué par l'influence anthropique (SOYER *et al.*, 1982) et de 187 à 249 t.ha⁻¹.an⁻¹ dans un milieu subnaturel (MITI *et al.*, 1984). Même si, pour notre aire d'étude, on admet un splash ramené à la plus petite de ces valeurs seulement, il apparaît que le taux d'exportation global par le ruissellement demeure assez faible en soi, bien qu'il soit largement supérieur, comme on l'a vu, à celui qui existe en milieu suburbain.

V. CONCLUSION

L'étude du transport des sédiments en suspension permet d'estimer l'intensité de l'érosion dans un petit bassin-versant intra-urbain. Alors que l'observation directe ne révèle guère des marques d'érosion grave dans ce bassin, les valeurs très élevées de concentration des sédiments en suspension démontrent que l'érosion y est, en réalité, très active.

Par rapport au résultat obtenu par d'autres auteurs pour un bassin suburbain, le taux d'érosion est plus de 60 fois plus élevé dans le bassin intra-urbain. Pour expliquer cette énorme différence, la taille moins grande de ce dernier bassin ou les différences dans le programme d'échantillonnage apparaissent comme des facteurs secondaires. En fait, l'érosion élevée mise en évidence dans cette étude doit être attribuée principalement aux effets de l'urbanisation.

Au sein même du bassin étudié, le taux d'érosion se révèle être variable selon l'affectation du sol. En particulier, l'érosion est moindre sur les versants conservant encore

de la végétation, laquelle joue un double rôle inhibiteur: sur le détachement des particules de sol d'une part, et sur l'exportation des sédiments d'autre part. Ceci souligne l'utilité qu'il y aurait à bien conserver les parcelles de végétation encore existantes dans le bassin-versant.

Etant basée sur des observations éparses au cours d'une seule année qui, de surcroît, a été déficitaire en précipitations, cette estimation de l'érosion reste évidemment très imprécise. Elle ne permet pas d'évaluer le taux d'érosion réel qui se produit lors des années particulièrement pluvieuses.

REFERENCES

- ALEXANDRE, J. et ALEXANDRE, S., 1964. Action linéaire ou en surface du ruissellement dans une région de savane (Katanga méridional). *Publ. UOC, Elisabethville*, vol. VII: 105-114.
- ALEXANDRE, J., 1967. L'action des animaux fousseurs et des feux de brousse sur l'efficacité érosive du ruissellement dans une région de savane boisée. *Congrès et Colloques de l'Univ. de Liège*, vol. 40: L'évolution des versants: 43-49.
- ALEXANDRE-PYRE, S., 1978. Stades d'évolution des ravinements sur les hauts plateaux sableux du Haut-Shaba. *Géo-Eco-Trop*, 2 (2): 155-160.
- BRUNEAU, J.C. et LOOTENS-DE MUYNCK, M., 1985. Dynamique démographique des quartiers de Lubumbashi des origines à nos jours. *Cah. Outre-Mer*, 150: 121-149.
- DE PLOEY, J., 1967. Erosion pluviale au Congo occidental. Reprinted from "Isotopes in Hydrology". *International Atomic Energy Agency (IAEA)*, Vienna: 291-301.
- DE PLOEY, J. et ROELS, J., 1965. *Etude de l'érosion pluviale de sols sablonneux du Congo occidental au moyen d'un traceur radioactif*. Rapport de recherche, Centre Trico de l'Univ. Lovanium 12, 9.
- DOUGLAS, I., 1969. Sediment yield from forested and agricultural lands. In TAYLOR, J.A. (Ed.), *Univ College of Wales, Aberystwyth Memo*. 12, E 1-22.
- DOUGLAS, I., 1972. *The environment game*. Inaugural lecture, Univ. of New England, Armidale.
- DOUGLAS, I., 1978. The impact of urbanization on fluvial geomorphology in the humid tropics. *Géo-Eco-Trop*, 2 (2): 229-242.
- DUNNE, T., 1979. Sediment yield and land use in tropical catchments. *J. Hydrol.*, 42: 281-300.
- FOURNIER, F., 1960. *Climat et érosion: la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques*. P.U.F., Paris, 201 p.
- FOURNIER, F., 1966. Utilisation des bassins-versants d'investigation hydrologique pour l'étude de l'érosion du sol. *Bull. Ass. Géogr. franç.*, 348: 49-52.
- GREGORY, K.J. et WALLING, D.E., 1973. *Drainage basin form and process. A geomorphological approach*. Edward Arnold, London, 458 p.
- GUY, H.P., 1964. An analysis of some storm-period variables affecting stream sediment transport. *US Geol. Surv. Prof. Paper*, 462 E.
- ILUNGA, L., 1978. L'érosion dans la ville de Bukavu. *Géo-Eco-Trop*, 2 (2): 221-228.
- KABULO, K., 1983. Sur les ravinements aux environs de Kasenga (Shaba, Zaïre). *Ann. Fac. Sc. Univ. Lubumbashi*, 3: 47-58.
- KALOMBO, K., 1979. Contribution à l'étude de l'intensité des pluies à Lubumbashi (Shaba, Zaïre). *Géo-Eco-Trop*, 3 (3): 159-167.
- KINOSITA, T. et SONDA, T., 1967. Change of runoff due to urbanization. Proc. of the Leningrad Symposium: Floods and their computation, *IAHS/UNESCO/WMO*, 2: 786-796.
- LEQUARRE, A., 1978. La végétation et l'action géomorphologique des rivières dans une région tropicale humide. Exemple de la moyenne Kafubu. *Géo-Eco-Trop*, 2 (1): 103-112.
- LOOTENS, M., 1982. Processus d'érosion sur des champs de maïs dans le bassin de la Luamabwe (Shaba, Zaïre). *Géo-Eco-Trop*, 6 (2): 77-90.
- LOOTENS, M., 1983. Erosion accélérée sur sol nu au Shaba méridional (Zaïre). *Ann. Fac. Sc. Univ. Lubumbashi*, 3: 1-6.
- LOOTENS, M. et LUMBU, S., 1986. Suspended sediment production in a suburban tropical watershed (Lubumbashi - Zaïre). *Hydr. Sc. J.*, 31 (1): 39-49.
- LOOTENS, M. et KISHIMBI, Y., 1986. Some aspects of water and sediment discharge in the upstream section of the Kafubu River (Shaba - Zaïre). *Geogr. Ann.*, 68 A (4): 383-392.
- LOUGHRAN, R.J., 1976. The calculation of suspended-sediment transport from concentration v. discharge curves: Chandler River, NSW. *Catena* 3: 45-61.
- MALAISSÉ, F., MALAISSÉ-MOUSSET, M. et SCHOROCHOFF, G., 1978. Analyse de la pluviosité à Lubumbashi et dans ses environs immédiats. *Géo-Eco-Trop*, 2 (3): 301-315.
- MBUYU, N. et SOYER, J., 1981. Problèmes d'érosion à Kalemie (Shaba - Zaïre). *Géo-Eco-Trop*, 5 (2): 73-86.
- MILLER, C.T., 1951. *Analysis of flow duration sediment rating curve method of computing sediment yield*. US Bureau of Reclamation Report.
- MITI, T., SOYER, J. et ALONI, K., 1984. Splash en milieu subnaturels de région tropicale (Shaba - Zaïre). *Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd.* 4: 75-86.
- MORGAN, R.P.C., 1978. *Soil erosion*. Longman, London, 113 p.
- PIEST, R.F., 1964. Longterm sediment yields from small watersheds. In Land erosion, precipitation, hydrometry, soil moisture (Proceedings of the Berkeley General Assembly of IUGG), IAHS Publ. n°65: 121-140.
- SOYER, J., MITI, T. et ALONI, K., 1982. Effets comparés de l'érosion pluviale en milieu péri-urbain de région tropicale (Lubumbashi, Shaba, Zaïre). *Rev. Géomorph. Dyn.*, 31: 71-80.
- SOYER, J. et NTOMBI, M.K., 1982. Variabilité spatiale des pluies à Lubumbashi, Zaïre. *Géo-Eco-Trop*, 6 (1): 1-20.

- WALLING, D.E., 1977. Limitations of the rating curve technique for estimating suspended loads, with particular reference to British rivers. *In* Erosion and solid matter transport in inland waters (Proceedings of the Paris Symposium), IAHS Publ., n°122: 34-48.
- WALLING, D.E., 1978. Reability considerations in the evaluation and analysis of river loads. *Z. Geomorph., Suppl.-Bd.* 29: 29-42.
- WALLING, D.E., 1981. Hydrological processes. *In* GREGORY, K.J. & WALLING, D.E. (Eds.): Man and environmental processes (Butterworth, London) : 57-81.
- WALLING, D.E., 1983. The sediment delivery problem. *J. Hydrol.*, 65: 209-237.

