



ECOLE NATIONALE DU
GENIE DE L'EAU ET DE
L'ENVIRONNEMENT
DE STRASBOURG

UNIVERSITE
LOUIS PASTEUR
STRASBOURG



**Etude de l'impact des feux sur l'érosion
des sols à partir des transports solides des
cours d'eau en milieu tropical humide,
(l'Oubangui Centrafrique)
-Etape préliminaire-**

Mémoire présenté en vue de l'obtention du
Diplôme d'Ingénieur des Techniques de l'Equipement Rural
&
Diplôme d'Etudes Approfondies
Mécanique et Ingénierie Option "Sciences de l'Eau"

Soutenu le 17 septembre 1996

par: GHILLOUFI Mohamed

Maître de stage: ORANGE Didier

Laboratoire d'accueil: Laboratoire d'Hydrologie, ORSTOM/Montpellier

A la mémoire de ma mère

AVANT PROPOS

Ce travail constitue l'étape préliminaire d'une collaboration intitulée " *Etude de l'impact des feux sur l'érosion des sols à partir des transports solides des cours d'eau en milieu tropical humide*" entre le Programme sur l'Environnement de la Géosphère Intertropicale (PEGI) et le programme *Fire in global Ressources and Environmental monitoring* (FIRE),

PEGI est un programme pluridisciplinaire des Sciences de la Terre financé par l'INSU, le CNRS et l'ORSTOM, ayant pour objectif l'étude des grands écosystèmes intertropicaux périatlantiques. Un des thèmes majeurs concerne les transports de matières des grands bassins fluviaux que sont ceux de l'Amazonie, du Congo et du Niger. A Paris en novembre 1993, le colloque «Grands Bassins Fluviaux périatlantiques: Congo, Niger, Amazonie» a donné l'état d'avancement des travaux de recherche entrepris sur ce thème, à mi-parcours de la réalisation du projet (OLIVRY et BOULEGUE, 1995).

FIRE est un programme du Joint Research Centre (JRC) financé par la CEE et débuté en 1993 (EHRLICH et al., 1995). Un des thèmes de recherche est la représentation dans l'espace et dans le temps de la répartition des feux de végétation sur la ceinture tropicale des hémisphères Nord et Sud du globe terrestre. Une caractéristique de ce programme est d'avoir choisi comme objet principal d'étude le bassin de l'Oubangui en raison de l'importance quantitative des feux de végétation dans cette zone géographique.

Au sein du programme PEGI, l'opération « Grands Bassins Fluviaux » constitue le volet d'étude à grande échelle des paysages intertropicaux, devant permettre de comprendre les cycles climatiques et les cycles d'érosion-sédimentation dans le domaine continental périatlantique. Les objectifs immédiats sont d'établir le bilan global et les fluctuations inter-annuelles des éléments minéraux et organiques, exportés en suspension ou en solution des continents vers l'océan Atlantique par les eaux fluviales, et ainsi de connaître la dynamique actuelle des grands écosystèmes intertropicaux.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je voudrais exprimer toute ma gratitude à M. Didier ORANGE, qui est le directeur de ce travail. Je suis très reconnaissant pour son soutien moral, et la confiance qu'il m'a toujours témoigné.

Je remercie également tous les membres du Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM à Montpellier pour leur accueil.

Je n'oublie pas non plus de remercier M. Pascal VINE et M. Xavier EUDES du Laboratoire Commun de Télédétection (LCT) pour leurs aides et leurs soutien, durant la première période de mon stage.

Enfin, c'est un grand plaisir pour moi d'exprimer ma reconnaissance à tous mes enseignants aussi bien de l'ENGEES que de l'ENSAIS durant mes cours de DEA, sans oublier ceux de l'ESIER à Tunis.

RESUME

L'étude de l'érosion a toujours été une préoccupation majeure de nombreux chercheurs des différents domaines scientifiques à cause de l'importance de ce phénomène dans le fonctionnement des écosystèmes.

La difficulté d'acquisition des données suffisantes et récentes rend la modélisation parfois délicate. Nous avons effectué tout d'abord une reconstitution des données pluviométriques annuelles et mensuelles, puis on a calculé les indices de végétation, lithologie, pédologie et pente sur chaque sous-bassins versants. Ces indices représentent les caractéristiques intrinsèques du bassin versant. Deux types de modèles ont été testés:

- le premier consiste à utiliser comme variable explicative, en plus des indices cités ci-dessus, la lame d'eau écoulée (L_e) et la lame d'eau précipitée (L_p);
- le deuxième utilise les mêmes variables à l'exception de la lame d'eau précipitée

Les tests statistiques effectués sur les deux modèles sélectionnés à partir de la régression multiple ont conduit à choisir le modèle de la première hypothèse pour la suite de l'étude. Ce modèle a permis de donner une estimation de la réparation de l'érosion globale mensuelle moyenne par sous-bassins versants constitutifs du bassin moyen de l'Oubangui, et d'en déduire l'érosion globale moyenne sur l'ensemble du bassin.

Sur le bassin moyen de l'Oubangui, l'intensité moyenne de l'érosion est de $4,7 \pm 0,4$ t/km²/an, ce qui correspond à une exportation de matières en suspension de 26,7 mg/l au niveau de Mongoumba, exutoire du bassin.

L'application du modèle sur IDRISI a donné une visualisation de la répartition mensuelle et annuelle de l'intensité de l'érosion sur l'ensemble du bassin de l'Oubangui. Cela a permis d'effectuer une analyse régionale de l'intensité de l'érosion et de son évolution au cours de l'année.

- > 40% de flux des matières particulières exportées au bief de Mongoumba proviennent de l'Uélé;
- > A partir des valeurs annuelles d'intensité d'érosion, on peut catégorier les sous-bassins versants constitutifs du bassin versant moyen de l'Oubangui, de la façon suivante:
 - érosion supérieure à 7 t/km²/an: Uélé et Mpoko;
 - érosion égale à 6 t/km²/an: Bili et Ouaka;
 - érosion égale à 4 t/km²/an: Mbomou, Ouara, Chinko;
 - érosion égale à 3 t/km²/an: Kémo, Lobaye;
 - érosion légèrement supérieure à 2: Kotto, Mbari.

Enfin, dès que les cartes de répartition du feu sur l'ensemble du bassin de l'Oubangui seront disponibles, il sera possible de confronter cette répartition de l'intensité de l'érosion avec celle des feux et de déterminer la relation qui peut exister entre feu et érosion.

*"Study of fire impact on soil erosion from solid
river transports in humid tropical landscape
-preliminary stage-".*

ABSTRACT

The study of erosion has always been one of the preoccupation of many researchers from different domains because of the importance of this phenomenon in the functioning of several ecosystems.

This study has allowed us to illustrate the different variables explaining erosion by means of bibliographic study. Then, with the available data, we have determined the variables: monthly precipitation and depth of runoff, the indexes of vegetation, pedologic, lithologic and that of slope and finally the area of each subwatershed. Thanks to these variables we have made a modelisation of erosion.

The application of the chosen model on a SIG, has allowed us later to well visualise the repartition of erosion on the whole Oubangui catchment.

The results obtained are the followings:

- 1- the maximum inter-annual monthly erosion over the Oubangui catchment is reached during the period from august to november;
- 2- the average intensity of the global erosion on the Oubangui catchment is about $4.7 \pm 0.4 \text{ t/km}^2/\text{year}$.
- 3- 40% of the particularly material flow exported to Mongoumba are issued from Uele.

Finally, when the fire repartition maps on the whole Oubangui catchment will be available, it will be possible to confront the repartition of the erosion intensity with that of fire.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I:ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE CONCERNANT L'EROSION GLOBALE	3
I- INTRODUCTION	3
II- L'EROSION DU SOL	3
II-1 GENERALITES.....	3
II-2 MECANISMES ET FACTEURS DE L'EROSION MECANIQUE	4
II-2-1 <i>Les facteurs qui règlent l'importance de l'érosion mécanique</i>	4
II-3 MECANISMES ET FACTEURS DE L'EROSION CHIMIQUE.....	8
II-3-1 <i>Mécanismes de l'érosion chimique</i>	8
III- LES MODELES D'EROSION MECANIQUE.....	9
III-1 PRESENTATION DE L'EQUATION UNIVERSELLE DE WISCHMEIER	10
III-1-1 <i>L'indice d'agressivité climatique</i>	10
III-1-2 <i>L'érodibilité du sol</i>	11
III-1-3 <i>Le facteur topographique SL</i>	11
III-1-4 <i>Le facteur C</i>	11
III-1-5 <i>Le facteur P</i>	12
III-2 MODELES PROPOSES PAR JANSEN ET PAINTER (1974).....	12
III-3 MODELES PROPOSES PAR PROBST (1990)	13
IV-CONCLUSION	14
CHAPITRE II-L'IMPORTANCE DES FEUX DE BROUSSE EN AFRIQUE CENTRALE.....	16
I- INTRODUCTION	16
II-DISTRIBUTION DES BIOMASSES BRULEES	16
II-1 IMPORTANCE DES BIOMASSES BRULEES PAR CONTINENT	16
II-2 REPARTITION DES FEUX EN AFRIQUE.....	18
III-L'IMPACT DU FEU SUR LA QUALITE DE L'ATMOSPHERE	21
IV- L'IMPACT DU FEU SUR L'EROSION.....	21
CHAPITRE III-PRESENTATION DU BASSIN DE L'OUBANGUI	22
I- SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE	22
II- LA MORPHOLOGIE DU BASSIN	22

III-LA VEGETATION DU BASSIN DE L'OUBANGUI.....	25
III-1 FORETS INONDABLES ET MARECAGEUSES	25
III-2 SAVANES.....	25
IV-LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE (D'APRÈS MALIBANGAR ET AL., 1993)..	25
IV-1 L'OUBANGUI SUPERIEUR	25
IV-1-1 <i>Le Mbomou et ses affluents</i>	25
IV-1-2 <i>L'Uélé</i>	27
IV-2 LE MOYEN OUBANGUI.....	27
IV-2-1 <i>L'Oubangui</i>	27
IV-2-2 <i>Les principaux affluents du moyen Oubangui</i>	27
IV-3 LES ENTITES HYDROLOGIQUES DE L'OUBANGUI.....	28
V-LE CLIMAT DU BASSIN DE L'OUBANGUI:.....	28
VI-LA PEDOLOGIE.....	28
VII-LA GEOLOGIE	31
VIII-ETUDE DES FLUX DE MATIERES SUR LE BASSIN DE L'OUBANGUI	31
VIII-1 PROTOCOLES DE MESURES DES FLUX DE MATIERES PARTICULAIRES.....	31
VIII-2 BILAN DES FLUX DE MATIERES A BANGUI.....	31
VIII-2-1 <i>Variabilité mensuel des flux de matières particulières</i>	34
VIII-2-3 <i>Variabilité mensuelle des flux de matières dissoutes</i>	34
VIII-2-4 <i>L'érosion mécanique actuelle</i>	34
CHAPITRE IV-LE SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE IDRISI.....	35
I-UTILITE D'UN SIG.....	35
II-PRESENTATION D'IDRISI.....	37
III-CONCLUSION	36
CHAPITRE V-CHOIX DES VARIABLES DE MODELISATION.....	37
I-INTRODUCTION	37
II-LA LAME D'EAU PRECIPITEE ANNUELLE	37
II-1 RECONSTITUTION DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES DE LA ZONE ZAIRE.....	37
II-2 CALCUL DE LA LAME D'EAU PRECIPITEE ANNUELLE SUR CHAQUE SOUS BASSIN VERSANT	42
II-2-1 <i>Méthode de THIESSEN</i>	42
II-2-2 <i>Méthode d'interpolation sous IDRISI</i>	44
II-2-3 <i>Comparaison entre les deux méthodes</i>	44
III LA LAME D'EAU PRECIPITEE MENSUELLE	47

III-1 RECONSTITUTION DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES MENSUELLES SUR LA PARTIE ZAIRE.....	47
III-2 CALCUL DE LA LAME D'EAU PRECIPITEE MENSUELLE.....	49
IV LA LAME D'EAU ECOULEE MENSUELLE.....	50
IV-1 DEFINITION.....	50
IV-2 PROCESSUS DE GENESE DES DEBITS.....	51
IV-3 TABLEAU DE RESULTATS.....	52
V- CALCUL DE L'INDICE DE VEGETATION.....	53
VI- CALCUL DE L'INDICE DE LITHOLOGIE.....	55
VII- CALCUL DE L'INDICE DE PEDOLOGIE.....	55
VIII- CALCUL DE L'INDICE DE PENTE.....	55
VIII-1 DEFINITION DE MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN.....	55
VIII-2 PRESENTATION DU MNT UTILISE.....	56
VIII-3 DETERMINATION DE L'INDICE DE PENTE.....	57
IX-COMMENTAIRES SUR LES VALEURS D'INDICE.....	57
CHAPITRE VI-MODELISATION DE L'EROSION SUR L'OUBANGUI A L'ECHELLE MENSUELLE.....	62
I-INTRODUCTION.....	62
II- DONNEES DE MES DISPONIBLES.....	62
III-MODELE A PARTIR DE L_e ET L_p	64
III-1 MODELISATION.....	64
III-2 VALIDATION DU MODELE.....	67
III-3 COMPARAISON AVEC LES MODELES DE JANSEN ET PAINTER ET DE PROBST.....	71
IV-MODELE A PARTIR DE L_e	71
IV-1 MODELISATION.....	71
IV-2 COMPARAISON DU MODELE L_pL_e ET DU MODELE L_e	74
V- TEST DE SENSIBILITE DES VARIABLES.....	76
V-1 TEST DE L'INDICE DE VEGETATION.....	76
V-2 TEST DE L'INDICE DE LITHOLOGIE.....	76
V-3 TEST DE L'INDICE DE PEDOLOGIE.....	77
CHAPITRE VII: SPATIALISATION DES RESULTATS SOUS.....	78
IDRISI ET INTERPRETATION.....	78
I-INTRODUCTION.....	78
II-PREPARATION DES DONNEES.....	78

II-1 CARTES DE LAME D'EAU PRECIPITEE MOYENNE MENSUELLE INTERANNUELLE.....	78
II-2 CARTES DE LAME D'EAU ECOULEE MOYENNE INTERANNUELLE	78
III-APPLICATION DU MODELE	79
IV-PRESENTATION DES RESULTATS.....	80
IV-1 CRITIQUE DES RESULTATS BRUTS.....	80
IV-2 PRESENTATION DE LA SPATIALISATION DE L'EROSION MENSUELLE	81
VI-3 VARIATION MENSUELLE DE L'EROSION GLOBALE DE L'OUBANGUI MOYEN.....	82
IV-4 BILAN ANNUEL DE L'EROSION PAR SOUS-BASSIN VERSANT	83
V-DISCUSSION.....	84
CHAPITRE VIII-CRITIQUE.....	88
I-INTRODUCTION	88
II-CALCUL DES INDICES D'AGRESSIVITE PLUVIOMETRIQUE	88
II-1 INDICE ANNUEL DE FOURNIER.....	88
II-2 INDICE D'AGRESSIVITE DE LA LAME D'EAU PRECIPITES MENSUELLE .	89
III-UTILISATION DES INDICES D'AGRESSIVITE PLUVIOMETRIQUE POUR LA MODELISATION.....	90
IV-CONCLUSION	90
CONCLUSION GENERALE	91

INTRODUCTION GENERALE

"L'érosion est un problème vieux comme le monde " (ROOSE, 1977).

Toutes les civilisations y ont été confrontées sur la route du développement et ont tenté d'y remédier avec des succès variables en inventant des techniques antiérosives adaptées aux circonstances écologiques et socio-économiques du moment.

De nombreux auteurs ont étudié les processus d'érosion pour appréhender les principaux facteurs qui les règlent, et pour quantifier l'intensité de cette érosion. La plupart de ces études retient comme premiers facteurs responsables de l'érosion, le climat (LANGBEIN et SCHUMM, 1958; WILSON, 1973; JANSON, 1982) et/ou l'altitude moyenne (AHNERT, 1970; PINET et SOURIAU, 1988) de la zone géographique considérée.

L'érosion est un phénomène permanent d'usure des surfaces continentales, qui met en jeux un ensemble de processus mécaniques et chimiques. L'érosion mécanique se traduit par la désagrégation des horizons supérieurs du sol donnant lieu à l'exportation de matière en suspension dans les drains de surface. Par contre l'érosion chimique, ou altération, correspond à une dissolution en profondeur des minéraux des roches à l'interface sol/roche mère sous l'effet des eaux de percolation et donnant lieu pour partie à l'exportation de matières dissoutes hors du paysage dans les drains de surface.

Les recherches relatives à l'érosion mettent en général l'accent sur la diversité et la complexité des facteurs contribuant à l'érosion. Ces facteurs font intervenir les aspects morphologiques, climatologiques, pédologiques, géologiques et phytogéographiques du paysage. A l'échelle globale, l'impact des activités anthropiques sur l'intensité de l'érosion mécanique dans les régions tropicales reste relativement limité. Néanmoins, les récents travaux du programme FIRE ont montré l'importance des feux de végétation (feux instantanés et feux anthropiques) sur l'ensemble de la ceinture tropicale, tant du point de vue de la répartition spatiale que temporelle, un pic d'intensité de l'activité des feux étant centré sur la zone du bassin de l'Oubangui. Cela amène bien sûr des situations préoccupantes vis à vis de l'érosion des sols. De plus, le tout peut être aggravé par le fait que dans cette région les régimes hydrologiques sont toujours du type crue unimodale.

Devant ce faisceau de facteurs favorables à l'érosion mécanique et donc à la dégradation de la couverture des sols sur l'ensemble du bassin de l'Oubangui, il est urgent de comprendre la dynamique érosive actuelle de cette zone géographique pour des aménagements futurs efficaces. Ainsi une collaboration entre le programme PEGI/GBF et le programme FIRE s'est imposée pour l'étude de l'impact des feux sur l'érosion des sols à partir des transports solides des cours d'eau sur le bassin de l'Oubangui.

Cette étude est réalisée sur la période 1992-1994 à partir de séries mensuelles d'observation de matières en suspension en plusieurs points du bassin de l'Oubangui et d'une chronique mensuelle de cartographie des feux obtenue par imagerie satellitaire NOAA-AVHRR (EHLICH et al., 1995).

La première difficulté est d'ordre méthodologique et fait l'objet de ce travail. En effet, il s'agit de savoir spatialiser l'information ponctuelle concernant l'érosion, donnée par les observations de matière en suspension, afin de pouvoir ensuite croiser cette information avec les cartes feux, IDRISI ayant été choisi comme SIG commun. Pour spatialiser l'information ponctuelle des observations de matières en suspension, il a été choisi d'établir un modèle global d'érosion à partir des différentes couches thématiques spatialisées disponibles (relief, végétation, pédologie, lithologie). Ce modèle doit permettre de produire des cartes mensuelles de répartition de l'intensité de l'érosion sur le bassin de l'Oubangui.

Le mémoire s'articule en deux grandes parties:

↳ Dans la première partie, le chapitre I est une recherche bibliographique des différents travaux effectués dans le domaine de la quantification de l'érosion à l'échelle globale (recherche de variables explicatives et modélisation). Le chapitre II donne l'état des connaissances sur la répartition spatiale et temporelle des feux en Afrique centrale. Le chapitre III présente la zone d'étude formée par le bassin de l'Oubangui (République Centrafricaine). Et enfin le chapitre IV donne un bref aperçu des potentialités du SIG IDRISI.

↳ La deuxième partie concerne la modélisation de l'érosion et la spatialisation de cette information. Le chapitre V discute du choix des variables nécessaires pour l'établissement du modèle et de l'acquisition de leur attribut. Le chapitre VI développe la méthode utilisée pour effectuer la modélisation de l'érosion à l'échelle mensuelle sur l'ensemble du bassin de l'Oubangui. Ensuite, le chapitre VII est consacré à l'application du modèle trouvé sur le système d'information géographique IDRISI. Il permet de visualiser la répartition de l'intensité de l'érosion sur chacun des sous-bassins versants constituant le bassin de l'Oubangui à un pas de temps mensuel. Enfin, le chapitre VIII fait une critique de la méthode d'acquisition du modèle et propose quelques améliorations.

CHAPITRE 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE CONCERNANT

L'EROSION GLOBALE

I- INTRODUCTION

L'un des problèmes majeurs de l'aménagement agricole moderne est la perte de sols due à l'écoulement superficiel et aussi la pollution accompagnant cet écoulement. Outre la déficience agricole, cela a des conséquences importantes sur la qualité de l'eau superficielle et profonde. Vu ces problèmes, il est très intéressant d'étudier le phénomène d'érosion et d'essayer de réaliser une cartographie des zones les plus touchées. Pour cela, il est nécessaire d'étudier les paramètres générant ce phénomène.

L'érosion des sols est régie par deux principaux types de facteurs:

- les agents érosifs, comme les précipitations ou le vent, fournissent tout d'abord l'énergie nécessaire au détachement et au transport des particules du sol;
- les facteurs d'érodibilité du sol (la pente des terrains ou encore la nature du couvert végétal) interagissent ensuite avec les agents érosifs et modulent leur action;

Ainsi la réponse d'un bassin versant aux agents érosifs est un processus très complexe faisant intervenir une large variété de facteurs. La végétation intercepte une grande part de l'énergie des pluies selon la densité du couvert végétal, les pratiques culturales du sol pouvant accélérer ou ralentir la vitesse des écoulements de surface. Cette liste de facteurs ne peut être exhaustive, son seul but est d'illustrer la multiplicité des paramètres en cause et par conséquent la complexité extrême des processus mis en oeuvre par l'érosion (WISCHMEIER, 1959; ROOSE, 1980; PROBST, 1990; TARDY, 1990...). Les facteurs les plus importants à prendre en considération pour l'érosion sont les suivants:

- ↳ des facteurs climatiques tels que l'intensité et la répartition des pluies;
- ↳ l'érodibilité du sol qui dépend du type de sol, de sa texture, de sa structure et des pratiques culturales;
- ↳ le couvert végétal;
- ↳ des facteurs morphologiques tels que la pente, la longueur des drains, l'exposition....

II- L'EROSION DU SOL

II-1 GENERALITES

Les articles relatifs à l'érosion mettent en général l'accent sur la description des mécanismes qui en règlent l'intensité. Un de leurs objectifs essentiels est de montrer comment l'érosion constitue un facteur de façonnement des paysages, de la morphogénèse et, finalement, de géographie.

L'érosion des sols est un problème préoccupant partout où le vent et l'eau sont en contact avec la surface terrestre. On peut distinguer trois types d'érosion des sols:

- 1- érosion par rigoles: elle se produit quand le ruissellement d'eau se concentre en ruisselets ayant un volume et une vitesse suffisants pour engendrer une force de creusement;
- 2- érosion en nappe: type d'érosion qui se produit quand un matériau est enlevé de la surface en une couche ou nappe de faible épaisseur;
- 3- érosion par ravelines: enlèvement du sol dû à une concentration excessive de l'eau courante aboutissant à la formation de canaux profonds.

L'érosion est un phénomène d'ablation. A la surface de la croûte terrestre continentale, elle prélève des matériaux qui, en solution ou en suspension dans les eaux des rivières et des fleuves, gagnent les océans et les bassins intercontinentaux, pour s'accumuler et former les dépôts de sédiments (fig 1). Elle est un ensemble de processus mécaniques et chimiques (TARDY, 1990).

II-2 MECANISMES ET FACTEURS DE L'ÉROSION MÉCANIQUE

Le mécanisme fondamental de l'érosion mécanique se résume en trois étapes:

- ❶ la première étape consiste en un ameublissement des roches en surface,
- ❷ la deuxième étape consiste en un détachement et une mise en mouvement des particules les plus fines en direction des talwegs
- ❸ la troisième étape est celle du transport des matériaux en suspension dans l'écoulement de surface.

II-2-1 Les facteurs qui règlent l'importance de l'érosion mécanique

Globalement, l'importance de l'érosion mécanique est directement liée à la pluviosité, au drainage, à la nature physique des roches, à la pente et au couvert végétal (PROBST, 1990).

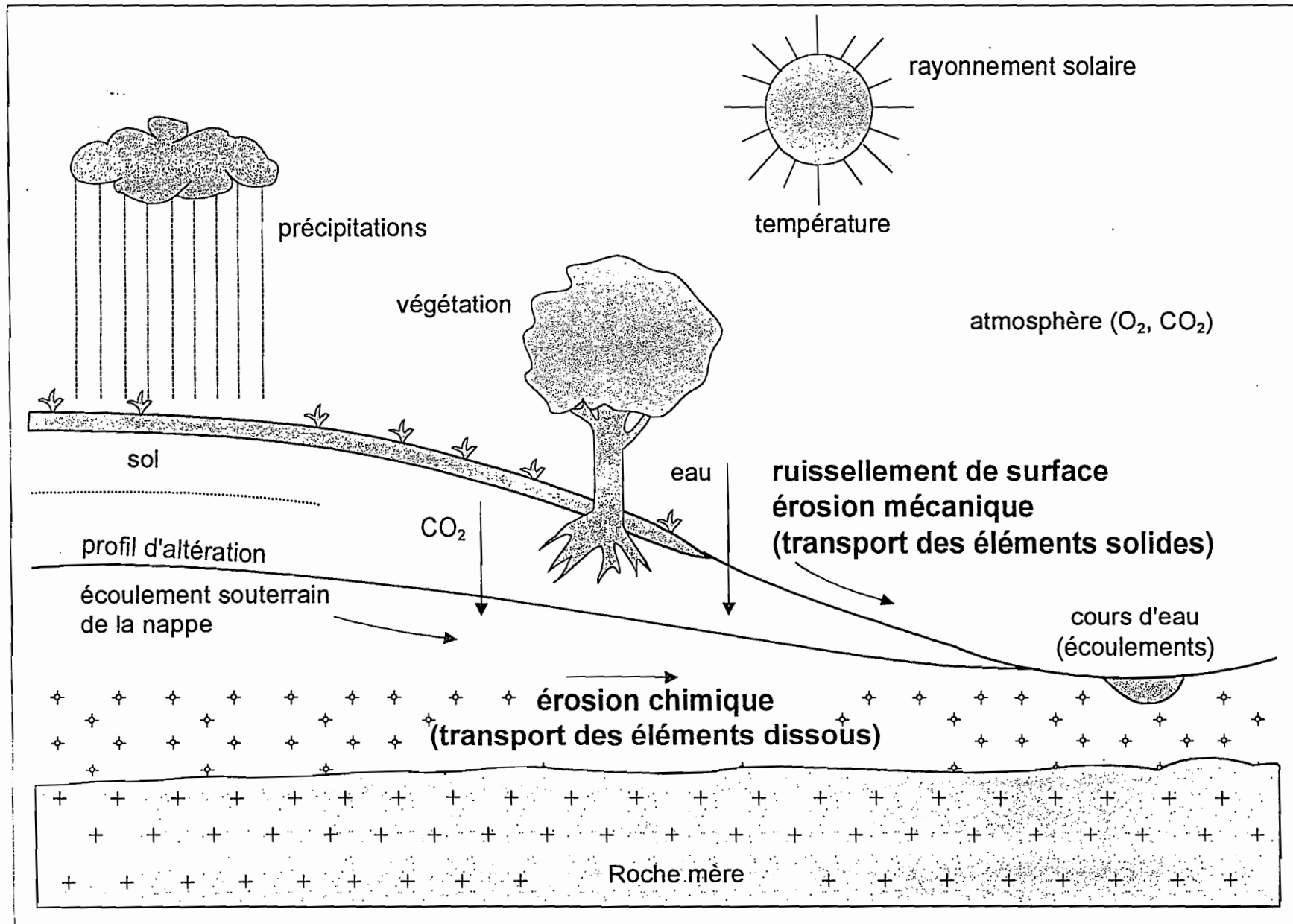
a) Pluie et ruissellement de surface

L'eau du ruissellement rapide en surface est le vecteur essentiel de l'érosion mécanique malgré qu'elle ne représente qu'un faible pourcentage de l'hydrogramme d'une crue. Par exemple, le tableau 1 illustre l'importance du ruissellement dans la quantité des matières transportées dans les régions du Nord-Est de la France. En effet, le ruissellement est souvent responsable de la totalité des exportations en suspension, si bien que en règle générale la concentration des particules augmente lorsque le débit total croît.

Tab 1: Distribution des différents facteurs d'érosion mécanique dans les Alpes (d'après KUKAL, 1982)

Agent de destruction	Matériel déplacé (million de tonnes/an)
eaux de ruissellement	5930
éboulements	274
avalanches	45
glaciers	27
solifluxion	1
Total	6277

Fig 1 : Érosion chimique, érosion mécanique
et mouvements de l'eau sur les versants



b) Force et distribution des gouttes de pluie

On note également l'effet mécanique important lié à l'énergie cinétique de la pluie à son arrivée sur le sol. En effet, les gouttes de pluie en tombant déchaussent les agrégats du sol en les entraînant vers l'aval selon deux phénomènes distincts. L'énergie cinétique disponible de la pluie est fonction d'une part, de la distribution de la taille des gouttes et d'autre part, de la vitesse de chaque classe de taille. HUDSON (1973) indique que 25 mm/h représente la limite entre une pluie érosive et une pluie non érosive. Une plus grande intensité donne une plus grande érosivité (tab2). Par ailleurs, le diamètre moyen des gouttes augmente avec l'intensité jusqu'à une certaine limite. On remarque aussi que sur un versant de pente donnée, l'érosion mécanique du sol par la pluie est d'autant plus efficace que l'intensité de la pluie est plus grande.

Tab 2: Erosion mécanique spécifique simulée, calculée en fonction de la pente du versant, de l'intensité de la pluie et de la vitesse de l'écoulement superficiel (d'après KILING et RICHARDSON, 1973)

pente du versant (%)	intensité de la pluie (mm/h)	vitesse de l'écoulement superficiel (m/h)	érosion mécanique spécifique simulée (t/km ² /an)
6	32	193	10
6	117	553	148
20	32	352	65
20	117	908	2647
40	32	444	107
40	117	1155	6108

c) Nature du couvert végétal et culture du sol

La densité du couvert végétal influe considérablement sur l'érosion mécanique. En effet, les feuilles des végétaux interceptant la pluie réduisent l'énergie cinétique des gouttes d'eau et leur pouvoir érosif. En fait, la quantité d'eau que la végétation peut retenir par interception, malgré l'action de la gravité et du vent, varie beaucoup suivant les espèces et la densité de la couverture végétale. Elle est de l'ordre de quelques millimètres d'eau en moyenne et elle ne joue un rôle important qu'au début de l'averse. C'est un phénomène que l'on remarque très bien sous des arbres à feuillage abondant, ou lorsque les pluies sont de courte durée et d'intensité assez faible.

d) Hauteur des reliefs

La vitesse des filets liquides et le pouvoir érosif de l'eau de ruissellement sont directement proportionnels à la pente de versant et à la longueur du chemin parcouru. Si la pente est forte, le ruissellement devient plus grand et par conséquence l'érosion devient plus forte.

e) Sensibilité des roches à l'érosion mécanique

La vitesse d'érosion des roches dépend dans un premier temps de mécanismes physiques qui séparent et désagrègent les cristaux des roches. ROUGERIE (1960), en Côte d'Ivoire, puis MICHEL (1973) sur les bassins versants du Sénégal et de la Gambie, ont proposé pour différentes formations rocheuses l'échelle suivante de dureté ou de résistance à l'érosion :

- roches très dures : grès quartzites, dolérites, cornéennes,
- roches dures : grès quartzeux bien cimentés,
- roches à dureté moyenne: roches vertes, quartzites fissurés,
- roches tendres : grès feldspathiques, schistes
métamorphiques,
- roches très tendres : grès à plaquettes, granites, tufs.

PROBST (1990) montre que plus les roches sont tendres, plus elles sont sensibles à l'érosion mécanique, d'après une étude effectuée sur plus de 153 bassins versants de tailles différentes au Maghreb. La relation trouvée entre le drainage et l'érosion mécanique en fonction des types de roche montre que plus la roche est dure (micaschistes, calcaires, grès et granites), moins l'érosion est corrélée avec le drainage.

Enfin, CHORLEY et al., (1984) cite dans une étude faite sur quelques pays d'Afrique du Nord une classification des roches suivant leur coefficient d'érodibilité défini comme étant le rapport entre le taux de dénudation de la roche considéré et le taux de dénudation du granite (tab3).

Tab 3: Coefficients d'érodibilité des roches (d'après CHORLEY et al., 1984)

Lithologie	Ker
Granites	1
Sandstones, limestones	4
Schistes / Micaschistes	10
Marls	50

$Ker = (\text{taux de dénudation des roches}) / (\text{taux de dénudation de granite})$

Tab 4 : Erosion mécanique et transport en suspension selon les bassins versants (d'après PROBST, 1990)

bassin	tonnage en suspension en 10^6 t/an	érosion mécanique en t/km ² .an
Amazone	900	152
Congo	48	13
Ienissei	13	5
Nil	111	58
Niger	67	43
Zambèze	100	70
Orange	17	23
Colorado	135	189
Rio Negro	13	73
Oubangui*	3	5.5

* ORANGE et al., 1995

II-3 MECANISMES ET FACTEURS DE L'EROSION CHIMIQUE

L'érosion chimique, ou encore altération, s'associe avec l'érosion mécanique pour évacuer les éléments minéraux hors du profil pédologique en utilisant l'eau comme vecteur.

II-3-1 Mécanismes de l'érosion chimique

Les mécanismes de l'altération chimique par les agents météoriques correspondent à la dissolution des roches par l'hydrolyse des minéraux sous l'effet de la percolation de l'eau de la pluie au travers des horizons des profils du sol.

a) Effet de la température

D'une manière générale, lorsque la température augmente la solubilité des minéraux constituant les roches silicatées diminue (tab5), alors que leur vitesse de dissolution augmente.

Tab 5: Le produit de solubilité (Kps) à la pression de 1 bar (d'après TARDY, 1990)

	log (Kps)			
	0°C	25°C	60°C	100°C
albite (NaAlSi ₃ O ₈)	5.07	3.94	2.61	1.48
anorthite (CaAl ₂ Si ₂ O ₈)	29.41	24.69	19.32	14.53
kaolinite (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	10.02	7.41	4.55	2.09
calcite (CaCO ₃)	9.94	9.76	9.51	9.06

L'intensité de l'altération chimique est, à drainage égal, plus forte en climat chaud intertropical qu'en climat tempéré froid. Autour de 15°C, une diminution de 10°C de la température moyenne annuelle provoque un effondrement de la vitesse d'altération d'un facteur 2 et une augmentation de 10°C multiplie par 1,5 l'intensité de l'érosion chimique (TARDY, 1990).

b) Effet des variations de la pluviosité et du drainage

Le bilan de l'érosion chimique est essentiellement influencé par la pluviosité, dont dépend l'importance du drainage en fonction des zones climatiques. Le drainage représente une fraction importante de la pluviosité en climat humide (60% pour une pluviosité de 2500 mm/an, 35% pour 1500 mm/an). Cette fraction devient pratiquement nulle en climat semi-aride, où toute l'altération cesse par manque d'eau. En revanche, dans les zones humides, les quantités de matières exportées en solution dans les fleuves sont relativement fortes, traduisant un taux d'érosion chimique élevé.

c) Sensibilité des roches mères à l'érosion chimique

La composition minéralogique ou chimique de la roche mère constitue bien sûr un facteur de première importance pour la vitesse d'altération chimique qui décroît dans le sens: sels, calcaires, marnes, argiles, schistes, grès et granites (MEYBECK, 1987) (tab6).

Tab 6: Echelle de sensibilité à l'érosion chimique de roches plutoniques, volcaniques, métamorphiques et sédimentaires (d'après MEYBECK, 1987)

roche	indice relatif
granites	1
gneiss	1
micaschistes	1
grès	1.3
gabbros	1.3
roches volcaniques	1.5
argiles	2.5
carbonates	12
gypses	40
sels	80

La quantité de matières dissoutes dans les eaux de rivières est donc fonction du type de roche constituant le substratum du bassin versant (tab7).

Tab 7: Erosion chimique spécifique selon la nature des roches du substratum (d'après STALLARD et EDMOND, 1981)

type de roches	bassins caractéristiques	charge cationique ($\mu\text{eq/kg d'eau}$)	masse de solides dissous (mg/kg d'eau)
grès et roches sableuses	rio Negro, Zaïre	< 200	< 20
grès, granites, argiles	Amazone, Orénoque	de 200 à 450	de 20 à 40
marnes, calcaires, sédiments	grande majorité des fleuves	de 450 à 3000	de 40 à 250
évacuaires (CaSO_4 , NaCl)	rio Colorado, rio Grande	>3000	> 250

III- LES MODELES D'EROSION MECANIQUE

Du point de vue des hydrologues, un bassin versant est fondamentalement une unité géomorphologique et hydraulique. Il a aussi une signification environnementale et écologique. Il fournit une unité dans laquelle on peut:

- > calculer le bilan hydrique,
- > déterminer les caractéristiques du transport dans le réseau hydrographique (érosion, sédimentation),
- > estimer la probabilité des événements extrêmes et améliorer la gestion des ressources en eau.

Avec l'évolution informatique, on assiste dans le domaine de l'hydrologie à la construction de plusieurs variétés de modèles de comportement des bassins versants. Parmi ces modèles, on trouve les modèles empiriques dans lesquels on fixe des conditions initiales et on observe les changements, mais dans lesquels on ne connaît pas les causes physiques sous-jacentes. Il existe aussi des modèles déterministes dans lesquels les phénomènes prenant place dans le bassin versant peuvent être décrits sous forme de lois physiques et chimiques connues. Cependant le manque de données pertinentes pour déterminer les paramètres des modèles physiques nécessitent souvent qu'ils soient moyennés spatialement sur l'ensemble du bassin versant. On traite alors les phénomènes sous forme morcelée.

Les premiers modèles se sont focalisés sur l'estimation du volume de précipitation à partir de données hydrologiques, mais avec le développement de préoccupations écologiques, particulièrement depuis le milieu des années 70, la modélisation de la quantité de sédiments et de nutriments dans les eaux est devenue de première importance (BROWNE, 1993).

III-1 PRESENTATION DE L'EQUATION UNIVERSELLE DE WISCHMEIER

L'équation universelle de perte de sol, ou USEL, essentiellement empirique, a été développée aux Etats-Unis pour prédire l'érosion du sol à partir de quelques paramètres bien définis. Elle est basée sur l'analyse des régressions menée sur plus de 10 000 résultats annuels observés sur des parcelles et petits bassins versants dans 45 stations de recherches. Elle a été développée pour des terrains à pentes faibles, cultivés, soumis à un climat tempéré. Cette formule fût proposée par WISCHMEIER et SMITH (1960) puis remise à jour en 1978

$$A = R * K * SL * C * P$$

avec :

A: perte de terre en tonne par hectare

R: érosivité de la pluie

K: indice de sol mesurant la résistance relative d'un sol à l'érosion, liée à sa nature lithologique et pédologique

SL: longueur et escarpement de la pente

C: indice de culture lié au type de végétation

P: indice de remède caractérisant les divers travaux de conservation des sols.

III-1-1 L'indice d'agressivité climatique

WISCHMEIER (1959) a sélectionné un indice d'agressivité climatique R défini comme la somme des produits de l'énergie cinétique des pluies unitaires par leur intensité maximale durant 30 minutes (exprimé en mm/h):

$$R = E_c * I_{30} / 100$$

avec: $E_c = 1214 + 890 \log I$ (WISCHMEIER et SMITH, 1958)

- E_c est l'énergie cinétique exprimée en t/km² et par mm de pluie.

ROOSE (1977) a constaté qu'il existe une relation simple entre l'indice d'agressivité climatique moyen annuel (R_{am}) sur une période suffisamment longue (5 à 10 ans) et la hauteur de pluie moyenne annuelle (H_{am}) durant la même période. Cette relation est de la forme:

$$\frac{R_{am}}{H_{am}} = 0.5 \pm 0.05$$

Ce rapport s'est avéré particulièrement constant en une vingtaine de points situés en Côte d'Ivoire, Sénégal, Niger, Tchad, Cameroun et Madagascar (ROOSE, 1977).

On peut trouver d'autres indices d'érosivité comme celui de FOURNIER (1962), qui a montré que sur de grands bassins versants, on observe une bonne corrélation entre le transport solide et un indice $\frac{p^2}{P}$ où p est la précipitation moyenne du mois le plus humide et P la pluie moyenne annuelle.

III-1-2 L'érodibilité du sol

WISCHMEIER a proposé d'étudier l'érodibilité du sol au champ dans des conditions standards qui servent de référence en tout point du globe. Il s'agit d'une parcelle de 22,1 m de long, 9% de pente, traitée comme une jachère nue, sans apport de matières organiques depuis trois ans, et travaillée superficiellement pour éviter la formation d'une pellicule de battance.

L'indice d'érodibilité K se calcule à partir de la formule suivante:

$$K = \frac{E}{R \times SL \times 2.24}$$

où E est l'érosion en tonne/ha/an, R est l'indice d'agressivité climatique, SL le facteur topographique et 2,24 un coefficient nécessaire pour passer des unités décimales (T/ha) aux unités anglo-saxonnes (t/acre).

III-1-3 Le facteur topographique SL

En vue de l'utilisation pratique à grande échelle, Wischmeier et Smith (1960) ont proposé un abaque unique qui traduit à la fois les influences de la longueur et de l'inclinaison de la pente selon la formule:

$$SL = \frac{\sqrt{L}}{100} \times (0.76 + 0.53 \times S + 0.076 \times S^2)$$

L: la longueur de la pente exprimée en pieds (1 pied = 0,3048 m)

S: la pente en %

ROOSE (1977) estime que ce facteur topographique est le point le plus faible de l'équation empirique USEL pour l'estimation de l'érosion. HUDSON (1973) propose une autre formule pour calculer ce coefficient:

$$SL = S^{1.5} \times L^{0.5}$$

Cette nouvelle formule, d'après ROOSE (1977), donne satisfaction dans bon nombre de cas sur les sols à argile dominante kaolinique, type dominant de sols en Afrique de l'Ouest et Centrale.

III-1-4 Le facteur C

C'est un facteur qui exprime l'interaction entre la plante et les techniques culturales sur la réaction à la pluie d'un type de sol. Ce facteur évolue en fonction du stade végétatif. Un couvert végétal complet assure une excellente protection du sol (tab8).

Tab 8: Quelques valeurs estimées du facteur C en Afrique (d'après ROOSE, 1977)

Pratique	Facteur C moyen annuel
sol nu	1
forêt ou arbuste dense	0.001
savane, prairie en bon état	0.01
savane ou prairie sur-pâturée	0.1

III-1-5 Le facteur P

Le facteur P est le rapport entre les pertes en sol sur un terrain aménagé et un autre de taille identique non aménagé. ROOSE (1977) propose différentes valeurs de P (tab9) en fonction des types d'aménagement en Afrique de l'Ouest et il signale que les techniques biologiques sont bien plus efficaces que les techniques mécaniques qui sont coûteuses à implanter et difficiles à entretenir.

Tab 9: Valeur de l'indice P (d'après ROOSE, 1977)

En Afrique de l'Ouest	P
billonnage isohypse cloisonné	0.2 à 0.10
bandes antiérosives de 2 à 4 m de large	0.30 à 0.10
mulch en paille	0.01
mulch curasol (60 gr/l/m ²)	0.5 à 0.20
prairie temporaire ou plantes de couverture	0.5 à 0.10
murettes en pierres sèches	0.10

III-2 MODELES PROPOSES PAR JANSEN ET PAINTER (1974)

La moyenne annuelle de sédiment sur 79 bassins versants de superficie supérieure à 5000 km² répartis sur tous les continents est dépendante de huit paramètres liant les données climatiques et topographiques (UNESCO, 1967; HOLMAN, 1968). Les facteurs non climatiques contrôlant l'érosion sont: l'érodibilité des sols et des roches, la topographie, la végétation et l'action humaine.

JANSEN et PAINTER (1974), par régression multiple sur ces 79 bassins versants, ont obtenu un modèle d'érosion globale pour l'ensemble:

$$\log S = -2.032 + 0.100 \log D - 0.314 \log A + 0.750 \log H + 1.104 \log P + 0.368 \log T - 2.324 \log V + 0.786 \log G$$

et quatre modèles d'érosion globale en fonction des zones climatiques représentées dans cet échantillon:

❶ climat tropical humide:

$$\log S = 4.354 + 1.527 \log D - 0.302 \log A + 0.296 \log R - 3.417 \log T$$

❷ climat tropical sec:

$$\log S = 12.133 - 0.340 \log D + 1.590 \log H + 3.704 \log P + 0.936 \log T - 3.495 \log V$$

❸ climat tempéré chaud:

$$\log S = -3.078 + 1.003 \log D + 0.686 \log R + 4.287 \log T - 5.031 \log V$$

④ climat tempéré froid:

$$\text{Log } S = -5.073 + 0.514 \text{ Log } H + 2.195 \text{ Log } P - 3.706 \text{ Log } V + 1.449 \text{ Log } G$$

avec :

S: érosion mécanique spécifique en t/km²/an

D: débit annuel écoulé en 10³ m³/km²

A: superficie du bassin en km²

H: altitude moyenne en m

P: pluviosité annuelle sur le bassin en mm

T : température moyenne du bassin en °C

V: facteur de végétation (il est égal à 4 pour les forêts , 3 pour les prairies, 2 pour les steppes, 1 pour les déserts)

G: paramètre lithologique (G=3 pour les roches dures du Paléozoïque, 5 pour les roches plus jeunes du Mésozoïque, 6 pour les sédiments tendres du Cénozoïque)

On remarque que les 7 variables explicatives sélectionnées sont utilisées dans le modèle d'ensemble d'érosion globale, ce qui n'est pas le cas des modèles d'érosion globale par climat. Par ailleurs, les variables explicatives n'ont pas toujours le même sens de variation d'un modèle à l'autre. Par exemple, le drainage est positif pour les climats tropical humide et tempéré chaud et négatif pour le climat tropical sec; il n'est pas pris en compte pour le climat tempéré froid.

Pour le modèle général, on note que l'érosion croît avec le drainage, l'altitude moyenne, la pluviosité annuelle, la température moyenne et l'érodibilité de la roche. A l'inverse, l'érosion décroît avec la superficie du bassin versant et la protection du sol.

III-3 MODELES PROPOSES PAR PROBST (1990)

PROBST (1990) a fait une étude de modélisation de l'érosion en distinguant plusieurs hypothèses de calcul comme la modélisation par continent, par bassin fluvial, etc... Le modèle obtenu à partir des bassins fluviaux est celui qui nous intéresse du fait que notre étude concerne l'un des plus grands bassins fluviaux du continent africain.

Le modèle d'érosion globale obtenu par régression multiple fait intervenir comme variables la pente moyenne du bassin, l'indice de dureté de la roche, l'intensité annuelle de précipitation, l'intensité annuelle du drainage et l'indice de protection des sols:

$\text{Log } Er = -72.3 \cdot 10^{-3} + 1.028 \text{Log } Pt + 0.0365 \text{Iit} + 0.6932 \text{Log } P + 0.0016 D - 0.7516 \text{Ips}$

avec:

Pt: pente moyenne en %

Iit: indice de dureté des roches qui varie de 1 à 40 (tab11)

P: pluviosité en mm

D: drainage en mm

Ips: indice de protection des sols par la végétation qui varie de 0 à 6 (tab10)

Comme dans le modèle de JANSEN et PAINTER (1974), le modèle général d'érosion globale proposé par PROBST (1990) montre que l'érosion augmente avec la pente, l'indice de dureté de la roche, la pluviosité et le drainage. Inversement, elle diminue avec l'indice de protection des sols. La superficie du bassin n'intervient pas dans l'équation de ce modèle.

Les tableaux 10 et 11 montrent successivement une comparaison des indices de végétation et de lithologie utilisés par JANSEN et PAINTER (1974) d'une part, et PROBST(1990) d'autre part, dans leurs modélisation de l'érosion à l'échelle globale.

Tab10 : Indices de végétation proposés par JANSEN et PAINTER (1974) et puis PROBST (1990)

Type de végétation	JANSEN et PAINTER (1974)	PROBST (1990)
déserts et sols nus	1	0
cultures	-	1
toundras	-	2
steppes	2	3
savanes	-	4
prairies	3	5
forêts	4	6

Tab11 : Indices de lithologie proposés par JANSEN et PAINTER (1974) et puis PROBST (1990)

Type de roche	JANSEN et PAINTER (1974)	PROBST (1990)
roches métamorphiques et plutoniques	3	1
roches volcaniques	-	2
roches sédimentaires consolidées	5	4
roches en zones plissées et faillées	-	10
roches sédimentaires non consolidées	6	32
alluvions récentes	6	40

Dans les deux cas, l'indice de végétation représente un indice de protection du sol et l'indice de lithologie est un indice inverse à la dureté de la roche. Ainsi, ces deux indices ont une signification opposée: l'augmentation de l'indice de végétation traduit une augmentation du frein à l'érosion alors que c'est la diminution de l'indice de lithologie qui traduit le frein à l'érosion.

IV-CONCLUSION

Dans ce premier chapitre, nous avons montré d'une part la diversité des facteurs qui interagissent entre eux pour générer le processus complexe de l'érosion et d'autre part, donner un aperçu de quelques modèles d'érosion obtenus à partir d'une approche globale.

Cette approche globale, obtenue à partir de régressions multiples effectuées sur un ensemble de variables explicatives choisies, a pour objectif de permettre une visualisation régionale de l'intensité de l'érosion. Elle diffère d'une approche déterministe qui serait basée sur la détermination des variables qui contrôlent la fonction de production et la fonction de transfert entre deux pixels voisins.

Ici notre but n'est pas de comprendre les mécanismes qui conduisent à l'érosion de tel ou tel paysage mais de saisir comment à l'échelle globale on peut expliquer à partir de variables simples et faciles d'accès les intensités d'érosion observées sur le terrain.

Cette recherche bibliographique a montré que les variables explicatives de l'érosion à l'échelle globale sont avant tout: le drainage, la pluviométrie, la végétation, la pédologie, la lithologie et la morphologie. Ce sont ces variables que nous chercherons à déterminer par la suite et le modèle d'érosion globale sera recherché par régression multiple.

CHAPITRE 11

L'IMPORTANCE DES FEUX DE BROUSSE EN AFRIQUE CENTRALE

I- INTRODUCTION

Les feux, qu'ils soient d'origine humaine ou naturelle, modifient d'une façon permanente l'écosystème. Ils sont en partie responsable de l'activité gazeuse et de la radioactivité atmosphériques. Les feux anthropiques contribuent d'une manière importante dans la quantité globale de biomasse brûlée. En effet, elle dépend essentiellement de l'activité humaine et du nombre de population présente dans la zone considérée.

Les feux modifient l'écosystème en provoquant des pertes dans l'atmosphère au cours de la combustion de la végétation, en apportant au sol des cendres riches en éléments minéralisés, en chauffant le sol et en modifiant ainsi indirectement son activité biologique. Lors des grands incendies, la température peut s'élever jusqu'à 150°C à 5 cm du sol, ce qui bien sûr peut être très néfaste pour les micro-organismes existants (MOULA et al., 1995).

II-DISTRIBUTION DES BIOMASSES BRULEES

II-1 IMPORTANCE DES BIOMASSES BRULEES PAR CONTINENT

La distribution des biomasses brûlées est basée sur une séparation en plusieurs domaines suivant le type de végétation, l'équation suivante décrivant la quantité des biomasses brûlées chaque année (CACHIER, 1992):

$$M = A * B * \alpha * \beta$$

avec :

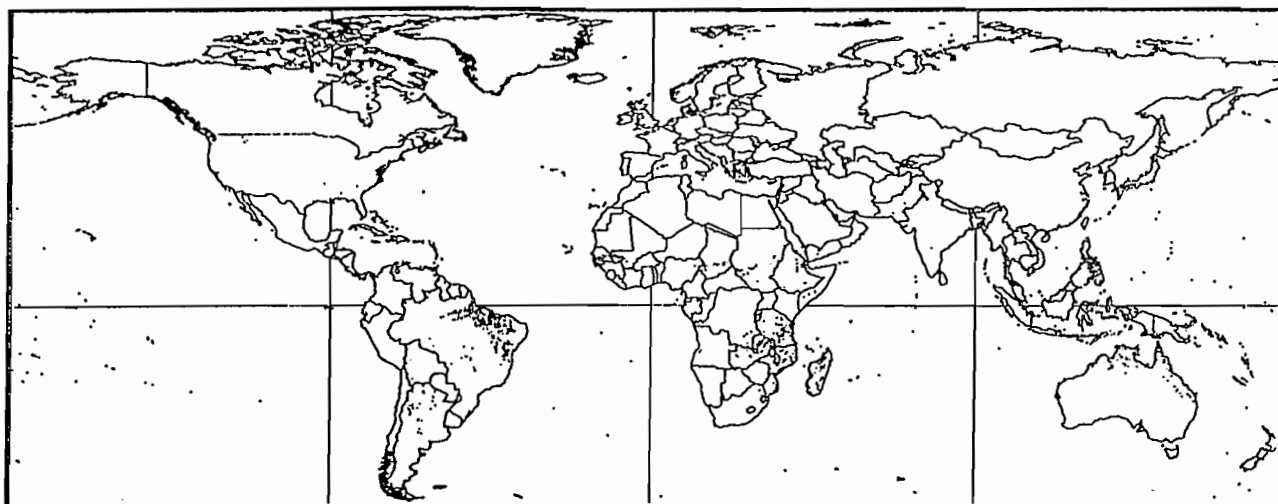
A: la superficie

B: la densité des biomasses

α : la fraction des biomasses existantes

β : l'efficacité des feux

Chaque année l'estimation globale de biomasses brûlées est de 8700 10¹² g chaque année, dont plus de 40% en savane (tab12). Il est important de signaler que 80% de la biomasse totale brûlée est localisée dans les zones intertropicales et 70% de cette biomasse est brûlée en Afrique tropicale (CACHIER, 1992; DWYER et MALINGREAU, 1995), (fig2).



October 1992 - 14 day composite



December 1992 - 14 day composite



January 1993 - 7 day composite

Cell Size : 0.25°

Fig 2: Répartition des feux sur l'ensemble des continents
(d'après DWYER et MALINGREAU, 1995)

Tab 12 : Estimation de la biomasse brûlée pour chaque écosystème (d'après CACHIER, 1992)

	superficie en 10 ⁶ km ²	fraction brûlée par an	biomasse totale kg/m ²	α en %	β en %
forêt tropicale	15	0.6	39	81	30-40
savane humide	9	60	0.9	71	83
forêt tempéré	12	0.4	35	73	20
sol cultivé	14	50	1	70	30

α : fraction des biomasses existantes; β : efficacité des feux

II-2 REPARTITION DES FEUX EN AFRIQUE

En Afrique, que ce soit dans les zones tropicales où subtropicales, l'activité du feu est liée à la saison et aux pratiques culturelles. Elle dépend aussi du type et du mode de répartition du couvert végétal et des conditions météorologiques (EHRlich et al., 1995).

Une étude de l'UNESCO (1983) a découpé l'Afrique centrale en quatre zones suivant les types de végétation (fig3). Ces zones sont:

- a: zone sahélienne constituée de savane aride,
- b: zone soudanienne constituée de savane sèche,
- c: zone guinéo-congolaise / soudanienne constituée de savane humide,
- d: zone guinéo-congolaise constituée de forêt équatoriale.

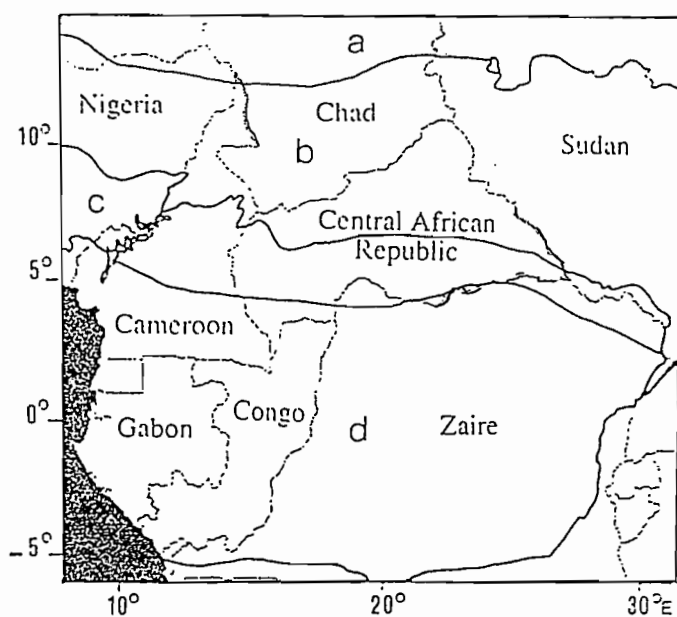


Fig3: Carte de répartition des zones de végétation en Afrique Centrale définies par l'UNESCO (1983).

Sur une saison sèche, l'activité des feux est généralement toujours supérieure en zone guinéo-congolaise/soudanienne (c) puis en zone soudanienne (b) et pratiquement inexistante en zone guinéo-congolaise (d) (tab13) (KOFFI et al., 1995).

Cette répartition spatiale est confirmée sur l'ensemble de l'année (fig4) (KOFFI et GREGOIRE; COOKE et al., 1996).

Tab 13: Répartition en % de l'activité saisonnière du feu sur une période sèche en fonction des zones végétatives (d'après KOFFI et al., 1995)

saison sèche	b (1700850 km ²)	c (627425 km ²)	d (2255600 km ²)
1984-1985	1.9	2.95	0.12
1985-1986	7.65	14.66	0.49
1986-1987	5.08	11.09	0.35
1987-1988	2.06	1.79	0.09

L'activité des feux est enregistrée surtout pendant les mois de novembre, décembre, janvier et février, qui correspond à la période la plus sèche de l'année. On remarque que la variation inter-annuelle de l'activité des feux est très importante dans la zone guinéo-congolaise/soudanienne (c), tandis qu'elle est moins marquée sur la zone soudanienne (b). Outre la relation existant entre le feu et le type de végétation, des études montrent une relation entre le feu et les zones pluviométriques. Ainsi, par exemple, l'activité est faible dans les zones arides (cas du Tchad), et elle est plus importante dans les zones humides (cas de la Centrafrique) (KOFFI et al., 1995).

L'activité du feu est variable aussi d'un mois à l'autre comme d'une saison à l'autre. Le tableau 14 montre cette variabilité saisonnière du feu dans les trois zones végétatives a, b, et c par le nombre de pixels brûlés sur chaque zone.

Tab 14 : Répartition du nombre de pixels brûlés sur chaque zone végétative (d'après KOFFI et al., 1995)

	Soudanienne	guinéo-congolaise/soudanienne	guinéo-congolaise
novembre 1984	8		
décembre 1984	16	16	
janvier 1985	4	4	
février 1985	1.6	12.8	1.6
novembre 1985	12		
décembre 1985	12	12	
janvier 1986	11.4	7.6	
février 1986	8.8	1.1	1.1
novembre 1986	8		
décembre 1986	7.5	7.5	
janvier 1987	16	16	
février 1987		8.8	2.2
novembre 1987	12		
décembre 1987	8	8	
janvier 1988	4.8	7.2	
février 1988		4.8	7.2

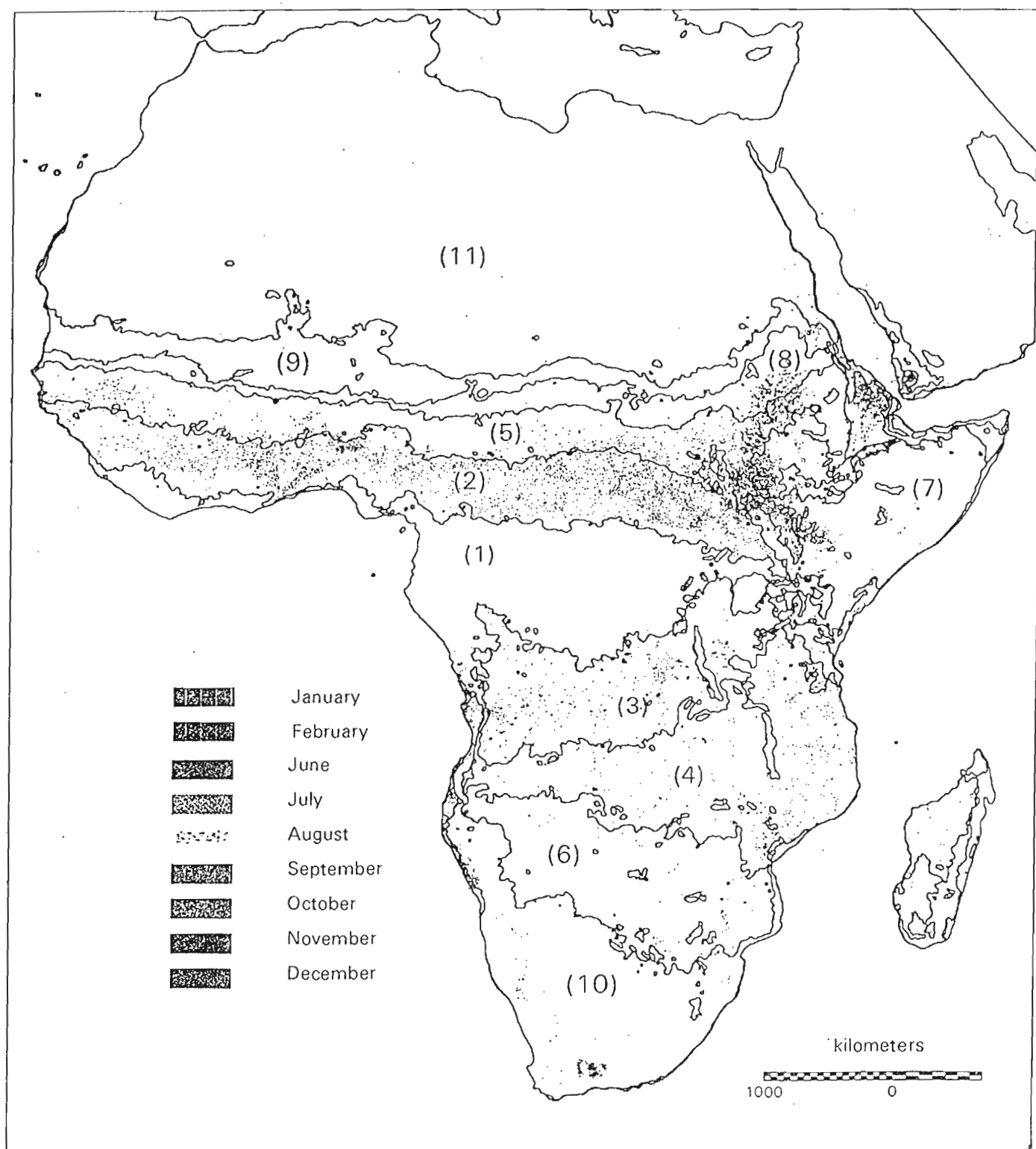


Fig 4: Distribution annuelle des feux sur le continent africain
(d'après KOFFI et GREGOIRE, 1995)

Figure 4: Distribution of fire pixels on continental Africa from November 1985 to October 1986, as derived from NOAA-AVHRR-GAC data (sub-sampling of the original data reduces the number of pixels by a factor 4) within classes of seasonal behaviour corresponding to the dominant vegetation type (Janodet, 1995): (1) dense forest, (2) guinean savannahs, (3) humid miombo, (4) dry miombo, (5) sudanian savannahs, (6) southern Africa shrub savannahs, (7) somalian shrubby thickets, (8) sudano-sahelian savannahs, (9) northern Africa semi-deserts, (10) southern Africa semi-deserts and deserts, (11) Sahara desert.

III-L'IMPACT DU FEU SUR LA QUALITE DE L'ATMOSPHERE

Le feu provoque des effets néfastes sur l'environnement. Ainsi, il est à l'origine d'une augmentation de l'acidité des eaux de pluie, comme par exemple en Côte d'Ivoire et au Congo (LEFEIVRE, 1993) ou en République Centrafricaine (SIGHA et ORANGE, 1996). Le pH de la pluie est alors régulièrement inférieur à 5, pouvant même atteindre des valeurs de 4. Cette acidité est due à une importante concentration d'acide sulfurique et d'acide nitrique dans l'atmosphère et dont l'origine est liée à la combustion de la biomasse par le feu (tab15).

Tab 15 : Comparaison entre la masse totale de quelques éléments chimiques dans l'atmosphère et la partie produite par la biomasse brûlée

	total en 10^{12} g/an	biomasses brûlées	
		10^{12} g/an	%
CO ₂	8700	3700	42
CO	1100	350	32
CH ₄	500	38	8
NO ₃	40	9	22
NH ₃	44	5	12
O ₃	3500	580	38
H ₂	75	19	25

IV- L'IMPACT DU FEU SUR L'EROSION

La végétation protège le sol contre l'érosion. En effet, la végétation amortit le choc des gouttes de pluie en les interceptant par le feuillage. Avec la destruction du couvert végétal par le feu, le processus d'érosion mécanique manifeste une efficacité beaucoup plus grande. Par ailleurs, après le feu, le sol est couvert de cendre et de charbon de bois; et la partie superficielle du sol a perdu sa cohésion. L'assemblage de tous ces processus induit le transport d'une quantité plus importante de matières dès la tombée des premières pluies.

On peut donc penser que juste après le feu le phénomène d'érosion doit être plus important ou du moins plus efficace. TRABAUD (1995) signale que des études faites en Espagne ont montré que l'érosion est très importante pendant les 2 à 3 premières années après le passage d'un feu mais qu'une fois la végétation revenue, l'érosion retrouve son intensité normale.

CHAPITRE 111

PRESENTATION DU BASSIN DE L'OUBANGUI

I- SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

Situé au coeur du continent africain, le bassin versant de l'Oubangui couvre une superficie totale de 643900 km². Notre zone d'étude est limitée au bassin des cours supérieur et moyen de l'Oubangui, ce qui correspond à une superficie de 553900 km² (MALIBANGAR et al., 1993). L'exutoire de ce bassin moyen de l'Oubangui correspond à la ville de Mongoumba située quelques kilomètres après la confluence Oubangui-Lobaye. Il s'étend des latitudes 00°30'S à 09°16'N et des longitudes 15°35'E à 30°57'E. Il est délimité par le Tchad au Nord, le Cameroun à l'Ouest, le Congo et le Zaïre au Sud et le Soudan à l'Est (fig5).

Son relief est une vaste pénéplaine modelée par les phénomènes d'érosion météoriques qui se sont succédés au cours des temps phanérozoïques. Les hauts reliefs qui dépassent rarement 1100 m, ne représentent que 5% de la superficie du bassin, les plateaux qui s'étagent de 500 à 900 m d'altitude constituent 70% de la superficie, et la plaine Oubanguienne forme les 25% de la superficie restante.

Les sols sont des sols ferrallitiques plus au moins indurés. Le couvert végétal est dense, le bassin est presque entièrement couvert par la savane arbustive ou arborée, l'extrémité nord du bassin est en bordure de la zone soudano-sahélienne, domaine de la steppe. La forêt humide semi-decidue n'occupe plus que les parties méridionales.

L'Oubangui est l'un des principaux affluents de l'hémisphère Nord du fleuve Congo. Son débit moyen interannuel est de 4300 m³/s à Bangui (CALLEDE et al., 1992; ORANGE et al., 1996), situé quelques 200 km avant Mongoumba et 600 km à l'amont de la confluence avec le Congo.

II- LA MORPHOLOGIE DU BASSIN

Les grands traits morphologiques du bassin moyen de l'Oubangui, limité à l'exutoire de Mongoumba, se répartissent en quatre domaines (fig6):

- les hauts reliefs d'altitude supérieure à 900 m, qui représentent 5% de la superficie du bassin moyen de l'Oubangui;
- les plateaux de grès, d'altitude comprise entre 500 et 900 m, représentent 12% du bassin;
- les plateaux de la surface centrafricaine, d'altitude comprise entre 500 et 700 m, qui forme 58% du bassin;
- la plaine de l'Oubangui allant de 300 à 500 m d'altitude, qui représente 25% du bassin.

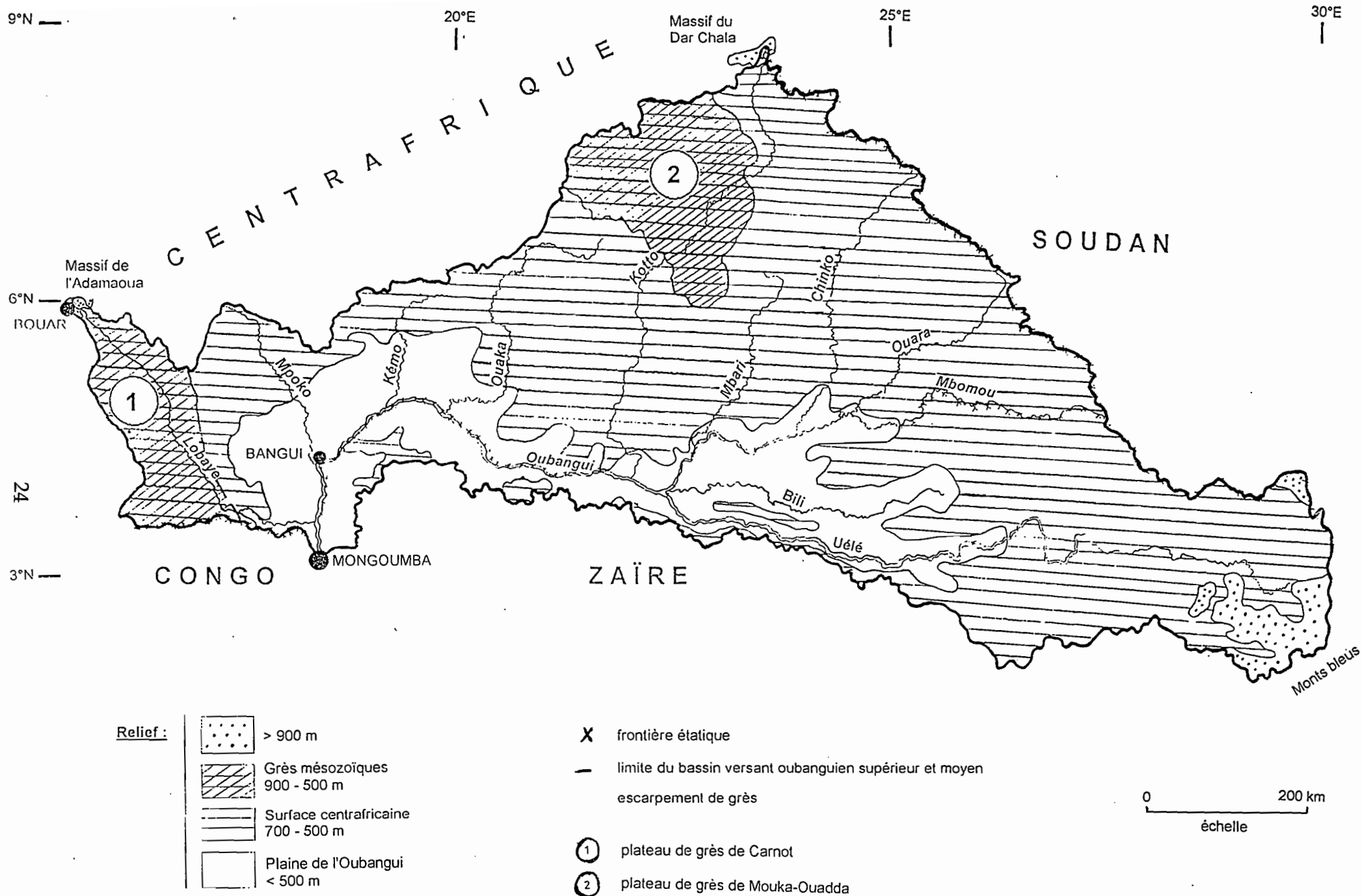


Fig6: Esquisse morphologique du bassin de l'Oubangui

III-LA VEGETATION DU BASSIN DE L'OUBANGUI

La végétation constitue avec le relief l'élément le plus déterminant des paysages, c'est également un des facteurs les plus importants du régime des cours d'eau.

D'après les nombreux travaux de BOULVERT (1986, 1992), on note que l'influence de l'homme sur la végétation se fait surtout sentir dans le secteur périforestier englobant la grande forêt, tout particulièrement dans les secteurs relativement peuplés, correspondant aux grandes vallées: Oubangui, Uélé, Mbomou. Par ailleurs, la grande région des savanes est chaque saison sèche, traversée par des feux courants (KOFFI et al., 1995). Enfin, les hauts bassins de la Kotto, du Mbomou peu peuplés sont en voie de dépeuplement depuis au moins un siècle et demi. Cette diminution de la pression anthropique permet à la végétation forestière de se reconstituer (BOULVERT, 1992).

III-1 FORETS INONDABLES ET MARECAGEUSES

La forêt guinéo-congolaise et la forêt marécageuse s'étendent largement de part et d'autre du confluent Oubangui-Zaïre. Elles sont restées pratiquement vierges en raison de leurs difficultés d'accès. En première approximation, la forêt dense guinéo-congolaise, ou forêt dense humide, couvre dans le bassin oubanguien 161000 km² dont 133000 km² pour la forêt de terre ferme et 28300 km² pour la forêt marécageuse (CALLEDE et al., 1992).

III-2 SAVANES

On distingue 3 types de savanes arbustives périforestières ou arborées soudano-guinéennes ou médio-soudaniennes. Elle couvrent 460000 km², soit 70% de la superficie du bassin oubanguien (CALLEDE et al., 1992):

IV-LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE (d'après MALIBANGAR et al., 1993)

On distingue le long du cours de l'Oubangui trois grandes parties: l'Oubangui supérieur, moyen et inférieur. L'Oubangui supérieur est représenté par le Mbomou, l'Uélé et leurs affluents. Le cours moyen commence au confluent Mbomou-Uélé et se termine au confluent Oubangui-Lobaye. Il reçoit presque uniquement que des affluents de rive droite dont les principaux sont la Kotto, la Ouaka, la Mpoko et la Lobaye. En aval de cette confluence, l'Oubangui rejoint le fleuve Congo à travers une forêt marécageuse et un dédale d'îles: c'est l'Oubangui inférieur (fig7).

IV-1 L'OUBANGUI SUPERIEUR

IV-1-1 Le Mbomou et ses affluents

Le Mbomou avec ses multiples méandres atteint une longueur de 966 km. Il matérialise la frontière d'état entre la République Centrafricaine et le Zaïre.

Le Mbomou prend sa source vers 720 m d'altitude à la limite du Soudan, du Zaïre et du Centrafrique. Il est orienté Est-Ouest sur tout son parcours. A Kadjéma, il reçoit en rive droite le Mbokou; à Dembia, il reçoit la Ouara. En aval de Dembia, le Mbomou traverse quelques seuils rocheux avant d'être rejoint par le Chinko. Le Mbomou franchit ensuite quelques rapides puis entre dans le domaine de la forêt dense dite du Mbomou et atteint la ville de Bangassou.

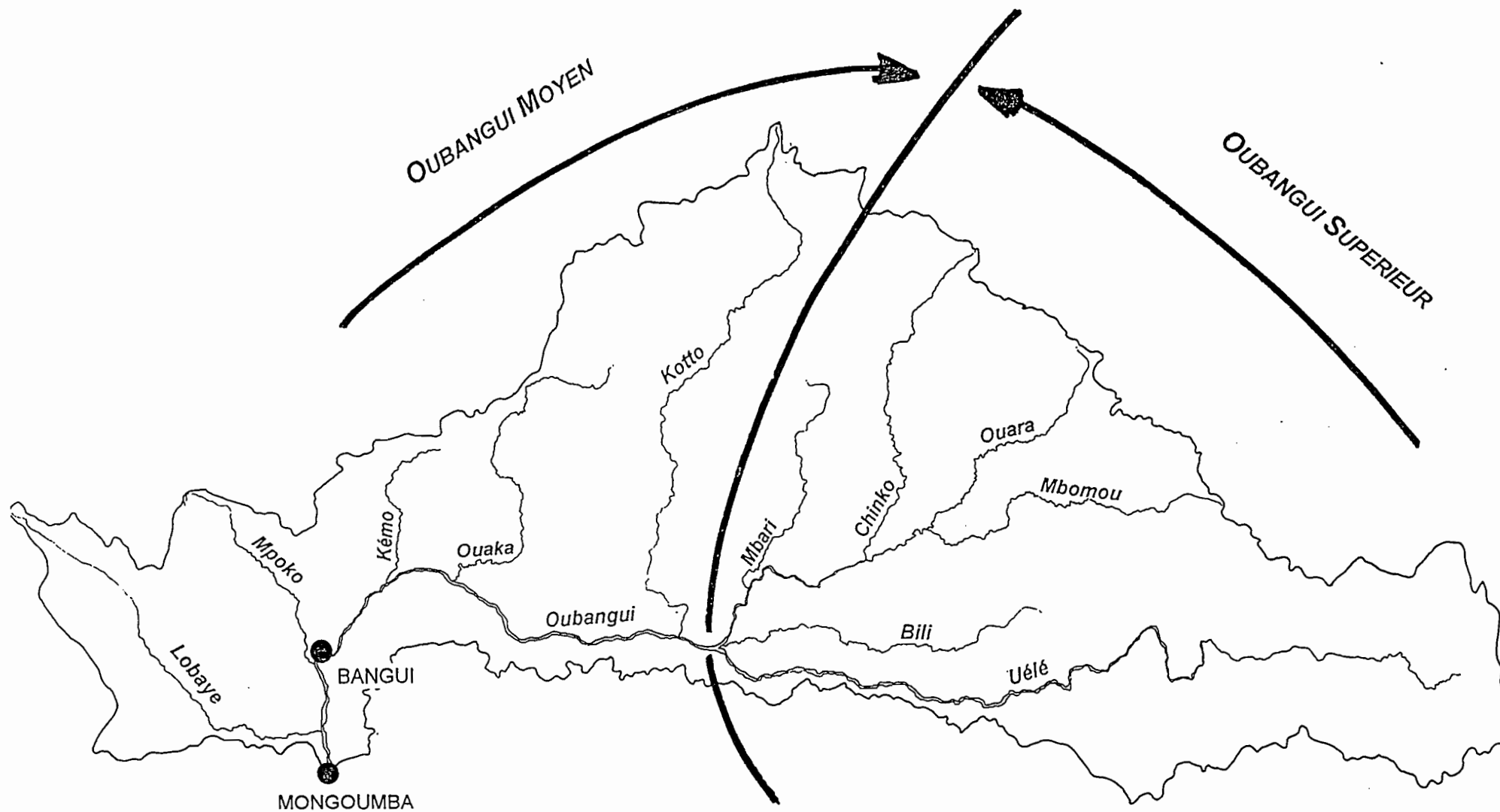


Fig. 7 : Le réseau hydrographique des principaux affluents de l'Oubangui à l'exutoire de Mongoumba

Après quelques kilomètres, il reçoit le Mbari en rive droite. Un peu plus loin, la Bili rejoint le Mbomou en rive gauche juste avant la confluence avec l'Uélé. La Bili est entièrement en territoire zaïrois, elle coule d'Est en Ouest.

IV-1-2 L'Uélé

Tout comme la Bili, l'Uélé est entièrement située en territoire zaïrois. Il prend sa source vers 1700 m d'altitude et a une longueur de 1170 km. Ce fleuve d'importance hydrologique sensiblement équivalente à celle du Mbomou est très mal connu (ORANGE, 1996). Son bassin amont draine le point culminant (1796 m aux Monts Nimba) du bassin de l'Oubangui, à l'extrême Est sur les contreforts Nord-Ouest des hauts plateaux Est africains.

IV-2 LE MOYEN OUBANGUI

IV-2-1 L'Oubangui

Avant de bifurquer vers le Sud à Bangui, l'Oubangui suit une direction grossièrement Est-Ouest. Ses affluents majeurs sont en rive droite, on trouve la Bangui-Kete, la Ouaka et la Kémo.

A la sortie de Bangui, l'Oubangui reçoit la Mpoko. Obliquant plein Sud, il pénètre dans un appendice de la plaine congolaise, où il reçoit son dernier gros affluent, la Lobaye, avant de s'engager dans sa plaine marécageuse, domaine de l'Oubangui inférieur.

IV-2-2 Les principaux affluents du moyen Oubangui

❶ La Kotto a un cours de 882 km de long. Elle prend sa source à une altitude de 1000 m. Sa pente moyenne est de 0,69 m/km.

❷ La Ouaka a un cours moins long et moins complexe que celui de la Kotto. Elle se jette dans l'Oubangui après un cours de 611 km avec une pente moyenne de 0,47 m/km, qui décroît régulièrement de l'amont vers l'aval.

❸ La Kémo est formée de la réunion de la Kouma et de la Tomi. Sa source est à environ 600 m d'altitude et sa pente moyenne est de 1 m/km. Le cours proprement dit de la Kémo n'est que d'une dizaine de kilomètres. La Kouma est long de 258 km avec une pente moyenne de 1 m/km. La Tomi est longue de 198 km avec une pente moyenne de 1,1 m/km.

❹ La Mpoko prend sa source vers 690 m d'altitude, elle parcourt 350 km avant de rejoindre l'Oubangui, elle admet une pente moyenne de 1 m/km.

❺ La Lobaye est orientée Nord-Ouest/Sud-Est, elle prend sa source à 1040 m d'altitude, elle admet un cours de 538 km d'une pente moyenne de 1,25 m/km.

IV-3 LES ENTITES HYDROLOGIQUES DE L'OUBANGUI

Pour la modélisation de l'érosion sur le bassin de l'Oubangui il a été choisi de travailler par sous bassin versant. Nous avons repris le découpage proposé par MALIBANGAR et al., (1993). Le bassin versant de l'Oubangui supérieur et moyen est découpé en 12 entités hydrologiques (fig8). Ce découpage a été fait en fonction des limites des principaux sous bassin versant en leur associant, si nécessaire, les petits tributaires de l'Oubangui. Ainsi, par exemple, l'entité de la Ouaka (n° 8) est composée du bassin versant de la Ouaka auquel sont associés les bassins versants de la Bangui-Kété à l'Est et de la Bamba à l'Ouest.

Ainsi, l'Oubangui supérieur correspond à l'Uélé, la Bili, le Haut-Mbomou, la Ouara, le Chinko, et la Mbari (entités 1, 2, 3, 4, 5, 6). L'Oubangui moyen est formé de la Kotto, la Ouaka, la Kémo, la Mpoko, la Lobaye et le Moyen Oubangui Zaïre (entités 7, 8, 9, 10, 11, 12).

V-LE CLIMAT DU BASSIN DE L'OUBANGUI:

Le climat du bassin de l'Oubangui varie depuis le tropical sec (au Nord) jusqu'à l'équatorial (au Sud):

- ① une saison sèche qui commence en octobre au Nord-Est et qui se généralise à l'ensemble du pays dès janvier;
- ② une intersaison avant la saison des pluies qui débute dans le Sud du pays en mars pour atteindre le Nord en avril-mai,
- ③ enfin, une saison pluvieuse qui affecte l'ensemble du bassin de juin à septembre et qui dure du Sud au Nord de 9 à 4 mois.

VI-LA PEDOLOGIE

Les sols ferrallitiques couvrent les 3/4 de la surface du bassin versant. Ils peuvent être subdivisés en quatre grandes unités distinctes suivant leur degré d'induration (fig9):

- les sols ferrallitiques très indurés,
- les sols ferrallitiques moyennement indurés,
- les sols ferrallitiques peu indurés,
- les sols ferrallitiques non indurés.

Ces types de sols sont formés suite à un long processus d'hydrolyse qui provoque l'accumulation des produits alumineux et ferrugineux peu solubles dans l'eau. La présence de fer et d'aluminium conduit à un processus d'induration du sol dont le terme ultime est la cuirasse latéritique. La sensibilité à l'érosion de ces sols est fonction du degré d'induration. Les sols non indurés sont très sensibles alors que les sols très indurés (carapaces) sont totalement insensibles à l'érosion (MAIGNIEN, 1958)

Quelques sols jeunes d'érosion sont situés sur les reliefs rocheux et sur les escarpements séparant les surfaces d'aplanissement.

Figure 8: Les entités hydrologiques constitutives du bassin versant supérieur et moyen de l'Oubangui

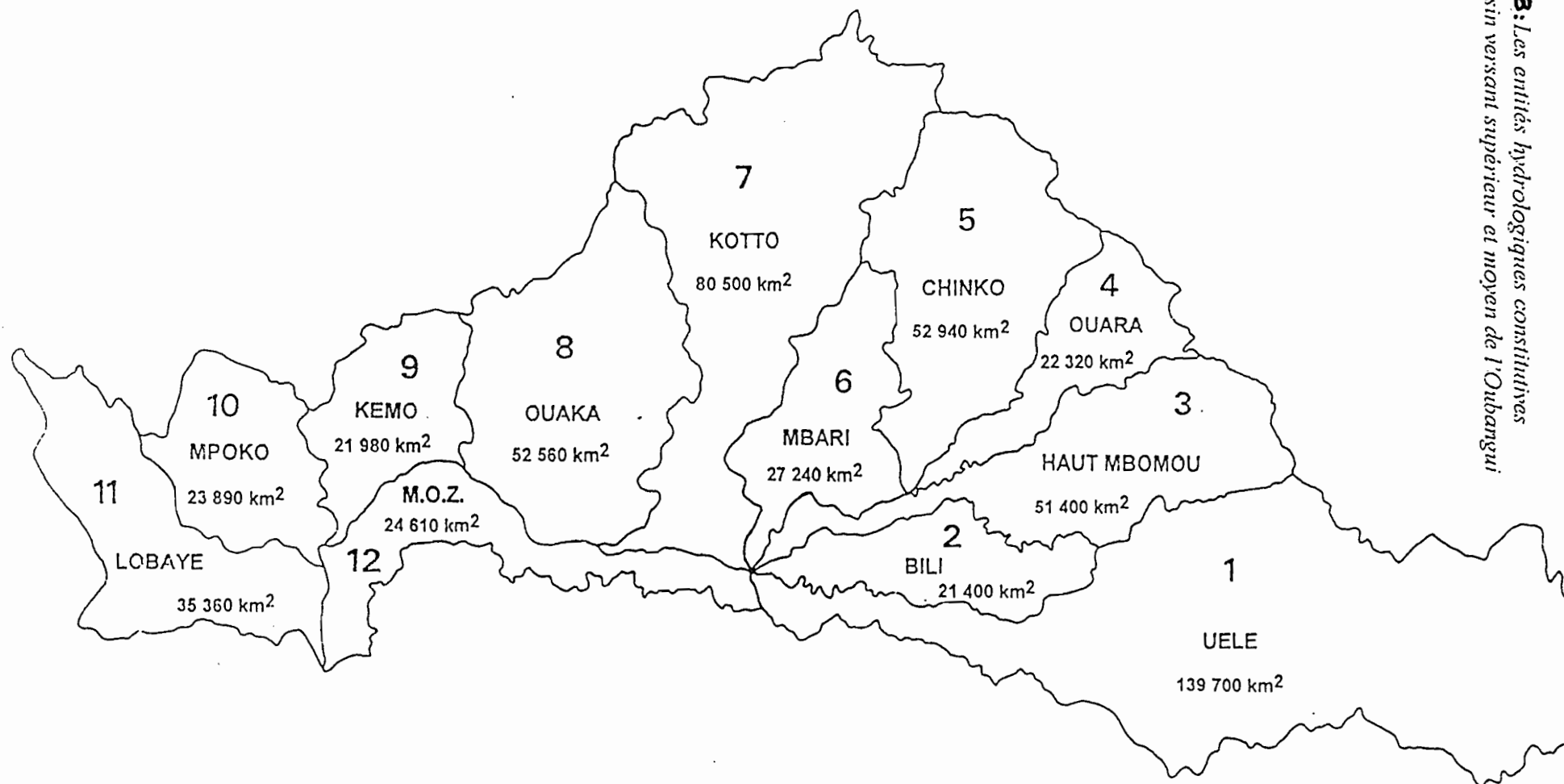


Fig 8: Les entités hydrologiques constitutives du bassin versant de l'Oubangui supérieur et moyen

Fig 9 : Pédologie du bassin de l'Oubangui



VII-LA GEOLOGIE

Le bassin versant centrafricain de l'Oubangui est essentiellement constitué par le socle précambrien à l'exception de deux formations gréseuses mésozoïques situées au Nord et à l'Est du bassin (MESTRAUD, 1982; POIDEVIN, 1985; CENSIER, 1991). Ces formations gréseuses couvrent 10% de la superficie du bassin. Les roches plutoniques et métamorphiques acides (de type granite, gneiss, micaschiste et schiste) représentent 60% de la superficie du bassin. Ensuite, par ordre d'importance, de surface, on trouve en portions sensiblement égales des roches volcaniques, des roches détritiques argileuses et des roches carbonatées (fig10).

VIII-ETUDE DES FLUX DE MATIERES SUR LE BASSIN DE L'OUBANGUI

VIII-1 PROTOCOLES DE MESURES DES FLUX DE MATIERES PARTICULAIRES

Sur le bassin de l'Oubangui, les flux de matières particulières ont été mesurés de façon intensive à Bangui de 1987 à 1994 et avec un protocole plus léger de 1992 à 1994 sur une quinzaine d'autres stations réparties sur l'ensemble du bassin versant (fig 11).

Trois types de prélèvements étaient effectués à Bangui: un échantillonnage journalier de un litre par deux mètres de fond à l'aide d'un préleveur automatique, un échantillonnage hebdomadaire de 10 litre à 2 m de fond et un échantillonnage mensuel de 100 litre sur une verticale choisie représentative de la section du fleuve.

Pour les autres stations, l'échantillonnage consiste en un prélèvement de 1 litre d'eau au milieu de la section du cours d'eau et à 50 cm sous la surface à l'aide d'un flacon en polyéthylène d'un litre à large ouverture. Dans la mesure du possible, la fréquence des prélèvements est mensuelle. A l'exception du prélèvement mensuel de Bangui, la concentration en MES est déterminée par filtration d'un litre, ou 500 ml selon le niveau de turbidité, de l'échantillon et par pesée du filtre séché après filtration à l'étuve.

VIII-2 BILAN DES FLUX DE MATIERES A BANGUI

Les flux des matières particulières et dissoutes exportées par l'Oubangui au bief de Bangui sont mesurées depuis 1987 (OLIVRY et BOULEGUE, 1995). Le tonnage annuel moyen de matières exportées, particulières et dissoutes, est de $6,5 \cdot 10^6$ t/an, ce qui représente un transport spécifique de $13,3 \text{ t/km}^2/\text{an}$ (ORANGE et al., 1995). Cette quantité est répartie comme suit : 42% de matières particulières et 58% de matières dissoutes. Ces 42% de matières particulières représentent $2,73 \cdot 10^6$ t/an, ce qui donne une concentration moyenne annuelle de 32 mg/l (ou un débit solide de 85 kg/s).

Fig10: Lithologie du bassin de l'Oubangui

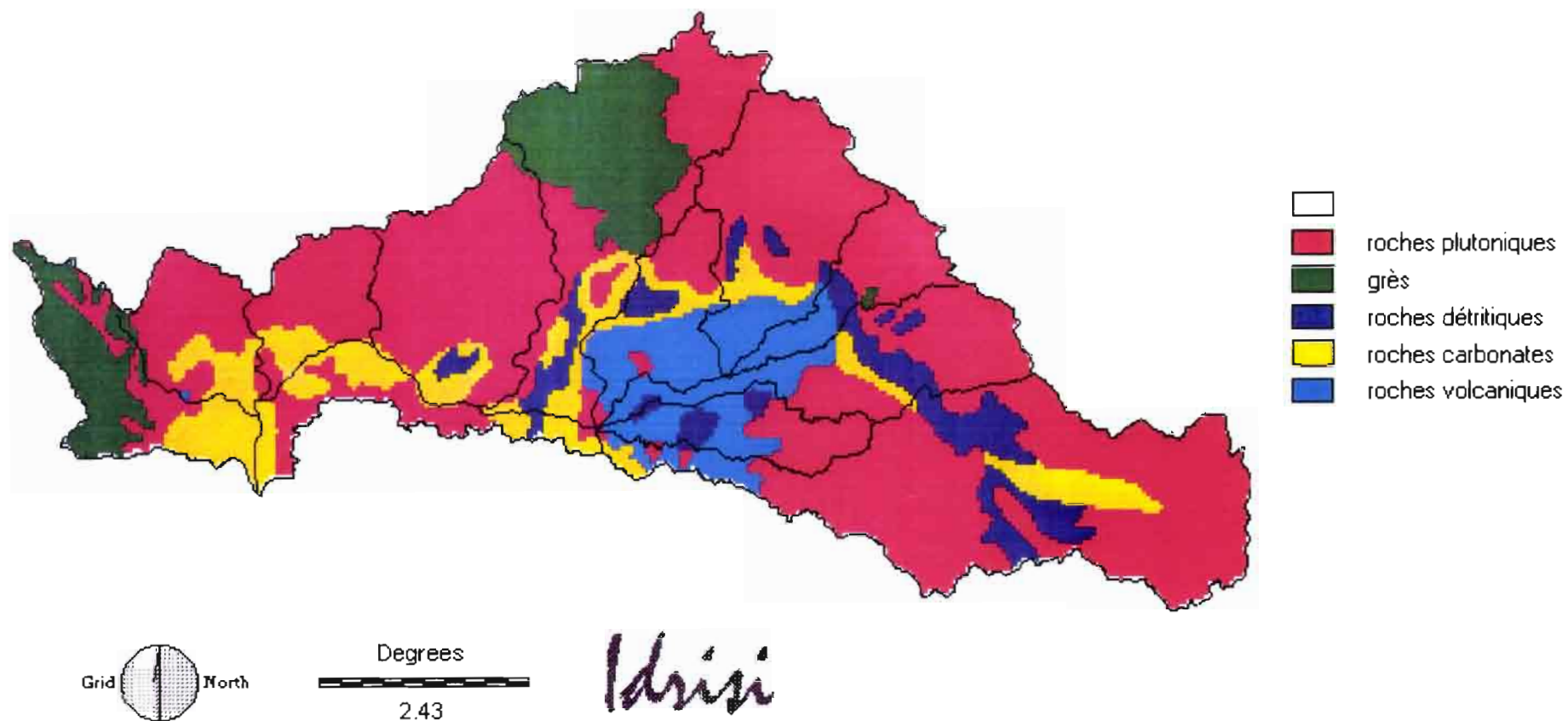
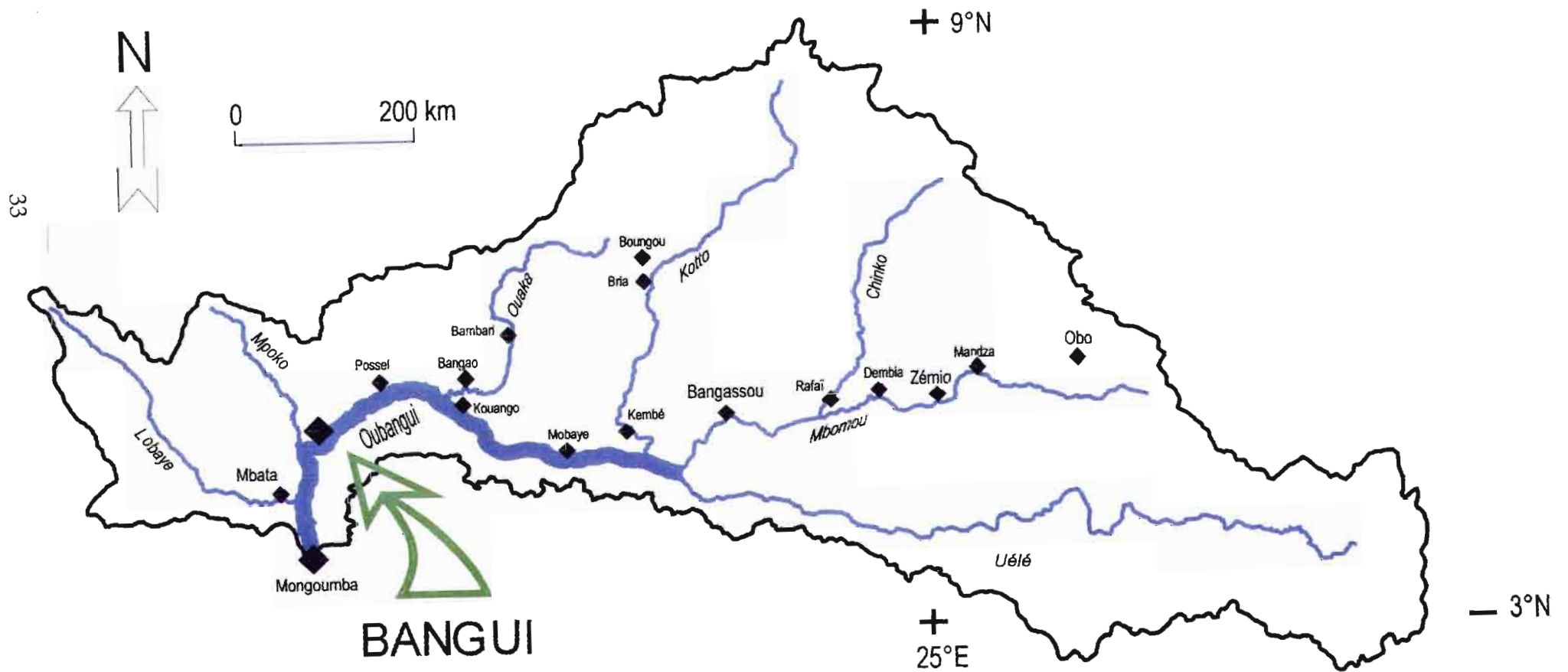


Fig. 11. Carte de localisation des points de prélèvements des matières en suspension sur l'Oubangui moyen



VIII-2-1 Variabilité mensuel des flux de matières particulaires

La variation journalière de la concentration en matières particulaires transportées par l'Oubangui à Bangui durant un cycle hydrologique est relativement faible par rapport à celle enregistrée sur les fleuves des zones tropicales sèches. Cette faible fluctuation journalière des concentrations se traduit par des pics annuels de concentration en matières particulaires peu élevés. Depuis 1987, le maximum journalier enregistré à Bangui n'est que de 55 mg/l.

Bien que sur les six années étudiées, les débits de pointe de crue aient variés de plus de 100% (de 4930 m³/s en 1990 à 10200 m³/s en 1988), la concentration maximale en matières particulaires de chaque cycle n'a varié que de 40% (de 55 mg/l en août 1988 à 39 mg/l en août 1991). Ce pic de concentration est toujours atteint fin août-courant septembre avant la pointe de l'hydrogramme de crue.

Chaque année, la concentration journalière minimale atteinte en fin de saison sèche est de 1 mg/l. Cela signifie un arrêt quasi-total du transport particulaire durant la saison des basses eaux, époque à laquelle la lame d'eau précipitée sur le bassin est quasi-nulle.

VIII-2-3 Variabilité mensuelle des flux de matières dissoutes

La charge totale dissoute des eaux de l'Oubangui à Bangui, qui englobe la matière minérale dissoute et la matière organique dissoute, évolue au cours d'un cycle hydrologique de 35mg/l à 60mg/l. Les fortes valeurs des concentrations dissoutes en hautes eaux sont expliquées par le rinçage à cette époque des solutés organiques très concentrés en zone de forêt inondée (OLIVRY et al., 1988; ORANGE et al., 1995). Les flux dissous sont supérieurs aux flux particuliers. Cette différence est due à l'efficacité du couvert végétal contre l'érosion mécanique et surtout à la présence de la matière organique dissoute provenant des zones humides à fort pourcentage de matières organiques dans les sols et inondées en période de crue.

VIII-2-4 L'érosion mécanique actuelle

En assimilant directement ces flux annuels de matières particulaires aux résultats de l'érosion mécanique sur l'ensemble du bassin versant, l'érosion mécanique spécifique sur le bassin de l'Oubangui est de 5,5 t/km²/an. Cette faible valeur d'érosion mécanique peut être expliquée par la faiblesse des écoulements enregistrés depuis le début des années 1970, avec en complément une couverture végétale encore relativement dense sur l'ensemble d'un bassin versant et un relief ancien fortement pénéplané. Ce chiffre place l'Oubangui parmi les fleuves ayant le plus faible taux d'exportation de matières particulaires (tab4).

CHAPITRE IV

LE SYSTEME D'INFORMATION

GEOGRAPHIQUE IDRISI

I-UTILITE D'UN SIG

Un SIG peut être décrit comme un système d'information qui utilise des données géoréférencées et qui peut être vu comme une suite d'opérations comprenant une collecte de données, l'entrée, le stockage, l'analyse et la visualisation. Ainsi, une des caractéristiques du SIG est sa capacité d'intégrer des informations diverses avec un lien spatial comme dénominateur commun entre les données. Un autre intérêt du SIG est sa capacité à exécuter une gamme d'opérations sur ces données plus largement que ce qui est possible avec des ensembles de données séparés, fragmentaires ou dispersés (SHEPHERD, 1991).

Chaque ensemble de données spatiales (par exemple, l'occupation des sols, la pédologie) constitue une variable explicative ou expliquée du modèle et peut être considéré comme une représentation de couches distinctes dans la base de données. Des attributs seront associés à chacun des comportements de la variable considérée vis à vis du modèle d'érosion recherchée. Cette opération s'effectue à l'intérieur même de la couche, puis pour le calcul du résultat du modèle en procédant par une opération entre les couches. Le SIG peut aider de façon simple et rapide au développement d'hypothèses, à la recherche des facteurs causaux, à la simulation de scénarios différents et à la visualisation des répartitions spatiales des processus.

On distingue deux structures dans le mode de représentation des SIG:

mode objet (structure vecteur): dans une représentation en mode objet, les limites ou les bordures des objets sont décrites comme une séquence de points qui, joints par des lignes, forment la représentation graphique de cet objet. Les points eux-mêmes sont décrits par une paire de coordonnées X,Y dans un système de référence tel que, par exemple, latitude/longitude.

mode image (structure raster): la seconde forme majeure de représentation numérique de l'information spatiale est le mode image. Dans un système en mode image, la description des objets et celle de leurs caractéristiques thématiques constituent des fichiers à structure unique. En fait, les entités spatiales décrites ne sont pas à proprement parlé des objets spatiaux, mais des unités d'observation qui résultent de la subdivision de la zone d'étude en un maillage de cellules rectangulaires, appelées pixel.

II-PRESENTATION D'IDRISI

IDRISI est un système d'information géographique en mode image, ainsi qu'un système de traitement d'image, développé par le Département de Géographie de l'Université de Clark (EASTMAN, 1995). Il est conçu dans le but de fournir un mode d'accès peu coûteux aux technologies d'analyses géographiques assistées par ordinateur.

C'est un ensemble d'environ 100 fonctions reliées sous une structure commune. Ces fonctions se répartissent en trois grands ensembles:

- 1- le module central qui fournit les utilitaires de base pour l'entrée, le stockage, la gestion, l'affichage et l'analyse d'images raster;
- 2- les modules d'analyse contiennent des outils d'analyse en mode image pour le traitement d'image et l'analyse spatiale;
- 3- le module périphérique qui permet la conversion de données entre IDRISI et d'autres logiciels et mode de stockage de données (COLLET, 1993).

III-CONCLUSION

Nous disposons sous format raster des cartes de végétation, de pédologie, de lithologie, de réseau hydrographique, de limites de bassins versants et un modèle numérique de terrain du bassin moyen de l'Oubangui:

- carte de la végétation (trois classes au format IDRISI);
- carte de pédologie (cinq classes) au format IDRISI
- carte de lithologie (cinq faciès) au format IDRISI;
- carte du réseau hydrographique;
- carte des bassins versants (12 entités hydrologiques) au format IDRISI;
- un MNT (30" d'arc) couvrant l'ensemble du bassin de l'Oubangui au format IDRISI.

IDRISI sera utilisé tout d'abord pour le calcul des différents indices nécessaires à la modélisation de l'érosion. Ces indices sont les indices de végétation, de pédologie, de lithologie et de pente moyenne, ce dernier étant obtenu à partir d'un MNT. Ensuite, IDRISI sera utilisé pour mettre tous ces indices sous forme de cartes afin de pouvoir donner une représentation spatiale mensuelle de l'érosion globale sur le bassin de l'Oubangui en appliquant le modèle choisi sur ces différentes couches d'information que constituent les cartes d'indice.

Cette méthodologie permet de tester rapidement aussi bien différents modèles que différentes couches d'indice.

CHAPITRE V

CHOIX DES VARIABLES DE MODELISATION

I-INTRODUCTION

Après avoir inventorié dans la partie précédente les principales variables contribuant à l'érosion, cette partie sera consacrée d'une part à la reconstitution des données manquantes qui seront nécessaires à la détermination de certaines variables comme la lame d'eau précipitée, et d'autre part à l'estimation des indices tels que, les indices de végétation, de pédologie, de lithologie et de pente moyenne.

II-LA LAME D'EAU PRECIPITEE ANNUELLE

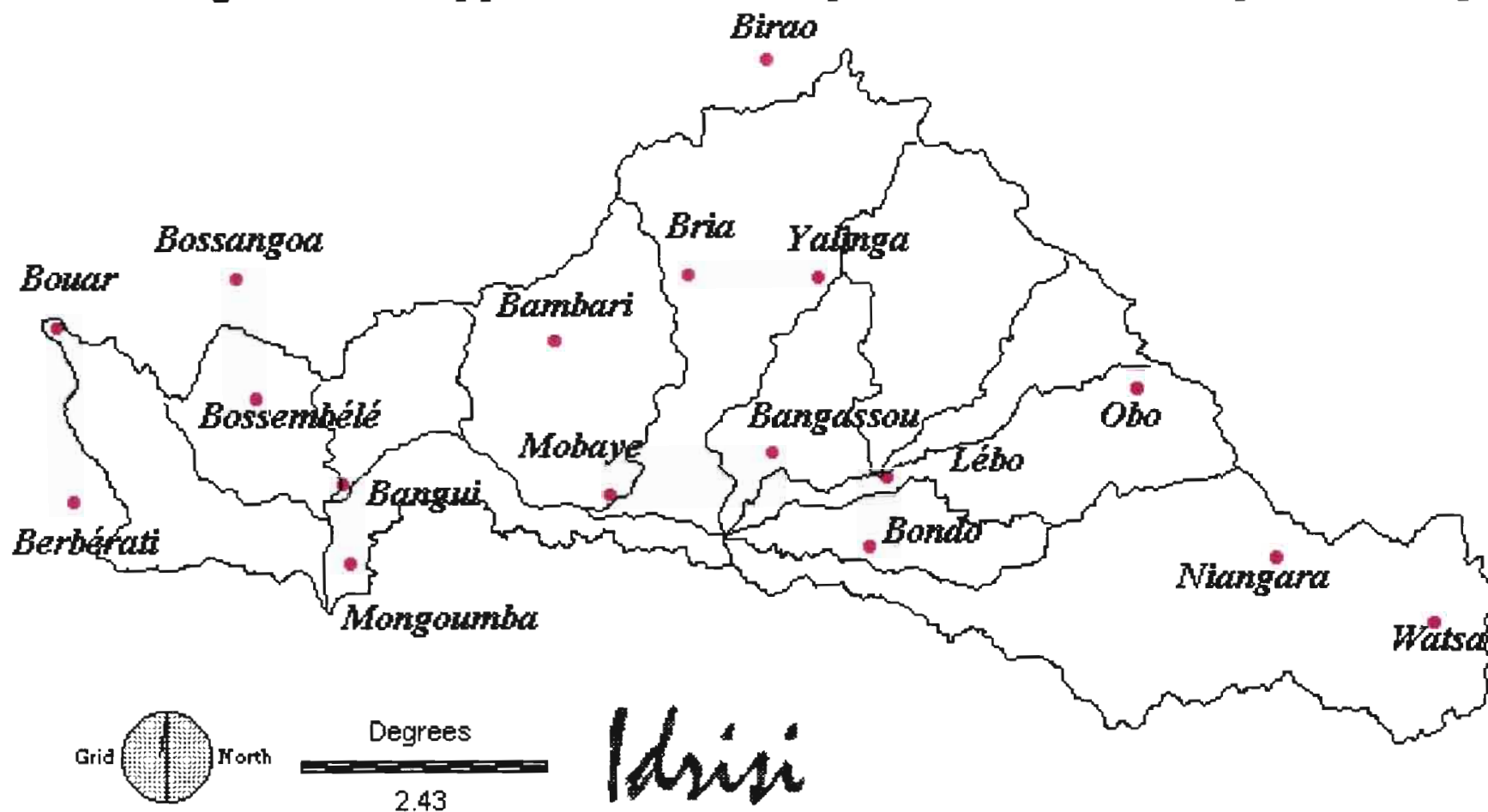
II-1 RECONSTITUTION DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES DE LA ZONE ZAIRE

On dispose de la pluviométrie observée sur 17 stations de 1972 à 1992 (tab16). Ces stations sont mal réparties sur l'ensemble du bassin de l'Oubangui; on remarque notamment un manque important sur la partie Est en zone Zaïre (fig12). De plus, les stations zairoises ont des années d'observations manquantes: la station de Watsa n'a pas d'observation sur la période 1982-1992, de même pour les stations de Niangara, Lebo et Bondo sur la période plus courte 1988-1992.

Tab16: Coordonnées géographiques des stations pluviométriques

station	n° d'ordre	coordonnées	
		latitude	longitude
Bambari	1	5°51 N	20°39 E
Bangassou	2	4°44 N	22°50 E
Bangui-mpoko	3	4°24 N	18°31 E
Berberati	4	4°15 N	15°48 E
Birao	5	10°17 N	22°47 E
Bondo	6	3°48 N	23°49 E
Bossangoa	7	6°29 N	17°26 E
Bossembele	8	5°16 N	17°38 E
Bouar	9	5°58 N	15°38 E
Bria	10	6°32 N	21°59 E
Lebo	11	4°29 N	23°58 E
Mobaye	12	4°19 N	21°11 E
Mongoumba	13	3°38 N	18°36 E
Niangara	14	3°42 N	27°54 E
Obo	15	5°24 N	26°30 E
Watsa	16	3°04 N	29°30 E
Yalinga	17	6°30 N	23°16 E

Fig12 : Carte approximative de répartition des stations pluviométriques



Pour combler ce manque, on a utilisé dans le logiciel SYSTAT la méthode d'analyse en composante principale (ACP) sur la pluviométrie entre 1972-1982 observée sur les 17 stations. En général l'ordre de grandeurs des variables influence les résultats de l'ACP ainsi que leurs répartitions autour de la moyenne. Pour remédier à ces inconvénients, il est recommandé de donner la même importance aux différentes variables en les réduisant, ainsi soit on traite les données centrées à partir de la matrice de variances-covariances, soit sur les données centrées réduites à partir de la matrice de corrélations. Cette dernière méthode est utilisée si les données sont représentées dans des systèmes d'unité différents et/ou si les valeurs sont très dispersées.

Les résultats de l'ACP (annexe 1) sur les données de 1972-1982 montrent que les 5 premiers axes principaux n'expliquent que 82,2% de la variance, dont l'axe n°1 explique 27% et l'axe n°2 18%. Ces chiffres se traduisent par une forte répartition des variables sur l'ensemble des plans formés par ces axes, donc il n'était pas aisé de construire à partir de ces résultats des groupes qui permettent d'expliquer une station par les autres, cela peut être due au faible nombre d'observations.

Dans SYSTAT, il existe une fonction STEPWISE qui permet de trouver une meilleure régression multiple entre une variable et l'ensemble des autres. On commence par faire une régression simple entre la variable Y à expliquer et la variable X_i qui lui est le mieux corrélé; on vérifie que le coefficient de corrélation est significatif. On cherche alors la variable X_j qui se corrèle le mieux avec le résidu de la régression de X_i et Y. On effectue ensuite une régression double, on vérifie les coefficients de corrélation partielle. Si la dernière variable introduite n'est pas significative, on s'arrête; si une des variables précédemment entrées n'est plus significative, on la retire. Dans les cas contraires, on introduit un nouveau X_k qui explique le mieux la variance résiduelle précédente. Le choix des stations explicatives est a priori et dans la mesure du possible basé sur l'appartenance avec la station à expliquer à une même zone climatique.

Pour contrôler la qualité de cette procédure, un coefficient de tolérance est calculé pour chaque variable introduite dans le modèle. Ce coefficient de tolérance est défini de la manière suivante:

$$\text{tolérance de la station } i = 1 - R^2(i)$$

$R^2(i)$ est le coefficient de corrélation qui existe entre la station i et la station à expliquer. Ainsi si la tolérance tend vers 1, la station i est indépendante des autres stations et inversement si la tolérance tend vers 0, les stations sont dépendantes.

Pour la station de Watsa, l'équation de régression multiple obtenue est la suivante:

Watsa=1382+0.628*Berberati+0.018*Mobaye-0.324*Mongoumba-0.041*Bangassou
avec un coefficient de corrélation égal à 0,63 et un nombre d'observation N égal à 11.

Pour déterminer les valeurs manquantes sur la période 1988-1992 des stations Lebo, Bondo et Niangara, on répète la même méthode de calcul en utilisant cette fois les observations sur la période 1972-1988 sans prendre la station de Watsa.

Pour la station de Niangara, l'équation de régression multiple est la suivante:

$$\text{Niangara} = -666 + 0.705 \cdot \text{Bangassou} + 0.259 \cdot \text{Bangui} + 0.316 \cdot \text{Berberati} - 0.304 \cdot \text{Mobaye} + 0.188 \cdot \text{Mongoumba} + 0.470 \cdot \text{Obo}$$
avec $R=0.79$ et $N=17$

Pour la station de Bondo, l'équation de régression multiple est:

$$\text{Bondo} = 572 - 0.112 \cdot \text{Mobaye} + 0.083 \cdot \text{Bangui} + 0.307 \cdot \text{Berberati} + 0.514 \cdot \text{Bangassou}$$
avec $R=0.633$ et $N=17$

Enfin, pour la station de Lebo, l'équation de régression multiple est:

$$\text{Lebo} = -135 - 0.562 \cdot \text{Bambari} + 0.734 \cdot \text{Bangui} + 1.019 \cdot \text{Bouar}$$
avec $R=0.89$ et $N=17$.

A partir de ces 4 équations de régression multiple, on estime la pluviométrie annuelle des observations manquantes des 4 stations zaïroises. Finalement, la banque de données pluviométriques définitive est donnée dans le tableau 17.

Résultat de calcul des différents coefficients de chaque variable pour chaque station

DEP VAR: **WATSA** N:11 MULTIPLE **R: 0.626**

VARIABLE	COEFFICIENT	STD ERROR	STD COEF	TOLERANCE
CONSTANT	1382.084	919.907	0.000	0
BERBERAT	0.628	0.389	0.555	0.856
MOBAYE	0.018	0.492	0.016	0.516
MONGOUMB	-0.324	0.440	-0.286	0.673
BANGASSO	-0.041	0.574	-0.035	0.424

DEP VAR: **NIANGARA** N: 17 MULTIPLE **R: 0.792**

VARIABLE	COEFFICIENT	STD ERROR	STD COEF	TOLERANCE
CONSTANT	-666.079	758.309	0.000	.
BANGASSO	0.705	0.216	0.757	0.694
BANGUI	0.259	0.174	0.314	0.838
BERBERAT	0.316	0.207	0.305	0.927
MOBAYE	-0.304	0.176	-0.389	0.738
MONGOUMB	0.188	0.201	0.196	0.855
OBO	0.470	0.233	0.441	0.777

DEP VAR: **BONDO** N:17 MULTIPLE **R: 0.633**

VARIABLE	COEFFICIENT	STD ERROR	STD COEF	TOLERANCE
CONSTANT	571.955	507.383	0.000	0
MOBAYE	-0.112	0.197	-0.148	0.739
BANGUI	0.083	0.180	0.104	0.987
BERBERAT	0.307	0.227	0.306	0.979
BANGASSO	0.514	0.235	0.569	0.740

DEP VAR: **LEBO** N:17 MULTIPLE **R: 0.886**

VARIABLE	COEFFICIENT	STD ERROR	STD COEF	TOLERANCE
CONSTANT	-135.512	400.182	0.000	0
BAMBARI	-0.562	0.147	-0.526	0.877
BANGUI	0.734	0.147	0.684	0.880
BOUAR	1.019	0.182	0.818	0.778

Tab 17: Pluioimétrie observée ou estimée (en gras) sur le bassin de l'Oubangui

Station	Bambari	Bangassou	Bangui-Mpoko	Berbérati	Birao	Bondo	Bossangoa	Bossemele	Bouar	Bria	Lebo	Mobaye	Mongoumba	Niangara	Obo	Watsa	Yalinga
n°ordre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1972	1334	1533	1416	1246	795	1518	1508	1504	1412	1289	1590	1548	1337	1542	1339	2010	1325
1973	1126	1729	1437	1368	797	1869	1192	1303	1396	1156	1712	1744	1442	1667	1521	1676	1241
1974	1668	1514	1384	1583	771	1896	1516	1449	1608	1539	1526	1613	1239	1588	1326	1966	1475
1975	1742	1586	1695	1626	727	1817	1329	1375	1565	1349	1630	1566	1602	1834	1495	2055	1373
1976	1553	1749	1719	1424	828	1762	1365	1698	1336	1565	1595	1577	1331	1808	1443	1880	1439
1977	1457	1754	1829	1636	521	1886	1217	1527	1297	1633	1801	1611	1529	1903	1014	1784	1448
1978	1429	1386	1577	1364	466	1502	1659	1373	1639	1330	2032	1204	1308	1516	1237	1636	1709
1979	1611	1551	1603	1148	475	1634	1089	1618	1395	1839	1469	1832	1422	1649	1436	1470	1788
1980	1606	1866	1277	1494	500	1895	1290	1714	1432	1465	1484	1694	1645	1912	1231	1655	1545
1981	1693	1366	1526	1566	556	1870	1373	1438	1203	1518	1196	1396	1360	1887	1580	1815	1843
1982	1818	1516	1295	1624	705	1734	1409	1488	1649	1394	1497	1522	1067	1750	1503	1996	1552
1983	1483	1610	1818	1317	683	1828	1451	1761	1385	1479	1802	1352	1506	1844	1397	1680	1429
1984	1447	1334	1384	1316	531	1603	1312	1200	1142	1134	1315	1167	1477	1617	1517	1697	1407
1985	1611	1434	1440	1288	641	1848	1299	1294	1397	1355	1517	1261	1403	1864	1556	1701	1517
1986	1334	1698	1236	1455	744	1809	1201	1141	1570	1029	1485	1229	1371	1825	1460	1805	1483
1987	1294	1726	1675	1290	498	2064	1259	1339	1235	1280	1694	1398	1393	2083	1475	1696	1388
1988	1285	1337	1630	1442	903	1683	1552	1580	1194	1383	1382	1439	1749	1698	1377	1693	1353
1989	1584	1395	1102	1597	986	1723	1135	1525	1454	1380	1270	1322	1300	1509	1190	1931	1354
1990	1204	1760	1478	1563	661	1876	1298	1099	1515	1322	1821	1816	1444	1779	1293	1857	1535
1991	1389	1673	1302	1770	888	1921	1708	1546	1562	1455	1636	1452	1427	1965	1549	1990	1346
1992	1477	1286	1406	1471	665	1651	1401	1338	1261	1619	1356	1338	1614	1623	1397	1755	1414
Moyenne	1483	1562	1487	1456	683	1780	1360	1443	1412	1405	1562	1480	1427	1755	1397	1797	1474
Max	1818	1866	1829	1770	986	2064	1708	1761	1649	1839	2032	1832	1749	2083	1580	2055	1843
Min	1126	1286	1102	1148	466	1502	1089	1099	1142	1029	1196	1167	1067	1509	1014	1470	1241

II-2 CALCUL DE LA LAME D'EAU PRECIPITEE ANNUELLE SUR CHAQUE SOUS BASSIN VERSANT

II-2-1 Méthode de THIESSEN

La méthode de THIESSEN consiste à tracer autour de 2 ou 3 stations pluviométriques voisines un polygone formé par les médiatrices des segments de droites reliant ses stations. Ce travail a été effectué sur le bassin de l'Oubangui par Mettin (1995) (fig13). Nous reprenons ici ses résultats légèrement modifiés par l'introduction dans la base de données pluviométriques les reconstitutions pour les stations de Watsa, Niangara, Bondo et Lébo. Ensuite, on calcule les pourcentages de superficie de chaque entité hydrologique occupée par chaque polygone représentatif de chaque station, ce pourcentage est calculé par la formule suivante:

$$X_{i,j} = \frac{S_{i,j}}{A_j}$$

avec: $X_{i,j}$: le pourcentage de la superficie occupée par le polygone i dans l'entité hydrologique concernée j

$S_{i,j}$: la superficie occupée par le polygone i dans l'entité hydrologique concernée j

A_j : la superficie de l'entité hydrologique concernée j.

Enfin, la lame d'eau précipitée sur l'entité i sera déterminée par la formule ci-dessous et le résultat est présenté dans le tableau 18.

$$Lp_j = \sum_i P_i * X_{i,j}$$

avec: Lp_j : la lame d'eau précipitée sur l'entité hydrologique j

P_i : la pluviométrie de la station du polygone i

Tab 18 : Lame d'eau précipitée annuelle par sous bassin versant de l'Oubangui

	Uélé	Bili	Mbomou	Ouara	Chinko	Mbari	Kotto	Ouaka	Kemo	Mpoko	Lobaye	MOZ
1972	1742	1560	1391	1350	1265	1427	1190	1368	1452	1486	1347	1453
1973	1705	1754	1564	1517	1277	1470	1156	1241	1256	1315	1394	1544
1974	1810	1627	1370	1343	1338	1494	1305	1637	1505	1445	1495	1485
1975	1911	1678	1522	1496	1331	1477	1212	1646	1499	1436	1600	1636
1976	1809	1648	1486	1450	1363	1575	1337	1556	1578	1654	1444	1598
1977	1796	1804	1185	1072	1198	1596	1272	1506	1478	1545	1546	1674
1978	1560	1824	1374	1297	1406	1598	1147	1378	1499	1457	1460	1379
1979	1550	1520	1448	1453	1503	1671	1397	1674	1469	1538	1356	1671
1980	1749	1619	1309	1257	1311	1672	1247	1595	1499	1561	1485	1528
1981	1825	1408	1505	1573	1584	1606	1280	1609	1492	1447	1418	1469
1982	1843	1566	1503	1505	1426	1534	1249	1697	1507	1436	1482	1401
1983	1741	1789	1475	1418	1328	1527	1234	1459	1624	1728	1467	1565
1984	1642	1403	1474	1502	1326	1371	1034	1350	1317	1255	1298	1318
1985	1765	1607	1543	1552	1415	1483	1180	1507	1391	1326	1359	1382
1986	1789	1589	1478	1462	1380	1571	1110	1268	1216	1169	1421	1268
1987	1864	1797	1525	1482	1304	1546	1115	1310	1364	1398	1350	1504
1988	1672	1465	1375	1376	1302	1348	1234	1331	1515	1586	1462	1545
1989	1727	1405	1215	1201	1254	1365	1259	1500	1359	1380	1433	1262
1990	1809	1821	1406	1330	1351	1646	1239	1331	1241	1207	1488	1595
1991	1941	1718	1571	1544	1354	1498	1281	1415	1514	1518	1574	1395
1992	1674	1437	1384	1396	1310	1358	1245	1472	1398	1361	1420	1416
moyen	1758	1621	1433	1409	1349	1516	1225	1469	1437	1440	1443	1481

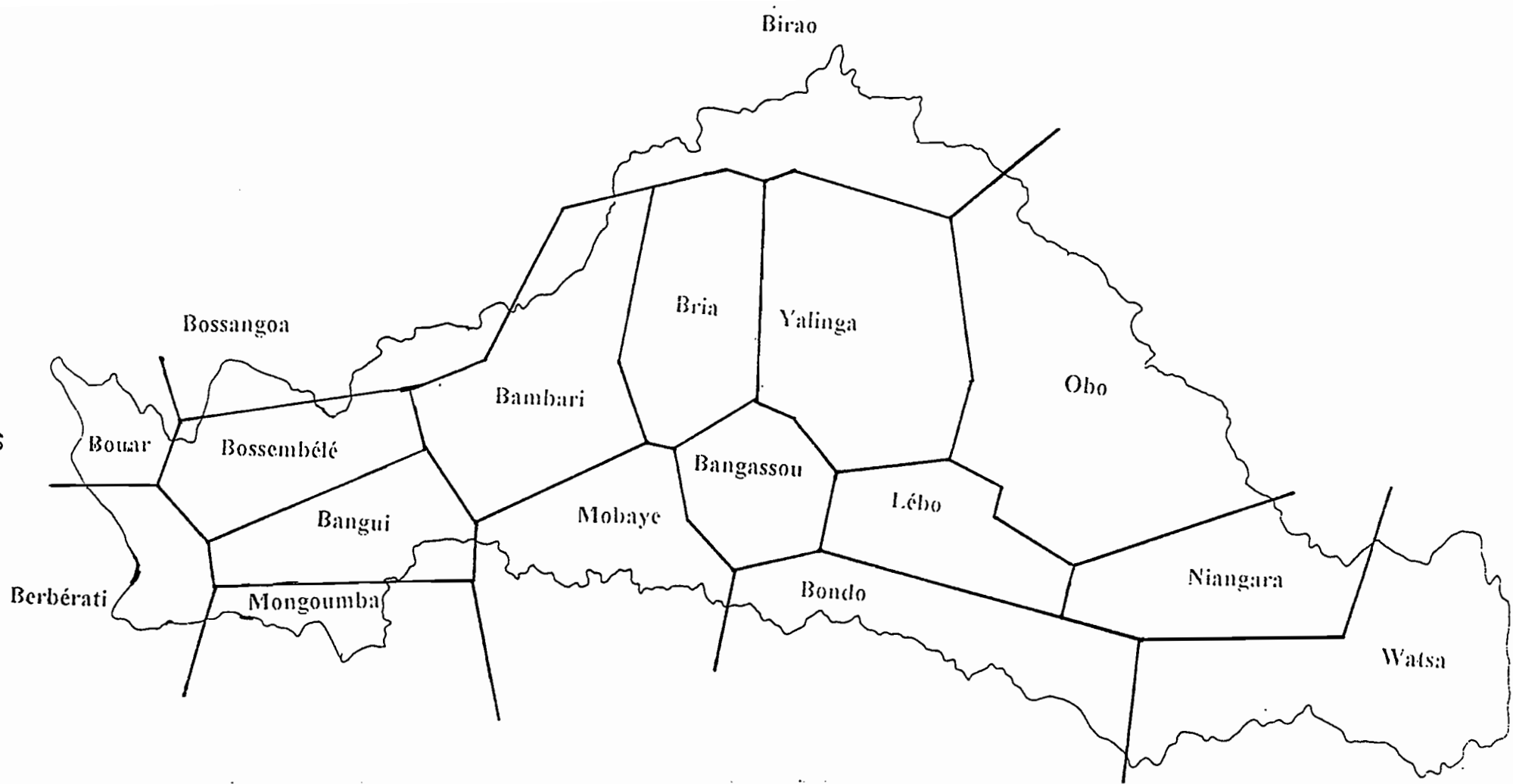


Fig13: Carte de repartition des polygone de THIESSEN autour de chaque station pluviométrique

II-2-2 Méthode d'interpolation sous IDRISI

Cette méthode nécessite l'existence de deux cartes: une des entités hydrologiques et l'autre des isohyètes. Nous disposons de la première, la seconde est créée comme suit.

On digitalise les stations pluviométriques sur la carte de l'Oubangui. On obtient un fichier (.vec), puis on crée un fichier de valeurs de la pluviométrie pour chaque station (.val) et enfin on applique la fonction d'interpolation qui permet d'effectuer une interpolation proportionnelle à l'inverse de la distance à la puissance n , n étant choisi de façon à linéariser les résultats. On obtient une image de la répartition de la pluviométrie sur l'ensemble du bassin (fig14). Ensuite on masque la carte des entités hydrologiques et en effectuant un croisement entre les deux cartes, puis en appliquant la fonction HISTO sur le résultat du croisement, on obtient le nombre de pixels pour chaque valeur de pluviométrie dans chaque entité hydrologique. La lame d'eau précipitée est alors calculée par la formule suivante :

$$L_j = \frac{\sum_i P_i * X_{i,j}}{\sum_i X_{i,j}}$$

avec:

L_j : la lame d'eau précipitée sur l'entité hydrologique j

$X_{i,j}$: le nombre de pixels de la classe pluviométrique i dans l'entité hydrologique j

P_i : la pluviométrie de la classe pluviométrique i .

Le résultat trouvé par cette méthode est donné dans le tableau 19. Uniquement les lames d'eau des trois années 1990, 1991 et 1992 ont été ainsi calculées des fait que cette méthode nécessite beaucoup de mémoire libre sur la machine et que les observations de matières en suspension ne concernent que ces 3 années.

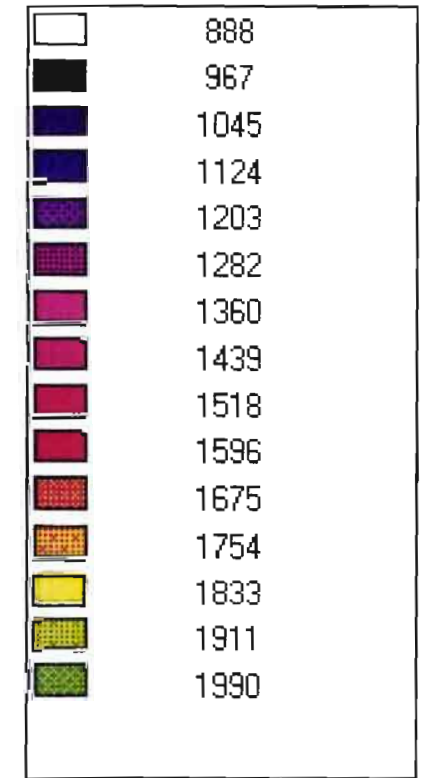
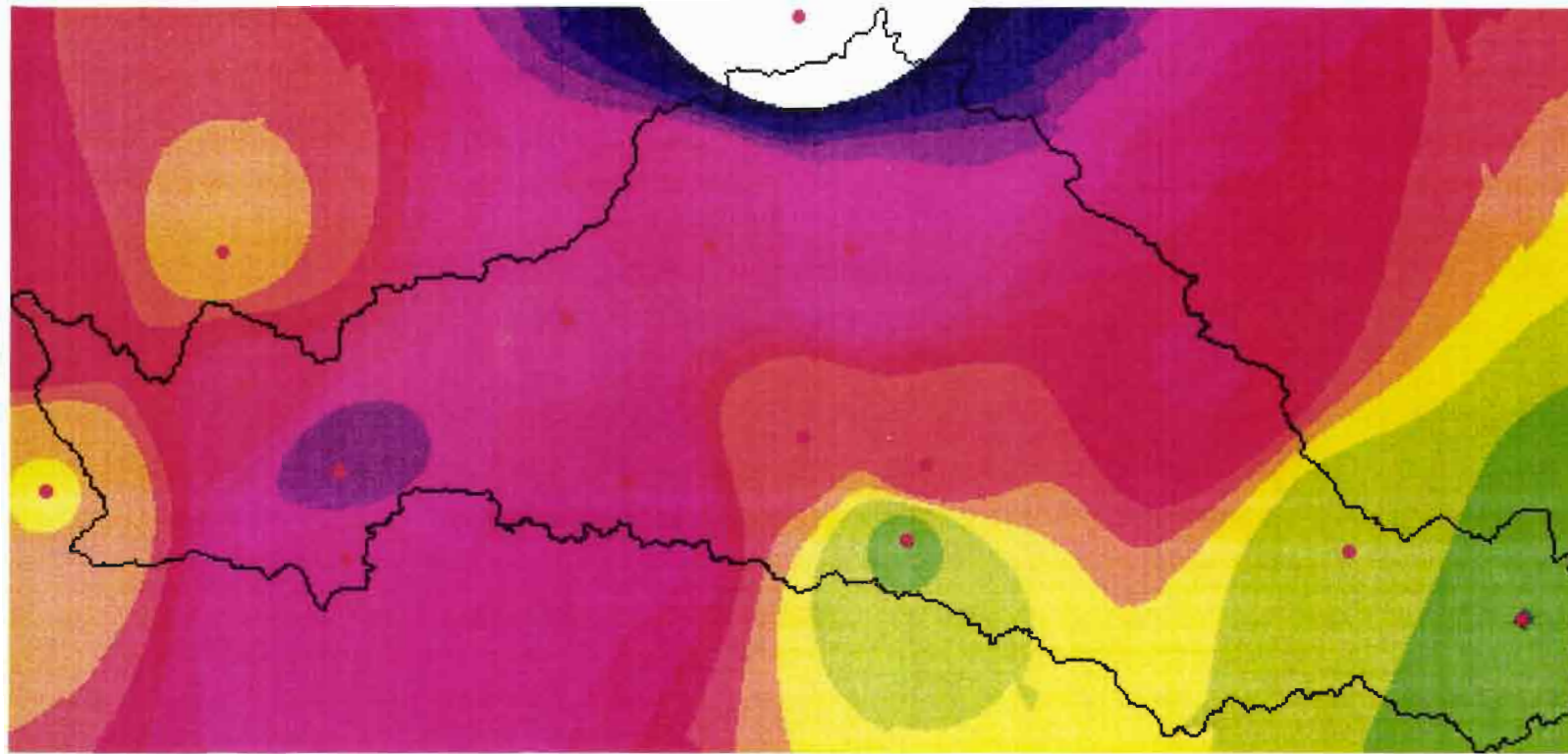
Tab 19 : Lame d'eau précipitée annuelle calculée par interpolation sous IDRISI

	Uélé	Bili	Mbomou	Ouara	Chinko	Mbari	Kotto	Ouaka	Kémo	Mpoko	Lobaye	MOZ
n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1990	1778	1838	1503	1443	1552	1707	1343	1389	1343	1198	1457	1590
1991	1868	1807	1611	1576	1450	1582	1336	1419	1392	1498	1593	1403
1992	1628	1528	1403	1393	1377	1338	1312	1464	1418	1360	1430	1428

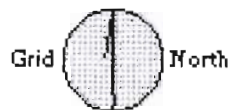
II-2-3 Comparaison entre les deux méthodes

La figure 15 donne une comparaison des résultats obtenus par la méthode de Thiessen et par l'interpolation sous IDRISI. Les deux méthodes donnent des résultats équivalents, à l'exception des lame d'eau 4 et 5 (Ouara et Chinko) pour l'année 1990. En général, les valeurs obtenues interpolation sous IDRISI sont légèrement plus élevées. Cela peut être due au faible nombre de stations utilisées pour l'interpolation, de même qu'à la mauvaise répartition des stations sur l'ensemble du bassin. Enfin, l'image donnée par interpolation sous IDRISI de la répartition pluviométrique sur l'ensemble du bassin n'est pas satisfaisante. En effet, génère un ensemble de cercles concentriques autour des points dont la valeur est connue, du fait du trop petit nombre de stations observées. Pour cela, nous avons préféré prendre en considération les résultats obtenus par la méthode de Thiessen.

Carte de la pluviométrie de l'année 1991



45

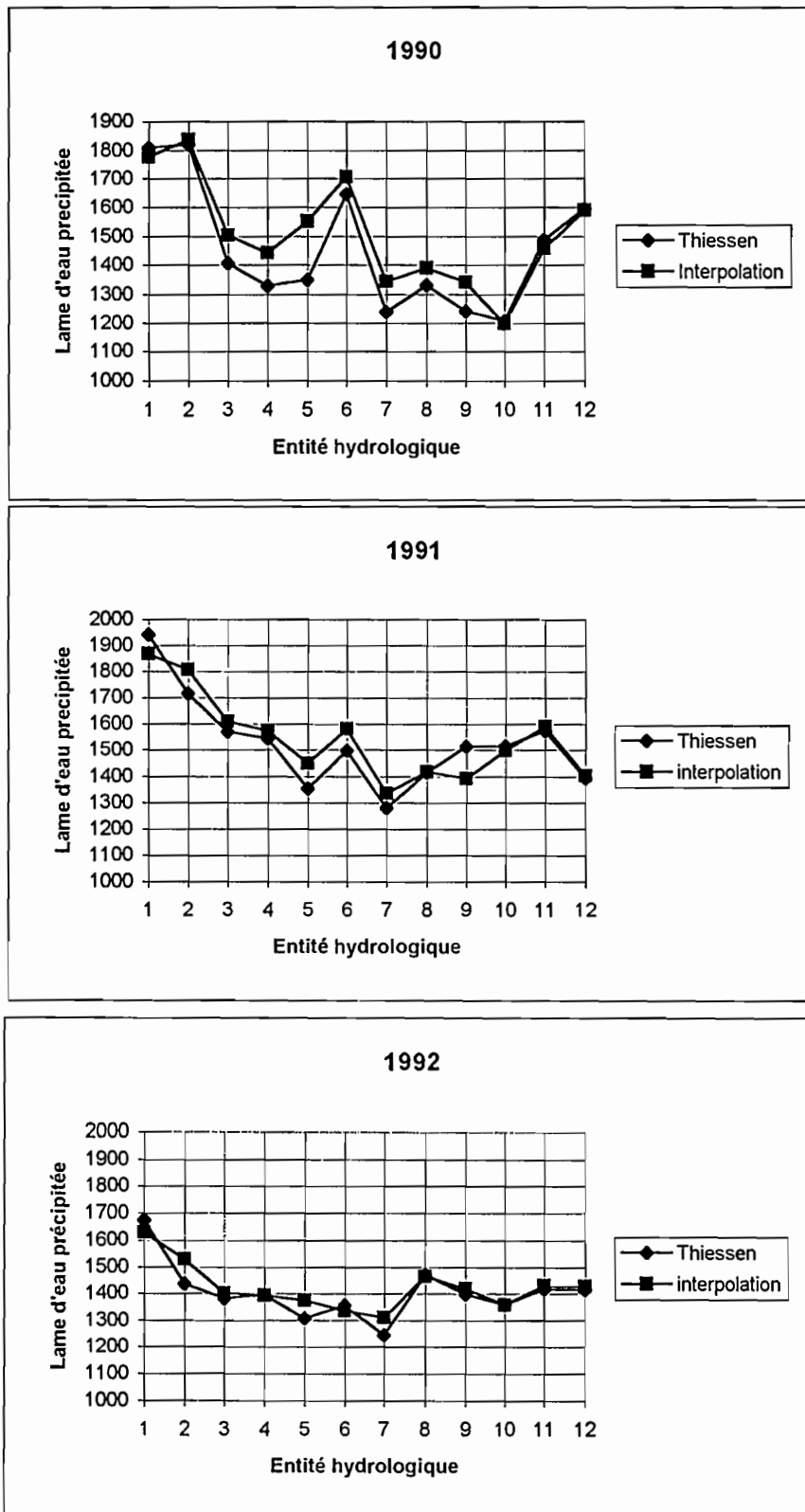


Degrees
2.43

Idrisi

Fig14: Interpolation sous IDRISI de la pluviométrie de l'année 1991 (en mm/an)

Fig15: Comparaison entre les resultats de la méthode de Thiessen et l'interpolation sous IDRISI



III LA LAME D'EAU PRECIPITEE MENSUELLE

Le but de cette partie est de calculer la lame d'eau précipitée mensuelle sur chaque entité hydrologique. Comme pour la pluviométrie annuelle, on est bien sûr amené à reconstituer la pluviométrie mensuelle sur les stations du Zaïre.

III-1 RECONSTITUTION DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES MENSUELLES SUR LA PARTIE ZAIRE

Sur la partie Zaïre, on possède les observations mensuelles sur trois stations parmi quatre. Ces observations se répartissent comme suit:

- ✧ entre 1950 et 1959 pour la station de Niangara,
- ✧ entre 1946 et 1959 pour Bondo,
- ✧ de 1940 à 1959 sauf les années 1950, 1956 et 1958 pour Lebo,
- ✧ aucune observation pour Watsa.

La méthode utilisée pour l'estimation de la pluviométrie mensuelle sur les 3 années récentes (1990, 1991 et 1992) consiste à calculer la valeur moyenne inter-annuelle de chaque mois sur les chroniques observées. Ensuite, on calcule le pourcentage que représente la valeur moyenne de chaque mois par rapport à la pluviométrie moyenne annuelle. Enfin on applique ce pourcentage sur les valeurs annuelles reconstituées précédemment, des années 1990, 1991 et 1992.

Pour la station de Watsa, faute du manque total d'observations, on a supposé que la répartition mensuelle de la pluviométrie varie de la même façon qu'à Niangara. On applique donc les pourcentages trouvés pour cette dernière sur les valeurs annuelles de Watsa. Le choix de la station de Niangara est basé surtout sur le fait que cette station est la plus proche de Watsa.

III-1-1 Tableaux de données disponibles

Tableau de la pluviométrie mensuelle observée de 1950 à 1959 à Niangara

	janvier	février	mars	avr	mai	juin	juillet	août	sep	oct	nov	dece	année
1950	24	21	164	167	208	214	103	266	305	407	104	74	2057
1951	1	26	175	172	121	142	289	637	269	262	253	21	2368
1952	7	60	153	209	151	130	225	266	253	139	249	20	1862
1953	134	98	145	270	261	274	194	261	129	123	96	6	1991
1954	0	114	200	140	153	143	182	157	233	111	44	22	1499
1955	23	16	186	260	94	267	268	180	373	234	143	80	2124
1956	1	102	79	191	216	192	171	264	255	280	36	53	1840
1957	46	18	120	126	112	267	204	215	125	207	170	105	1715
1958	12	6	146	357	134	179	97	180	111	239	50	164	1675
1959	5	0	130	261	186	216	97	122	131	330	56	61	1595
moyen	25	46	150	215	164	202	183	255	218	233	120	61	1873
%	1.4	2.5	8.0	11.5	8.7	10.8	9.8	13.6	11.7	12.5	6.4	3.2	100

Tableau de la pluviométrie mensuelle observée de 1940 à 1959 à Lébo:

	janvier	février	mars	avr	mai	juin	juillet	août	sep	oct	nov	dece	année
1940	19	174	99	240	93	112	280	161	206	393	121	73	1971
1941	0	42	145	181	232	201	250	114	220	206	211	0	1802
1942	12	101	96	192	210	148	89	260	189	157	85	33	1572
1943	23	18	122	137	180	314	267	201	226	340	79	7	1914
1944	38	41	159	122	241	174	111	122	148	215	57	0	1428
1945	84	0	35	224	316	193	311	231	300	197	142	27	2060
1946	26	29	39	146	164	158	191	140	253	163	133	28	1470
1947	27	52	110	171	165	223	198	249	289	233	69	52	1838
1948	2	198	61	179	171	220	309	222	167	228	35	14	1806
1949	16	6	76	75	239	220	223	128	238	515	62	30	1828
1951	33	31	76	98	152	144	191	169	244	266	192	6	1602
1952	0	29	72	150	149	194	154	220	178	225	113	50	1534
1953	40	67	80	97	286	116	132	166	113	198	67	27	1389
1954	59	73	98	101	108	106	267	349	217	178	243	18	1817
1955	25	4	194	193	154	108	190	224	163	329	154	7	1745
1957	35	40	216	127	246	130	119	157	203	242	200	187	1902
1959	33	8	126	122	144	148	355	289	170	311	193	75	1974
moyen	28	54	106	150	191	171	214	200	207	259	127	37	1744
%	1.6	3.1	6.1	8.6	11.0	9.8	12.3	11.5	11.9	14.8	7.3	2.1	100

Tableau de la pluviométrie mensuelle observée de 1946 à 1959 à Bondo:

	janvier	février	mars	avr	mai	juin	juillet	août	sep	oct	nov	dece	année
1946	9	91	68	181	278	111	148	282	245	294	66	18	1791
1947	4	94	103	203	107	185	208	166	160	241	90	20	1581
1948	9	144	80	221	131	98	156	162	108	333	89	8	1539
1949	14	3	69	191	178	168	158	121	334	368	42	75	1721
1950	5	15	141	66	226	189	174	184	239	150	63	1	1453
1951	39	68	112	39	294	174	84	215	148	194	171	1	1539
1952	6	10	93	181	178	87	201	94	197	144	105	74	1370
1953	44	51	65	113	228	90	199	190	123	175	28	68	1374
1954	15	55	86	142	105	152	189	144	195	303	131	53	1570
1955	34	15	148	141	161	82	124	215	191	148	117	40	1416
1956	12	24	103	107	138	105	131	176	240	303	72	44	1455
1957	14	92	150	116	76	165	57	133	129	168	175	85	1360
1958	7	1	108	295	147	215	200	76	107	272	60	79	1567
1959	7	2	259	221	239	124	155	162	148	249	290	0	1856
moyen	16	48	113	158	178	139	156	166	183	239	107	40	1542
%	1.0	3.1	7.3	10.3	11.5	9.0	10.1	10.7	11.9	15.5	6.9	2.6	100

III-1-2 Tableaux de données reconstituées

① Estimation de la pluviométrie mensuelle de 1990 à 1992 à Niangara

	janvier	février	mars	avr	mai	juin	juillet	août	sep	oct	nov	dece	année
1990	24	44	142	205	155	192	174	242	207	222	114	58	1779
1991	27	48	157	226	172	212	192	267	229	245	126	64	1965
1992	22	40	130	187	142	175	159	221	189	202	104	52	1623

② Estimation de la pluviométrie mensuelle de 1990 à 1992 à Lébo

	janvier	février	mars	avr	mai	juin	juillet	août	sep	oct	nov	dece	année
1990	29	56	111	157	200	179	223	209	216	270	132	39	1821
1991	26	50	100	141	179	160	201	188	194	243	119	35	1636
1992	22	42	82	117	149	133	166	156	161	201	99	29	1356

③ Estimation de la pluviométrie mensuelle de 1990 à 1992 à Bondo

	janvier	février	mars	avr	mai	juin	juillet	août	sep	oct	nov	dece	année
1990	19	58	138	193	216	169	190	202	223	290	130	49	1876
1991	19	59	141	197	221	173	194	206	228	297	133	50	1921
1992	17	51	121	170	190	149	167	177	196	256	115	43	1651

④ Estimation de la pluviométrie mensuelle de 1990 à 1992 à Watsa

	janvier	février	mars	avr	mai	juin	juillet	août	sep	oct	nov	dece	année
1990	25	46	149	214	162	201	181	253	217	231	119	60	1857
1991	27	49	159	229	174	215	194	271	232	248	128	64	1990
1992	24	43	140	202	153	190	172	239	205	219	113	57	1755

III-2 CALCUL DE LA LAME D'EAU PRECIPITEE MENSUELLE

Pour calculer la lame d'eau précipitée mensuelle, nous avons utilisé la méthode de THIESSEN précédemment décrite avec les mêmes coefficients de pondération.

Résultat du calcul de la lame d'eau précipitée mensuelle en 1990:

	Uélé	Bili	Mbomou	Ouara	Chinko	Mbari	Kotto	Ouaka	Kemo	Mpoko	Lobaye	MOZ
jan	23	27	15	10	19	41	16	19	18	26	20	50
fev	46	54	23	18	7	15	5	5	2	3	0	8
mars	139	112	55	47	16	19	6	12	11	15	49	35
avr	200	165	108	96	67	104	52	101	107	112	140	155
mai	175	207	222	220	150	181	128	142	170	160	181	127
juin	189	173	157	160	200	204	132	90	84	73	123	119
juill	182	214	196	191	218	244	216	171	168	148	203	235
aout	237	218	233	227	243	308	236	247	220	211	278	282
sep	210	210	127	120	182	191	203	264	184	140	206	203
oct	238	268	194	185	179	202	161	160	138	141	146	183
nov	116	130	64	50	60	105	65	103	109	130	121	136
dec	54	42	14	8	11	32	18	17	31	47	22	62
année	1809	1821	1406	1330	1351	1646	1239	1331	1241	1207	1488	1595

Résultat du calcul de la lame d'eau précipitée mensuelle en 1991:

	Uélé	Bili	Mbomou	Ouara	Chinko	Mbari	Kotto	Ouaka	Kemo	Mpoko	Lobaye	MOZ
jan	24	22	9	8	11	10	5	3	1	2	6	14
fev	49	52	24	17	11	31	9	18	42	56	55	57
mars	149	105	70	69	38	22	27	27	47	61	61	62
avr	217	163	164	158	98	143	88	181	145	149	184	170
mai	183	191	180	178	166	150	210	198	146	132	183	175
juin	202	162	159	164	180	166	170	162	151	151	127	93
juill	194	193	188	190	176	135	208	186	266	264	228	159
août	259	205	314	328	256	280	220	228	276	283	261	263
sep	228	202	198	202	183	184	144	156	168	131	153	148
oct	253	265	198	183	217	317	183	219	207	202	217	167
nov	123	121	55	39	15	57	18	36	64	88	89	78
dec	58	37	11	8	3	2	1	2	0	1	11	10
année	1941	1718	1571	1544	1354	1498	1281	1415	1514	1518	1574	1395

Résultat du calcul de la lame d'eau précipitée mensuelle en 1992:

	Uélé	Bili	Mbomou	Ouara	Chinko	Mbari	Kotto	Ouaka	Kemo	Mpoko	Lobaye	MOZ
jan	21	20	9	7	2	8	1	0	0	0	3	3
fev	42	43	21	18	30	38	12	2	1	0	7	6
mars	129	90	70	71	70	66	53	65	70	72	83	99
avr	186	133	120	121	119	138	92	101	74	70	117	84
mai	160	161	181	188	169	168	142	201	165	170	132	178
juin	176	140	168	178	209	205	219	199	175	175	168	136
juill	168	167	186	193	225	212	203	182	215	222	232	218
août	219	160	192	201	165	127	182	304	269	227	208	248
sep	198	175	196	197	145	163	147	204	186	168	189	182
oct	219	216	181	176	154	180	162	184	179	173	204	174
nov	107	101	50	39	20	48	30	29	57	77	65	72
dec	50	31	10	7	2	6	1	0	6	8	13	16
année	1674	1437	1384	1396	1310	1358	1245	1472	1398	1361	1420	1416

IV LA LAME D'EAU ECOULEE MENSUELLE

IV-1 DEFINITION

La lame d'eau écoulee est la hauteur d'eau qu'atteindrait le volume total d'eau écoulé à l'exutoire d'un bassin en un temps donné, si ce volume était également réparti sur une surface horizontale de superficie égale à celle du bassin. On l'exprime en mm et on l'obtient par la formule:

$$Le = \frac{Q * dt}{1000 * S}$$

avec :

Le: lame d'eau écoulee

Q : débit moyen en m³/s

dt: intervalle de temps en secondes

S : superficie du bassin en km²

IV-2 PROCESSUS DE GENESE DES DEBITS

La répartition la plus connue de la formation des débits dans les cours d'eau est celle d'un partage de la pluie disponible au niveau de la surface du sol, après interception éventuelle par la végétation:

↳ dès que l'intensité des pluies dépasse l'infiltrabilité du sol, elle même variable selon l'humidité du sol, il y a saturation de la surface «par le haut» et après avoir rempli les dépressions de la surface, l'eau en excès est évacuée rapidement par ruissellement de surface pour former l'écoulement rapide de crue;

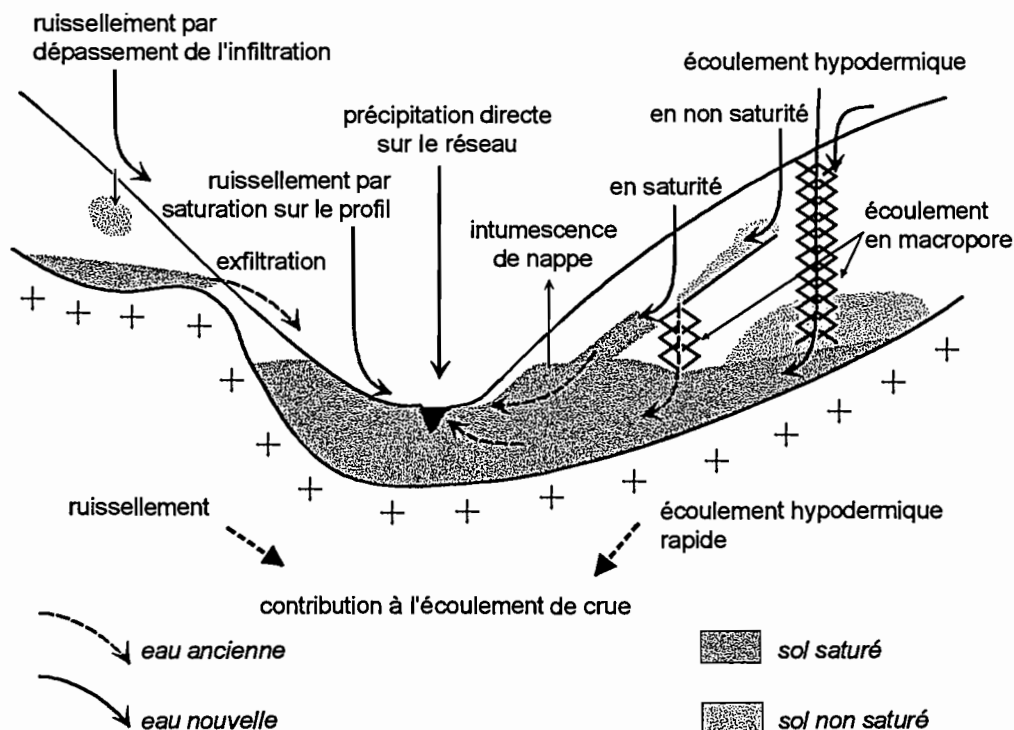
↳ le reste de l'eau s'infiltrate et contribue à la recharge des nappes et au débit de base par un écoulement beaucoup plus lent à travers les sols et les formations superficielles.

Loin d'être généralisé à tout un bassin, ce type de ruissellement n'est actif que sur une partie souvent très limitée du bassin. Et selon la localisation de cette zone, l'eau ruisselée pourra alors soit effectivement contribuer au débit de crue, soit au contraire s'infiltrer plus en aval sur le versant. Dans le cas des zones humides où le sol est déjà saturé jusqu'en surface, la pluie tombant sur ces surfaces saturées ne peut que ruisseler ou libérer par «effet piston» un volume équivalent d'eau ancienne. Un troisième type de ruissellement provient de l'exfiltration, fréquente sur ces zones hydromorphes où affleurent les nappes, d'eau provenant de l'écoulement souterrain. Toutes ces contributions s'ajoutent bien sûr aux précipitations directes sur le réseau de drainage.

Enfin, la part du ruissellement dans l'écoulement de crue peut être faible, les crues peuvent avoir comme origine, l'eau infiltrée, soit par écoulement hypodermique dans les sols, soit par une recharge rapide des nappes (AMBROISE, 1995) (fig 16).

Notre étude étant une approche globale des processus d'érosion sur l'ensemble du bassin versant implique de considérer que chaque parcelle du bassin participe de façon égale à l'écoulement enregistré à l'exutoire.

Fig16: Processus de genèse des débits



IV-3 TABLEAU DE RESULTATS

Le calcul est effectué en utilisant les débits observés, estimés et reconstitués d'après ORANGE et al, (1995) pour les 11 sous-bassins versants constitutifs de l'Oubangui.

★Lame d'eau écoulée mensuelle en mm pour l'année 1991:

	Uélé	Bili	Mbomou	Ouara	Chinko	Mbari	Kotto	Ouaka	Kemo	Mpoko	Lobaye
jan	17.87	16.02	3.83	2.16	3.28	1.80	3.49	2.39	0.28	4.93	10.45
fev	6.35	8.61	1.85	1.01	1.55	0.74	2.75	1.11	0.21	3.25	8.93
mars	3.45	7.16	1.52	0.60	1.26	0.37	2.70	0.76	0.46	1.35	10.38
avr	4.38	7.62	2.37	0.35	1.37	0.54	2.81	4.25	0.22	3.25	11.73
mai	9.45	11.54	3.47	1.70	4.55	1.40	3.86	4.56	1.29	3.48	11.13
juin	24.08	20.95	5.32	4.41	8.37	4.90	5.15	10.95	0.67	6.29	13.34
juill	29.49	24.66	6.91	4.52	10.42	4.95	9.35	8.61	15.72	10.31	13.94
aout	41.87	32.79	13.83	9.64	9.82	8.21	13.38	14.12	26.81	10.43	20.30
sept	45.75	39.49	26.01	17.65	17.58	18.27	17.55	15.04	30.42	23.54	19.87
octo	37.50	39.93	40.42	26.88	25.70	25.07	21.43	22.63	27.66	56.95	25.22
novem	44.18	40.09	41.36	25.55	16.94	11.23	7.18	11.59	16.63	33.42	21.26
decem	22.47	22.78	18.18	11.83	10.78	5.60	4.06	5.35	3.96	12.56	14.92
année	286.8	271.6	165.07	106.3	111.6	83.1	93.7	101.3	124.3	169.8	181.5

★Lame d'eau écoulée mensuelle en mm pour l'année 1992

	Uélé	Bili	Mbomou	Ouara	Chinko	Mbari	Kotto	Ouaka	Kemo	Mpoko	Lobaye
jan	9.20	11.71	6.13	2.42	4.14	1.87	3.36	2.73	1.97	7.29	11.29
fev	3.75	7.60	4.49	1.23	1.94	1.00	3.00	1.50	0.62	6.50	9.07
mars	2.34	6.53	1.73	0.96	0.73	0.62	2.77	1.05	0.33	6.95	10.23
avr	1.38	6.09	1.97	0.70	1.66	0.90	2.71	1.45	2.13	7.59	10.48
mai	3.49	8.17	4.39	1.40	3.35	2.04	3.23	4.89	7.15	8.30	11.29
juin	8.96	12.11	9.00	4.05	4.26	3.39	3.77	4.36	6.39	10.74	13.71
juill	21.72	20.40	10.06	4.98	7.08	7.50	5.62	9.07	13.28	12.22	16.97
aout	34.99	31.67	21.37	16.08	13.96	11.50	10.15	11.77	17.18	50.45	26.06
sept	45.53	42.76	32.28	23.69	29.43	16.18	19.77	16.37	24.06	46.65	25.58
octo	62.67	52.44	42.74	32.04	19.17	19.67	13.48	14.63	21.45	54.04	29.24
novem	59.17	46.27	38.65	23.92	9.20	11.89	7.02	11.88	17.45	46.11	22.50
decem	24.96	22.03	14.79	7.51	4.19	4.50	3.79	4.30	6.30	13.79	14.92
année	278.2	267.8	187.60	119.0	99.1	81.1	78.7	84.0	118.3	270.6	201.3

★Lame d'eau écoulée mensuelle en mm pour l'année 1993:

	Uélé	Bili	Mbomou	Ouara	Chinko	Mbari	Kotto	Ouaka	Kemo	Mpoko	Lobaye
jan	10.85	12.64	6.47	3.10	3.56	1.77	3.36	3.18	4.67	9.75	12.27
fev	4.25	7.89	2.91	1.32	2.76	1.10	2.76	1.94	2.84	7.13	10.06
mars	2.32	6.70	2.33	0.72	1.32	0.79	2.78	1.39	2.02	7.18	9.39
avr	2.47	6.88	3.23	1.14	1.32	1.92	2.71	1.67	2.45	8.35	9.60
mai	6.71	10.28	6.14	2.09	3.16	3.25	3.08	2.76	4.05	9.42	11.36
juin	15.36	16.84	11.04	5.45	8.03	5.36	6.21	5.08	7.45	11.61	15.17
juill	21.78	23.03	19.73	10.19	13.15	6.17	9.62	5.86	8.58	18.95	20.30
aout	21.95	28.54	31.14	15.60	23.17	21.44	16.14	9.22	13.53	39.80	27.42
sept	19.98	29.92	31.25	21.72	33.24	21.31	22.67	19.87	29.13	47.96	21.48
octo	33.59	35.17	32.20	23.04	26.76	10.03	14.97	12.28	18.03	45.63	21.13
novem	36.18	34.88	31.72	19.51	23.99	3.98	6.92	6.76	9.91	28.64	17.08
decem	27.99	24.53	21.08	9.60	5.26	2.95	4.16	4.79	7.01	15.36	14.69
année	203.4	237.3	199.24	113.5	145.7	80.1	95.4	74.8	109.7	249.8	190.0

★ **Lame d'eau écoulee mensuelle en mm pour l'année 1994:**

	Uélé	Bili	Mbomou	Ouara	Chinko	Mbari	Kotto	Ouaka	Kemo	Mpoko	Lobaye
jan	15.59	15.02	8.55	2.40	2.38	1.47	3.46	3.36	4.92	8.07	11.74
fev	6.08	8.55	3.31	1.12	1.18	0.80	2.61	2.20	3.23	4.51	9.99
mars	3.18	7.08	2.90	0.60	0.76	0.58	2.77	1.48	2.17	3.25	9.24
avr											8.80
mai											11.44

V- CALCUL DE L'INDICE DE VEGETATION

L'indice de végétation caractérise l'aptitude de chaque type de végétation à protéger le sol contre l'érosion. On dispose d'une carte digitalisée de la végétation sur l'ensemble du bassin de l'Oubangui (fig17). La végétation est divisée en trois classes:

- savane,
- forêt sèche,
- forêt dense humide.

Pour chaque classe, le choix de l'attribut caractérisant l'aptitude de la végétation concernée à protéger le sol contre l'érosion est fait en fonction des informations du tableau 8. Par exemple, nous avons vu que le facteur C de l'équation de WISCHMEIER augmente d'un facteur 10 si on passe de la forêt dense à la savane.

La plage de variation de la valeur des attributs est fixée à 10, comme pour les modèles de JANSEN et PAINTER (1974) ou PROBST (1990). Nous avons choisi d'attribuer 1 à la classe de forêt dense humide, 4 à la classe de forêt sèche et 10 pour la classe de savane. On rappelle que si la valeur de l'attribut augmente, la protection du sol devient faible. Notons que l'indice de végétation obtenu à partir de ces attributs a une signification inverse à celle des indices de végétation utilisés par JANSEN et PAINTER (1974) et PROBST (1990).

Sous IDRISI en croisant la carte de végétation et celle des entités hydrologiques, puis en appliquant la fonction HISTO, on obtient le nombre de pixels occupé par chaque classe de végétation sur chaque sous-bassin versant (tableau 20). On peut effectuer ce travail en appliquant la fonction CROSSTAB qui permet d'obtenir le résultat complet de croisement entre les deux cartes sous forme d'un tableau unique (voir annexe 2).

Tableau 20: Exemple de résultat de l'histogramme calculé sur le bassin de l'Uélé

Class	Frequency	Prop.	% d'occupation
0	1305031	0.9027	
4	37565	0.026	27
8	5189	0.0036	4
10	97903	0.0677	69

Class : classe de végétation

Frequency: nombre de pixels par classe

Prop : pourcentage par rapport à la surface totale du bassin de l'Oubangui

En multipliant les % d'occupation de chaque classe par les attributs correspondant, on obtient l'indice de végétation de chaque sous-bassin versant (tab21).

Fig17 : Végétation du bassin de l'Oubangui



VI- CALCUL DE L'INDICE DE LITHOLOGIE

L'indice de lithologie caractérise la sensibilité de chaque type de roches à l'érosion. On suit la même démarche que pour le calcul de l'indice de végétation en utilisant la carte digitalisée de lithologie présentée en fig10 et pour déterminer les attributs de chaque type de roche on utilise le tableau 6 ainsi que la connaissance du terrain. Ces attributs sont les suivants:

- 2 pour les roches plutoniques,
- 1 pour les roches volcaniques et métamorphiques,
- 4 pour les roches détritiques argileuses,
- 10 pour les roches carbonatées.

Le tableau de résultats donnant le nombre de pixels occupé par chaque type de roches sur chaque sous-bassin versant est donné en annexe 2. Les valeurs correspondantes de l'indice de lithologie sont dans le tableau n°21.

VII- CALCUL DE L'INDICE DE PEDOLOGIE

L'indice de pédologie caractérise l'aptitude de chaque type de sol à être érodé. Le bassin de l'Oubangui contient deux grands types de sol: les sols ferrallitiques de très indurés jusqu'à non indurés et les sols jeunes d'érosion (fig9). Le type ferrallitique non induré est le plus susceptible d'être érodé après le sol jeune d'érosion. On identifie cinq classes avec les attributs suivants:

- 1 pour le sol ferrallitique très induré,
- 2 pour le sol moyennement induré,
- 3 pour le sol peu induré,
- 6 pour le sol non induré
- 8 pour le sol jeune d'érosion.

Le choix de ces indices est basé sur une étude faite par MAGNIEN (1958). Le calcul de l'indice de pédologie reprend la même méthode que celle présentée pour les indices précédents. Les valeurs de l'indice de pédologie par sous-bassin versant sont données dans le tableau n°21 et le détail du nombre de pixels par classe et par sous-bassin est présenté en annexe 2.

VIII- CALCUL DE L'INDICE DE PENTE

L'indice de pente, ou bien pente moyenne sur l'ensemble du bassin, caractérise la morphologie générale du bassin. Pour calculer l'indice de pente, nous avons utilisé une carte des pentes obtenue à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT).

VIII-1 DEFINITION DE MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN

Un modèle numérique de terrain est un fichier de stockage de l'information topographique propre à une surface donnée. La surface est représentée par une grille dont les mailles sont carrées. Chaque maille est caractérisée par son pas, qui correspond à la résolution spatiale du MNT. Chaque noeud de la maille est caractérisé par son altitude Z_i et ses coordonnées (X_i, Y_i) qui permettent de le situer dans l'espace géographique.

L'intérêt des MNT est de permettre une manipulation rapide et quantifiée de l'information spatiale. Pour cette raison, ils sont de plus en plus utilisés dans les domaines tels que la modélisation hydrologique, l'étude de l'érosion, les études géomorphologiques ou pédologiques. Ils sont facilement applicables à n'importe quel problème d'aménagement, dont l'altitude ou les fichiers dérivés qui en découlent. La qualité et la précision des MNT dépendent principalement de celles des documents de départ et de la méthode d'interpolation. Il sera donc toujours important lors de l'utilisation d'un MNT d'être très critique sur la qualité des informations fournies.

VIII-2 PRESENTATION DU MNT UTILISE

Pour notre étude, nous avons utilisé un MNT de 30'' d'arc issu d'une couverture ONC (Opération Navigation Chart, au 1/1000000 de l'armée américaine). Ce MNT possède une résolution de 922 m (la taille du pixel est de 922 m), ce qui est une résolution très grossière pour un MNT. Avec une résolution aussi grossière, un MNT peut générer de fort imprécisions sur les altitudes et engendrer des zones à pentes nulles. Aussi, dans le cadre le cadre d'une étude en commun avec des étudiants de l'ENGREF (Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts), nous avons été chargés de valider la qualité de cet MNT en recherchant notamment les différents artefacts qui pouvaient exister FATHALLAH, (1996).

Les différents artefacts communs dans un MNT sont:

- ① si toutes les voisines de la cellule traitée ont une altitude plus élevée, la cellule traitée est une dépression (puits) et sa direction d'écoulement n'est pas définie;
- ② si deux cellules s'écoulent l'une vers l'autre, ce sont des dépressions (boucle);
- ③ si une cellule présente la même variation d'altitude dans plusieurs directions;

La première opération a consisté en une conversion du fichier MNT de IDRISI vers ARC/INFO (système d'information géographique en format vecteur et qui peut utiliser aussi le format raster). Cette opération avait pour objet le nettoyage du fichier de tous les artefacts qui peuvent exister. Premièrement, ARC/INFO détermine un modèle d'écoulement à partir des altitudes. La direction est déterminée selon le principe de la descente maximale: le drainage se fait dans la direction de la maille voisine d'altitude la plus faible. Le modèle de drainage obtenu à partir du MNT comportait 518 puits qui ont été ensuite corrigé sur ARC/INFO. Les étapes utilisées pour la suppression de ces dépressions, ou puits, sont les suivantes:

- ↳ détermination de la direction des flux en utilisant la fonction FLOWDIRECTION
- ↳ recherche des dépressions à l'aide de la fonction SINK
- ↳ enfin et à l'aide de la fonction FILL, on comble les dépressions déjà détectées.

Toutes ces étapes ont été effectuées sur ARC/INFO plutôt que sur IDRISI car ce dernier SIG ne possède pas suffisamment de mémoire pour répertorier tous les puits existants. Le temps de calcul était beaucoup trop long et le résultat non satisfaisant. En examinant la carte des sous bassins versants déterminée à partir de ce MNT, on note que sur la partie Est, dans le bassin de l'Uélé, on a une petite zone à pente nulle (fig18). Cependant, si on compare le réseau hydrographique digitalisé à partir d'une carte IGN au 1/1000000 et le réseau hydrographique reconstitué à partir du MNT sous ARC/INFO, le résultat est très satisfaisant pour notre étude à échelle globale: il y a une bonne superposition des deux réseaux (fig19).

Pour conclure sur la validité de ce modèle numérique de terrain, on peut dire que pour des études globales à grande échelle il présente un grand intérêt. Mais si on désire affiner la problématique, la résolution de ce MNT n'est plus suffisante pour obtenir des résultats fiables.

VIII-3 DETERMINATION DE L'INDICE DE PENTE

A partir du MNT corrigé (fig20), on utilise la fonction SURFACE sous IDRISI pour calculer la carte de pente (fig18). A ce stade, à chaque pixel correspond une valeur de pente exprimée en %. Cette carte est multipliée par un scalaire égal à 100 pour mieux distinguer les différentes classes. Ensuite, un croisement est effectué entre la carte des entités hydrologiques et la carte de pente ainsi multipliée par 100. En utilisant la fonction HISTO, on obtient le nombre de pixels pour chaque classe de pente et enfin à l'aide de la fonction ci-dessous, on calcule la pente moyenne sur chaque entité hydrologique (tab21):

$$\text{pente (j) en \%} = \frac{\sum X_i * \frac{P_i}{100}}{\sum X_i}$$

avec:

pente (j): pente moyenne de l'entité j
 X_i : nombre de pixels de la classe de pente i
 P_i : attribut de la classe de pente i.

IX-COMMENTAIRES SUR LES VALEURS D'INDICE

Avant d'aborder la modélisation, je voudrais faire quelques remarques concernant les valeurs des indices déterminées par sous-bassin versant (tab21):

- ❶ ces valeurs sont considérées comme étant des caractéristiques intrinsèque du bassin versant concerné. En effet, pour un bassin versant donné, elles sont invariables quelques soient l'année ou le mois, ce qui se comprend bien pour la pente, la lithologie ou la pédologie mais pas pour la végétation.
- ❷ les attributs des différentes classes ont été choisis de sorte que tous les indices varient dans le même sens vis à vis de la sensibilité à l'érosion: plus l'indice est fort, plus le paysage est sensible à l'érosion. On note donc que notre indice de végétation a une signification contraire à celle choisie par JANSSEN et PAINTER (1974) puis PROBST (1990).

③ les indices de lithologie surtout et pédologie ont une faible variation d'un sous-bassin à l'autre, respectivement variables de 2 à 4 et de 2 à 6. Les indices de végétation et de pente sont mieux contrastés, variation de 5 à 10 pour les deux.

④ Enfin, ce tableau 21 nous informe que les bassins du Mbomou et de la Ouara sont structurellement peu sensibles à l'érosion avec une végétation très faiblement protectrice. A l'opposé, le bassin de la Lobaye est structurellement très favorable à l'érosion mais possède une couverture végétale très protectrice.

Tab 21: Valeurs des différents indices sur l'ensemble du bassin (en italique, peu sensible à l'érosion; en gras, très sensible à l'érosion)

bassin	surface en km ²	pente	invégét	inlith	inpédo
Uélé	139700	0.493	7	2,28	2
Bili	21400	0.409	6	1,95	2
Mbomou	51400	0.285	8	2,59	2,04
Ouara	22320	0.340	10	1,92	2,07
Chinko	52940	0.440	10	2,5	2,16
Mbari	27240	0.483	5	2,73	1,88
Kotto	80500	0.598	9	2,89	3,85
Ouaka	52560	0.568	10	2,68	3,44
Kémo	21980	0.483	10	3,28	2,93
Mpoko	23890	0.684	9	3,87	3,37
Lobaye	35360	0.938	6	3,84	5,70

invégét: indice de végétation; inlith: indice de lithologie; inpédo: indice de pédologie

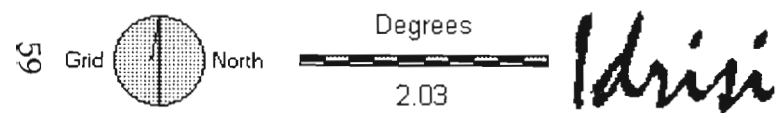
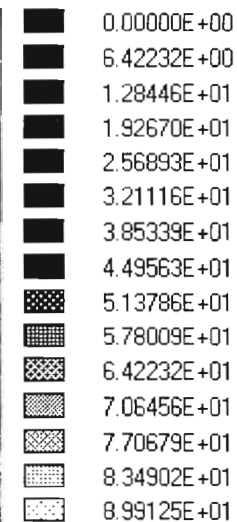
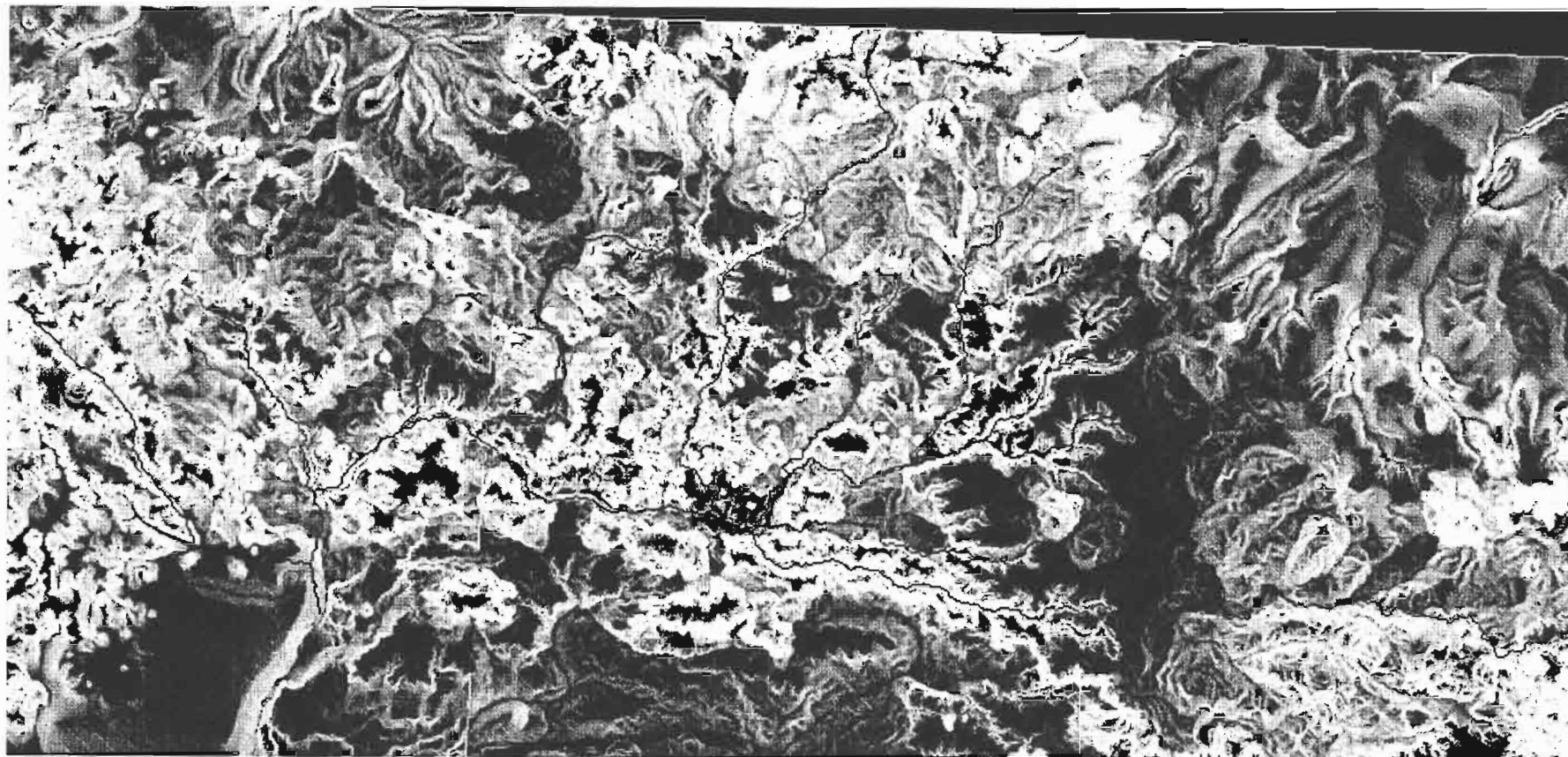
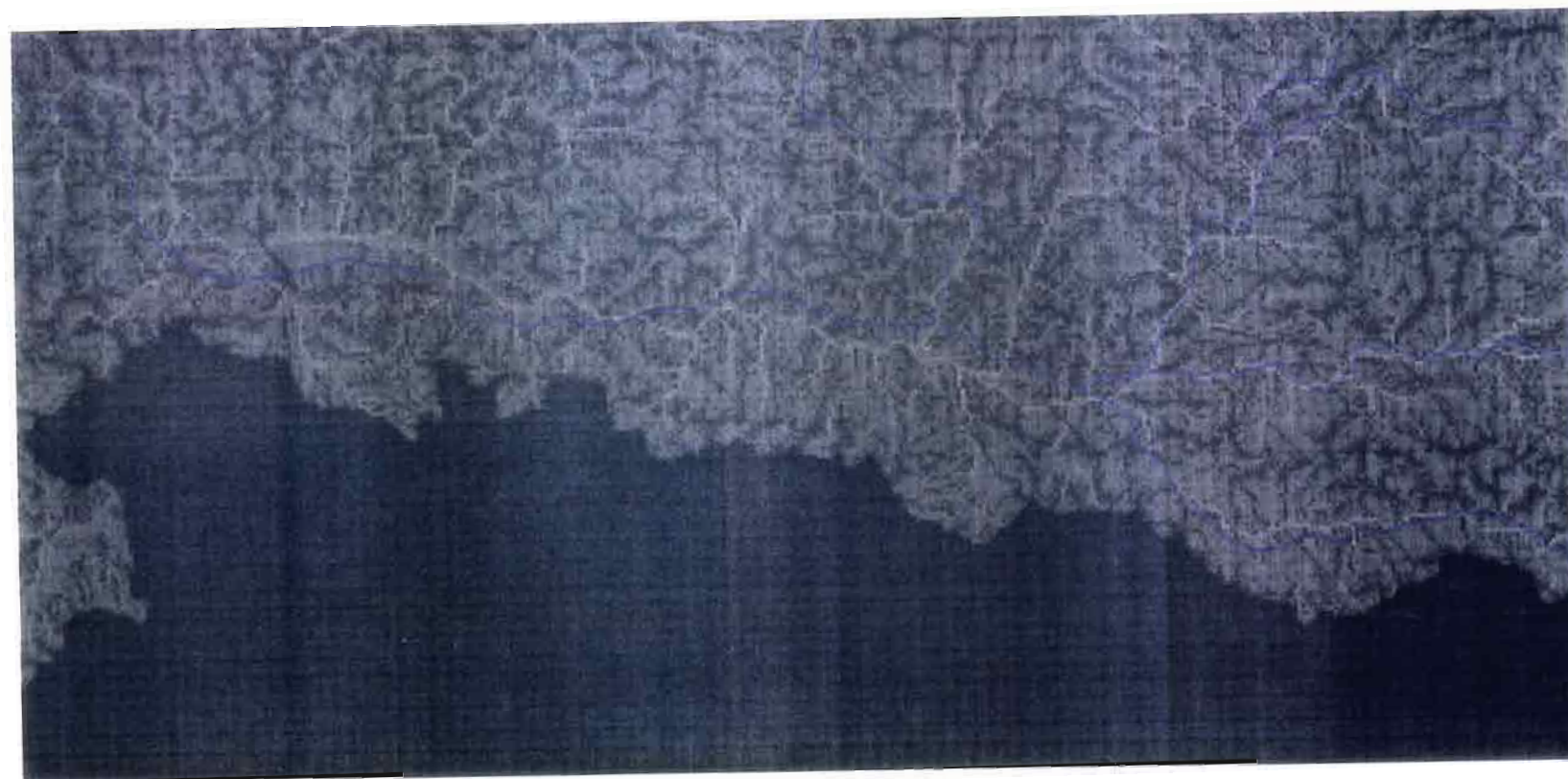


Fig18: Carte des pentes et réseau hydrographique digitalisé surimposé (en degré)



Meters



0 51

Fig19: Superposition du réseau hydrographique digitalisé (en bleu) avec le réseau hydrographique reconstitué à partir du MNT (en gris clair) (zone allant de l'Oubangui à Kouango au Mbomou avant Rafai et confluence avec l'Uélé et la Bili)

Carte du modèle numérique de terrain corrigée

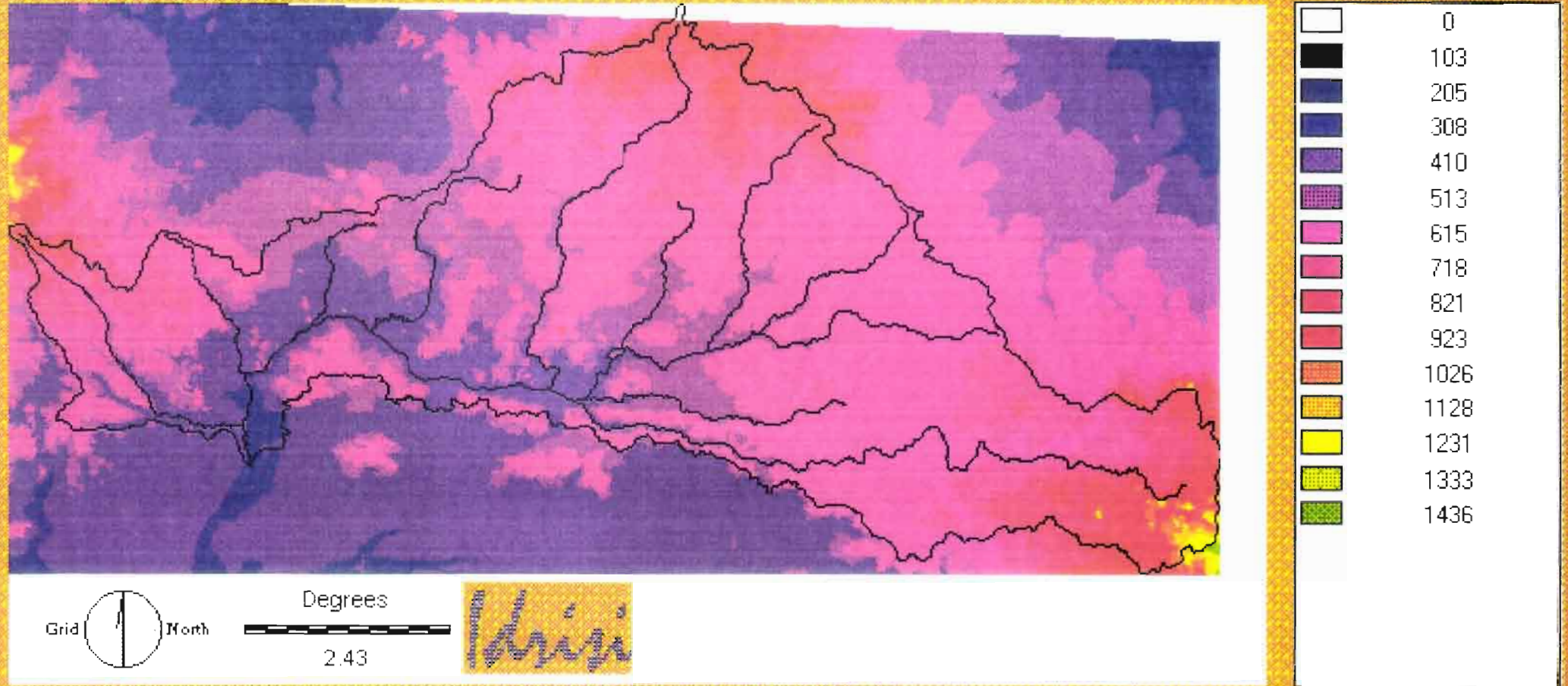


Fig20: Carte du MNT corrigé

CHAPITRE VI

MODELISATION DE L'EROSION SUR L'OUBANGUI A L'ECHELLE MENSUELLE

I-INTRODUCTION

Il s'agit de mettre en relation l'érosion (matières en suspension) avec l'ensemble des facteurs qui sont susceptibles de la contrôler et de déterminer le ou les facteurs qui agissent le plus sur son intensité. La procédure utilisée pour cette modélisation est une analyse de régression multiple effectuée sous SYSTAT (KIRBY, 1993).

Rappelons que l'intérêt majeur de cette étude est d'obtenir un modèle global d'érosion applicable à des bassins versants d'une superficie supérieure à 2000 km². L'érosion est appréhendée à partir de mesures de concentration de matières en suspension dans les eaux de rivières, c'est à dire à partir du flux de matière particulaires transportées. Afin de pouvoir comparer entre eux les flux de matières des différents bassins versants étudiés, ces flux sont ramenés à l'unité de surface: on parle alors de flux spécifique, ou encore érosion. Bien sûr, la contrainte majeure est la disponibilité des mesures de matières en suspension, les zones étudiées étant des régions peu peuplées, difficiles d'accès (réseau routier absent, climat difficile,...).

Deux hypothèses de travail ont été choisies. Dans un premier temps, comme JANSEN et PAINTER (1974) ou PROBST (1990), bien que la lame d'eau écoulée L_e dépend évidemment directement de la lame d'eau précipitée L_p , on recherche un modèle en utilisant ces deux paramètres comme variables explicatives, notre but étant d'obtenir une modélisation de l'érosion sur de grandes surfaces à partir de variables explicatives simples (végétation, lithologie, pédologie, pente) et le plus proche possible des observations. Dans un deuxième temps, on ne prend pas en compte la lame d'eau précipitée, du fait que cette information est souvent difficile à acquérir.

II- DONNEES DE MES DISPONIBLES

On dispose d'observations mensuelles de matières en suspension (MES) de 1991 à 1994 sur 11 stations du bassin de l'Oubangui moyen, avec de nombreux mois manquants (tab22). Quelques valeurs qui semblent douteuses ont été supprimées de la modélisation.

Tab22: Observations de MES sur le bassin de l'Oubangui
MES mensuelles de l'année 1991 (en mg/l)

bassin	Uélé	Bili	Mbomou	Ouara	Chinko	Mbari	Kotto	Ouaka	Kémo	Mpoko	Lobaye
station	Yakoma	Kolico	Zémio	Dembia	Rafaï	Loungoumba	Limassa	Bangao	Possel	Nzongo	Batalimo
octo	22	21.9								39.1	
nove	30	30.1								32.6	13.8
dec	29.9	21.5					8.7				

MES mensuelles de l'année 1992 (en mg/l)

bassin	Uélé	Bili	Mbomou	Ouara	Chinko	Mbari	Kotto	Ouaka	Kémo	Mpoko	Lobaye
station	Yakoma	Kolico	Zémio	Dembia	Rafaï	Loungoumba	Limassa	Bangao	Possel	Nzongo	Batalimo
jan		14.6									2.7
fev							3.7			9.7	4.7
mars	5.3						3			24.8	4
avril	2.9	2.4		3.9	0.3	1.9		30.6	10.5	22.2	9.6
mai	12.7	7					4.3		16.8	70.7	
juin	7.8	24.5					8.4	40.4	25.7	29.9	
juillet	42.2	20.6					12.3	89.9	23.9		
août	33.3	25.7					9.6	67.6	58.4		
sep	29.1	27.6					27.6	165.9	24		
octo	51.8	16.6		26.1	75.5	36.7	34.9	55.7	35.7		
nove	40.8	30.4					23	42.8	24.4	27.4	
dec	21.2	24.2					18.2	36.8	32.2	21.3	

en gras: valeurs douteuses supprimées de la modélisation

MES mensuelles de l'année 1993 (en mg/l)

bassin	Uélé	Bili	Mbomou	Ouara	Chinko	Mbari	Kotto	Ouaka	Kémo	Mpoko	Lobaye
station	Yakoma	Kolico	Zémio	Dembia	Rafaï	Loungoumba	Limassa	Bangao	Possel	Nzongo	Batalimo
jan	1.4	12.4					6	23	28.8	16	
fev							7.4	9.2	10	8.4	11.6
mars							4.8	11	12.4	11.2	11.8
avril	17.8	5					3.7	13.4	14.8	22.4	17.2
mai	22.4	14.2	23.2	13.4	13	28.6	5.4	15.6	13.4	19.6	12.6
juin			34.2				2.4	78.6	57.6	83	33
juillet			39.2				20			69.2	27
août			36.4				26.8	91	52.2	35.8	23.2
sep			8.2				45.8	62.2	27.8	39.8	15.6
octo	26.2	26	28.4				30.6	59	40.2	24.4	11.6
nove	12.8	23.6	17.4				16.2	42.8	48.4	27.2	7.2
dec	23.4	24.2					17.6	14.6		29.6	6.2

MES mensuelles de l'année 1994 (en mg/l)

bassin	Uélé	Bili	Mbomou	Ouara	Chinko	Mbari	Kotto	Ouaka	Kémo	Mpoko	Lobaye
station	Yakoma	Kolico	Zémio	Dembia	Rafaï	Loungoumba	Limassa	Bangao	Possel	Nzongo	Batalimo
jan			0.6				5.6	9.6	32.8		5.4
fev							10.2	2.2	15.8	10	5.4
mars							2.8	7.6	7.2	14.6	8
avril		24.2	21.4				5.6	19.2	9.4	10	12
mai	20.4		19.2	5.2	27.8	58.6	13.6	141.4	30.2	92	9
juin							4.6		16.8	54.6	12.2
juillet							18.6	86.2	17.2	62.2	24
août			11.6				21.4	58.2	11.6	52.2	23.6
sep		30	6.8				20.6	75.6	33.2	30.6	17.4
octo	19.6	17.2	15.2				11.8	24.6	41.8		13.4
nove	31.8	19.2	20	25	31.8	33	21	43.2	28.8	23.8	
dec											

Les 11 stations de mesures sont réparties sur les principaux affluents du Mbomou puis de l'Oubangui au niveau de leur confluence avec l'axe fluviale principal (fig21). Certaines stations ont été suivies mensuellement, il s'agit de celles situées sur la Mpoko, la Lobaye, la Ouaka, le Mbomou, la Kotto, la Kémo, l'Uélé et la Bili. D'autres n'ont eu des mesures que deux fois par an: le Chinko, la Ouara et le Mbari. Huit stations seront utilisées pour la recherche du modèle et trois serviront à la validation.

La première étape consiste à transformer l'unité des données de matières en suspension de mg/l en tonne/km²/mois. On rappelle que le point de mesure unique dans le mois est par hypothèse assimilé à la concentration mensuelle. Cette transformation s'obtient en multipliant la concentration par le débit (Q) et en divisant par la surface (S):

$$\text{MES (t/km}^2\text{/mois)} = \text{MES(mg/l)} * \frac{Q(\text{m}^3/\text{s})}{S(\text{km}^2)} * t$$

avec t le nombre de secondes par mois.

III-MODELE A PARTIR DE Le ET Lp

III-1 MODELISATION

Pour cette hypothèse, on a utilisé les observations de MES jusqu'à fin 1992, puisque la lame d'eau précipitée n'est pas disponible après cette date. Cela fait un total de 65 observations. Le choix du type de modèle testé est basé sur la forme des modèles proposés par JANSEN et PAINTER (1974). Le tableau 23 donne la signification des 9 modèles testés en fonction des variables introduites

Tab23: Coefficients R² de la variance expliquée en fonction des variables introduites dans le modèle.

modèle	variables							R ²
	Lp	Le	végétation	lithologie	pédologie	pente	surface	
1*	+	+	+					0.87
2	+	+	+	+	+	+	+	0.87
3	+	+	+	+	+	+		0.87
4	-	+	+	+	+	+		0.867
5	+	+	ln	ln	ln	+	ln	0.89
6	+	+	ln	ln	ln	ln	ln	0.89
7	+	ln	ln	ln	ln	ln	ln	0.79
8	ln(lp+1)	ln	ln	ln	ln	ln	ln	0.78
9	+	+	ln	+	+	+	ln	0.88

+: variable introduite dans le modèle; ln: logarithme népérien de la variable; *: modèle trouvé par la fonction stepwise, en gras: modèle choisi.

Le modèle trouvé par la fonction STEPWISE n'utilise que 3 variables explicatives: la lame d'eau précipitée, la lame d'eau écoulée et la végétation. En introduisant le logarithme népérien des indices de végétation, lithologie, pédologie, pente et surface comme variables explicatives supplémentaires (cas de modèle n°6), en améliore légèrement la signification du modèle (R² passe de 0,87 à 0,89) (tab 23)

Le modèle choisi n°6 est le suivant:

$\text{MES} = 0,678 + 0,001 \cdot \text{Lp} + 0,03 \cdot \text{Le} + 1,13 \cdot \ln(\text{invégét}) - 0,815 \cdot \ln(\text{inlith}) - 0,505 \cdot \ln(\text{inpedo}) + 1,263 \cdot \ln(\text{pente}) - 0,094 \cdot \ln(\text{surface})$		
$R^2=0,89$	$N= 65$	

avec:

Lp	: lame d'eau précipitée en mm
Le	: lame d'eau écoulée en mm
surface	: la surface en km ²
inlith	: indice de lithologie
invégét	: indice de la végétation
inpedo	: indice de la pédologie
MES	: l'érosion en t/km ² / mois
pente	: la pente moyenne en %

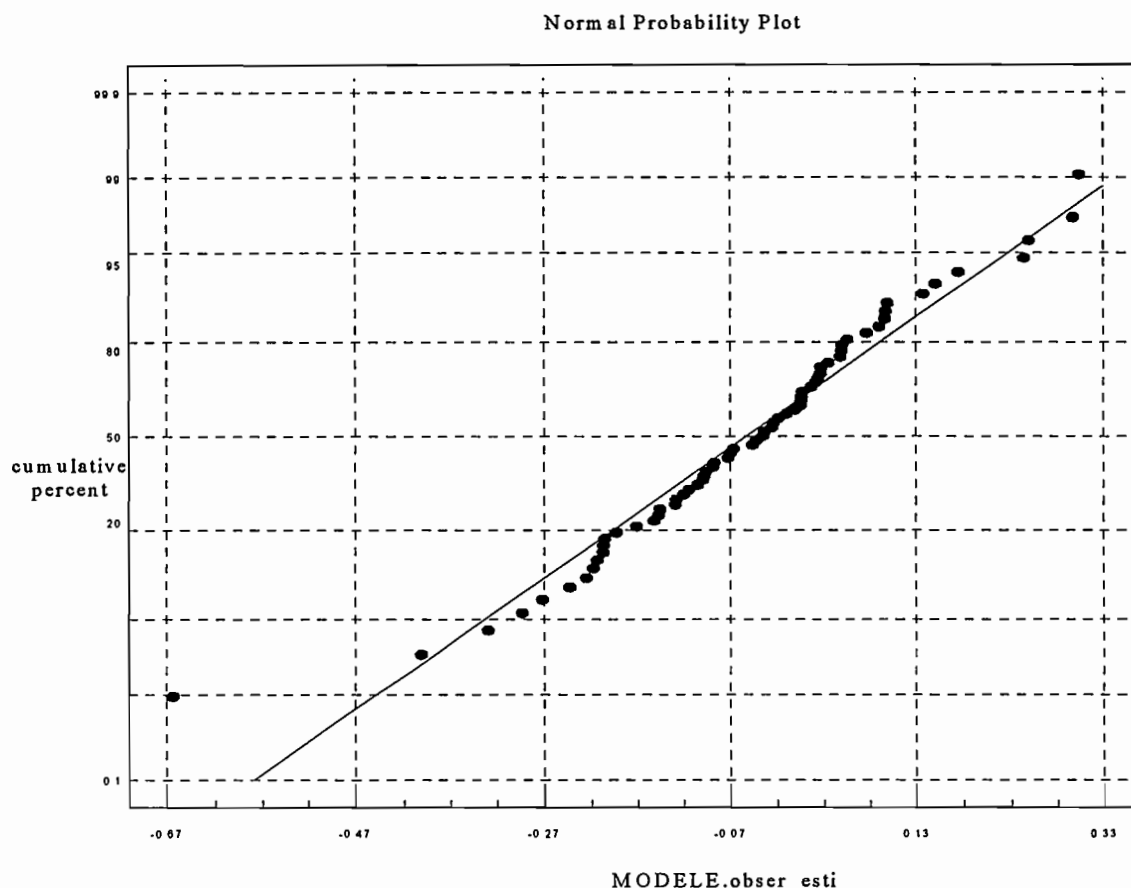
Ce modèle été choisi parce que d'une part il admet le plus fort coefficient R^2 et d'autre part il est le plus proche de la forme des modèles de référence. La figure 22 montre qu'il existe une très bonne correspondance entre les valeurs observées et estimées. Les bassins les moins bien expliqués sont la Kémo, la Ouaka et surtout la Kotto. Pour ce dernier, l'érosion estimée est largement supérieure à celle observée en début de saison humide. Cela peut être dû au fait que 100 km à l'amont du point de prélèvement, ce cours de la Kotto est coupé par une falaise de grès qui a donné naissance aux fameuses "chutes de Kembé" et un grand lac où doivent sédimenter les matières en suspension de l'amont.

L'étape suivante consiste à tester l'ajustement et la normalité du modèle. Les tests utilisés sont:

- 1-la répartition des résidus (observation - estimation) par rapport à la droite d'Henry,
- 2-le test du χ^2 ,
- 3- le test de KOLMOGOROV et SMIRNOV.

La figure 23 montre la répartition trouvée par rapport à la répartition théorique représentée par la droite d'Henry. A première vue, cet ajustement à une loi normal semble satisfaisant:

Fig23: Test de normalité du modèle LpLe



Après avoir calculé le résidu (observée-estimée), on vérifie la normalité de cette population par le test du χ^2 sous STATGRAPHICS. Le résultat est:

$$\chi^2 = 3,54$$

$$\gamma = 5$$

$$\alpha = 61\%$$

avec 19 classes, γ étant le nombre de degrés de liberté, α le niveau de signification.

Si nous nous fixons un seuil α de 5%, nous trouvons dans les tables qu'il y a moins de 5% de chance d'obtenir par hasard un χ^2 supérieur à 11. C'est à dire que même si la concordance était parfaite, il y aurait 5% de chance que le χ^2 dépasse 11.

Afin de confirmer le test du χ^2 , on applique le test de KOLMOGOROV et SMIRNOV. Ce test est basé sur la comparaison de la fonction cumulative des fréquences pour l'échantillon avec la fonction de répartition pour la population. Le but de ce test est de déterminer l'écart maximum existant en valeur absolue entre ces deux fonctions et de comparer cet écart à des valeurs critiques particulières.

Ces valeurs particulières sont données suivant le niveau de signification, qui est égal à $\frac{1,36}{\sqrt{n}}$ pour 0,05 et $\frac{1,63}{\sqrt{n}}$ pour 0,01 avec n, le nombre d'échantillons. L'hypothèse est rejetée lorsque l'écart maximum observé est supérieur ou égal à l'un ou l'autre de ces valeurs. Dans notre cas les valeurs théoriques sont respectivement 0,16868 et 0,20217 puisque n est égal à 65. Le calcul donne respectivement 0,0717127 et 0,0599111 pour une valeur de signification égale à 0,89. L'hypothèse est donc acceptée.

En conclusion, le résidu suit une loi normale, et d'après le test du χ^2 cette loi caractérise la population totale. On peut donc calculer l'intervalle de confiance. On appelle intervalle de confiance à α % sur l'estimation y d'un paramètre $\hat{y}$, l'intervalle limité par deux bornes p1 et p2 telles qu'on a $1-\alpha$ % de chance que la valeur estimée soit à l'intérieur de l'intervalle (p1,p2).

Soit $u_{1-\frac{\alpha}{2}}$ la variable réduite de Gauss qui correspond à la fréquence $1-\alpha/2 = 0,975$ (ici on prend comme niveau de signification 5% qui est la valeur la plus utilisée) d'où $u_{1-\frac{\alpha}{2}} = 1,96$. L'intervalle est donné par une multiplication de la variable réduite de Gauss par l'écart type, l'écart type de notre modèle est de 0,17 d'où un intervalle de 0,33. La valeur estimée sera donc égale à $y \pm 0,35$, y étant la valeur donnée par le modèle.

III-2 VALIDATION DU MODELE

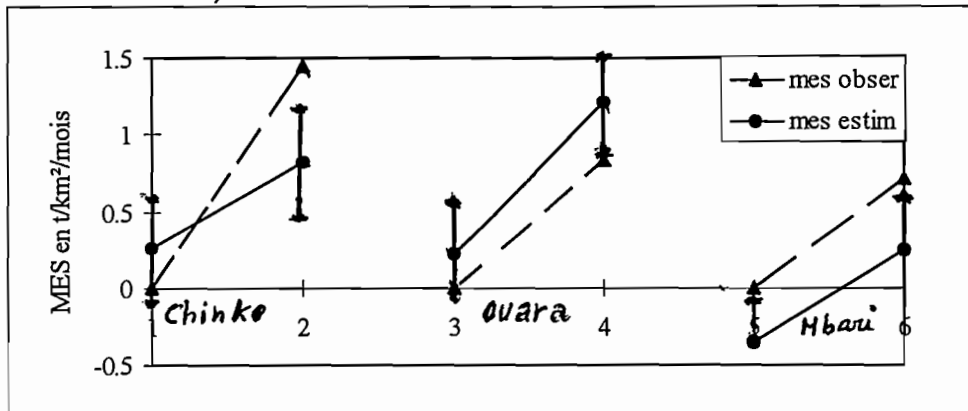
La validation du modèle est effectuée sur les observations des stations du Mbari, du Chinko et de la Ouara. Sur chacune de ces stations, on dispose de 2 observations de MES pendant l'année 1992 (tab 24).

Tab24: Observations de MES pour la validation du modèle (en t/km²/mois)

	Avril 1992	Octobre 1992
Chinko	0.0005	1.4477
Ouara	0.0027	0.8362
Mbari	0.0017	0.727

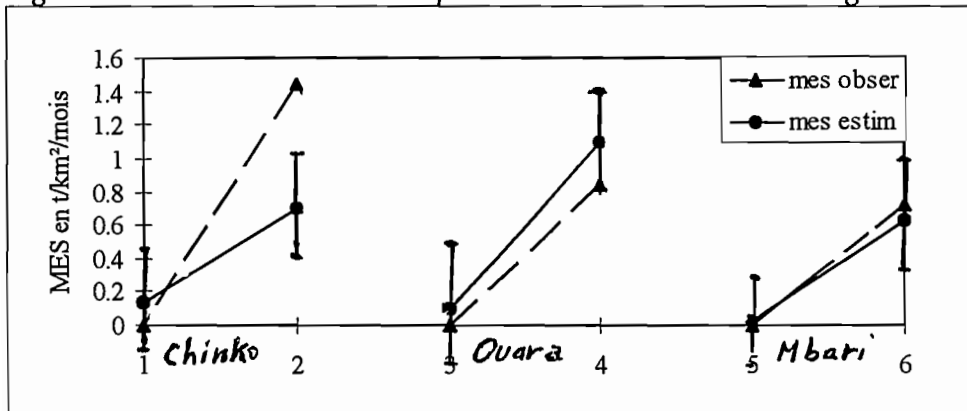
Sur la figure 24, les deux premières observations sont les observations effectuées sur le Chinko, la troisième et quatrième sur la Ouara, la cinquième et sixième sur le Mbari. La validation du modèle est satisfaisante: 5 points sur 6 entrent dans l'intervalle de confiance. La seule exception correspond au mois d'octobre sur le Chinko; la valeur observée est alors très largement supérieure à la valeur estimée. Plus dans le détail, on note que l'érosion semble surestimée pour la Ouara et sous-estimée pour le Mbari. Pour ce dernier, on trouve une valeur négative d'érosion en avril.

Fig24: Résultat de la validation du modèle LpLe (avec intervalle de confiance à 5% sur les valeurs estimées)



Afin d'affiner le modèle pour ces 3 bassins où nous possédons que 2 point d'observation, on choisit de corriger les valeurs d'indice d'après les enseignement du terrain. Aussi, on note que sur le bassin du Mbari il existe une forte activité minière ayant largement défrichée la zone, que sur les bassins de la Ouara et du Chinko il semble y avoir plus de forêt humide que ce qu'on trouve sur la carte de végétation (fig17) En effet, elle à été construite d'après des observations des années 50 et 60. Or BOULVERT (1992) note que le dépeuplement de l'Est de la Centrafrique a eu pour conséquence une extension de la forêt humide dans cette zone. On peut donc justement supposer que les indices de végétation sur les bassins de la Ouara et du Chinko sont surestimés. En tenant compte de ces différentes remarques, on a augmenté l'indice de végétation sur la Mbari en prenant 7 au lieu de 5 et on a diminué l'indice sur les deux autres bassins on prenant 9 au lieu de 10. La figure 25 illustre le résultat après cette modification.

Fig25: Résultat de la validation après correction des indices de végétation



Après cette correction de l'indice de végétation, valeurs estimées et observées sont très proches, surtout pour le Mbari où la valeur estimée d'avril n'est plus négative. Par contre, la forte valeur d'octobre sur le bassin du Chinko reste un point remarquable. Cela est due à l'hypothèse que le prélèvement de MES qui s'effectue une seule fois par mois est représentatif de la moyenne de concentration du mois, alors que la concentration de MES est très variable d'un jour à l'autre, surtout pendant les mois de début de saison humide, tel octobre.

Fig 21: Carte de localisation des stations de prélèvements de MES

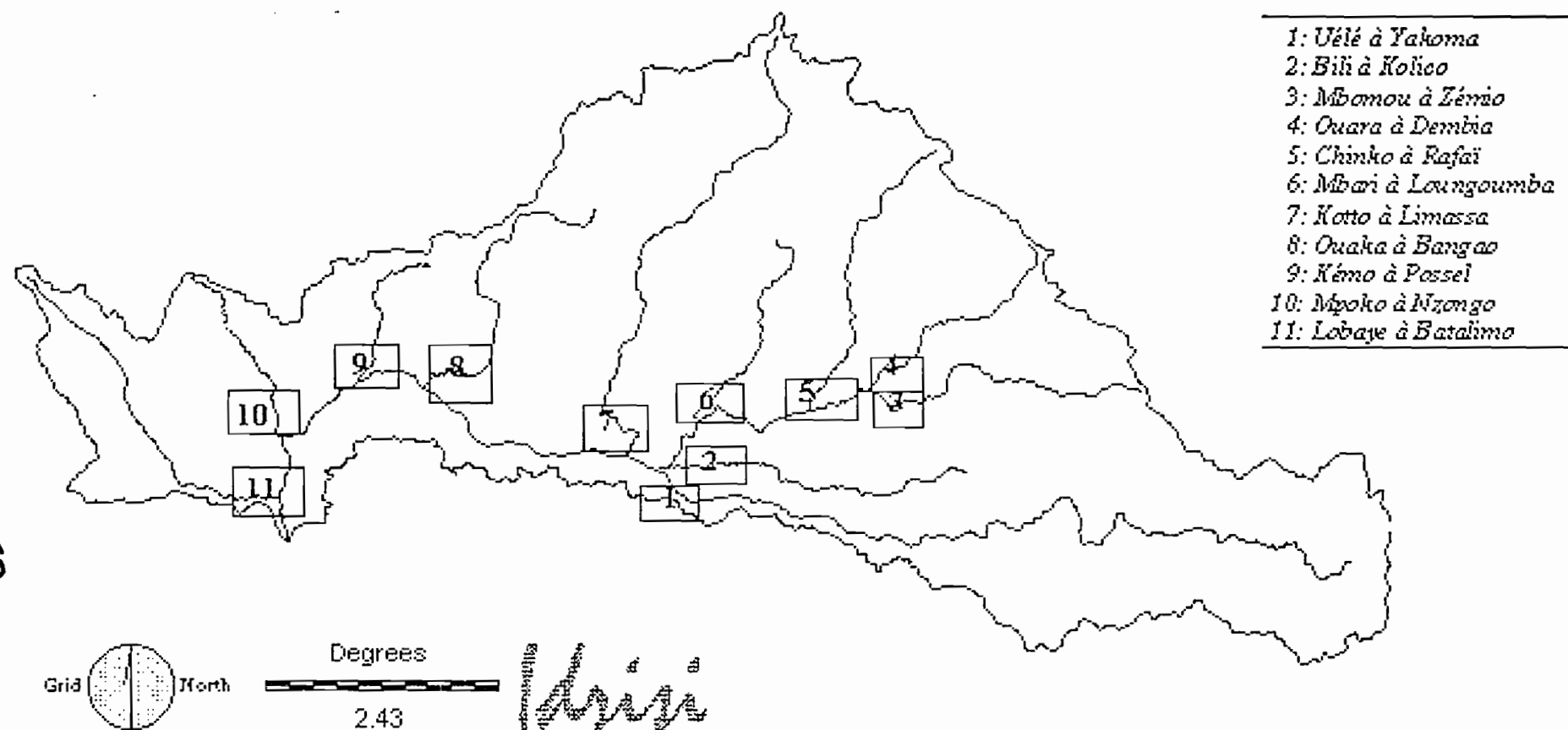
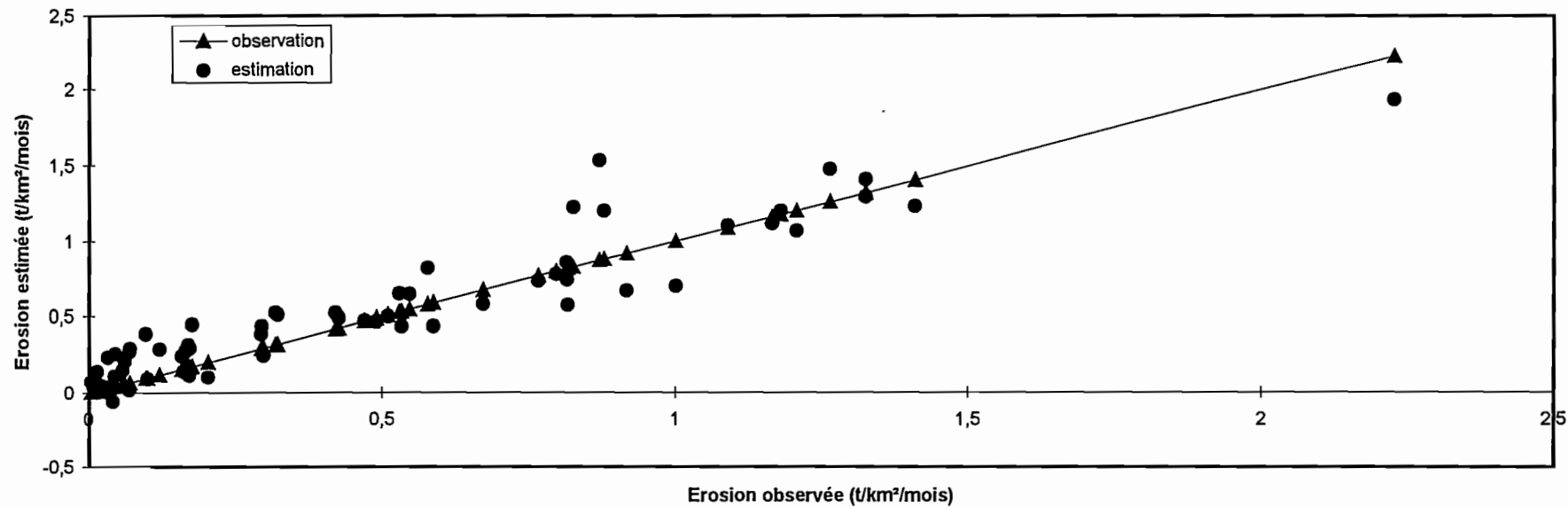
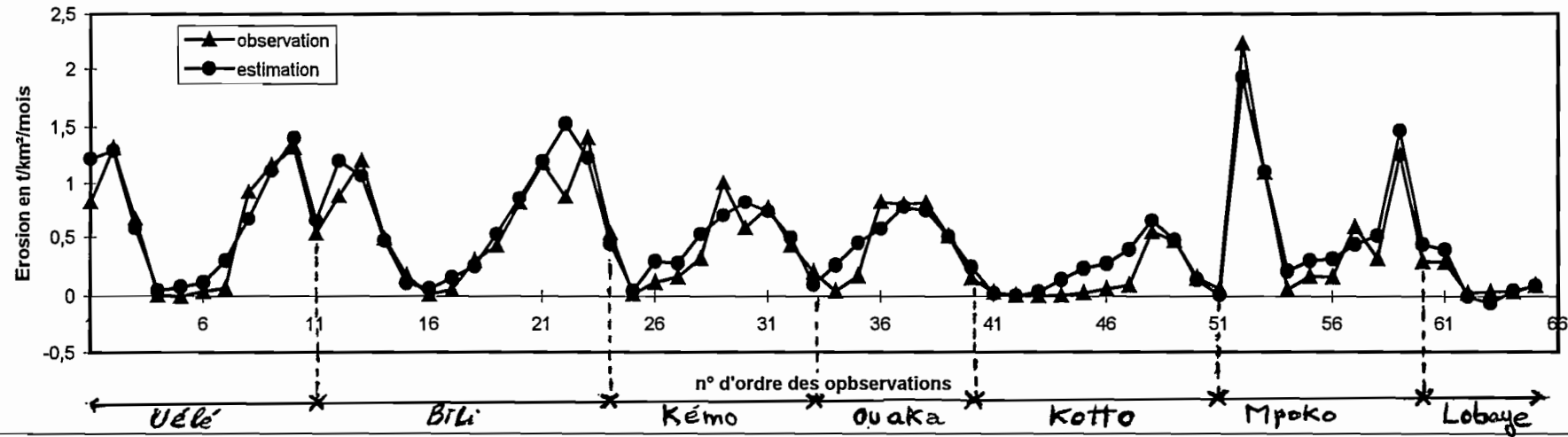


Fig22: Comparaison entre les valeurs observées et les valeurs estimées d'érosion (modèle LpLe) (les observation sont classées par ordre chronologique et par sous-bassin versant)



III-3 COMPARAISON AVEC LES MODELES DE JANSEN ET PAINTER ET DE PROBST

Le but de ce paragraphe est de comparer l'influence de chaque variable entre le modèle ainsi trouvé et les modèles proposés par JANSEN et PAINTER (1974) et puis PROBST (1990). Avant tout, remarquons que ces 2 modèles sont faits à l'échelle annuelle alors que le notre est à l'échelle mensuelle.

Tab25: Comparaison des modèles de JANSEN et PAINTER (1974), de PROBST (1990) et de cette étude.

variable	Lp	Le	invégét	inpédo	inlith	pente	altitude	surface
Jansen	+	+	-	*	+	*	+	-
Probst	+	+	-	*	+	+	*	*
Ghiloufi	+	+	+	-	-	+	*	-

+ signifie que le coefficient de la variable est positif; - signifie que le coefficient de la variable est négatif; * signifie que la variable n'a pas été utilisée.

Comme indiqué dans le chapitre précédent, l'indice de végétation de JANSEN et PAINTER puis de PROBST a une signification contraire à celui de cette étude. Par conséquent, d'après le tableau 25, on constate que toutes les variables jouent le même rôle sur l'érosion dans tous les modèles à l'exception de la lithologie. Par ailleurs, notre modèle est le seul à intégrer un indice de pédologie.

IV-MODELE A PARTIR DE Le

IV-1 MODELISATION

L'intérêt de cette modélisation est d'éliminer la lame d'eau précipitée des variables explicatives, car cette information est souvent d'acquisition difficile. N'ayant plus la contrainte de la lame d'eau écoulées jusqu'en 1994, on peut donc utiliser pour cette hypothèse toutes les observations de MES disponibles, c'est à dire de 1991 à 1994, ce qui fait une population totale de 149 indices

Comme précédemment, plusieurs modèles ont été testés (tab 26).

Tab 26: Coefficient R^2 de la variance expliquée en fonction des variables introduites dans le modèle

modèles	variables						R^2
	Le	végétation	lithologie	pédologie	pente	surface	
1*	+	+					0.820
2	+	ln				ln	0.820
3	+	ln	ln	ln	ln	ln	0.830
4	+	+	+	+	+	+	0.827
5	+	ln	ln	ln	+	ln	0.828
6	ln	+	ln	ln	+	ln	0.760
7	+	+		+			0.820
8	+	+	+	+	+		0.825

+: variable introduite dans le modèle; ln: logarithme népérien de la variable; *: modèle trouvé par la fonction stepwise, en gras: modèle choisi.

La fonction STEPWISE confirme que l'indice de végétation influence le plus l'intensité de l'érosion. En ajoutant d'autres variables explicatives, on améliore que très peu la qualité du modèle. Finalement, le modèle donnant le plus fort R^2 est choisie. Il s'agit du modèle n°3:

$\text{MES} = 0,094 + 0,033 \cdot \text{Le} + 0,939 \cdot \ln(\text{invégét}) - 0,542 \cdot \ln(\text{inlith}) - 0,245 \cdot \ln(\text{inpedo}) + 1,752 \cdot \ln(\text{pente}) - 0,081 \cdot \ln(\text{surface})$	$R^2=0,83$	$N=149$
--	------------	---------

Avec ce modèle, la correspondance entre valeurs observées et valeurs estimées reste très satisfaisante (fig26). Seules quelques pics de MES observées, sont sous estimées. Pour tester la validité de ce modèle, on a effectué les mêmes tests statistiques que précédemment. L'ajustement à une loi normale de la population des résidus est nettement moins satisfaisant (fig27). De même, les tests du χ^2 et de KOLMOGOROV et SMIRNOV l'hypothèse que le résidu suit une loi normale et qu'il soit représentatif de la population. Cela doit être dû au fait qu'une grande partie des observations ajoutées à la population du précédent modèle possède une valeur d'érosion faible, alors que pour les valeurs observées supérieures à 0,3 t/km²/mois la compacité du nuage de points reste sensiblement la même (fig26).

Fig27: Test de normalité du modèle Le

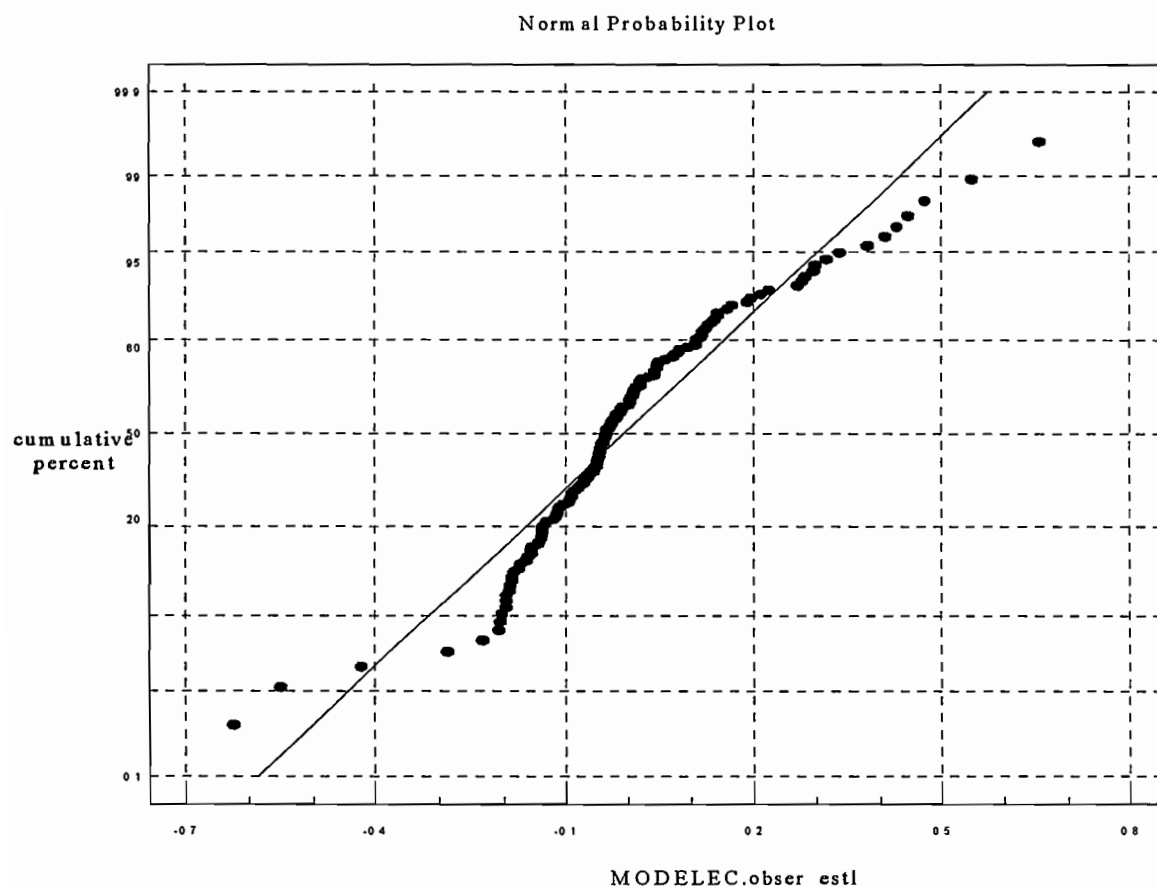
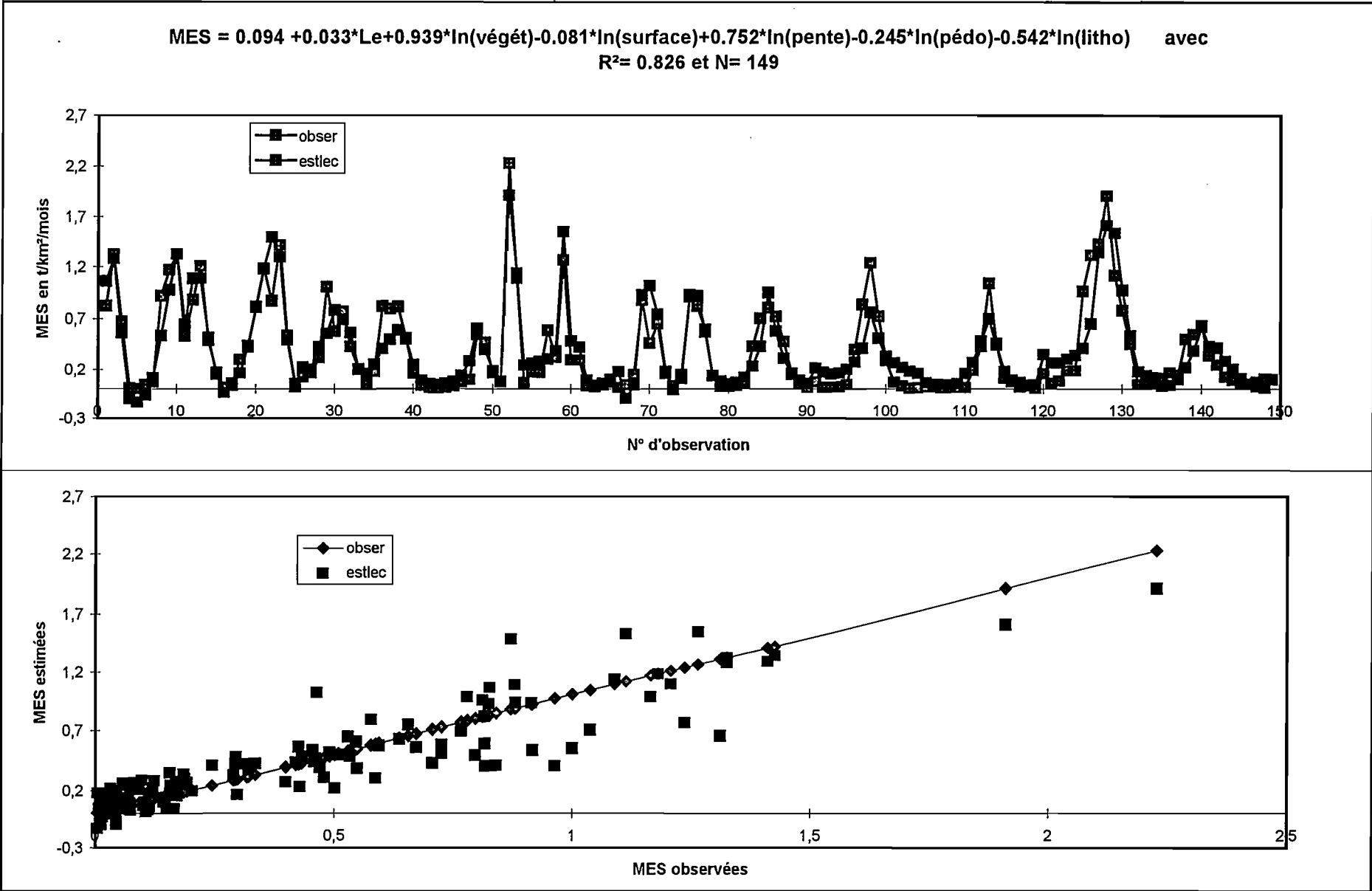


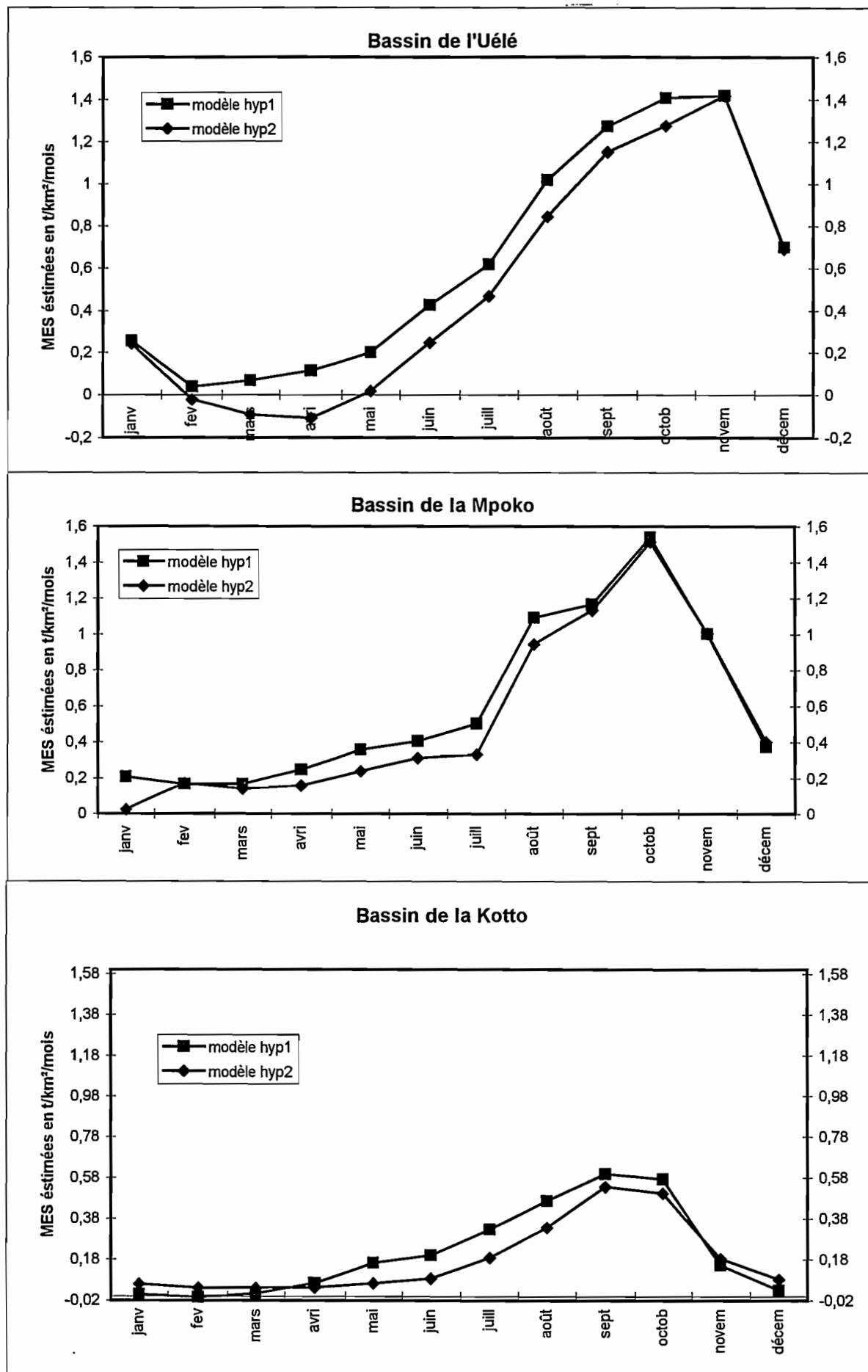
Fig26: Comparaison entre les valeurs observées et estimées de MES (2ème hypothèse)



IV-2 COMPARAISON DU MODELE LpLe ET DU MODELE Le

Malgré le rejet des tests statistiques, nous avons voulu comparer les résultats donnés par le modèle LpLe (hypothèse 1) et le modèle Le (hypothèse 2). Pour cela, nous avons utilisé les 2 modèles pour estimer l'érosion moyenne sur 3 bassins versants tirés au hasard (Uélé, Mpoko et Kotto), à partir des lames d'eau précipitées et écoulées moyenne mensuelle inter-annuelles (fig28). Le modèle Le a légèrement tendance à sous-estimer l'érosion. Cependant, la comparaison est globalement très satisfaisante, à l'exception des mois de saison sèche sur l'Uélé où le modèle Le donne une érosion moyenne mensuelle négative.

Fig 28: Comparaison des érosion mensuelles estimées par le modèle LpLe (hypothèse 1) et le modèle Le (hypothèse 2)



V- TEST DE SENSIBILITE DES VARIABLES

Il s'agit ici de tester la sensibilité du modèle choisi par rapport à la valeur calculée des variables explicatives que qui sont les indices de végétation, de lithologie et de pédologie. On rappelle que ces indices ont été calculés au chapitre V à partir d'attributs associés à chaque classe descriptive de la variable considérée, valeurs d'attribut choisies d'après la bibliographie.

La méthode de test consiste à faire varier la valeur des attributs de chaque classe d'une variable donnée et de comparer le résultat de la modélisation effectuée avec ce nouvel indice.

V-1 TEST DE L'INDICE DE VEGETATION

Le tableau 27 donne les différents attributs choisis pour chaque type de végétation pour trois tests (le test 3 correspondant au modèle initial). A partir de ces nouvelles valeur d'attribut, on a calculé les indices de végétation sur chacun des sous bassins versants. Ces nouveaux indices sont introduits dans le procédure de modélisation pour déterminer les nouveaux paramètres de chaque variable en fonction de l'indice utilisé tableau 28.

Tab27: Test des attributs de la variable végétation

n° test	savane	forêt sèche	forêt dense humide
1	10	7	1
2	8	3	1
3*	10	4	1

*: modèle initial

Tab28: Les paramètres et le coefficient R^2 du modèle LpLe en fonction des tests sur les attributs de la variable végétation

n° test	const	Lp	Le	Ln(surface)	Ln(inlith)	Ln(invégét)	Ln(inpédo)	ln(pente)	R^2
1	0.723	0.001	0.031	-0.105	-0.782	0.969	-0.306	1.049	0.882
2	0.537	0.001	0.031	-0.09	-0.792	0.979	-0.273	1.015	0.884
3*	0.678	0.001	0.03	-0.094	-0.815	1.130	-0.505	1.23	0.887

*: modèle initial

Le résultat de ces 3 tests confirment que les attributs utilisés lors de la modélisation initiale donnent le meilleur coefficient R^2 . On note également une très faible sensibilité du modèle à cette variation de la valeur des attributs, aussi bien au niveau du R^2 qu'au niveau des paramètres.

V-2 TEST DE L'INDICE DE LITHOLOGIE

Les nouveaux attributs utilisés pour la variable lithologie sont donnés dans le tableau 29.

Tab29: Test des attributs sur la variable lithologie.

n° test	roche plutonique	grès	détritique	volcanique	carbonaté
1	3	3	5	1	8
2	2	2	5	1	8
3*	2	2	4	1	10

*: modèle initial

On procède comme pour la variable végétation et les conclusions sont identiques (tab30). Le résultat des trois tests confirment que les attributs utilisés lors de la modélisation initiale donne le meilleur coefficient R^2 . Et on note une très faible sensibilité du modèle à cette variation de la valeur des attributs, les paramètres ayant encore moins variés que lors du test précédent sur l'indice de végétation.

Tab30: Les paramètres et le coefficient R^2 du modèle LpLe en fonction des tests sur les attributs de la variable lithologie

n° test	const	Lp	Le	Ln(surface)	Ln(inlith)	Ln(invégét)	Ln(inpédo)	ln(pente)	R^2
1	0.084	0.001	0.031	-0.02	-0.80	1.033	-0.595	1.123	0.884
2	0.411	0.001	0.031	-0.018	-0.861	0.978	-0.675	1.270	0.887
3*	0.678	0.001	0.03	-0.094	-0.815	1.130	-0.505	1.23	0.887

*: modèle initial

V-3 TEST DE L'INDICE DE PEDOLOGIE

Les nouveaux attributs utilisés pour la variable pédologie sont donnés dans le tableau 31.

Tab31: Test des attributs sur la variable pédologie

n° test	Ferr très induré	ferr moy induré	ferr peu induré	ferr non induré	jeune d'érosion
1	1	2	4	8	9
2	1	3	5	7	9
3	1	2	4	6	7
4*	1	2	3	6	8

*: modèle initial

Pour la variable pédologie, les attributs utilisés dans le modèle initial ne donne pas le meilleur R^2 (tab32). Cependant, la variation est très faible. La sensibilité du modèle à cette variation de la valeur des attributs n'est pas plus importante que pour les 2 variables précédentes. L'indice de pédologie retenu précédemment semble surestimer légèrement l'influence de la qualité des sols sur l'érosion.

Tab32: Les paramètres et le coefficient R^2 du modèle LpLe en fonction des tests sur les attributs de la variable pédologie

n° test	const	Lp	Le	Ln(surface)	Ln(inlith)	Ln(invégét)	Ln(inpédo)	ln(pente)	R^2
1	0.46	0	0.031	-0.083	-0.772	1.091	-0.372	1.192	0.888
2	1.2	0.001	0.031	-0.098	-0.894	1.150	-0.68	1.35	0.887
3	0.534	0.001	0.031	-0.080	-0.794	1.076	-0.471	1.190	0.888
4*	0.678	0.001	0.03	-0.094	-0.815	1.130	-0.505	1.23	0.887

*: modèle initial

CHAPITRE VII

SPATIALISATION DES RESULTATS SOUS

IDRISI ET INTERPRETATION

I-INTRODUCTION

L'un des intérêts du système d'information géographique est de permettre d'effectuer des opérations entre différentes couches d'informations d'une manière aisée et de permettre une visualisation d'ensemble de la répartition spatiale des intensités d'une variable donnée sur l'ensemble du bassin. Ce chapitre est une application du modèle testé dans la partie précédente sur le logiciel IDRISI afin de calculer et visualiser la répartition mensuelle moyenne de l'érosion MES sur l'ensemble du bassin versant moyen de l'Oubangui.

II-PREPARATION DES DONNEES

La modélisation de l'érosion est effectuée en utilisant le modèle LpLe (hypothèse 1) et les lames d'eau précipitées et calculées moyenne mensuelles inter-annuelles. Avant tout, il faut préparer toutes les couches d'information nécessaires pour ce modèle, et notamment les carte mensuelles moyennes inter-annuelles de Lp et Le.

Pour les indices de végétation, de pédologie, de lithologie, de pente et la surface, il suffit de créer une seule carte pour chaque variable (remarque: on utilise le logarithme népérien de ces indices pour créer ses différentes couches d'information).

II-1 CARTES DE LAME D'EAU PRECIPITEE MOYENNE MENSUELLE INTERANNUELLE

Ces cartes sont déterminées comme suit:

- ↳ calcul de lame d'eau précipitée mensuelle inter-annuelle 1990-1992 sur chacun des sous-bassins versants;
- ↳ reclassification de la carte des sous-bassins en affectant à chacun des sous-bassins versants un attribut égal à sa lame d'eau précipitée mensuelle multipliée par le paramètre correspondant à la variable Lp du modèle choisi.

Par cette procédure, on obtient 12 cartes de lames d'eau précipitée mensuelles. Par exemple, pour le mois de janvier, on a sur l'Uélé une lame d'eau précipitée inter-annuelle égale à 22,6 mm; le paramètre de Lp dans le modèle étant 0,001 on affecte pour le bassin de l'Uélé un attribut égal à: $22,6 \times 0,001 = 0,0226$.

II-2 CARTES DE LAME D'EAU ECOULEE MOYENNE INTERANNUELLE

On utilise la même procédure que précédemment et on obtient 12 cartes de lames d'eau écoulee mensuelles.

III-APPLICATION DU MODELE

Une fois que toutes les couches d'information sont préparées sous forme d'une carte, il reste maintenant à effectuer les opérations entre ces cartes en respectant l'équation du modèle LpLe:

$$Er = 0.678 + 0.001Lp + 0.03Le - 0.0941\ln(\text{surface}) - 0.815\ln(\text{inlith}) + 1.13\ln(\text{invégét}) - 0.505\ln(\text{inpedol}) + 1.263\ln(\text{pente})$$

Vu le nombre important d'opérations à effectuer, on automatise la procédure en créant une macro sous IDRISI pour faciliter la tâche. La macro est la suivante:

overlay x	1	%1	%2	test1
overlay x	2	test1	insurfa	test2
overlay x	2	test2	inlitho	test3
overlay x	1	test3	inveget	test4
overlay x	2	test4	inpedol	test5
overlay x	1	test5	inpente	test6
scalar x		test6	%3	1
				0.678

avec:

➤ Pour l'application overlay, la colonne n°2 indique le numéro de l'opération (si = 1 addition si =2 soustraction), la colonne n°3 indique la première variable, la colonne n°4 indique la deuxième variable et la cinquième colonne est le résultat de l'opération.

Remarque: si la variable change d'une opération à l'autre, on met %i et dans ce cas, lors de l'exécution de la macro on doit taper le nom de la variable désirée.

- Pour l'application scalar, la colonne n°4 indique l'opération à effectuer (1= addition, 2= soustraction) et la colonne 5 donne la constante à additionner.
- %1 représente la carte de lame d'eau précipitée du mois i multipliée par le paramètre de Lp.
- %2 représente la carte de lame d'eau écoulée du mois i multipliée par le paramètre de Le.
- insurfa représente la carte du log népérien de la surface multipliée par son paramètre.
- inlitho: représente la carte du log népérien de l'indice de lithologie multipliée par son paramètre.
- invégéta: représente la carte du log népérien de l'indice de végétation multipliée par son paramètre.
- inpedol: représente la carte du log népérien de l'indice de pédologie multipliée par son paramètre.
- inpente: représente la carte de la pente moyenne multipliée par son paramètre.
- %3 c'est la carte de l'érosion du mois i, résultat de la modélisation.

IV-PRESENTATION DES RESULTATS

IV-1 CRITIQUE DES RESULTATS BRUTS

La procédure de modélisation décrite fournit donc une valeur mensuelle moyenne interannuelle d'érosion pour chaque sous-bassin versant constitutif du bassin moyen de l'Oubangui. Avant de visualiser les résultats du calcul, on utilise comme filtre le fait que si l'érosion estimée est négative alors la valeur retenue est égale à zéro.

Pour le bassin du Mbomou les valeurs de l'érosion estimée sont nulles sur huit mois de l'année. En effet, les observations de MES montrent que ce sous-bassin enregistre les valeurs d'érosion les plus faibles du bassin de l'Oubangui. Cela est dû à une faible valeur de la pente, le Mbomou admet la pente la plus faible sur l'ensemble du bassin de l'Oubangui (MALIBANGAR et al., 1992); mais aussi à la présence sur ce bassin d'une grande extension de cuirasses latéritiques. Pour corriger les résultats du modèle concernant le Mbomou, on a choisi de modifier la valeur des indices de lithologie et pédologie de ce bassin en tenant compte des remarques ci-dessus et en se calant sur le fait que la valeur d'érosion mensuelle ne doit pas être négative (fig29). Le nouvel indice de lithologie est de 1,4 au lieu de 2,59 et le nouvel indice de pédologie de 2 au lieu de 2,038.

Les nouveaux résultats de la modélisation sont présentés dans le tableau 33. Notons que les observations de MES sur le Mbomou ont débuté en 1993 et n'ont donc pas pu être utilisées pour la validation de ce modèle LpLe puisque les données de lame d'eau précipitée s'arrêtent en 1992.

Tab33: Erosions mensuelles estimées du Mbomou avant et après correction des indices

	janv.	fevr	mars	avril	mai	juin	juill	août	sept	octo	nove	dec
LpLe1	0	0	0	0	0	0	0	0.039	0.217	0.485	0.326	0
LpLe2	0	0	0	0.002	0.112	0.189	0.274	0.550	0.728	0.995	0.837	0.24

LpLe1: avant correction des indices; LpLe2: après correction des indices

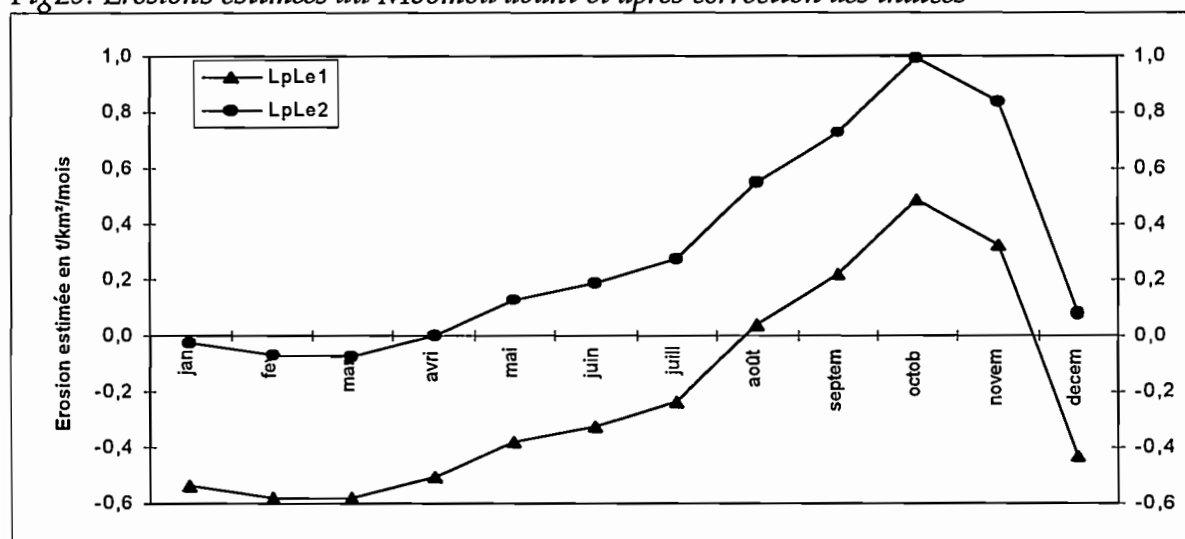
Les valeurs d'érosion mensuelle retenues sont présentées dans le tableau 34. Pour les mois de janvier, février et mars sur le Mbari, la Kémo et le Mbomou, le modèle donne des valeurs d'érosion nul. Ce résultat semble logique du fait que la concentration en MES observée est très faible durant cette période de l'année (de l'ordre de 10 mg/l) (tab22), cette période correspondant à la saison sèche. Le maximum d'érosion mensuel est atteint pendant les mois d'août, septembre et octobre sur tous les bassins versants. Ce maximum coïncide avec la période du maximum des lames d'eau précipitée et écoulee mensuelles.

Tble34: Erosion mensuelle estimée par sous-bassin (en t/km²/mois)

	janv	fevr	mars	avril	mai	juin	juill	aout	sept	octo	nove	dec
Uélé	0.257	0.04	0.069	0.115	0.203	0.427	0.620	1.020	1.270	1.410	1.410	0.703
Bili	0.170	0.035	0.051	0.092	0.216	0.339	0.520	0.800	1.056	1.240	1.060	0.490
Mbomou	0	0	0	0.002	0.112	0.189	0.274	0.550	0.728	0.995	0.837	0.24
Ouara	0.024	0.002	0.038	0.093	0.199	0.246	0.308	0.560	0.664	0.870	0.620	0.208
Chinko	0.062	0.018	0.027	0.09	0.214	0.331	0.421	0.595	0.793	0.798	0.346	0.173
Mbari	0	0	0	0.007	0.072	0.167	0.240	0.450	0.524	0.747	0.274	0.025
Kotto	0.002	0	0.009	0.058	0.159	0.194	0.321	0.460	0.594	0.569	0.146	0.023
Ouaka	0.21	0.168	0.184	0.311	0.418	0.441	0.511	0.723	0.785	0.774	0.472	0.25
Kémo	0	0	0	0.044	0.163	0.126	0.440	0.676	0.774	0.610	0.345	0.032
Mpoko	0.198	0.157	0.158	0.237	0.351	0.398	0.495	1.081	1.156	1.530	0.990	0.367
Lobaye	0.014	0	0.031	0.129	0.169	0.191	0.320	0.536	0.510	0.590	0.348	0.113

en gras les valeurs fortes d'érosion.

Fig29: Erosions estimées du Mbomou avant et après correction des indices



IV-2 PRESENTATION DE LA SPATIALISATION DE L'EROSION MENSUELLE

A partir du tableau 34, 12 cartes mensuelles de répartition de l'intensité de l'érosion sur le bassin versant moyen de l'Oubangui sont réalisées (fig 30 à fig 41). La visualisation de ces 12 cartes permet de catégorier rapidement le comportement des sous-bassins versants entre eux du point de vue de leur sensibilité à l'érosion au cours d'une année.

Tout d'abord, on note que toute l'année l'érosion agit sur le bassin versant de l'Oubangui. Le mois où la répartition de la présence d'érosion est la plus faible, est le mois de février (fig 31). Ce mois-là, l'intensité de l'érosion est la plus importante sur les sous-bassins de la Ouaka et de la Mpoko, et dans une moindre mesure sur les sous-bassin de l'Uélé, de la Bili et du Chinko; cela signifie que uniquement sur 5 sous-bassins versants l'érosion agit toute l'année.

Le mois suivant, en mars (fig32), l'érosion commence à apparaître sur d'autres sous-bassins versant (Lobaye et Ouara) et couvre l'ensemble du bassin de l'Oubangui en mai (fig34). L'ordre d'apparition de l'érosion au cours de l'année sur les sous-bassins versants est le suivant:

- en mars: Lobaye et Ouara (fig32),
- en avril: Kotto et Kémo (fig33),
- en mai: Mbari et Mbomou (tout le bassin est couvert) (fig34).

Sur l'ensemble du bassin versant moyen de l'Oubangui, l'intensité de l'érosion est toujours la plus forte sur les sous-bassins de la Ouaka, de la Mpoko, de l'Uélé et de la Bili. Dans le détail, la Ouaka et la Mpoko ont une intensité d'érosion supérieure à celle de l'Uélé et de la Bili de février à mai, égale en juin (fig35) puis inférieure le reste de l'année (de juillet à décembre).

L'intensité de l'érosion est sensiblement égale sur l'ensemble des 6 autres sous-bassins (Lobaye, Kémo, Kotto, Mbari, Ouara et Mbomou) en août et septembre (fig 37 et 38). La Kotto, le Mbari, la Kémo et la Lobaye sont les premiers sous-bassins à avoir leur intensité d'érosion diminuée en novembre (fig 40). Et dès décembre (fig 41), l'intensité de l'érosion est nulle sur les sous-bassins de la Kotto, du Mbari et de la Kémo.

VI-3 VARIATION MENSUELLE DE L'EROSION GLOBALE DE L'OUBANGUI MOYEN

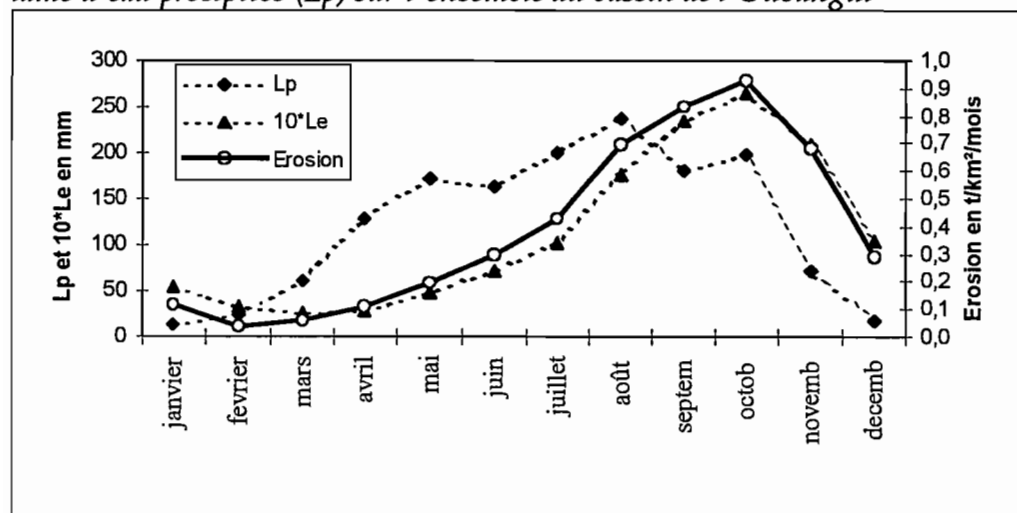
L'intensité moyenne mensuelle de l'érosion sur l'ensemble du bassin de l'Oubangui a été calculé mois par mois en faisant la moyenne, pondérée par les surfaces, des intensités d'érosion des différents sous-bassins constitutif, à l'exception de l'entité hydrologique n°12 (fig8) concernant la partie du bassin de l'Oubangui située en zone Zaïre en face des confluences de la Lobaye, Mpoko, Kémo, Ouara et Kotto. Aucun affluent important draine cette zone du bassin, aussi on peut considérer que son apport en MES au drain principal qu'est l'Oubangui, est négligeable.

L'intensité de l'érosion globale sur l'Oubangui est minimale en février et maximale en octobre. Bien sûr, son évolution mensuelle suit de très près celle de la lame d'eau écoulée Le (fig 42). Cependant, on peut faire deux remarques qui montrent l'influence de la lame d'eau précipitée Lp sur l'intensité de l'érosion, et surtout qui prouvent que le modèle d'érosion globale proposé est suffisamment sensible pour réagir aux variations d'évolution de cette lame d'eau précipitée par rapport aux variation de la lame d'eau écoulée.

Premièrement, l'érosion atteint son minimum en février alors que la lame d'eau écoulée Le est minimale en avril. Cela est dû au fait que la lame d'eau précipitée Lp augmente très significativement en mars (fig42) d'où une réponse de l'érosion sur l'ensemble des sous-bassins versants.

Deuxièmement, lorsque la lame d'eau précipitée L_p commence à diminuer en septembre, les courbes d'évolution de la lame d'eau écoulée Le et de l'érosion montrent une augmentation moins rapide de leur intensité. Mais la pente de la courbe d'évolution de l'érosion est à partir de ce point devient plus faible que celle de la courbe d'évolution de Le (fig42), à cause de la baisse de L_p qui se traduit en fait par une activité de l'érosion moins importante sur le terrain.

Fig42: Variation mensuelle inter-annuelle de l'érosion, de la lame d'eau écoulée(Le) et de la lame d'eau précipitée (L_p) sur l'ensemble du bassin de l'Oubangui



IV-4 BILAN ANNUEL DE L'EROSION PAR SOUS-BASSIN VERSANT

L'érosion annuelle sur chacun des sous-bassins est calculée en effectuant la somme de l'érosion mensuelle. Cette opération est effectuée sur IDRISI en utilisant la fonction OVERLAY qui permet de faire des opérations entre deux cartes. La carte obtenue (fig43) confirme que les sous-bassins de l'Uélé et de la Mpoko puis de la Bili, et dans une moindre mesure de la Ouaka, sont les bassins où l'intensité de l'érosion est la plus forte à l'échelle de l'année. A l'opposé, le bassin du Mbari a l'intensité d'érosion la plus faible. Les 6 autres bassins ont une intensité d'érosion semblable entre eux.

A partir des valeurs annuelles d'intensité d'érosion, on peut catégorier les sous-bassins versants constitutifs du bassin versant moyen de l'Oubangui, de la façon suivante (fig44):

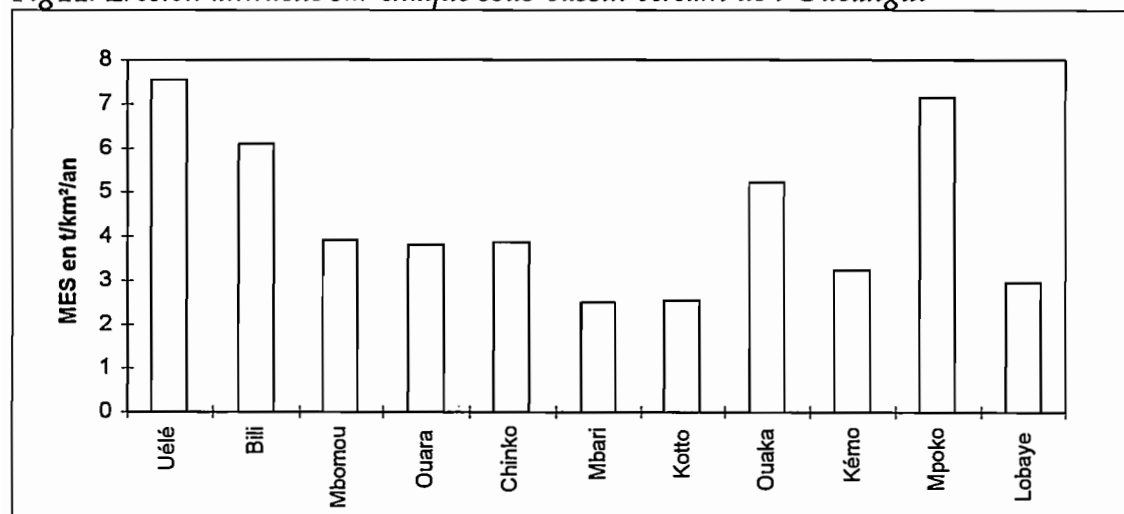
- érosion supérieure à $7 t/km^2/an$: Uélé et Mpoko;
- érosion égale à $6 t/km^2/an$: Bili et Ouaka;
- érosion égale à $4 t/km^2/an$: Mbomou, Ouara, Chinko;
- érosion égale à $3 t/km^2/an$: Kémo, Lobaye;
- érosion légèrement supérieure à 2: Kotto, Mbari.

Enfin, on a calculé l'érosion globale annuelle sur le bassin versant moyen de l'Oubangui en effectuant la moyenne des intensités d'érosion de chaque sous-bassin pondérées par les surface respectives.

L'intensité moyenne de l'érosion globale sur le bassin moyen de l'Oubangui est de $4,7 \pm 0,4 t/km^2/an$.

Ce chiffre est du même ordre de grandeur que celui donné par ORANGE et al., (1995) sur l'Oubangui à Bangui, c'est-à-dire 200 km plus à l'amont (5,5 t/km²/an).

Fig44: Erosion annuelle sur chaque sous-bassin versant de l'Oubangui



V-DISCUSSION

Afin de pouvoir comparer les sous-bassins du point de vue de leur contribution au flux de matières transporté à l'exutoire du bassin versant moyen de l'Oubangui (Mongoumba) on a calculé le flux moyen annuel de MES en tonnes et la concentration moyenne annuelle de MES en mg/l sur chaque sous-bassin versant à partir des intensités d'érosions données par le modèle (tab 35). Le débit du Mbomou de tableau 35 correspond au débit du Mbomou à Tondomzouma (fig 11) soustrait des débits de la Ouara, du Chinko et du Mbari.

Tab35: Erosion annuelle, concentration annuelle, débit moyen annuel et flux annuel des MES

	Uélé	Bili	Mbomou	Ouara	Chinko	Mbari	Kotto	Ouaka	Kémo	Mpoko	Lobaye	Oubangui
Er	7,5	6,1	3,9	3,8	3,9	2,5	2,5	5,2	3,2	7,1	3,0	4,7
MES	23,5	23,5	26,1	38,3	33,9	30,9	30,4	63,7	35,1	32,9	16,3	26,7
Q*	1090	170	370	68	170	71	210	130	63	160	210	3060
Flux	1053897	129877	201848	85530	204772	68263	204068	275782	70556	170049	104347	2579512

bv: sous-bassins versants, MES: concentration de matières en suspension en mg/l, Q: débit en m³/s; *: ORANGE et al., (1995); flux: flux de MES en tonnes.

Quelques remarques:

✂ Sur l'Ouaka, on obtient la concentration maximale. Cela est dû en fait au faible couvert végétal qui s'étale sur la partie amont de ce sous-bassin versant installé sur un sol ferrallitique moyennement induré, donc un couvert qui protège mal le sol et un sol qui admet un potentiel d'érosion non négligeable.

↳ On obtient une forte concentration sur la Mpoko, bien qu'il existe un barrage sur l'un des ces bras amont, donc on devrait trouver une concentration moins importante. Cela étant dit, le résultat peut être expliqué par le fait que le débit utilisé durant le calcul a été estimé avec un degré de confiance très approximatif sur ce sous bassin versant. D'autre part, ce bassin est fortement anthropisé.

↳ On obtient la plus faible valeur de concentration sur la Lobaye du fait que ce sous-bassin est couvert d'une grande partie de forêt dense humide sur des grès qui engendrent par conséquent une faible concentration.

↳ A partir de l'intensité d'érosion globale sur l'ensemble du bassin de l'Oubangui, on obtient une concentration de 26,7 mg/l. Cette valeur est inférieure à la concentration moyenne de l'Oubangui à Bangui, qui est de 32 mg/l (ORANGE et al., 1995). Cependant, ces valeurs restent dans le même ordre de grandeur.

La répartition de la concentration aux flux globaux de chaque sous-bassin versant montre clairement la prédominance de l'Uélé (fig 45). Ces résultats de la modélisation indiquent que:

40% des flux de matières particulières exportés au bief de Mongoumba proviennent de l'Uélé.

Ainsi, l'Uélé est le bassin versant ayant le plus forte taux d'érosion et la contribution la plus importante aux flux globaux, tandis que la concentration en MES est moyenne (tab 35). Cette opposition est expliquée d'une part par la superficie très importante et d'autre part par le grand volume d'eau écoulé sur le bassin.

Fig45: Pourcentage de contribution aux flux globaux de chacun des sous bassins versants

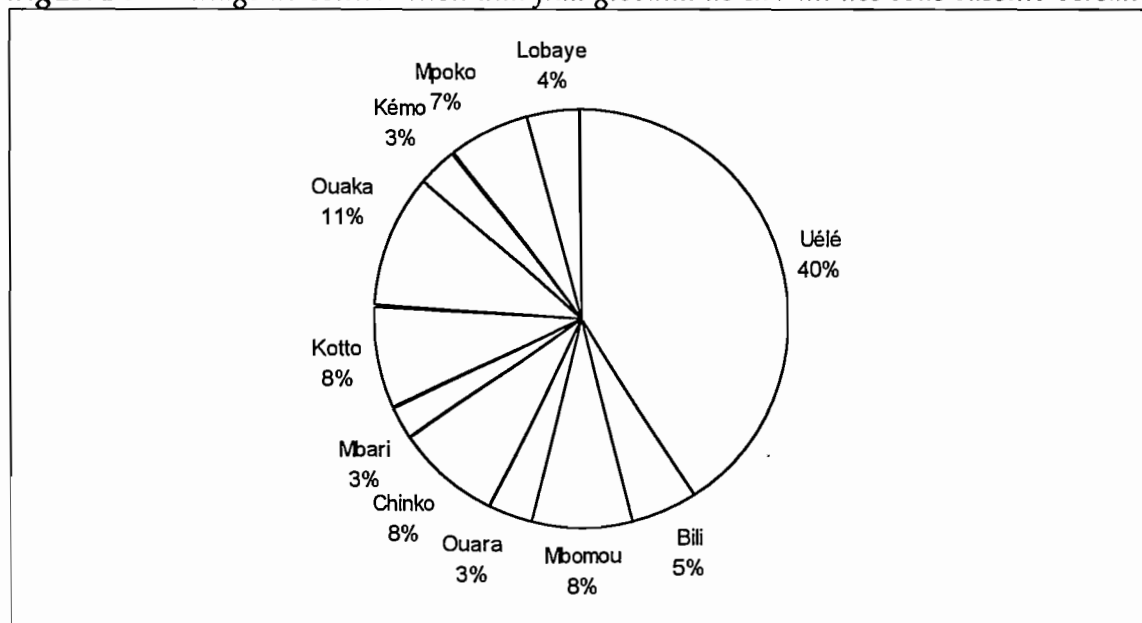


Fig 30: Carte de l'érosion du mois de janvier

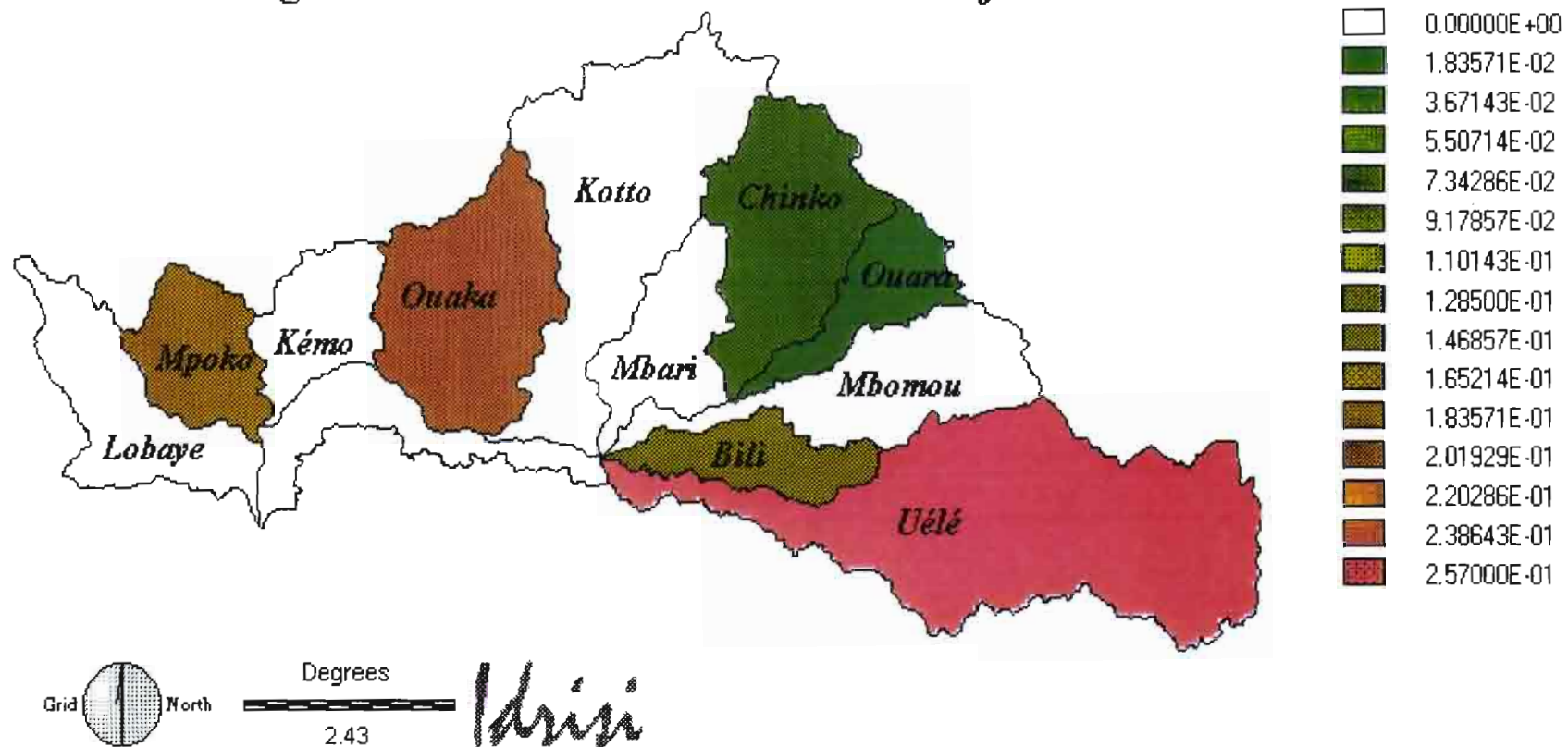


Fig31: Carte de l'érosion du mois de février

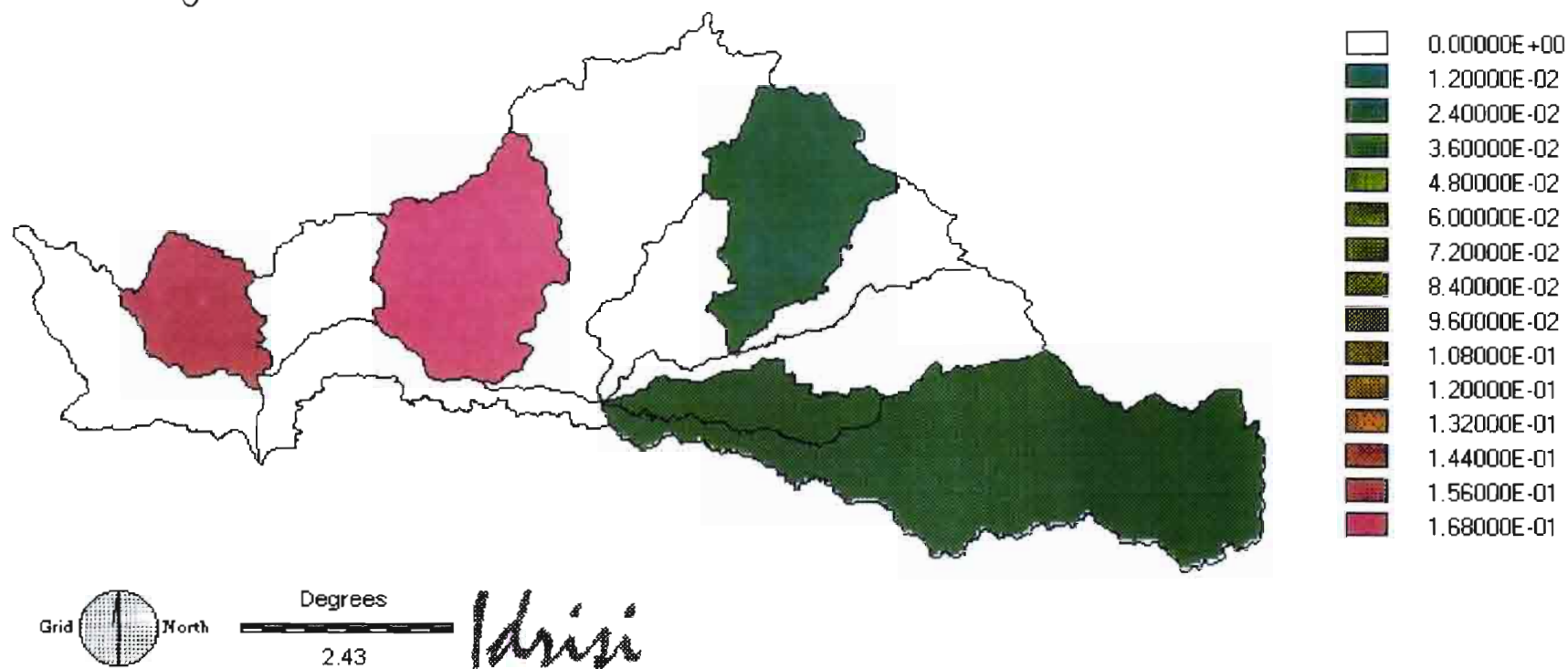


Fig 32: Carte de l'érosion du mois de mars

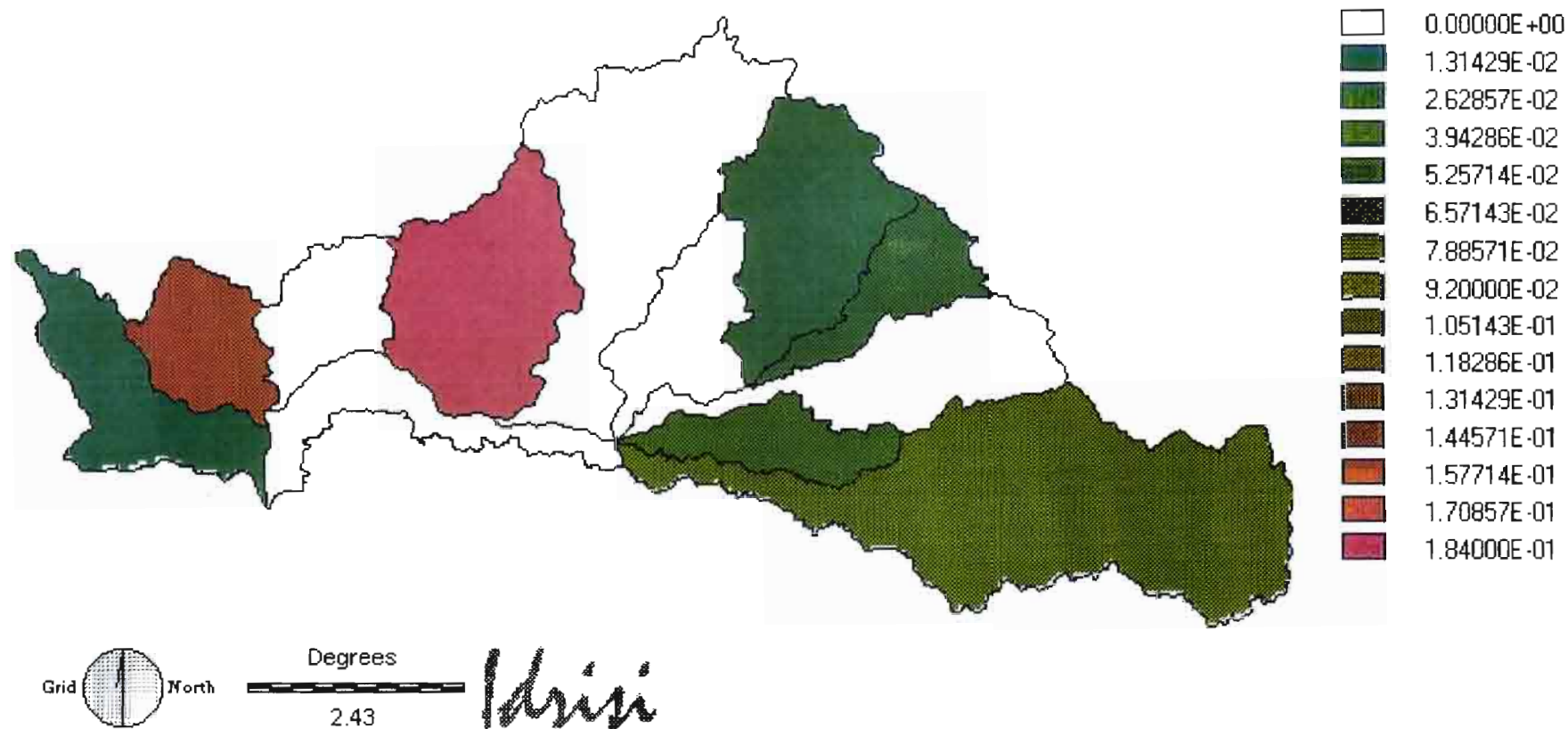


Fig33: Carte de l'érosion du mois d'avril

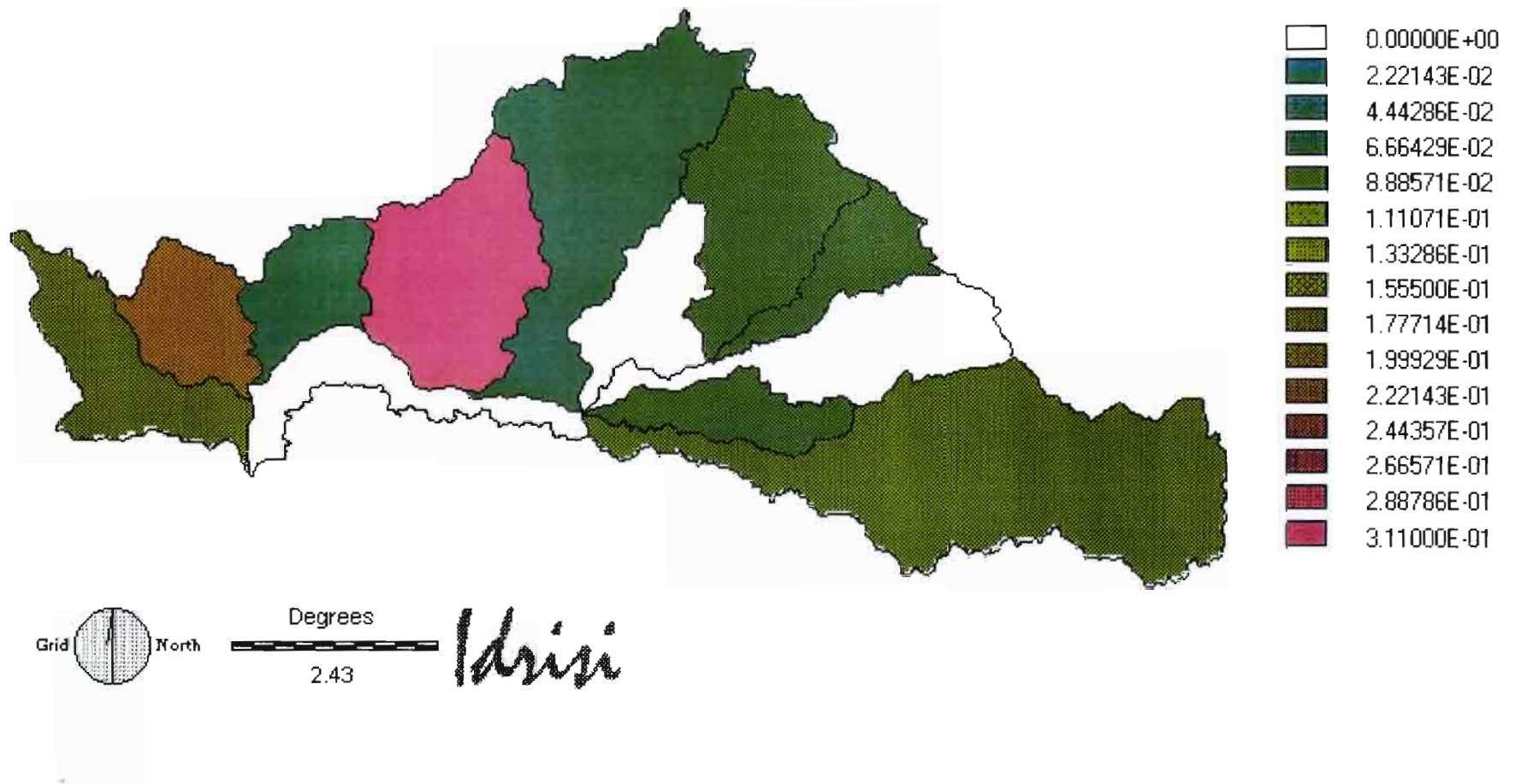
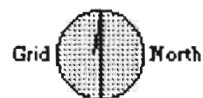
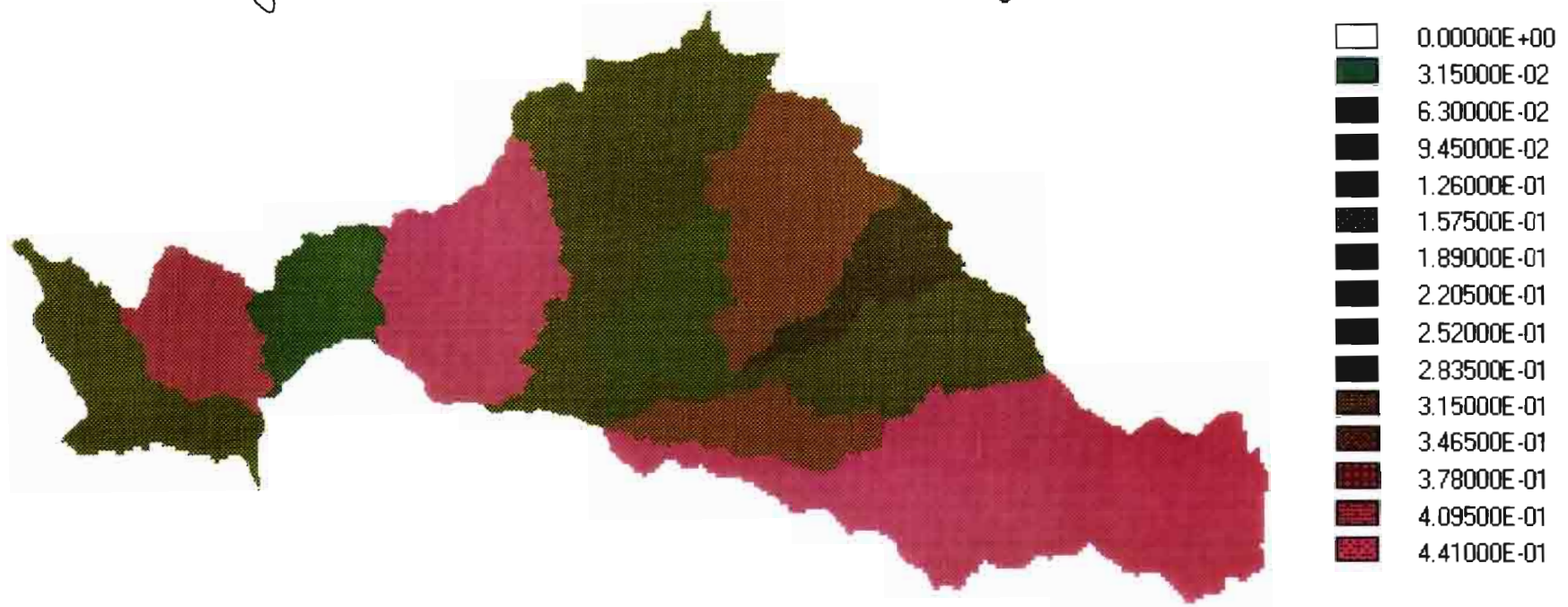


Fig 34: Carte de l'érosion du mois de mai



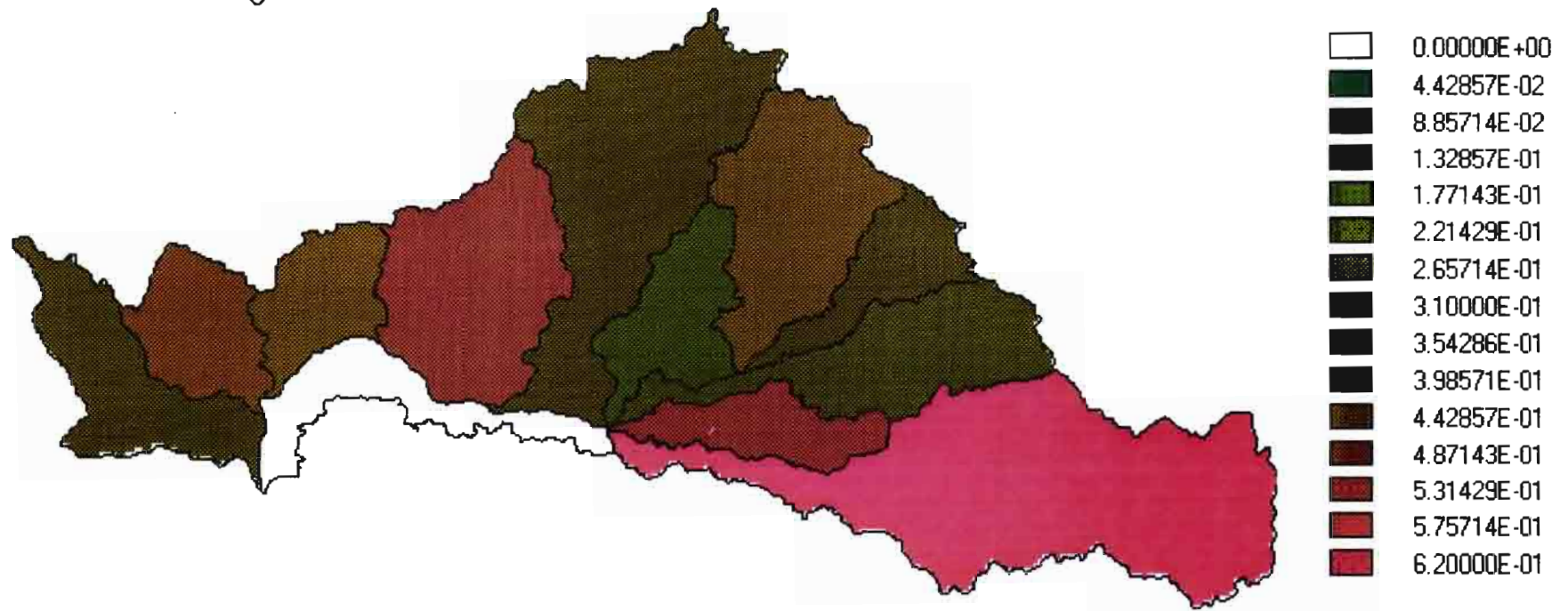
Fig35: Carte de l'érosion du mois de juin



Degrees
2.43

Idrisi

Fig 36: Carte de l'érosion du mois de juillet



Degrees
2.43

Idrisi

Fig 77: Carte de l'érosion du mois d'août

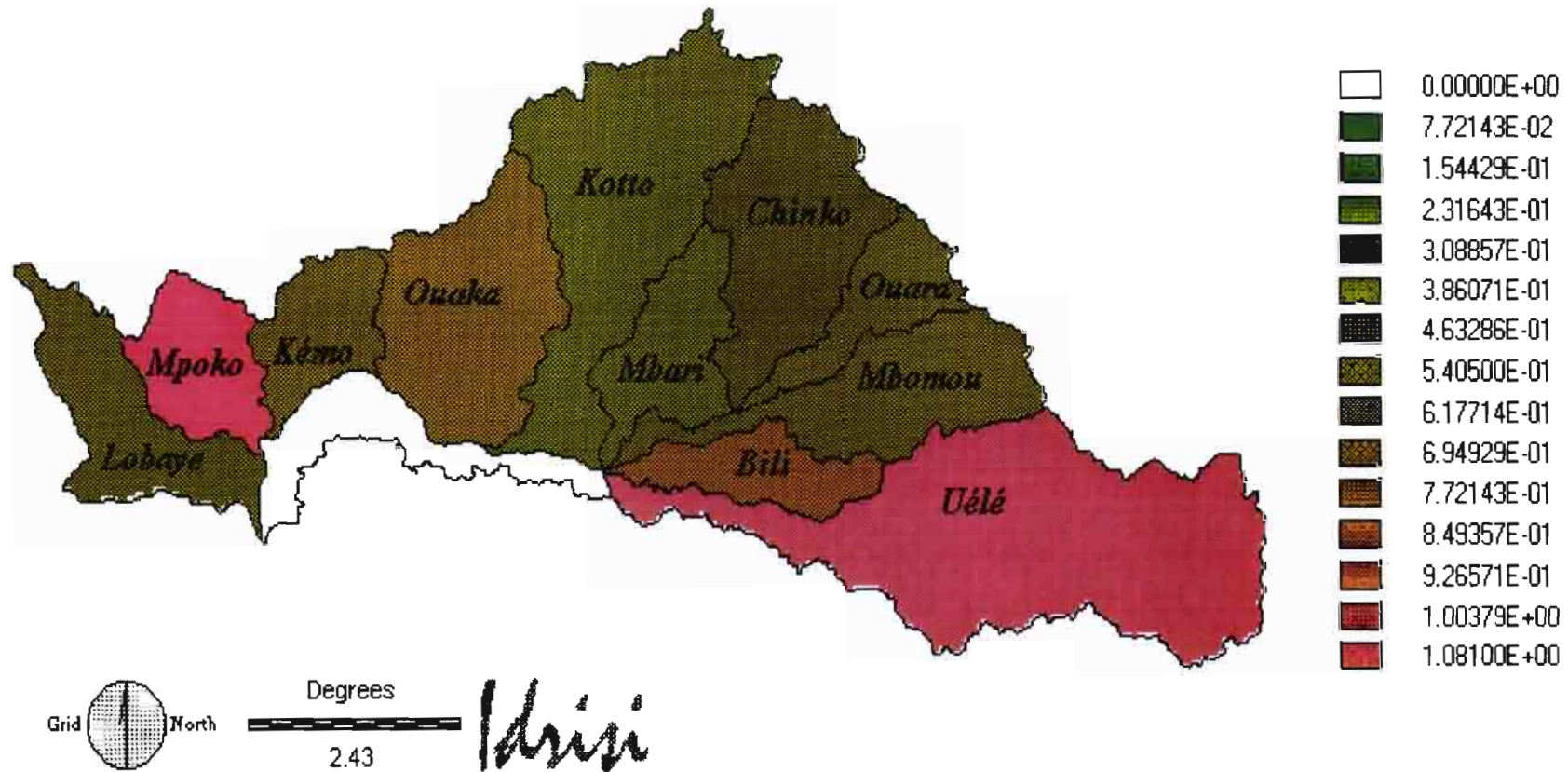


Fig 38: Carte de l'érosion du mois de septembre

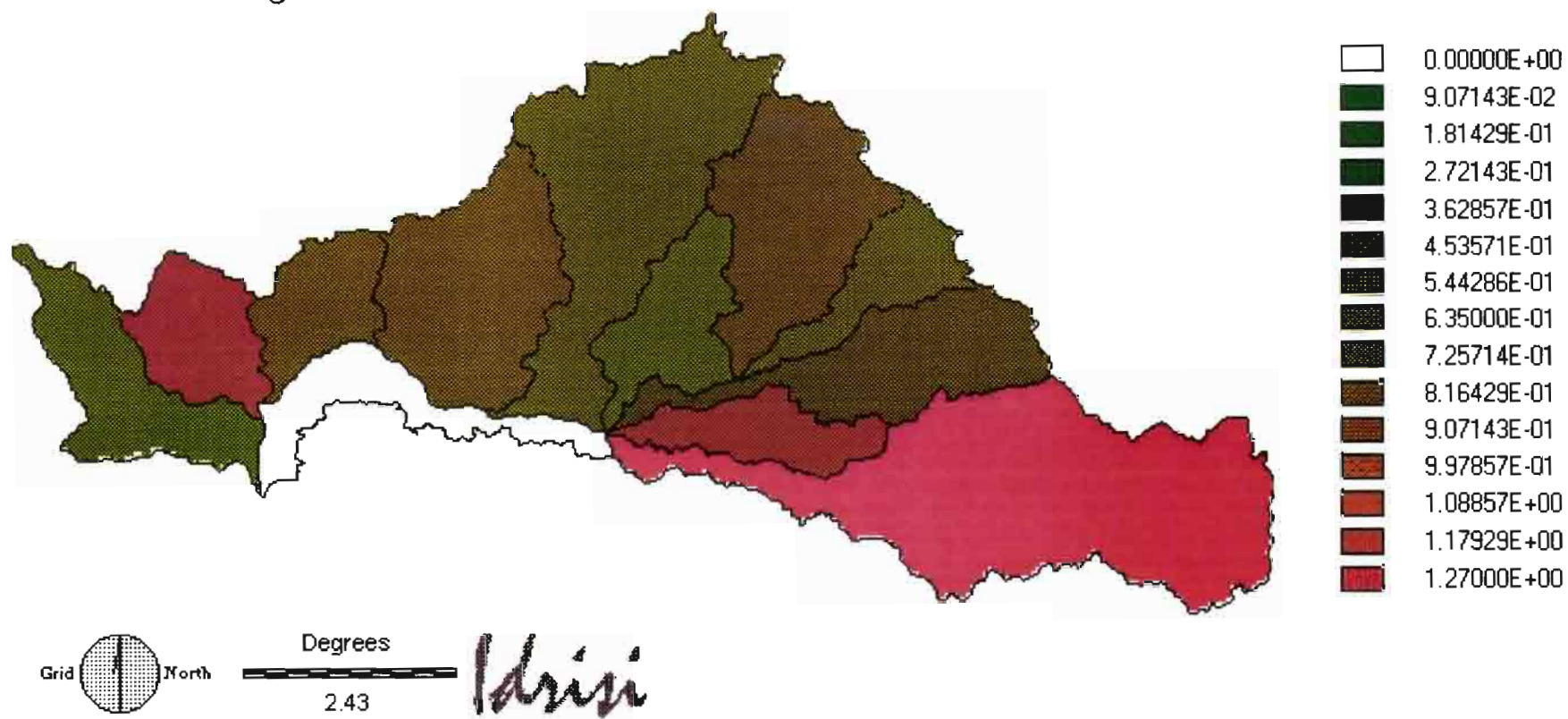


Fig39: Carte de l'érosion du mois d'octobre

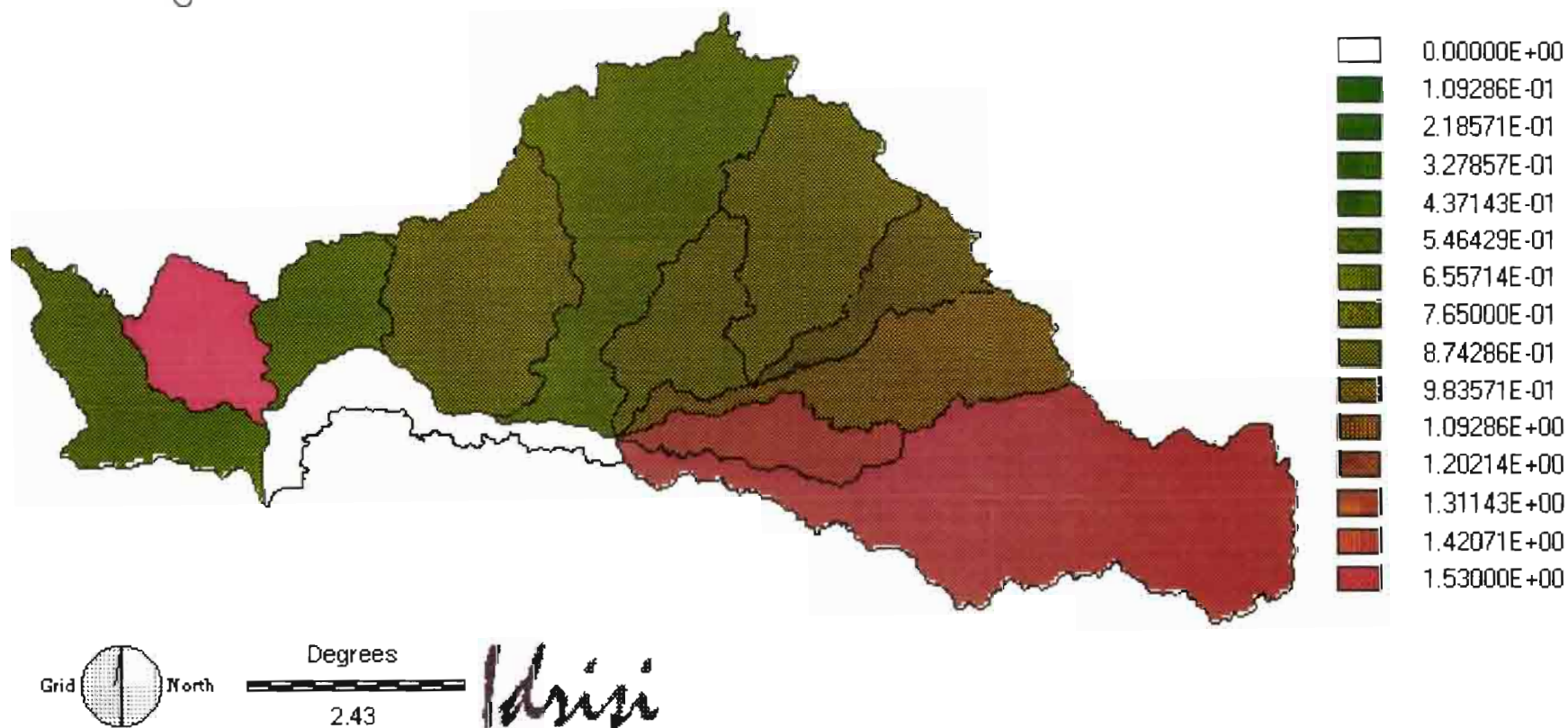


Fig40: Carte de l'érosion du mois de novembre

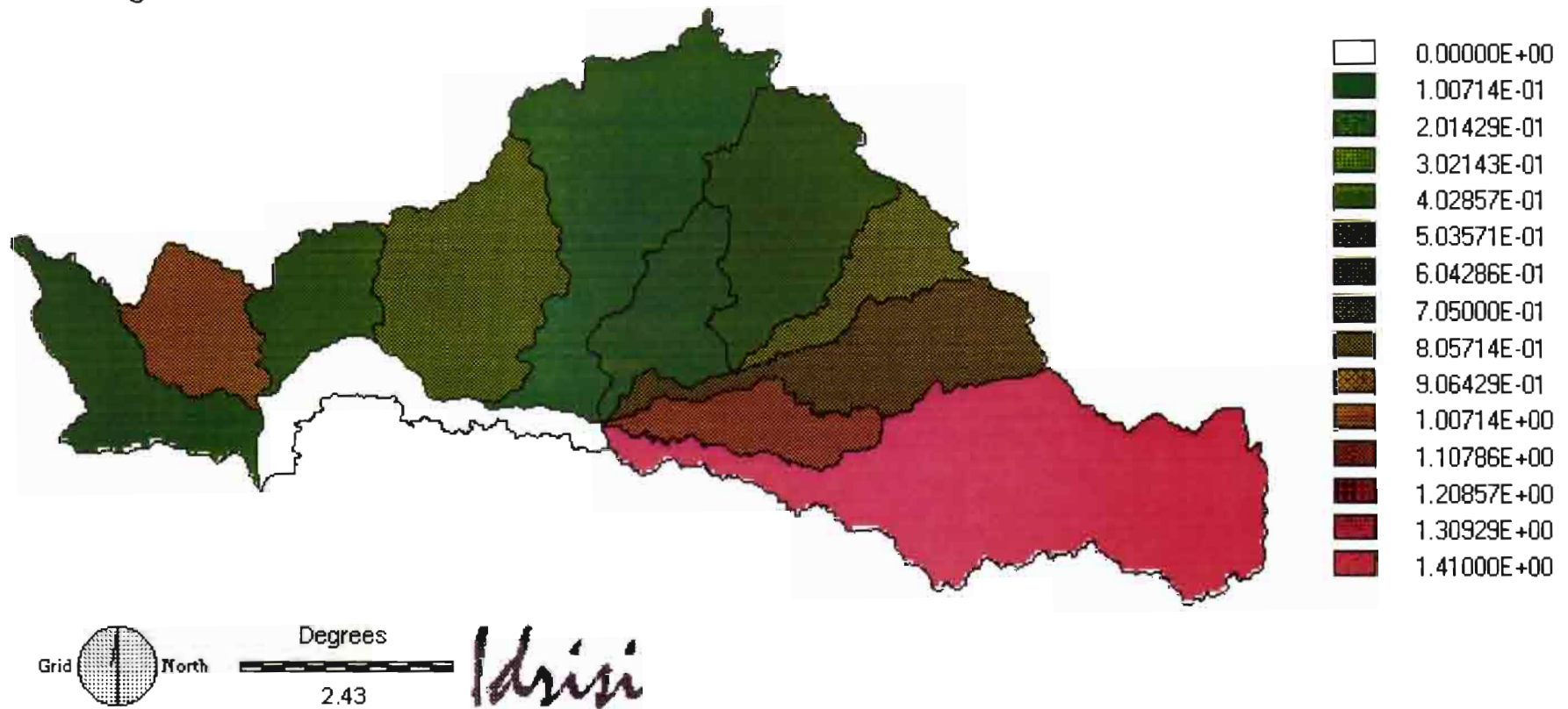
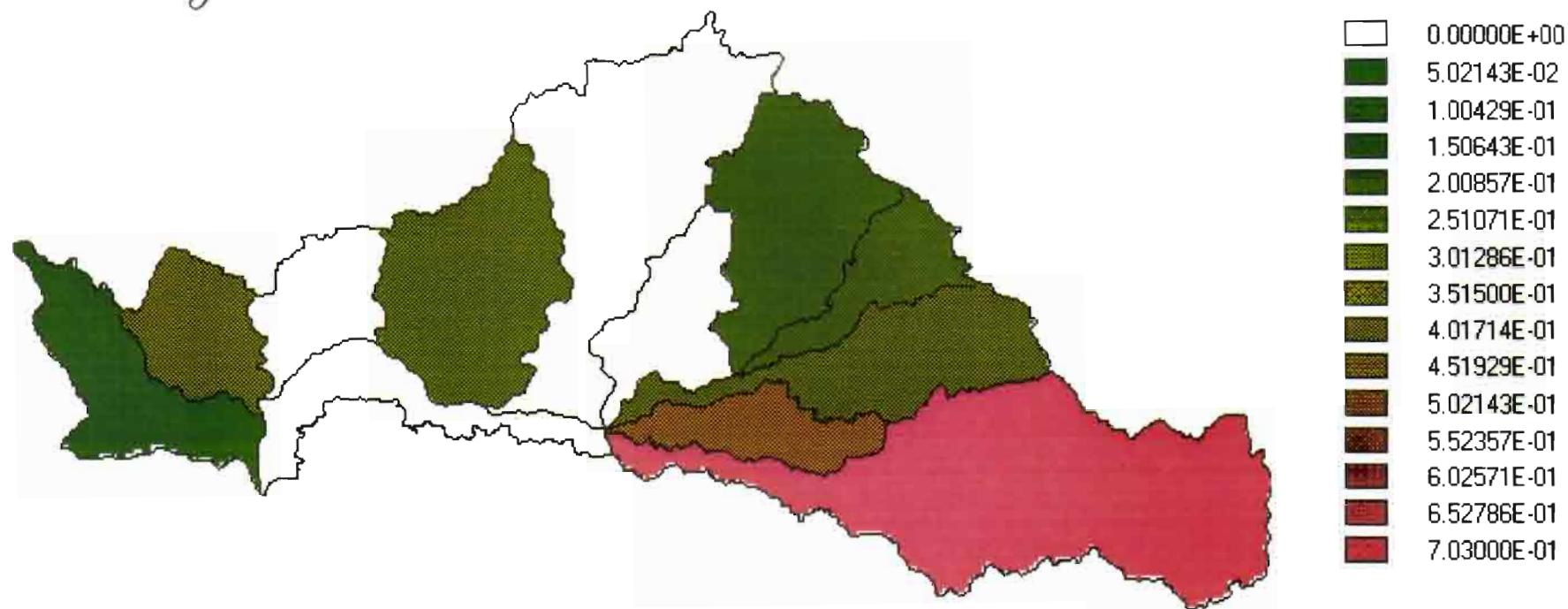


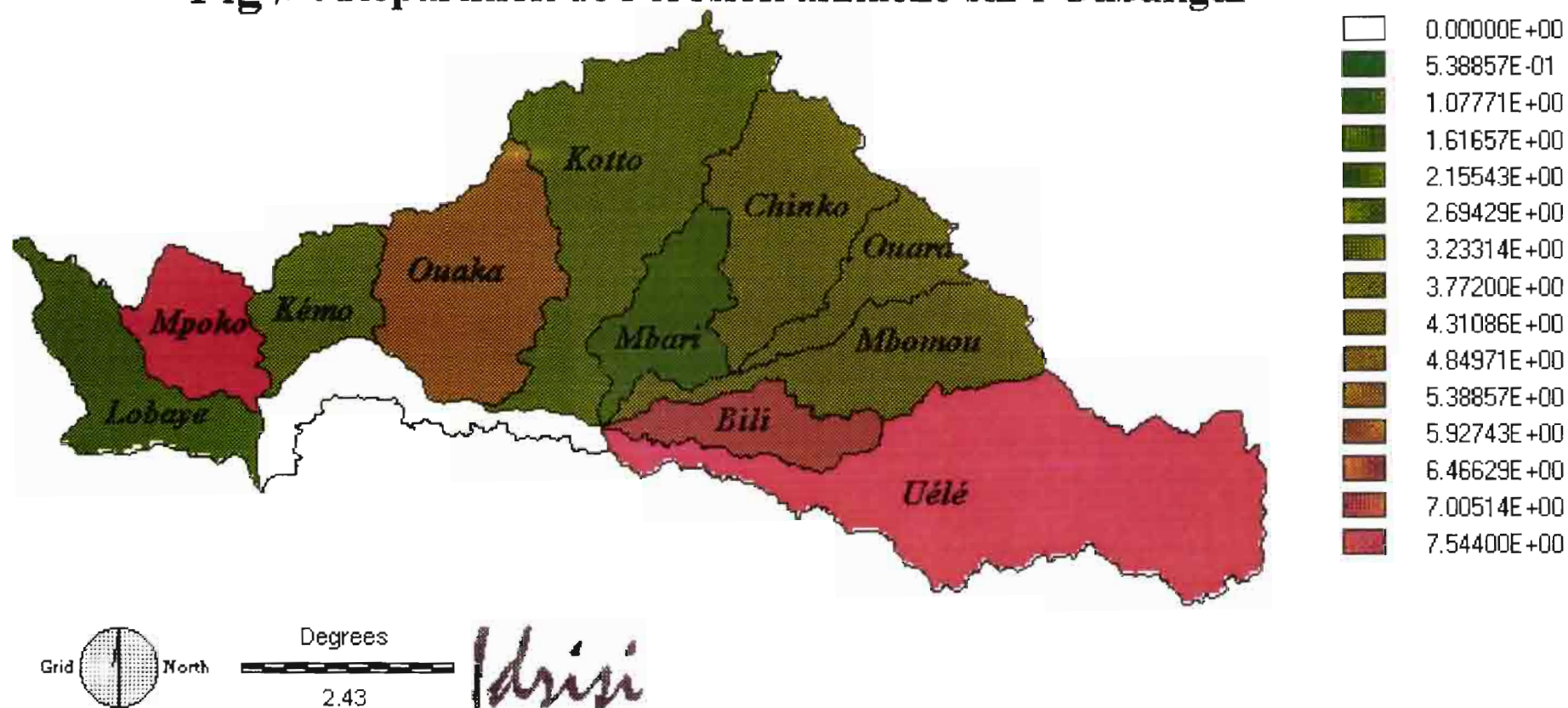
Fig41: Carte de l'érosion du mois de décembre



Degrees
2.43

Idrissi

Fig42 : Répartition de l'érosion annuelle sur l'Oubangui



CHAPITRE 1999

CRITIQUE

I-INTRODUCTION

Malgré le nombre faible d'observations (65 seulement) utilisées pour déterminer le modèle, le fait que ces observations mensuelles sont localisées sur un nombre limité de sous-bassins versants, malgré l'utilisation durant cette modélisation de variables estimées, on a pu construire un modèle qui donne des résultats très proche des données du terrain. Ce modèle est un concept global le plus facile à obtenir et qui permet une représentation spatiale à grande échelle du processus d'érosion sur le bassin de l'Oubangui.

On peut critiquer l'utilisation de la notion de lame d'eau écoulée dans la modélisation comme variable explicative de l'érosion, qui elle-même a été obtenue dans le système d'unité tonne/km²/mois en multipliant la concentration observée de MES par Q/S (Q étant le débit et S la superficie). Sont utilisation est justifiée par le fait qu'on cherche un modèle global simple à obtenir. On veut expliquer la quantité de tonnages exportées (et par là l'intensité de l'érosion globale). De plus, on peut remarquer que dans les modèles présentés en première partie, que soit le modèle de JANSEN et PAINTER (1974) ou de PROBST (1990), ils utilisent dans leurs variables explicatives la notion de drainage, qui n'est autre qu'une lame d'eau écoulée.

Dans ce qui suit on essaye de trouver d'autres variables qui peuvent être utiles dans l'explication de l'érosion tout en éliminant la variable lame d'eau écoulée de la modélisation. Un essai de modélisation en utilisant uniquement la lame d'eau précipitée L_p comme variable explicative, associée aux variables explicatives classiques décrivant les caractéristiques intrinsèque du bassin versant (indice de végétation, de lithologie, de pédologie, de pente et surface), donne un coefficient R^2 de la variance expliquée extrêmement faible de 0,23. Ceci montre qu'il est nécessaire d'ajouter d'autres variables explicatives. Or un aspect important de la pluie, qui n'a jamais été pris en compte, est son agressivité

II-CALCUL DES INDICES D'AGRESSIVITE PLUVIOMETRIQUE

II-1 INDICE ANNUEL DE FOURNIER

L'indice de FOURNIER c'est un indice qui traduit agressivité moyenne annuelle de la pluie à l'échelle globale. Cet indice ne s'applique guère à l'échelle de la parcelle (ROOSE, 1977). Il est calculé à partir de la pluviométrie maximale mensuelle et de la pluviométrie annuelle:

$$\text{infour} = \frac{(P \text{ max mensuelle})^2}{P \text{ annuelle}}$$

Pour calculer cet indice, on a utilisé la pluviométrie observée entre les années 1990 et 1992 et on a appliqué la méthode de Thiessen pour l'interpoler sur l'ensemble des sous-bassins versants.

Tab36: Indice de Fournier inter-annuel (1990-1992) par sous-bassin versant:

	Uélé	Bili	Mbomou	Ouara	Chinko	Mbari	Kotto	Ouaka	Kémo	Mpoko	Lobaye
infour	37	40	47	48	52	56	62	58	55	46	54

II-2 INDICE D'AGRESSIVITE DE LA LAME D'EAU PRECIPITES MENSUELLE

Pour caractériser l'agressivité mensuelle de la pluie dans une région donnée, on a défini l'indice INLP. C'est un indice qui tient en compte de l'importance de la pluviométrie mensuelle par rapport à l'annuelle et aussi de la quantité précipitée pendant les mois précédents. Cet indice est calculé à l'aide de la formule suivante:

$$INLP_k = \frac{\sum_{i=1}^k Lp_i}{Lp \text{ annuelle}}$$

avec: $INLP_k$: indice d'agressivité mensuelle du mois k

Lp_i : lame d'eau précipitée pour le mois i

Tab 37: Indice d'agressivité de la lame d'eau précipitée mensuelle
a) de l'année 1991

	Uélé	Bili	Mbomou	Ouara	Chinko	Mbari	Kotto	Ouaka	Kemo	Mpoko	Lobaye
jan	0.012	0.013	0.006	0.005	0.008	0.007	0.004	0.002	0.001	0.001	0.004
fev	0.038	0.043	0.021	0.016	0.016	0.028	0.011	0.015	0.029	0.038	0.039
mars	0.115	0.105	0.066	0.061	0.044	0.042	0.032	0.034	0.060	0.078	0.078
avr	0.227	0.200	0.170	0.163	0.116	0.138	0.100	0.162	0.156	0.176	0.194
mai	0.321	0.310	0.284	0.279	0.239	0.238	0.264	0.302	0.252	0.263	0.310
juin	0.425	0.405	0.386	0.385	0.371	0.349	0.397	0.416	0.351	0.362	0.391
juill	0.525	0.517	0.506	0.508	0.502	0.439	0.559	0.548	0.527	0.536	0.536
aout	0.659	0.636	0.706	0.721	0.691	0.626	0.731	0.709	0.710	0.722	0.701
sep	0.776	0.754	0.832	0.851	0.827	0.749	0.843	0.819	0.821	0.808	0.798
oct	0.907	0.908	0.958	0.970	0.987	0.960	0.985	0.973	0.958	0.942	0.936
nov	0.970	0.979	0.993	0.995	0.998	0.998	0.999	0.999	1.000	1.000	0.993
dec	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

b) de l'année 1992

	Uélé	Bili	Mbomou	Ouara	Chinko	Mbari	Kotto	Ouaka	Kemo	Mpoko	Lobaye
jan	0.012	0.014	0.007	0.005	0.002	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002
fev	0.038	0.044	0.022	0.018	0.024	0.034	0.011	0.001	0.001	0.000	0.007
mars	0.115	0.106	0.072	0.069	0.078	0.082	0.053	0.046	0.051	0.053	0.065
avr	0.226	0.199	0.159	0.155	0.169	0.184	0.127	0.114	0.104	0.105	0.148
mai	0.321	0.311	0.290	0.290	0.298	0.308	0.242	0.251	0.222	0.229	0.241
juin	0.426	0.408	0.411	0.418	0.457	0.459	0.417	0.386	0.347	0.358	0.359
juill	0.527	0.525	0.546	0.556	0.629	0.615	0.580	0.510	0.501	0.521	0.522
aout	0.657	0.636	0.684	0.700	0.755	0.708	0.727	0.716	0.693	0.687	0.669
sep	0.776	0.757	0.826	0.841	0.865	0.828	0.844	0.855	0.827	0.811	0.802
oct	0.907	0.908	0.957	0.967	0.983	0.961	0.975	0.980	0.955	0.938	0.946
nov	0.970	0.978	0.993	0.995	0.998	0.996	0.999	1.000	0.996	0.994	0.991
dec	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

III-UTILISATION DES INDICES D'AGRESSIVITE PLUVIOMETRIQUE POUR LA MODELISATION

Le tableau 38 illustre les différents essais de modélisation avec les 2 indices d'agressivité pluviométrique:

Tab 38 : Coefficient R^2 de la variance expliquée en fonction des variables introduite dans le modèle

	Lp	INLP	infour	invégét	inpédo	inlith	surface	pente	R^2
1	+			ln	ln	ln	ln	ln	0.23
2	+	+		ln	ln	ln	ln	ln	0.62
3	+	+	+	ln	ln	ln	ln	ln	0.57
4	+	+	ln	ln	ln	ln	ln	ln	0.63
5	+		+	ln	ln	ln	ln	ln	0.3
6*	+	+	+		ln		ln	ln	0.58

* résultat de stepwise ln : logarithme népérien

L'analyse de ce tableau montre que l'indice de FOURNIER a peu d'effet sur la modélisation (test n°5). Par contre le seul ajout de l'indice d'agressivité mensuel INLP (test n°2) améliore très fortement le coefficient R^2 (on passe de 0,23 à 0,62). La procédure de STEPWISE a sélectionné ces 2 indices d'agressivité au dépend de l'indice de végétation et de l'indice de lithologie.

IV-CONCLUSION

Les résultats donnés dans le tableau précédent montre l'importance de considérer dans une modélisation future l'agressivité de la pluie comme variable explicative de l'érosion.

Tous ces essais peuvent certainement être améliorés, en particulier par une étude plus approfondie de la topographie; On pourrait par exemple introduire dans les modèles des indices dérivés de la pente. Bien sûr et surtout il reste la nécessité d'avoir, une bonne connaissance du terrain pour mieux estimer tous les indices. Il ne suffit pas d'avoir des cartes. Il faut des cartes récentes associées à une bonne connaissance du milieu.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Il ressort de cette étude ainsi que des recherches bibliographique effectuées, que le drainage ou la lame d'eau écoulee est le facteur principal qui règle l'intensité de l'érosion mécanique, du fait que les flux de matière en suspension sont fonction de débits des fleuves, et les tonnages de matériaux particuliers sont principalement évacués lors des périodes de crues. C'est durant ces périodes de crues que se produit le ruissellement superficiel qui est finalement le principal agent responsable de l'érosion mécanique. Les différents modèles sites montre également l'importance de la lame d'eau précipitée, de l'indice de végétation, de pédologie, de la lithologie et de pente.

La difficulté d'acquisition des données suffisantes et récentes rend la modélisation parfois délicate. Nous avons effectué tout d'abord une reconstitution des données pluviométriques annuelles et mensuelles, puis on a calculé les indices de végétation, lithologie, pédologie et pente sur chaque sous-bassins versants. Ces indices représentent les caractéristiques intrinsèques du bassin versant. Deux types de modèle ont été testés:

- le premier consiste à utiliser comme variable explicative, en plus des indices cités ci-dessus, la lame d'eau écoulee (Le) et la lame d'eau précipitée (Lp);
- le deuxième utilise les mêmes variables à l'exception de la lame d'eau précipitée.

Les tests statistiques effectués sur les deux modèles sélectionnés à partir de la régression multiple ont conduit à choisir le modèle de la première hypothèse pour la suite de l'étude.

Finalement, pour des bassins versants allant de 20000 km² à 150000 km², l'érosion globale mensuelle moyenne sur le bassin de l'Oubangui est régie par:

$$Er = 0,678 + 0,001 * Lp + 0,03 * Le + 1,13 * \ln(\text{invégét}) - 0,815 \ln(\text{inlith}) - 0,505 * \ln(\text{inpedo}) + 1,263 * \ln(\text{pente}) - 0,094 * \ln(\text{surface})$$

Ce modèle est suffisamment sensible pour refléter dans l'évolution des intensités mensuelles d'érosion les variations de la lame d'eau précipitée par rapport à celles de la lame d'eau écoulee, qui est de loin le principal facteur explicatif de l'érosion dans ce type de modélisation. L'indice de végétation est l'indice le plus significatif. Ce modèle a permis de donner une estimation de la réparation de l'érosion globale mensuelle moyenne par sous-bassins versants constitutifs du bassin moyen de l'Oubangui, et d'en déduire l'érosion globale moyenne sur l'ensemble du bassin.

Sur le bassin moyen de l'Oubangui, l'intensité moyenne de l'érosion est de $4,7 \pm 0,4$ t/km²/an, ce qui correspond à une exportation de matières en suspension de 26,7 mg/l au niveau de Mongoumba, exutoire du bassin.

L'application du modèle sur IDRISI a donné une visualisation de la répartition mensuelle et annuelle de l'intensité de l'érosion sur l'ensemble du bassin de l'Oubangui. Cela a permis d'effectuer une analyse régionale de l'intensité de l'érosion et de son évolution au cours de l'année.

- 40% de flux des matières particulaires exportées au bief de Mongoumba proviennent de l'Uélé;
- A partir des valeurs annuelles d'intensité d'érosion, on peut catégorier les sous-bassins versants constitutifs du bassin versant moyen de l'Oubangui, de la façon suivante:
 - érosion supérieure à 7 t/km²/an: Uélé et Mpoko;
 - érosion égale à 6 t/km²/an: Bili et Ouaka;
 - érosion égale à 4 t/km²/an: Mbomou, Ouara, Chinko;
 - érosion égale à 3 t/km²/an: Kémo, Lobaye;
 - érosion légèrement supérieure à 2: Kotto, Mbari.

Dans la dernière partie, on a cherché à trouver d'autres variables explicatives de l'érosion globale afin de pouvoir s'affranchir de la lame d'eau écoulée dans le modèle pour ne garder que la lame d'eau précipitée. En effet, bien que la pluie soit le point de départ de l'érosion, la lame d'eau précipitée n'explique qu'une faible partie de la variance. Aussi, pour compléter dans le modèle l'information fournie par le travail de la pluie dans le processus d'érosion, on a défini un indice d'agressivité mensuelle de la lame d'eau précipitée, noté INLP. Effectivement, cet indice améliore de beaucoup le modèle. Néanmoins, pour obtenir un modèle d'érosion fonction de la lame d'eau précipitée, il reste encore à trouver d'autres indices caractérisant par exemple la morphologie du bassin autre que la pente moyenne.

Enfin, dès que les cartes de répartition du feu sur l'ensemble du bassin de l'Oubangui seront disponibles, il sera possible de confronter cette répartition de l'intensité de l'érosion avec celle des feux et de déterminer la relation qui peut exister entre feu et érosion.

LISTE DES TABLEAUX

tab1: Distribution des différents facteurs d'érosion mécanique dans les Alpes.	4
tab2: Erosion mécanique spécifique simulée, calculée en fonction de la pente du versant, de l'intensité de la pluie et de la vitesse de l'écoulement superficiel	6
tab3: Coefficient d'érodibilité des roches	7
tab4: Erosion mécanique et transport en suspension selon les bassins versants	7
tab5: Le produit de solubilité à la pression de 1 bar	8
tab6: Echelle de sensibilité à l'érosion chimique de roches plutoniques, volcaniques, métamorphiques et sédimentaires	9
tab7: Erosion chimique spécifique selon la nature des roches du substratum	9
tab8: Quelques valeurs estimées du facteur C en Afrique	10
tab9: Valeurs de l'indice P	10
tab10: Indices de végétation	14
tab11: Indices de lithologie	14
tab12: Estimation de la biomasse brûlée pour chaque écosystème	18
tab13: Répartition en % de l'activité saisonnière du feu sur une période sèche en fonction des zones végétatives	19
tab14: Répartition du nombre de pixels brûlés sur chaque zone végétative	19
tab15: Comparaison entre la masse totale de quelques éléments chimiques dans l'atmosphère et la partie produite par les biomasses brûlées	21
tab16: Coordonnées géographique des stations pluviométriques	37
tab17: Pluviométrie annuelle estimée et observée sur le bassin de l'Oubangui	41
tab18: Lamme d'eau précipitée annuelle par sous-bassin versant de l'Oubangui	42
tab19: Lamme d'eau précipitée annuelle calculée par interpolation sous IDRISI	44
Tab20: Exemple de résultat de l'histogramme calculé sur le bassin de l'Uélé	53
tab21: Valeurs des différents indices sur l'ensemble du bassin	58
tab22: Observations de MES sur le bassin de l'Oubangui	62
tab23: Coefficient R^2 de la variance expliquée en fonction des variables introduites dans le modèle	64
tab24: Observations de MES pour la validation du modèle	67
tab25: Comparaison des modèles de JANSEN et PAINTER, de PROBST et de cette étude	71
tab26: Coefficient R^2 de la variance expliquée en fonction des variables introduites dans le modèle	71
tab27: Test des attributs de la variable végétation	76
tab28: Les paramètres et le coefficient R^2 du modèle LpLe en fonction des tests sur les attributs de la variable végétation	76
tab29: Test des attributs de la variable lithologie	77
tab30: Les paramètres et le coefficient R^2 du modèle LpLe en fonction des tests sur les attributs de la variable lithologie	78
Tab31: Test des attributs de la variable pédologie	78
tab32: Les paramètres et le coefficient R^2 du modèle LpLe en fonction des tests sur les attributs de la variable pédologie	78
tab33: Erosions mensuelles estimées du Mbomou avant et après correction des indices	80

tab34: Erosion mensuelle estimée par sous-bassin	81
tab35: Erosion annuelle, concentration annuelle, débit moyen annuel et flux annuel des MES	84
tab36: Indice de FOURNIER inter-annuel (1990-1992) pas sous-bassin versant	89
tab37: Coefficient R^2 de la variance expliquée en fonction des variables introduite dans le modèle	90

LISTE DES FIGURES

fig1: Erosion chimique, érosion mécanique et mouvements de l'eau sur les versants	5
fig2: Répartition des feux sur l'ensemble des continents	17
fig3: Carte de répartition des zones de végétation en Afrique Centrale définies par l'UNESCO (1983)	18
fig4: Distribution annuelle des feux sur le continent africain	20
fig5: Carte de localisation du bassin versant de l'Oubangui	23
fig6: Esquisse morphologique du bassin de l'Oubangui	24
fig7: Le réseau hydrographique des principaux affluents de l'Oubangui à l'exutoire de Mongoumba	26
fig8: Les entités hydrologiques constitutives du bassin versant de l'Oubangui supérieur et moyen	29
fig9: Pédologie du bassin de l'Oubangui	30
fig10: Lithologie du bassin de l'Oubangui	32
fig11: Carte de localisation des points de prélèvements des matières en suspension sur l'Oubangui moyen	33
fig12: Carte approximative de répartition des stations pluviométriques	38
fig13: Carte de répartition des polygones de Thiessen autour de chaque station pluviométrique	43
fig14: Interpolation sous IDRISI de la pluviométrie de l'année 1991	45
fig15: Comparaison entre les résultats de la méthode de Thiessen et l'interpolation sous IDRISI	46
fig16: Processus de genèse des débits	51
fig17: Végétation du bassin de l'Oubangui	54
fig18: Carte des pentes et réseau hydrographique digitalisé surimposé	59
fig19: Superposition du réseau hydrographique digitalisé avec le réseau hydrographique reconstitué à partir du MNT	60
fig20: Carte du MNT corrigé	61
fig21: Carte de localisation des stations de prélèvements de MES	69
fig22: Comparaison entre les valeurs observées et estimées d'érosion (modèle LpLe)	70
fig23: Test de normalité du modèle LpLe	66
fig24: Résultat de la validation du modèle LpLe	68
fig25: Résultat de la validation après correction des indices de végétation	68
fig26: Comparaison entre les valeurs observées et les valeurs estimées d'érosion (modèle Le)	73
fig27: Test de normalité du modèle Le	72
fig28: Comparaison des érosions mensuelles estimées par le modèle LpLe (hypothèse 1) et le modèle Le (hypothèse 2)	75
fig29: Erosions estimées du Mbomou avant et après correction des indices	81
Fig30: Carte de l'érosion du mois de janvier	86
Fig31: Carte de l'érosion du mois de février	86
Fig32: Carte de l'érosion du mois de mars	86
Fig33: Carte de l'érosion du mois de avril	86
Fig34: Carte de l'érosion du mois de mai	86

Fig35: Carte de l'érosion du mois de juin	86
Fig36: Carte de l'érosion du mois de juillet	86
Fig37: Carte de l'érosion du mois de août	86
Fig38: Carte de l'érosion du mois de septembre	86
Fig39: Carte de l'érosion du mois de octobre	86
Fig40: Carte de l'érosion du mois de novembre	86
Fig41: Carte de l'érosion du mois de décembre	86
fig42: Variation mensuelle inter-annuelle de l'érosion, de la lame d'eau écoulée (Le) et de la lame d'eau précipitée (Lp)	83
fig43: Répartition de l'érosion annuelle sur l'Oubangui	87
fig44: Erosion annuelle sur chaque sous-bassin versant de l'Oubangui	84
fig45: Pourcentage de contribution aux flux globaux de chacun des sous-bassins versants	85

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AHNERT F. (1970), "Functional relationship between denudation, relief and uplift in large mid-latitude drainage basins". *Am. J. Sci.*, 268, p243-263.
- AMBROISE B. (1995), "Cours d'hydrologie générale". ENGEES, Strasbourg.
- BOULVERT Y. (1986), "Carte phytogéographique du 1/1000000, République Centrafricaine". Notice explicative, n°104, Edn ORSTOM, Paris.
- BOULVERT Y. (1992), "Document phytogéographique sur les savanes centrafricaine". Note du Laboratoire des Formations Superficielles, ORSTOM, Bondy, 200p.
- BROWNE T. J. (1993), "The role of geographical information systems in hydrology". *Hydro GIS 93: Application of Geographic information systems in Hydrology and Water Ressources* (Proceedings of Vienna Conference, April 1993), IAHS Publ, 211.
- CACHIER H. (1992), "Biomass burning sources". *Encyclopedia of Earth System Science*, volume 1, p 377-385.
- CALLEDE J., BOULVERT Y., THIEBAUX J.P. (1992), "Le bassin de l'Oubangui". *Coll. Monographies Hydrologiques*, Edn ORSTOM, Paris, 400p (in press).
- CENSIER C. (1991), "Dynamique sédimentaire d'un système fluvial diamantifère mésozoïque: la formation de Carnot (Rép. Centrafricaine)". *Doc. BRGM*, 205, 568p.
- CHORLEY R.J., SCHUMM S.A., SUGDEN D.E. (1984), "Geomorphology". Methuen, New York, USA.
- COLLET C. (1993), "IDRISI, Manuel de l'utilisateur". Traduction française, tomes I, 151p.
- COOKE W.F., KOFFI B., GREGOIRE J.M. (1996), "Seasonality of vegetation fires in Africa from remote sensing data and application to a global chemistry model" *J. Geoph. Res.*, in press.
- DWYER E., MALINGREAU J.P. (1995), "Global Fire Product". in: *IGBP-DIS Workshop on Global Fire Monitoring*, JRC, October 17-19, 5p.
- EASTMAN J. R. (1995), "Student Manual, Idrisi for windows". Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis, Clark University.
- EHRLICH D., GREGOIRE J.M., EVA H., JANODET E., KOFFI B., "Fire Detection, Land-Cover Characterization and Burnt Area Estimation in the Savannah-Forest Transition Zone of Central Africa". *ECSC-EC-EAEC*, Brussels. Luxembourg, 70p.
- FOURNIER F. (1962), "Climat et Erosion". Press. Universitaires de France, Paris, 201p.
- HOLEMAN J.N. (1968), "The sediment yield of major rivers of the World". *Wat. Res. Res.*, 4 (4), 737-747.
- HUDSON N.W. (1961), "An introduction to the mechanics of soil erosion under conditions of sub-tropical rainfall". *Proceedings and transactions of the Rhodesia Scientific Association*, 49, Part. 1, p15-25.
- HUDSON N.W. (1973), "Soil conservation". B.T. Bastford Ltd, London, 320p.
- JANSEN J.M.L., PAINTER R.P. (1974), "Predicting sediments yield from climate and topography". *J. Hydrol.*, 21, p371-380.
- JANSON M.B. (1982), "Land erosion by water in different climates". *UNGI, Rap.* 57, 151p.

- KILING M., RICHARDSON E.V. (1973), "Mechanics of Soil Erosion from overland flow Generated by simulated Rainfall". Colorado State university, Hydrology, p63.
- KIRBY K. N., (1993) "Advanced Data Analysis with SYSTAT". Multiscience Edn Press Inc., Van Nostrand Reinhold, New York, 475p.
- KOFFI B., GREGOIRE J.M. (1995), "Continental Fire Product for Africa Using AVHRR GAC data". in: IGBP-DIS Workshop on Global Fire Monitoring, JRC, October 17-19, 5p.
- KOFFI B., GREGOIRE J.M., MAHE G., LACAUX J.P. (1995), "Remote Sensing of bush Fire dynamics in Central Africa From 1984 to 1988: analysis in relation to regional vegetation and pluviometric patterns". Atmospheric Research, 39, p179-200.
- KUKAL Z. (1982), "Geology of recent sediments ". (CSAV Publishers Prague , 1964). in: D. Zachar dir., Soil Erosion, Elsevier.
- LANGBEIN W.B., SCHUMM S.S. (1958), "Yield of sediment in relation to mean annual precipitation". Am. Geoph. Union Trans., vol. 39, p1076-1084.
- LEFEIVRE B. (1993), "Etude Exprimentale et par Modélisation des caractéristiques physiques et chimiques des précipitations collectées en Forêt Equatoriale Africaine". Thèse, Univ. Paul Sabatier, Toulouse, 308p.
- MAIGNIEN R. (1958), "Le cuirassement des sols en Guinée Afrique Occidental". thèse, science, géologie, uni. Strasbourg; Mém. Ser. Carte Géol. Als-Lorr., Strasbourg, 16, 239p.
- MALIBANGAR D., ORANGE D., CENSIER C. (1993), "Note sur les caractéristiques physiques et phytogéographiques des bassins versants constitutifs du bassin de l'Oubangui". Rapp. Lab. Hydrologie, ORSTOM, Bangui (RCA), 60p.
- METTIN J.L. (1994), "Calcul de la lame d'eau précipitée sur le bassin de l'Oubangui à Mongoumba (1972-1992)". Maitrise de Géographie, univ. Bangui, p 44-70.
- MESTRAUD J.L. (1982), "Géologie des ressources minérales de la République Centrafricaine, état des connaissances à fin 1963". Mém. BRGM, 60, 186p.
- MEYBECK M. (1987), "Global Superficial Weathering of superficial rocks estimated from river dissolved loads". Am. J. Sci., 287, p401-428.
- MICHEL P. (1973), "Les bassins du Sénégal et de la Gambie: Etude géomorphologique". Thèse Lettres, géographie, univ. Strasbourg; Mém. ORSTOM, Paris, 63, 3 tomes, 753p.
- FATHALLAH M., GHILOUFI M. (1996), "Critique d'un MNT pour une etude globale d'érosion hydrique d'un bassin versant tropical humide: le bassin de l'Oubangui". Micro-projets, ENGREF MED/EVE, Lab. Comm. Télé. 16p.
- MOULA M., BRUSTET J.M., FONTAN J., EVA H., GREGOIRE J.M. (1995), "Contribution of Spread-Fire Model in the Study of Savannah Fire" AGU Conference on Biomass Burning and Global Change, Williamsbourg, USA, March 13-17, proceedings in preparation.
- OLIVRY J.C., BOULEGUE J. (1995), "Grands bassins fluviaux périatlantiques: Congo, Niger, Amazone". Actes du Colloque PEGI, Edn INSU-CNRS-ORSTOM, Paris (France), 503p.
- OLIVRY J.C.(1988), "Transport de matières sur les grands fleuves des régions intertropicales". in: Sediment Budgets", IAHS pub., 174, p509-521.

- ORANGE D. (1996), "Hydroclimatologie récente de l'Oubangui et flux de matières". Proc. TCMH 1996, "Tropical Climatology Meteorology and Hydrology" Brussels, Ed: DEMAREE G.R., 15p.
- ORANGE D., OLIVRY J.C., CENSIER C. (1995), "Variations et bilans des flux de matières particulaires et dissoutes de l'Oubangui à Bangui de 1987 à 1992". Act. du Coll. PEGI, INSU-CNRS-ORSTOM, Paris (France), p147-180.
- ORANGE D., FEIZOURE C., LARAQUE A., WESSELINK A.J. (1996), "Hydroclimatological changes on the Central African Continent: evidence from the Oubangui river". Physics and Chemistry of Earth, Edn EGS, 7p (in press).
- ORANGE D., WESSELINK A., FEIZOURE C. (1995), "Banque de données hydrologiques du bassin de l'Oubangui utilisée pour le programme PEGI/GBF (1986-1993)". Rapp. Lab. Hydrologie, ORSTOM, Montpellier, 52p.
- PINET P., SOURIAU M. (1988), "Continental erosion and large scale relief". Tectonics, vol. 7, n°3, p 563-582.
- POIDEVIN J.L. (1985), "Le Protérozoïque supérieur de la RCA, stratigraphie et structures". Ann. Sci.Géo., Musée Royal Afri.Cent., Tervuren (Belgique), 91, 75p.
- PROBST J.L. (1990), "Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale. Mécanismes, bilan global actuel et fluctuations au cours des 500 derniers millions d'années". Thèse Science Géologie, univ. Strasbourg, 190p.
- ROOSE E. (1977), "Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest". Trav. doc. ORSTOM, Paris, 78, 108p.
- ROOSE E. (1980), "Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale". Thèse Science, Géologie, univ. Orléans, 587p.
- ROUGERIE G. (1960), "Le façonnement actuel des modelés en Côte d'Ivoire Forestière". Thèse Lettre, géographie, univ.Paris; Mém.IFAN, Sénégal, 58, 542p.
- SHEPHERD I.D.H (1991), "Information integration and GIS". in: Maguire, D.J. Goodchild, M.F. and Rhind, D. W. (eds), Geographical Information Systems, Principales and Applications, vol 1, ch. 22, p 337-360, Longman, Harlow.
- SIGHA N.L., ORANGE D. (1996), "Physico-chimie des précipitations en Afrique Centrale". in: Colloque PEGI, Paris, janvier 1996, 10p.
- STALLARD R.F., EDMOND J. M. (1981), "Geochemistry of the Amazon; 1. Precipitation chemistry and the marine contribution to the dissolved load at the time of peak discharge". J. Geoph. Res., 86, p9844-9858.
- TARDY Y. (1990), "Erosion". in: Encyclopédia Universalis, p615-627.
- TRABAUD L. (1995), "Communication orale dans un rapport sur les feux de forêts en région méditerranéenne française". ENGEES, Strasbourg.
- UNESCO (1967), "Rapport final, groupe de travail de conseil de coordination sur les échanges d'information: transport total des sédiments aux océans". Bul.Int. Ass. Sci.Hydr., XII (3), p 100-110.
- UNESCO (1983), "Vegetation map of Africa". Unesco, Paris.
- WILSON L. (1973), "Variations in mean annual sediment yield as a fonction of mean annual precipitation". Am. J. Sci., 273, p 335-349.
- WISCHMEIER W.H.(1959), "A rainfall erosion index for an universal soil loss equation soil". Sci. Soc. Soc. Am. Proc., 23, p322-326.

- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. (1958), "Evolution of factors in soil loss equation".
Agron. Eng., 39 (8), p458-462.
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. (1960), "An universal soil loss estimating equation
to guide conservation farm planning". 7th inter. Cong. Soil Science, vol.I,
p418-425.

ANNEXE n° 1

SYSTAT FILE VARIABLES AVAILABLE TO YOU ARE:

BAMBARI	BANGASSO	BANGUI	BERBERAT	BIRAO
BONDO	BOSSANGO	BOSSEMBE	BOUAR	BRIA
LEBO	MOBAYE	MONGOUMB	NIANGARA	OBO
WATSA	YALINGA			

Resultat de l'Analyse en Composante Principale

COMPONENT LOADINGS		1	2	3	4	5
□						
BAMBARI	A	0.100	-0.101	0.886	0.128	0.276
BANGASSO	B	0.665	0.450	-0.423	0.069	0.340
BANGUI	C	0.294	-0.153	-0.202	0.461	-0.379
BERBERAT	D	0.065	0.499	0.566	0.613	-0.014
BIRAO	E	-0.319	0.773	-0.027	-0.357	0.046
BONDO	F	0.575	0.553	0.314	0.170	-0.120
BOSSANGO	G	-0.833	-0.070	0.149	0.296	0.175
BOSSEMBE	H	0.599	-0.223	0.090	-0.113	0.600
BOUAR	I	-0.649	0.056	0.057	0.133	0.491
BRIA	J	0.598	-0.540	0.282	-0.015	0.224
LEBO	K	-0.361	-0.071	-0.706	0.523	0.087
MOBAYE	L	0.656	0.259	-0.237	-0.512	0.232
MONGOUMB	M	0.645	0.109	-0.363	0.279	-0.187
NIANGARA	N	0.742	0.271	0.390	0.331	-0.143
OBO	O	-0.181	0.195	0.426	-0.659	-0.415
WATSA	P	-0.399	0.659	0.410	0.141	0.108
YALINGA	Q	0.097	-0.838	0.495	0.008	-0.131

VARIANCE EXPLAINED BY COMPONENTS

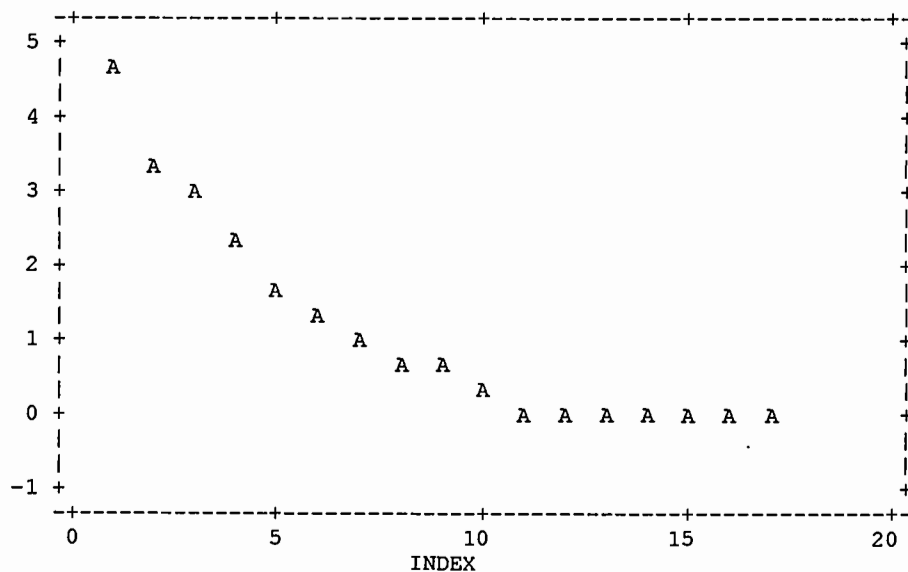
1	2	3	4	5
4.535	3.071	2.970	2.061	1.352

PERCENT OF TOTAL VARIANCE EXPLAINED

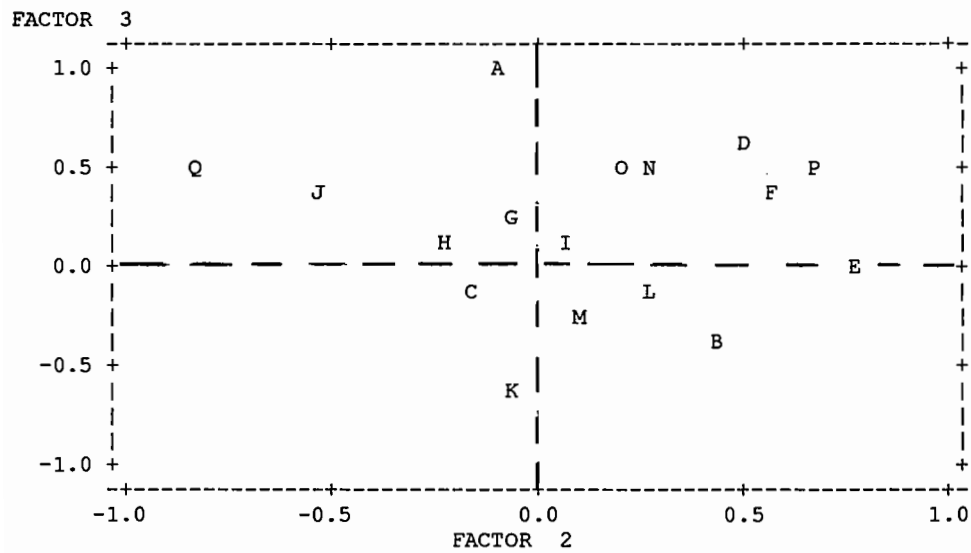
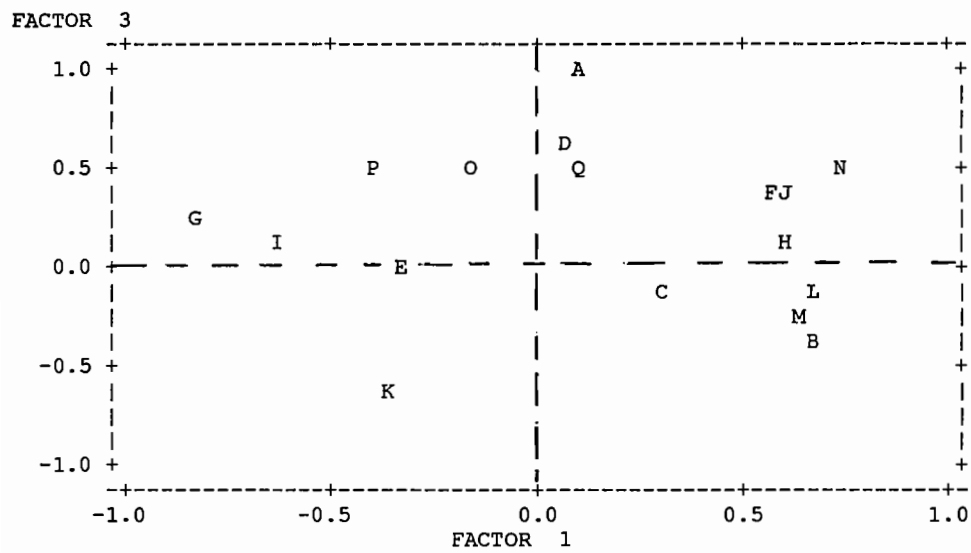
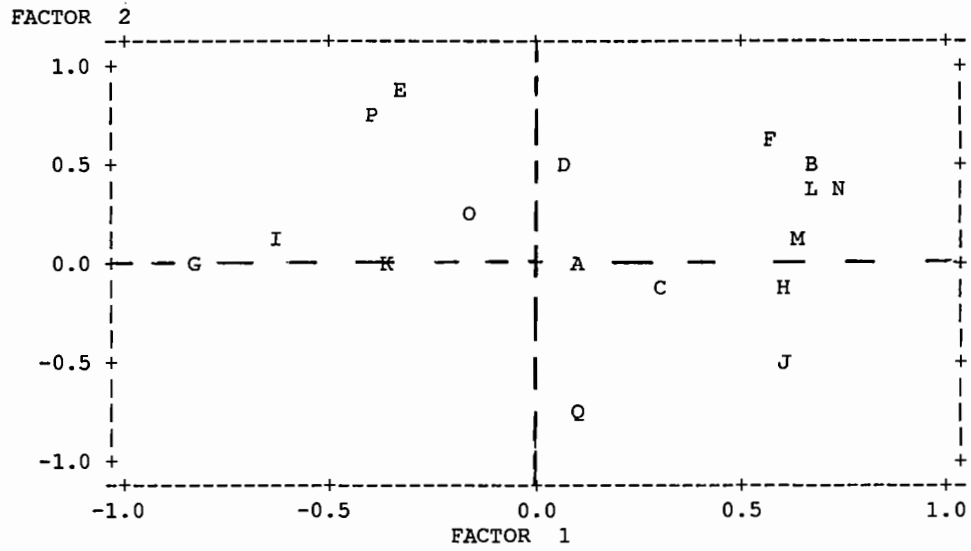
1	2	3	4	5
26.676	18.063	17.469	12.125	7.951

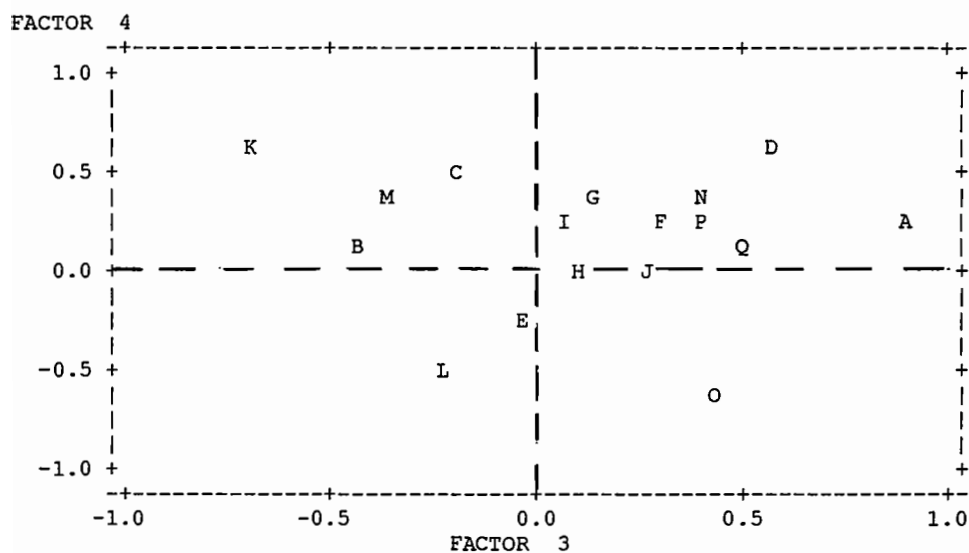
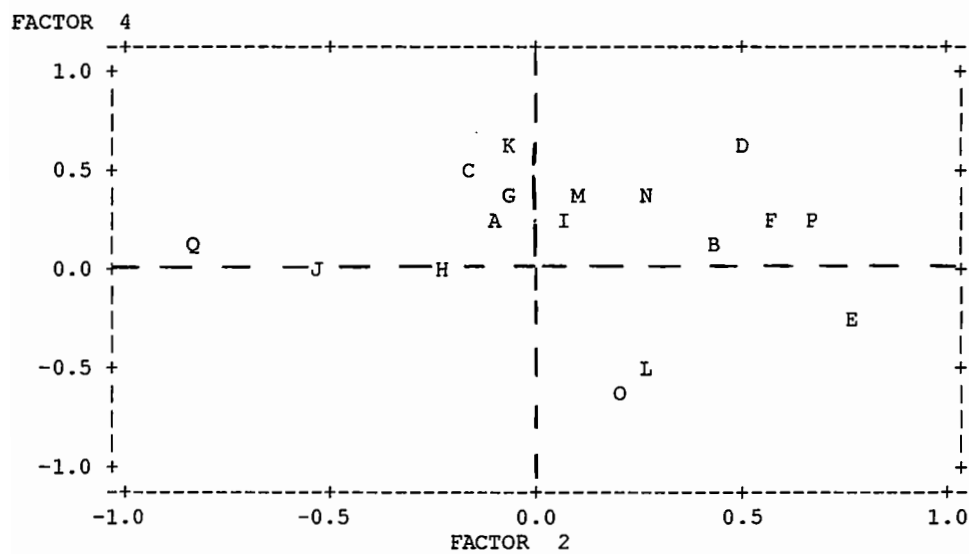
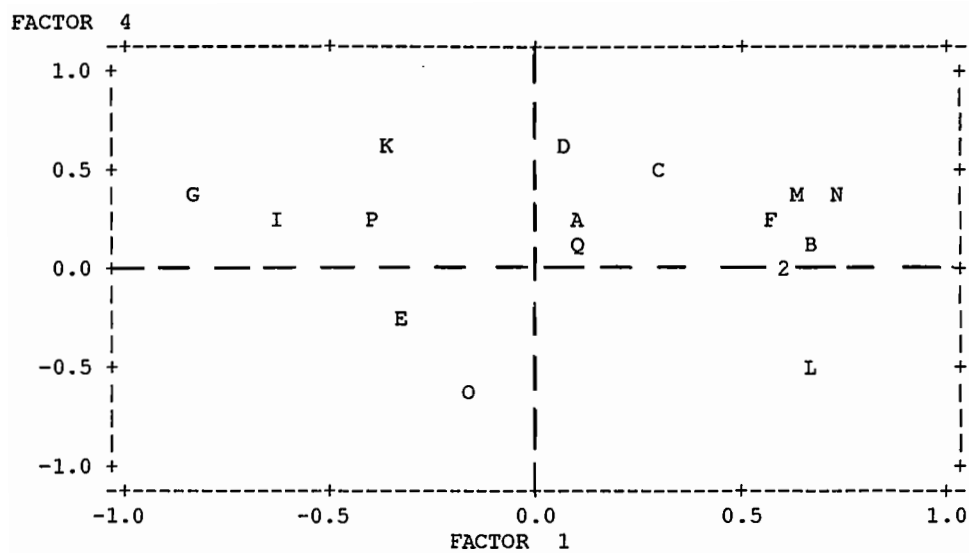
FACTOR SCREE PLOT

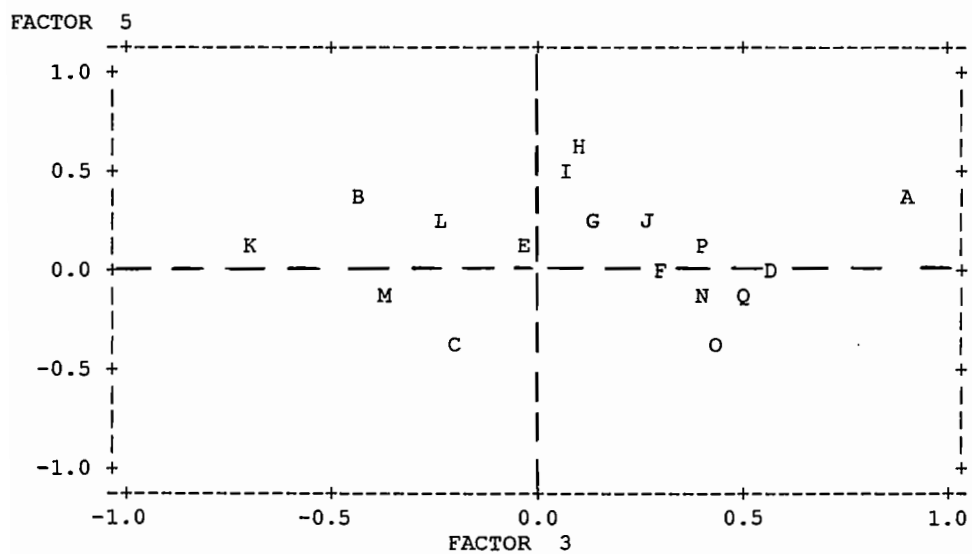
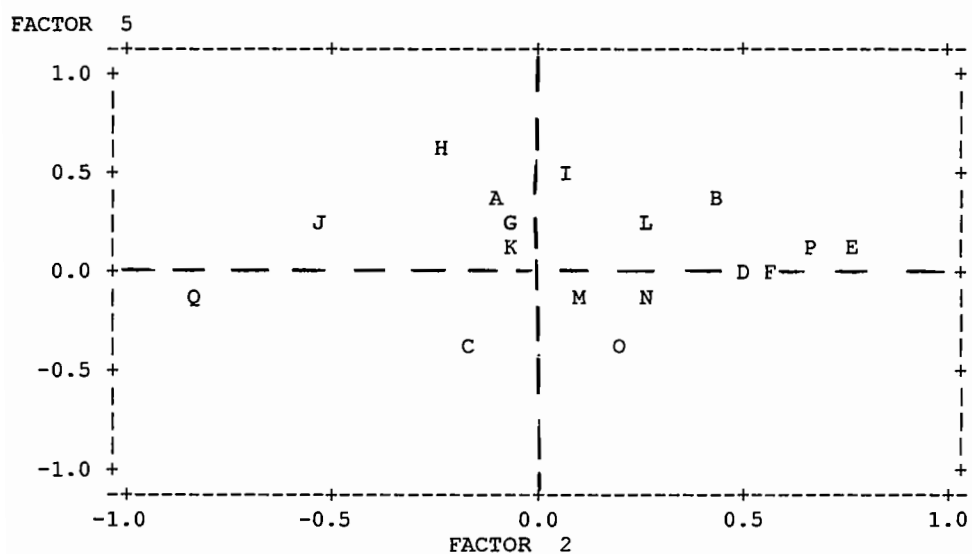
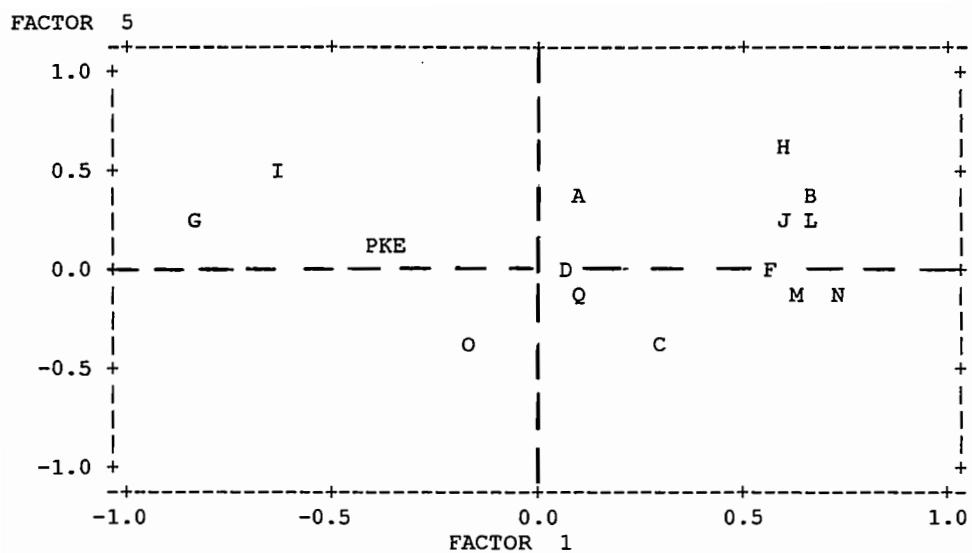
EIGENVALUES

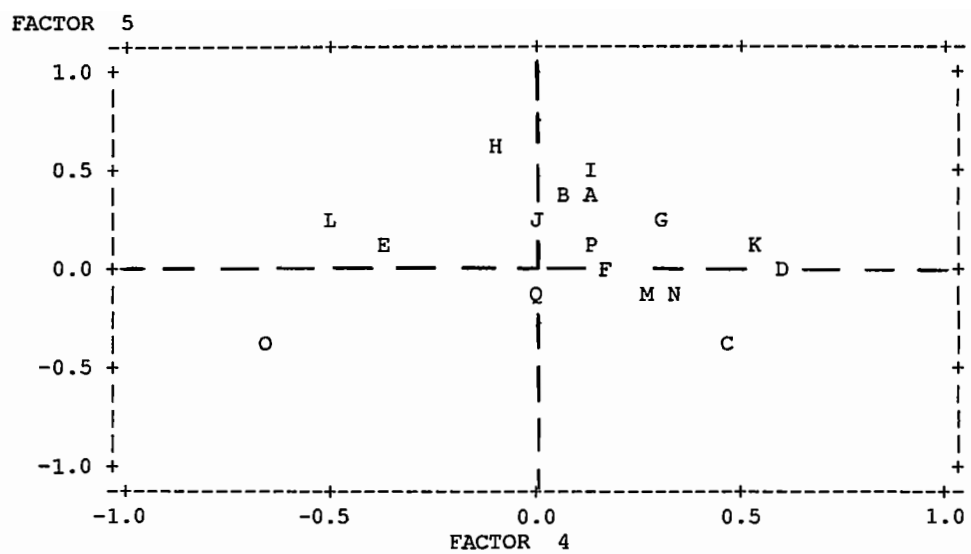


FACTOR LOADING PLOTS









ANNEXE n° 2

Cross-tabulation of bassin (columns) against vegeta (rows)

Calcul de nombre de pixels par type de végétation:

	0	1	2	3	4	5
0	826499	42	0	0	0	0
4	0	37565	11125	9959	0	1626
8	0	5189	0	3084	468	324
10	0	97903	14148	37814	24590	57258
Total	826499	140699	25273	50857	25058	59208

	6	7	8	9	10	11
0	0	1	0	0	0	12
4	16630	5382	0	39	1720	20345
8	1546	6778	328	907	65	0
10	14216	82544	64893	25985	27878	21236
Total	32392	94705	65221	26931	29663	41593

	12	Total
0	142	826696
4	10615	115006
8	1476	20165
10	15356	483821
Total	27589	1445688

4:forêt dense humide
8:forêt dense sèche
10:savane

Cross-tabulation of bassin (columns) against geol (rows)

Calcule de nombre de pixels par type de géologie:

	0	1	2	3	4	5
0	826499	474	0	50	60	135
1	0	105784	11292	30745	16376	43153
2	0	0	0	43	461	0
3	0	18661	4290	7699	2065	3069
4	0	10428	0	2947	48	4279
5	0	5352	9691	9373	6048	8572
Total	826499	140699	25273	50857	25058	59208

	6	7	8	9	10	11
0	0	331	122	162	136	339
1	9685	35363	57231	22425	21834	9000
2	0	42808	1075	0	606	22768
3	2590	5294	1656	0	0	0
4	4271	9707	5137	4344	6954	9475
5	15846	1202	0	0	133	11
Total	32392	94705	65221	26931	29663	41593

	12	Total
0	108	828416
1	12633	375521
2	0	67761
3	722	46046
4	14126	71716
5	0	56228
Total	27589	1445688

1:roche plutonique
2:grés
3:roche détritique
4:roche carbonatée
5:roche volcanique

Cross-tabulation of bassin (columns) against pedo (rows)

Calcul de nombre de pixels par type de pédologie:

	0	1	2	3	4	5
0	826499	0	0	0	30	0
2	0	0	0	80	1249	3954
4	0	0	0	975	5709	14663
6	0	140699	25273	49155	18069	40591
8	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	647	1	0
Total	826499	140699	25273	50857	25058	59208

	6	7	8	9	10	11
0	0	12	0	0	0	103
2	927	4490	14889	4141	5245	2296
4	9976	1473	0	0	0	0
6	20904	44601	47696	22790	21913	4192
8	585	9139	2259	0	0	0
10	0	34990	377	0	2505	35002
Total	32392	94705	65221	26931	29663	41593

	12	Total
0	36	826680
2	45	37316
4	0	32796
6	26417	462300
8	0	11983
10	1091	74613
Total	27589	1445688

2:sol jeune
 4:sol très induré
 6:sol moyennement induré
 8:sol peu induré
 10:sol non induré

ENGEEES, ECOLE NATIONALE DU GENIE DE L'EAU
ET DE L'ENVIRONNEMENT DE STRASBOURG

1, Quai Koch
67070 STRASBOURG CEDEX

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
MEMOIRE DE D.E.A. Mécanique et Ingénierie Filière "Sciences de l'Eau"

Auteur: GHILOUFI Mohamed	Promotion: Guadeloupe (1993-1996)
Titre: Etude de l'impact des feux sur l'érosion des sols à partir des transports solides des cours d'eau en milieu tropical humide (RCA) étape préliminaire.	Année de publication: 1996
Nombre de volume (s) : 1 Nombre de pages: 100 Nombre de références bibliographiques: 59	
Structure d'accueil: ORSTOM, Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération, Laboratoire d'Hydrologie centre de Montpellier.	
Résumé: L'étude de l'érosion a toujours été une préoccupation majeure de nombreux chercheurs des différents domaines scientifiques à cause de l'importance de ce phénomène dans le fonctionnement des écosystèmes. La difficulté d'acquisition des données suffisantes et récentes rend la modélisation parfois délicate. Nous avons effectué tout d'abord une reconstitution des données pluviométriques annuelles et mensuelles, puis on a calculé les indices de végétation, lithologie, pédologie et pente sur chaque sous-bassins versants. Ces indices représentent les caractéristiques intrinsèques du bassin versant. Deux types de modèles ont été testés: - le premier consiste à utiliser comme variable explicative, en plus des indices cités ci-dessus, la lame d'eau écoulee (L_e) et la lame d'eau précipitée (L_p); - le deuxième utilise les mêmes variables à l'exception de la lame d'eau précipitée Le modèle choisi a permis de donner une estimation de la réparation de l'érosion globale mensuelle moyenne par sous-bassins versants constitutifs de l'Oubangui, et d'en déduire l'érosion globale moyenne sur l'ensemble du bassin qui est de $4,7 \pm 0,4 \text{ t/km}^2/\text{an}$, ce qui correspond à une exportation de matières en suspension de $26,7 \text{ mg/l}$ au niveau de Mongoumba, exutoire du bassin. Ensuite l'application du modèle sur IDRISI a donné une visualisation de la répartition mensuelle et annuelle de l'intensité de l'érosion sur l'ensemble du bassin de l'Oubangui.	
Mots-clés: Erosion, MES, Feux, Modélisation globale, Tropical humide, S.I.G (IDRISI).	