

VIII° Journées Hydrologiques de l'ORSTOM - Montpellier, 22-23 Septembre 1992
"Régionalisation en hydrologie Application au développement"

REGIONALISATION DES PARAMETRES DU MODELÉ MAILLE:
IMPACT DE LA DEFORESTATION SUR LE REGIME HYDROLOGIQUE DE LA LOKOHO
(MADAGASCAR)

RANDRIAMAHERISOA Alain

Assistant' - Doctorant

Université Catholique de Louvain

Génie Rural - Place Croix du Sud, 2-Boite 2

B-1348 Louvain-la-Neuve, BELGIQUE

BINARD Marc

Chercheur

Université de Liège - Surfaces

7, Place de XX atout (B.A1-12)

B-4000 Liège, BELGIQUE

Résumé:

L'emploi des modèles hydrologiques régionalisés est *très* utile pour l'étude des impacts des changements des caractéristiques physiques sur le volume et le transfert des eaux ruissellées dans un bassin versant. Ces modèles requièrent une bonne description des phénomènes hydrologiquement liés à la physiographie du bassin.

La distribution spatiale des caractéristiques physiographiques et hydrologiques dans un bassin peut être identifiée à partir des données télédéteectées ou de la cartographie numérique en général. Dans le modèle hydrologique de simulation et de prédétermination des crues, développé dans notre laboratoire, la régionalisation des paramètres est basée sur le maillage du bassin, considérant les mailles discrétisant le bassin comme l'unité d'analyse du bilan hydrologique. Différentes sources d'informations métriques et cartographiques sont alors utilisées pour la caractérisation des mailles: la photographie aérienne et l'imagerie satellitaire pour l'occupation du sol et le Modèle Numérique de Terrain (MNT) pour les caractéristiques topographiques comme la pente, le gisement, les lignes de crêtes, les thalwegs, le réseau de drainage naturel,... D'autres caractéristiques cartographiques comme le type de sol peuvent être numérisées pour améliorer l'estimation des conditions de drainage dans chaque maille. Les données proprement hydrologiques comme la pluie, l'évapotranspiration, le débit,— sont distribuées à chaque maille en fonction de la carte de la zone d'influence de chaque station de mesure, soit selon le polygone de Thiessen, soit selon le sous-bassin correspondant. Toutes ces informations sont traitées au préalable avec un Système d'Information Géographique pour permettre la classification du potentiel au ruissellement de toutes les mailles constituant le bassin. Cette procédure permet la prise en compte à petite échelle de la variabilité spatiale des caractéristiques physiques du bassin ainsi que l'étude rapide de leur évolution spatio-temporelle.

Le modèle est utilisé en particulier pour l'étude d'un grand bassin versant rural à Madagascar. Depuis le début des années soixante, ce bassin a fait l'objet de divers aménagements axés sur la lutte contre l'inondation et la mise en valeur agricole de la plaine très fertile au centre du bassin. Ces aménagements concernent en particulier les rectifications et l'endiguement des rivières, le drainage et l'assainissement des zones hydromorphes, l'irrigation en contre saison des périmètres rizicoles,... Mais parallèlement aux travaux dans la plaine, les versants de ce bassin ont subi des déforestations rapides au profit des cultures temporaires de riz pluvial nécessaires à la subsistance d'une population fortement accrue suite à une immigration et une poussée démographique explosive. Il est alors intéressant d'étudier l'impact des changements des caractéristiques physiques, en particulier l'occupation du sol, sur le régime hydrologique des rivières dans ce bassin.

Abstract:

The use of a regionalized hydrological model is very useful for the prediction of the impact of land cover changes on the volume of the runoff and its transfer. These models require a good description of the phenomena and the hydrological parameters linked to the watershed physical characteristics. The spatial distribution of the physiographical and hydrological characteristics can be identified either from remote sensing data or from numerical cartography in general.

In the hydrological simulation and flooding prediction model, developed in our laboratory, the regionalization of parameters is based on a square gridding of the basin, considering the meshes of the discretized basin as the analysis unit of hydrological balance. Different metrical and cartographical data sources are used to characterize each mesh of the grid: aerial photography and satellite imagery for the land use, and Digital Terrain Model (DTM) for the topographical characteristics like crest lines, thalwegs, naturel drainage network, slope, orientation,... Other mapped data, like soil type, can be numerized to help in estimating the drainage condition of each mesh. Hydrological data (rainfall, evapotranspiration and runoff) are computed for each mesh by the Thiessen's polygons or in accordance with the associated sub-basin. All the data are handled by a GIS in order to classify the surface runoff potential of all meshes in the watershed. This procedure allow to consider the spatial variability of the physical characteristics at small scale and to study quickly their spatio-temporal evolutions.

The model was used to study the case of one large rural watershed in Madagascar. Since the 1960's, several waterworks were achieved (e.g. detours rivers, ...) in order to struggle against the flooding of the upstream fertile plain (subject of various developments). Meanwhile, the forest of the basin hillslopes was and still strongly claimed for land cultivation (pluvial vice crops), which is necessary for the subsistence of a fast growing population due to immigration and exploding demography. It is interesting to study the impact of the basin physical characteristics changes, particularly of the land cover, on the river flow régime in this basin.

Introduction

Toute modification des caractéristiques physiques d'un bassin implique un changement du régime hydrologique des rivières dans ce bassin. La régionalisation des paramètres des modèles hydrologiques est très utile pour la prédiction des impacts des changements de l'occupation du sol sur le volume et le transfert des eaux ruissellées. Elle permet en outre l'estimation du régime des rivières non équipées d'appareil de mesure. Les modèles régionalisés nécessitent une bonne description des phénomènes et des paramètres hydrologiquement liés aux caractéristiques physiques du bassin. La distribution spatiale des caractéristiques physiographiques et hydrologiques dans un bassin peut être réalisée à partir des données télédéteectées ou de la cartographie numérique en général. Divers modèles sont alors développés et proposés pour l'utilisation optimale de la cartographie numérique dans la modélisation hydrologique (Abbott et al., 1986; Allewijn, 1990; Schultz, 1988; Walsh et al., 1985 etc).

La modification de l'environnement, plus particulièrement de la forêt, est un des sujets de l'actualité mondiale surtout dans les pays tropicaux en voie de développement. C'est effectivement le cas de l'Est de Madagascar, où le défrichement et la pratique du feu au profit des cultures temporaires de riz pluvial ne sont plus une simple coutume traditionnelle, mais devenus une nécessité pour la subsistance d'une population fortement accrue suite à une immigration massive et une forte poussée démographique. Cependant, ces modes de culture ne sont pas nécessairement bénéfiques car ils peuvent provoquer d'autres conséquences néfastes qui ne sont pas souvent mesurées en temps utile. Ainsi, il est important d'étudier l'impact des changements des caractéristiques physiques du bassin, en particulier de l'occupation de sol, sur le régime hydrologique des rivières dans ce bassin. Le présent travail traite le cas d'un grand bassin de cette région où l'occupation du sol est continuellement modifiée, d'une part suite à l'ensemble d'aménagements hydro-agricole dans ce bassin et d'autre part suite à la pratique des cultures temporaires de riz pluvial sur les versants.

DESCRIPTION DU BASSIN

La rivière Lokoho draine à la sortie de la plaine d'Andapa un bassin de 1050km² situé au Nord-Est de Madagascar [Figure 1].

Le relief de ce bassin est caractérisé par le contraste très marqué de deux unités géomorphologiques nettement différenciées. Sous forme de cuvette, une vaste plaine d'altitude comprise entre 460 et 500 m occupe le centre du bassin, entourée par des massifs montagneux à versants abrupts dont les sommets fluctuent entre 1200 et 2400m d'altitude.

Ces deux entités sont séparées par une frange intermédiaire de piedmont à pente moyenne. Le rétrécissement du lit de la Lokoho à la sortie de la plaine provoque l'inondation fréquente de cette plaine très fertile car l'étranglement de cet exutoire ne permet pas l'évacuation rapide de la concentration des eaux de ruissellement provenant des versants [voir Figure 2].

Depuis le début des années soixante, divers aménagements hydrauliques ont été menés en vue de la lutte contre l'inondation de cette plaine dans le cadre des projets FED¹ sur la mise en valeur agricole de la plaine du bassin.

¹ FED: Fond Européen pour le Développement rattaché à la Communauté Economique Européenne.

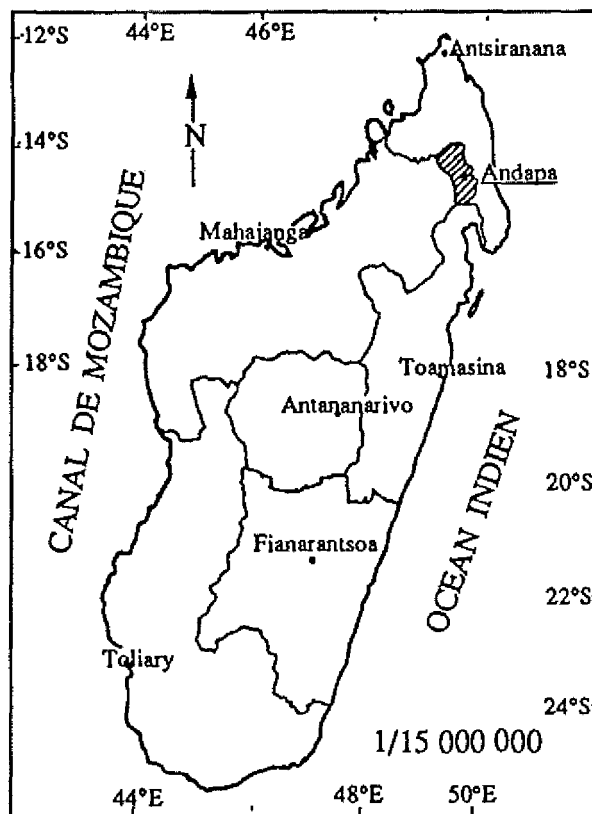


Figure.1 Situation géographique du bassin de la Lokoho.

Les travaux effectués consistent principalement à élargir, à approfondir, à faucarder et à rectifier le lit de la Lokoho dans ce tronçon étroit. Techniquement, l'objectif était d'avoir un régime d'écoulement critique évacuant un fort débit à une faible hauteur d'eau. Ces travaux ont permis de diminuer de quelques mètres la hauteur d'eau qui y passe lors des fortes crues et de réduire par conséquent le risque d'inondation de la plaine juste en amont. Cette plaine était par ailleurs le centre d'intérêt de diverses réalisations d'aménagements comme le drainage, l'assainissement, l'irrigation gravitaire en contre saison des rizières, l'endiguement des rivières, l'installation d'une station de pompage et d'une centrale énergétique, etc (Agrer, 1978).

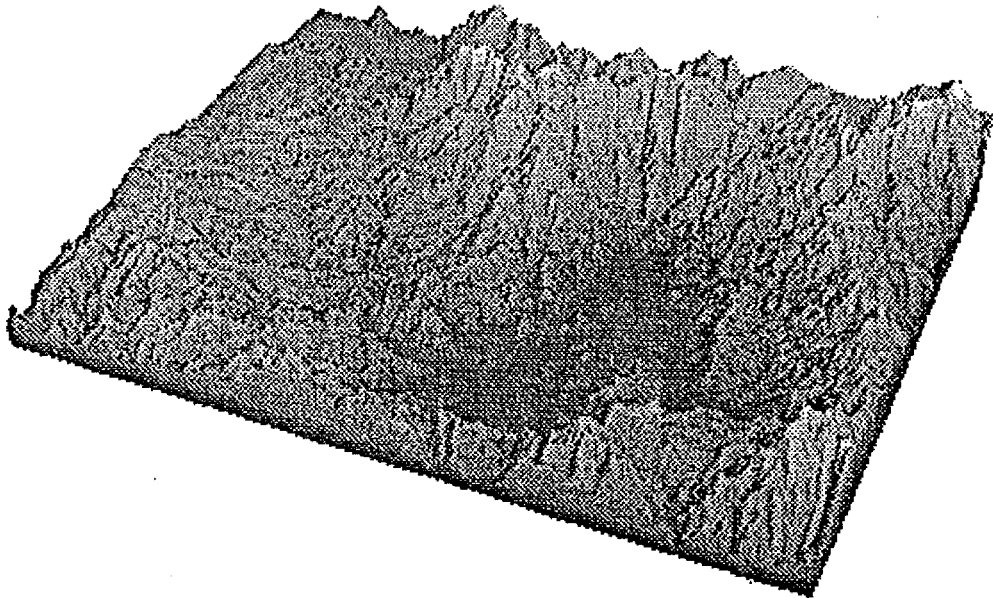


Figure 2: Le Modèle Numérique de Terrain du bassin versant de la Lokoho

Le climat dans la cuvette est du type tropical humide et chaud. La température moyenne varie de 18°C en juillet à 25°C en février le mois le plus chaud. L'humidité relative est en moyenne de l'ordre de 87% mais pouvant atteindre 97% en mars et avril. La pluviométrie annuelle moyenne est de 2041mm répartie sur 272 jours de pluie dont 65% est tombée entre décembre et mars. Cette période est marquée par le passage des perturbations cycloniques les plus redoutables en ce qui concerne les crues. Ce sont des fortes pluies de durée relativement courte, souvent associées à des vents violents pouvant parfois dépasser 9 m/s. Une hauteur de pluie de 104mm a été enregistrée en une nuit lors du cyclone Collette en 1966; une autre de 228,4mm en 24 heures lors du cyclone Georgette en 1968 ainsi que 202,5mm en 24 heures lors du cyclone Danae en 1976.

En période de crues, le débit de la Lokoho est en moyenne de l'ordre de 100 m³/s, mais peut atteindre 2000 m³/s lors des averses cycloniques. Un mur de 8m d'eau associé à un débit de cette ordre de grandeur a été effectivement observé au niveau de l'exutoire lors du cyclone Georgette. Suite à l'achèvement vers la fin des années soixante des travaux hydrauliques cités précédemment, la hauteur d'eau associée à tel débit n'était plus que de l'ordre de 6m, telle que observée lors du cyclone Danae en 1976.

Du point de vue géologique, la région est couverte en majeure partie par des terrains très anciens appartenant au précambrien métamorphique situés pratiquement en entier dans les gneiss du système de graphite, rompus au Nord et au Sud par des granites à faciès Malgachitique (charnockites) avec quelques affleurements dispersés de quartzite.

Un manteau d'altération de sol ferrallitique épais par endroit occupe les versants sur gneiss alors que le piedmont et la plaine sont constitués respectivement par des sols limoneux caillouteux et des sols limono-argileux à argileux parfois hydromorphiques.

Les versants ont été entièrement colonisés par des végétations forestières denses et par des cultures clairsemées de café et de Vanille. Mais au cours de ces 30 dernières années, des cultures temporaires de riz pluvial après défrichement et passage du feu, suivies généralement d'un abandon en jachères, communément appelées respectivement *Tavy* et *Savoka*, sont venues interrompre la monotonie de la strate arborée. La plaine avec une mauvaise condition de drainage, par contre est actuellement presque entièrement aménagée en rizières.

Ces modifications de l'occupation du sol dans le bassin sont dues principalement à l'activité d'une population qui se consacre totalement à l'agriculture. Les habitants dans la cuvette sont caractérisés par leur origine très variée, par une très forte croissance démographique et par une présence récente suite à l'immigration due à la fertilité des terres et aux aménagements très prometteurs. La densité de population répartie sur 765 km² est de 93 habitants par km² avec un taux d'accroissement de 4%.

C'est pour la subsistance et le bien-être d'une telle population fortement accrue et très motivée que l'occupation du sol dans le bassin a subi beaucoup de changements dont les conséquences ne sont pas toujours en leur faveur et parfois désastreuses; entre autre en ce qui concerne le régime hydrologique des rivières. Un modèle hydrologique régionalisé est alors utilisé pour en évaluer l'impact sur le régime de la Lokoho.

LA REGIONALISATION DES PARAMETRES DU MODELE MAILLE

Description du modèle maillé

Sans vouloir rejeter systématiquement les méthodes purement empiriques, les aléas de leurs résultats font que beaucoup se sont tournés vers la modélisation mathématique où deux voies s'ouvrent aux hydrologues. On distingue d'un côté, les modèles stochastiques où l'on cherche une relation quelconque entre un *input* qui est la pluie et un *output* qui est le débit. De l'autre côté, on a les modèles déterministes, beaucoup plus physiques, qui tentent de modéliser la relation pluie-débit en simulant les différents phénomènes conduisant à la génération des crues.

Pour l'étude de l'influence de l'un ou l'autre phénomène sur la relation pluies-débits, seuls les modèles déterministes sont les mieux adaptés et plus particulièrement ceux qui considèrent la variabilité spatiale des paramètres liés à la physique du phénomène. Le modèle maillé, qui est du type distribué, en fait partie. Il est destiné à la simulation des débits de crues et à l'application particulière de prédétermination des crues de projet. L'originalité du modèle maillé est justement la discrétisation du bassin en un ensemble de mailles qui sont les unités d'analyse au niveau desquelles on considère les fonctions de productions et les fonctions de transfert selon les caractéristiques topographiques et l'occupation du sol de chaque maille. De cela découle la considération à petite échelle de la variabilité spatiale des paramètres et l'étude de l'impact de leur évolution spatio-temporelle en considérant différentes situations. Comme évolution, on a par exemple le cas du changement de l'occupation du sol dû à l'urbanisation, à la déforestation et aux divers aménagements dans le bassin.

Dans ce modèle, la fonction de production, qui modélise pour chaque maille la manière dont la pluie brute se transforme en pluie ruisselée, est régie par le coefficient de ruissellement dépendant de l'intensité de la pluie, de la couverture, de l'imperméabilité et de la pente du sol. La fonction de transfert qui traite la manière dont la pluie ruisselée atteint l'exutoire du bassin versant est régie par les vitesses de ruissellement qui dépendent de la pente, du gisement et de la couverture du sol ou du chenal. Le principe de transfert est l'isochronisme.

La régionalisation des paramètres du modèle

La considération de la variabilité spatiale des paramètres du modèle est faite à partir de la cartographie numérique en utilisant en particulier le MNT et la télédétection. C'est en effet l'intérêt de l'analogie de la structure du modèle maillé et le mode de représentation raster de la cartographie numérique.

Ces deux techniques s'épousent parfaitement car la cartographie numérique fournit les informations spatiales nécessaires au modèle et permet par conséquent d'éviter le travail fastidieux de paramétrisation de toutes les mailles du bassin, jadis effectué manuellement. La modélisation hydrologique au niveau de chaque maille constitue à son tour une caractéristique fonctionnelle des pixels des cartes numériques [Figure 3].

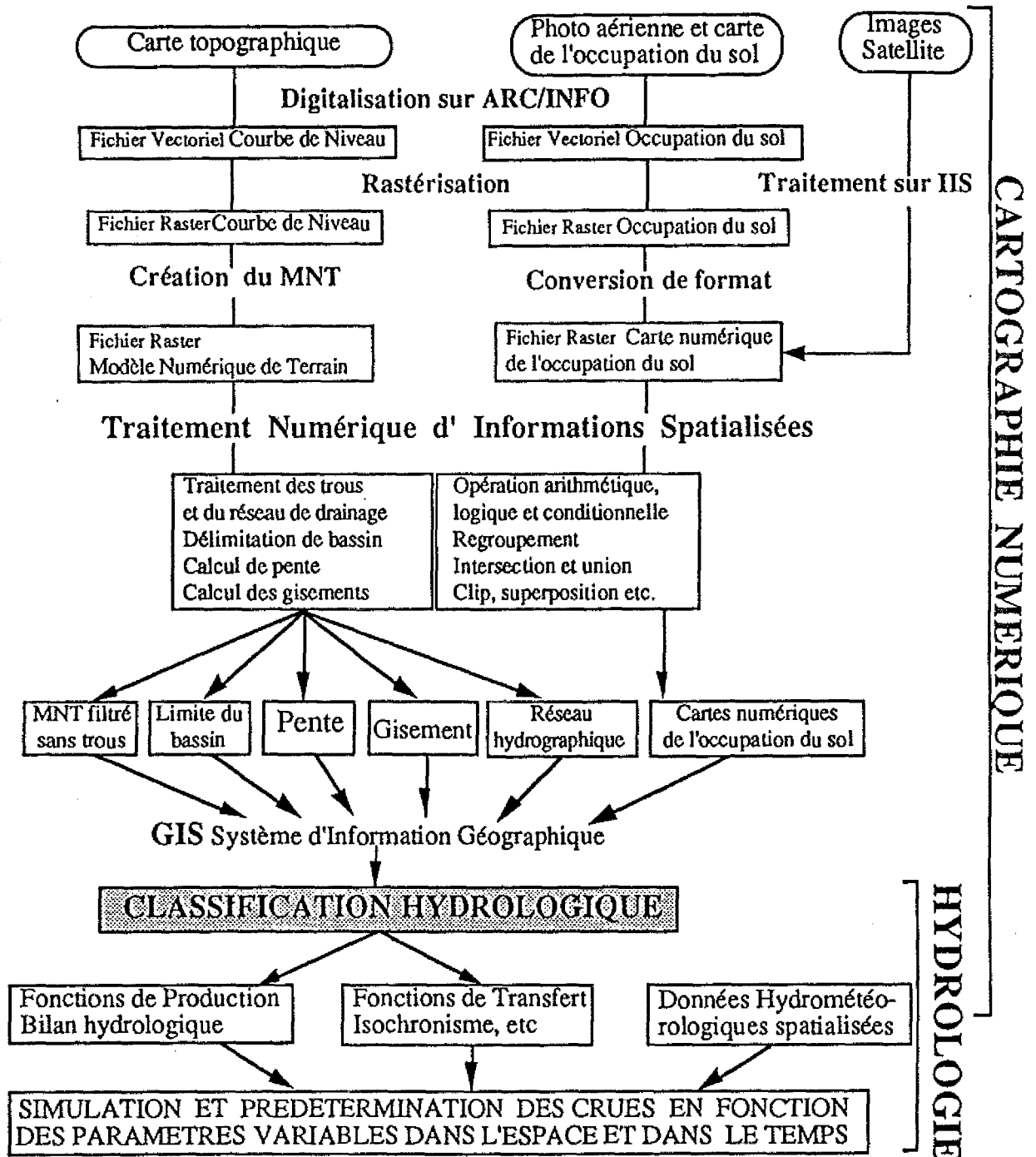


Figure 3. Organigramme de mise en œuvre de la modélisation hydrologique de la Lokoho (Randriamaherisoa A., 1990)

L'uniformisation de la classification de l'occupation du sol s'impose car les végétations sont considérées uniquement par leur rôle dans l'hydrologie du bassin, notamment en ce qui concerne l'interception des pluies, l'évapotranspiration, l'infiltration et le ruissellement. Certaines affectations de sol peuvent être regroupées dans une même "classe de végétation" en fonction de leur taille, de leur densité et en quelques sortes de leur potentialité à l'écoulement.

Pour le bassin de la Lokoho, quatre classes de végétation sont finalement retenues. La première, qui est la classe des végétations supérieures, regroupe les forêts primaires et secondaires. La deuxième, celle des végétations moyennes, est constituée par les cultures de café et vanille, le *tavy*² et le *savoka*³ et les zones habitées. Les zones habitées, si rares dans le bassin, sont regroupées dans cette classe car en générale elles sont entourées de culture de café, de banane et de vanille. La troisième classe, représentée par la végétation basse, regroupe les rizières sous eaux et les zones marécageuses de la plaine. La quatrième classe est constituée par les rivières qui sont en quelques sortes la classe sans végétation [Tableau 1].

Pour ajouter un caractère qualitatif à l'analyse, les affectations de sol ont été combinées avec une caractéristique topographique du bassin. Il s'agit de la pente qui est calculée pour chaque maille à partir du MNT suivant la ligne de plus grande pente en fonction de l'altitude des ses 8 voisins directs. Les valeurs ponctuelles des pentes ont été classées dans trois catégories qui sont respectivement la classe des faibles pentes, la classe des pentes moyennes et la classe des fortes pentes.

Dans le cas du bassin de la Lokoho, la considération de l'imperméabilité du sol n'est pas utile car les types de sols et par conséquent les conditions de drainage se confondent exactement avec la distinction des unités géomorphologiques selon les classes de pentes choisies. En effet, les versants sont recouverts par des sols ferralitiques à bon drainage alors que le piedmont et la plaine sont constitués respectivement par des sols limoneux caillouteux et des sols limono-argileux à argileux parfois engorgés d'eau. De toute façon, le modèle est spécialement utilisé en période de crues durant lesquelles les sols sont considérés en état de saturation.

L'organigramme à la figure 3 résume les étapes de la réalisation en pratique de l'étude. La digitalisation des documents de restitutions de photographies aériennes et le traitement des imageries satellitaires procurent numériquement les informations qualitatives et quantitatives sur l'occupation du sol. Les caractéristiques physiques du relief du bassin intervenant dans le modèle, comme la pente, le gisement, les lignes de crêtes, les thalwegs, le réseau de drainage naturel, la délimitation automatique du bassin et des sous-bassins etc, sont déduites directement du MNT. Ce dernier est élaboré à partir du traitement de la carte numérique vectorielle des courbes de niveau issue de la digitalisation sur ARC/INFO de la carte topographique. Le mode de calcul est l'interpolation linéaire suivant la ligne de plus grande pente des altitudes de chaque nœud du maillage avec des considérations particulières pour les crêtes et les thalwegs. Le MNT résultant est corrigé des trous artificiels et des aberrations éventuelles pour être drainant.

Les différentes cartes numériques du relief et de l'occupation du sol nécessaires au modèle constituent les *input* d'un Système d'Information Géographique (SIG) de type raster destiné à la classification hydrologique des mailles du bassin versant et à la distinction des cas spéciaux nécessitant des traitements particuliers comme les bassins d'orage, les stations de pompage, etc. Les classes hydrologiques, qui en résulte, déterminent en quelques sortes les potentialités au ruissellement des différents cas observés dans le bassin. A chaque classe correspond ses paramètres spécifiques. Le ruissellement au niveau d'une maille va dans l'ordre croissant selon qu'on a une végétation dense, une faible pente et un sol perméable vers une maille sans végétation, à très forte pente et sur sol imperméable. Cette classification peut être remise à jour facilement en ne changeant sur les cartes numériques des caractéristiques physiques du bassin que l'affectation des régions ayant subi des modifications [Figure 4].

Les résultats de la classification font partie de l'*input* des fonctions de production et des fonctions de transfert du modèle maillé. La répartition spatiale des données météorologiques et des données hydrométriques est prise en compte dans le modèle par les cartes numériques raster des zones d'influence de chaque station du réseau de points de mesures installés dans le bassin. Ces zones d'influence sont déterminées soit selon les polygones de Thiessen soit selon les sous-bassins correspondants. Ainsi chaque maille reçoit les données météorologiques du sous-bassin et/ou de la station la plus proche.

² Tavy: Culture temporaire de riz pluvial sur versant après défrichement et passage du feu

³ Savoka: Jachère succédant le Tavy

La régionalisation des paramètres de ruissellement ou plus exactement la considération de leur répartition spatiale et leur évolution spatio-temporelle par l'intermédiaire de la classification hydrologique des mailles discrétisant le bassin versant, trouve son intérêt particulièrement dans le cas du bassin de la Lokoho. La disposition des classes de végétation et des types de sol concorde parfaitement avec les trois unités géomorphologiques distinguées par les classes de pentes choisies créant ainsi des régions homogènes. Les versants à fortes pentes sont constitués quasi totalement par des sols ferrallitiques et recouverts principalement par les végétations supérieures. Les piedmonts à pentes moyennes sont occupés en partie par des végétations supérieures mais surtout par des végétations moyennes. La plaine à faible pente, constituée par des sols argileux et limono-argileux, est recouverte quasi totalement par la végétation basse.

SUIVI DE L'EVOLUTION DES PARAMETRES REGIONALISES

Trois situations de l'occupation de sol du bassin de la Lokoho sont cartographiées sous forme numérique en suivant la procédure décrite précédemment. Les deux premières situations sont obtenues à partir de la restitution des photographies aériennes prises respectivement en 1957 et en 1978. La troisième situation est représentée par le résultat du traitement de deux scènes multispectrales SPOT prises respectivement en 1989 et 1990. Comme le MNT, toutes ces cartes numériques ont une résolution spatiale de 100m, qui est le compromis entre la bonne représentation de l'homogénéité des différents types d'occupation de sol et la taille de fichier raisonnable pour un temps de calcul optimal sur le micro-ordinateur de travail (Macintosh).

La situation 1957 renseigne sur l'état du bassin avant la déforestation et le début des aménagements dans le bassin. L'activité humaine sur le bassin était encore très faible. Par contre, la situation en 1978 est marquée par des changements spectaculaires des étendues de chaque type d'occupation de sol [Figure 4]. Plusieurs phases de l'aménagement hydro-agricole de la plaine étaient déjà achevées et la déforestation des piedmonts d'accès facile était presque généralisée. En effet, 37% des forêts en 1957, soit près de 300 km² c'est à dire 28% de la superficie du bassin, sont transformées en *Tavy* et *Savoka* en 1978 [Tableau 1]. Bien que cette déforestation affecte toutes les catégories de forêt sur des étendues sensiblement égales (respectivement 91.4km² sur les faibles pentes, 94km² sur les pentes moyennes et 106.5km² sur les fortes pentes), une nette préférence relative est observée pour les zones à faibles pentes et pentes moyennes, probablement à cause de l'accès nettement plus facile et surtout pour mieux profiter les eaux de pluies vu que la culture n'est pas irriguée. En effet, la diminution des forêts sur pente faible est plus de 50%, alors que sur pente moyenne elle n'atteint pas 40% et encore plus faible sur forte pente, moins de 29% [Tableau 2].

Classe	I	II				III		IV
Type	Forêt	"Tavy"	Culture	Habitat	Erodée	Rizière	Marais	Rivière
1957	785,3	67,0	50,6	3,2		37,1	57,1	45,2
1978	493,6	311,3	68,3	7,9	14,6	104,4		45,2
1990	556,5	200,6	135,9	12,7		78,0	16,3	45,22

I: Végétation supérieure II: Végétation moyenne III: Végétation basse IV: Sans végétation

Tableau 1: Importance relative en km² de l'occupation du sol dans le bassin de la Lokoho

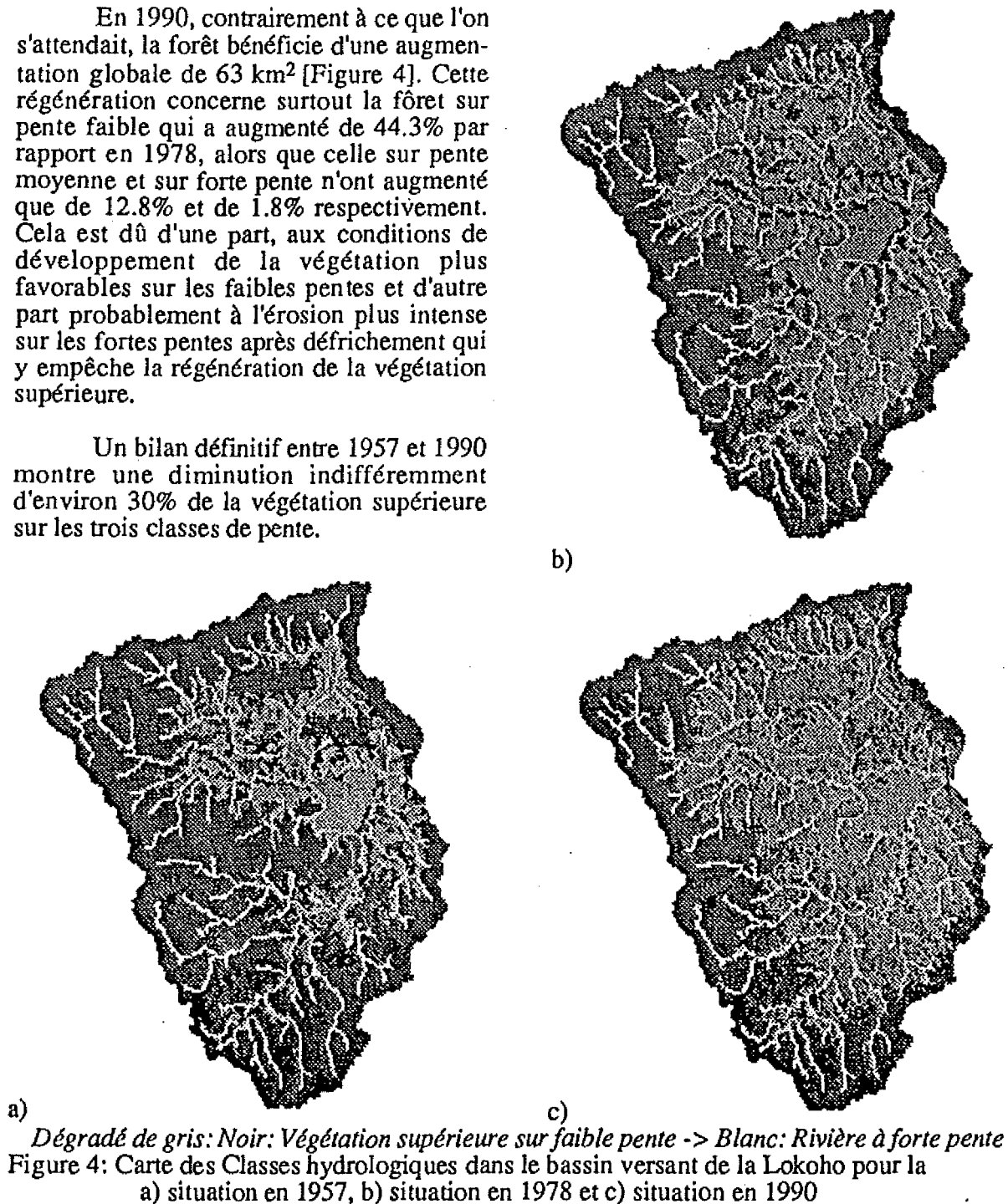
Pente	Végétation Supérieure			Végétation moyenne			Végétation basse			Rivière		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
1957	181.5	236.0	367.8	80.7	21.0	19.0	90.4	2.9	0.8	38.1	6.1	1.05
1978	90.1	142.1	261.3	163.4	113.9	124.9	77.1	4.0	1.3	38.1	6.1	1.05
1990	130.1	160.4	266.0	131.4	97.6	120.4	91.1	2.1	1.1	38.1	6.1	1.05

* I : Faible pente, II : Pente moyenne , III : Forte pente

Tableau 2: Importance relative en km² de chaque classe hydrologique du bassin de la Lokoho.

En 1990, contrairement à ce que l'on s'attendait, la forêt bénéficie d'une augmentation globale de 63 km² [Figure 4]. Cette régénération concerne surtout la forêt sur pente faible qui a augmenté de 44.3% par rapport en 1978, alors que celle sur pente moyenne et sur forte pente n'ont augmenté que de 12.8% et de 1.8% respectivement. Cela est dû d'une part, aux conditions de développement de la végétation plus favorables sur les faibles pentes et d'autre part probablement à l'érosion plus intense sur les fortes pentes après défrichement qui y empêche la régénération de la végétation supérieure.

Un bilan définitif entre 1957 et 1990 montre une diminution indifféremment d'environ 30% de la végétation supérieure sur les trois classes de pente.



En ce qui concerne la classe des végétations basses: quasi la totalité de la plaine, dont environ 30% soit 57 km² était marécageuse en 1957, est aménagée en rizière en 1978. C'est également le cas en 1990, car l'affectation sous eaux distinguée lors du traitement des images satellites n'est autre que de la rizière à l'époque de repiquage des pousses de riz (mois de février). Quant à la classe des végétations moyennes, elle suit l'évolution inverse de la végétation supérieure parce que la déforestation est en sa faveur.

Toutefois, il faut garder à l'esprit qu'il se peut que les zones sous forêts en 1990 soient légèrement surestimées à cause de la faible différence de réflectance entre forêts et jachères arbustives. Mais toujours est-il que les conditions locales sont favorables à une croissance rapide des végétations et que les jachères abandonnées suffisamment longtemps peuvent atteindre l'écosystème d'une forêt secondaire (Randriamaherisoa A., 1991).

Il faut alors profiter de ces conditions pour élaborer des solutions d'agroforesterie pour fixer et modifier intelligemment les activités humaines aux zones déjà déforestées associées à un bon programme de conservation de sol et la mise en défends des réserves naturelles.

IMPACT DE LA DEFORESTATION SUR LE REGIME DE LA LOKOHO

L'ensemble de procédure décrit précédemment est utilisé pour l'étude de l'impact de la déforestation sur le régime hydrologique de la Lokoho. Les paramètres du modèle représentant les potentialités au ruissellement de chacune des classes hydrologiques, exprimées par les coefficients et les vitesses de ruissellement, sont calées avec les données hydrologiques de la situation en 1990. En effet, les données météorologiques et hydrométriques avec le pas de temps adéquat ne sont disponibles qu'après l'installation des appareils de mesure en 1989. Les paramètres ainsi ajustés pour chaque classe sont utilisés pour la simulation du régime hydrologique des situations antérieures. Seules les mailles des régions affectées par des changements sont sujets aux adaptations des paramètres selon les classes correspondantes. Cette considération est plus intéressante qu'une modification globale des paramètres dans le cas des modèles non distribués parce que la localisation des régions affectées influence considérablement la conséquence des changements. En effet, la déforestation peut provoquer des résultats totalement différents selon qu'elle est située près de l'exutoire ou très loin en amont dans le bassin.

L'évolution de l'hydrogramme unitaire pour les trois situations montre une réponse plus rapide et plus importante du bassin en fonction de la déforestation. Cela se traduit par une réduction du temps de concentration et une augmentation du débit maximum pour les pluies de même type. En effet, le temps de concentration du bassin de la Lokoho estimé à 12 heures en 1957 n'était plus que de l'ordre de 9 heures en 1978. Cette diminution de quelques heures est liée à l'accélération de l'écoulement due à la réduction de l'interception de la pluie et du rôle de tampon joué par les 300 km² de forêts coupées entre ces deux situations. De même, suite à cette accélération du ruissellement et la prépondérance des mailles à coefficient de ruissellement plus élevé, le débit de pic afférent à une averse unitaire a augmenté de 26.6%. Par contre entre 1978 et 1990, suite à la stabilisation de la situation, voire son amélioration due à la régénération des végétations supérieures, le volume de pluies nettes destinées au ruissellement est moins important et le transfert de ces pluies nettes est quelque peu ralenti. Le débit maximum pour l'averse unitaire diminue de 3% et le temps de concentration du bassin augmente légèrement.

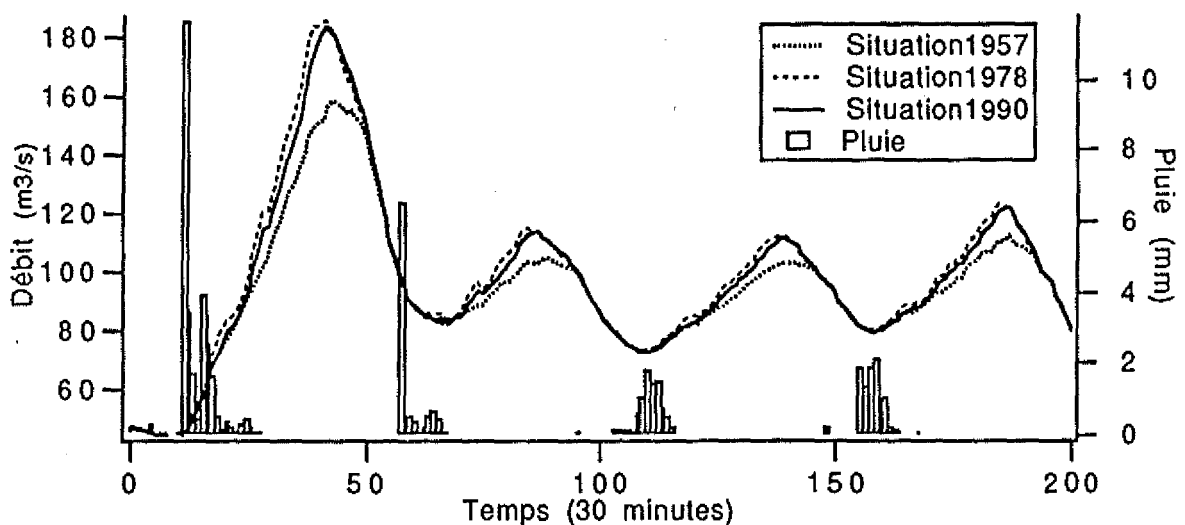


Figure 5 Evolution des hydrogrammes de simulation de la Lokoho selon les trois situations

Appliquée à un même épisode de pluie, la simulation de l'hydrogramme de la Lokoho selon les différentes situations de l'occupation de sol illustre bien ce changement de régime [Figure 5].

CONCLUSION

La régionalisation des paramètres de ruissellement dans un bassin versant par la classification des mailles discrétisant le bassin en fonction de ses caractéristiques physiques permet la prise en compte de la répartition spatiale de ces paramètres dans la modélisation hydrologique ainsi que l'étude de l'impact du changement de ces paramètres sur le régime hydrologique des rivières dans le bassin.

Le régime hydrologique de la Lokoho, exprimé par l'hydrogramme unitaire se trouve modifié lors des changements des caractéristiques physiques et hydrologiques de son bassin en amont. C'est ce que la déforestation dans ce bassin a montré. En période de crue, dans le cas de saturation du sol, le débit de pic de la Lokoho est inversement proportionnel à l'étendue de la végétation supérieure (plus exactement de la forêt) dans le bassin. Par contre, le temps de concentration du bassin suit la même évolution que la superficie de la forêt. Moins importante est la surface sous forêt dans le bassin, plus court est le temps de concentration du bassin, autrement dit plus rapide est le ruissellement dans ce bassin. Ces faits sont dus à des phénomènes physiques liés à la présence de la forêt, comme l'interception plus importante de la pluie, l'évapotranspiration plus forte, le ruissellement plus faible, etc.

La concentration plus rapide des ruissellements dans la plaine du bassin de la Lokoho et le débit de pic accru peuvent favoriser à nouveau l'inondation de cette plaine si fertile et bien aménagée et peut anéantir les efforts entrepris ces 30 dernières années. Des décisions doivent donc être prises pour trouver des compromis entre l'utilisation des terres pour la subsistance de la population en forte croissance et la conservation du sol et de la forêt. Des solutions d'agroforesterie semblent être les plus favorables dans ce cas, en apportant aux habitants des techniques de production combinées avec la végétation supérieure. Les conditions locales semblent être prêtes pour cela.

Références

- Abbott M.B., Bathurst J.C., Cunge J.A., O'Connell P.E. and Rasmussen J., 1986. An introduction to European Hydrological System - Système hydrologique Européen, "SHE", 2. Structure of a physically-based, distributed modeling system. *J. Hydrol.*, 87: 61-77.
- Agrer, 1978. Etudes pour la mise en valeur de la cuvette d'Andapa. Contrat d'études n° ET/1282, 92p
- Allewijn R., 1990. Remote sensing and runoff modelling in alpine areas. A landsat-supported conceptual semi-distributed rainfall-runoff model, applied to the N-Italian alps. Thesis at "Vrije Universiteit te Amsterdam, Druk, Meetkundige Dienst - Delft, 276p.
- Randriamaherisoa A. 1990. Le relief et le modèle maillé. Actes des "Troisièmes journées Utilités et Limites des Modèles en Hydrologie" - ORSTOM Montpellier, France 28 juin 1990, p15-21.
- Randriamaherisoa A. 1991. Utilisation d'un Système d'information Géographique pour une approche hydrologique sur l'impact de la déforestation. *Revue du Centre National de Recherche sur l'Environnement à Madagascar*, 10p.
- Randriamaherisoa A., Binard M. et Persoons E., 1992. Use of GIS and Remote Sensing in Hydrological model for the impact study of land cover change in a Malagasy rural basin. Workshop of EARSeL (European Association of Remote Sensing Laboratories). Belgium, Louvain-la-Neuve, 29th June-1st July 1992, 13p.
- Réménieras G., 1980. L'hydrologie de l'ingénieur. Edition Eyrolles, 456p.
- Schultz G.A., 1988. Remote sensing in Hydrology. *J. Hydrol.*, vol. 100, Special issues.
- Walsh S. J. and Gregory M.S., 1985. Hydrologic Modeling Through Remote Sensing and Geographic Information Systems. Proceedings, Applied Geographic Conferences, Denton, Texas, 5: 109-116.