

## LISTE DES ABREVIATIONS

A.E.P	Adduction d'Eau Potable
APIPA	Autorité pour la Protection contre l'Inondation de la Plaine d'Antananarivo
BCEOM	Bureau Central d'Etudes pour les équipements d'Outre-Mer
CN	Curve Number (Coefficient d'aptitude au ruissellement)
ESPA	Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
FTM	Foibe Taosaritanin'i Madagasikara (Institut Géographique de Madagascar)
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System
RN3	Route Nationale numéro 3
$S_{bv}$	Surface du bassin versant
SCS	Soil Conservation Service
SCS CN	Soil Conservation Service Curve Number
SIG	Système d'Information Géographique
SOMEAH	Société Malgache d'Etudes et d'Applications Hydrauliques
USACE	United States Army Corps for Engineers

## LISTE DES TABLEAUX

Numéro	Titre
1.	Récapitulation des caractéristiques du bassin Mamba
2.	Valeurs de C en fonction de la surface du bassin(S), de la pente du versant(I) et de la couverture végétale
3.	Valeurs de tc (Temps de concentration) pour le bassin versant Mamba
4.	Quelques valeurs de P(24, F) : hauteur de pluie de durée 24heures et de fréquence F(10 ;25 ;50 et 100ans)
5.	Hauteur de pluie pour les différentes fréquences
6.	Valeurs des débits de crues pour les différentes fréquences
7.	Les articles dans le menu <b>File</b> et leur fonctions
8.	Les articles dans le menu <b>Component</b> et leur fonctions
9.	Le rôle du menu ' <b>Data</b> ' dans la définition du projet
10.	Rôle du menu 'Tools' dans la définition du projet
11.	Caractéristiques des sous bassins de la Mamba
12.	Données des sous bassins
13.	Données de tronçons
14.	Données pluviométriques du 01 janvier 2005 de la station d'Antananarivo
15.	Résultats de la simulation au niveau du sous bassin MB1
16.	Résultats de la simulation au niveau du sous bassin MB2
17.	Résultats de la simulation au niveau du sous bassin MB3
18.	Résultats de la simulation au niveau du sous bassin MB4
19.	Résultats de la simulation au niveau du sous bassin MB5
20.	Résultats de la simulation au niveau du sous bassin MB6
21.	Comparaison des résultats du modèle HEC-HMS avec ceux de Louis Duret et Rationnelle
22.	Analyse de la sensibilité du paramètre SCS Curve Number
23.	Analyse de la sensibilité du paramètre SCS T Lag
24.	Analyse de la sensibilité du paramètre ' <b>Impervious</b> '
25.	Analyse de la sensibilité du paramètre ' <b>Initial Loss</b> '

## LISTE DES FIGURES

Numéro	Titre
1.	Localisation du bassin versant Mamba
2.	Le Bassin Versant de la Mamba et ses réseaux hydrographiques
3.	Le cycle de l'eau
4.	courbe de l'hydrogramme de crue/décrue
5.	Principe de Sherman
6.	principe de Sherman(temps de base)
7.	hydrogramme en S
8.	Conditions aux limites pour les paramètres de Muskingum
9.	Procédure générale de calage du modèle
10.	Les méthodes de calcul de l'eau produite ( <b>Loss method</b> )
11.	Les méthodes de transformation de la pluie nette en eau transférée à l'exutoire ( <b>Transform</b> )
12.	Méthode de calcul de l'écoulement de base ( <b>Baseflow</b> )
13.	Le laminage de l'hydrogramme ( <b>Channel Routing</b> )
14.	Les méthodes de calcul de la pluie moyenne
15.	Les paramètres de contrôle de la simulation
16.	l'écran définissant le Projet dans HEC-HMS
17.	Découpage du bassin versant Mamba en six sous bassins
18.	Schéma topologique de la Mamba
19.	L'écran définissant les paramètres de temps dans le modèle HEC-HMS
20.	Précipitation sur les sous bassins
21.	L'écran montrant l'état de la simulation avec HEC-HMS
22.	Hydrogramme calculé au pont de Sabotsy-Namehana(Exutoire)
23.	Hydrogramme calculé à la jonction (ou nœud) N1
24.	Hydrogramme calculé à la jonction (ou nœud) N2
25.	Hydrogramme calculé à la jonction (ou nœud) N3
26.	Hydrogramme calculé à la jonction (ou nœud) N4
27.	Hydrogramme calculé au niveau du sous bassin MB1
28.	Hydrogramme calculé au niveau du sous bassin MB2
29.	Hydrogramme calculé au niveau du sous bassin MB3
30.	Hydrogramme calculé au niveau du sous bassin MB4
31.	Hydrogramme calculé au niveau du sous bassin MB5
32.	Hydrogramme calculé au niveau du sous bassin MB6
33.	Résultats de la Modélisation HEC-HMS sur la Mamba
34.	Graphique montrant la variation des caractéristiques de l'hydrogramme par rapport à la variation du paramètre <b>SCS Curve Number</b> du modèle

35. Graphique montrant la variation des caractéristiques de l'hydrogramme par rapport à la variation du paramètre **SCS TLAG** du modèle
36. Graphique montrant la variation des caractéristiques de l'hydrogramme par rapport à la variation du paramètre **Impervious** du modèle
37. Graphique montrant la variation des caractéristiques de l'hydrogramme par rapport à la variation du paramètre **Initial Loss** du modèle

# SOMMAIRE

	Page
INTRODUCTION.....	1
Partie –I ETUDES DE LA RIVIERE ET DU BASSIN VERSANT MAMBA.....	3
1.1. GENERALITES.....	3
1.1.1. Définition.....	3
1.1.2. Les types de bassin versant.....	3
1.2. LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDES ET SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	3
1.3. CLIMATOLOGIE DE LA REGION.....	6
1.4. CONTEXTE GEOLOGIQUE.....	6
1.5. INFRASTRUCTURE HYDROAGRICOLE EXISTANTES.....	7
1.6. INFRASTRUCTURES ROUTIERES EXISTANTES.....	8
1.7. VEGETATION.....	8
1.8. CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT.....	9
1.8.1. Superficie et Périmètre du bassin versant Mamba.....	9
1.8.2. Longueur du drain principal.....	10
1.8.3. Coefficient de Compacité de Gravelius.....	10
1.8.4. Rectangle équivalent.....	10
1.8.5. Indice de pente et pente moyenne.....	11
1.8.6. Coefficient de ruissellement.....	12
Partie-II ASPECTS THEORIQUES SUR LES ETUDES HYDROLOGIQUES D'UN BASSIN VERSANT.....	14
2.1. GENERALITE.....	14
2.2. CYCLE DE L'EAU.....	14
2.3. BILAN HYDRIQUE.....	15
2.4. REPONSE HYDROLOGIQUE.....	16
2.4.1. Définition.....	16
2.4.2. Facteurs d'influence de la réponse hydrologique.....	16
2.5. TRANSFORMATION DE LA PLUIE EN HYDROGRAMME DE CRUE.....	17
2.6. HYDROGRAMME UNITAIRE.....	19
2.6.1. Définition.....	19
2.6.2. Les hypothèses.....	19
2.6.3. Principe de superposition et de proportionnalité de l'hydrogramme unitaire.....	20
2.6.4. Hydrogramme unitaire synthétique.....	21
2.6.5. Hydrogramme unitaire de Snyder.....	21
2.6.6. Hydrogramme unitaire du SCS.....	23
2.7. Hydrogramme en S.....	24
2.8. ESTIMATION DES DEBITS DE CRUES.....	25
2.8.1. Formule rationnelle.....	25
2.8.2. Méthode Louis Duret.....	27

.9.	LAMINAGE EN RIVIERE DE MUSKINGUM.....	28
Partie-III MODELISATION HYDROLOGIQUE.....		Page 31
3.1.	UTILITE D'UNE MODELISATION HYDROLOGIQUE.....	31
3.2.	DEFINITION D'UN MODELE.....	31
3.3.	LES MODELES HYDROLOGIQUES.....	31
3.3.1.	Définition d'un modèle hydrologique.....	32
3.3.2.	Les modèles probabilistes.....	32
3.3.3.	Les modèles déterministes .....	32
3.3.4.	Les composantes d'un modèle hydrologique.....	33
a)-	La Fonction de Production.....	33
b)-	La Fonction de Transfert.....	33
3.3.5.	Les données requises pour un modèle hydrologique.....	33
a)-	Le bassin versant.....	33
b)-	La Topographie.....	33
c)-	Le réseau hydrographique.....	34
d)-	Caractéristiques des cours d'eau.....	34
e)-	Données climatologiques.....	34
f)-	Données hydrométriques.....	34
3.3.6.	Calage et Validation des modèles hydrologiques.....	34
3.3.6.1.	Procédure générale de calage .....	35
3.3.6.2	Les types de paramètres à calibrer.....	36
Partie -IV LE MODELE HYDROLOGIQUE HEC-HMS – APPLICATION A LA RIVIERE MAMBA.....		37
4.1.	DESCRIPTION GENERALE DU LOGICIEL HEC-HMS.....	37
4.1.1.	Le Modèle de bassin.....	38
4.1.2.	Le Modèle Météorologique.....	41
4.1.3.	Le Contrôle de spécification.....	42
4.2.	DEMARRAGE DU MODELE HEC-HMS.....	43
4.3.	ETAPES D'UNE SIMULATION AVEC HEC-HMS.....	45
4.4.	APPLICATION DU MODELE A LARIVIERE MAMBA.....	46
4.4.1.	Découpage du bassin versant Mamba en six sous bassins.....	46
4.4.2.	Schéma topologique de la Mamba.....	48
4.4.3.	Données de modèle de bassin pour le cas de la Mamba.....	48
4.4.3.1.	Données des sous bassins.....	49
4.4.3.2.	Données des Tronçons.....	50
4.4.4.	Données du modèle Météorologique.....	50
4.4.5.	Définition des paramètres de la Simulation.....	53

	Page
.5. RESULTATS.....	55
4.6. COMPARAISON AVEC LES RESULTATS OBTENUS A PARTIR DES METHODES CLASSIQUES.....	67
4.7. CONCLUSION PARTIELLE.....	67
4.8. ANALYSE DE SENSIBILITE.....	68
CONCLUSIONS GENERALES.....	76
ANNEXE 01 Choix de SCS Curve Number pour un terrain agricole et pour une zone urbaine.....	77
ANNEXE 02 Démarrage d'un nouveau projet avec HEC-HMS .....	79
ANNEXE 03 Définition du modèle de bassin versant dans HEC-HMS....	87
ANNEXE 04 Définition de la station météorologique dans HEC-HMS...	92
ANNEXE 05 Définition du modèle de précipitation dans HEC-HMS.....	96
ANNEXE 06 Définition des paramètres de contrôle de la simulation avec HEC-HMS.....	98
ANNEXE 07 Création et exécution d'une simulation avec HEC-HMS....	100
ANNEXE 08 Visualisation des résultats avec HEC-HMS.....	103
ANNEXE 09 Données pluviométriques d'Antananarivo.....	106



# INTRODUCTION

A Madagascar, les études hydrologiques se limitent le plus souvent à l’application des méthodes plus ou moins empiriques dont la plus courante est celle de Louis DURET, faute de données.

La modélisation hydrologique des bassins versants a cependant beaucoup évolué au cours de la dernière décennie. Des outils performants sont maintenant disponibles gratuitement aux sites Internet des grands instituts de recherche scientifiques des pays développés comme : les Etats Unis, le Canada ou la France.

Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes intéressé plus particulièrement au système de modélisation hydrologique HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System). C'est un modèle conçu par l'U.S. Army Corps of Engineers (Etats Unis) et qui figure parmi les modèles les plus reconnus et les plus utilisés dans les pays anglo-saxons et quelques pays francophones. Nous l'avons retenu comme outil de modélisation dans le cadre de ce travail de mémoire de fin d'études, du fait des expériences acquises sur son utilisation et ses exploitations.

Grâce à la collaboration entre le bureau d'études SOMEAH (Société Malagasy d'Etudes et d'Applications Hydrauliques) et l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA), j'ai eu l'occasion de faire mon mémoire de fin d'études qui s'intitule : « Modélisation hydrologique de la rivière Mamba ».

La Mamba est un des affluents de la rivière IKOPA au niveau de la plaine d'Antananarivo. Elle est aussi la moins connue parmi les affluents de cette rivière. Cependant, c'est une rivière importante au regard des points suivants :

- Irrigation de la plaine agricole (Laniera),
- Exutoire du système d'assainissement pluvial de la ville d'Antananarivo (station de pompage d'Ambodimita) : son niveau en période de crues conditionne le fonctionnement de la station,
- Apport d'eau non négligeable en crue au niveau de la plaine d'Antananarivo (Exemple : fin décembre 2004),
- Traversée de sa plaine par la route nationale (RN3),

- Exploitation envisagée des eaux de la Mamba et d'une partie de sa plaine pour renforcer l'adduction d'eau potable d'Antananarivo (Schéma Directeur d'AEP d'Antananarivo, BCEOM, 2003).

Notre étude suit les étapes suivantes :

- Dans la première partie, nous allons décrire globalement la rivière Mamba et son bassin versant en le situant géographiquement, en étudiant sa topologie, sa nature géologique, la couverture végétale et l'utilisation des terres ;
- En deuxième partie, nous allons faire une étude hydrologique de la Mamba à partir des approches classiques basées sur des méthodes plus ou moins empiriques comme la méthode de Louis DURET et la méthode rationnelle afin d'estimer les débits de crues à l'entrée de la plaine d'Antananarivo ;
- Dans la troisième partie, nous allons présenter les aspects théoriques sur la modélisation hydrologique d'un bassin versant ;
- Dans la quatrième et dernière partie seront présentés le modèle hydrologique HEC-HMS, son application à la rivière Mamba, les principaux résultats, la comparaison de ces résultats avec ceux des deux méthodes classiques (rationnelle et Louis Duret), ainsi que les résultats d'une étude de sensibilité.

# **Première Partie : ETUDES DE LA RIVIERE ET DU BASSIN VERSANT DE LA MAMBA A L'ENTREE DE LA PLAINE D'ANTANANARIVO**

## **1.1.GENERALITES**

### **1.1.1. Définition :**

Le mot ‘*bassin versant*’ désigne la surface d’interception des précipitations alimentant un cours d’eau. C’est l’unité de toute étude hydrologique.

### **1.1.2. Les types de bassins versants :**

Il y a deux types de bassin versant :

- Bassin versant réel : relatif à l’exutoire donné, c’est le domaine pour lequel toute précipitation qui tombe dessus afflue vers l’exutoire ;
- Bassin versant topographique : c’est le domaine pour lequel le ruissellement provoqué par les précipitations afflue vers l’exutoire. Le bassin versant topographique est obtenu par le tracé joignant de crête en crête les courbes de niveau.

## **1.2. LOCALISATION DE LA ZONE D’ETUDES ET SITUATION GEOGRAPHIQUE :**

La rivière Mamba prend sa source au Nord-Est d’Antananarivo. Elle rejoint l’IKOPA entre le pont de Mahitsy et le confluent de la Sisaony. Elle draine un bassin versant d’ une superficie totale de 94Km<sup>2</sup> à l’entrée de la plaine d’Antananarivo (au pont de Sabotsy-Namehana).

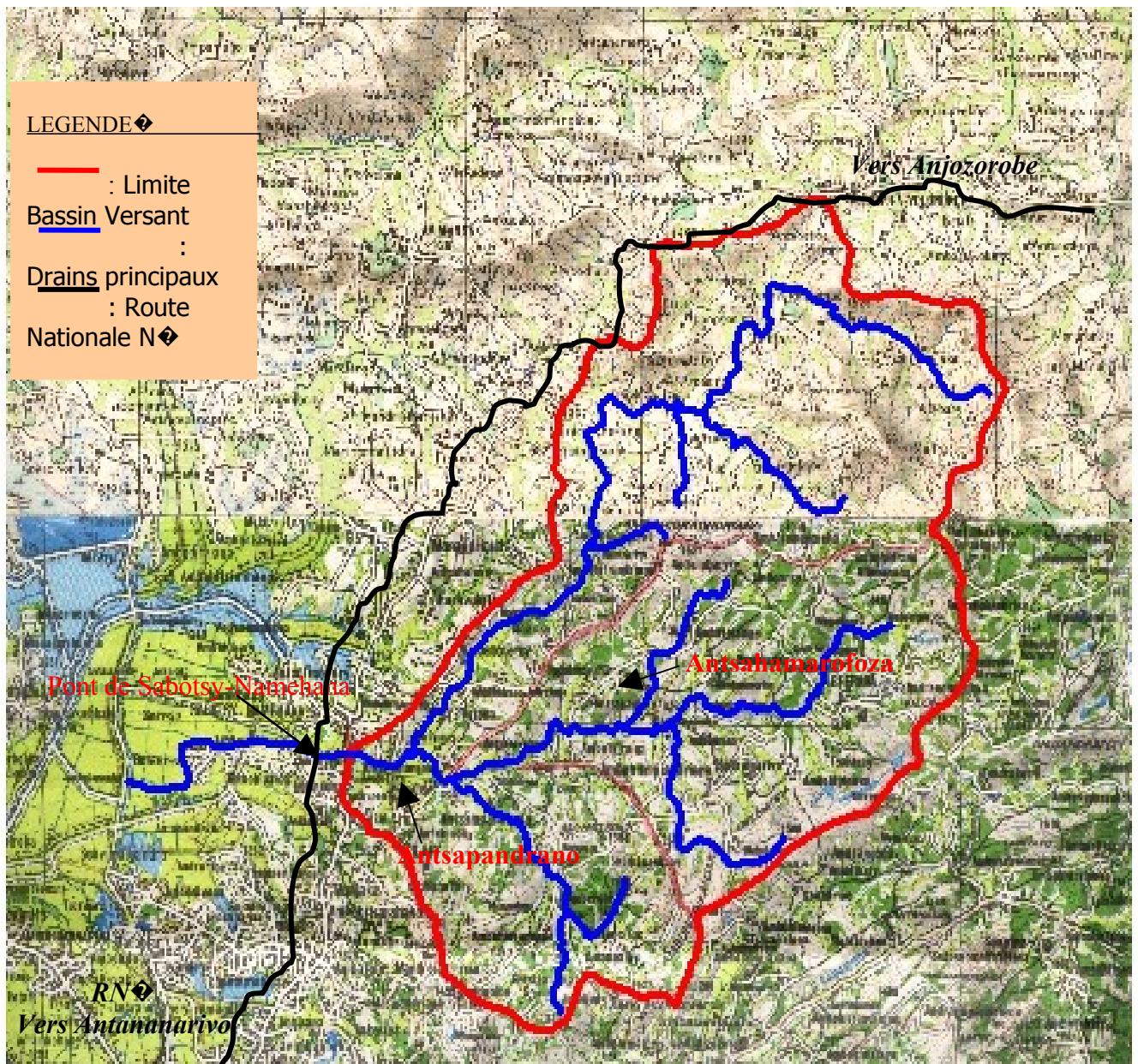
Le relief est dominé par des collines s'élevant jusqu'à une altitude aux environ de 1600 mètres. La rivière présente des pentes rapides et des lits relativement encaissés.

[source : Assainissement et drainage de Tananarive, Tome III- Livre II-2<sup>ème</sup> Partie, du 27/02/1974]

**Figure N°01 : Localisation du bassin versant Mamba**



Le bassin versant se situe entre les longitudes : 47°36'57"Est et 47°40'28"Est, et les latitudes : 18°56'65"Sud et 18°60'18"Sud.



Le Bassin Versant de la Mamba et ses réseaux hydrographiques

**Figure N°02**

[source : Carte topographique d'Antananarivo P-47 et d'Ambohimanga P-46 sur Echelle :1/100.000, FTM]

### **1.3. CLIMATOLOGIE DE LA REGION :**

**Par sa situation géographique, la région de Mamba appartient à la zone tropicale. Cette zone est caractérisée par un climat tempéré de type tropical d'altitude.**

**Il existe deux saisons nettement tranchées :**

- **La saison de pluie qui commence au mois de Novembre et se prolonge jusqu'au mois de Mars, et est influencée par les cyclones venant de l'Est ;**
  
- **La saison sèche qui débute du mois d'Avril pendant lequel on observe encore les dernières averses, se termine au mois d'Octobre.**

**La pluviométrie moyenne annuelle est autour de 1300mm. Sur l'ensemble de l'année, la température moyenne est de l'ordre de 22°C, la valeur minimale peut tomber jusqu'à 16°C en juillet et la maximale peut atteindre 29°C. [source : Service Météorologique Nationale, 2003]**

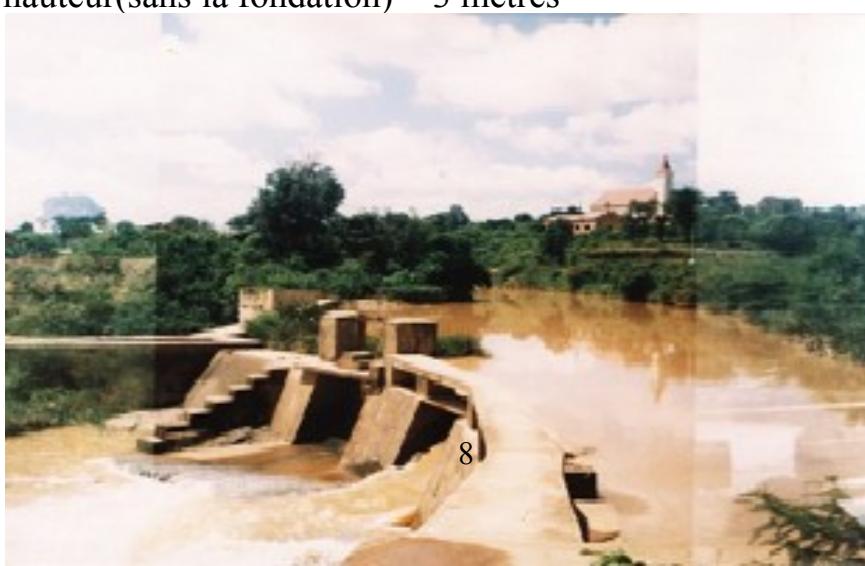
### **1.4 . CONTEXTE GEOLOGIQUE**

**La majeure partie des terrains est sur migmatites et roches gneissiques. Sur ces roches reposent les sols ferralitiques de types variés qui sont dans l'ensemble très susceptibles à l'érosion et surtout à la formation des lavaka.**

#### **1.5 . INFRASTRUCTURES HYDROAGRICOLE EXISTANTES :**

Sur le bassin versant étudié, on trouve deux barrages qui servent à l'irrigation des périmètres hydroagricole avoisinantes. L'un se trouve à Antsapandrano dont les caractéristiques sont les suivantes :

- longueur du barrage = 25 mètres ;
- largeur en crête = 0,50 mètre ;
- hauteur(sans la fondation) = 3 mètres



Partie amont du barrage d'Antsapandrano : **Photo N°01**  
(les photos ont été prise lors de notre visite sur terrain en janvier et mars 2005)



Partie aval du barrage d'Antsapandrano : **Photo N°02**

L'autre barrage se trouve à Antsahamarofoza. Les caractéristiques sont :

- longueur du barrage = 16 mètres ;
- largeur en crête = 0,50 mètre ;
- hauteur (sans la fondation) = 2 mètres ;



## Barrage d'Antsahamarofoza : **Photo N°03**

### 1.6 . INFRASTRUCTURES ROUTIERES EXISTANTES :

La plaine du bassin est traversée par une route nationale RN3(goudronnée) qui relie la capitale avec le district d'Anjozorobe.

On y trouve également des routes secondaires( en terres) qui relient quelques villages de la région.

### 1.7. VEGETATION :

Les versants sont sujets à une forte exploitation agricole : les paysans font des cultures de spéculations comme : les cultures des maniocs, des maïs, des haricots, des patates douces, des taro,... Il y a peu de végétation ce qui favorise un ruissellement important dû à une faible infiltration dans les sols.

### 1.8. CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT :

En général, le bassin versant est caractérisé par :

- ✓ la superficie,
- ✓ la longueur du drain principal,
- ✓ la pente moyenne,
- ✓ le coefficient de ruissellement global, qui est évalué par la procédure suivante : le bassin versant est découpé en zones homogènes du point de vue du ruissellement et l'occupation des sols(zones urbanisées, zones boisées, terrains agricoles...), puis le coefficient de ruissellement est évalué en pondérant les superficies des différentes zones par leurs coefficients de ruissellements associés.

#### 1.8.1. Superficie et Périmètre du bassin versant Mamba:

On mesure sur la carte par planimétrie ou par la méthode des petits carreaux la superficie du bassin versant. A l'aide du SIG (Système d'Informations Géographiques) sur MAPINFO, nous avons pu calculé la surface et le périmètre du bassin versant Mamba et nous avons trouvé :

$$S_{bv} = 94 \text{ Km}^2.$$

$$P = 45 \text{ Km}$$

Ces résultats sont obtenus à partir d'une carte topographique de la Mamba à l'Echelle 1/100.000, scannée puis traitée sur MAPINFO.

#### 1.8.2. Longueur du drain principal :

Par un curvimètre, on mesure la longueur du drain principal. Le plus long cheminement est :  $L = 19,738 \text{ Km}$

#### 1.8.3. Coefficient de compacité de Gravelius :

Par définition, le coefficient de compacité de Gravelius K est égal à :

$$K = \frac{\text{Périmètre du bassin}}{\text{Périmètre du cercle de surface équivalente}}$$

Si  $P$  est le périmètre du bassin et  
 $S$  la surface du bassin,  
Alors :

$$K = \frac{P}{2\sqrt{\pi} S} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

Pour le bassin Mamba  $K = 1,30$

#### 1.8.4. Rectangle équivalent :

Pour une comparaison plus générale, deux bassins versants de même coefficient  $K$  peuvent se comporter différemment du point de vue écoulement. Il s'agit de transformer géométriquement le bassin versant en un rectangle de même périmètre et même surface

$$P = 2(l + L)$$

$$S = l \times L$$

$$K = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

$$\text{soit : } P = \frac{K\sqrt{S}}{0,28} = 2(l + L)$$

d'où :

$$L = \frac{K\sqrt{S}}{1,12} \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{K} \right)^2} \right) \quad : \text{longueur du rectangle équivalent,}$$

$$l = \frac{P}{2} - L \quad : \text{largeur du rectangle équivalent,}$$

$$\text{Soient : } L = 16,96 \text{ Km} \quad \text{et} \quad l = 5,435 \text{ Km}$$

#### 1.8.5. Indice de pente ( $I_p$ ) et pente moyenne( $I$ ) :

##### a)- Indice de pente $I_p$ :

M.Roche définit l'indice de pente qui tient compte de la totalité du relief :

$$I_p = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n \sqrt{S_i(d_i - d_{i-1})}$$

avec :

$d_i$  et  $d_{i-1}$  sont les côtes des deux courbes de niveaux voisines

$S_i$  : surface comprise entre les deux courbes

$L$  : la longueur du rectangle équivalent

Pour le bassin Mamba  $I_p = 0,124$

##### b)- Pente moyenne :

D'après la formule de Louis Duret :

$$I = \frac{DH}{L}$$

avec :  $DH = Z_{\max} - Z_{\min}$

et  $L$  la longueur du rectangle équivalent

Pour la Mamba  $I = 19,22 \text{ m/km}$

Selon Louis Duret, l'indice de pente  $I_p$  et la pente moyenne  $I$  sont liées par la relation :  $I = 1250 I_p^2$  [ Louis Duret, Estimation des débits de crues à Madagascar, page 29]

**Tableau N°01** : Récapitulation des caractéristiques du bassin Mamba

Bassin Versant Mamba								
Surface (Km <sup>2</sup> )	Périmètre (Km)	Long. rect. équi- valent (Km)	Longueur du plus long cheminement (km)	$Z_{\max}$ (m)	$Z_{\min}$ (m)	Coef. K de Gravelius	Pente moy (m/km)	Indice de pente $I_p$
94	45	16,96	19,738	1596	1270	1,30	19,22	0,124

#### 1.8.6. Coefficient de ruissellement :

Par définition le coefficient de ruissellement C relatif à une zone déterminée est le rapport du volume d'eau ruisselé au volume de la pluie ayant provoqué le ruissellement.

La valeur du coefficient de ruissellement C du bassin versant découpé en  $n$  zones homogènes est donnée par la formule:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n c_i a_i}{\sum_{i=1}^n a_i}$$

avec :  $a_i$  -représente l'aire de la  $i^{\text{ème}}$  zone,  
 $c_i$  -représente le coefficient de la  $i^{\text{ème}}$  zone,

Pour les bassins versants de surface inférieure à 400Ha le coefficient C est déterminée par le tableau N°02 suivant :

**Tableau N°02** : Valeurs de C en fonction de la surface du bassin(S), de la pente du versant(I) et de la couverture végétale (Cours d'hydraulique routière, Année 2004)

Nature de la couverture végétale	S = 0 à 10 ha				S = 10 à 400 ha			
	I < 5%	5-10%	10-30%	I > 30%	I < 5%	5-10%	10-30%	I > 30%
Plate forme,chaussée de route, cour	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Terrain denudé,végétation non couvrante,								
terrain déjà attaqué par l'érosion,labour frais	0,8	0,85	0,9	0,95	0,7	0,75	0,8	0,85
Culture couvrante,terrain de parcours,								
petite brousse clairsemée	0,75	0,8	0,85	0,9	0,52	0,6	0,72	0,8
Prairie,brousse dense,savane à sous bois	0,7	0,75	0,8	0,85	0,3	0,36	0,42	0,5
Forêt ordinaire en futaie,sous bois touffus	0,3	0,5	0,6	0,7	0,13	0,2	0,25	0,3
Grand forêt primaire	0,2	0,25	0,3	0,4	0,15	0,18	0,22	0,25

D'après la reconnaissance sur terrain que nous avons effectué et selon la couverture végétale de la Mamba et compte tenu du fait que le sol est généralement saturé en période de crues, nous avons considéré un coefficient C = 0,35.

## Deuxième Partie : ASPECTS THEORIQUES SUR LES ETUDES HYDROLOGIQUES D'UN BASSIN VERSANT

## 2.1. GENERALITES :

L'hydrologie peut être définie brièvement comme la science qui étudie le cycle de l'eau dans la nature et l'évolution de celle-ci à la surface de la terre et dans le sol, sous ses trois états : liquide, solide et gazeux ; l'une des branches principales est consacrée à l'analyse du débit des crues des cours d'eau. [ Hydrologie de l'Ingénieur, Réminieras, Edition Eyrolle]

L'hydrologie fait appel à des nombreux sciences, certaines rattachées à la physique du globe telle que : la météorologie, la climatologie, la géographie physique, la géologie, etc.

Donc l'hydrologie est devenue aujourd'hui une technique importante de l'art de l'ingénieur intéressé à l'exploitation ou au contrôle des eaux naturelles.

## 2.2. CYCLE DE L'EAU :

Sur le bassin versant l'eau de pluie suit une vaste cycle que l'on peut représenter par le schéma suivant :

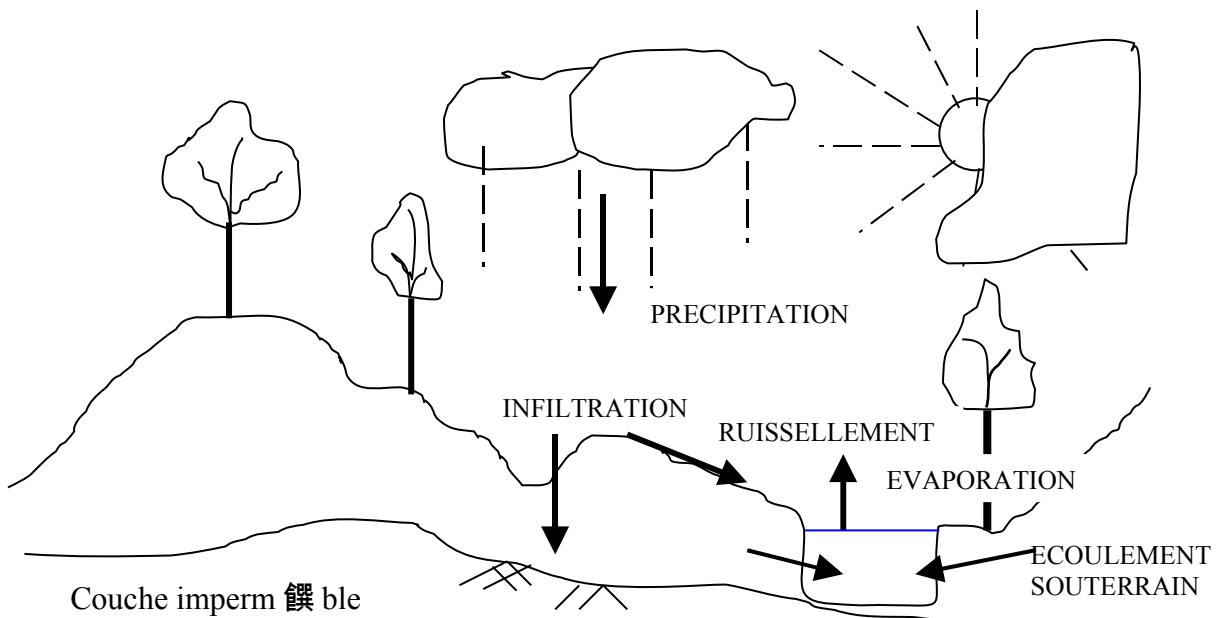


Figure N°03

## 2.3. BILAN HYDRIQUE :

- La pluie qui tombe s'infiltre entièrement dès qu'elle arrive sur le sol car elle est captée par les cavités naturelles ou par les racines des végétations pour

remplir les vides du sol. Au fur et à mesure que la capacité d'infiltration du sol diminue, les dépressions superficielles se remplissent et il se forme une mince pellicule d'eau à la surface du sol;

- Lorsque la rétention superficielle n'augmente plus, l'eau commence à ruisseler. Le volume d'eau ruisselé est égal au volume d'eau précipité diminué de celui qui a été infiltré. De micro – canaux en rigoles, l'eau rejoint le réseau hydrographique du bassin pour arriver à l'exutoire.

A l'exutoire, le débit augmente avec les apports des points les plus éloignés jusqu'à ce que l'eau tombée sur ces points arrivent au bout d'un temps  $T_c$  appelé « Temps de concentration » ;

- Une partie, qu'on néglige généralement, s'évapore dans l'atmosphère due au rayonnement solaire.

On peut les résumer dans une seule formule :

$$P = I + R + E \pm \Delta S$$

Avec :

P : représente la précipitation,  
I : quantité d'eau infiltrée,  
R : ruissellement,  
E : Evapotranspiration – Evaporation,  
 $\Delta S$  : variation de la réserve souterraine.

## 2.4. REPONSE HYDROLOGIQUE :

### 2.4.1- Définition :

La manière dont réagit le bassin versant lorsqu'il est soumis à une sollicitation se nomme : **Réponse hydrologique**.

Une averse tombant sur un bassin versant aura pour conséquence, en une station de contrôle située sur le cours d'eau, une **réponse** pouvant être nulle (absence de modification de l'écoulement ou absence de crue) ou positive (écoulement modifié ou crue). Cette réponse peut être :

- **RAPIDE** : La réponse rapide est imputable aux écoulements de surface ou, par exemple, à un effet piston, ou encore à l'effet de la macro porosité du sol.
- **RETARDE** : C'est notamment le cas lorsque la **réponse hydrologique** est due principalement aux écoulements souterrains.

De plus, la réponse peut être différenciée selon que cette dernière est :

- ✓ **TOTALE** : Dans ce cas, la **réponse hydrologique** est composée à la fois par des écoulements de surface et souterrains.
- ✓ **PARTIELLE** : C'est à dire lorsque la réponse est la résultante d'un ou l'autre des processus décrit précédemment.

#### 2.4.2- Facteurs d'influence de la réponse hydrologique :

La réponse hydrologique d'un bassin versant est influencée par une multitude de facteurs tels que ceux liés :

- ⇒ Aux conditions climatiques du milieu,
- ⇒ A la pluviosité (répartition spatiale et temporelle, intensité et durée),
- ⇒ A la morphologie du bassin versant (forme, dimension, altimétrie, orientation des versants),
- ⇒ Aux propriétés physiques du bassin (nature des sols, couverture végétale),
- ⇒ A la structuration du réseau hydrographique (extension, dimension, propriété hydrauliques),
- ⇒ Aux états antécédents d'humidité des sols.

Les facteurs liés aux précipitations ainsi qu'aux conditions climatiques sont des facteurs externes au milieu tandis que la morphologie, les propriétés physiques

du versant, la structuration du réseau et les conditions antécédentes d'humidité sont des facteurs internes.

La réponse hydrologique dépend fortement de l'état hydrique initial du bassin, lui-même relié aux séquences de divers types de périodes pluvieuses et sèches qui ont précédé l'événement pluie-débit étudié. Ainsi, une pluie tombant sur un sol sec servira d'abord à combler le déficit d'humidité du sol. Cette même pluie sera entièrement disponible pour le ruissellement si le sol est déjà saturé au début de l'événement.

Dans un état initial sec (nappe profonde, faible extension des surfaces saturées), la recharge de la nappe sera beaucoup plus lente et le ruissellement par saturation beaucoup plus limité. La condition initiale sèche se traduit par une première crue bien plus faible que dans la situation d'une condition initiale humide puisque l'eau de pluie va commencer par remplir le réservoir sol avant de générer de l'écoulement.

## 2.5. TRANSFORMATION DE LA PLUIE EN HYDROGRAMME DE CRUE :

Dans le cadre d'une description des processus selon le principe établi par Horton, la transformation de la pluie en hydrogramme de crue se traduit par l'application successive de deux fonctions nommées respectivement :

**FONCTION DE PRODUCTION** – ou fonction d'infiltration – et  
**FONCTION DE TRANSFERT.**

La fonction de production permet de déterminer l'hyéogramme de pluie nette à partir de la pluie brute. (Rappelons que : l'*hyéogramme* c'est la distribution dans le temps de l'intensité d'une averse ).

La fonction de transfert permet quant à elle de déterminer l'hydrogramme de crue résultant de la pluie nette (la pluie nette est la fraction de pluie brute participant totalement à l'écoulement).

Le passage de l'hyéogramme de pluie à l'hydrogramme de crue fait intervenir toute les caractéristiques météorologiques, physiques et hydrologiques du bassin versant considéré. Dès lors, on comprendra aisément que la détermination d'une relation analytique rigoureuse entre précipitations et débits est une tâche très difficile. Toutefois, l'analyse de séries de couples PLUIES-DEBITS permet d'obtenir des informations pertinentes sur la fonction de transfert du bassin versant.

Une averse, définie dans le temps et dans l'espace, tombant sur un bassin versant de caractéristiques connues, et dans des conditions initiales données, provoque à l'exutoire du bassin considéré un hydrogramme défini.

### **L'hydrogramme de crue :**

Par définition, un Hydrogramme c'est la représentation graphique des débits d'un cours d'eau en fonction du temps.

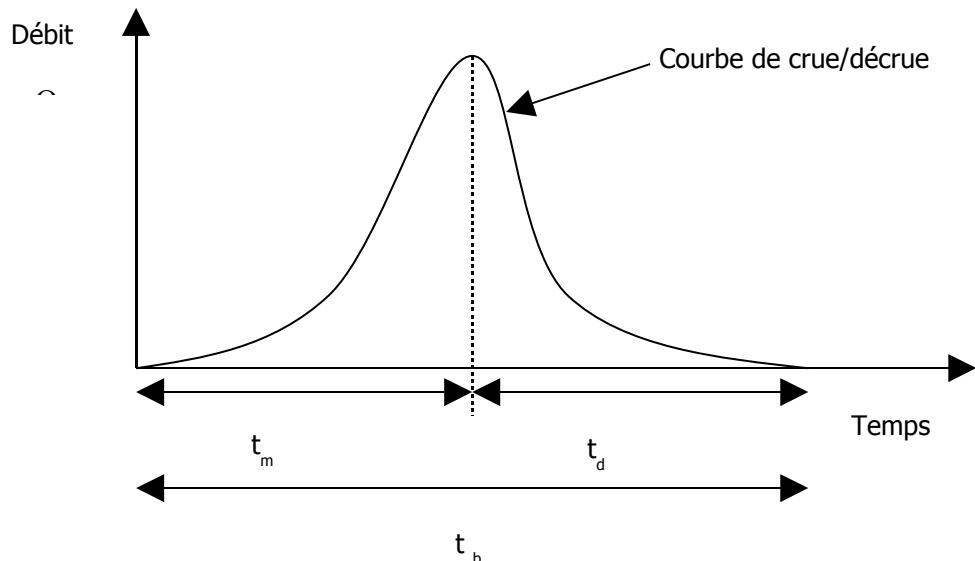
L'hydrogramme de crue présente la forme générale d'une courbe en cloche dissymétrique que l'on divise en quatre parties :

- Tarissement (avant la pluie nette) ;
- La crue ;
- La décrue ;
- Et le tarissement (après la recension hydropluviométrique étudiée).

On définit alors des temps caractéristiques :

- **TEMPS DE REONSE** : Le temps de réponse du Bassin, noté  $t_p$  ( ou Lag) est l'intervalle du temps qui sépare le centre de gravité de la pluie nette de la pointe de crue ou parfois du centre de gravité de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface.
- **TEMPS DE CONCENTRATION** : noté  $t_c$ , c'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée « hydrologiquement » de l'exutoire pour parvenir à celui-ci. On peut estimer  $t_c$  en mesurant la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement direct (c'est à dire fin de l'écoulement de surface).
- **TEMPS DE MONTEE** :  $t_m$ , c'est le temps qui s'écoule entre l'arrivée à l'exutoire de l'écoulement rapide (détectable par le limnigraphie) et le maximum de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface.
- **TEMPS DE BASE** :  $t_b$  -c'est la durée du ruissellement direct, c'est à dire la longueur sur l'abscisse des temps de la base de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface. Il est égal au temps de concentration augmenté de la durée  $t$  de l'averse :  $t_b = t_c + t$  .

La surface comprise entre la courbe de l'écoulement retardé et l'hydrogramme de CRUE/DECRUE représente le volume ruisselé. Ce volume, exprimé en lame d'eau, est égal par définition au volume de la pluie nette. Cependant, la distinction entre écoulement retardé de subsurface et ruissellement direct de surface étant relativement floue, il n'est pas rare de considérer un volume de ruissellement direct équivalent à celui de la pluie nette définie comme la surface comprise entre la courbe de l'hydrogramme de CRUE/DECRUE et celle de l'écoulement souterrain.



**Figure N°04**

## 2.6. HYDROGRAMME UNITAIRE :

### 2.6.1. Définition :

C'est l'hydrogramme représentant une unité de ruissellement direct, produit par une précipitation nette d'une hauteur unitaire répartie uniformément sur un bassin versant avec une intensité constante durant un intervalle de temps donné.

### 2.6.2. Les hypothèses :

- Précipitation nette et d'intensité constante : c'est à dire une précipitation de courte durée ;
- Précipitation nette et est uniformément répartie sur le bassin versant : petit bassin versant ;
- Les caractéristiques du bassin ne varient pas dans le temps : c'est à dire pas de lacs importants ni débordements dans la plaine inondable.

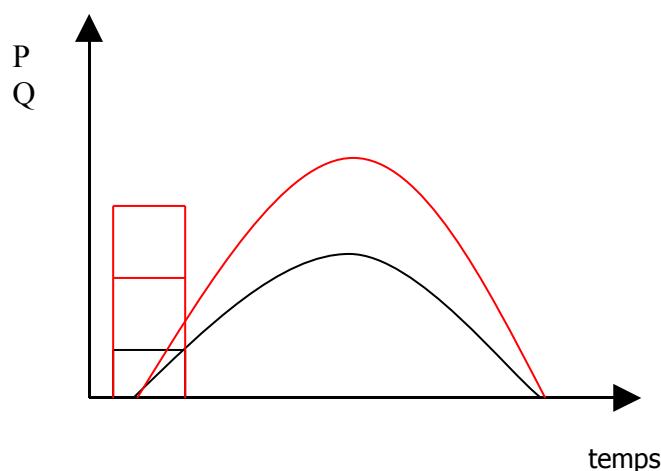
Notons que ces conditions sont rarement rencontrées dans la réalité de façon simultanée.

### 2.6.3. Principe de superposition et de proportionnalité de l'hydrogramme unitaire :

(Cours d'hydrologie générale en 3<sup>ème</sup> Année Hydraulique, ESPA)

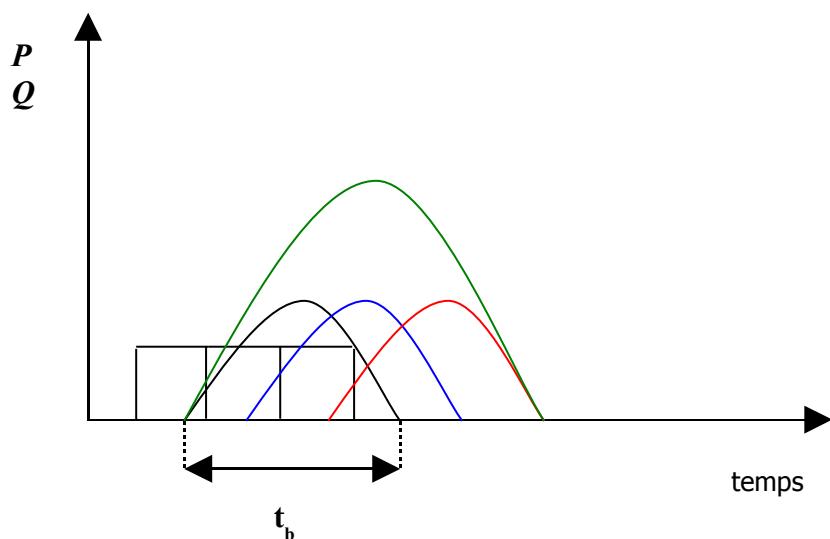
- *Principe de Sherman, établi en 1932 et encore très employé :*

- Les volumes d'eaux apportés par les averses uniformes de même durée sont proportionnels aux intensités de l'averse : c'est à dire
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{i_1}{i_2} = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{Q_{1,\max}}{Q_{2,\max}}$$



**Figure N°05**

- Pour un bassin donné, tous les hydrogrammes engendrés par les averses de même durée ont mêmes temps de base :



## Figure N°06

### 2.6.4. Hydrogramme unitaire synthétique :

Cet hydrogramme est largement employé car les hydrogrammes et hyéogrammes ne sont souvent pas disponibles. Il est basé sur une relation entre l'hydrogramme et la géométrie du bassin versant : temps de concentration  $t_c$ , temps de délai  $t_L$  qui est l'intervalle de temps qui sépare le centre de gravité de la pluie nette et la pointe de crue, débit de pointe  $Q_{\text{pointe}}$

Avec :

$$t_c = 0,000326 \left( \frac{L}{\sqrt{I}} \right)^{0,79}$$

$$t_L = \frac{1,347 L^{0,8} (\sigma + 2,54)}{1900 \sqrt{I}}^{0,7} = 0,7517 C_t (L L_{ca})^{0,3} \quad (\text{en heure})$$

avec :  $\sigma = \frac{2540}{CN} - 25,4$

**CN** : SCS Curve Number, appelé aussi ‘coefficent d’aptitude au ruissellement’, il renseigne la capacité du sol à infiltrer la pluie ( $20 < CN < 99$  ;  $CN = 20$  pour une infiltration totale et  $CN = 99$  s’il n’y a pas d’infiltration)[ cf. Annexe N°01]

**C<sub>t</sub>** : c'est un paramètre qui tient compte des variations de pente et de stockage dans le bassin, il varie typiquement de 1,8 à 2,2. les valeurs les plus faibles de **C<sub>t</sub>** correspondent aux pentes les plus abruptes, et les valeurs les plus fortes correspondent aux pentes les plus faibles ou à la présence des lacs importants. Comme première approximation, on suggère de prendre la valeur minimale pour le bassin dont la pente est supérieur à 10m/Km et la valeur maximale lorsque la pente est inférieure à 2m/Km.[source : CTN 537-Gestion des Ressources Hydriques, par Luc Roy, Université de Québec, 2004]

L : longueur du bassin versant (Km)

I : la pente du bassin( m/m)

### 2.6.5. L’hydrogramme unitaire de Snyder :

C'est un hydrogramme unitaire développé à partir de l'hydrogramme des bassins versants des Appalaches. Il est davantage applicable aux grands bassins versants.

La construction de l'hydrogramme unitaire de Snyder se fait selon l'ordre suivant :

i- On calcul le temps de délai du bassin versant :

$$t_L = 0,7517 C_t (L L_{ca})^{0,3}$$

Avec :  $L_{ca}$  – longueur ou distance entre l'embouchure et le centre de gravité du bassin versant ;

$L$  – longueur du plus long cheminement hydraulique ;

ii- On calcule le débit de pointe de l'hydrogramme unitaire( $m^3/s/Cm$ ) :

$$Q_p = \frac{2,75 A C_p}{t_L}$$

$A$  : aire ou superficie du bassin

Le facteur  $C_p$  (*coefficient de pointe*) varie typiquement entre 0,4 et 0,8 et est fonction de la capacité de rétention ou de stockage du bassin versant. Les valeurs les plus faibles sont habituellement associées aux valeurs les plus fortes de  $C_t$  et inversement.

iii- On calcul le temps de base :

$$t_b = 24 \left( 3 + \frac{t_L}{8} \right) \text{ pour les grands bassins,}$$

$$t_b = \text{entre } 3t_c \text{ et } 5t_c \text{ pour les bassins moyens ;}$$

iv- On calcule la largeur de l'hydrogramme à 50% et à 75% du débit de pointe :

$$W_{50} = 2,14 \left( \frac{Q_p}{A} \right)^{-1,08}$$

$$W_{75} = 1,22 \left( \frac{Q_p}{A} \right)^{-1,08}$$

v- On lisse une courbe par les points calculés ;

On obtient un hydrogramme unitaire de durée :  $t_r = 0,18 t_p$

## 2.6.6. L'hydrogramme unitaire du SCS (Soil Conservation Service) :

C'est un hydrogramme unitaire qui comporte des similitudes avec l'approche de Snyder. Il est développé à partir de l'hydrogramme sur des petits bassins versants ruraux à topographie peu accentuée. Il peut être appliqué à des bassins montagneux et marécageux.

La construction de l'hydrogramme unitaire du SCS suit les étapes suivants :

i- On calcule le temps de délai du bassin versant :

$$t_L = \frac{1,347L^{0,8}(\sigma + 2,54)^{0,7}}{1900\sqrt{I}}$$

où  $\sigma = \frac{2540}{CN} - 25,4$

I – pente(m/m) ;

L – longueur du plus long cheminement (m)

CN –SCS Curve Number. (Le choix de SCS Curve Number sera présenté en Annexe N°01)

ii- On calcule le temps de pointe de l'hydrogramme unitaire :

$$t_P = \frac{DT}{2} + t_L$$

(avec DT le pas de temps de calcul sur HEC-HMS);

iii- On calcule le débit de pointe de l'hydrogramme unitaire( $m^3/s/cm$ ) :

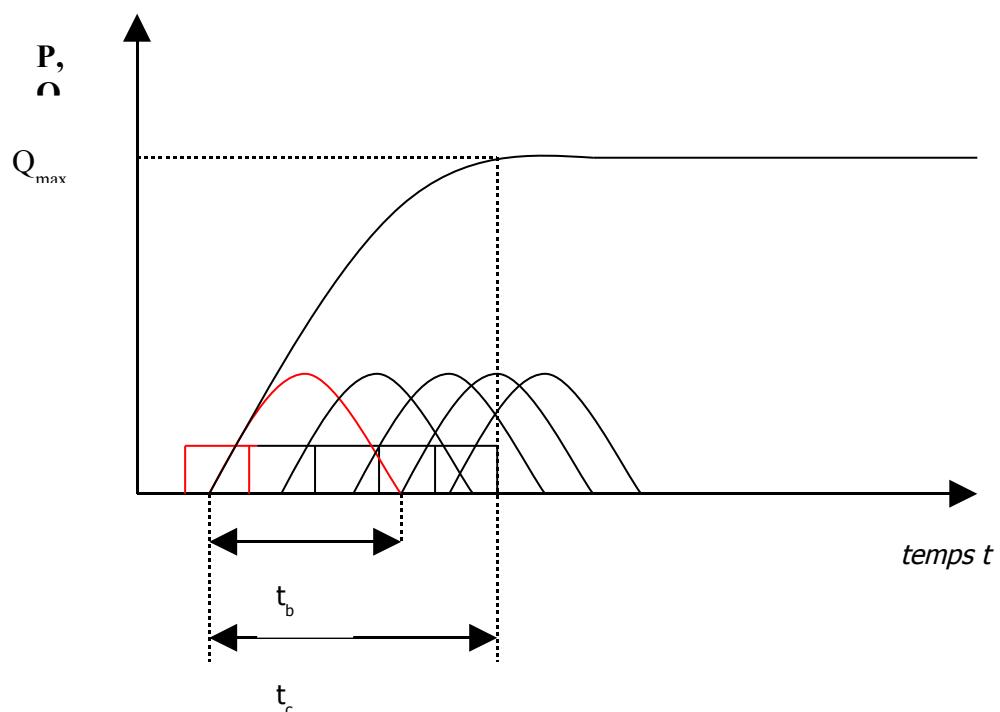
$$Q_P = \frac{2,08A}{t_P}$$

Avec A – l'aire du bassin versant ( $m^2$ )

La valeur de 2,08 est pour un bassin versant rural peu accidenté. Elle peut être de 1,3 pour un bassin versant plat ou jusqu'à 2,6 pour un bassin versant montagneux.

## 2.7. HYDROGRAMME EN S :

Lorsque le temps de pluie (temps de pointe) augmente, le débit  $Q_{\max}$  augmente et cela jusqu'à ce que :  $t_p = t_c$ . le débit maximum atteint le maximum maximorium à partir duquel le débit maximum ne croît plus, l'hydrogramme ainsi formé correspond à l'hydrogramme en  $S$ .



**Figure N°07**

## 2.8. ESTIMATION DES DEBITS DE CRUE :

### 2.8.1. Formule rationnelle (BCEOM) :

$$Q[m^3/s] = K C S i$$

Où : C - est le coefficient de ruissellement défini comme étant le rapport du volume d'eau ruisselé au volume de la pluie ayant provoqué le ruissellement.

i- intensité de pluie [mm/h].

S - surface du bassin versant [Km<sup>2</sup>]

K – est un coefficient fonction des unités choisies, il est égal à 0,28

Cette méthode est fondée sur les hypothèses suivantes :

- le coefficient de ruissellement ne dépend ni de l'intensité de la pluie ni de la saturation en eau du sol,
- la pluie est uniforme dans le temps et dans l'espace,
- une pluie de même intensité donne lieu à un débit maximal lorsque sa durée est égale ou supérieure au temps de concentration **tc** du bassin versant

L'intensité de pluie **i** est donné par la formule suivante :

$$i(t,F) = \frac{P(24,F)}{24^b} t^{b-1} \quad c'est l'intensité de pluie de durée t et de fréquence F$$

avec  $P(24,F)$  : la hauteur(en mm) de l'averse de durée 24 heures, de même fréquence F au même endroit.

Le débit de crue est obtenu lorsque  $t = tc$  , c'est à dire :

$$Q_F = 0,28 C S \frac{P(24,F)}{24^b} t c^{b-1}$$

$b$  est un paramètre variable suivant les régions, pour notre cas  $b=0,14$

[source : Estimation des débits de crues à Madagascar, par Louis Duret, p.16]

Plusieurs formules donnent la valeur de  $t_c$  :

- En tenant compte de la vitesse moyenne d'écoulement de l'eau à la surface du sol  $V_m$ , et de la longueur du rectangle équivalent  $L$ , on peut exprimer  $t_c$  par :

$$t_c = \frac{L}{V_m}$$

Comme  $L \approx K\sqrt{S}$  pour  $K \geq 1,2$  et  $V_m = kI^c$ , avec  $I$  la pente moyenne du bassin,  $k$  constante faisant intervenir le rayon hydraulique et la rugosité superficielle du sol et  $c=0,5$  (formule de Bazin ou de Manning), alors :

$$t_c = C^{te} K \left( \frac{S}{I} \right)^{0,5}$$

- D'après VENTURA :  $t_c = 0,127 \frac{\sqrt{S}}{\sqrt{I}}$   
 $S$  – surface du bassin en  $\text{Km}^2$  ;  
 $I$  – pente en  $\text{m/m}$  ;  
 $t_c = 8,88$  heures
- D'après PASSINI :  $t_c = 0,108 \frac{\sqrt[3]{S} L}{\sqrt{I}}$   
 $S$  – surface du bassin en  $\text{Km}^2$  ;  
 $L$  – longueur en  $\text{Km}$  du plus long cheminement;  
 $I$  – pente en  $\text{m/m}$  ;  
 $t_c = 9,57$  heures

Nous appliquons, pour le cas du bassin versant Mamba en vue de comparer les deux méthodes, les deux formules : VENTURA et PASSINI qui sont couramment admises.

On obtient les résultats suivants :

**Tableau N°03** : valeurs de  $t_c$

S(km <sup>2</sup> )	L(km) Longueur du cheminement	I(m/m)	tc VENTURA(heures)	tc PASSINI(heures)	tc adopté (heures)
93,97	19,738	0,01922	8,88	9,57	9,23

### 2.8.2. Méthode de Louis Duret (1976) :

Le débit de crue  $Q_F$ , de fréquence F, sur un bassin de surface  $S > 10 \text{ Km}^2$  est donné par :

$$Q_F = 0,002 S^{0,8} I^{0,32} P^{1,39} \quad \text{pour } S > 150 \text{ Km}^2$$

$$Q_F = 0,009 S^{0,5} I^{0,32} P^{1,39} \quad \text{pour } S < 150 \text{ Km}^2$$

avec :

S – surface du bassin versant(km<sup>2</sup>),

I – la pente moyenne (m/km)

P – la hauteur(en mm) de l'averse de durée  $t = t_c$ , de même fréquence F

Calcul de la hauteur de pluie  $P(t, F) = P(24, F) \left[ \frac{t}{24} \right]^b$

Nous allons étudier les cas où  $F = 1/10 ; 1/25 ; 1/50 ; 1/100$ . Pour cela, prenons les données de pluie de Tananarive-Observatoire

### Tableau N°04 : quelques valeurs de $P(24, F)$

[ source : Estimation des débits de crues à Madagascar, par Louis DURET, page 19]

P(24,10) mm/24h	P(24,25) mm/24h	P(24,50) mm/24h	P(24,100) mm/24h
110	135	150	170

La hauteur de pluie  $P(t, F)$  est donc la suivante :

### Tableau N°05 : hauteur de pluie pour les différentes fréquences

Fréquence	1/10	1/25	1/50	1/100
Durée de pluie	9,23	9,23	9,23	9,23

tc en heure				
Hauteur de pluie correspondant à tc (mm)	96,23	118,10	131,22	148,71

Les débits de crues, pour les deux méthodes , sont les suivants :

**Tableau N°06** : valeurs des débits de crues pour les différentes fréquences

Fréquence	1/10		1/25		1/50		1/100	
Intensité de pluie : $i(tc, F)$ (mm/h)	10,43		12,79		14,22		16,11	
Débits (m <sup>3</sup> /s)	Louis DURET	Ratio/lle						
	128,33	96,01	170,59	117,83	197,49	130,92	235,02	148,38

## 2.9. LAMINAGE EN RIVIERE DE MUSKINGUM :

La méthode de Muskingum utilise une approximation de l'équation de la différence finie :

$$\left( \frac{I_{t-1} + I_t}{2} \right) - \left( \frac{O_{t-1} + O_t}{2} \right) = \left( \frac{S_t - S_{t-1}}{\Delta t} \right) \quad (*)$$

Avec :

- $I_{t-1}$  et  $I_t$  sont respectivement les débits d'entrée du tronçon d'écoulement à l'instant  $t-1$  et à l'instant  $t$ ,
- $O_{t-1}$  et  $O_t$  sont respectivement les débits de sortie du tronçon d'écoulement à l'instant  $t-1$  et à l'instant  $t$ ,
- $S_{t-1}$  et  $S_t$  sont les volumes stockés dans le tronçon d'écoulement à l'instant  $t-1$  et à l'instant  $t$ ,

Le volume stocké dans un tronçon de rivière est proportionnel à une moyenne pondérée des débits observés au même instant aux deux extrémités du tronçon. Soit :

$$S_t = KO_t + KX(I_t - O_t) = K [ XI_t + (1-X)O_t ] \quad (**) \quad$$

Où : -  $S_t$  est le volume stocké dans le tronçon à l'instant  $t$ ;

-  $K$  est un coefficient qui traduit que le volume stocké dans le tronçon est proportionnel aux débits.  $K$  est homogène à un temps et se rapproche du temps de transfert de la crue entre l'entrée et la sortie ;

-  $X$  est un coefficient qui traduit l'influence de l'entrée et de la sortie pour la détermination du volume stocké.

$$X = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{Q_o}{BS_o c \Delta x} \right)$$

avec : -  $Q_o$  est un débit de référence pour l'hydrogramme(c'est la moyenne du débit de base et du débit de pointe)

-  $S_o$  : la pente du lit,  
-  $B$  : la largeur au sommet de l'écoulement,  
-  $c$  : la célérité de l'onde,  
-  $\Delta x$  : longueur de portée(tronçon) [source : HMS Technical Reference]

On établit avec

$0 < X < 0,5$  tel que si :

- $X = 0$  , le volume stocké dépend seulement du débit de sortie ( cas d'un réservoir) ;
- $X = 0,5$  , le volume stocké est contrôlé d'une proportion égale par l'entrée et la sortie(aucun effet d'inertie) ;
- $I_t$  est le débit d'entrée du tronçon d'écoulement à l'instant  $t$ ,
- $O_t$  est le débit de sortie du tronçon d'écoulement à l'instant  $t$ .

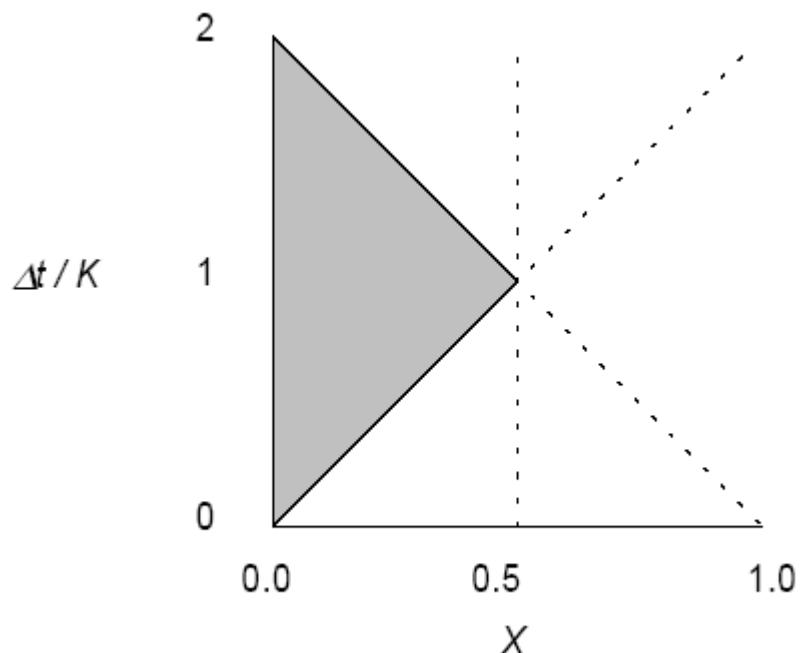
En remplaçant la valeur de  $S_t$  dans l'équation (\*) par sa valeur définie par l'équation (\*\*) et en isolant de l'autre coté l'inconnue  $O_t$ , on aura :

$$O_t = \left[ \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \right] I_t + \left[ \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \right] I_{t-1} + \left[ \frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t} \right] O_{t-1}$$

Le logiciel HEC-HMS résout cette équation de récurrence, avec la condition initiale  $O_t = 0$  pour  $t = 0$  et les paramètres  $K$  et  $X$  , pour avoir l'hydrogramme laminé.

Les paramètres K et X sont choisis de telle sorte que la combinaison soit tombée sur la partie hachurée :

**Figure N°08** : Conditions aux limites pour les paramètres de Muskingum



## **Troisième Partie : MODELISATION HYDROLOGIQUE**

### **3.1. UTILITE D'UNE MODELISATION HYDROLOGIQUE :**

La modélisation hydrologique est utile pour :

- ⇒ Dimensionner les ouvrages hydrauliques permanents(barrages, évacuateurs de crues) ou temporaires(batardeaux) ;
- ⇒ Evaluer la performance d'ouvrages existants pour réduire les dommages face aux inondations ;
- ⇒ Prévision hydrologique : gestion des ouvrages hydrauliques pour atténuer les effets de la crue ;
- ⇒ Evaluation de la crue de conception pour un projet de construction en milieu hydrique ;
- ⇒ Délimitation des zones inondables, gestion du territoire.

### **3.2. DEFINITION D'UN MODELE :**

Un modèle peut être défini comme un ensemble d'équations mathématiques représentant l'état d'un système et son évolution sous l'influence de certaines variables.

En gestion des ressources hydriques, on utilise trois catégories de modèles à savoir :

- ⇒ Les modèles statistiques ;
- ⇒ Les modèles hydrologiques ( calcul des débits et volumes) ;
- ⇒ Les modèles hydrauliques(calcul des niveaux d'eau et des vitesses).

Dans le cadre de ce mémoire, nous allons étudier plus particulièrement la modélisation hydrologique.

### **3.3. LES MODELES HYDROLOGIQUES :**

Les objets principaux sont :

- ⇒ Simulation du processus de **Pluie-Ruisseau** sur le bassin versant ;
- ⇒ Représentation plus ou moins simplifiée des diverses composantes du cycle hydrologique ;
- ⇒ Fournir un hydrogramme en un ou plusieurs points du bassin versant simulé.

### 3.3.1. Définition d'un modèle hydrologique :

Par définition, c'est l'ensemble d'équations mathématiques représentant l'état d'un bassin versant et l'évolution du cycle de l'eau par rapport à des conditions météorologiques spécifiées.

Il y a deux grands types de modèles hydrologiques :

- ⇒ Les modèles probabilistes ,
- ⇒ Les modèles déterministes,

### 3.3.2. Les modèles probabilistes :

Ils sont basés sur de longues séries d'observations. Ce sont des modèles statistiques et stochastiques.

Ces modèles sont utiles pour :

- ⇒ Etablir des critères de design ;
- ⇒ Vérifier la performance d'un ouvrage existant ;

Les limites sont :

- extrapolation ;
- modifications au bassin ou cours d'eau ;

### 3.3.3. Les modèles déterministes :

Aucun élément n'est aléatoire ou probabiliste et on peut distinguer selon l'échelle de temps utilisé.

Dans ce modèle, on peut représenter schématiquement certaines parties du cycle hydrologique. On parle aussi de modèles conceptuels.

Dans le modèle déterministe, on peut faire une distinction selon l'échelle spatiale utilisée :

- ⇒ modèles globaux : le bassin versant est représenté au moyen des paramètres représentant la réponse hydrologique du système(peut aussi être subdivisé en quelques parties nommées sous bassins) ;
- ⇒ modèles distribués(à parcelles) : le bassin versant est décomposé en une multitudes de parcelles ayant chacune leurs caractéristiques hydrologiques.

On prend aussi en compte l'hétérogénéité des bassins versants à niveau différent.

### 3.3.4. Les composantes d'un modèle hydrologique :

Il y a deux composantes principales dans le modèle hydrologique :

#### a)- La Fonction de production :

- l'eau « *disponible* » pour l'écoulement ;
- mouvement vertical de l'eau sur le bassin versant ;

#### b)- La Fonction de transfert :

- L'eau disponible est « transformée » en débit à l'exutoire ;
- La méthode dépend du type de modèle(global, spatialisé) ;
- Mouvement horizontal de l'eau sur le bassin versant ;

### 3.3.5. Les données requises pour un modèle hydrologique :

Les principaux types de données pour un modèle sont :

- Caractéristiques du bassin versant et des sous bassins ;
- Caractéristiques du réseau hydrographique ;
- Données météorologiques ;
- Données hydrométriques ;
- Données concernant l'usage de la ressource en eau ;
- Données des réservoirs d'emmagasinement ;
- Paramètres du modèle ;
- Conditions initiales ;

#### a)- Le bassin versant :

- ligne de partage des eaux,
- réseau hydrographique,

- topographie,
- sols, végétation, utilisation du territoire,

b)- la topographie :

- cartes topographiques,
- modèles numériques de terrain,
- sources de données(FTM, Service météorologique, ...)

c)- Le réseau hydrographique :

- cartes topographiques,
- format numérique disponible

d)- Caractéristiques des cours d'eau :

- géométrie des cours d'eau : sections transversales, pentes ;
- coefficient de Manning ( $Q = \frac{1}{n} A R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$ )

e)- Données climatologiques :

- précipitations,
- température de l'air,
- vitesse du vent, ensoleillement, humidité atmosphérique,
- données journalières disponibles, horaires en quelques stations,

f)- Données hydrométriques :

- débits,
- niveaux d'eau,

3.3.6. Calage et validation des modèles hydrologiques :

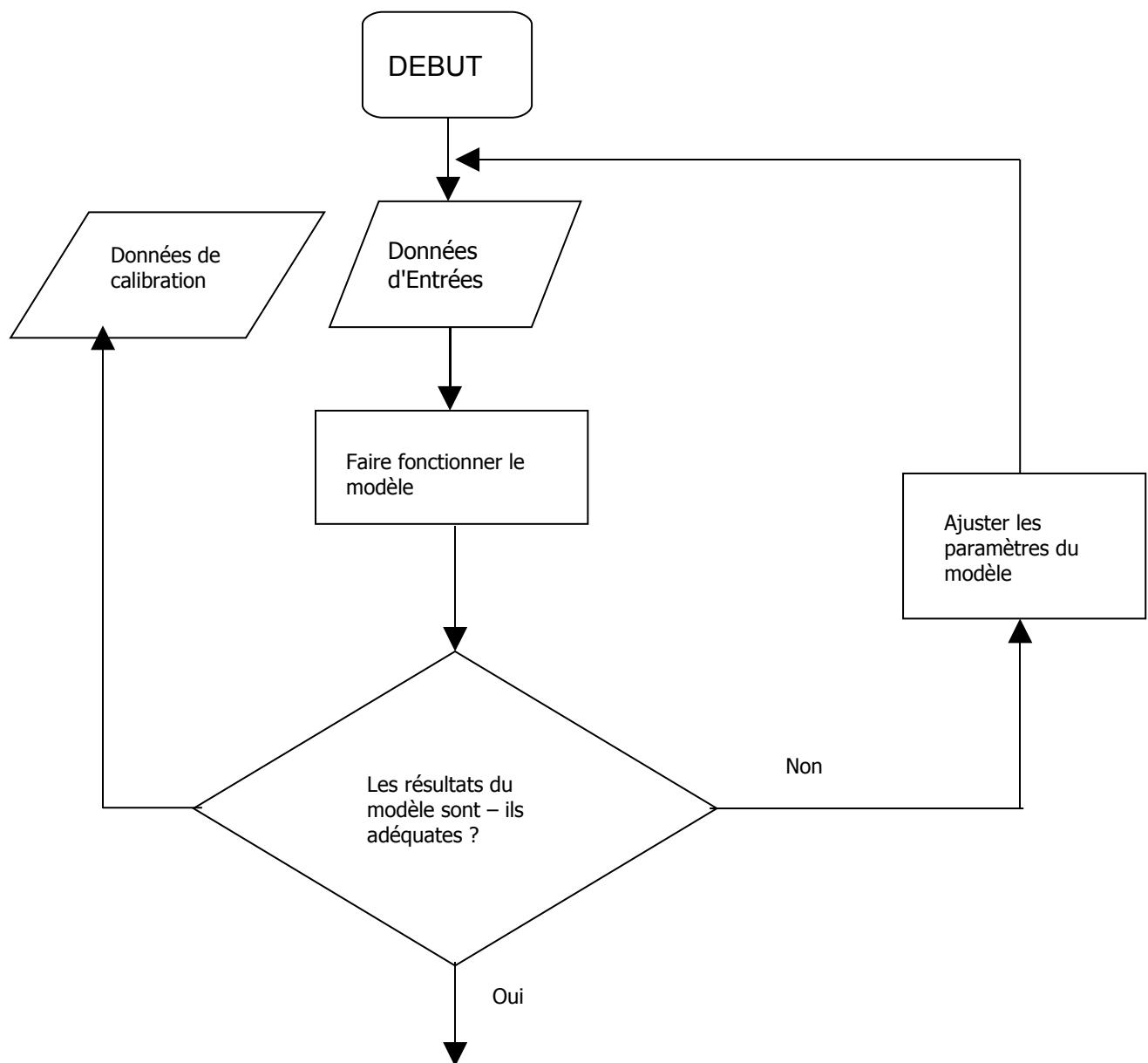
Le calage d'un modèle est le procédé suivant lequel les valeurs des paramètres du modèle sont identifiées en vue d'une application particulière. Habituellement, on ajuste les paramètres de manière à ce que les débits simulés à l'exutoire d'un bassin versant correspondent le plus étroitement possible avec les débits observés.

Un modèle hydrologique devrait toujours être calibré avant d'être utilisé. Les rôles d'une calibration sont :

- ⇒ estimation des paramètres non connus,
- ⇒ compenser pour les erreurs du modèle et des données,
- ⇒ le modèle est sensible à quels paramètres ?

### 3.3.6.1. Procédure générale de calage :

**Figure N°09** : Calage du modèle



*FIN*

### 3.3.6.2. Les types de paramètres à calibrer :

Les paramètres à calibrer sont de deux types :

les paramètres physiques et les paramètres conceptuels.

- ⇒ Les paramètres physiques : ce sont des paramètres mesurables tels que : la superficie du bassin, les pentes, l'utilisation du territoire(zone urbanisée, agricole, forestière, ....)
- ⇒ Les paramètres conceptuels : ce sont les paramètres qui ne peuvent être mesurés(coefficient du ruissellement, perte initiale)

La calage portera principalement sur les paramètres conceptuels.

## **Quatrième Partie : LE MODELE HYDROLOGIQUE HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center -Hydrologic Modeling System)- APPLICATION A LA RIVIERE MAMBA**

### **4.1. DESCRIPTION GENERALE DU LOGICIEL HEC-HMS:**

Le modèle hydrologique HEC-HMS est un modèle déterministe applicable principalement à la simulation d'un événement donné.

HEC-HMS est un modèle global qui permet de subdiviser un bassin versant en plusieurs parties, appelées sous-bassins, qui sont considérées comme ayant chacune des caractéristiques homogènes. Il est particulièrement bien adapté pour simuler le comportement hydrologique des bassins versants non urbanisés.

HEC-HMS permet également de simuler et d'incorporer des réservoirs et des dérivations.

Le modèle hydrologique HEC-HMS comprend une interface graphique, des capacités pour la manipulation, la gestion et le stockage des données, ainsi que des possibilités d'affichages et d'impressions des résultats. Il fait suite au modèle hydrologique

HEC-1 , 'Flood hydrograph package' développé durant les années 70 et qui est aujourd'hui encore le modèle hydrologique le plus employé aux Etats Unis. A Madagascar, c'est maintenant qu'on commence à utiliser ce modèle.

Le modèle hydrologique HEC-HMS a été développé par l' Hydrologic Engineering Center du U.S. Army Corps of Engineers(USACE). La documentation complète du logiciel HEC-HMS peut être consultée au site Internet de l' USACE (<http://www.hec.usace.army.mil>).

Dans le logiciel HEC-HMS il y a trois modèles qui sont :

- le Modèle de bassin ;
- le Modèle Météorologique ;
- le Contrôle de spécification.

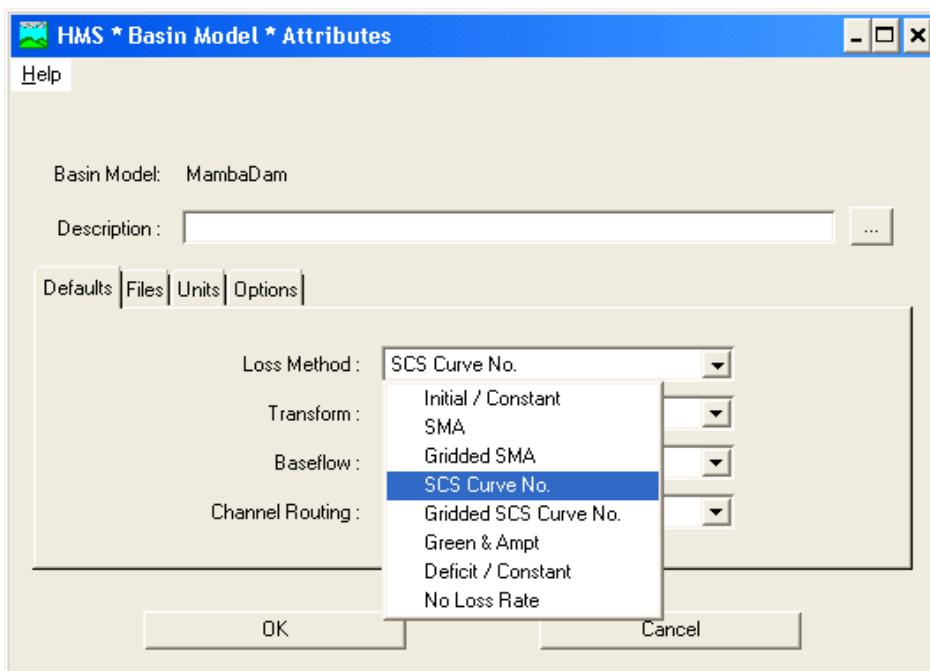
#### 4.1.1. Le Modèle de Bassin :

Ce modèle contient quatre fichiers :

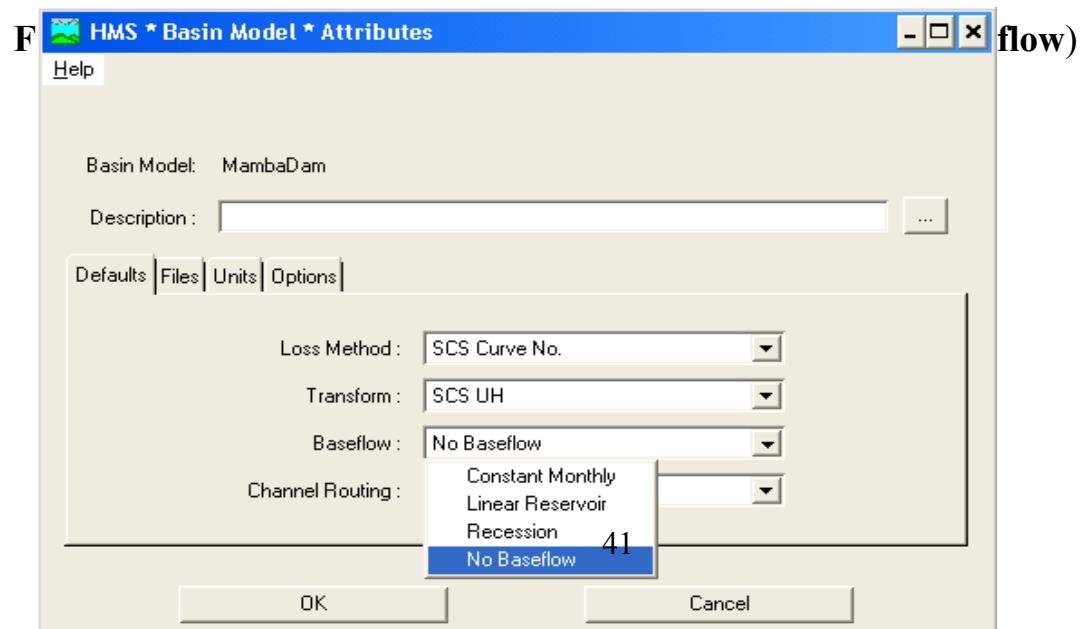
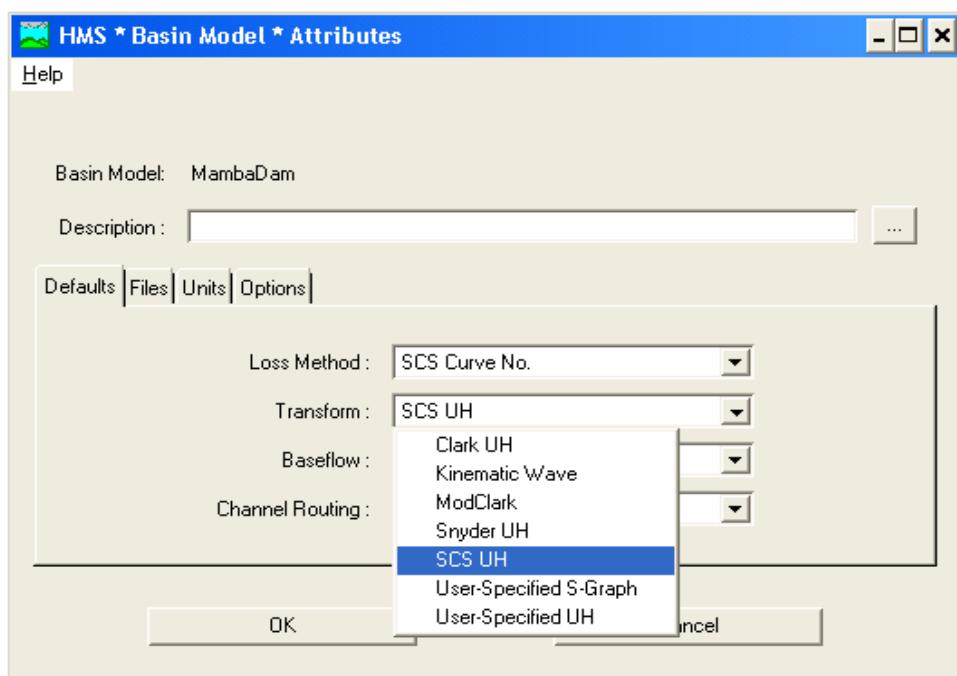
- **Loss method** : qui permet de choisir la méthode de calcul de l'eau 'produite', ou la pluie nette ;
- **Transform** : qui permet de choisir la méthode de transformation de la pluie nette en eau 'transférée' à l'exutoire ;
- **Baseflow** : qui fait le calcul de l'écoulement de base ; et
- **Channel Routing** : qui fait le laminage de l'hydrogramme en rivière.

Les figures suivantes montrent les différentes méthodes pour chaque fichier :

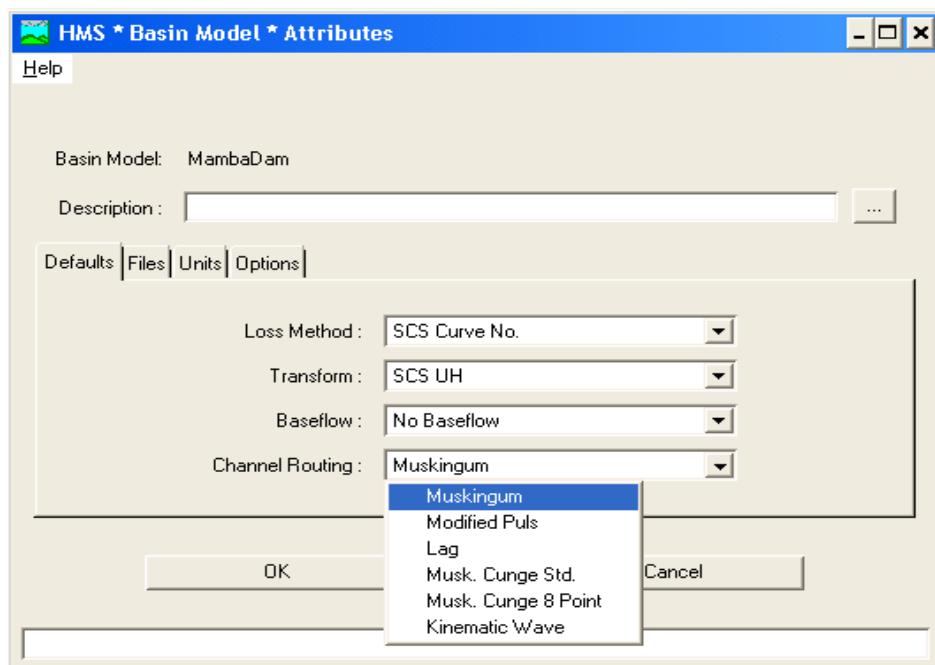
**Figure N°10** : les méthodes de calcul de l'eau produite (**Loss method** )



**Figure N°11** : les méthodes de transformation de la pluie nette en eau transférée à l'exutoire (**Transform**)



**Figure N°13** : le laminage de l'hydrogramme (Channel Routing)



Pour notre cas, nous allons choisir : **SCS Curve No.** pour Loss Method, **SCS UH** pour Transform, **No Baseflow** pour Baseflow et **Muskingum** pour Channel Routing.

Ce qui veut dire que :

- le calcul de l'eau 'produite' se fait par la méthode de SCS Curve Number ;
- la transformation de l'eau produite en eau 'transférée' à l'exutoire du bassin versant se fait par la méthode de l'hydrogramme unitaire de SCS ;

- on ne tient pas compte de l'écoulement de base ;
- le laminage de l'hydrogramme en rivière utilise la méthode de Muskingum.

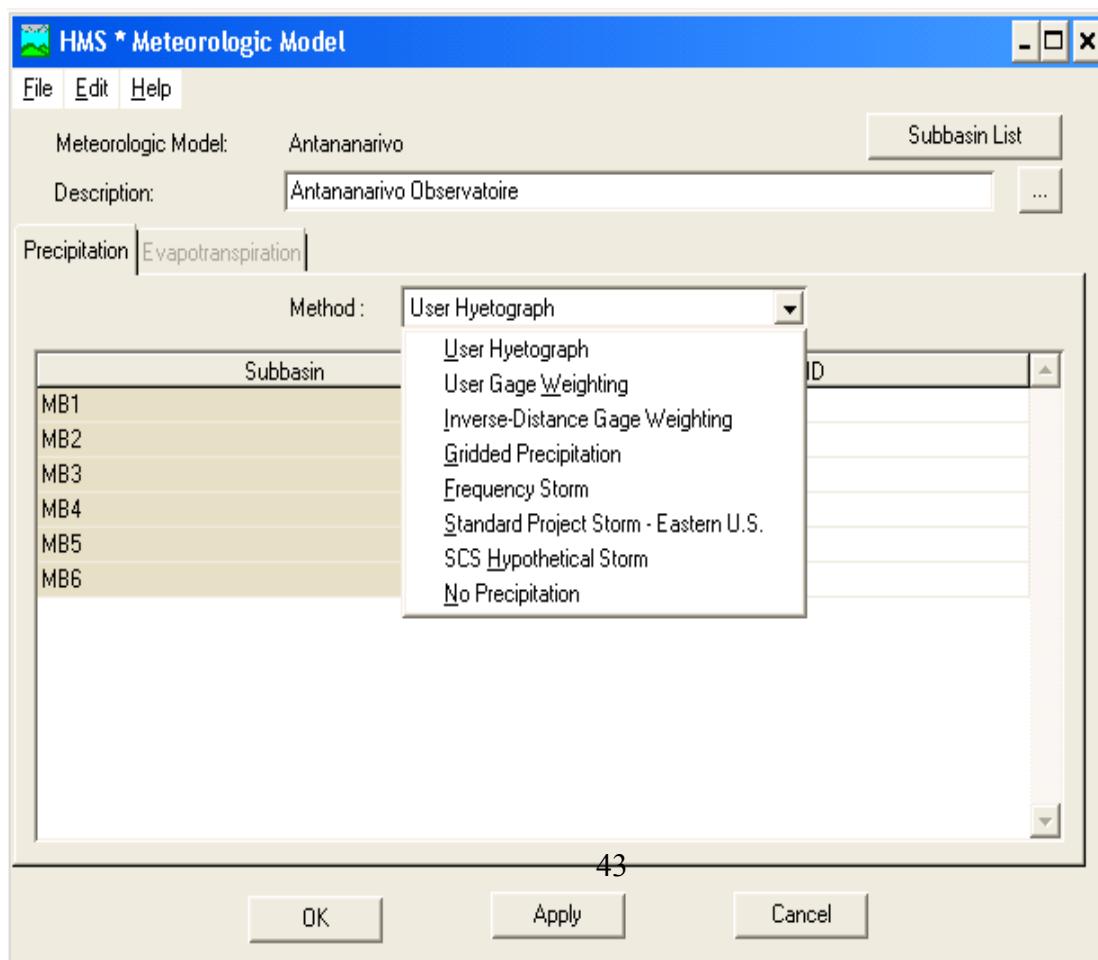
#### 4.1.2. Le Modèle Météorologique :

C'est ce modèle qui sert à définir de quelle façon sera calculée la pluie moyenne sur le bassin versant.

On introduit dans ce modèle les données pluviométriques et la date/heure d'une période pluvieuse dont on veut simuler pour savoir l'hydrogramme engendré.

Les méthodes de calcul de la pluie moyenne sont figurées dans le menu 'method' :

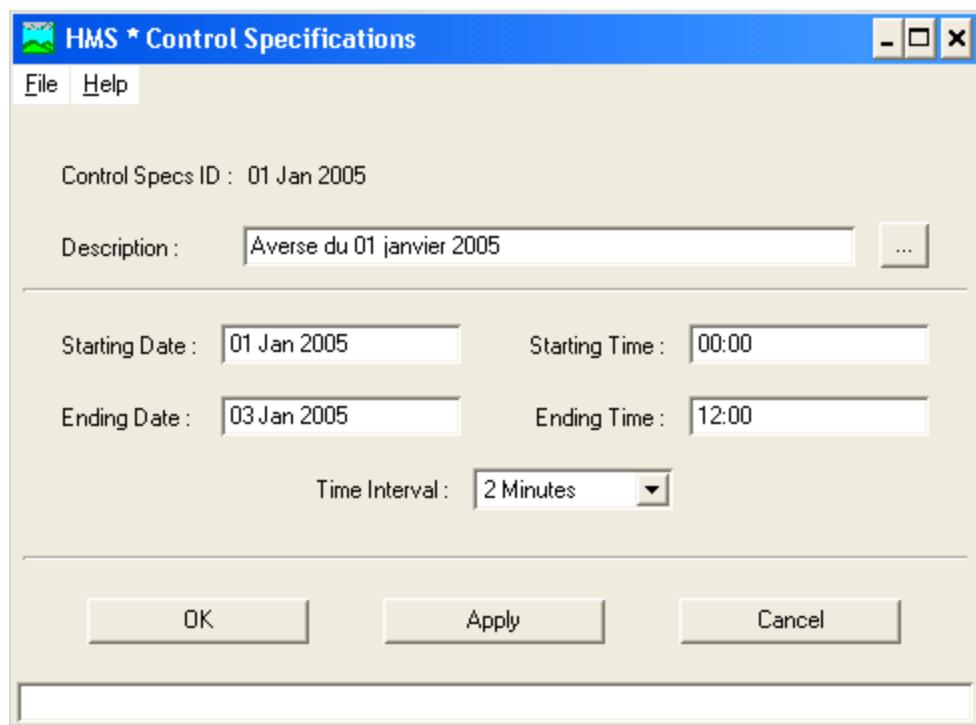
**Figure N°14**



Nous utilisons la méthode **User Hyetograph** : ce qui veut dire qu'on va utiliser l'hyétoprême obtenu à partir des données entrées manuellement dans le modèle. (Cf. Annexe 04)

#### 4.1.3. Le Contrôle de spécification :

C'est le fichier qui permet d'entrer les paramètres de contrôle de la simulation.  
**Figure N°15 :**



Le pas de temps de calcul (Time Interval) noté DT est défini par la condition :  
 $DT \leq 0,29 \text{ T Lag}$ .

## 4.2. DEMARRAGE DU MODELE HEC-HMS :

Notons que jusqu'à maintenant il y a deux versions de HEC-HMS dont :

- la version HEC-HMS 2.2.0 ;
- la version HEC-HMS 2.2.2.

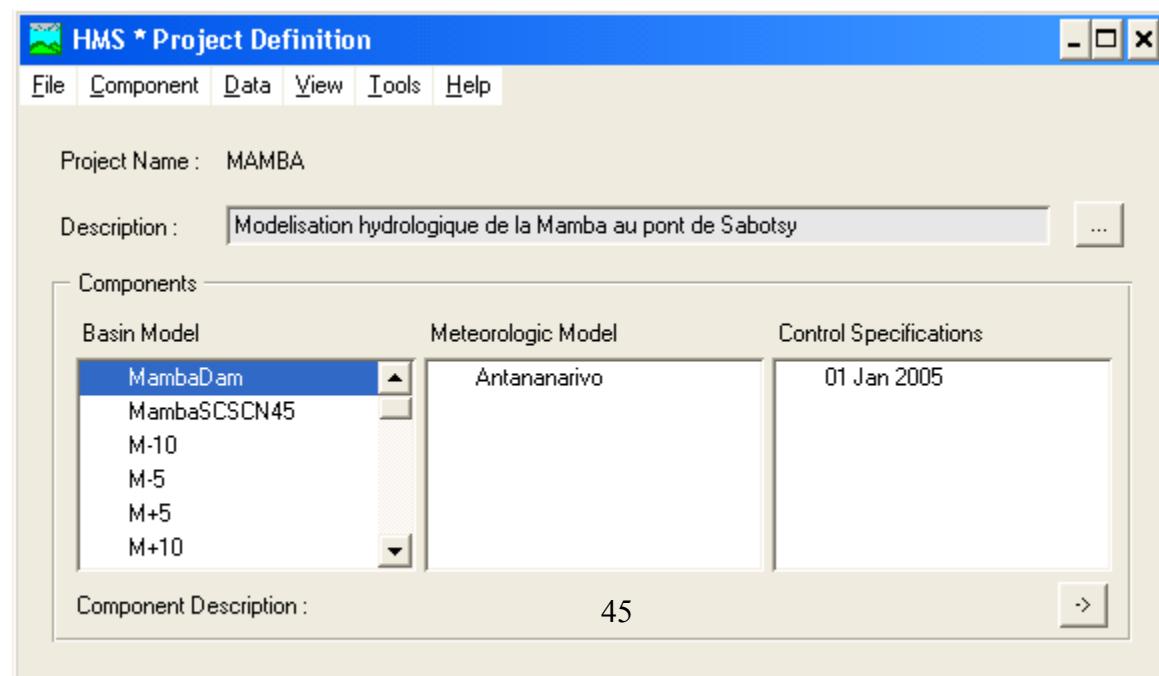
Tous deux peuvent être installées sur un système d'exploitation : Windows95, Windows 98, Windows NT 4.0 ou Windows 2000.

Comme c'est un logiciel destiné pour le public, donc tout le monde peut l'avoir en téléchargeant sur le site : <http://www.hec.usace.army.mil> .

Une fois le logiciel installé sur l'ordinateur, on peut le faire fonctionner en double cliquant sur l'icône correspondant à la version qu'on va utiliser.

Le logiciel HEC-HMS s'ouvre en tentant d'ouvrir le dernier projet enregistré sur l'ordinateur comme le montre la figure suivante :

**Figure N°16** : l'écran définissant le Projet



Sur cet écran dénommé ‘**Project Definition**’ on définit le projet qu’on veut exécuter sur HEC-HMS.

Dans le menu **File** il y a des éléments d’informations qui nous permettent de choisir les tâches à faire. Nous allons les résumer dans le tableau N°07 suivant :

**Tableau N° 07** : les articles dans le menu **File** et leur fonctions

<b>Article ou élément d’information (Menu Item en anglais)</b>	<b>Fonction</b>
New Project	Créer un nouveau Projet
Open Project	Ouvrir un projet listé ou non dans le logiciel
Save Project	Sauver le projet en cours
Copy Project	C’est pour faire une copie du projet en cours
Delete Project	Effacer ou supprimer le projet

Project Attributes	Mettre la description du projet et les autres attributs
Import HEC-1	Importer un fichier HEC-1 dans le projet en cours
Exit	Quitter le programme

Dans le menu ‘ **Component**’ il y a aussi les articles suivants :

**Tableau N°08** : les articles dans le menu **Component** et leur fonctions

Article ou élément d’information (Menu Item en anglais)	Fonction
Basin Model ⇒ New	Créer un nouveau modèle de bassin
Basin Model ⇒ Open	Ouvrir un modèle de bassin existant
Basin Model ⇒ Delete	Rayer le modèle de bassin du projet
Basin Model ⇒ Import	Importer un modèle de bassin existant dans le projet en cours
Meteorologic Model ⇒ New	Créer un nouveau modèle météorologique
Meteorologic Model ⇒ Open	Ouvrir un modèle météorologique existant
Meteorologic Model ⇒ Delete	Effacer le modèle météorologique du projet
Meteorologic Model ⇒ Import	Importer un modèle météorologique existant
Control Specifications ⇒ New	Créer un nouveau contrôle de spécification (date de simulation de la pluie)
Control Specifications ⇒ Open	Ouvrir le contrôle de spécification existant
Control Specifications ⇒ Delete	Effacer le contrôle de spécification du projet

**Tableau N°09** : Le rôle du menu ‘ **Data**’ dans la définition du projet :

Article ou élément d’information (Menu Item en anglais)	Fonction
Precipitation gages	Pour faire entrer les données

	pluviométriques
Discharge Gages	Changer les données pluviométriques
User-Specified Unit Hydrographs	Ouvrir et utiliser l'Hydrogramme Unitaire
User-Specified s-Graphs	Ouvrir et utiliser l'Hydrogramme en S
Soil Moisture Accounting Units	Estimer l'humidité du sol

**Tableau N°10** : Rôle du menu ‘Tools’ dans la définition du projet

Article ou élément d’information (Menu Item en anglais)	Fonction
Run Configuration	Créer une nouvelle simulation
Run manager (ou C)	Choisir sur quel ‘Run’ l’ordinateur va faire le calcul
Optimization Run configuration	Créer une nouvelle optimisation du fonctionnement de la simulation
Optimization Manager	Essayer et exécuter la simulation

#### 4.3. ETAPES D’UNE SIMULATION AVEC HEC-HMS :

Pour effectuer une première simulation, il est nécessaire de créer une base de données pour caractériser le bassin versant et déterminer des averses qui seront employées comme données d’entrées du modèle.

Les principales étapes de la simulation sont :

- ⇒ Démarrage d’un nouveau modèle ;
- ⇒ Définition du modèle de bassin versant ;
- ⇒ Données de la ou des stations météorologiques ;
- ⇒ Définition du modèle de précipitation ;
- ⇒ Définition des paramètres de contrôle de la simulation ;
- ⇒ Création et exécution d’une simulation ;
- ⇒ Visualisation des résultats ;

Ces étapes seront détaillées dans les Annexes N° 02 à 08

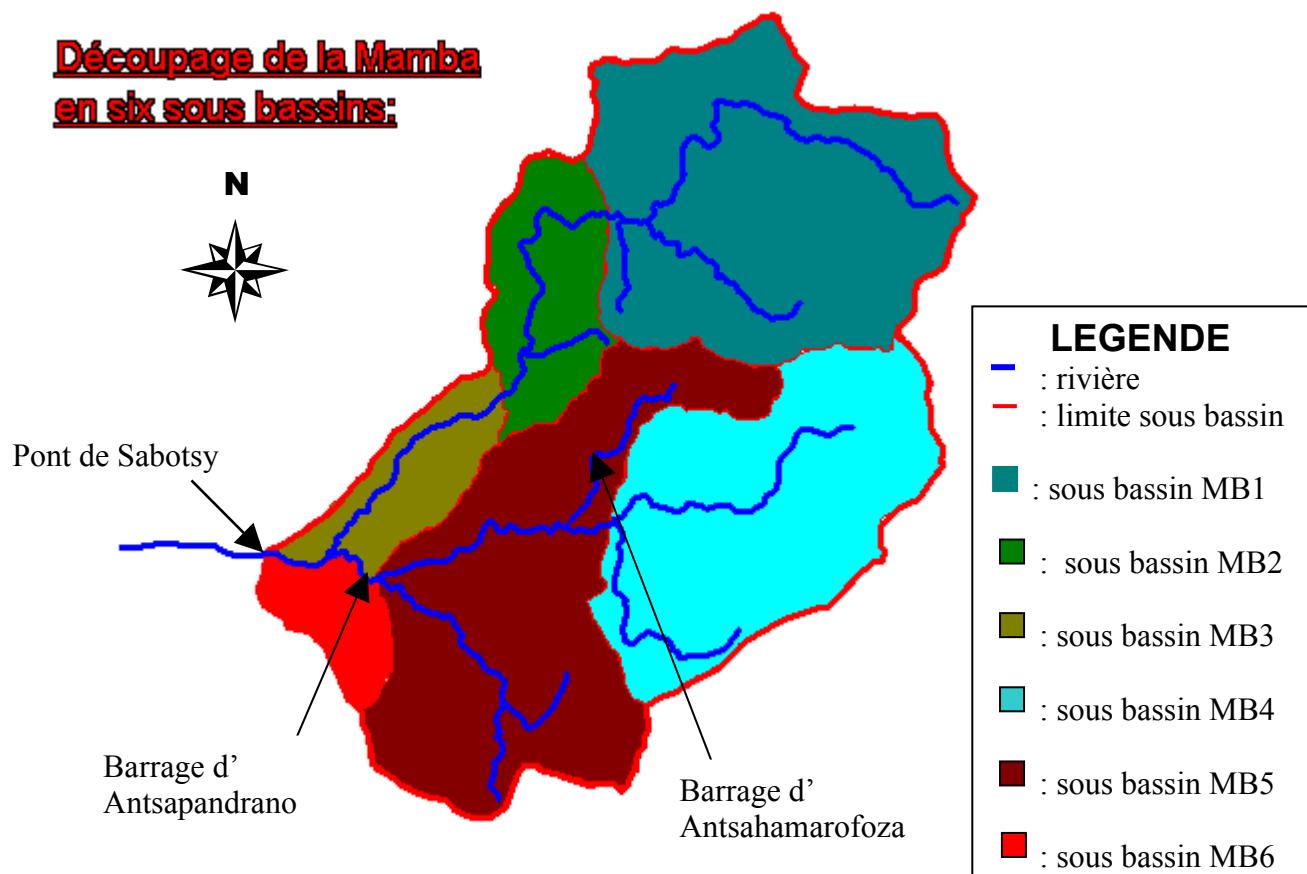
## 4.4. APPLICATION DU MODELE HEC-HMS A LA MAMBA

### 4.4.1- Découpage du bassin versant Mamba en six sous bassins :

Afin de modéliser la réponse en débit de la Mamba à l'implantation d'ouvrages écrêteurs de crues sur son bassin versant, il est nécessaire de procéder à un découpage en sous-bassins versants. Nous allons utiliser le découpage montré sur la **Figure N°17** suivante, sur laquelle le bassin versant Mamba a été découpé en six(06) sous-bassins.

Le découpage a été établi en considérant d'une part le réseau hydrographique et d'autre part les éléments structurants et l'occupation de sol.

**Figure N°17 :**



*Echelle du fond de carte = 1/100.000*

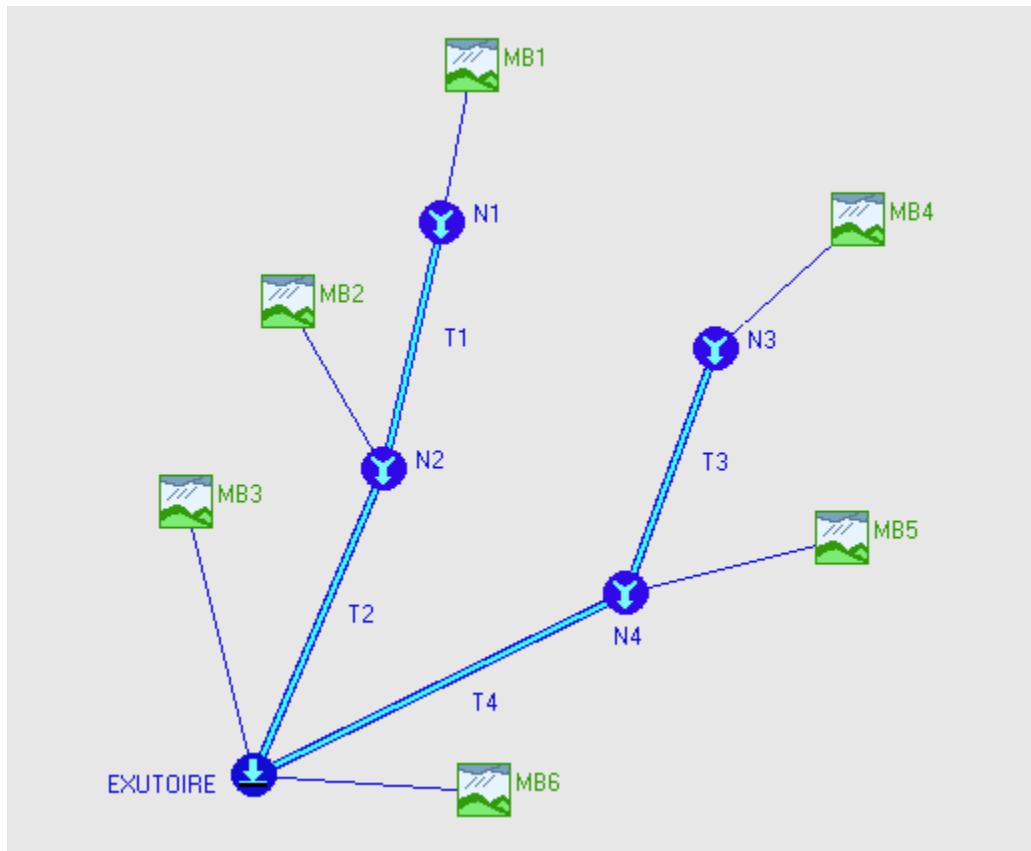
**Tableau N°11:** Caractéristiques des sous bassins de la Mamba :

Nom	Surface (Km <sup>2</sup> )	Périmètre (Km)	Long Rivière (Km)	Coef de ruiss.	Zmax (m)	Zmin (m)	Pente (m/Km)	Pente (%)	K	Long rect. Equiv (Km)	Tc(h)
MB1	28,174	22,984	9,332	0,35	1596	1348	26,575	2,657	1,21	7,946	4,19
MB2	8,0907	13,144	5,719	0,35	1511	1220	50,886	5,089	1,29	4,931	1,66
MB3	5,7869	12,212	6,029	0,35	1270	1250	3,317	0,332	1,42	4,933	5,72
MB4	22,177	21,142	5,839	0,35	1571	1364	35,453	3,545	1,26	7,685	3,04
MB5	26,246	28,699	5,602	0,35	1511	1308	36,236	3,624	1,57	12,198	3,21
MB6	3,4904	8,676	2,618	0,35	1433	1250	69,896	6,99	1,30	3,271	0,88

Pour le calcul de Tc nous avons utilisé les deux formules : Ventura et Passini puis on a pris la moyenne des deux.

#### 4.4.2. Schéma topologique de la Mamba :

**Figure N°18** : Schéma topologique



#### 4.4.3. Données du modèle de bassin pour le cas de la Mamba :

Pour le modèle du bassin versant nous allons considérer les cas suivants :

- a)- le bassin a été découpé en six sous bassin (voir Figure N°17) ;
- b)- on prend en compte les quatre tronçons d'écoulement : T1 à T4 ;
- c)- pour chaque sous bassin :
  - La fonction de production (ou loss method) est basée sur la méthode de SCS Curve Number,
  - La fonction de transfert (ou transform method) est basée sur le SCS synthetic dimensionless unit hydrograph,
  - Base flow : non prise en compte de la récession.
- d)- pour chaque tronçon d'écoulement on applique la méthode de laminage en rivière de Muskingum ( Muskingum routing method)

#### 4.4.3.1. Données des sous bassins :

**Tableau N°12 :**

Nom	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Loss method			SCS T Lag (h) [3]
		Initial loss (mm)[1]	% imperméabilit é	SCS Curve Number[2]	
MB1	28,174	5	0	70	2,514
MB2	8,091	5	0	75	0,996
MB3	5,787	5	0	70	3,432
MB4	22,177	5	0	52	1,824
MB5	26,246	5	0	90	1,926
MB6	3,490	5	0	90	0,528

[1] 'Initial Loss' ou pertes initiales : Ce sont des quantités d'eau perdues dans les dépressions ainsi que par l'interception de l'eau par la végétation. On évalue les pertes d'eau initiales d'un sous-bassin comme étant **la somme des pertes** dans les dépressions **et** des pertes par interception, selon les informations suivantes:

*Pertes dans les dépressions du sol :*

Les pertes par interception sont approximativement de 1,5 mm en zone urbaine, 3 mm en zone agricole et 8 mm en forêt. Selon les types d'utilisation du sol des sous-bassins,

*Pertes par interception :*

Les pertes par interception varient selon le type de végétation et l'état du couvert végétal

[2] donné par l'Annexe N°01

[3] T Lag ~ 0,6 x Tc

#### 4.4.3.2. Données des tronçons :

**Tableau N°13 :**

Nom	V (m/s)	L (m)	Coefficient K (h) [4]	Coefficient X [5]	Nombre de Reaches [6]
T1	2,0	900	0,125	0,2	4
T2	1,5	1100	0,204	0,2	6
T3	2,0	900	0,125	0,2	4
T4	1,5	400	0,074	0,2	3

[4]  $K = L / V$ , V étant la vitesse de propagation des ondes de crues sur le tronçon.

[5] X est le coefficient de Muskingum,  $0 < X < 0,5$ . en cas de débordement X est choisi entre 0,1 et 0,2.

[6] Nombre de sous-tronçons à considérer pour respecter le critère :

$$\text{Nombre Reaches} \times DT \sim K$$

DT étant le pas de temps de calcul,  $DT \leq 0,29 T_{\text{Lag}}$

ici  $DT = 2$  minutes

#### 4.4.4. Données du modèle Météorologique :

La station météorologique d'Antananarivo est la seule station qui contrôle les six sous bassins versants.

Sur la base d'hyétophraphes enregistrés dans le cadre du système d'annonce de crues de l'Ikopa (Précipitations à Antananarivo), la répartition horaire du **Tableau 14** ci- après a été considérée dans le cadre de la présente étude.

**Tableau N°14** : Répartition temporelle de la pluie sur 24 heures - Station d'Antananarivo

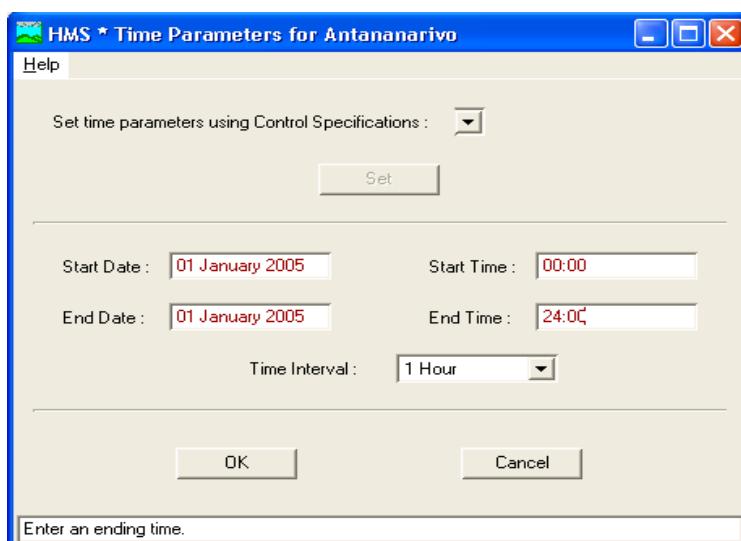
[Source : Hyétographes APIPA (2002) ]

Pluie 24 heures $P_{\max,24} = 130\text{mm}$			
Heure	Pourcentage Pluie totale	% Cumulé	Pluie incrément. (mm)
1	1,2	1,2	1,56
2	1,4	2,6	1,82
3	2,8	5,4	3,64
4	2,8	8,2	3,64
5	1,4	9,6	1,82
6	2,8	12,4	3,64
7	5,6	18	7,28
8	8,3	26,3	10,79
9	4,2	30,5	5,46
10	2,8	33,3	3,64
11	5,6	38,9	7,28
12	8,3	47,2	10,79
13	6,9	54,1	8,97
14	9,7	63,8	12,61
15	4,2	68	5,46
16	6,9	74,9	8,97
17	6,9	81,8	8,97
18	4,2	86	5,46
19	4,2	90,2	5,46
20	2,8	93	3,64
21	2,5	95,5	3,25
22	2,5	98	3,25
23	1	99	1,3
24	1	100	1,3

Dans la fenêtre **Time Parameters for Manual Data Entry**, entrer la date et les heures dont on a les données horaires, par exemple entrer :

- ⇒ Start date : 01 January 2005
- ⇒ Starting time : 00:00
- ⇒ End date : 01 January 2005
- ⇒ End time : 24:00
- ⇒ Time interval : 1 hour

**Figure N°19 :**

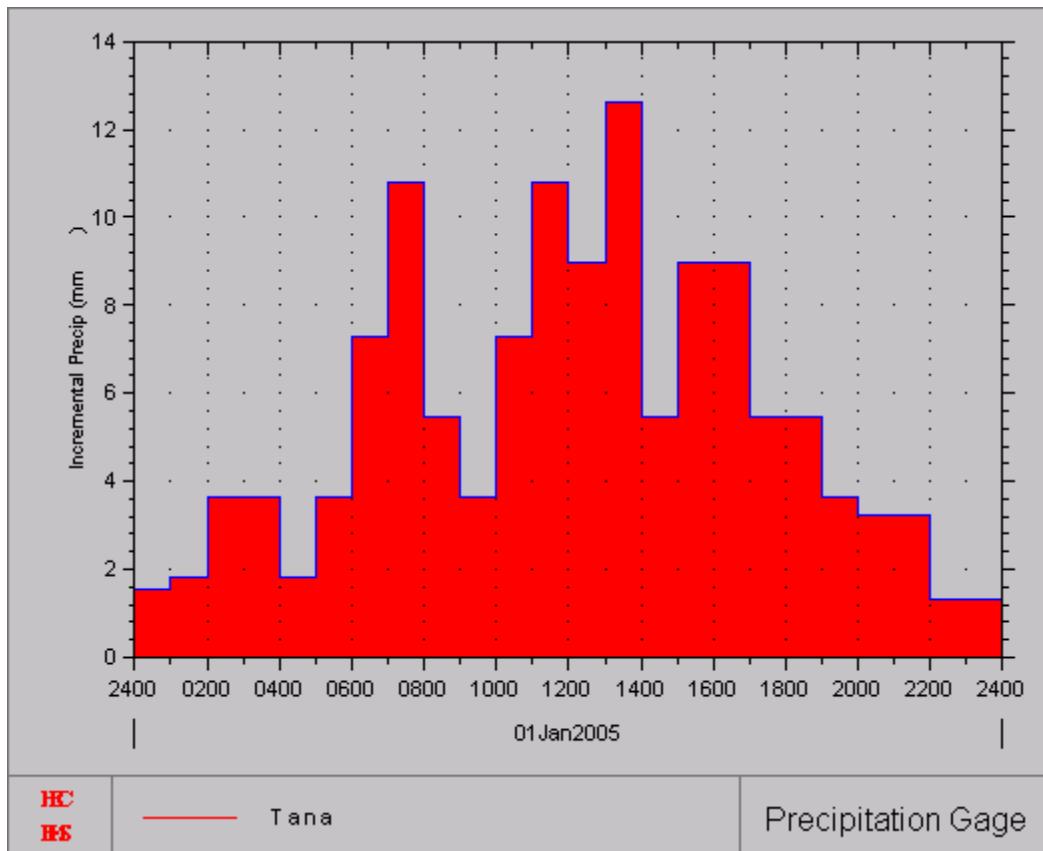


Cliquer sur **OK**.

Ici nous devons avoir les données horaires de la station de contrôle et la répartition de celles-ci durant les 24 heures(une journée).

L'hydrogramme construit à partir de la pluie maximale sur 24h du Tableau N°14 est le suivant :

**Figure N°20** : Précipitation sur les sous bassins (130mm)



#### 4.4.5. Définition des paramètres de la simulation :

Une fois les données pluviométriques sont entrées dans le modèle on peut les simuler pour avoir les hydrogrammes engendrés.

La date et l'heure du début et de la fin de la simulation n'ont pas à correspondre nécessairement aux dates et heures employées pour décrire les hyéogrammes utilisés par le modèle (Figure N°19 du § 4.4.4). la période simulée se doit d'être plus longue que la précipitation étudiée, si l'on veut obtenir l'hydrogramme complet jusqu'à ce que le ruissellement cesse et qu'il ne reste plus que l'écoulement de base.

Pour étudier la précipitation du 01 janvier 2005 on peut entrer les données suivants :

Start date : 01 january 2005,

Starting time : 00 :00,

End time : 03 january 2005,

End time : 12 :00,  
Time interval : 2 minutes

Après avoir monté le modèle, on peut lancer la simulation . Rappelons que dans HEC-HMS, une simulation est constituée d'un modèle de bassin, d'un modèle de précipitation et de paramètres de contrôle. Pour créer et exécuter une simulation :

A partir de la fenêtre **Project Definition**, ouvrir la fenêtre **Basin Model** en cliquant deux fois sur le Basin Model Mamba.

Dans la fenêtre **Basin Model**, cliquer sur **Simulate** et choisir **Run Configuration**. Sélectionner un Basin ID, un Met Model ID, et un Control ID correspondant au modèle de bassin, modèle de précipitation et paramètres de contrôles créés précédemment. Aller dans **Run ID** et écrire un titre pour la simulation et une courte description. Cliquer sur **OK**.

Ouvrir la fenêtre **Run Manager** à partir du menu Simulate de la fenêtre Basin Model. Choisir un **Run ID** et cliquer sur **Compute** pour lancer la simulation. On peut aussi lancer la simulation en cliquant sur l'icône  de la fenêtre

Basin Model sans ouvrir la fenêtre Run Manager.

La fenêtre suivant s'affiche sur l'écran pour dire que la simulation a bien réussi.

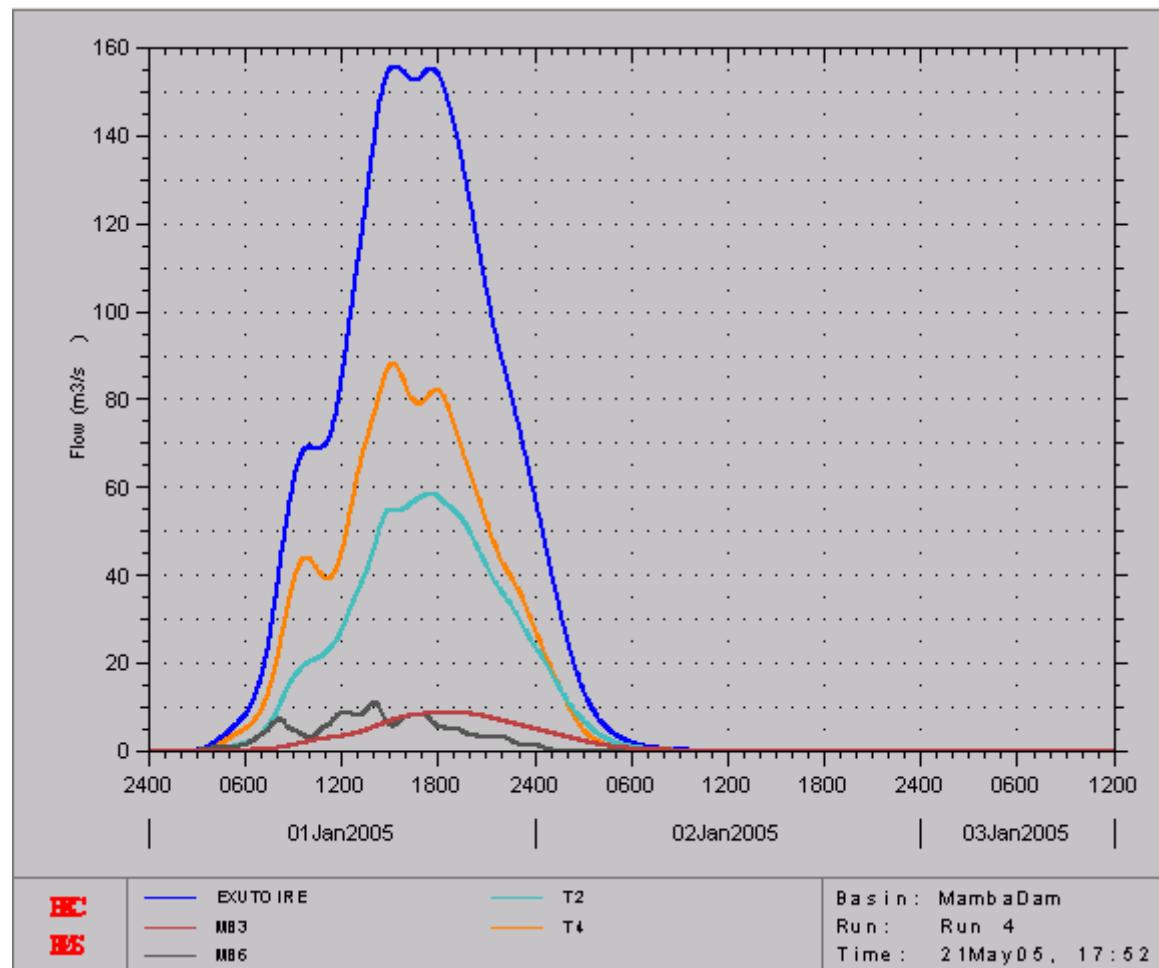
**Figure N°21 :**



## 4.5. RESULTATS

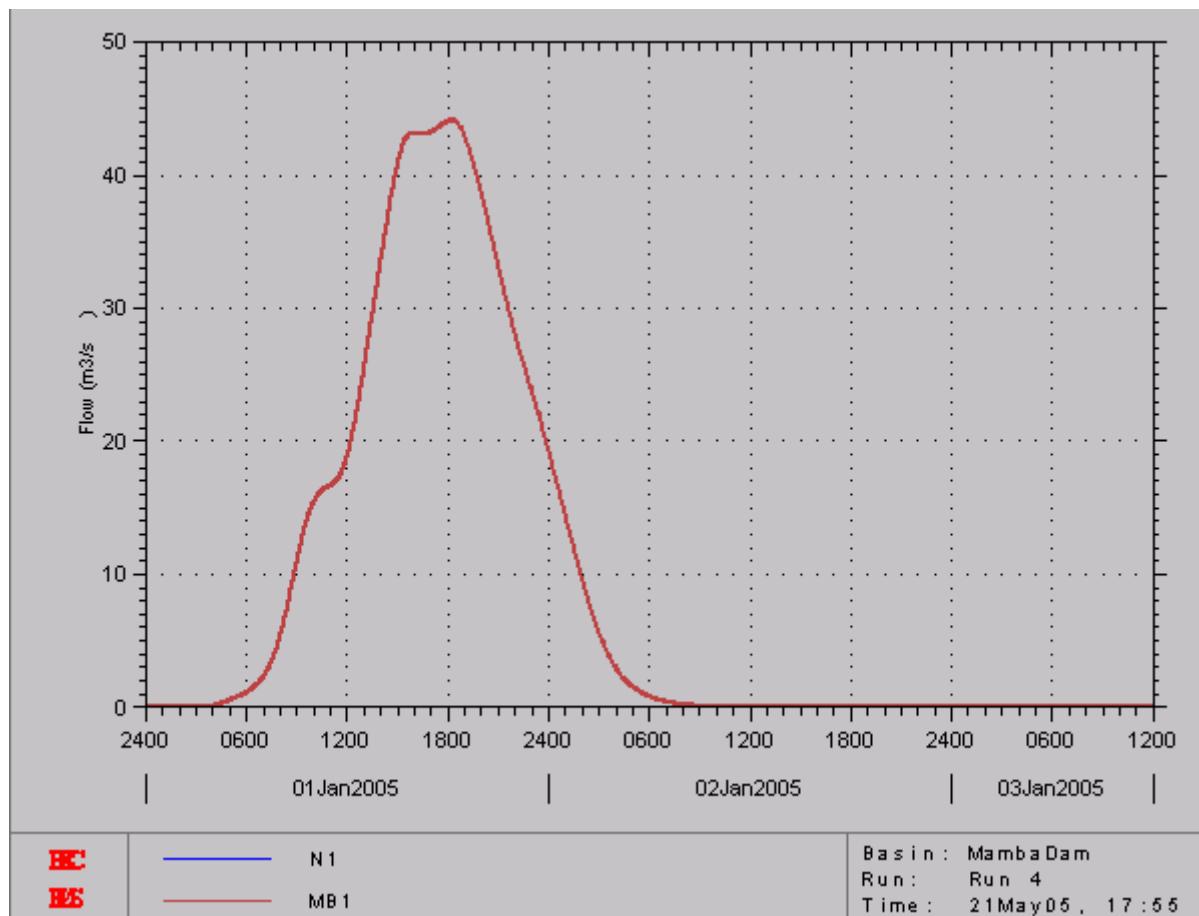
Avec les données cités ci-dessus nous avons comme résultats les hydrogrammes suivants :

**Figure N°22** : hydrogramme calculé au pont de Sabotsy-Namehana(Exutoire)



Le débit de pointe vaut  $Q_p = 155,65 \text{ m}^3/\text{s}$  qui s'est produit à la date du 01 janvier 2005 à 15 heures 22 minutes. Cette crue a engendré une lame de ruissellement direct : 73,1mm au niveau de l'Exutoire.

**Figure N°23 : hydrogramme calculé à la jonction (ou nœud) N1**

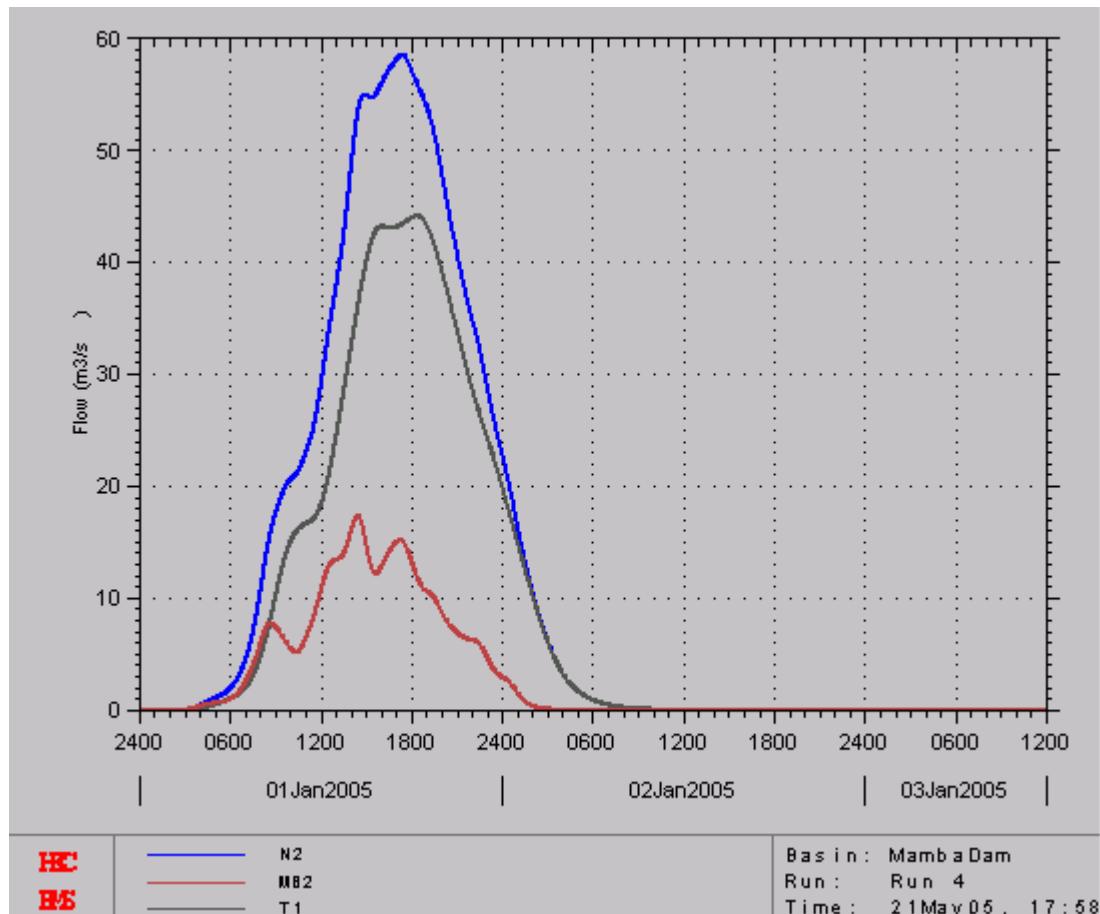


Débit maximum  $Q_p = 44,105 \text{ m}^3/\text{s}$

Date du débit maximum : 01 Janvier 2005 à 18h 18mn

Lame d'eau sortant du nœud : 66,8 mm

**Figure N°24** : hydrogramme calculé à la jonction (ou nœud) N2

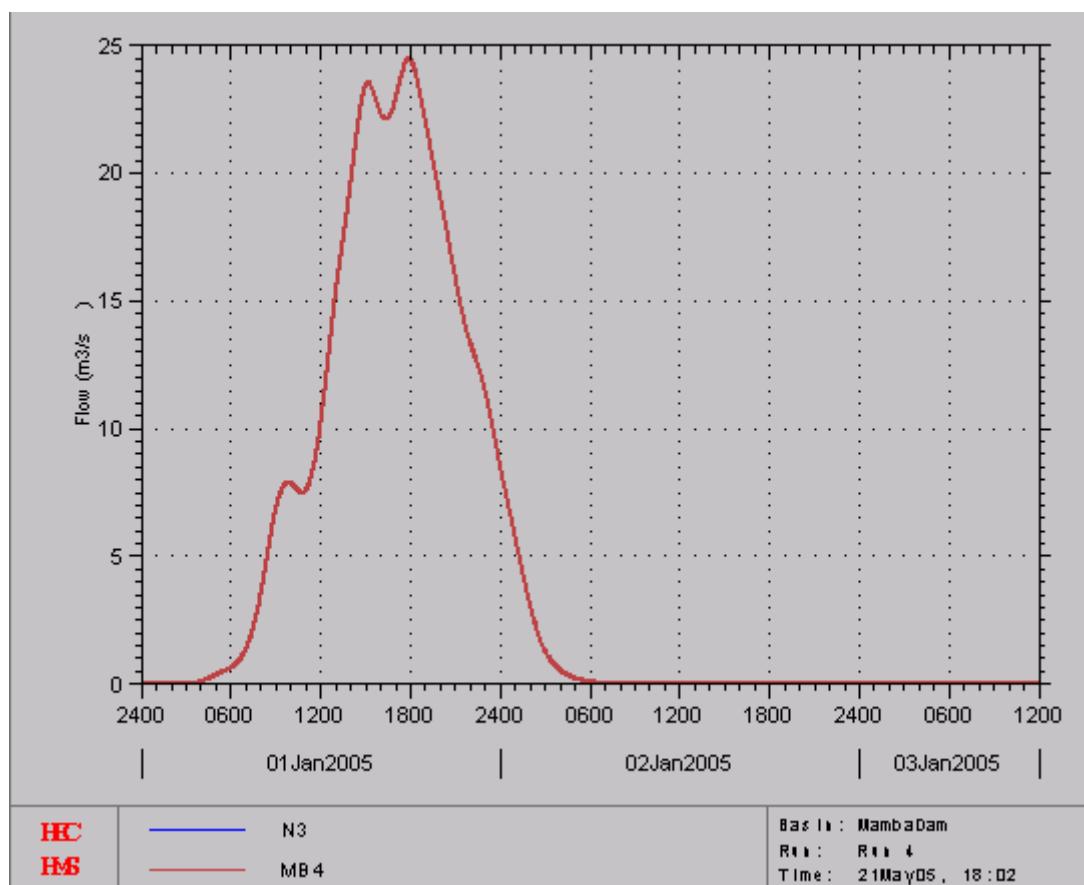


Débit maximum  $Q_p = 58,478 \text{ m}^3/\text{s}$

Date du débit maximum : 01 Janvier 2005 à 17h 26mn

Lame d'eau sortant du nœud : 68,5 mm

**Figure N°25** : hydrogramme calculé à la jonction (ou nœud) N3

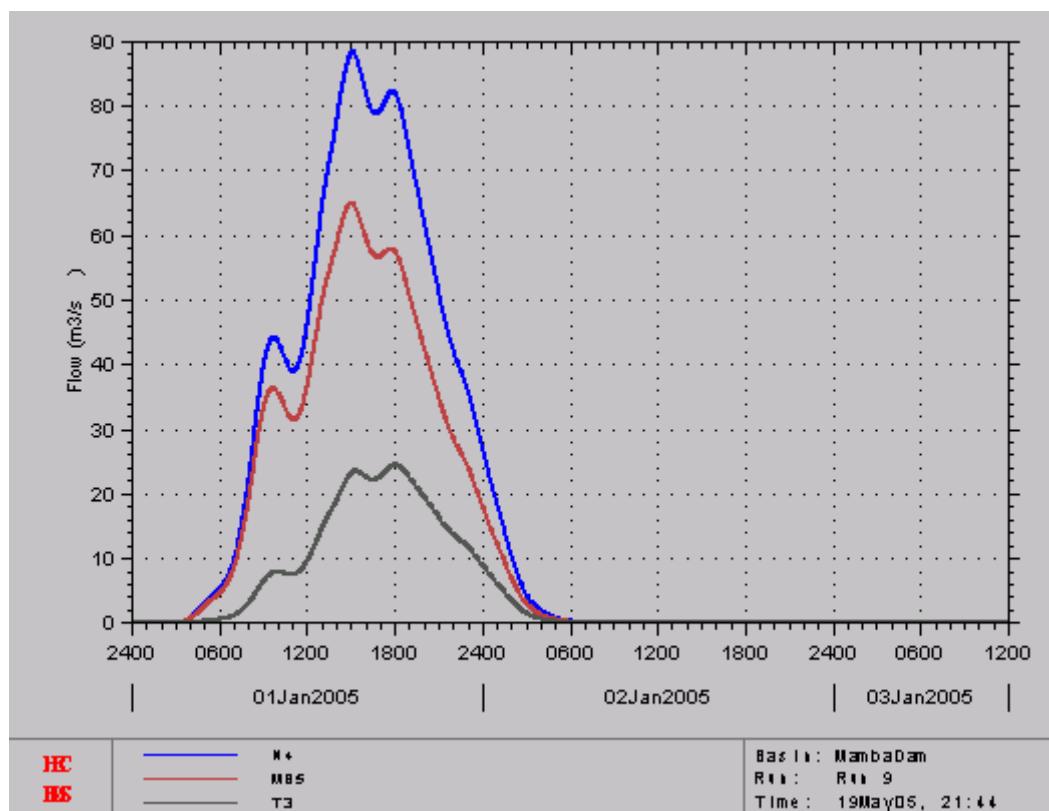


Débit maximum  $Q_p = 24,464 \text{ m}^3/\text{s}$

Date du débit maximum : 01 Janvier 2005 à 17h 56 mn

Lame d'eau sortant du nœud : 43,5mm

**Figure N°26** : hydrogramme calculé à la jonction (ou nœud) N4

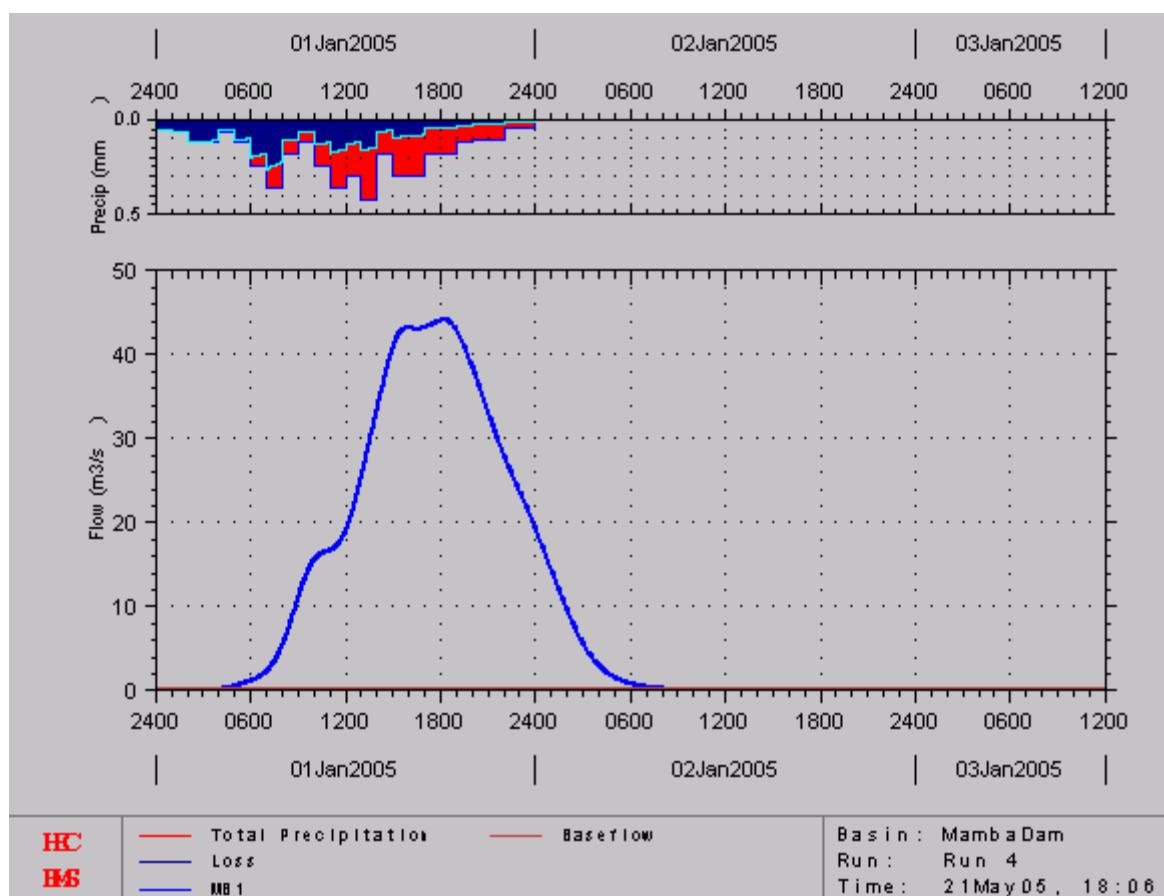


Débit maximum  $Q_p = 88,32 \text{ m}^3/\text{s}$

Date du débit maximum : 01 Janvier 2005 à 15h 08 mn

Lame d'eau sortant du nœud : 75,2mm

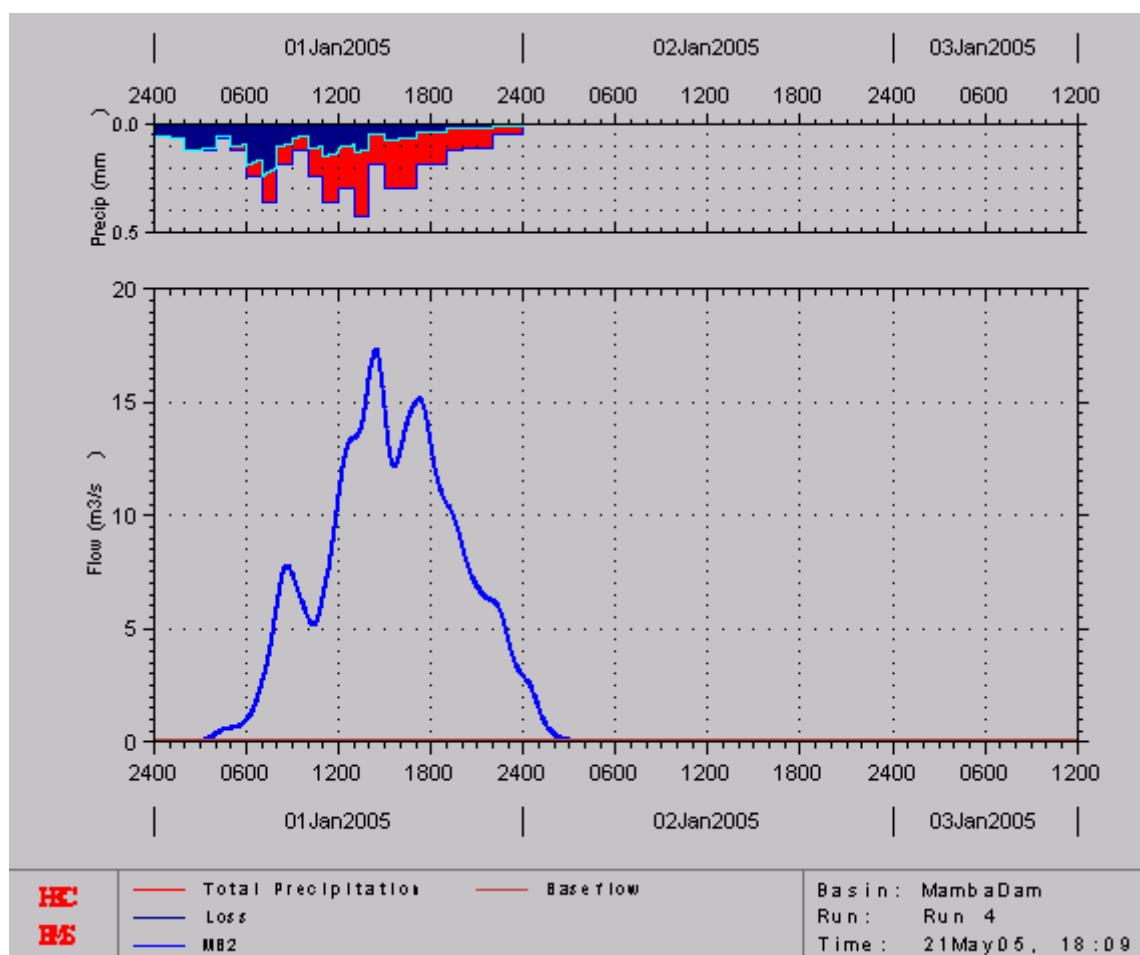
**Figure N°27** : hydrogramme calculé au niveau du sous bassin MB1



**Tableau N° 15** : résultats de la simulation au niveau du sous bassin MB1

Peak Discharge = 44,105m3/s	Date/heure : 01 janv. 05 à 18h 18 mn
Total precipitation = 130,0 mm	Total Discharge Runoff = 66,8 mm
Total Loss = 63,2 mm	Total Baseflow = 00,00 mm
Total Excess = 66,8 mm	Total Discharge = 66,8 mm

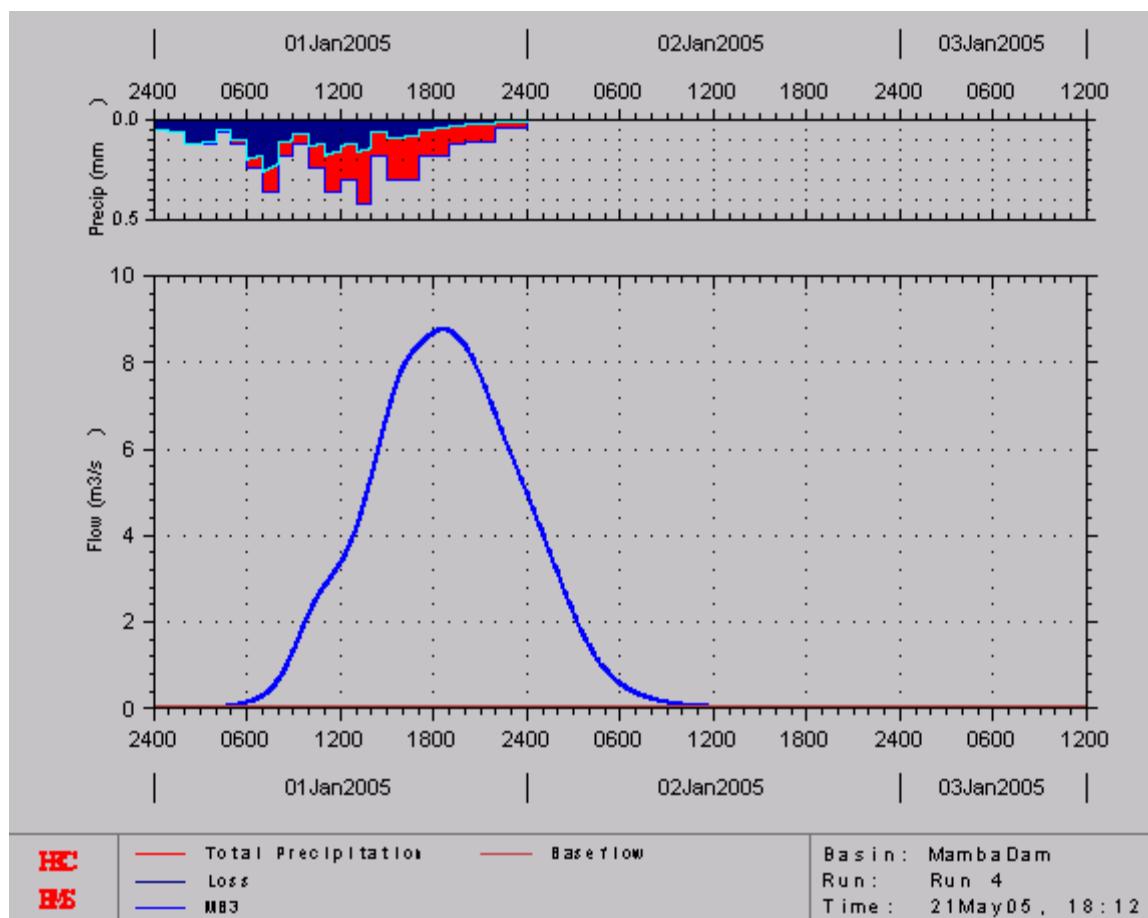
**Figure N°28** : hydrogramme calculé au niveau du sous bassin MB2



**Tableau N° 16** : résultats de la simulation au niveau du sous bassin MB2

Peak Discharge = 17,316 m <sup>3</sup> /s	Date/heure : 01 janv. 05 à 14h 28 mn
Total precipitation = 130,0 mm	Total Discharge Runoff = 74,5 mm
Total Loss = 55,5 mm	Total Baseflow = 00,00 mm
Total Excess = 74,5 mm	Total Discharge = 74,5 mm

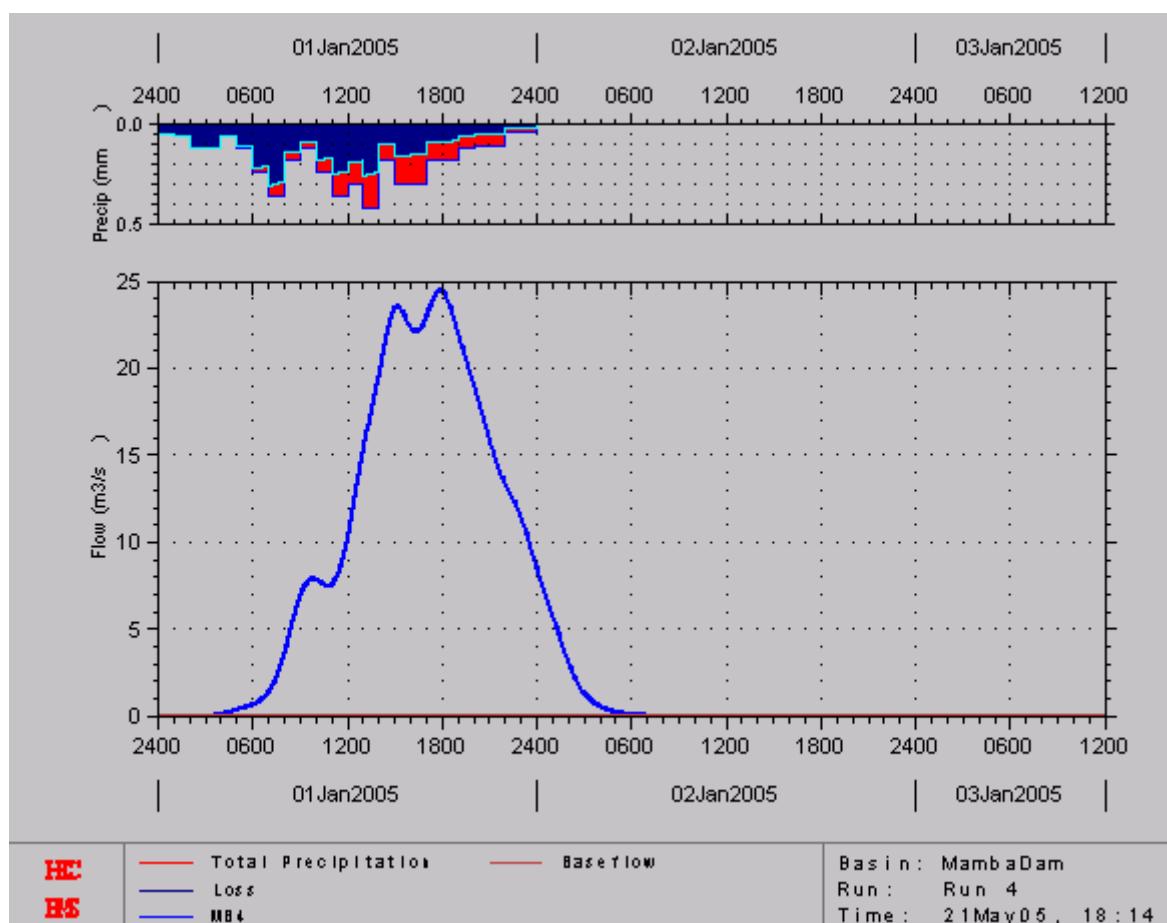
**Figure N°29** : hydrogramme calculé au niveau du sous bassin MB3



**Tableau N° 17** : résultats de la simulation au niveau du sous bassin MB3

Peak Discharge = 8,7506 m3/s	Date/heure : 01 janv. 05 à 18h 42 mn
Total precipitation = 130,0 mm	Total Discharge Runoff = 66,8 mm
Total Loss = 63,2 mm	Total Baseflow = 00,00 mm
Total Excess = 66,8 mm	Total Discharge = 66,8 mm

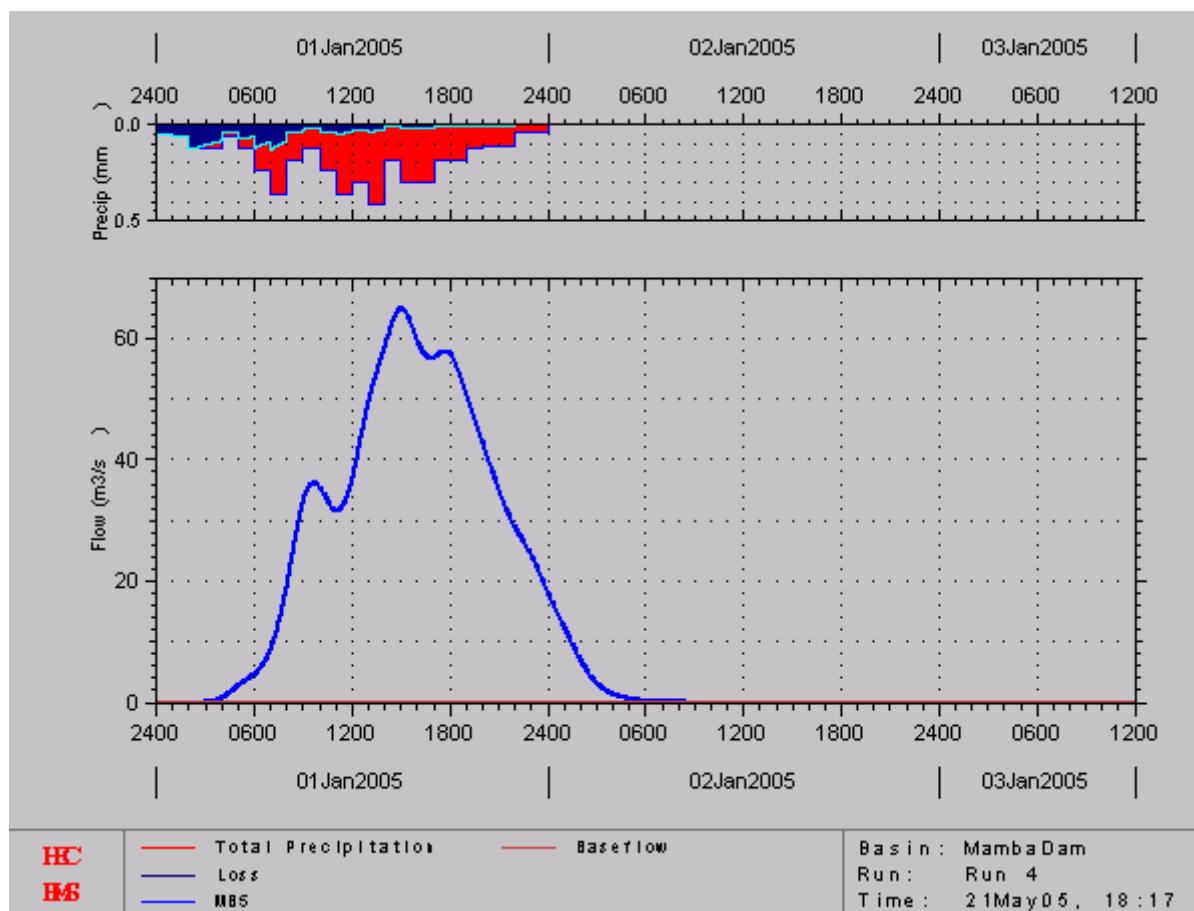
**Figure N°30** : hydrogramme calculé au niveau du sous bassin MB4



**Tableau N° 18** : résultats de la simulation au niveau du sous bassin MB4

Peak Discharge = 24,464 m <sup>3</sup> /s	Date/heure : 01 janv. 05 à 17h 56mn
Total precipitation = 130,0 mm	Total Discharge Runoff = 43,6 mm
Total Loss = 86,5 mm	Total Baseflow = 00,00 mm
Total Excess = 43,5 mm	Total Discharge = 43,6 mm

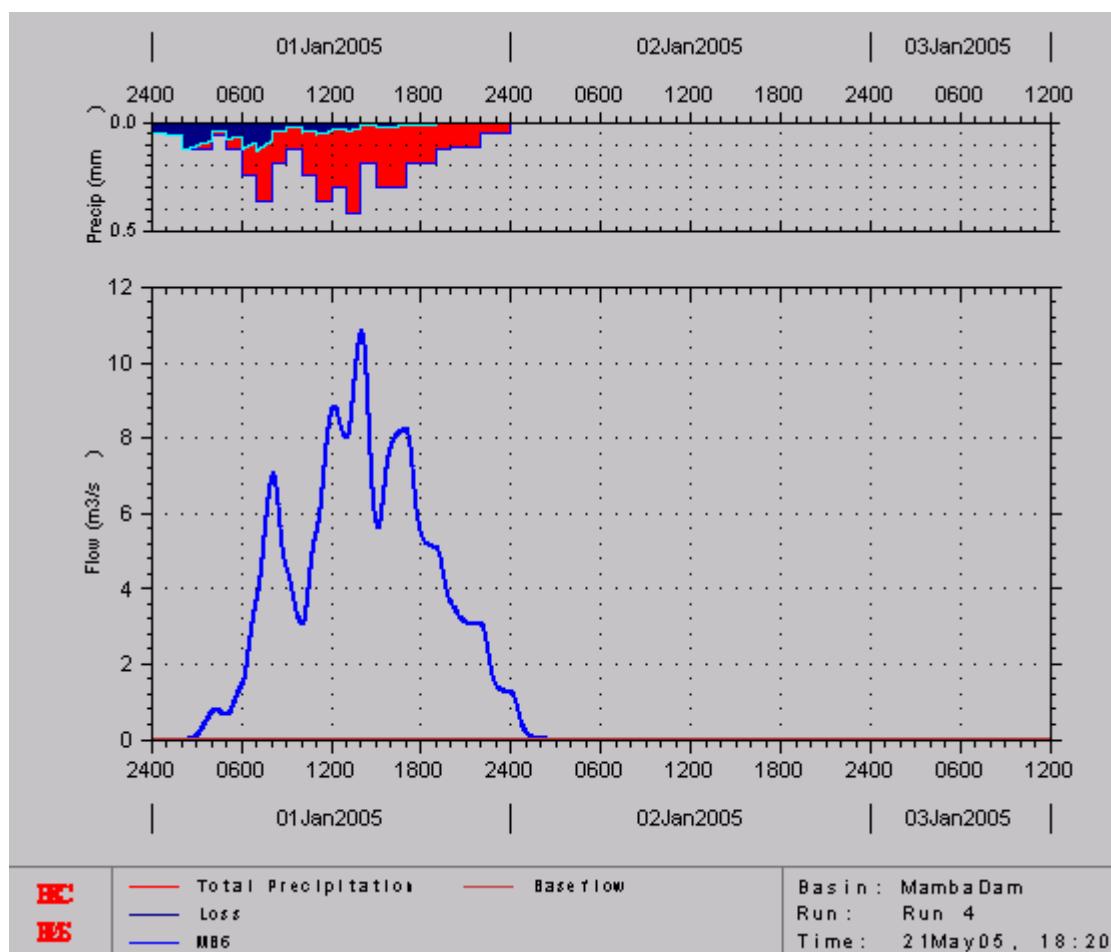
**Figure N°31** : hydrogramme calculé au niveau du sous bassin MB5



**Tableau N° 19** : résultats de la simulation au niveau du sous bassin MB5

Peak Discharge = 65,009 m <sup>3</sup> /s	Date/heure : 01 janv. 05 à 15h 04 mn
Total precipitation = 130,0 mm	Total Discharge Runoff = 102,0 mm
Total Loss = 28,0 mm	Total Baseflow = 00,00 mm
Total Excess = 102,0 mm	Total Discharge = 102,0 mm

**Figure N°32** : hydrogramme calculé au niveau du sous bassin MB6



**Tableau N° 20** : résultats de la simulation au niveau du sous bassin MB6

Peak Discharge = 10,806 m <sup>3</sup> /s	Date/heure : 01 janv. 05 à 14h 08 mn
Total precipitation = 130,0 mm	Total Discharge Runoff = 102,0 mm
Total Loss = 28,0 mm	Total Baseflow = 00,00 mm
Total Excess = 102,0 mm	Total Discharge = 102,0 mm

Ces résultats sont résumé dans un tableau du modèle dans la fenêtre ‘**Summary of Results**’ :

**Figure N°33** : Résultats de la Modélisation HEC-HMS sur la Mamba

**HMS \* Summary of Results**

Project: MAMBA		Run Name: Run 4		
Start of Run:	01Jan05 0000	Basin Model:	MambaDam	
End of Run:	03Jan05 1200	Met. Model:	Antananarivo	
Execution Time:	21May05 1749	Control Specs:	01 Jan 2005	
Hydrologic Element	Discharge Peak (cms)	Time of Peak	Total Volume (1000 cu m)	Drainage Area (sq km)
MB1	44.105	01 Jan 05 1818	1882.2	28.170
N1	44.105	01 Jan 05 1818	1882.2	28.170
T1	44.100	01 Jan 05 1826	1882.2	28.170
MB2	17.316	01 Jan 05 1428	602.89	8.090
N2	58.478	01 Jan 05 1726	2485.1	36.260
T2	58.462	01 Jan 05 1738	2485.1	36.260
MB4	24.464	01 Jan 05 1756	964.12	22.180
N3	24.464	01 Jan 05 1756	964.12	22.180
T3	24.458	01 Jan 05 1804	964.12	22.180
MB5	64.810	01 Jan 05 1504	2676.9	26.250
N4	88.149	01 Jan 05 1510	3641.0	48.430
T4	88.136	01 Jan 05 1514	3641.0	48.430
MB3	8.7506	01 Jan 05 1842	386.85	5.790
MB6	10.806	01 Jan 05 1408	355.90	3.490
EXUTOIRE	155.65	01 Jan 05 1522	6868.8	93.970

Print      Close

#### 4.6. COMPARAISON AVEC LES RESULTATS OBTENUS A PARTIR DES METHODES CLASSIQUES

La hauteur de pluie maximale sur 24 h observée à la station d'Antananarivo vaut 130mm. On peut donc calculer le débit de crue correspondant à cette précipitation par les deux méthodes : Rationnelle et Louis Duret ( Partie II- §.2.8.1 . page 25et §.2.8.2 de la page 27)

**Tableau N°21 :** Comparaison des résultats

Méthode de Louis Duret	Méthode Rationnelle	Résultat du HEC-HMS
194,95 m <sup>3</sup> /s	113,48 m <sup>3</sup> /s	155,65 m <sup>3</sup> /s

Il y a une différence de 39,3 m<sup>3</sup>/s entre le résultat de la méthode de Louis Duret et celui du HEC-HMS . Et de 42,17 m<sup>3</sup>/s entre le résultat de la méthode Rationnelle et celui du HEC-HMS.

La différence vient du fait que l'estimation des paramètres ne sont pas les mêmes pour les méthodes classiques et celle du modèle HEC-HMS.

#### 4.7. CONCLUSION :

Les méthodes classiques nécessitent une série de données météorologiques pendant au moins trente années pour que les résultats soient proches de la réalité. Tandis que le modèle HEC-HMS permet de calculer le débit de crue d'un événement pluvieux, si l'on connaît les données pluviométriques et la répartition temporelle de celles-ci. Le résultat du modèle est fiable et tout proche de la réalité.

De plus, avec le modèle HEC-HMS les hydrogrammes de crues, la date et l'heure où se passe le débit de pointe, et le volume d'eau écoulé sont tous donnés directement par le modèle. Ce qui est l'avantage de ce modèle.

## 4.8. ANALYSE DE SENSIBILITE

Une fois une première simulation effectuée, il devient facile de modifier la valeur d'un paramètre et d'observer l'effet sur les hydrogrammes générés. On devrait faire varier les paramètres de bassin pour observer les changements produits aux hydrogrammes calculés. Les caractéristiques des hydrogrammes calculés à analyser sont : le débit maximum, le volume de ruissellement, le temps du débit de pointe.

On fait varier les paramètres en augmentant et en diminuant leur valeur (par exemple  $\pm 50\%$ ) par rapport à leur valeur initiale. On ne fait varier qu'un seul paramètre à la fois de manière à bien saisir l'influence exercée par chacun sur les résultats des simulations. Après chaque changement d'une valeur, un nouveau modèle de bassin sera créé (**Save Basin Model as...**).

Pour chacun des cas à analyser, il y aura aussi une simulation (**Run**) qui sera créée.

Les paramètres du modèle à examiner pour cette analyse de sensibilité sont les suivants : SCS Curve Number , SCS T LAG , Initial loss, et Impervious

**Tableau N°22** : Analyse de la sensibilité du SCS Curve Number pour le bassin Mamba

Conditions initiales : MB1 : SCS CN=70, Qmax = 155,65 m<sup>3</sup>/s  
 MB2 : SCS CN=75, lame de ruiss. Direct =73,1 mm  
 MB3 : SCS CN= 70, Temps Qmax = 15,22heures  
 MB4 : SCS CN= 52,  
 MB5: SCS CN= 90,  
 MB6 : SCS CN=90.

SCS Curve Number : -10, -5, +5 et +10 ( par rapport aux valeurs initiales)

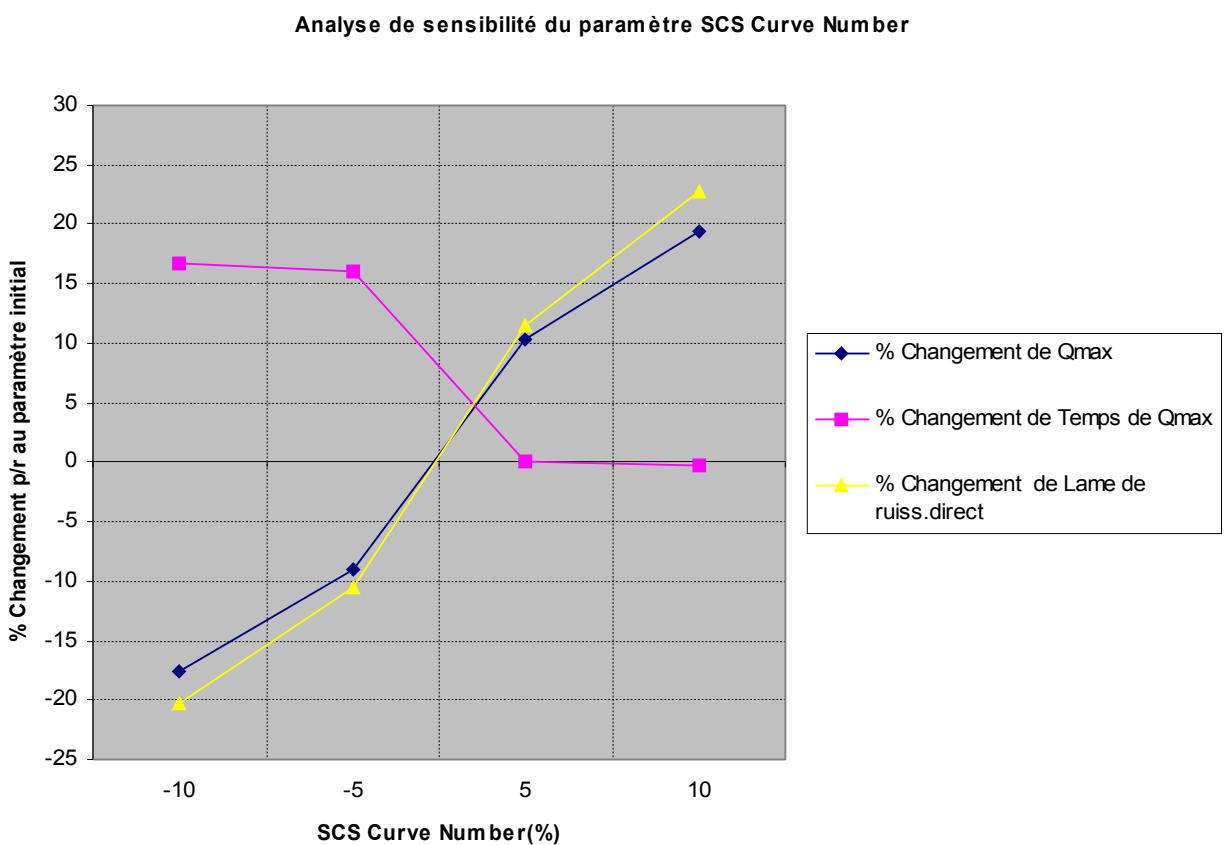
SCS Curve Number	Qmax (m <sup>3</sup> /s)	% changement p/r aux cond. initiales	Temps Qmax (heures)	% changement p/r aux cond. initiales	Lame de ruissellement direct(mm)	% changement p/r aux cond. initiales
-10	128,34	-17,55	17,77	+16,75	58,3	-20,25
-5	141,69	-8,97	17,67	+16,10	65,4	-10,53

+5	171,63	+10,27	15,23	+0,07	81,5	+11,49
+10	185,84	19,40	15,17	-0,33	89,8	+22,85

L'observation de la différence est effectué au niveau de l'exutoire (le signe moins veut dire une manque et le signe plus un excès ou surplus par rapport aux valeurs initiales)

Le graphique suivant montre la variation des caractéristiques de l'hydrogramme par rapport à la variation du paramètre **SCS Curve Number** du modèle :

**Figure N° 34 :** Analyse de sensibilité du paramètre SCS Curve Number



#### Commentaire :

Le paramètre SCS Curve Number intervient beaucoup sur le changement du débit maximal et de la lame de ruissellement direct. Selon cette figure, une diminution de 10% de la valeur de SCS Curve Number entraîne une diminution de l'ordre de 20% au niveau de la lame de ruissellement direct et d'une diminution de l'ordre de 18% du débit maximal.

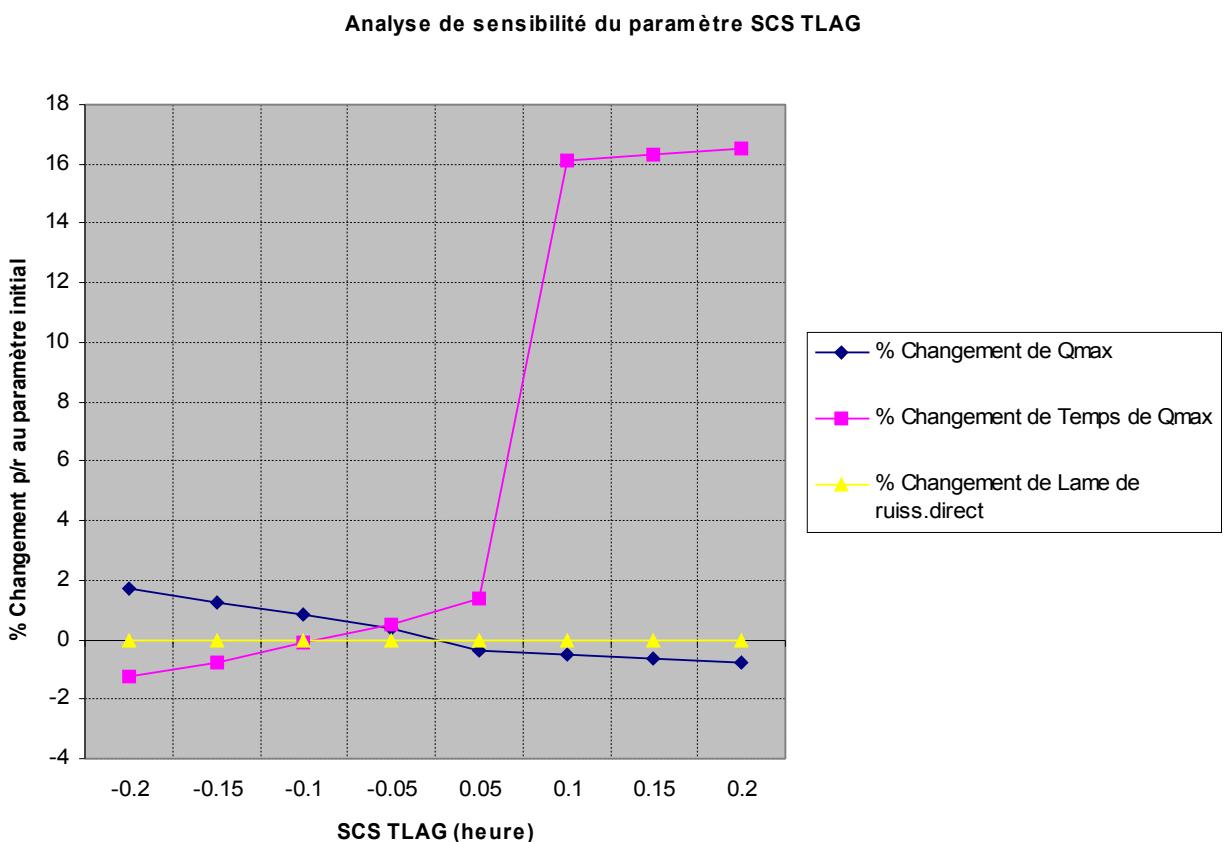
On peut dire donc que le paramètre SCS Curve Number est très sensible pour le modèle.

**Tableau N°23 : Analyse de sensibilité du paramètre SCS T Lag**

Conditions initiales : MB1 : SCS TLAG =2,514, Qmax = 155,65m<sup>3</sup>/s  
 MB2 : SCS TLAG =0,996, lame de ruiss.Direct =73,1mm  
 MB3 : SCS TLAG =3,432, Temps Qmax = 15,22heures  
 MB4 : SCS TLAG =1,824,  
 MB5: SCS TLAG =1,926,  
 MB6 : SCS TLAG =0,528.

SCS T Lag (h)	Qmax (m <sup>3</sup> /s)	% changement p/r aux cond. initiales	Temps Qmax (heures)	% changement p/r aux cond. initiales	Lame de ruissellemen t direct(mm)	% changement p/r aux cond. initiales
-0,20	158,32	+1,72	15,03	-1,25	73,1	0
-0,15	157,61	+1,26	15,10	-0,79	73,1	0
-0,10	156,94	+0,83	15,20	-0,13	73,1	0
-0,05	156,28	+0,40	15,30	+0,53	73,1	0
+0,05	155,04	-0,39	15,43	+1,38	73,1	0
+0,10	154,83	-0,53	17,67	+16,10	73,1	0
+0,15	154,65	-0,64	17,70	+16,29	73,1	0
+0,20	154,48	-0,75	17,73	+16,49	73,1	0

**Figure N°35 :** Graphique montrant la variation des caractéristiques de l'hydrogramme par rapport à la variation du paramètre SCS TLAG du modèle



**Commentaire :**

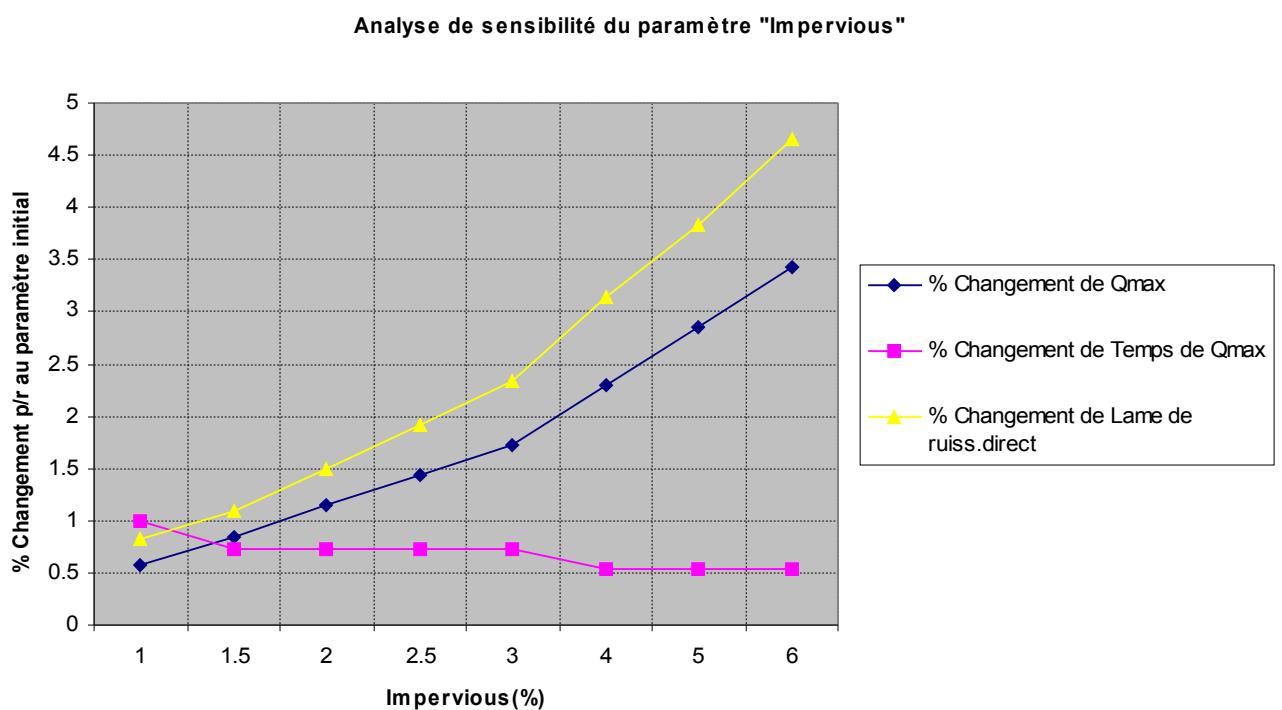
Le changement du SCS Tlag n'influe pas sur la lame de ruissellement direct. Il intervient sur le Temps de Qmax. C'est normal parce que SCS Tlag est proportionnel au temps de concentration Tc.

**Tableau N°24 : Analyse de sensibilité du paramètre ‘Impervious’ (imperméabilité)**

Conditions initiales : MB1 : % Impervious =0,0 Qmax = 155,65 m<sup>3</sup>/s  
 MB2 : % Impervious =0,0 lame de ruiss.Direct =73,1mm  
 MB3 : % Impervious =0,0 Temps Qmax = 15,22heures  
 MB4 : % Impervious =0,0  
 MB5: % Impervious =0,0  
 MB6 : % Impervious =0,0.

Impervious (%)	Qmax (m <sup>3</sup> /s)	% changement p/r aux cond. initiales	Temps Qmax (heures)	% changement p/r aux cond. initiales	Lame de ruissellement direct(mm)	% changement p/r aux cond. initiales
1,0	156,54	+0,57	15,37	+0,99	73,7	+0,82
1,5	156,98	+0,85	15,33	+0,72	73,9	+1,09
2,0	157,43	+1,14	15,33	+0,72	74,2	+1,50
2,5	157,87	+1,43	15,33	+0,72	74,5	+1,92
3,0	158,32	+1,72	15,33	+0,72	74,8	+2,33
4	159,21	+2,29	15,30	+0,53	75,4	+3,15
5	160,10	+2,86	15,30	+0,53	75,9	+3,83
6	160,99	+3,43	15,30	+0,53	76,5	+4,65

**Figure N°36 :** Graphique montrant la variation des caractéristiques de l'hydrogramme par rapport à la variation du paramètre **Impervious** du modèle



#### Commentaire :

Le débit maximal et la lame de ruissellement direct augmentent en fonction de l'imperméabilité (Impervious). Inversement, lorsque l'imperméabilité augmente alors le temps de Qmax diminue car la vitesse d'écoulement augmente.

**Tableau N°25** : Analyse de sensibilité du paramètre ‘Initial Loss’ (perte initiale)

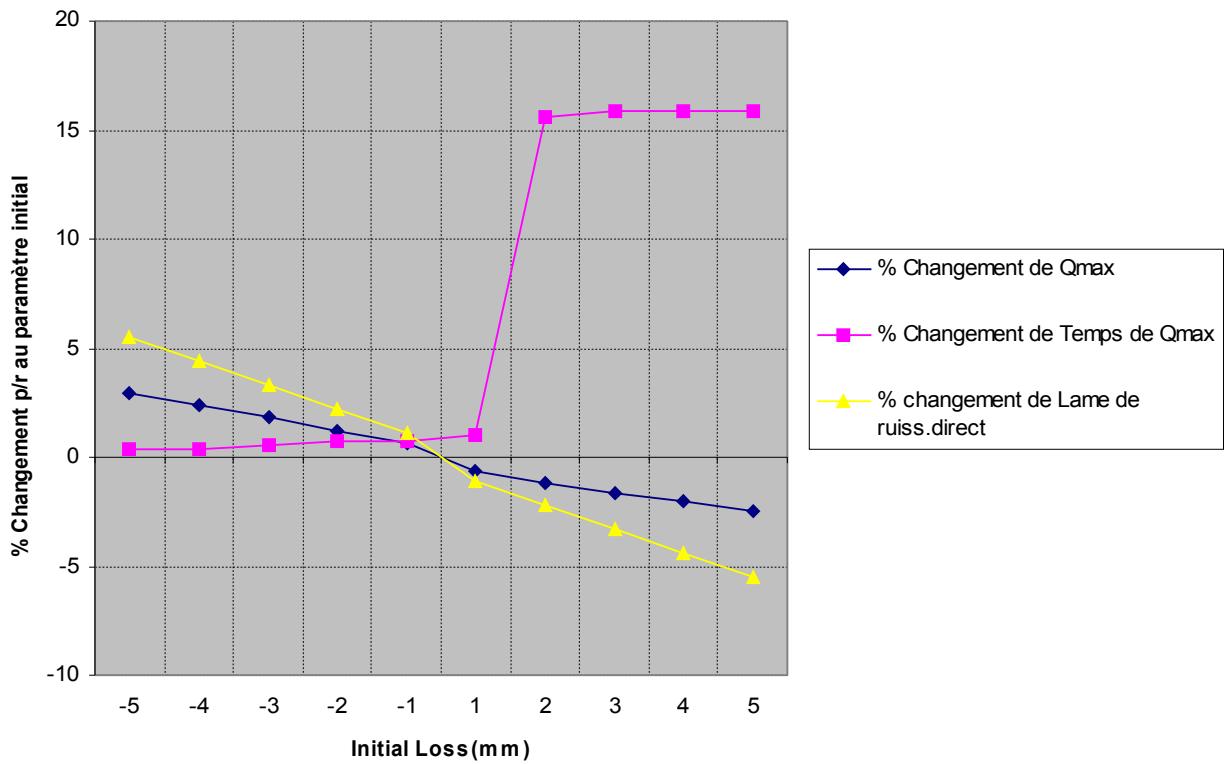
Conditions initiales : MB1 : Initial Loss =5    Qmax = 155,65m<sup>3</sup>/s  
 MB2 : Initial Loss =5    lame de ruiss.Direct =73,1mm  
 MB3 : Initial Loss =5    Temps Qmax = 15,22heures  
 MB4 : Initial Loss =5  
 MB5: Initial Loss =5  
 MB6 : Initial Loss =5.

Imperviou s (%)	Qmax (m <sup>3</sup> /s)	% changemen t p/r aux cond. initiales	Temps Qmax (heures )	% changemen t p/r aux cond. initiales	Lame de ruissellemen t direct(mm)	% changemen t p/r aux cond. initiales
-5	160,2 7	+2,97	15,27	+0,33	77,10	+5,47
-4	159,3 7	+2,39	15,27	+0,33	76,30	+4,38
-3	158,4 7	+1,81	15,30	+0,53	75,50	+3,28
-2	157,5 4	+1,21	15,33	+0,72	74,70	+2,19
-1	156,6 0	+0,61	15,33	+0,72	73,90	+1,09
+1	154,6 8	-0,62	15,37	+0,99	72,30	-1,09
+2	153,7	-1,19	17,60	+15,64	71,50	-2,19

	9					
+3	153,1 2	-1,63	17,63	+15,83	70,70	-3,28
+4	152,4 5	-2,06	17,63	+15,83	69,90	-4,38
+5	151,7 6	-2,50	17,63	+15,83	69,10	-5,47

**Figure N°37 :** Graphique montrant la variation des caractéristiques de l'hydrogramme par rapport à la variation du paramètre **Initial Loss** du modèle

### Analyse de sensibilité du paramètre "Initial Loss"



### Commentaire :

Quand la perte initiale (Initial Loss) diminue, le débit maximal et la lame de ruissellement direct augmentent. Inversement, quand cette perte augmente alors ces deux paramètres diminuent.

## CONCLUSIONS GENERALES

La rivière Mamba est l'un des éléments constitutifs du réseau hydrographique de la plaine d'Antananarivo. Cependant, les données sur son fonctionnement de crue sont peu nombreuses, voire inexistantes.

La modélisation conduite dans le cadre de cette étude avec le système HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) a permis d'appréhender l'hydrogramme d'une crue cinquantennale à l'entrée de la plaine d'Antananarivo, au pont de Sabotsy Namehana sur la RN3.

La connaissance de l'hydrogramme de crue est particulièrement importante pour la protection contre les crues et les inondations de la plaine et de la ville d'Antananarivo.

Dans cette perspective, les résultats de cette étude permettront notamment d'affiner la modélisation hydraulique de l'écoulement des crues de l'IKOPA dans la plaine d'Antananarivo.

Concernant le débit de pointe, les résultats de la modélisation concordent bien avec les résultats fournis par les méthodes classiques (Méthode rationnelle et la formule de Louis DURET).

Cette étude démontre également l'intérêt d'une modélisation hydrologique dans le cas d'une rivière pour laquelle les données observées sont très limitées.

L'absence de données d'observation n'a pas permis de procéder au calage du modèle établi. Une suite naturelle à cette étude consisterait donc à rassembler des données d'observations sur les crues de la Mamba afin d'améliorer la réponse du modèle hydrologique.

A noter que, l'extension envisagée du système d'annonce de crue de l'IKOPA au sein de la Mamba permettrait de fournir des données pluviométriques et hydrauliques intéressantes, pouvant servir au calage du modèle hydrologique.

## ANNEXE 01

Choix de SCS Curve Number pour un terrain agricole :

Description de la couverture		SCS Curve Number pour chaque groupe de sol			
Types de la couverture et condition hydrologique	Condition hydrologique	A	B	C	D
Pâture, Pelouse , gazons, fourrager	Faible	68	79	86	89
	Moyenne	49	69	79	84
	Bonne	39	61	74	80
Prairie , terrain protégé contre le pâturage		30	58	71	78
Brousse et mauvaise herbe	Faible	48	67	77	83
	Moyenne	35	56	70	77
	Bonne	30	48	65	73
Bois et pelouse, gazon	Faible	57	73	82	86
	Moyenne	43	65	76	82
	Bonne	32	58	72	79
Forêt dense	Faible	45	66	77	83
	Moyenne	36	60	73	79
	Bonne	30	55	70	77
Ferme, bâtiment, chaussée de route, cour		59	74	82	86

Choix de SCS Curve Number pour un terrain urbanisé :

Description de la couverture	SCS Curve Number
------------------------------	------------------

Types de la couverture et condition hydrologique	% moyen de la région	A	B	C	D
Espace ouverte ( Park, pelouse, terrain de golf, cimetière) avec une couverture d'herbe à moins de 50%		68	79	86	89
Espace ouverte ( Park, pelouse, terrain de golf, cimetière) avec une couverture d'herbe entre 50 à 75 %		49	69	79	84
Espace ouverte ( Park, pelouse, terrain de golf, cimetière) avec une couverture d'herbe plus de 75%		39	61	74	80
Terrain imperméable : toiture, pavé(serré)		98	98	98	98
Pavé avec ouverture		83	89	92	93
Gravier,		76	85	89	91
Chemin en terre		72	82	87	89
Zone commerciale	85	89	92	94	95
Zone résidentielle	38	61	75	83	87
Zone industrielle	72	81	88	91	93
Zone suburbaine		77	86	91	94

Groupe de sol :

**A** :sable profond, limon des plateaux(loess) ,limon,

**B** : limon peu profond, terre sablonneux,

**C** : terre argileux, terre argileux peu profonde, sol contenant des matières organiques,

**D** : sol gonflable quand humide, argile plastique, sol salin

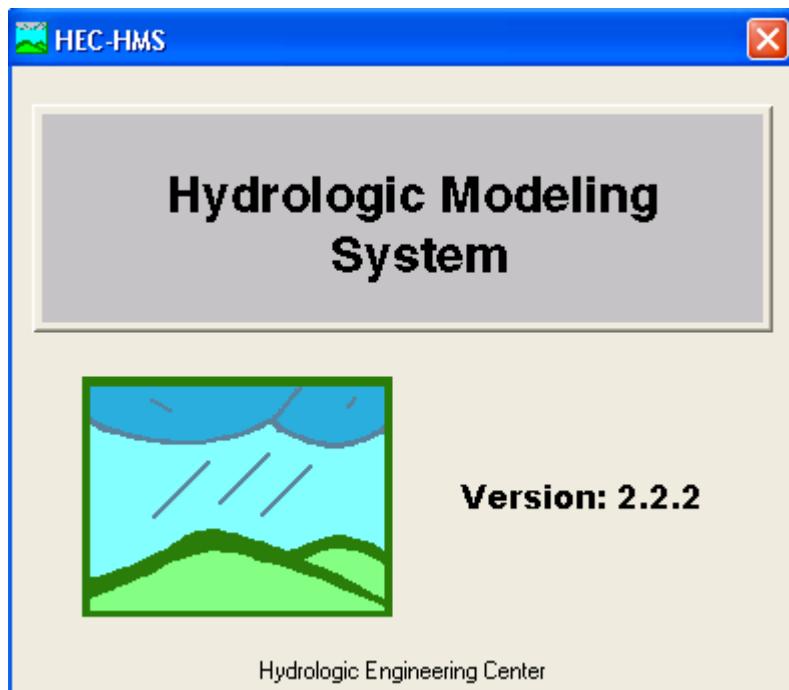
[source : SCS, Skaggs and Khaleel ; 1986 ]

## ANNEXE 02

## Démarrage d'un nouveau projet avec HEC-HMS :

Le démarrage d'une session HEC-HMS se fait en double cliquant sur l'icône HEC-HMS :  HEC-HMS 2.2.2

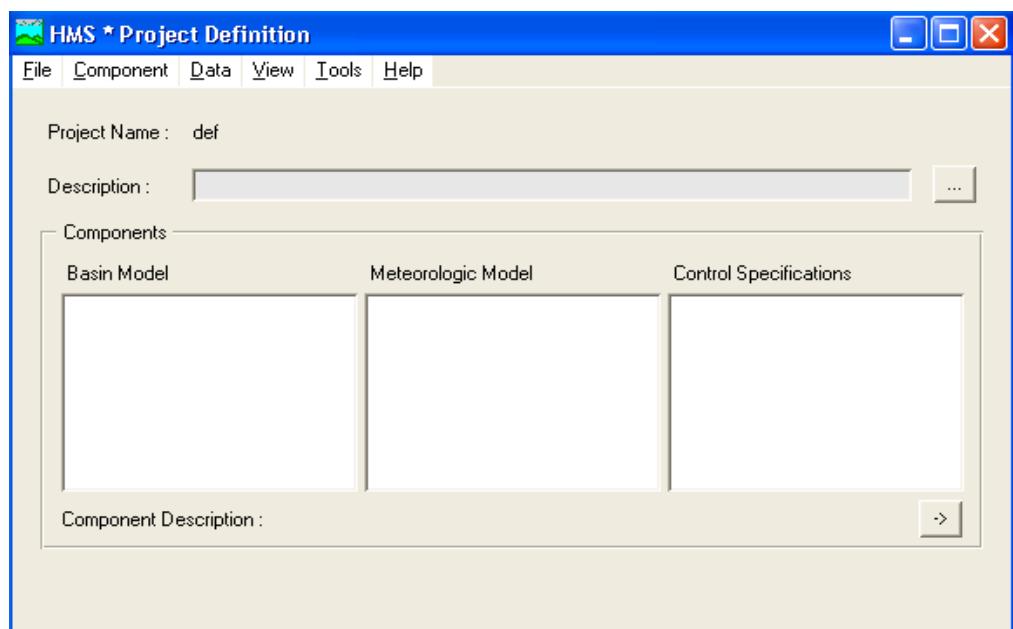
La figure suivante apparaîsse sur l'écran :



La fenêtre qui apparaît porte le nom de '**Project Definition**'.

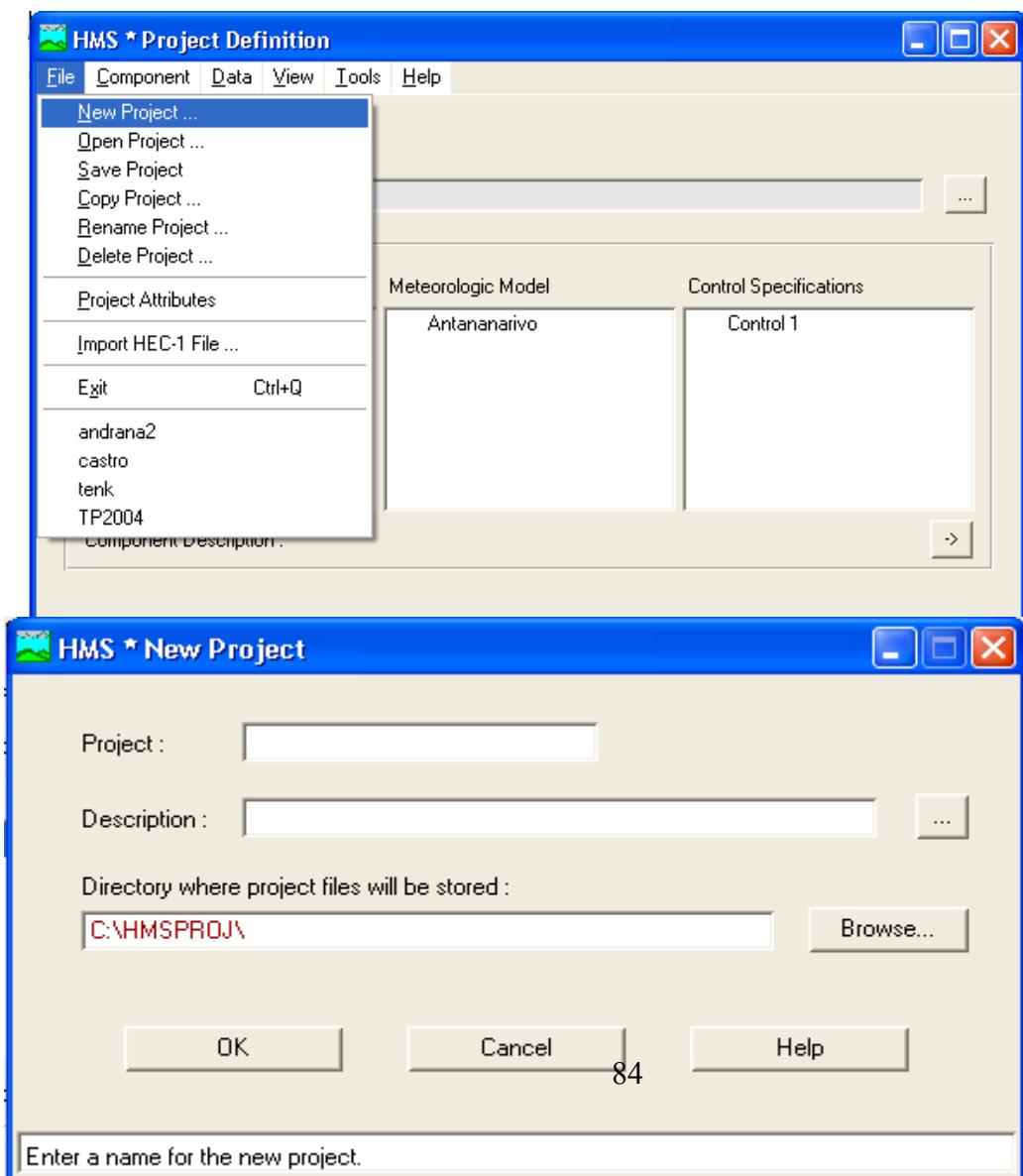
Cette fenêtre nous permet d'ouvrir un projet déjà existant sur le HEC-HMS ou de créer un nouveau projet grâce au menu **File** des barres d'outils.

Si par exemple nous voulons créer un nouveau projet nommé « Mamba », les étapes à suivre sont les suivants :



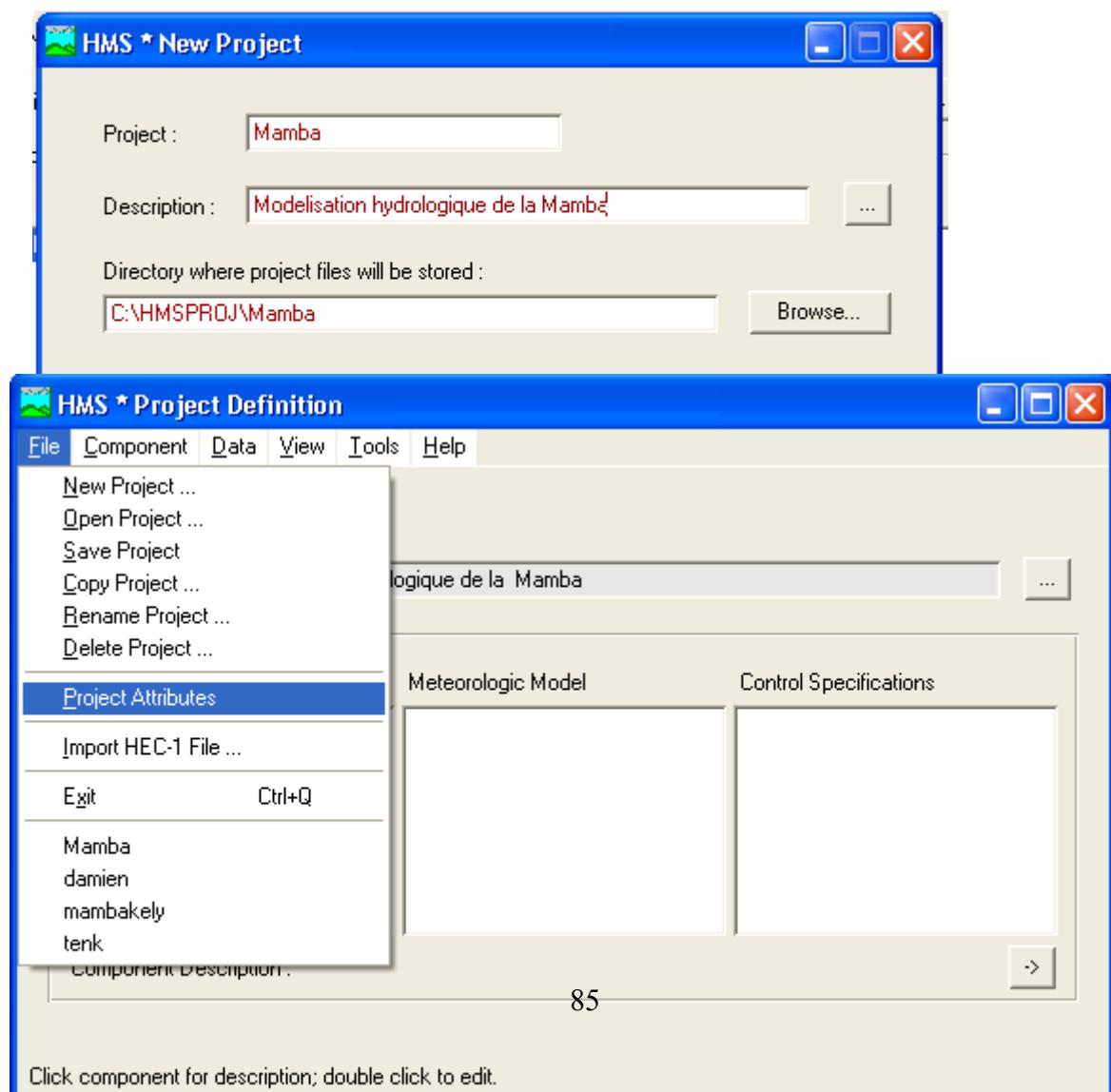
Il faut d'abord définir le projet, comme il s'agit de nouveau projet donc :

- Dans le menu **File**, sélectionner **New Project**.



- Dans la fenêtre **New Project**, valider le nom du répertoire dans lequel tous les fichiers créés par HEC-HMS seront sauvegardés. Par la suite, entrer le nom du projet ainsi qu'une courte description. Il est préférable de ne pas utiliser les accents et les caractères spéciaux.

Appuyer sur **OK** lorsqu'on a terminé, la figure suivante réapparaîsse :

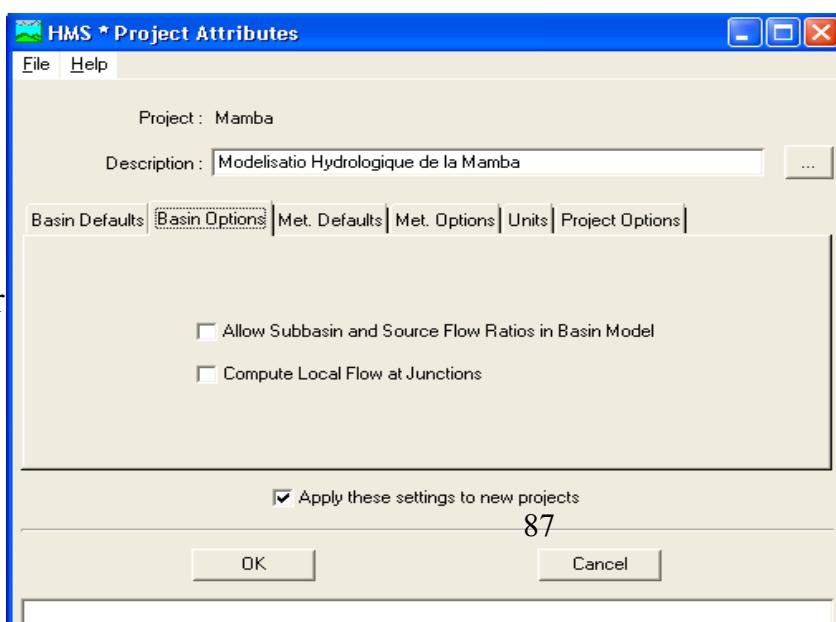
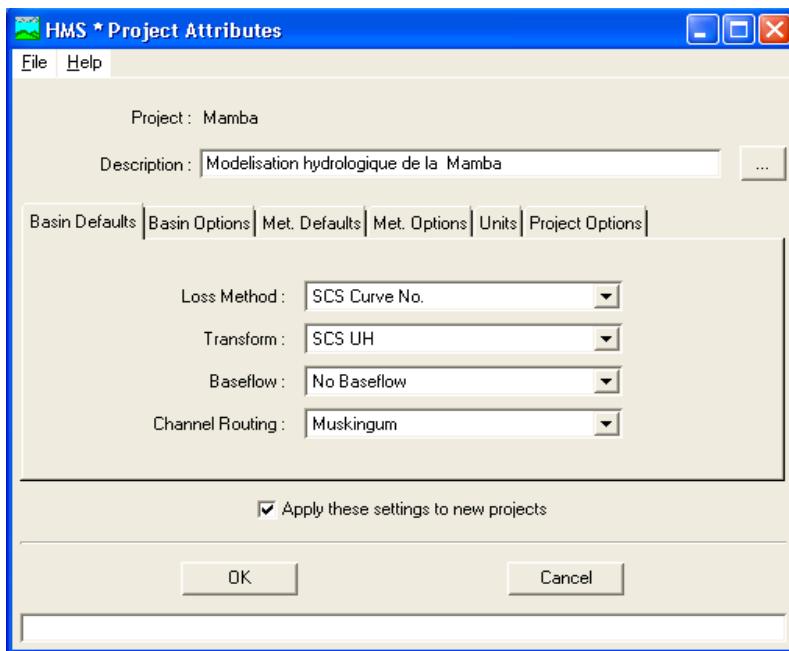


C'est pour attribuer les paramètres que le modèle va utiliser durant toute la simulation. C'est ici qu'on choisit les méthodes de calcul pour les pluies nettes, la transformation de la pluie nette en hydrogramme de crue ou le laminage en rivière, les paramètres sur la pluviométrie,...etc.

Prenons par exemple le cas suivant pour notre nouveau projet :

Pour l'onglet **Basin Defaults**, choisir les options suivantes :

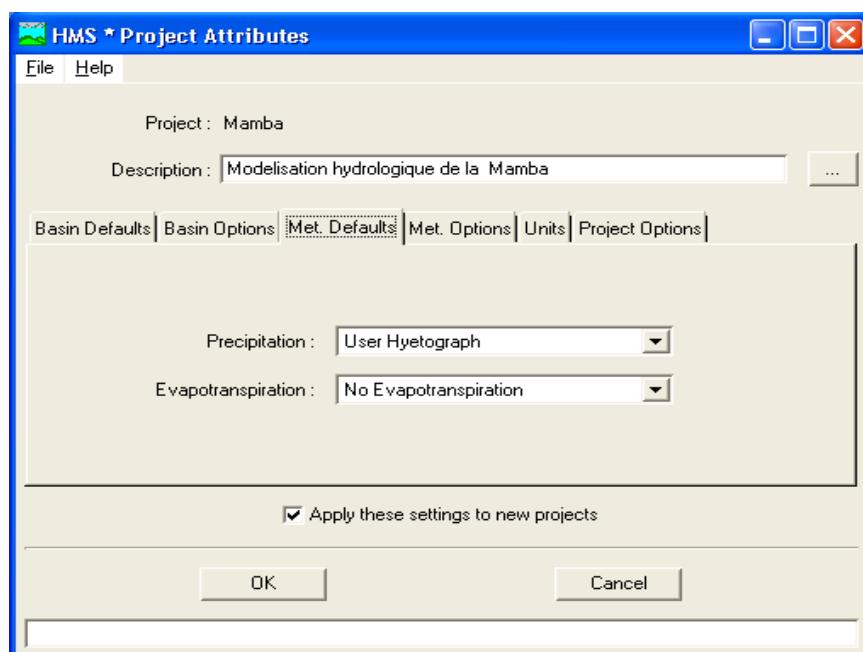
- Loss method : SCS Curve No.(le calcul de l'eau '*produite*' ou la '*pluie nette*') ;
- Transform : SCS U.H (la transformation de la pluie nette en eau '*transférée*' à l'exutoire du bassin avec la méthode de l'hydrogramme unitaire de SCS) ;
- Baseflow : No Baseflow (on ne tient pas compte de l'écoulement de base) ;
- Channel Routing : Muskingum (le laminage en rivière par la méthode Muskingum dont le principe de base est déjà cité plus haut) ;



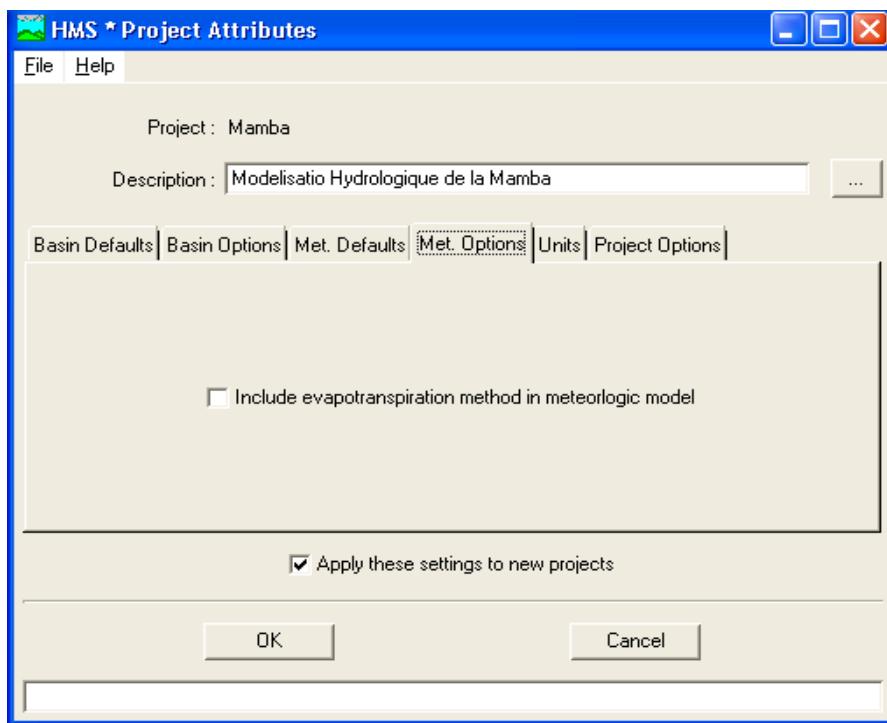
Pour

Pour l'onglet **Meteorological Defaults**, choisir les options suivantes :

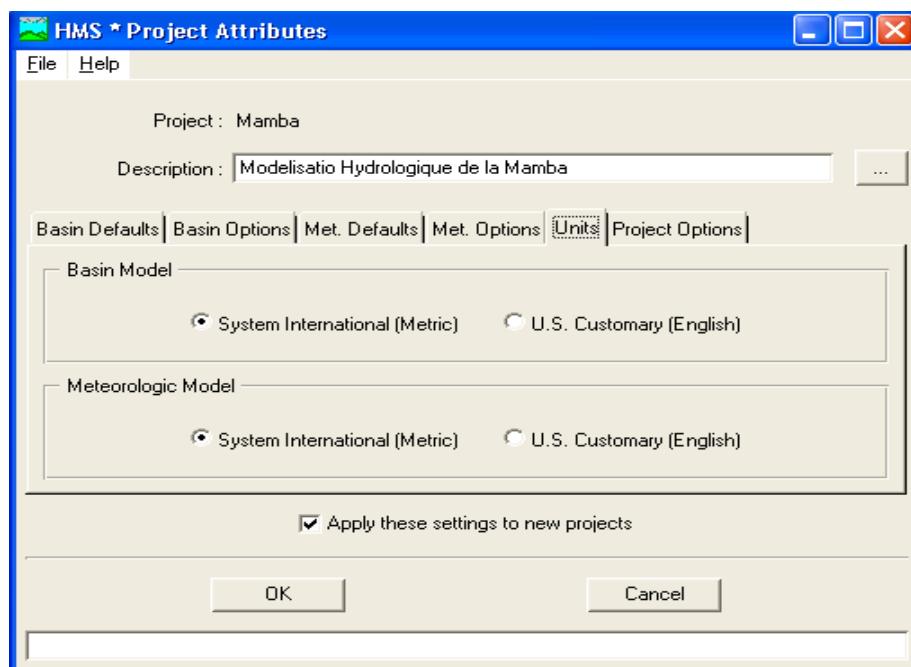
- Precipitation : User hyetograph
- Evapotranspiration : No evapotranspiration



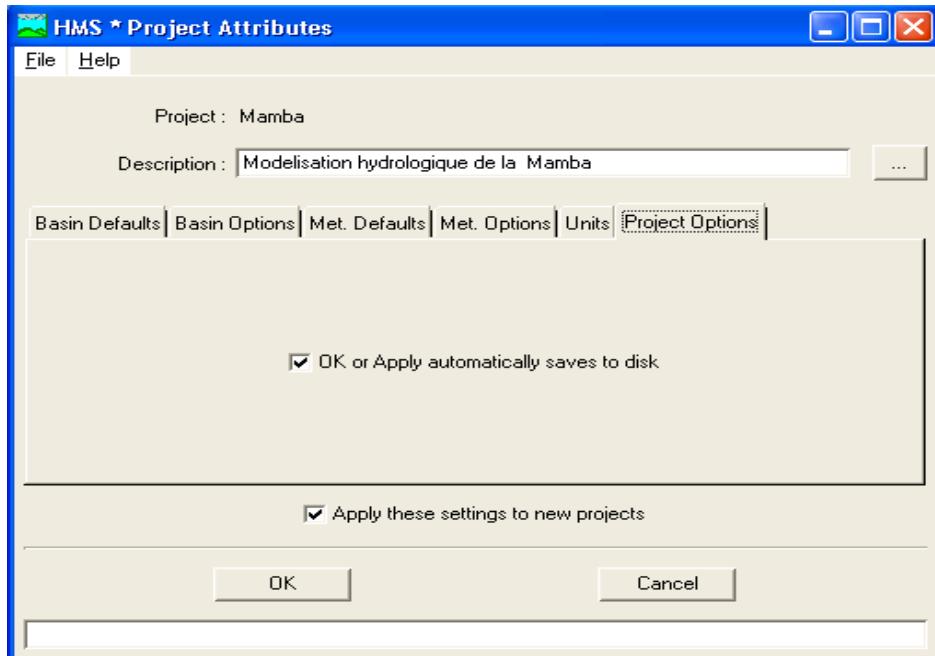
Pour l'onglet **Meteorological Options**, la case **Include Evapotranspiration** ne doit pas être cochée.



Dans l'onglet **Units**, on choisit l'unité à utiliser, pour notre exemple cocher les deux cases **System International (Metric)**



Dans l'onglet **Project Options**, cocher **OK/Apply automatically saves to disk**. Cocher ensuite **Apply these settings to new projects** et finalement appuyer sur le bouton **OK** au bas pour sortir de la fenêtre.

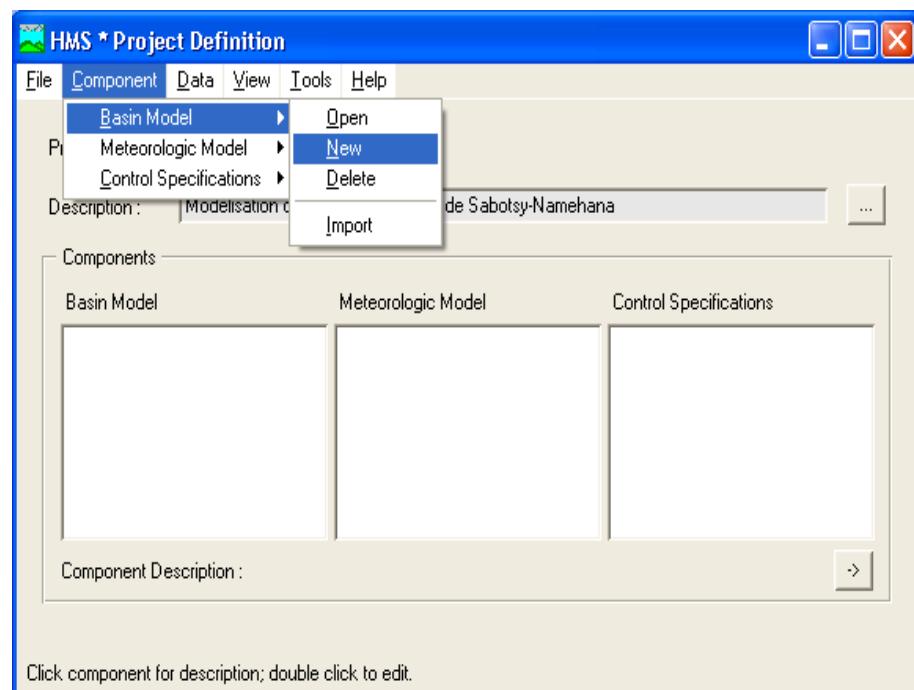


Ces divers éléments définissant le contenu de **Project Attributes** ne doivent être spécifiés que lors de la création d'un nouveau projet.  
Tous les travaux effectués sur ce nouveau projet seront sauvegardés automatiquement sur le disque dur ( dans notre cas, ils seront sauvegardés dans : C:\ HMSPROJ\Mamba)

## ANNEXE 03

Définition du modèle de bassin versant :

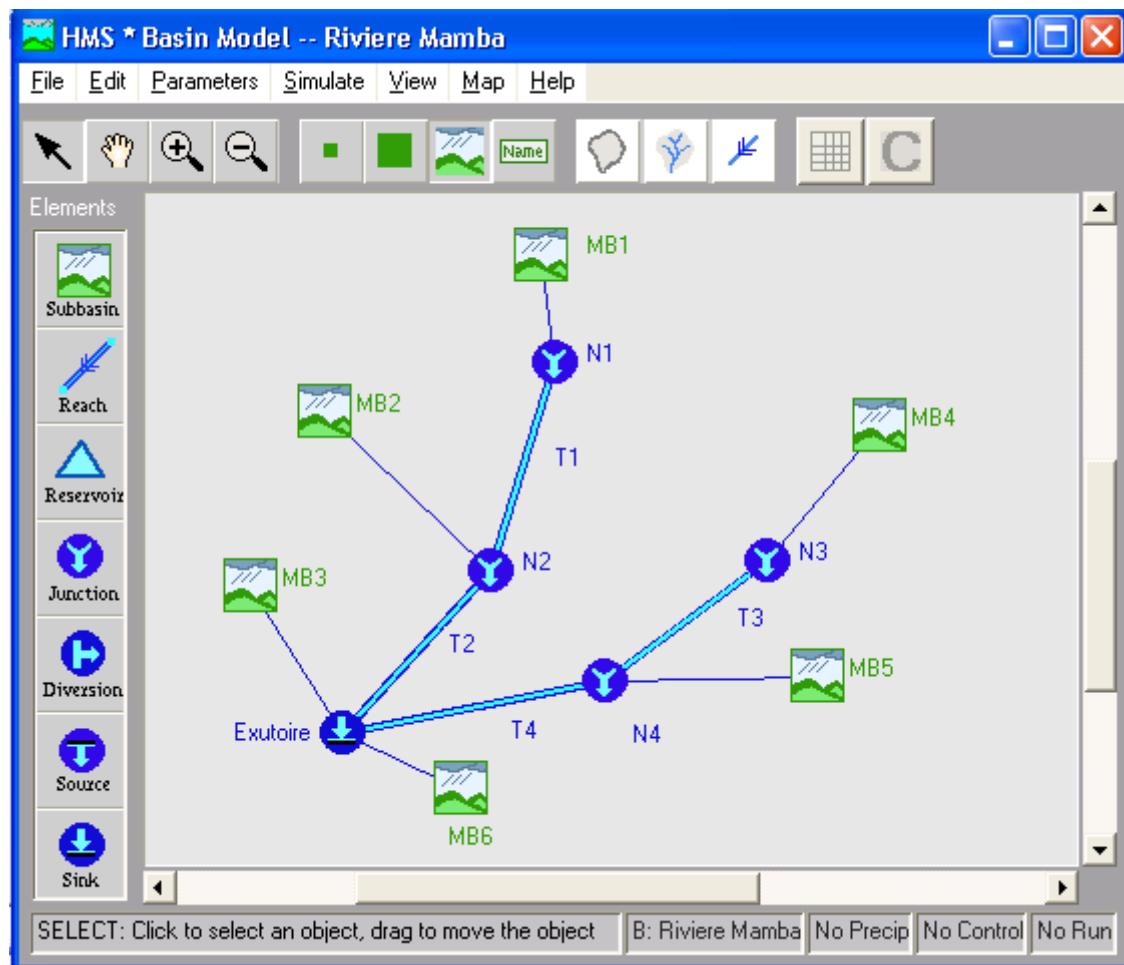
Dans la fenêtre **Project Definition**, cliquer sur **Component, Basin Model, New**.



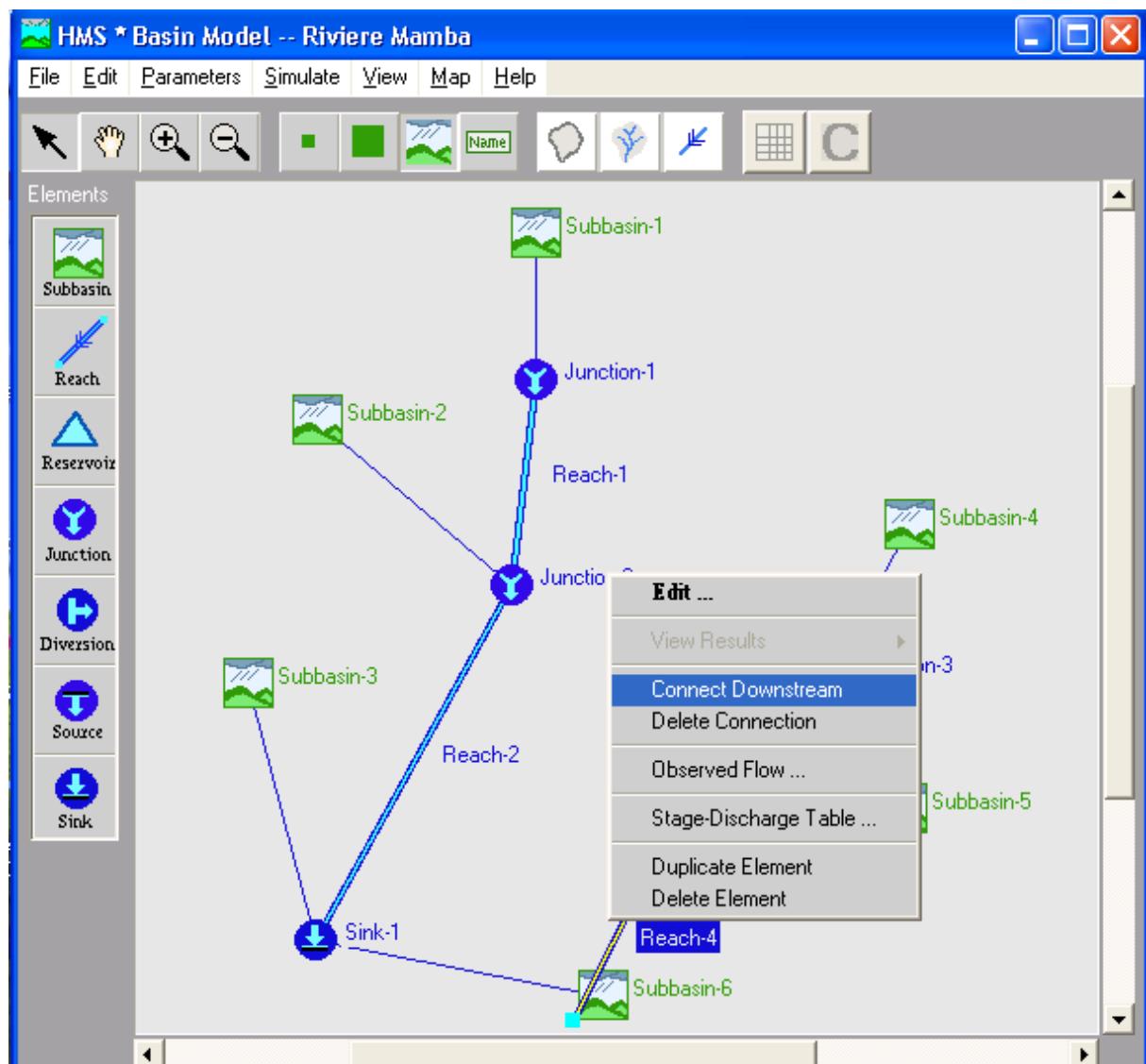
Une fenêtre **New Basin Model** apparaîtra. Donner le nom du bassin (**Riviere Mamba** par exemple) et une courte description. Cliquer sur **OK**.



Une fenêtre **Basin Model** apparaîtra. Dans cette fenêtre, il faudra incorporer les 6 sous-bassins comprenant le bassin versant de la rivière Mamba, des jonctions ainsi que les tronçons de rivière (reach). Afin d'avoir un repère visuel pour la construction du modèle de bassin, on peut inclure une carte en arrière plan. Pour ce faire, on entre dans le menu **File** à l'item **Basin Model Attributes**. Dans l'onglet **Files** de cette fenêtre, il y a un item prévu pour **Map File**. On clique sur **Browse** et on cherche le fichier Mamba.map à l'endroit où il a été copié dans le répertoire du projet, sur le disque local ou autre.

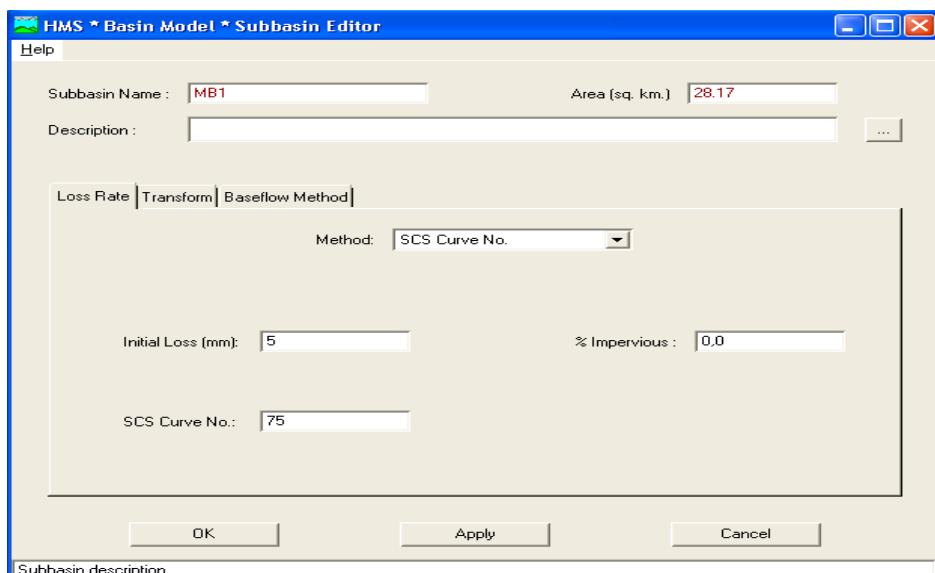


L'approche générale pour construire le modèle de bassin versant consiste à cliquer sur l'icône approprié en bordure de la fenêtre et à amener cet icône dans la zone principale avec l'aide de la souris. Par la suite, il faut apporter une attention particulière à relier ces divers éléments ensemble. Ceci se fait sélectionnant un élément, en appuyant sur le bouton droit de la souris pour obtenir un menu contextuel et choisir alors **Connect downstream** (ce qui signifie que l'on doit spécifier quel est l'élément qui se trouve en aval qui recevra les eaux de cet élément). Le curseur de la souris change de forme pour nous permettre de sélectionner l'élément en aval. Un trait reliant les éléments apparaîtra pour montrer que l'opération a réussi. Une fois le schéma complété, cliquer dans le menu **File** et sur **Save Basin Model**.

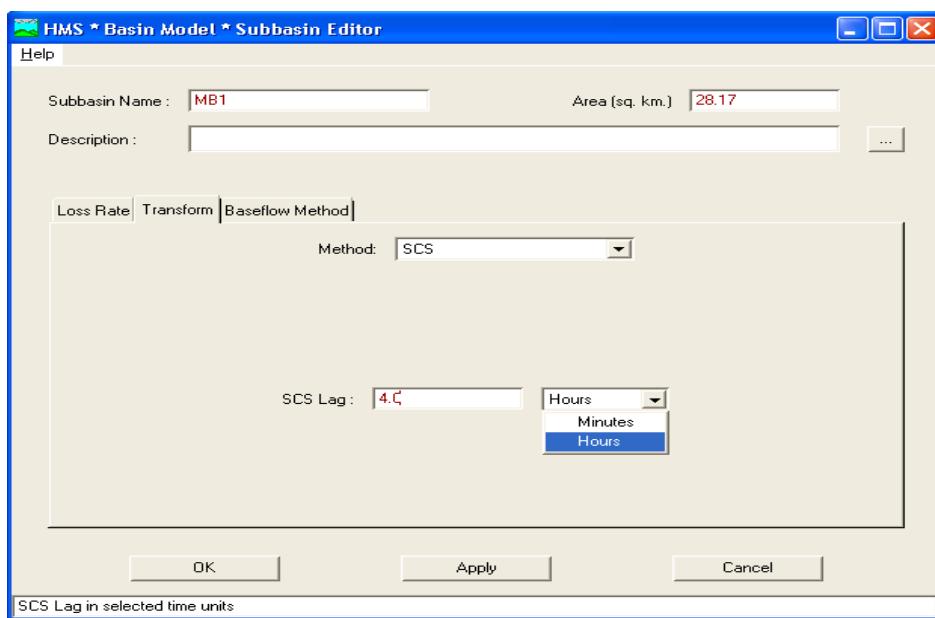


Les paramètres propres à chaque sous-bassin et au tronçon de rivière sont incorporés en double-cliquant sur l'icône correspondant à l'élément choisi. On peut également entrer les paramètres d'une autre façon, en procédant par élément du cycle hydrologique en cliquant sur **Parameters**. Les figures suivantes nous montrent comment faire entrer ces paramètres :

Dans l'onglet 'Loss Rate' on choisit la méthode de calcul de l'eau produite , ou la pluie nette



Dans l'onglet 'Transform' on choisit la méthode de transformation de la pluie nette en 'eau transférée'



Les paramètres qui seront incorporés aux éléments du modèle de bassin sont les suivants :

Données des sous bassins :

Nom	Superficie (km <sup>2</sup> )	Loss method			SCS T lag (h) [2]
		Initial loss (mm)	% imperméabilité	SCS Curve Number[1]	
MB1	28,17	5	0	70	2,514
MB2	8,09	5	0	75	0,996
MB3	5,79	5	0	70	3,432
MB4	22,18	5	0	52	1,824
MB5	26,25	5	0	90	1,926
MB6	3,49	5	0	90	0,528

[1] Estimé à partir de l'annexe N°01;

[2]  $T_{lag} \approx 0,6 \times T_c$

Données de tronçons :

Nom	V(m/s)	L(m)	Coefficient K (h) [3]	Coefficient X [4]	Nombre de reaches [5]
T1	2,0	900	0,125	0,2	4
T2	1,5	1100	0,204	0,2	6
T3	2,0	900	0,125	0,2	4
T4	1,5	400	0,074	0,2	3

[3]  $K = L/V$ ,  $V$  étant la vitesse de propagation des ondes de crue sur le tronçon ;

[4] En cas de débordement, X est choisi entre 0,1 et 0,2 ;

[5] Nombre de sous – tronçons à considérer pour respecter le critère :

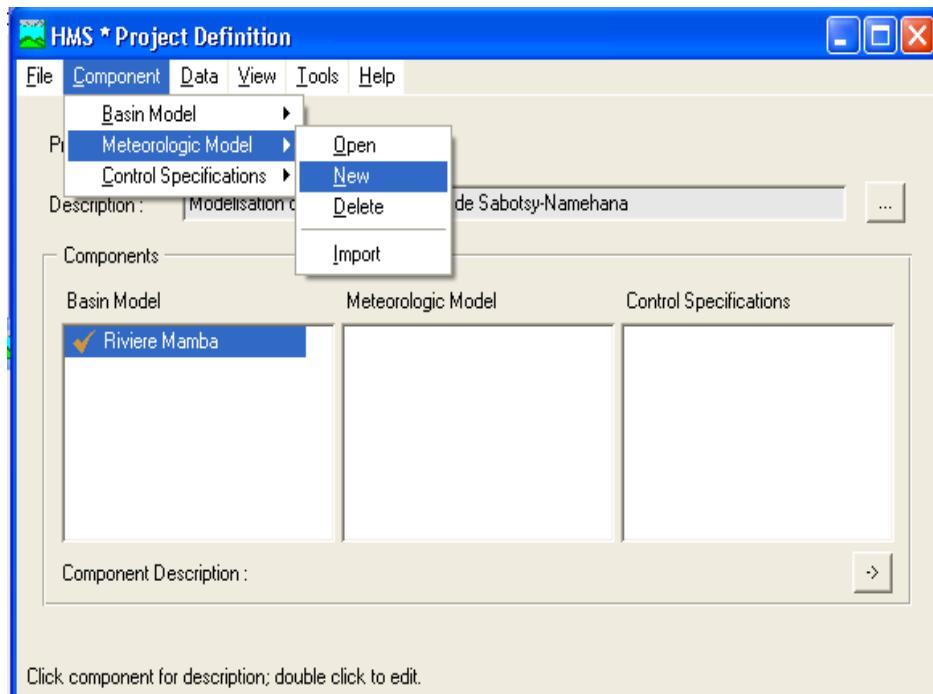
$$Nbr\_Reaches \times DT \approx K$$

DT étant le pas de temps de calcul,  
 $DT \leq 0,29 T_{lag}$ , soit  $DT = 2$  minutes.

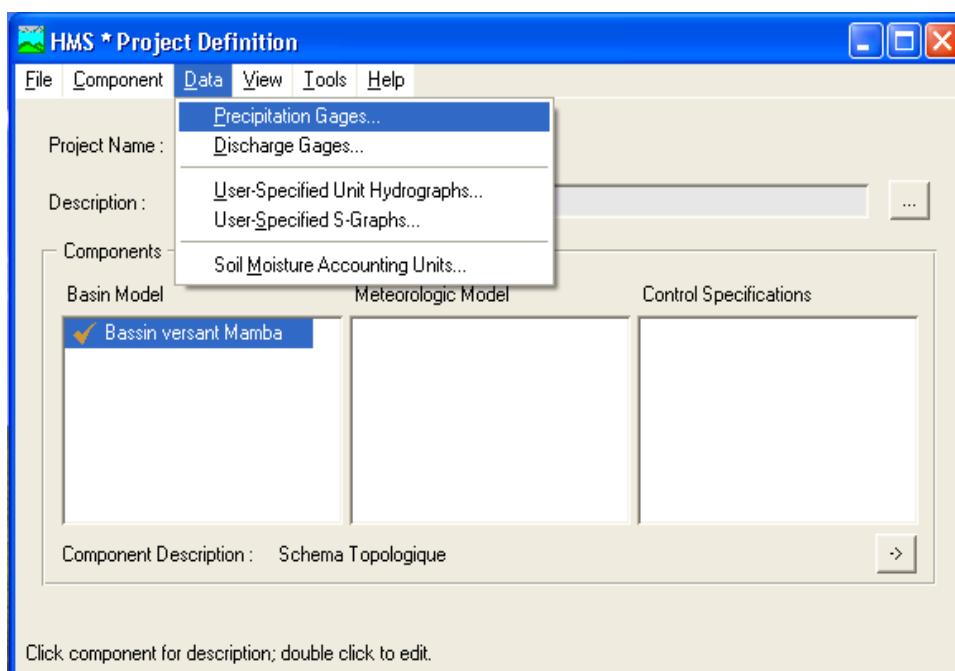
# ANNEXE 04

Définition de la station météorologique :

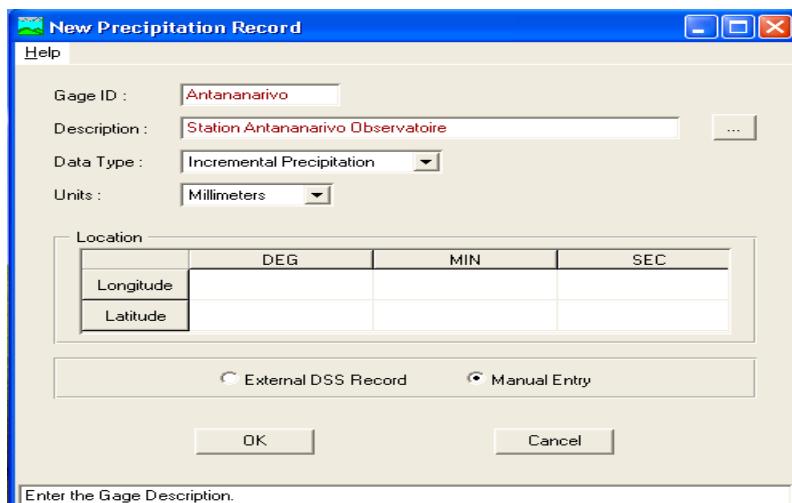
Dans la fenêtre **Project Definition**, cliquer sur **Component, Meteorologic Model, New**.



Dans la fenêtre **Project Definition**, ouvrir le menu **Data** et choisir **Precipitation Gages**.

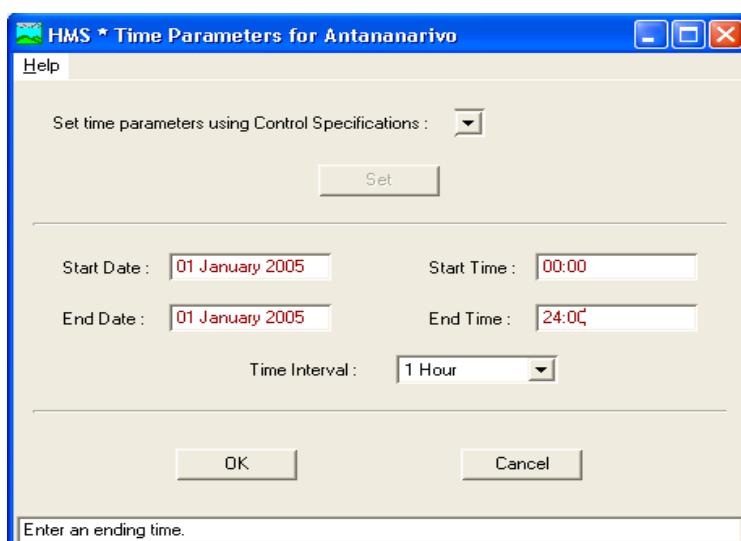


Une fenêtre **New Precipitation Record** apparaîtra. Entrer le nom de la station climatologique (Antananarivo par exemple) et une courte description. Choisir **incremental precipitation** pour le type de données et **millimiters** pour les unités de précipitation. Choisir **manual entry** car nous avons à entrer les données de précipitation de façon manuelle. Cliquer sur **OK**.



Dans la fenêtre **Time Parameters for Manual Data Entry**, entrer la date et les heures dont on a les données horaires, par exemple entrer :

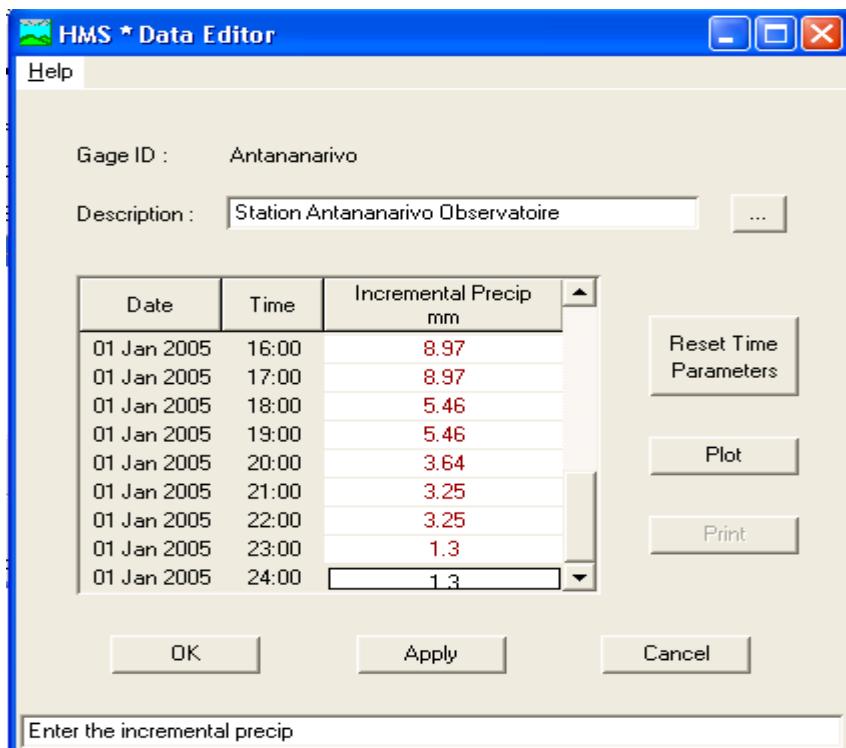
- ⇒ Start date : 01 January 2005
- ⇒ Starting time : 00:00
- ⇒ End date : 01 January 2005
- ⇒ End time : 24:00
- ⇒ Time interval : 1 hour



Cliquer sur **OK**.

Ici nous devons avoir les données horaires de la station de contrôle et la répartition de celles-ci durant les 24 heures(une journée).

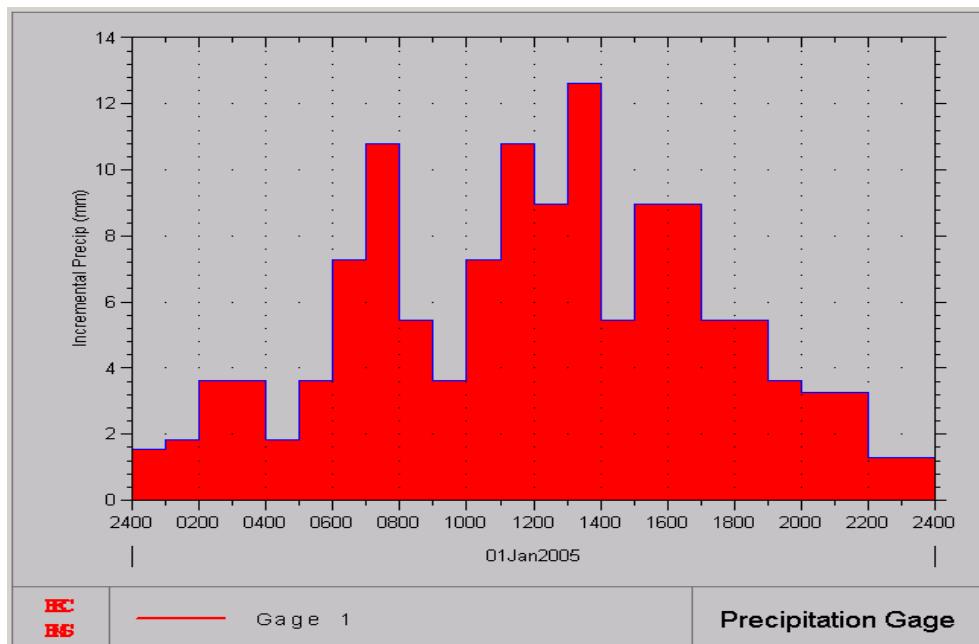
Une fenêtre d'entrée des données de précipitation apparaît. Entrer les données de précipitation horaire de la station d'Antananarivo montrées au **Tableau N°14** plus haut(page : 48)et ensuite cliquer sur **Apply**.



On peut visualiser les données entrées avec le bouton **Plot**.

Pour quitter le graphique, on appuie sur **Close**. Par la suite, on peut appuyer sur **OK** dans la fenêtre HMS Data Editor. Un sommaire apparaîtra dans la fenêtre Precipitation Gage Manager. Fermer cette fenêtre.

*Précipitation :*

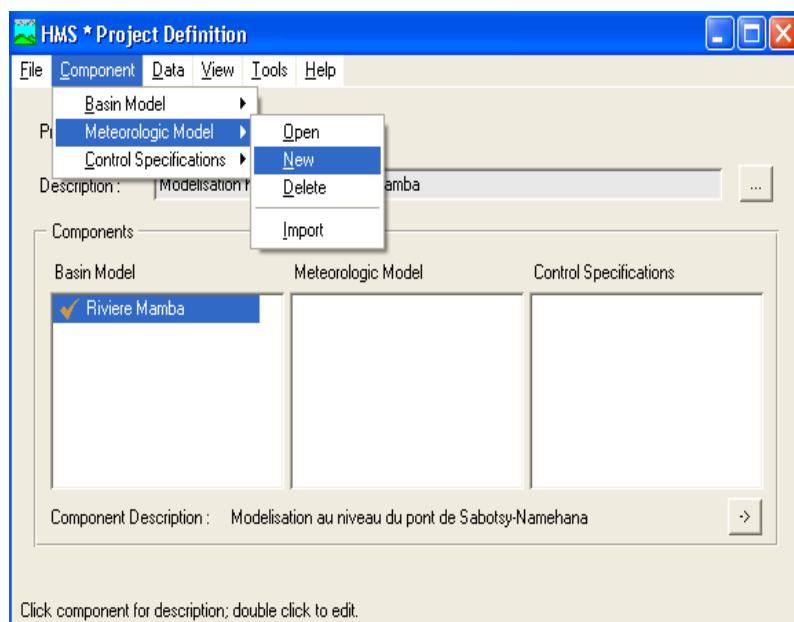


# ANNEXE 05

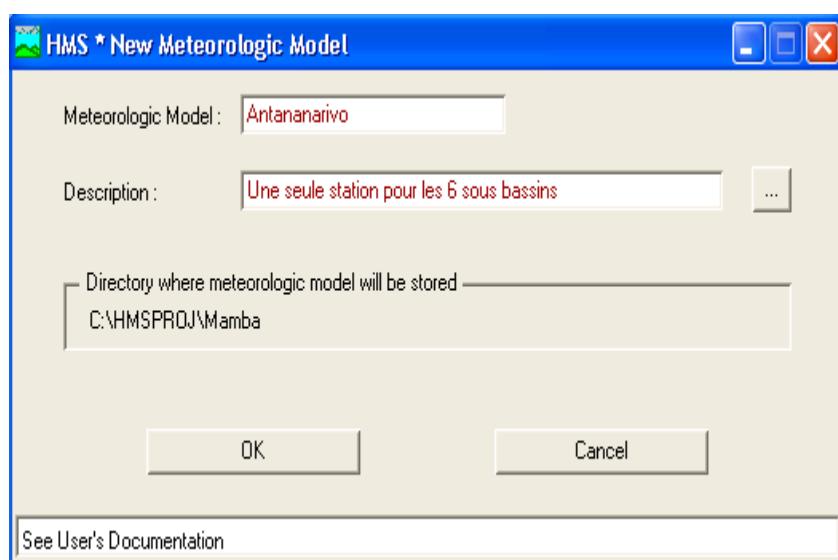
## Définition du modèle de précipitation :

Le modèle de précipitation sert à définir de quel façon sera calculée la pluie moyenne sur le bassin versant.

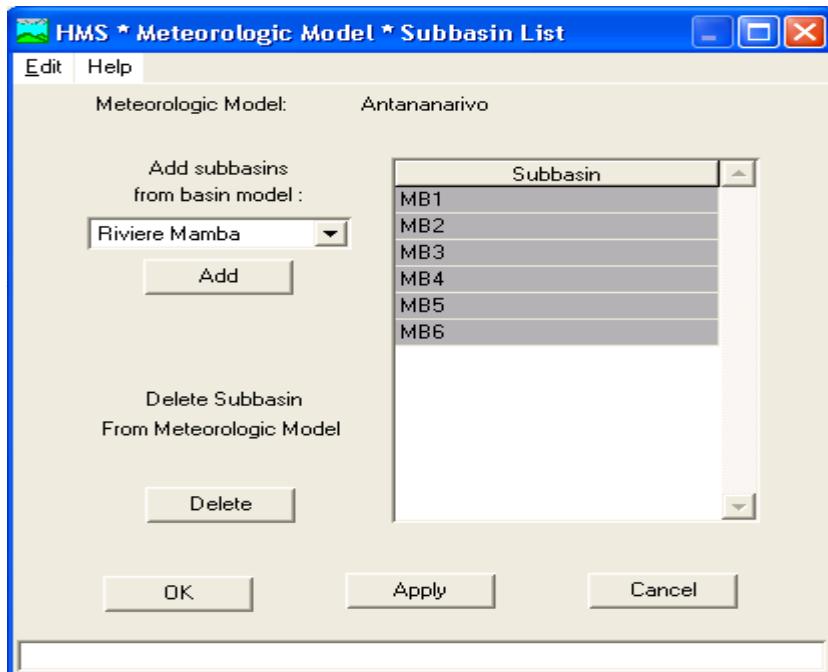
Dans la fenêtre **Project definition**, cliquer sur **Component, Meteorologic Model, New**



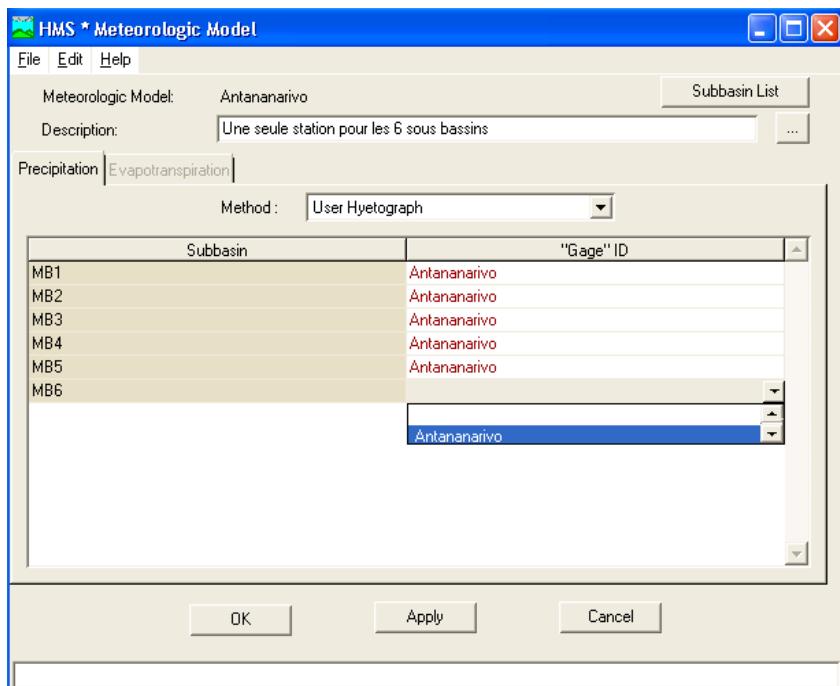
Dans la fenêtre **New meteorologic model**, donner un nom au modèle météorologique et une courte description. Cliquer sur **OK**.



Les fenêtres **Subbasin list** et **Meteorologic model** apparaissent par la suite. La fenêtre **Subbasin list**, permet de spécifier quels sont les sous-bassins à utiliser dans ce modèle de précipitation. Ajouter les sous-bassins créés pour le modèle de bassin de la rivière Mamba (**Add subbasin from basin model**) en cliquant sur **Add**. Cliquer ensuite sur **OK**. pour revenir à la fenêtre **Meteorologic Model**.



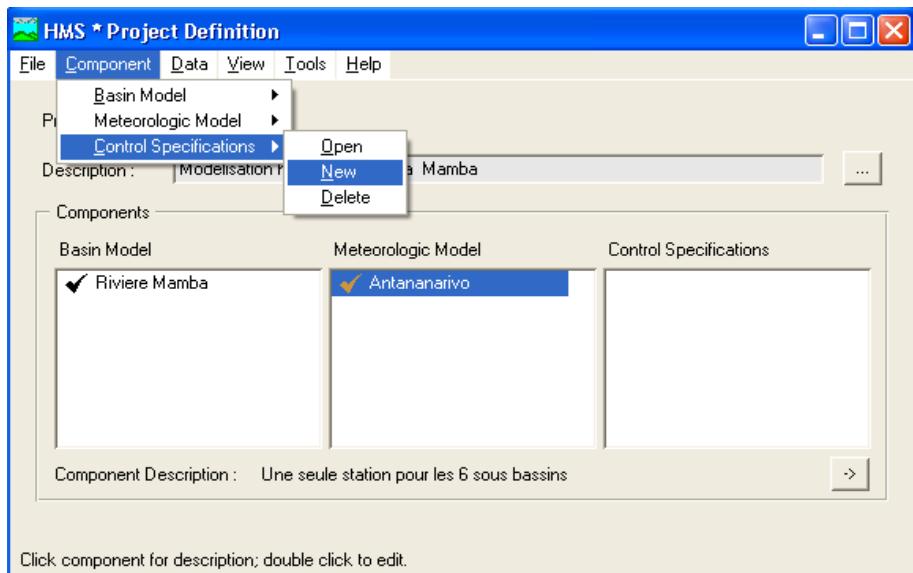
Dans la fenêtre **Meteorologic model**, choisir Method: **User Hyetograph**. Il suffit de cliquer sur la case ‘**Gage**’ID comme le montre la figure suivante :



# ANNEXE 06

Définition des paramètres de contrôle de la simulation :

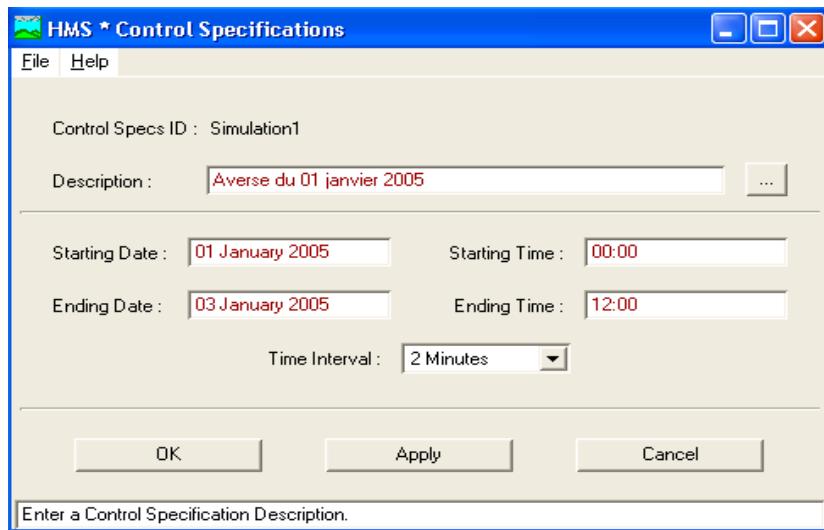
Dans la fenêtre **Project definition**, cliquer sur **Component, Control Specifications, New**.



Une fenêtre **New Control Specifications** apparaîtra. Entrer un titre (ex : 1 Janvier 05) et une courte description (ex : averse du 1 janvier 2005) pour la description de la simulation. Cliquer sur **OK**. Entrer la date et l'heure du début et de la fin de la simulation et le pas de temps de la simulation (**Time interval**). La date et l'heure du début et de la fin de la simulation n'ont pas à correspondre nécessairement aux dates et heures employées pour décrire les hyéogrammes utilisés par le modèle (à l'Annexe N°04). La période simulée se doit d'être plus longue que la précipitation étudiée, si l'on veut obtenir l'hydrogramme complet jusqu'à ce que le ruissellement cesse et qu'il ne reste plus que l'écoulement de base.

Pour notre nouveau projet, on peut faire entrer les valeurs suivantes et appuyer sur **OK** :

- Start date : 01 January 2005
- Starting time : 01:00
- End date : 03 January 2005
- End time : 12:00
- Time interval : 2 minutes



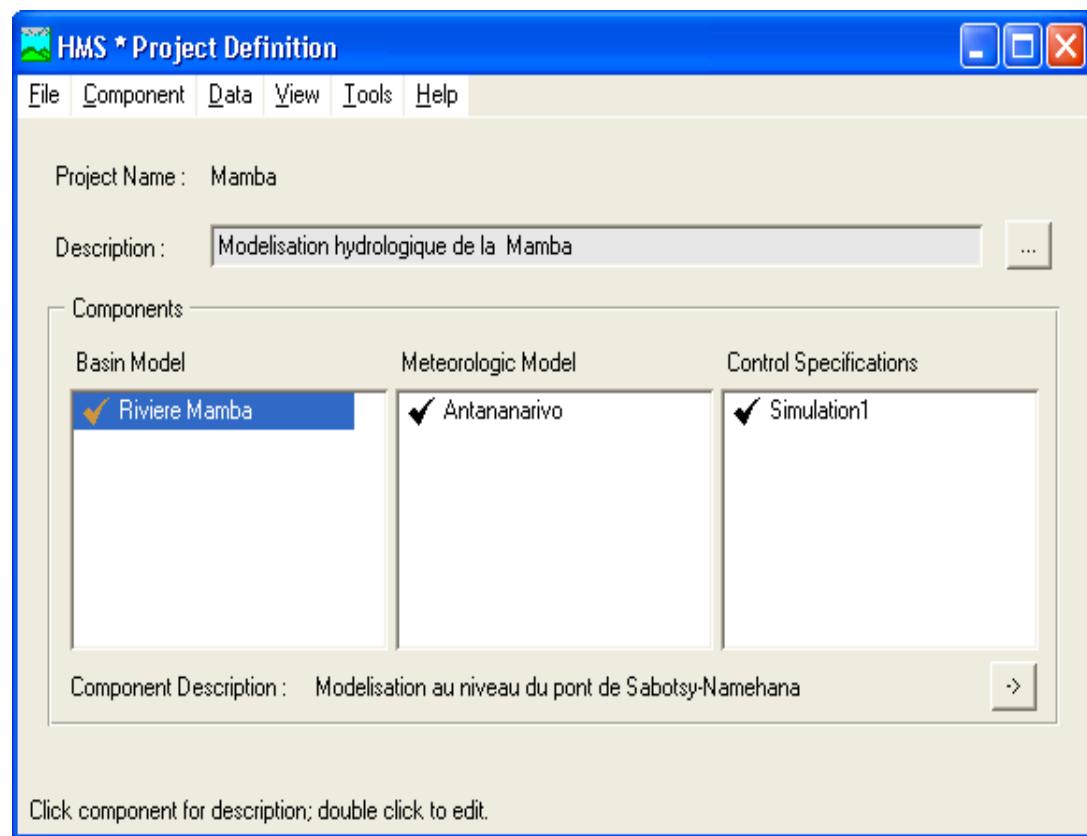
## ANNEXE 07

### Création et exécution d'une simulation :

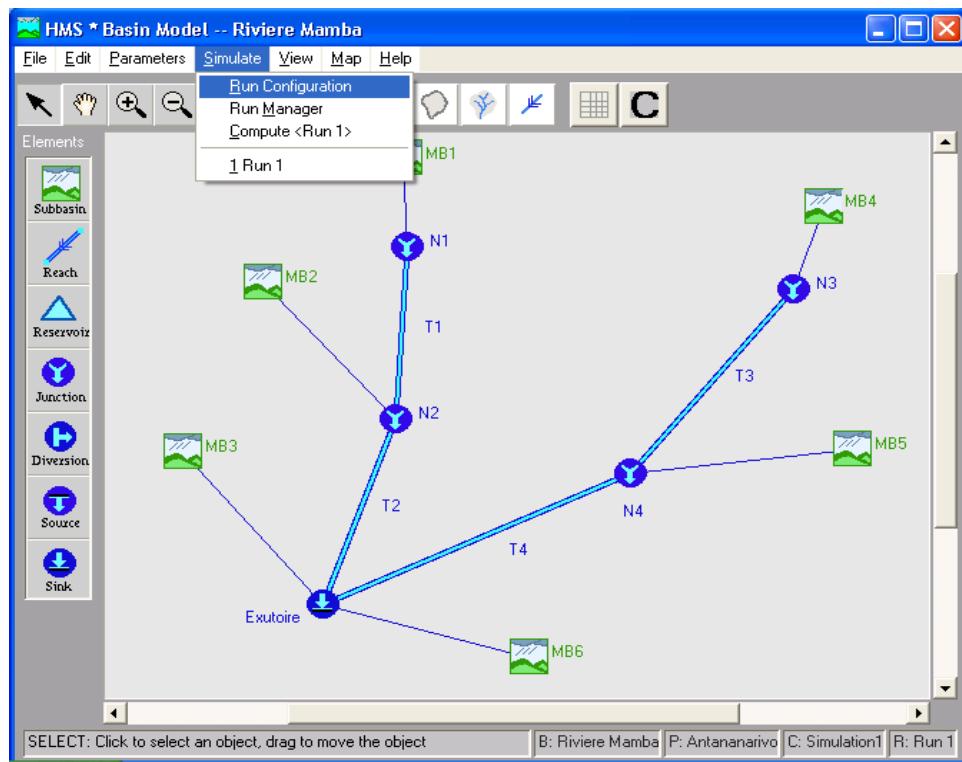
À cet étape, toutes les données permettant d'effectuer une simulation ont été entrées.

Dans HEC-HMS, une simulation est constituée d'un modèle de bassin, d'un modèle de précipitation et de paramètres de contrôle. Pour créer et exécuter une simulation :

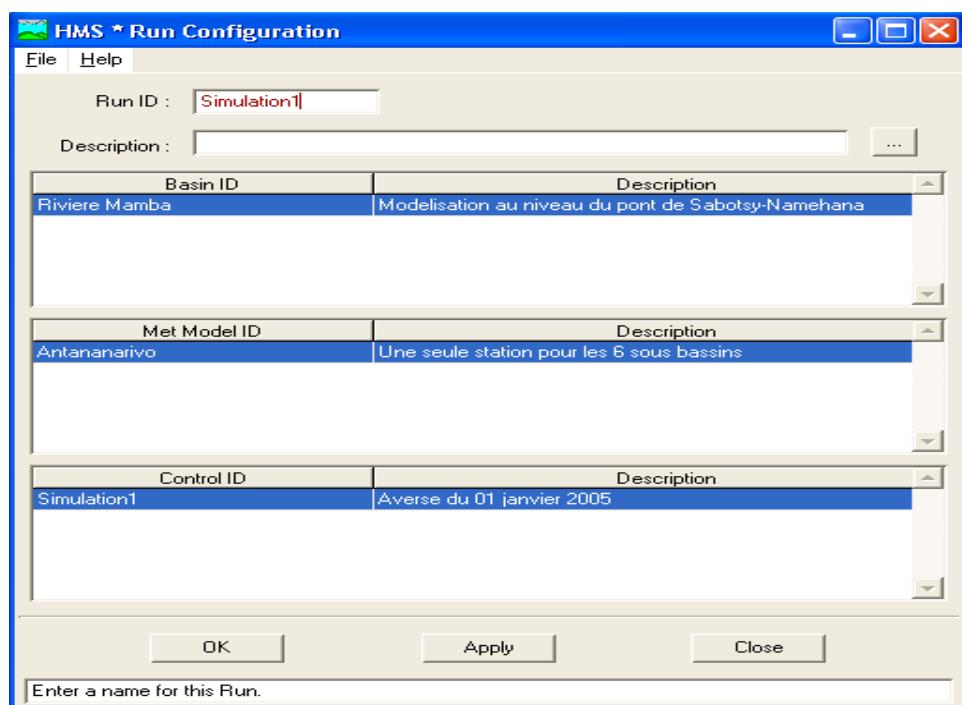
A partir de la fenêtre **Project Definition**, ouvrir la fenêtre **Basin Model** en cliquant deux fois sur le Basin Model **Riviere Mamba**.



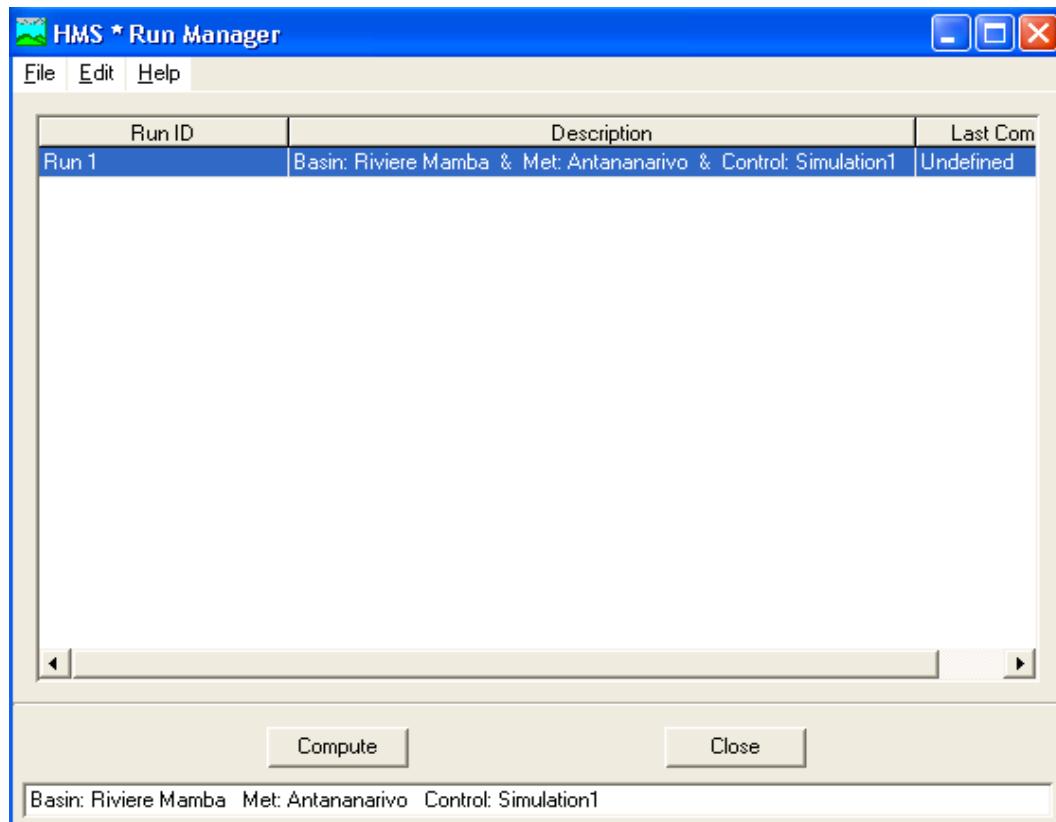
Dans la fenêtre **Basin Model**, cliquer sur **Simulate** et choisir **Run Configuration**.



Sélectionner un Basin ID, un Met Model ID, et un Control ID correspondant au modèle de bassin, modèle de précipitation et paramètres de contrôles créés précédemment. Aller dans **Run ID** et écrire un titre pour la simulation (Ex : Simulation Mamba) et une courte description de la simulation. Cliquer sur **OK**.



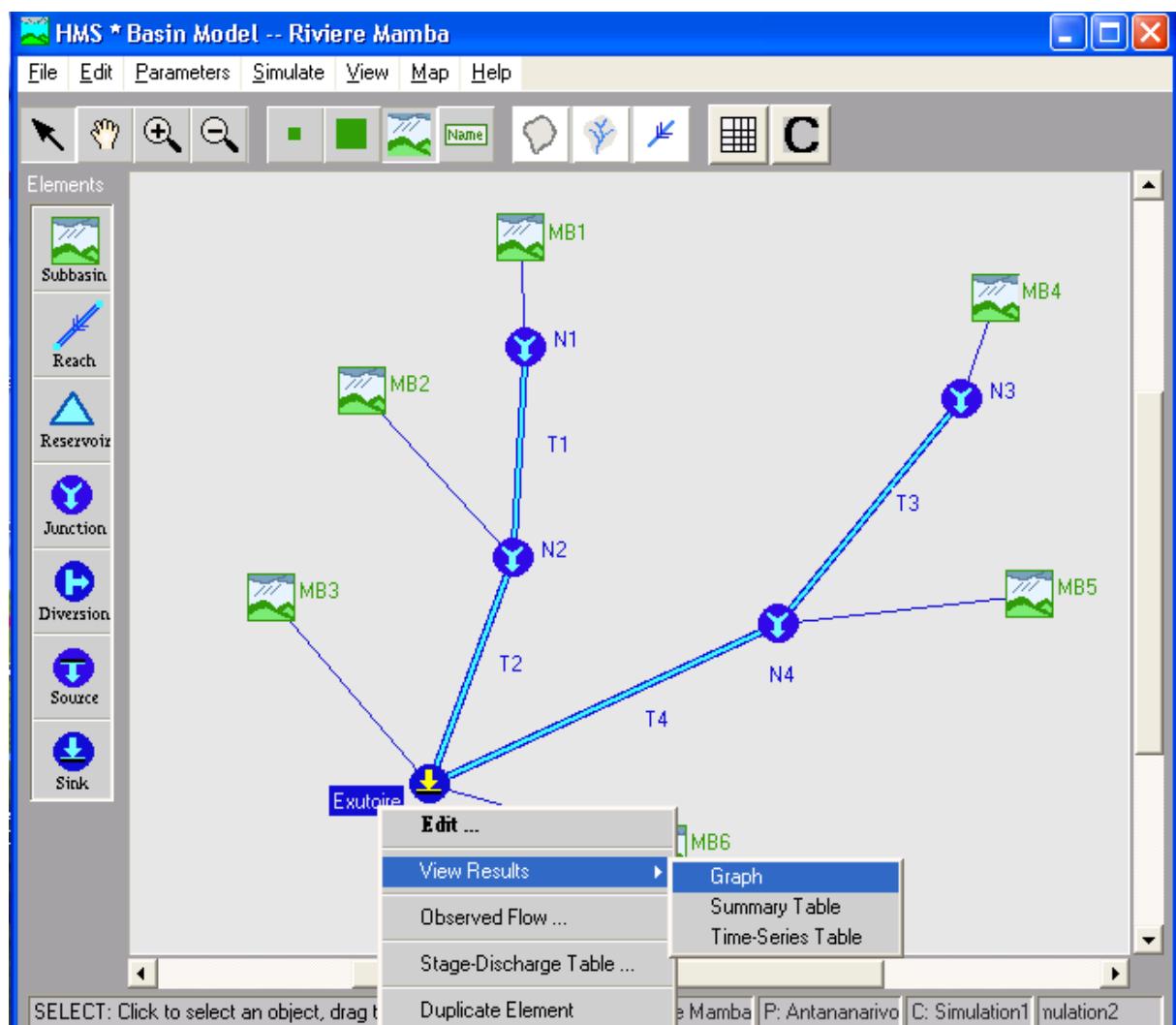
Ouvrir la fenêtre **Run Manager** à partir du menu **Simulate** de la fenêtre **Basin Model**. Choisir une **Run ID** et cliquer sur **Compute** pour lancer la simulation. Les items **Run Configuration** et **Run Manager** sont également accessibles à partir du menu **Tools** de la fenêtre **Project definition**.



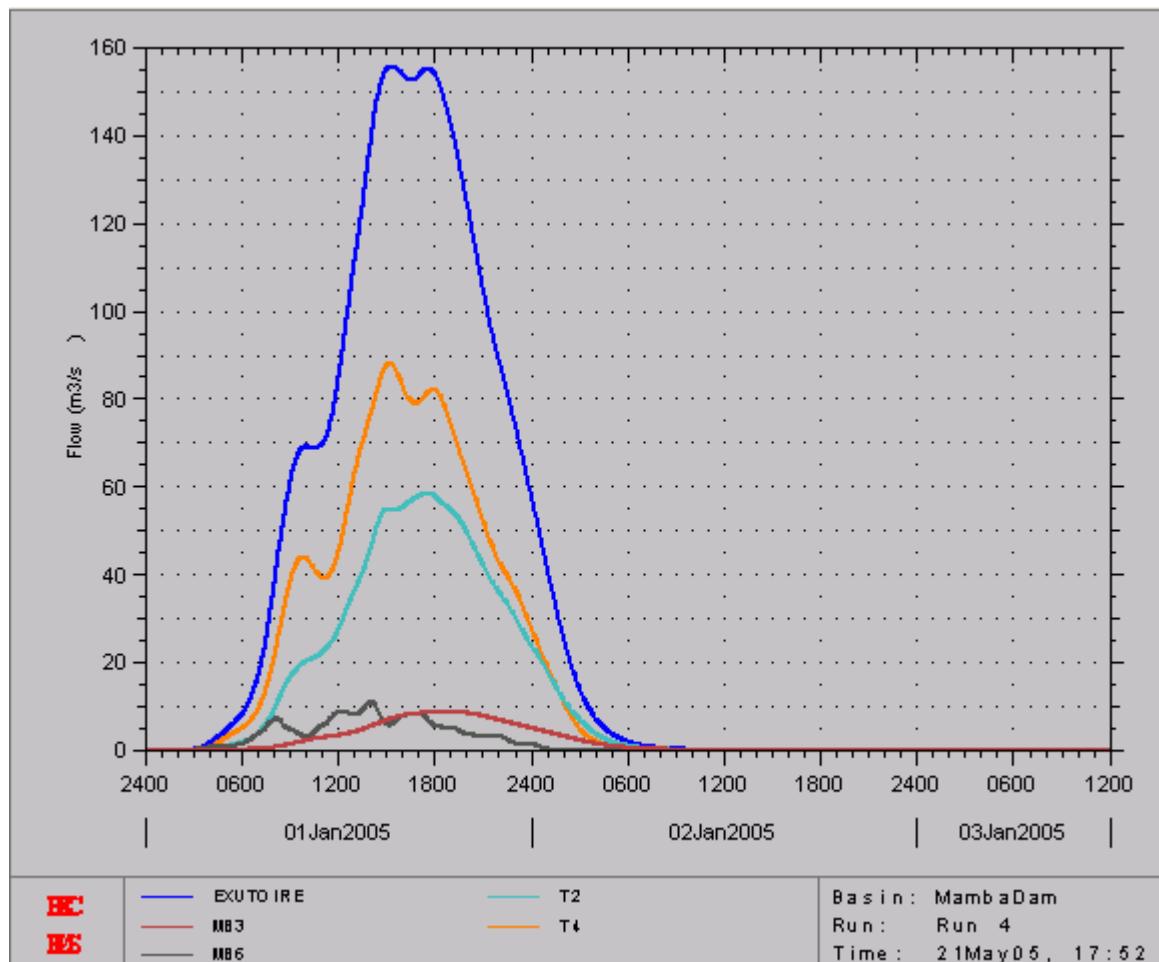
# ANNEXE 08

## Visualisation des résultats :

Après avoir effectuer une simulation on peut visionner les résultats en allant dans la fenêtre **Basin Model**. Cliquer avec le bouton droit de la souris sur l'élément désiré (sous bassin, tronçon, jonction). Sélectionner **View Results**. On peut faire apparaître des hydrogrammes, des tableaux résumés et des tableaux détaillés des simulations. Les résultats peuvent être imprimés et les valeurs des tableaux détaillés peuvent exportés vers une autre application. On sélectionne les valeurs désirées, on appuie sur les touches CTRL+C et on peut par la suite coller (CTRL+V) les valeurs dans une autre application.



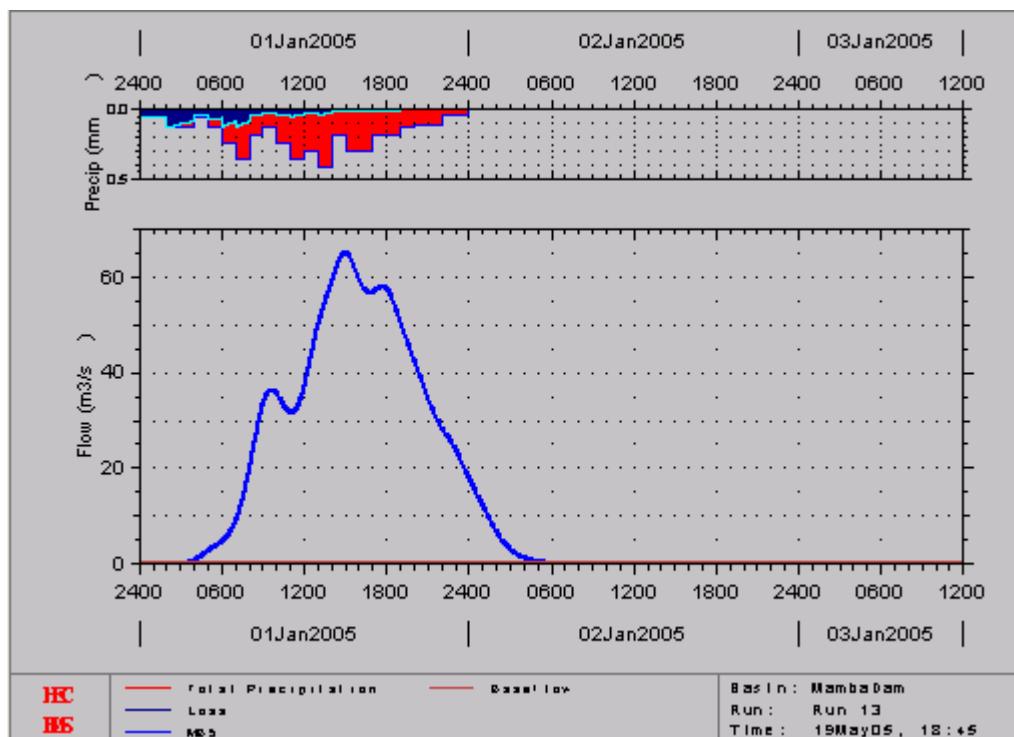
Résultats de la simulation au niveau de l'exutoire :



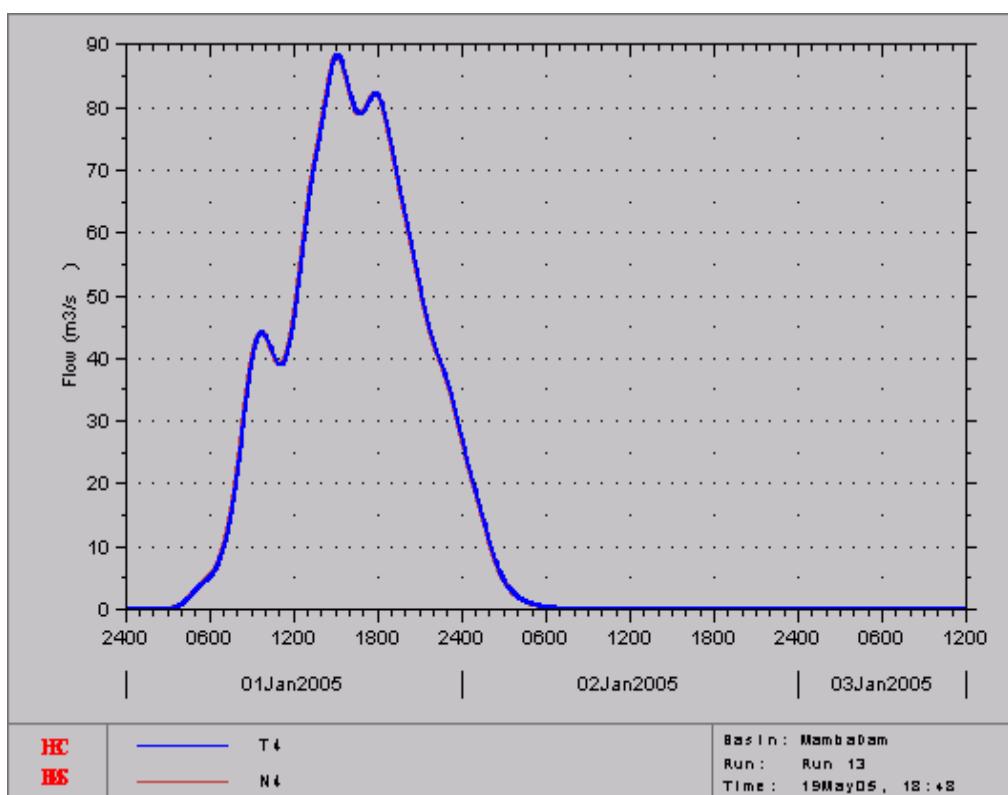
Le débit de pointe vaut  $Q_p = 155,65 \text{ m}^3/\text{s}$  qui s'est produit en date du 01 janvier 2005 à 15 heures 22 minutes. Cette crue a pour hauteur 73,1 mm au niveau de l'Exutoire.

On peut voir le résultat de la simulation sur n'importe quel point du réseau hydrographique .

Par exemple au niveau du sous bassin MB5, on a :



Et au niveau du tronçon T4, on a :



## ANNEXE 09

Données pluviométriques d'Antananarivo :

[ source : Service Météorologique Nationale, 2005]

Année	PRECIPITATIONS 24H(EN MM)					MAX							
		JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
1959	Pluie	62,1	88	88,1	4,2	0,9	1	2,9	4	9,3	1,5	51,1	59,2
	Date	11	24	27	1	1	26	29	3	15	20	9	14
2000	Pluie	23,8	128	104,4	1,4	2,8	1	9,2	0,3	0,5	8,5	61,5	62,3
	Date	6	17	2	26	27	7	6	26	16	22	24	15
2001	Pluie	76,5	64,8	15	10,2	0,8	0,7	0,8	24	-	35,8	30,4	68,3
	Date	27	1	19	11	18	27	30	6	-	26	16	25
2002	Pluie	34	67,3	29	35,9	40,8	9	0,2	0,7	37,4	28,6	52,6	45,4
	Date	16	22	8	20	13	16	21	8	8	26	10	27
2003	Pluie	91,7	36,5	93	7,5	7,6	0,5	3	0,3	8,8	15,7	21,4	39,2
	Date	20	28	14	7	28	21	7	9	24	16	28	31
2004	Pluie	44,1	76,8	19,1	15,7	23	26	24	20,7	2,8	3,8	70,5	78,2
	Date	27	27	9	13	5	20	27	23	29	23	24	23

# ANNEXES



## BIBLIOGRAPHIE

Assainissement et drainage de Tananarive - du 27/02/1974 , Tome III – Livre II  
2<sup>ème</sup> Partie CONTROLE DES CRUES,

Hydrologic Engineering Center – March 2000 – Hydrologic Modeling System(HEC-HMS) : Technical Reference Manual U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA.

Louis Duret - Estimation des débits de crues à Madagascar,

Luc Roy – 2004 - CTN 537-Gestion des Ressources Hydriques - Université de Québec

M. ALDEGHERI – 1967 - Fleuve et Rivière de Madagascar,

RAMANARIVO Solofofampionona – 2002 - Cours d'hydrologie générale en 3<sup>ème</sup> Année Hydraulique ESPA

RASOLOFONIAINA Jean Donné - 2004 - Cours d'hydraulique routière en 5<sup>ème</sup> Année Hydraulique ESPA

Réminieras – PARIS 1970- Hydrologie de l'Ingénieur - Edition Eyrolle

Service Météorologique Nationale,2003

Skaggs and Khaleel - 1986 - SCS,

Site web : <http://www.usace.army.mil>



Nom : FENOMANANA RAKOTONIRINA  
Prénom : Damien  
Titre : MODELISATION HYDROLOGIQUE DE LA MAMBA  
Nombre de Pages : 106  
Nombre de Tableaux : 25  
Nombre de Figures : 37

Résumé :

Cette étude vise principalement l'amélioration de la connaissance du fonctionnement hydrologique en périodes de crue de la rivière Mamba qui est l'un des affluents de la rivière Ikopa dans la plaine d'Antananarivo.

Elle est basée sur une modélisation hydrologique de la Mamba en amont du pont de Sabotsy Namehana sur la RN3.

Cette modélisation a été conduite avec le système HEC-HMS (Hydrological Modeling System) développé par l'US Army Corps of Engineers (Etats-Unis) qui permet de représenter la transformation des précipitations en hydrogrammes de crues, moyennant un découpage du bassin versant en sous-bassins homogènes.

L'étude a donc permis d'établir l'hydrogramme d'une crue cinquantennale au pont de Sabotsy. Le débit de pointe correspondant concorde bien avec les estimations fournies par les méthodes classiques (formules de L. DURET, méthode rationnelle).

Mots clés : *Bassin Versant, Modélisation hydrologique, Mamba, Ikopa, HEC-HMS*

Directeur du Mémoire : Mr LALA RAKOTOSON Serge  
Directeur Technique Adjoint à la SOMEAH

Adresse de l'Auteur : Mr FENOMANANA RAKOTONIRINA Damien

Près lot 21/3606/03 Ivory sud Fianarantsoa - 301  
Tél. 033.12.054.30