



Académie de Montpellier  
Université Montpellier II



HydroSciences  
Montpellier

**SIMULATION DE LA RESSOURCE EN EAU SUR  
UN PETIT BASSIN VERSANT SAHÉLIEN :  
ÉVALUATION DE LA TRANSPOSABILITÉ D'UN  
MODÈLE HYDROLOGIQUE.**

par  
**Roméo Lucibello**

**D.E.A.**  
**Sciences de l'Eau en Environnement Continental**  
Université Montpellier II

Soutenu le 1<sup>er</sup> Juillet 2003

## SOMMAIRE

<b>Avant-propos</b>	<b>3</b>
<b>Objectif.</b>	<b>4</b>
<b>I. Contexte général</b>	<b>4</b>
<b>II. Présentation de l'étude</b>	<b>5</b>
<b>Construction du Modèle</b>	<b>7</b>
<b>I. Caractéristiques Physiques.</b>	<b>7</b>
A. Localisation et géographie	7
B. Caractéristiques des précipitations	9
C. Description du site de Banizoumbou.	9
<b>II. L'outil de simulation</b>	<b>11</b>
A. Outil utilisé	11
B. Fonctionnement de r.water.fea	11
<b>III. Construction du modèle</b>	<b>13</b>
A. Réseau et bassin	13
B. Modèle Numérique de Terrain	13
C. Les états de surface	14
D. Humidité Initiale	16
<b>IV. Méthode d'utilisation du modèle</b>	<b>17</b>
A. Paramètres de calage du modèle	17
B. Les Fonctions Critères	18
C. Méthode d'optimisation	19
<b>V. Données d'entrée</b>	<b>21</b>
A. Évènements disponibles	21
B. Échantillon de pluies communes	21
<b>Modelisation</b>	<b>23</b>
<b>I. Résultats</b>	<b>23</b>
A. Présentation des résultats	23
1. Sensibilité du modèle	23
2. Choix d'un optimum de compromis	27
3. Représentation dans l'espace des critères	30
4. Bilan des résultats obtenus	32
B. Étude de l'Optimum de Compromis	33
1. Comparaison des volumes	33
2. Comparaison des débits de pointe	34

3.	Observation de quelques hydrogrammes	36
4.	Conclusion	37
C.	Validation du Calage	37
1.	Démarche	37
2.	Résultats	38
3.	Validation sur le bassin D	40
4.	Conclusion	41
<b>II.</b>	<b>Discussion</b>	<b>43</b>
A.	Étude de la transposabilité du calage de Wankama	43
1.	Performance du jeu de paramètres	43
2.	Étude plus détaillée du jeu	44
3.	Volumes Cumulés	49
B.	Critique du calage obtenu sur Banizoumbou	50
1.	Observation de l'infiltration dans le réseau	50
2.	Comparaison avec les valeurs simulées	50
	<b>Conclusion</b>	<b>53</b>
	<b>Liste des Figures</b>	<b>55</b>
	<b>Liste des tableaux</b>	<b>56</b>
	<b>Annexes</b>	<b>57</b>

# ***Avant-propos***

Ce mémoire rend compte d'un stage de 6 mois (janvier-juin 2003) effectué dans le cadre du DEA Sciences de l'Eau en Environnement Continental de l'Université Montpellier II. Sous la responsabilité de l'unité rattachée à l'UMR HSM (HydroSciences Montpellier), j'ai eu le plaisir de travailler à la Maison des sciences de l'Eau au sein de l'équipe MEVHYS (MEcanismes de la Variabilité Hydrologique en zone Sahélienne).

Je remercie chaudement mon maître de stage, Christophe Peugeot, pour sa patience et pour la disponibilité dont il a fait preuve au cours de ces mois. Je tiens aussi à remercier les autres membres de l'équipe pour leur aide précieuse lors des moments délicats de cette étude.

Merci enfin à la machine à café de la Maison des Sciences de l'Eau, sans qui rien n'aurait été possible.

# Objectif.

## **I. Contexte général**

Les recherches menées ces dernières années, par exemple celles menées dans le cadre du PMRC (Programme Mondial de Recherche sur le Climat) et du PIGB (Programme International Géosphère-Biosphère), ont mis en évidence un possible changement du climat global, auquel les régions tropicales sont particulièrement sensibles. L'objectif du projet MEVHYSA (MEcanismes de la Variabilité Hydrologique en zone SAhélienne) est de comprendre et de quantifier l'incidence des évolutions climatiques et environnementales sur les ressources en eau de surface et souterraine en zone sahélienne.

Au Niger, deux phénomènes en apparence contradictoire ont été observés. D'une part, la baisse de la pluviosité dans le Sahel depuis les années 1970 a été de l'ordre de 10% par rapport aux moyennes à long terme. D'autre part, au Niger Occidental, Leduc et al. (2001) ont mis en évidence une montée de plusieurs mètres de la nappe phréatique du Continental Terminal. Les niveaux actuels de la nappe sont même constamment plus hauts que ceux observés dans les 1960, alors que la pluie était plus abondante.

Cette contradiction entre signal climatique et fluctuation de la ressource en eau invite à prendre en compte l'anthropisation du milieu sahélien. Albergel (1987) a en effet montré sur de petits bassins de moins de 500 km<sup>2</sup> une augmentation très importante des coefficients de ruissellement, par modification de la végétation (défrichement, augmentation des surfaces mises en culture). Leduc et Loireau (1997) relient aussi la hausse de la nappe à l'accroissement des surfaces cultivées, phénomène favorisant les écoulements de surface. Cependant, l'expansion des surfaces anthropisées, liée à la croissance démographique, est très changeante selon les régions. Il n'est donc pas possible de considérer ce phénomène et ses conséquences de façon uniforme.

Une approche physique apparaît alors comme la plus pertinente, à la fois pour quantifier et modéliser sur une zone d'étude les processus à l'œuvre et, d'autre part, pour pouvoir transposer les observations à d'autres régions moins bien instrumentées et prévoir une évolution probable de ces milieux. C'est dans cette optique qu'un modèle distribué à bases physiques, dont l'outil

de calcul se nomme *r.water.fea* (Vieux et Gauer, 1994), a été adapté au cas sahélien puis calé et validé sur un petit bassin endoréique (Wankama) situé dans le degré carré de Niamey (sud-ouest du Niger, entre 2 et 3°Est et 13 et 14°Nord) (Peugeot et al. 2003, Cappelare et al. 2003, Seguis et al. 2002).

## **II. Présentation de l'étude**

L'objectif de notre étude vise à évaluer la transposabilité du modèle appliqué à Wankama à trois bassins versants emboîtés, situés un peu plus au sud dans le degré carré, près du village de Banizoumbou, d'une taille inférieure (de l'ordre de 5 ha, soit 0.05 km<sup>2</sup>) à celle du bassin de Wankama (environ 2 km<sup>2</sup>).

Nous serons amené dans un premier temps à construire le modèle, à partir de données déjà réunies pour les études sur le bassin de Wankama mais aussi à partir de données de terrain (Esteves, 1997) spécifiques aux bassins de Banizoumbou. En particulier, le modèle spatialisé nécessite la préparation de cartes représentant la géométrie du bassin (MNT, carte des pentes, etc...) que nous serons amenés à définir.

Le modèle nécessite d'autre part en entrée les données pluviométriques, définies à pas fins : les processus de ruissellement sont en effet modélisés de façon spatialisée mais aussi discrétisés dans le temps. Nous utiliserons comme données de forçage les hyetogrammes obtenus à proximité des bassins pour deux années (1992 et 1993). Ces données seront complétées par les hydrogrammes du ruissellement, mesurées par les stations de jaugeages définissant les exutoires des bassins.

Après calage du modèle sur les bassins de Banizoumbou, l'évaluation de sa transposabilité sera rendue plus complète par l'exploration systématique de l'espace des paramètres, permettant de juger la sensibilité du modèle. Les valeurs des paramètres de calage de Wankama obtenus par ailleurs (Cappelare et al.) seront mis en regard des valeurs obtenues par calage sur les données de Banizoumbou et situées dans l'espace des paramètres.

Les résultats permettront d'évaluer la capacité du modèle validé à Wankama à décrire d'autres bassins versants du degré carré, en terme de prédiction événement par événement mais aussi vis à vis des cumuls annuels de volume ruisselé. De plus, afin de vérifier la portée de nos résultats, nous pourrons nous interroger sur la validité du calage réalisé à Banizoumbou, en

nous penchant sur le phénomène d'infiltration dans le réseau, que Peugeot (1995) et Cappelaere et al. (2003) ont montré être un phénomène probablement important.

# ***Construction du Modèle***

## ***I. Caractéristiques Physiques.***

### **A. Localisation et géographie**

La présente étude sera menée sur quatre petits bassins versants du degré carré de Niamey, dans l'ouest du Niger, où des instrumentations denses ont été menées de 1992 à 1994.

(voir Figure 1 ci après)

Le degré carré est caractérisé par des reliefs peu marqués, allant de 200 à 260 m au-dessus du niveau de la mer. Le paysage est composé de plateaux à cuirasse ferrugineuse séparés par de vastes vallées de pente faible, dont les formations sableuses s'appuient sur le flanc des plateaux.

Le fonctionnement hydrographique de la région est fortement endoréique. Il résulte de la présence de pentes faibles, de l'absence de réseau de drainage développé et de la petite taille des bassins versants. Ce fonctionnement est encore amplifié par l'existence de nappes sableuses en divers points des vallées.

Il n'y a pas d'écoulement de base et les ruissellements s'arrêtent avec la pluie. L'eau coule depuis les plateaux jusqu'à des horizons sableux où elle s'infiltré rapidement ou jusqu'à de petites mares, qui se forment au bas de petites dépressions et qui alimentent la nappe en profondeur (Desconnets et al. 1997).

Cette nappe se trouve à des profondeurs variant de 10 à 30m sous les vallées et à plus de 70m sous certains plateaux.

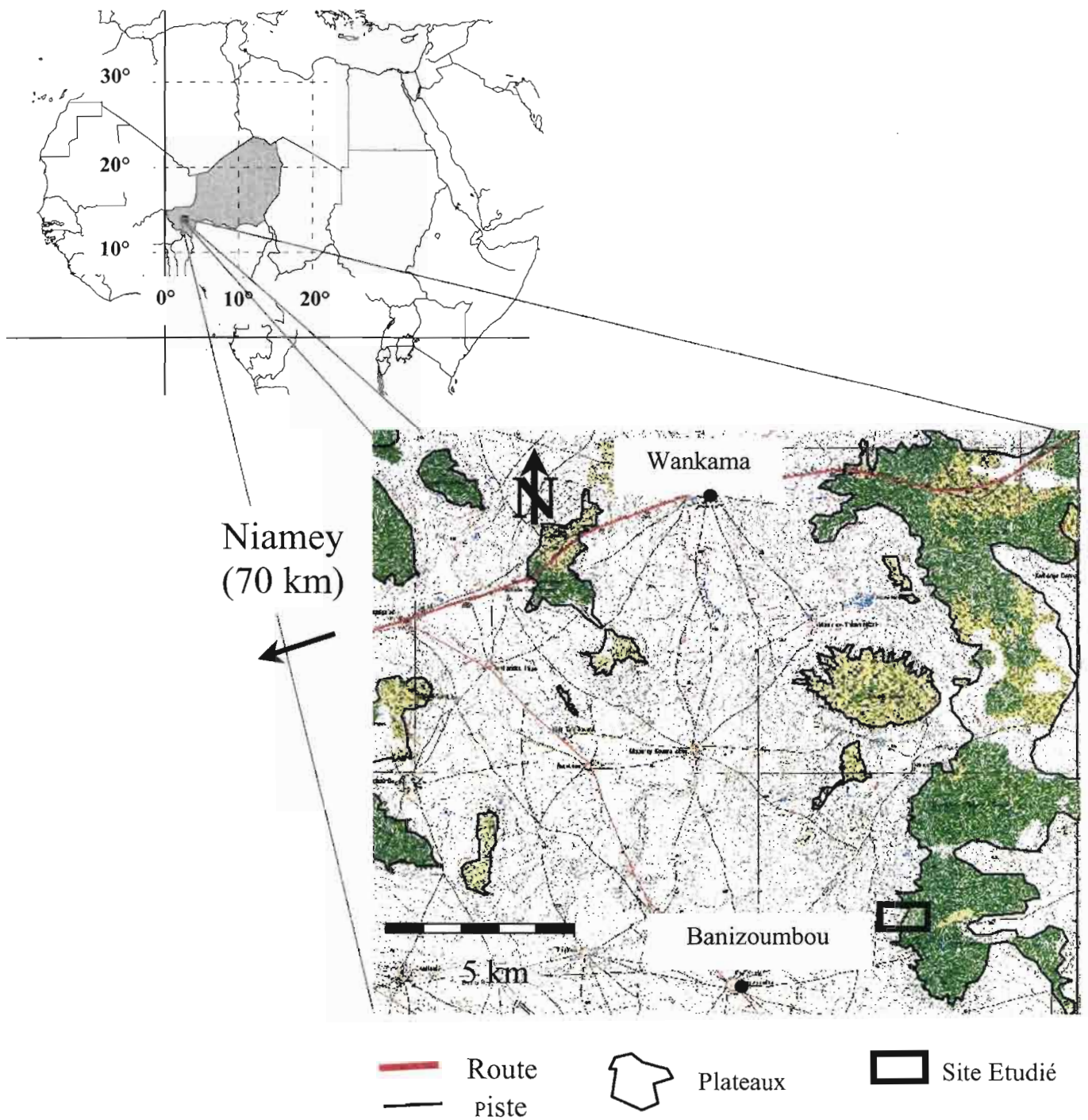


Figure 1 Localisation de la région étudiée au Niger Occidental, et du site expérimental à proximité de Banizoumbou

## **B. Caractéristiques des précipitations**

Les précipitations de la région se caractérisent par une distribution annuelle très irrégulière : la saison des pluies connaît de forts orages, de Mai à Septembre, et représente 95% de la hauteur d'eau précipitée annuelle, tandis que les autres mois de l'année sont secs.

Ces pluies sont très généralement issues de systèmes convectifs dénommés lignes de grains, vastes systèmes organisés à l'échelle de quelques centaines de kilomètres. Ces lignes sont constituées de cellules orageuses, dont est issue la pluie, dont la taille typique est de 5 à 10 km en largeur pour 10 à 12 km de hauteur. Ces dimensions sont très importantes en regard de celles des bassins d'étude aussi les précipitations seront-elles considérées comme spatialement uniformes sur chaque bassin.

Le hyétoqramme classiquement généré est caractérisé par un front de grande intensité (supérieure à 100 mm/h) suivi d'une traîne plus longue et de plus faible intensité (15 à 30 mm/h) (Thauvin 1992). La pluie dure de 3 à 5 heures et il s'écoule durant la saison humide en moyenne deux jours et demi entre deux évènements successifs.

## **C. Description du site de Banizoumbou.**

Le site de Banizoumbou se trouve à une dizaine de kilomètre au sud du bassin de Wankama (voir Figure 1).

On retrouve sur le bassin de Banizoumbou les traits caractéristiques du paysage de la région, avec de l'amont vers l'aval, le plateau cuirassé, le versant sableux et le bas-fond. La différence d'altitude totale est faible (voir Figure 2), de l'ordre d'une vingtaine de mètres. Les pentes sont généralement douces mais non uniformes. Elles sont de 0.2% sur le plateau, de 2 à 5% sur le versant sableux et peuvent être localement supérieures à 15% sur le talus.

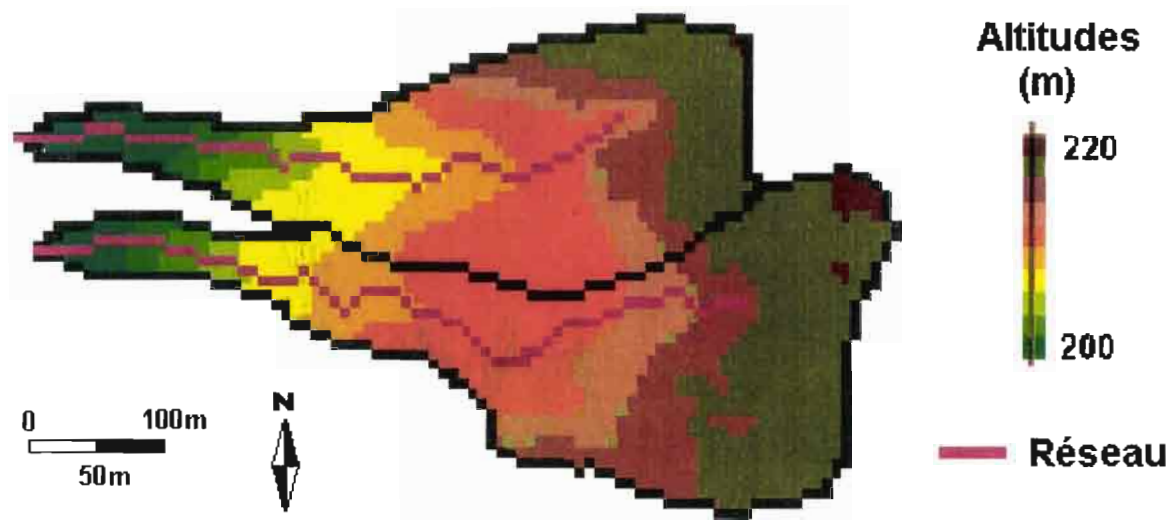


Figure 2 Les altitudes des bassins de Banizoumbou

Le site sur lequel porte notre étude est composé de deux bassins versants parallèles et voisins. Le bassin Nord a pu être lui-même décomposé en trois bassins versants emboîtés : deux stations de jaugeage situées en amont, sur le réseau, ont défini les exutoires de ces deux sous-bassins. La transposabilité du modèle sera donc étudiée sur quatre bassins différents. Ils sont notés A, B et C pour les trois bassins emboîtés et D pour le dernier bassin.

Ces quatre bassins sont semblables en terme de caractéristiques physiographiques mais aussi dans leur occupation du sol : ils sont en effet les uns comme les autres non cultivés.

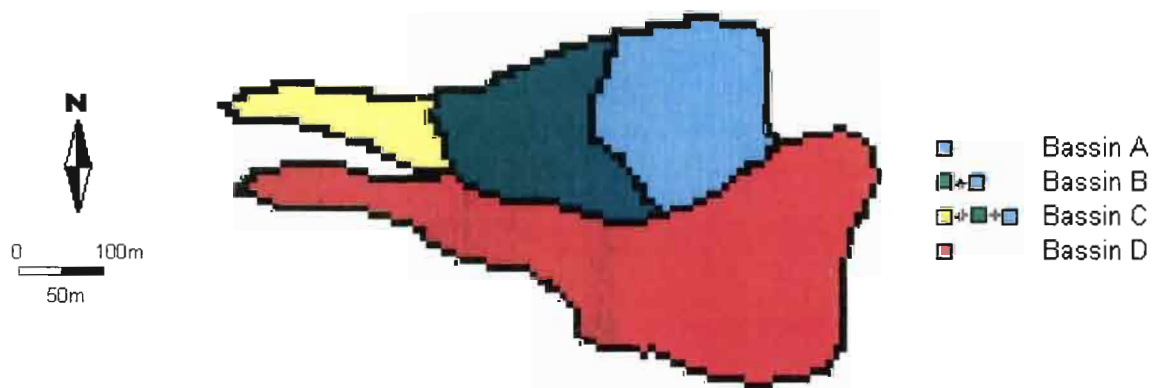


Figure 3 Les quatre bassins versants

## II. L'outil de simulation

### A. Outil utilisé

Toutes les simulations de notre étude sont réalisées à l'aide de l'outil de calcul `r.water.fea` (Vieux et Gaur 1994; Vieux 2001, Cappelaere et al. 2003). Le modèle est un modèle à base physique, spatialisé, en deux dimensions, qui agit dans l'environnement GRASS GIS (Westervelt, 1991) sur des grilles raster (Cappelaere et al. 2003).

### B. Fonctionnement de `r.water.fea`

Les cartes précisant la géométrie du bassin (limites du bassin, tracé du réseau, directions de drainage) définissent la structure discrète du modèle. Sur chaque cellule de la grille ainsi définie, les écoulements sont décrits par l'approximation De Saint-Venant de l'onde cinématique.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r - f$$

$h$  : hauteur d'eau sur la surface (m)

$q$  : débit surfacique ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )

$r$  : intensité de la pluie ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$f$  : vitesse d'infiltration ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$t$  : temps (s)

$x$  : dimension spatiale, dans la direction de l'écoulement (m)

L'équation de Green et Ampt permet de calculer la vitesse d'infiltration :

$$f = K_s \left[ 1 + \frac{(H_f + h) \cdot \Delta\theta}{F} \right]$$

$K_s$  : perméabilité à saturation ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$H_f$  : pression capillaire au front d'humidité (m)

$\Delta\theta = \theta_i - \theta_s$  : déficit initial en eau ( $\theta_i$  : humidité initiale,  $\theta_s$  : humidité à saturation) (sans unité)

$F$  : hauteur d'eau infiltrée, cumulée depuis le début de la pluie (m)

$h$  : hauteur d'eau (m)

Enfin, le système d'équations est résolu avec l'équation de Manning liant la vitesse d'écoulement  $u$  et le rayon hydraulique (Seguis et al, 2002).

$$u = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

$n$  : coefficient de rugosité de Manning ( $m^{-1/3} \cdot s$ )

$S$  : pente du terrain (m/m)

Pour des écoulements en nappe,  $R$  peut être assimilé à la hauteur d'eau  $h$ .

$u$  : vitesse d'écoulement, avec  $q = u \cdot h$

La méthode de résolution de l'ensemble des équations dans l'espace est celle des éléments finis et dans le temps celle des différences finies. Chaque point de la grille raster est lié à son voisin en aval, par le schéma de drainage défini à partir de la carte des directions de drainage.

Le modèle spatialisé nécessite d'entrer diverses données, sous forme de cartes raster :

- Les données géométriques

Il s'agit des cartes des contours de bassins, des réseaux, des pentes, des directions de drainage et des surfaces accumulées.

- Les caractéristiques d'infiltration et de transfert

Il s'agit de la carte de conductivité hydraulique à saturation ( $K_s$ ), puis des cartes donnant les coefficients de rugosité de Manning ( $n$ ) pour les écoulements superficiels sur les versants et pour la propagation dans le réseau.

- Les données d'entrée

Il s'agit des données de pluies discrétisées mais aussi du pourcentage de saturation du sol au début de la pluie.

L'obtention de l'ensemble de ces données a nécessité dans un premier temps de prendre en main le système d'exploitation UNIX et l'environnement spécifique GRASS mais aussi de traiter des données jusque là dispersées (certaines étant géoréférencées, d'autres non), comme nous allons le voir en détail dans les chapitres suivants.

### **III. Construction du modèle**

#### **A. Réseau et bassin**

Sur chaque bassin versant, le réseau de drainage a été identifié à partir des photos aériennes et des connaissances qualitatives de terrain. Sa largeur a été considérée comme constante et évaluée à 1m50, qui est une valeur couramment observée sur le terrain.

#### **B. Modèle Numérique de Terrain**

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) a été réalisé à partir du relevé de terrain de Michel Esteves (1997), que nous avons géoréférencé en nous appuyant sur cinq points repères : les stations de jaugeages marquant l'exutoire des bassins versants. Ces stations sont en effet des points stables dans le temps, qui peuvent aisément retrouvées sur les photos aériennes : elles jouent donc à la perfection le rôle de point de repère. De plus, leur position géoréférencée a été établie lors d'une mission topographique au GPS 3D (Seguis et Peugeot 2001) et a permis de situer de façon absolue la géométrie des bassins.

Le MNT, une fois établi, a permis de calculer les cartes des pentes, des directions de drainage et des surfaces accumulées, grâce aux fonctions existantes dans l'environnement GRASS. Les résultats bruts obtenus n'étaient cependant pas satisfaisants : l'environnement étant extrêmement plat, les méthodes de calcul automatique étaient prises en défaut et donnaient des cartes d'accumulation et de drainage en complète contradiction avec les observations de terrain, en particulier les contours des bassins et la localisation des drains. Nous avons donc été amenés à créer un MNT fictif, établi par forçage des limites connues (les contours des bassins et les drains) dans le MNT précédent (par amplification de la profondeur des ravines et de la hauteur des lignes de crêtes), permettant aux procédures de calcul de réaliser des cartes des directions de drainage et des surfaces accumulées en accord avec les connaissances du terrain que nous avions.

Afin de vérifier la pertinence du MNT, nous avons comparé la valeur des surfaces mesurées sur le terrain (Esteves, 1997) et déduites du modèle numérique (Tableau 1). Les différences, de l'ordre de 1 hectare (environ 10% de la surface totale), ont été jugées acceptables : il est en effet extrêmement difficile de définir une limite des bassins sur leur partie haute, c'est à dire sur le plateau. La pente y est en effet quasi nulle et la moindre modification de la surface

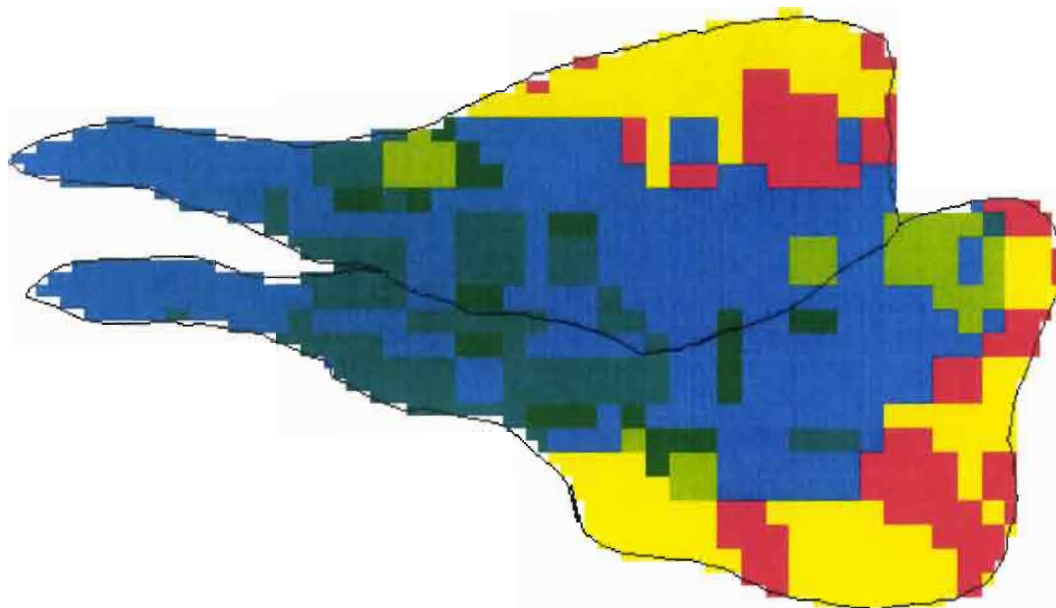
(déchet végétal, activité de la faune) peut entraîner des changements importants du ruissellement. La surface réelle du bassin peut donc avoir connu d'importantes modifications au cours des saisons, tandis que la carte définie dans l'environnement Grass ne peut qu'être considérée comme stable dans le temps.

	<b>Surface du bassin observée (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Surface du bassin donnée par le MNT (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Ecart (MNT-observé) (m<sup>2</sup>)</b>
<b>Bassin A</b>	46 750	49 900	3 150
<b>Bassin B</b>	81 150	92 100	10 050
<b>Bassin C</b>	99 540	111 400	10 860
<b>Bassin D</b>	129 730	127 800	-2 070

*Tableau 1 Surface observées et numérisées*

### **C. Les états de surface**

En 1992, à partir de mesures in situ, de photographies aériennes et d'images multispectrales SPOT, une carte d'état de surface a été établie pour la région par D'Herbes et Valentin (1997). Déjà employée pour l'étude du bassin voisin de Wankama, cette carte a naturellement servi de base à notre étude (voir Figure 4).



- Depots sableux eoliens (Savane tres claire herbacee dense)
- Bas-fonds syst. alluvial (mil assez dense)
- Bas-fonds syst. alluvial (mil/sorgho/niebe)
- Haut de versant, Chanfreins
- Sol nu sur plateaux
- Vegetation claire sur plateaux

Figure 4 Les états de surface

A chacune des classes de cette carte, définies par leurs propriétés de surface (pourcentage de sol nu, pourcentage de végétation herbacée, arbustive, arborée, type de croûte de battance), D'Herbes et Valentin (1997) ont affecté une conductivité hydraulique à saturation selon la classification de Casenave et Valentin (1992). Ces derniers ont en effet montré que les écoulements de surface en zone sahélienne sont sous la dépendance quasi exclusive des propriétés de surface du sol (couvert végétal, activité faunique, microrelief, type de croûte). Ensuite, D'Herbes et Valentin ont déterminé les coefficients de rugosité de Manning à partir de la connaissance des valeurs extrêmes, imposées par la végétation de plateau et par le sol dégradé, trouvées dans la littérature et par la connaissance du terrain pour les valeurs intermédiaires.

Comme nous l'avons vu, la carte de D'Herbes et Valentin permet d'obtenir les valeurs de  $K_s$  et de  $n$  pour les différents points des bassins versants. En revanche, les valeurs du coefficient de rugosité et de la perméabilité dans le réseau ont été différenciées de celles des versants et ont été considérées comme uniformes. Le réseau joue un effet un rôle particulier : il est le siège

d'une très forte infiltration, comme cela a été mis en évidence sur le bassin de Wankama. De plus, l'état actuel des connaissances ne permet pas de définir avec précision les caractéristiques du réseau. Nous avons donc repris les valeurs de  $K_s$  et de  $n$  définies lors de la modélisation de Wankama et qui ont déjà permis de simuler de façon satisfaisante les particularités du réseau : forte perméabilité et coefficient de rugosité relativement faible (Cappelaere et al. 2003).

L'ensemble des valeurs utilisées pour décrire le milieu est présenté dans le Tableau 2.

Type de surface	$K_s$ (*10 <sup>-7</sup> mm/h)	$n$ (*10 <sup>-3</sup> m <sup>-1/3</sup> s)
Sol nu sur plateaux	2	20
Haut de versant, Chanfreins	3	15
Bas-fonds système alluvial (mil/sorgho/niebe)	7	174
Bas-fonds système alluvial (mil assez dense)	7	123
Dépôts sableux éoliens (savane très claire herbacée dense)	16	200
Végétation claire sur plateaux	31	277
Réseau	69	30

Tableau 2 Valeurs de  $K_s$  et de  $n$

#### D. Humidité Initiale

L'humidité initiale au début de la pluie est choisie uniforme sur le bassin et est calculée à partir de la méthode suivante, basée sur l'API (*Antecedent Precipitation Index* - Index des Précipitations Antécédentes) formulé par Kohler et Linsey et calibré à partir d'observations d'humidité du sol (Peugeot et al, 2003).

On définit le pourcentage de saturation par  $\%(Saturation)_i = \frac{S_i - S_{initial}}{S_{saturation} - S_{initial}}$

Avec :

$\%(Saturation)_i$  = pourcentage de saturation du sol de 0 à 40 cm au début de la pluie  $i$

$S_i$  = Stock d'eau dans le sol de 0 à 40cm au début de la pluie  $i$  (mm)

$S_{initial}$  = Stock d'eau de rétention dans le sol de 0 à 40 cm (mm)

$S_{saturation}$  = Stock d'eau dans le sol de 0 à 40 cm à saturation (mm)

Ce pourcentage de saturation du sol au début de la pluie est choisi uniforme sur le bassin.

L'API formulé par Kohler et Linsey est alors défini par  $API_i = (API_{i-1} + P_{i-1}) \cdot e^{-\alpha \cdot \Delta t_i}$

Avec :

$\alpha=0.093$  (jour<sup>-1</sup>)

$\Delta t_i$ = temps écoulé entre la fin de la pluie i-1 et le début de la pluie i (jour)

$P_{i-1}$ =cumul de la pluie i-1 (mm)

$API_0=0$

En ajustant des valeurs  $API_i$  sur des valeurs de stock  $S_i$  aux mêmes dates, Peugeot et al. (2003) calcule  $S_i$  par :

$$S_i = (S_{saturation} - S_{initial}) \cdot (1 + b^{API_i}) + S_{initial}$$

avec  $b=0.995$ , meilleur ajustement pour une relation de type puissance :

$$\%(Saturation)_i = 1 + b^{API_i}$$

Les paramètres de cette formule ont été déterminés par Peugeot à partir des données d'humidité obtenues par sonde à neutron.

#### **IV. Méthode d'utilisation du modèle**

Le modèle ainsi construit demande à être calé à l'aide d'un nombre limité de paramètres, et évalué quant à ses performances. Le paramétrage et le critère de performance sont présentés ci-dessous.

##### **A. Paramètres de calage du modèle**

Des études de sensibilités (Seguis et al, Cappelaere et al) ont permis de désigner comme paramètres les plus importants la conductivité hydraulique à saturation et le coefficient de rugosité de Manning. Pour limiter le nombre de paramètres, mais conserver la structure spatiale des perméabilités et des rugosités issues des cartes a priori, le paramétrage a été réalisé en appliquant le facteur multiplicatif K aux Ks des versants, C au Ks du réseau et M aux coefficients n (pour tout le bassin : versants et réseau). K, C et M sont ainsi les paramètres

de calage. Quant à  $H_f$  et  $\theta_s$ , ils sont pris uniformes et constants pour tout le bassin (Seguis et al 2002).

- conductivité hydraulique du bassin versant :  $K \cdot K_s$
- conductivité hydraulique du réseau :  $C \cdot K_s$
- coefficients de rugosité pour le bassin et le réseau :  $M \cdot n$

Les versants et le réseau ont été dissociés une nouvelle fois ; comme précédemment lors de la définition des caractéristiques du milieu (voir Les états de surface) c'est le rôle particulier joué par le réseau dans les phénomènes d'infiltration qui conduit à dédoubler le coefficient portant sur la conductivité hydraulique.

## **B. Les Fonctions Critères**

Afin d'évaluer la performance du modèle et de permettre son calage, nous disposons d'une fonction critère notée  $F$ , qui quantifie la correspondance entre données observées et simulées et dont la valeur doit être minimisée. Parmi les nombreuses fonctions qui auraient pu être choisies, celle-ci a été adoptée lors de l'application du modèle au bassin de Wankama (Vieux et Gauer, 1994) en regard des objectifs de la modélisation.

En effet, nous nous plaçons dans une perspective globale d'évaluation du renouvellement de la ressource en eau, aussi l'évaluation du volume  $V$  d'eau ruisselé à l'exutoire est-elle de première importance. Une fonction critère  $F_V$  a donc été définie, évaluant l'erreur quadratique de modélisation des volumes d'eau ruisselés. Mais afin d'augmenter la pertinence du modèle, une comparaison de la forme des hydrogrammes simulés et observés est aussi réalisée, à partir de la valeur du débit de pointe  $Q$  : cette comparaison est assurée par la fonction  $F_Q$ .

Deux critères,  $F_V$  et  $F_Q$  sont ainsi définis : pour chacune des deux variables de sorties (volume ruisselé  $V$  ou débit de pointe  $Q$ ), la valeur du critère ( $F_V$  ou  $F_Q$ ) pour un jeu de  $n$  observations est définie comme l'erreur quadratique moyenne sur ces  $n$  observations, normée par la variance observée sur un jeu de référence de  $n_0$  observations. C'est à dire :

$$F_V^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \alpha_i [V_{obs}(i) - V_{sim}(i)]^2 \right\}}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad \text{et} \quad F_Q^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \alpha_i [Q_{obs}(i) - Q_{sim}(i)]^2 \right\}}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}$$

$$F_V^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} \left\{ \alpha_i [V_{obs}(i) - \bar{V}_{obs}]^2 \right\}}{\sum_{i=1}^{n_0} \alpha_i} \quad \text{et} \quad F_Q^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} \left\{ \alpha_i [Q_{obs}(i) - \bar{Q}_{obs}]^2 \right\}}{\sum_{i=1}^{n_0} \alpha_i}$$

Avec  $n \leq n_0$

La combinaison de ces deux critères permet de définir la fonction critère F :

$$F = \sqrt{\left( F_V^2 + (a \cdot F_Q)^2 \right)}$$

avec  $0 < a < 1$ .

L'importance prépondérante d'une bonne modélisation des volumes ruisselés devant celle de la forme des hydrogrammes justifie la condition " $0 < a < 1$ ".

Pour notre étude la valeur  $a=0.5$  a été adoptée. Cette valeur est celle utilisée lors de la modélisation du bassin de Wankama.

Retenons enfin de cette relation entre F,  $F_V$  et  $F_Q$  que la valeur du débit de pointe n'intervient de façon significative que lorsque la correspondance des volumes est déjà suffisante ou lorsque le critère de forme devient très mauvais.

### C. Méthode d'optimisation

Pour trouver un jeu de paramètres (triplet K, C, M) minimisant F, nous n'avons pas choisi d'utiliser une procédure automatisée de recherche d'optimum. Nous avons opté pour une exploration systématique de l'espace des paramètres. Ce sont ainsi plus de 800 jeux de paramètres qui ont été considérés, pour des valeurs allant de 0.1 à 1.4 pour K, de 0.01 à 7 pour C et de 0.4 à 1.8 pour M.

Si l'exploration systématique de l'espace des paramètres peut parfois demander plus de temps de calcul, en revanche les informations obtenues ne sont pas de même nature. La sensibilité du modèle aux variations des paramètres peut ainsi être observée, apportant de nombreuses informations sur le comportement du modèle. Plus important encore, l'existence de minimums

locaux peut être mise en lumière : il est alors possible d'éviter de désigner comme jeu de paramètre optimal ce qui n'est un minimum que pour une région donnée de l'espace des paramètres.

## **V. Données d'entrée**

### **A. Évènements disponibles**

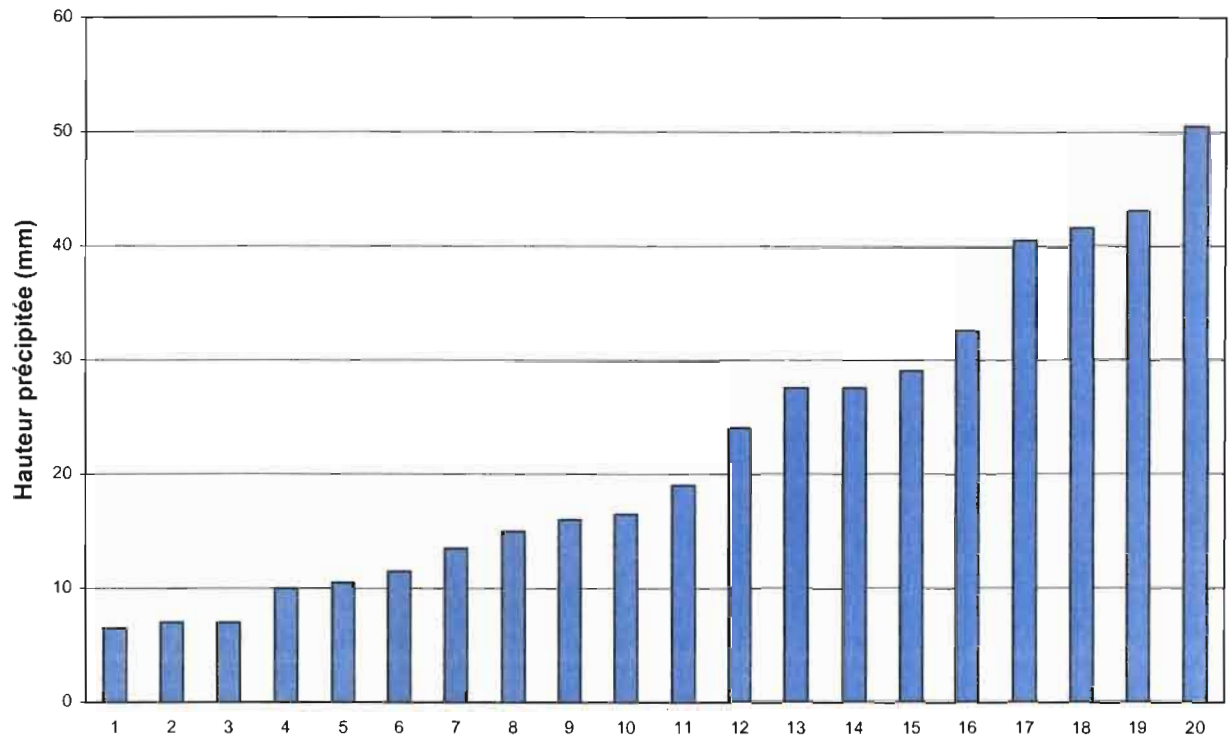
Nous disposons des hyétographes de pluies tombées au cours des saisons 1992 et 1993 (respectivement 38, 33 et 27 pluies pour les bassins A, B et C). En parallèle de ces données, nous disposons aussi des mesures effectuées dans les stations de jaugeages à l'exutoire de chacun des quatre bassins versants et qui renseignent sur le volume ruisselé au cours des pluies.

Ces données très riches seront les données de forçage de notre modèle. Le nombre d'évènements total n'est pas très élevé mais les données sont connues pour les quatre bassins versants, ce qui apporte une quantité d'informations importante.

### **B. Échantillon de pluies communes**

A partir de l'ensemble des évènements connus, un groupe de vingt évènements a été défini. Ce groupe rassemble tous les évènements dont les données existent et sont fiables (que ce soit les volumes précipités ou les volumes ruisselés) pour les quatre bassins. Les raisons qui déterminent la mise à l'écart d'un évènement ont pu être variées : les bassins peuvent ne pas avoir tous connu de crue lors de l'évènement pluvieux et d'autres évènements ont pu être accompagnés d'un problème lors de la mesure.

La Figure 5 présente les différentes pluies. Comme on peut le constater, le nombre de crues de grande importance ( $> 35\text{mm}$ ) est très réduit (seulement quatre crues) : les études réalisées sur ces seuls évènements de grande importance ne pourront donc pas être considérés comme parfaitement représentatifs. Nous retrouverons cette limite lors de l'étude des résultats de la simulation.



*Figure 5 L'échantillon de 20 pluies communes*

# *Modélisation*

## **I. Résultats**

### **A. Présentation des résultats**

#### **1. Sensibilité du modèle**

L'exploration systématique et régulière de l'espace des paramètres nous permet de prendre la mesure de la sensibilité du modèle, et plus précisément de l'influence de chaque paramètre sur la valeur de la fonction critère F. Elle permet aussi d'observer l'existence d'éventuels minimums locaux.

- *Construction des graphes*

La visualisation de la sensibilité ne va pas sans problème. Nous sommes en effet en présence d'un espace à 4 dimensions : les 3 premières sont définies par les paramètres de calage K, C et M, et la dernière par les valeurs de la fonction critère F. Nous sommes donc amenés à choisir un point de l'espace – un triplet (K,C,M) - autour duquel nous effectuons des coupes mettant en valeur l'influence d'un couple de paramètres, le troisième paramètre étant fixé.

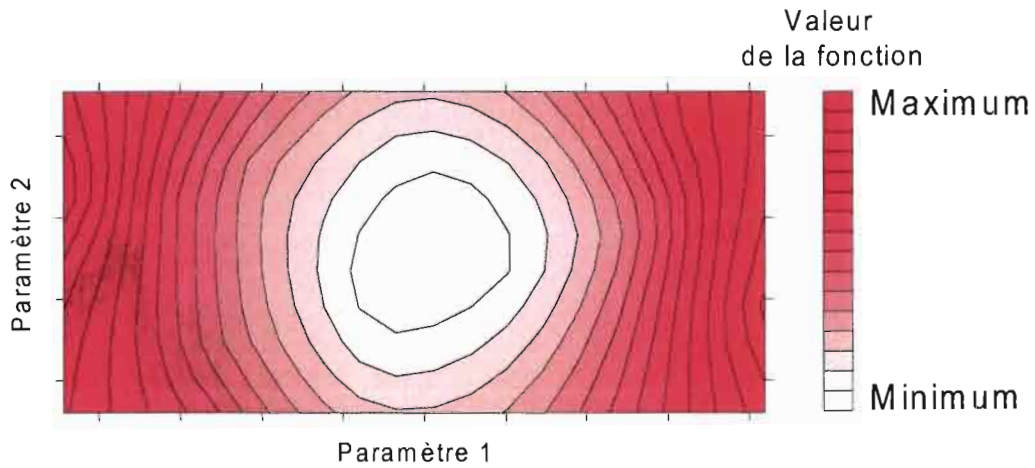
Le choix de ce point a été déterminé par l'étude des meilleurs jeux, que nous présenterons dans les chapitres suivants, et qui nous a permis de mettre en évidence un "optimum de compromis" défini par le triplet (K,C,M) = (0.4, 0.05, 1.2). C'est autour de ce point de référence, central dans notre étude, que se fait la visualisation qui suit.

Il faut noter que l'influence du point sur lequel nous effectuons des coupes n'est pas majeure. Nous avons procédé à de nombreuses visualisations et avons constaté qu'elles ne présentent de différences notables que lorsque l'on déplace le point de coupe vers des valeurs extrêmes des paramètres, ce qui correspond à des fonctionnements non pertinents du modèle. Ces coupes ont été réalisées pour les différents bassins et ont donné des résultats semblables.

Enfin, remarquons que pour permettre une comparaison aisée des résultats des trois bassins, les calculs de la fonction critère ont été effectués pour l'échantillon de 20 pluies communes aux trois bassins.

- *Existence d'un optimum et sensibilité*

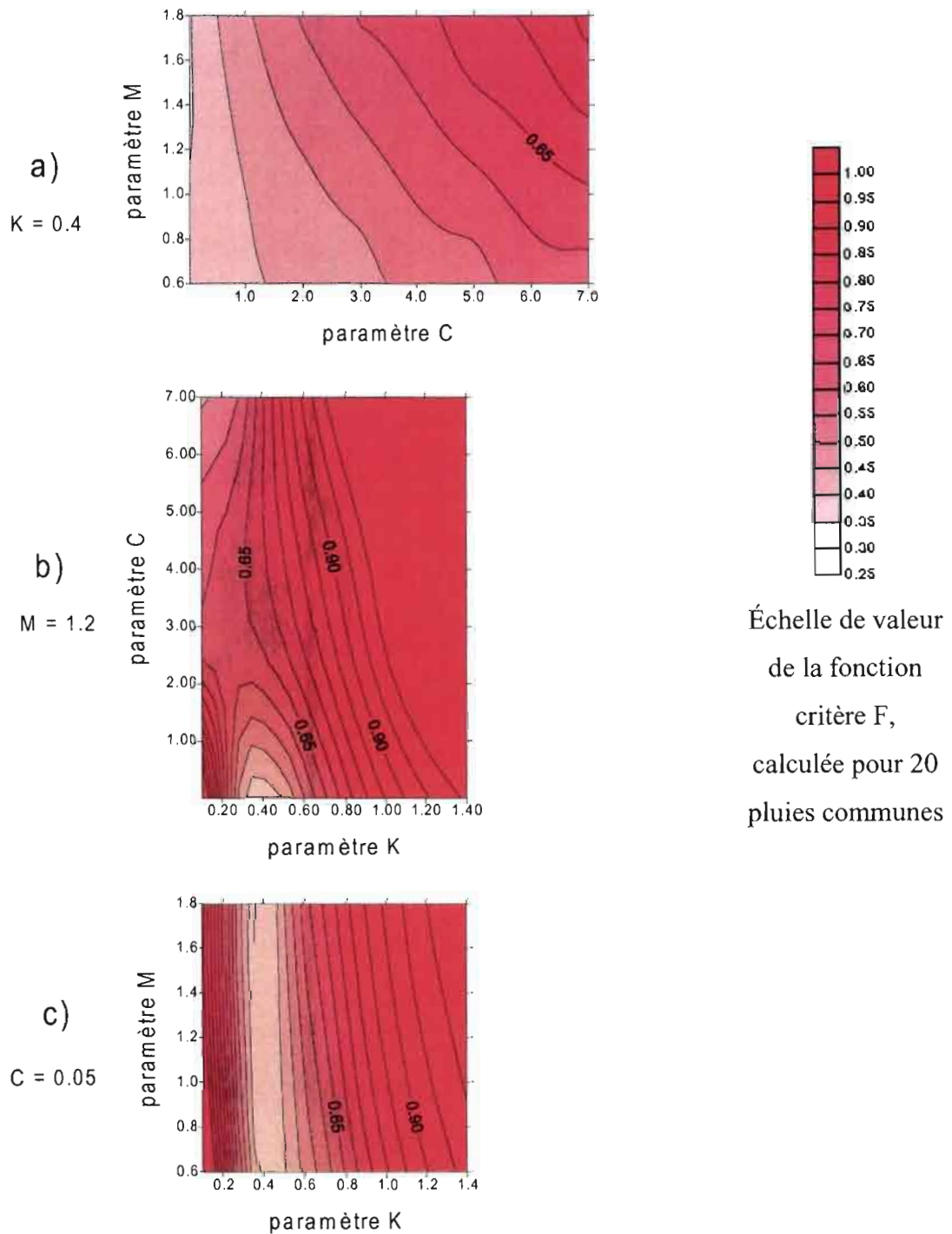
Dans le cas le plus idéal, l'étude de sensibilité du modèle aurait fait apparaître un minimum de  $F$  bien marqué. Ainsi, sur la représentation d'un cas fictif (Figure 6), nous pouvons observer que les isovaleurs de  $F$  définissent un domaine de valeurs des paramètres 1 et 2 minimisant la fonction étudiée. L'optimum peut alors être défini avec assurance.



*Figure 6 Cas fictif d'un optimum bien marqué*

Ce n'est absolument pas le cas dans notre étude, comme l'indique la Figure 7. Cela signifie que la définition d'un optimum va être délicate.

Figure 7 Sensibilité du modèle  
pour les 20 crues communes simulées sur le bassin C



Chacun des graphes présente les isovalues de F pour une valeur donnée de l'un des paramètres et différentes valeurs des deux autres : ainsi pour a),  $K=0.4$  et différentes valeurs de C et de M sont considérées.

Le graphe a) de la Figure 7 montre que sur le domaine exploré, les valeurs des paramètres M et C ne définissent pas une zone minimisant F. La valeur du critère diminuerait, semble-t-il, pour des valeurs plus basses de C et de M. Or la limite inférieure du domaine de définition de chaque paramètre a été définie :

- pour C en considérant l'exigence de réalisme des perméabilités. Il s'agit d'une contrainte sur les valeurs de K et C, provenant de la constatation de terrain suivante : la perméabilité du réseau est généralement supérieure à celle des versants, ou du moins supérieure aux plus faibles valeurs constatées sur les versants. Cela est traduit par la relation suivante :

$$C * K_{s_{réseau}} > K * \text{Minimum}(K_{s_{versant}})$$

- pour M en constatant une instabilité numérique des calculs pour des valeurs de M trop faibles

Il n'aurait donc pas suffi de modifier le domaine de variation des paramètres pour trouver un optimum : nous sommes sur une borne du domaine envisageable.

De plus, les valeurs basses de C donnent une valeur de F qui n'est pas influencée par le paramètre M. En effet, sur les coupes de l'espace des paramètres, la direction des lignes d'isovaleurs de F fait ressortir l'importance de chaque paramètre. Plus ces lignes sont parallèles à un axe, moins le paramètre correspondant a d'influence devant l'autre paramètre considéré. Nous sommes effectivement dans un cas où la détermination d'un optimum est délicate.

Le graphe b) définit une valeur optimale très nette pour le paramètre K. En revanche, c'est sur la borne de son domaine de définition que nous trouvons la valeur du paramètre C minimisant F. Cette borne correspond à l'exigence de réalisme des perméabilités qui a été définie comme une contrainte sur les valeurs de K et de C : c'est certainement le résultat le plus troublant de notre étude, comme nous le verrons par la suite.

Enfin, le graphe c) présente une "vallée" quasi parallèle à l'axe M, c'est à dire que le critère F présente pour un K donné une valeur constante pour toute valeur de M du domaine de définition. C'est un résultat déjà constaté en a) pour les valeurs basses de C. De même, la présence d'une valeur de K minimisant F est un résultat qui a déjà été observé.

Nous pouvons donc conclure de cette analyse de sensibilité que le modèle est fortement sensible aux variations du paramètre K et que viennent seulement ensuite les paramètres C et enfin M, pour lequel la sensibilité est minime.

## 2. Choix d'un optimum de compromis

Afin de pouvoir comparer le comportement des différents bassins, seules les 20 pluies communes aux trois bassins sont introduites dans le modèle. La contrainte sur le réalisme des perméabilités du réseau est aussi prise en compte. Nous constatons alors que le jeu optimal permettant de minimiser  $F$  varie selon le bassin considéré (voir Tableau 3).

<b>Jeu optimal</b> / <b>Bassin</b>	<b>K</b>	<b>C</b>	<b>M</b>
<b>A</b>	0,4	0,05	0,8
<b>B</b>	0,4	0,05	1,6
<b>C</b>	0,4	0,05	1,4

Tableau 3 L'optimum de chaque bassin

Rappelons que les domaines de variation des paramètres vont pour  $K$  de 0.1 à 1.4, pour  $C$  de 0.01 à 7 et pour  $M$  de 0.6 à 1.8 et observons à nouveau que la valeur calée du paramètre  $C$  se situe sur une borne du domaine (la valeur minimale 0.01 ne pouvant être acceptée en raison de la contrainte sur les perméabilités).

Afin d'avoir plus de réalisme dans la description du fonctionnement hydrologique du bassin complet ( $C$ ), nous recherchons un calage du modèle permettant une simulation décrivant le volume ruisselé et le débit de pointe non seulement à l'exutoire du bassin mais aussi aux deux points amonts que sont les deux exutoires des bassins A et B.

Un compromis est donc recherché, permettant d'obtenir un "optimum de compromis". Il s'agit d'un jeu pouvant être considéré comme donnant de bons résultats pour tous les bassins. Ce jeu sera ainsi considéré comme celui permettant au modèle de décrire de la façon la plus juste le bassin versant (bassin C) mais aussi ses sous-bassins (A et B).

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, pour les trois bassins les valeurs de  $C$  minimisant la fonction  $F$  sont très basses et sont limitées par la contrainte de réalisme des perméabilités. Certains jeux de paramètres ont été écartés car ils sont non pertinents pour la description physique du bassin. Les valeurs de  $C$  pour les trois bassins sont donc identiques et égaux à la borne minimale ( $C=0.05$ ). De même, le modèle étant très sensible au paramètre  $K$ , la valeur de ce dernier n'est pas affectée par le changement de bassin et reste identiquement égal 0.4. Seul le paramètre  $M$  est donc modifié lors du changement de bassin, variant de 0.8 à

1.4. Le choix d'un optimum de compromis se réduit donc au choix de la valeur de M. C'est un résultat qui pouvait être attendu dans la mesure où le paramètre M est celui pour lequel le modèle est le moins sensible. Sa valeur est plus facilement modifiable puisque ces modifications n'entraînent pas de dégradation majeure de la fonction critère.

L'optimum de compromis est estimé comme étant le jeu de paramètres donnant un critère minimal pour tous les bassins. Le % de dégradation de F (défini par l'écart entre la valeur de F pour l'optimum du bassin et celle du jeu considéré) est alors calculé pour les jeux de paramètres respectant  $K=0.4$  et  $C=0.05$ .

Les valeurs de M apparaissant comme minimisant la moyenne sur les trois bassins de la dégradation de la fonction critère vont de  $M=1$  à  $M=1.4$ , avec un % de dégradation proche de 14% (voir Figure 8). La valeur  $M=1.2$  se distingue mais nous avons vu que le modèle était peu sensible au paramètre M. Le choix entre ces deux valeurs va donc être précédé d'une étude du % de dégradation de  $F_v$  et de  $F_q$  (définis de façon identique au % de dégradation de F), afin de vérifier que la valeur M représente un compromis satisfaisant.

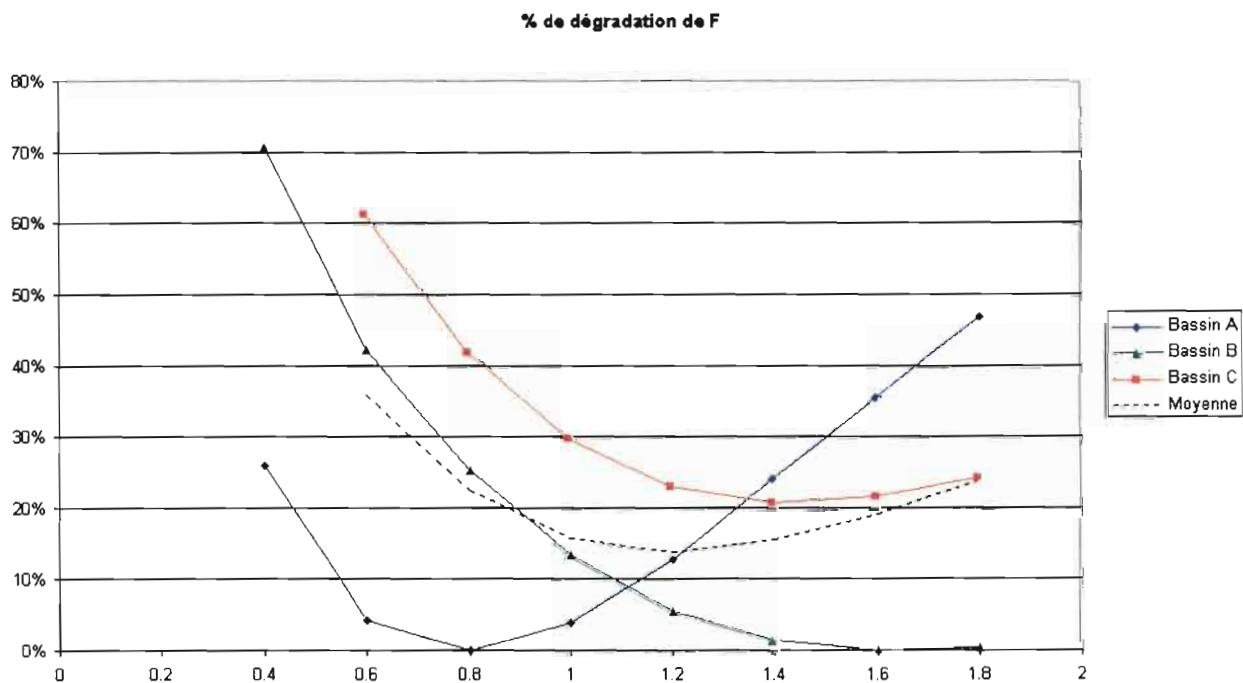
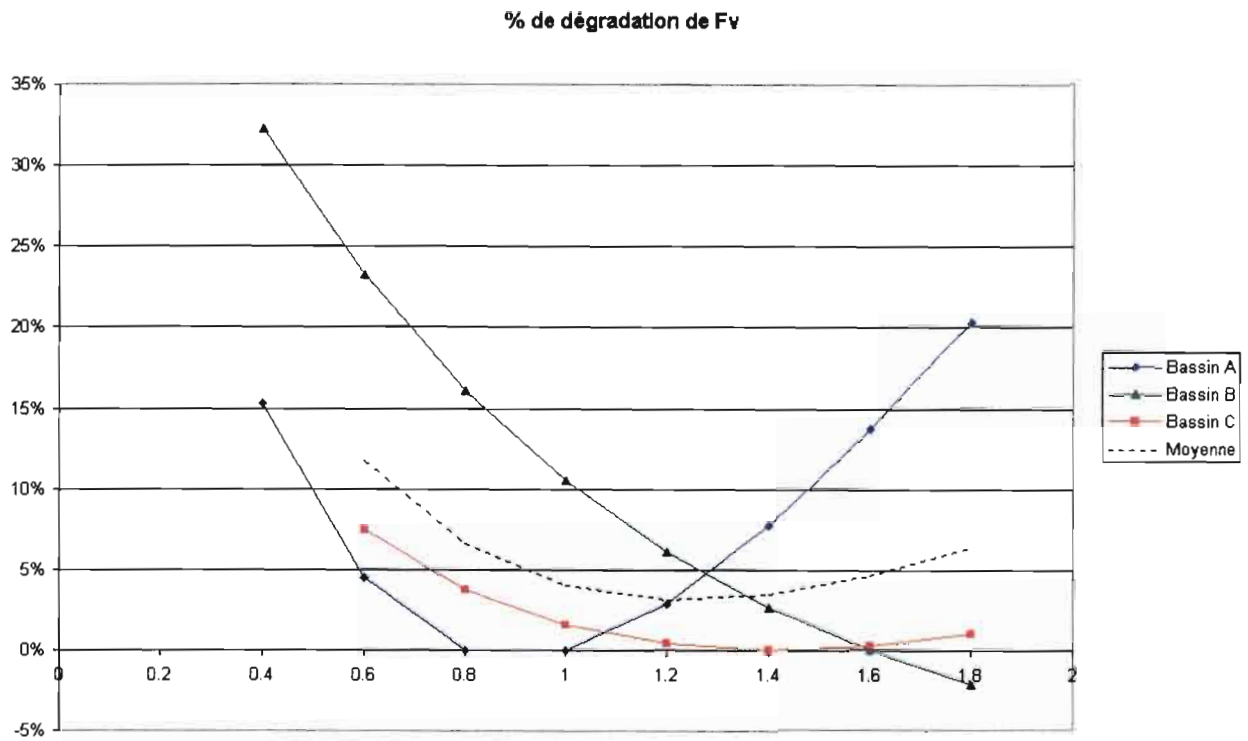
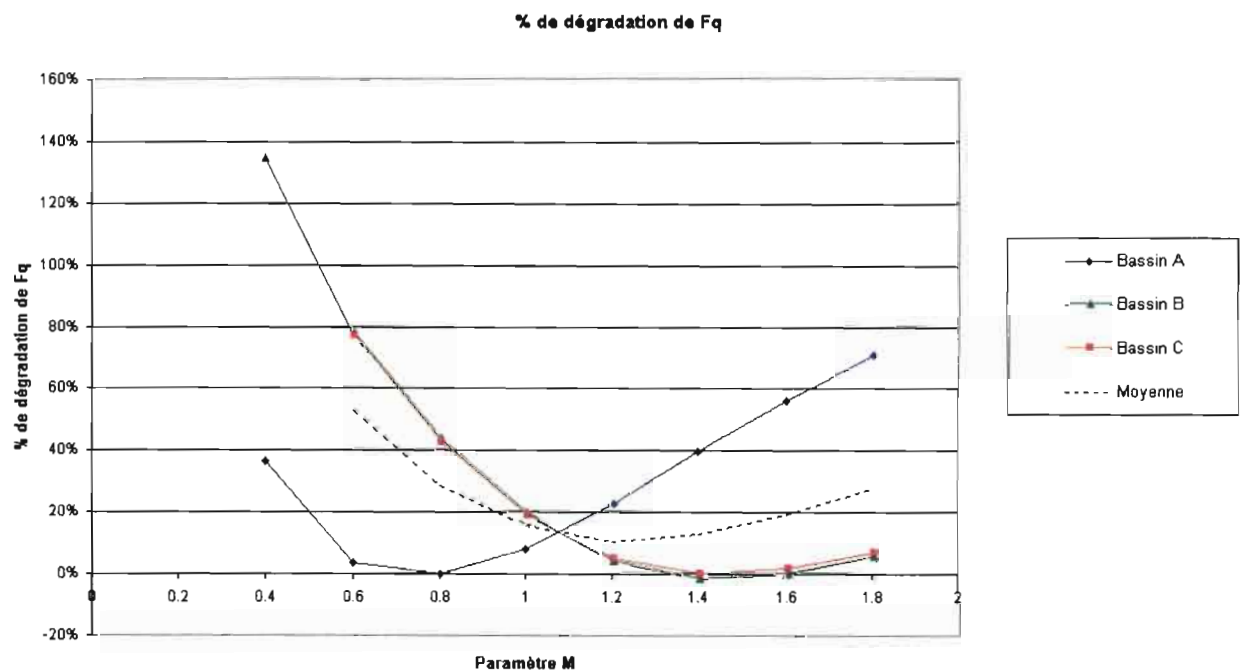


Figure 8 Dégradation de la F selon la valeur de M



*Figure 9 Dégradation de Fv selon la valeur de M*



*Figure 10 Dégradation de Fq selon la valeur de M*

Sur la Figure 9, on observe que les jeux définis par  $M=1$  et  $M=1.4$ , qui présentent une moyenne du % de dégradation de Fv sur les trois bassins très proche de celle de  $M=1.2$ , sacrifient l'un et l'autre la performance sur l'un des bassins. Pour  $M=1$ , c'est le bassin B qui

connaît une forte dégradation de  $F_v$ , pour  $M=1.4$ , il s'agit du bassin A. Or nous n'avons aucun argument justifiant de privilégier l'un ou l'autre des sous-bassins.

Sur la Figure 10, pour  $M=1.4$  on observe une très forte dégradation de la valeur de  $F_q$  du bassin A. Mais comme précédemment, rien ne justifie que l'on privilégie B devant A. Pour  $M=1$ , un équilibre semblable au cas  $M=1.2$  est conservé, avec des % de dégradation proches pour les trois bassins (de 10 à 20%). Mais en revanche, le bassin C se retrouve dégradé devant les deux sous-bassins. Or, si nous n'avons aucune raison de privilégier l'un ou l'autre des sous-bassin (A et B), la simulation du bassin C peut en revanche être considérée comme prioritaire, étant le bassin le plus grand.

Parmi les trois jeux minimisant le % dégradation de F, les jeux  $M=1$  et  $M=1.4$  provoquant des disparités fortes entre les différents bassins ou augmentant la dégradation du bassin C, c'est le jeu de paramètre défini par  $M=1.2$  qui est choisi comme meilleur calage de compromis.

L'optimum de compromis est ainsi choisi comme étant le jeu de paramètre suivant :

K	C	M	F (bassin A)	F (bassin B)	F (bassin C)
0,4	0,05	1,2	0.37	0.54	0.49

Tableau 4 L'Optimum de Compromis

Il faut souligner que la valeur de la fonction critère dépend étroitement de l'échantillon choisi et que les valeurs de F ne sont pas directement comparables entre elles. Cela est dû au fait que la fonction F est normée : dans sa définition même (voir page 18) le dénominateur est lié à la variance de l'échantillon observé. Cette échantillon dépend naturellement du bassin.

Ces valeurs seront donc mises en regard des valeurs obtenues pour d'autres jeux de paramètres sur le même bassin et pour le même échantillon (voir Tableau 5).

### 3. Représentation dans l'espace des critères

Les deux fonctions  $F_v$  et  $F_q$  permettant le calcul du critère F indiquent l'écart entre la simulation et l'observation respectivement des volumes et des débits de pointe. Si nous représentons chaque jeu de paramètres dans le plan ( $F_v$ ,  $F_q$ ), nous visualisons la performance des jeux selon les deux critères, et non plus simplement en fonction de la seule valeur de F.

Pour chacun des bassin, nous retrouvons à proximité de l'optimum absolu deux jeux que nous avons déjà décrits : l'optimum de compromis, choisi justement pour minimiser les écarts sur

les trois bassins, et le meilleur jeu respectant la contrainte sur les perméabilités (voir Figure 11 pour le bassin C).

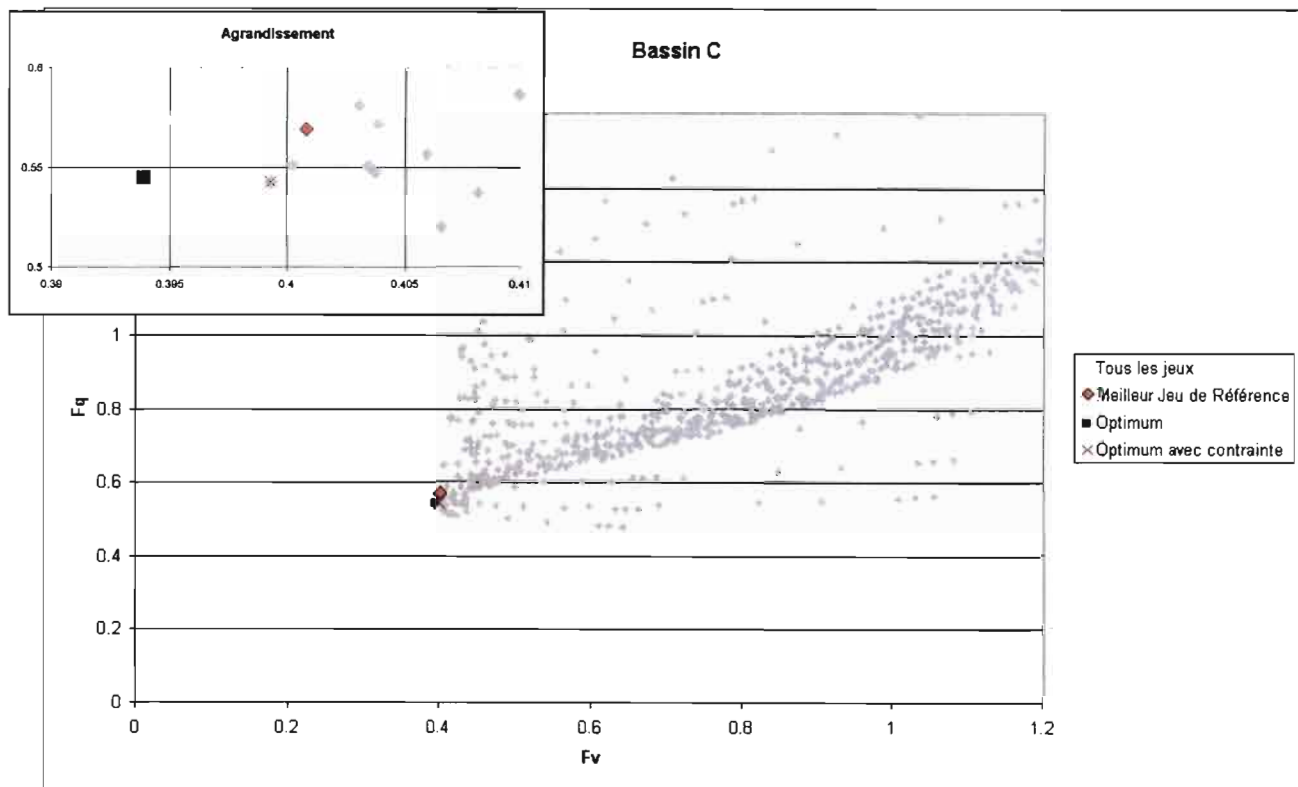


Figure 11 Les simulations du Bassin C dans l'espace des critères ( $F_v, F_q$ )

- *Influence de la contrainte*

Nous avons constaté que la définition d'une contrainte sur les perméabilité modifiait le calage du modèle. En effet, le jeu de paramètres minimisant  $F$  est obtenu en donnant à  $C$  une valeur très faible, conduisant à une perméabilité  $C_xK_s$  plus faible que celle observée sur le terrain. Nous avons en effet imposé une relation entre les perméabilités du versant et du réseau (la perméabilité du réseau est au moins supérieure aux plus faibles perméabilités de versants) revient à éliminer les valeurs très faibles de  $C$  et donc à changer l'optimum.

Cependant l'influence de la contrainte apparaît très nettement dans le plan ( $F_v, F_q$ ) comme étant négligeable en terme de critère. L'écart de critère entre optimum avec et sans contrainte est tout juste perceptible et il est surtout bien inférieur à la dégradation apportée par la recherche d'un jeu de référence unique pour les trois bassins (voir ci dessous). Ce résultat n'est pas surprenant puisque nous avons observé que la sensibilité du modèle était très faible vis à vis du paramètre  $C$ . La valeur des paramètres de calage est donc effectivement modifiée mais sans dégradation notable du critère.

- *Optimum de Compromis*

La visualisation dans l'espace  $F_v F_q$  de l'optimum de compromis fait mieux apparaître la façon dont cet optimum a été choisi. Ainsi sur le sous-bassin A, le compromis a-t-il été obtenu au prix d'une légère dégradation du critère  $F_q$ , sans modification de la valeur de  $F_v$ , que l'on juge importante. Sur le sous-bassin B, c'est l'inverse qui se produit, avec une dégradation nette de  $F_v$  et une valeur de  $F_q$  peut affectée. Enfin, sur le bassin complet, le bassin C, le compromis est obtenu au prix d'une dégradation infime de  $F$  également répartie sur  $F_v$  et  $F_q$ .

Le choix d'un optimum de compromis a impliqué une situation paradoxale : le jeu de paramètres retenu pour le calage du modèle n'est le plus performant sur aucun des bassins. Il est important de constater ici que la dégradation consentie n'est pas majeure.

#### **4. Bilan des résultats obtenus**

Le Tableau 5 présente les différents jeux de paramètres remarquables, pour chaque bassin, avec les valeurs des fonctions  $F$ ,  $F_v$  et  $F_q$  calculées sur les 20 pluies communes.

Pour les différents bassins, on peut ainsi comparer l'évolution des paramètres et des fonctions critères lors de la prise en compte de la contrainte sur les perméabilités ou lors de la recherche d'un jeu de compromis.

On observe ainsi que pour chaque bassin, les valeurs des fonctions critères ( $F$ ,  $F_v$  et  $F_q$ ) ne sont quasiment pas affectées par la contrainte : la différence se fait généralement au millième, alors que les variations des paramètres sur leur domaine ont conduit à des différences de plusieurs dixièmes (cent fois plus fortes donc). On peut aussi observer que le choix de l'optimum de compromis n'a pas affecté de la même manière les trois bassins, l'accent ayant été mis sur une bonne modélisation du bassin C, et que c'est principalement le critère  $F_q$  qui a été dégradé. En effet, le compromis s'est fait sur la valeur du paramètre  $M$ . Or  $M$  influence surtout le débit de pointe et moins le volume. Ce paramètre lisse ou accentue l'hydrogramme du volume ruisselé, en modifiant peu son intégrale.

Bassin	Optimum	K	C	M	F	Fv	Fq
A	Optimum	0,4	0,05	0,8	<b>0,33</b>	0,23	0,45
	Optimum, sans la contrainte sur les perméabilités	0,4	0,01	0,8	<b>0,32</b>	0,23	0,45
	<b>Optimum de compromis</b>	0,4	0,05	1,2	<b>0,37</b>	0,24	0,55
B	Optimum calculé	0,4	0,05	1,6	<b>0,52</b>	0,43	0,57
	Optimum sans la contrainte sur les perméabilités	0,4	0,01	1,6	<b>0,51</b>	0,43	0,57
	<b>Optimum de compromis</b>	0,4	0,05	1,2	<b>0,54</b>	0,46	0,60
C	Optimum	0,4	0,05	1,4	<b>0,48</b>	0,40	0,54
	Optimum sans la contrainte sur les perméabilités	0,4	0,01	1,6	<b>0,48</b>	0,39	0,55
	<b>Optimum de compromis</b>	0,4	0,05	1,2	<b>0,49</b>	0,40	0,57

Tableau 5 Les différents jeux de paramètres remarquables

## B. Étude de l'Optimum de Compromis

### 1. Comparaison des volumes

Pour l'ensemble de l'échantillon commun aux trois bassins, nous avons comparé les volumes d'eau ruisselée simulés par le modèle calé sur l'optimum de compromis, aux volumes observés sur le terrain. Nous avons procédé à une comparaison graphique (voir Figure 12) et avons pu observer que les erreurs commises dans la modélisation ne sont pas très importantes, les simulations se plaçant généralement à proximité de la première bissectrice.

D'autre part, une différence dans le comportement du modèle en fonction de l'importance des événements s'est révélée manifeste. Pour des événements provoquant peu de ruissellement, le modèle sous-estime systématiquement le volume ruisselé et semble même incapable de le simuler : les plus faibles ruissellements sont en effet simulés comme identiquement nuls.

En revanche, pour des crues plus importantes, la simulation peut aussi bien surestimer les volumes (cas du bassin B et dans une moindre mesure du bassin C) que les sous-estimer (bassin A). Le comportement du modèle est ici difficile à évaluer précisément, le nombre

d'évènements de grande importance (en terme de volume ruisselé) étant réduit : seules trois pluies provoquent des ruissellements supérieurs au milieu de l'intervalle de variation de l'échantillon complet (600, 1200 ou 1500 m<sup>3</sup> selon le bassin).

## **2. Comparaison des débits de pointe**

Une comparaison similaire a été faite pour les débits de pointe à l'exutoire simulés par le modèle (toujours calé sur l'optimum de compromis) et mesurés sur le terrain (voir Figure 13).

Si une sous-estimation des débits de pointe pour les petites pluies est toujours observée, cela semble s'apparenter à un comportement véritablement biaisé du modèle. Les débits de pointe observés sont en effet sous-estimés jusqu'à des valeurs de 0.4m<sup>3</sup>/s, ce qui représente près du tiers du débit maximum observé, mais les modélisations ne sont pas dispersées et elles suivent une évolution nette : les valeurs les plus faibles sont simulées comme étant quasiment nulles, puis les suivantes rejoignent la première bissectrice selon une tendance linéaire.

Figure 12 Volumes Observés/Volumes Simulés

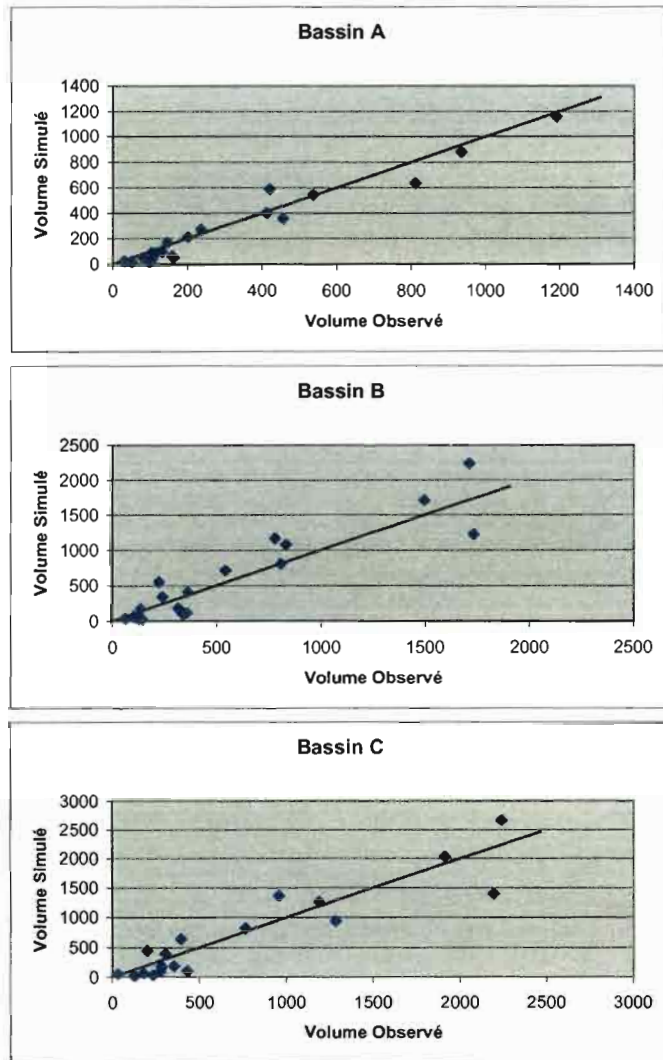
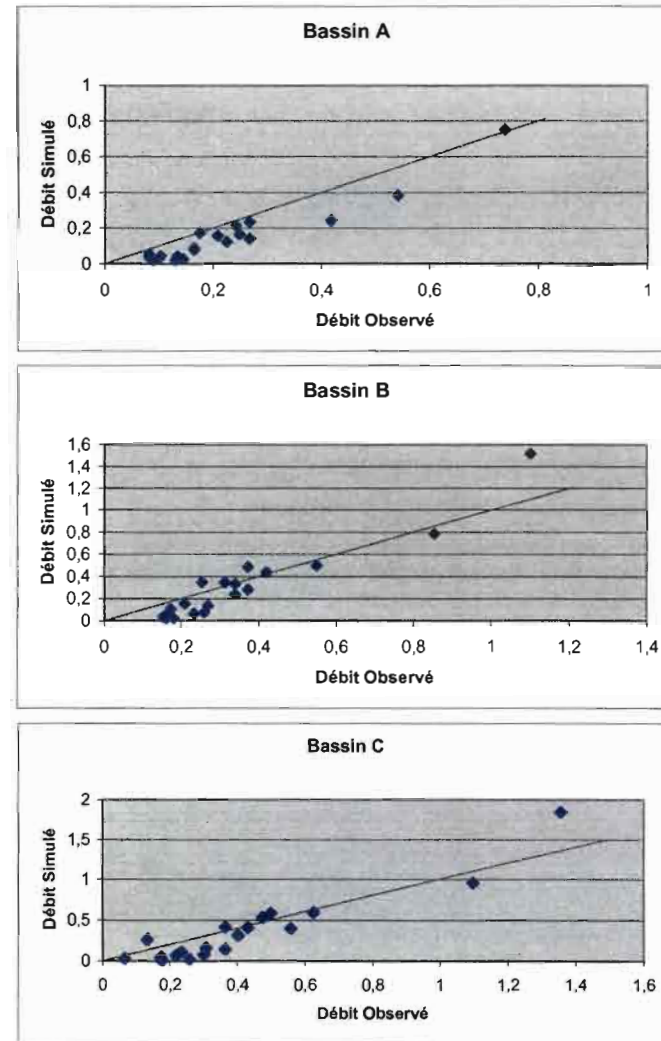


Figure 13 Débits de pointe Observés/Débits de pointe Simulés



### 3. Observation de quelques hydrogrammes

Afin de mieux prendre la mesure de la pertinence du modèle, nous avons réalisé les hydrogrammes d'un ensemble d'évènements. Nous avons choisi pour cela deux séries d'évènements : une première correspondant à des évènements pour lesquels la simulation est performante, une seconde où les simulations sont peu performantes. Au sein de chaque série, nous avons choisi un évènement de petite, de moyenne et de grande importance (au sens du volume d'eau ruisselé). L'ensemble de ces hydrogrammes est en annexe (Annexe 1 à 3) : nous ne présentons ici que ceux de la Figure 14, pour deux évènements moyens observés sur le bassin C.

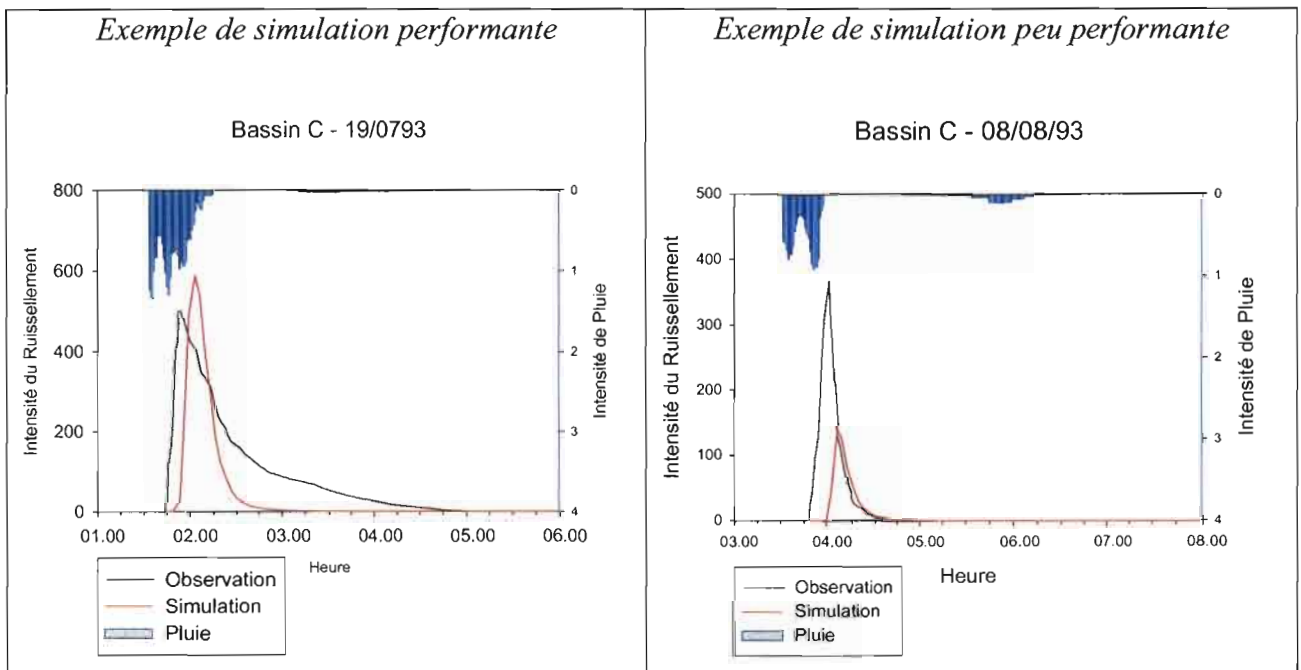


Figure 14 Exemple d'hydrogrammes lors d'évènements de moyenne importance

Nous remarquons tout d'abord un retard de la simulation sur l'observation. Ce retard est présent sur l'ensemble des hydrogrammes visualisés : il ne dépasse cependant que rarement la dizaine de minutes. Notre objectif n'étant pas une prévision des évènements individuels (dans une optique de gestion des risques par exemple), ce biais n'est pas un problème.

D'autre part, la forme de l'hydrogramme est bien conservée. Les simulations dites "peu performantes" reproduisent elle-aussi cette forme : on ne peut considérer que le modèle reproduit mal les écoulements que pour des évènements de très faibles importance, constatation que nous avons déjà faite, pour lesquels le modèle sous-estime drastiquement le ruissellement. Pour les autres, l'allure générale est conservée, comme on peut le voir sur les deux exemples présentés ici.

Enfin, il ne faut pas perdre de vue que l'objectif de cette simulation est une meilleure compréhension de la ressource en eau : la valeur du débit de pointe n'a été choisie comme critère (par la fonction  $F_Q$ ) qu'en tant qu'indicateur simple de la forme générale de l'hydrogramme. Il est donc intéressant d'observer ici que même pour une simulation peu performante au sens des critères, le modèle ne produit pas un hydrogramme extrêmement différent de celui observé.

#### **4. Conclusion**

A l'aide de ces quelques observations sur les volumes, les débits de pointe et les hydrogrammes simulés, nous n'avons pu mettre en évidence d'erreurs majeures ou de simulations aberrantes : le modèle calé sur l'optimum de compromis donne donc apparemment des résultats globalement satisfaisants pour les crues ayant servi au calage.

Nous avons pu observer chacune des simulations et, limite manifeste du modèle s'ajoutant à celle posée par le calage du paramètre C sur une borne, mettre en évidence un défaut de modélisation des petites crues. Mais l'évaluation réelle du modèle ne peut être faite avec précision avec les seules données étudiées. Nous avons donc cherché à faire intervenir d'autres événements pluvieux, jusque là inutilisés.

### **C. Validation du Calage**

#### **1. Démarche**

Notre modèle a été calé sur un optimum de compromis, à partir d'un échantillon de 20 pluies communes aux trois bassins. Cependant les données concernant d'autres événements étaient connues : nous les avons regroupées et formé un échantillon de validation. Ce nouvel échantillon a été utilisé pour vérifier la capacité du modèle à prévoir le comportement d'évènements qui n'ont pas joué de rôle dans son calage.

Il faut remarquer que ces données sont en nombre plus faible (7 à 18 pluies selon le bassin) et correspondent souvent à des pluies dont le cumul est de petite ou de moyenne importance. Nous pouvions donc nous attendre à observer des simulations peu performantes ou même donnant des résultats en complète contradiction avec ceux obtenus précédemment : en effet, le modèle a présenté lors du calage des faiblesses manifestes dans la simulation des événements de petite importance et son comportement est mal compris pour cette catégorie de crues.

## 2. Résultats

- *Évaluation par comparaison des volumes*

La visualisation sur un graphe "Volume Observé/Volume Simulé" ( Figure 15 à Figure 17) des nouveaux évènements permet de prendre la mesure de la pertinence du modèle. C'est un résultat positif qui apparaît : les nouvelles simulations (triangles jaunes) s'insèrent en effet au milieu des crues de calage (points sombres) pour tous les bassins, sans présenter de biais, de distorsion ou de dispersion importante. Les petits ruissellements sont certes toujours sous-estimés mais cette faiblesse du modèle est de même ampleur que ce soit avec les nouvelles crues ou avec les anciennes.

Notons que les crues disponibles pour le bassin B (Figure 16) sont toutes de faible importance et n'apportent donc aucune information sur la performance du modèle : seule sa faiblesse vis à vis de ce type de ruissellement est mise en valeur.

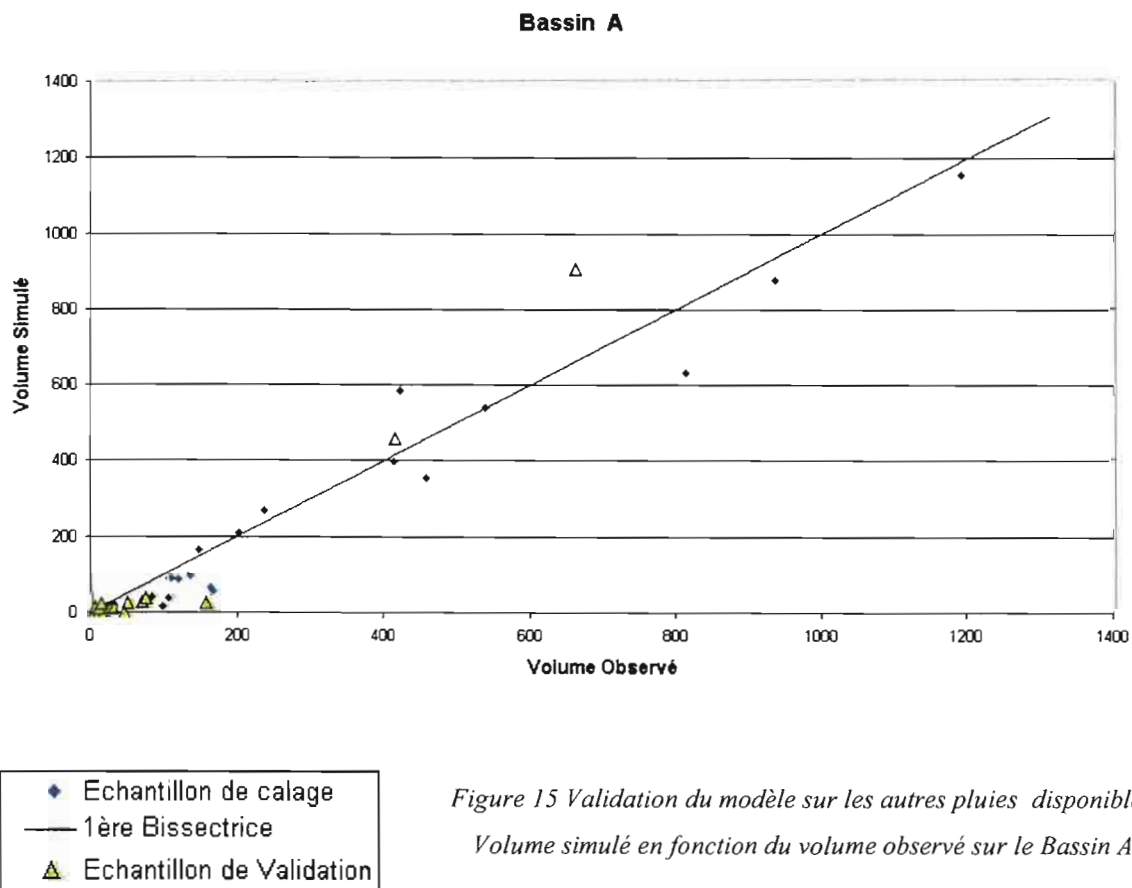


Figure 15 Validation du modèle sur les autres pluies disponibles ;  
Volume simulé en fonction du volume observé sur le Bassin A.

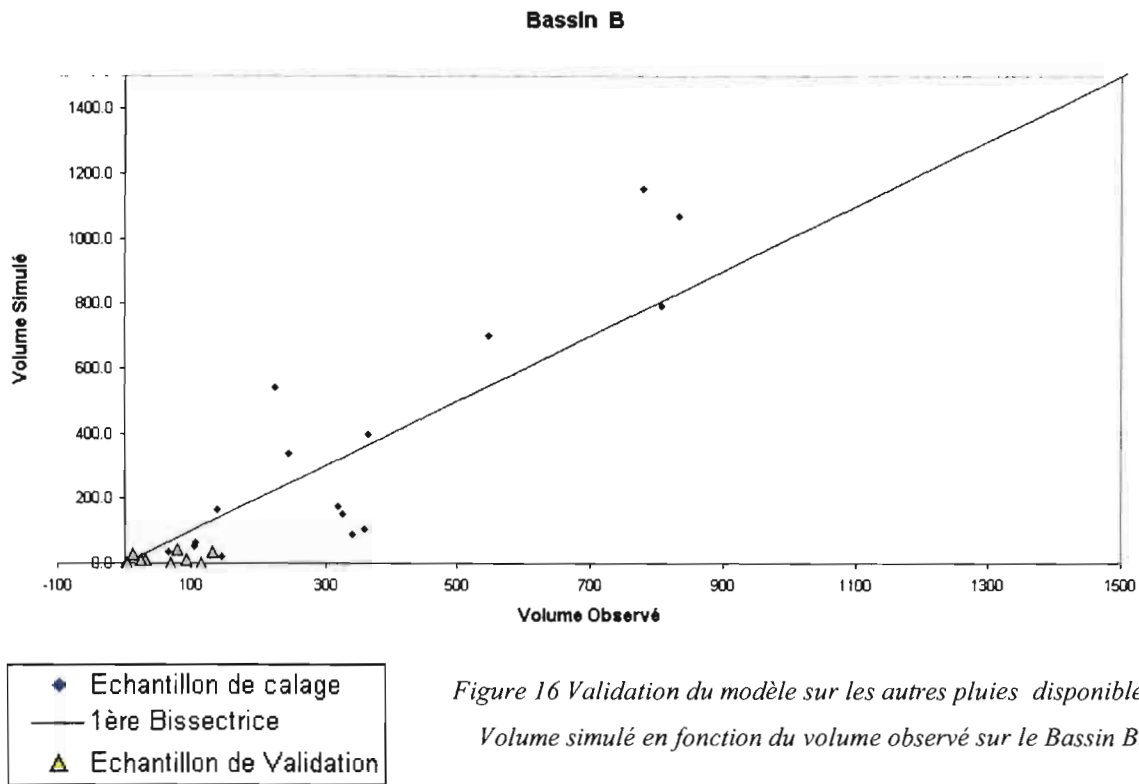


Figure 16 Validation du modèle sur les autres pluies disponibles ;  
Volume simulé en fonction du volume observé sur le Bassin B.

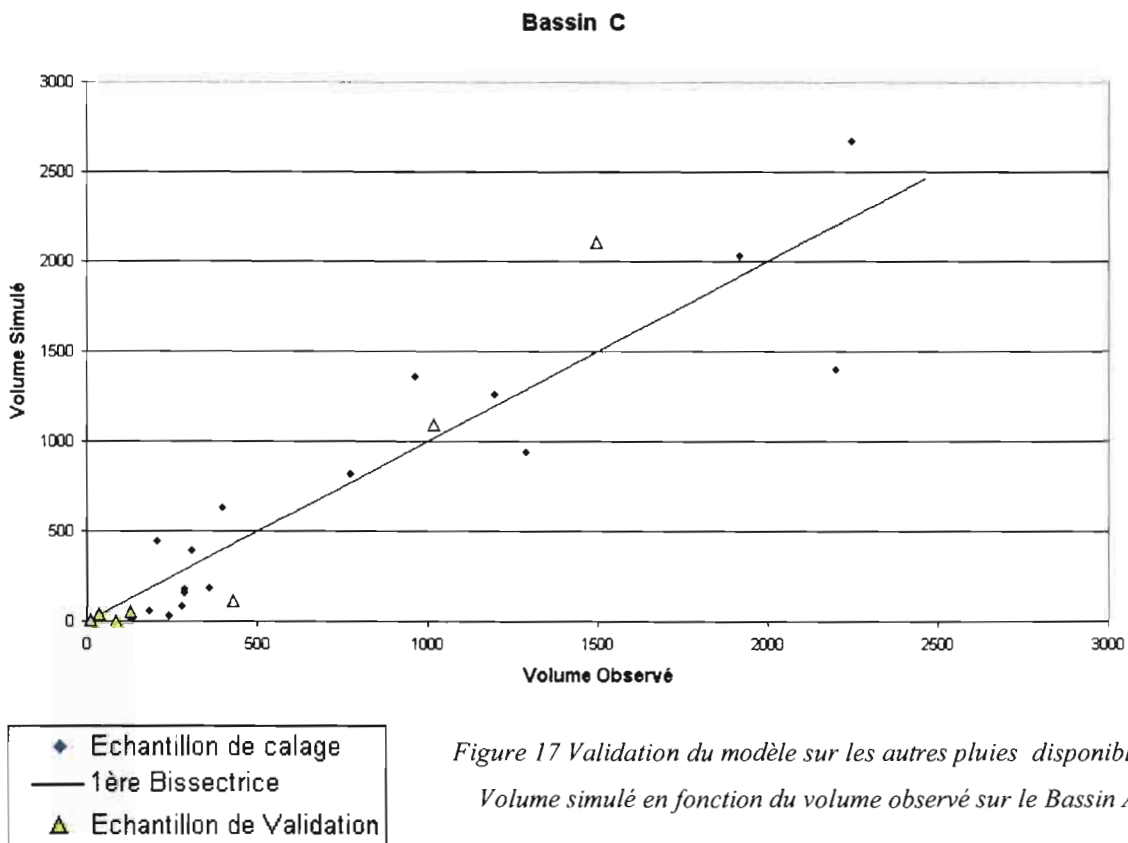


Figure 17 Validation du modèle sur les autres pluies disponibles ;  
Volume simulé en fonction du volume observé sur le Bassin A.

Des résultats tout à fait semblables sont obtenus pour les bassins A, B et C lors de la visualisation des échantillons de validation sur un graphe "Débit Observé/Débit Simulé".

- *Évaluation par la fonction critère*

Le calcul de la fonction critère F pour les nouveaux événements rend aussi compte de la performance de la validation. Il faut souligner que la valeur de la fonction critère dépend étroitement de l'échantillon choisi et que les valeurs de F ne sont pas directement comparables entre elles. Cela est dû au fait que la fonction F est normée : dans sa définition même (voir page 18) le dénominateur est lié à la variance de l'échantillon observé. Dans le cas d'échantillons aussi différents, elles ne donnent qu'une indication générale.

Bassin	Calage (20 pluies)			Validation			
	F	Fv	Fq	F	Fv	Fq	Nombre de pluies
A	<b>0.37</b>	0.24	0.55	<b>0.47</b>	0.41	0.47	18
B	<b>0.54</b>	0.46	0.60	<b>1.41</b>	1.23	1.37	9
C	<b>0.49</b>	0.40	0.57	<b>0.52</b>	0.49	0.38	7

*Tableau 6 Performance du modèle en validation*

Les simulations menées sur les bassins A et C nous ont donné de bons résultats. La valeur du critère est restée dans la gamme des valeurs attendues et les fonctions Fv et Fq donnent des résultats semblables, indiquant que les volumes comme les débits sont correctement reproduits.

La simulation lancée sur le bassin B a donné des valeurs de F, Fv et Fq nettement supérieures à celles usuellement constatées : cela n'est pourtant n'est pas interprété comme une remise en question du calage. D'une part, la valeur des fonctions critères dépend de l'échantillon de crue considéré. D'autre part, comme nous l'avons déjà remarqué, les crues simulées sur le bassin B sont toutes de très faible importance. Or nous connaissons les défaillances du modèle pour les petites pluies.

### 3. Validation sur le bassin D

Afin de compléter la précédente validation, nous avons procédé à la simulation d'un échantillon de 26 crues sur le Bassin D avec le jeu de paramètre de l'Optimum de Compromis. Nous obtenons bien sûr une valeur de critère mais qu'il n'est pas possible de commenter précisément sans la comparer à d'autres valeurs obtenues dans les mêmes conditions, comme nous l'avons déjà signalé. Nous ne pouvons donc que dire nous obtenons une valeur de l'ordre de grandeur précédemment observé sur les bassins A à C.

K	C	M	F	Fv	Fq
0.4	0.05	1.2	0.66	0.43	1.00

*Tableau 7 Valeurs des critères sur le bassin B à l'optimum de compromis*

Pour aller plus loin, il nous faut nous pencher sur des représentations détaillant les événements un à un. Nous ne prendrons comme visualisation qu'un graphe de type volume observé/volume simulé : ce type de visualisation a en effet déjà été observé précisément et commenté pour les autres bassins.

Ainsi, sur la Figure 18, nous constatons que la simulation des volumes de ruissellement par le modèle calé sur l'Optimum de Compromis est en bonne adéquation avec l'observation de ces volumes. Les volumes simulés se placent le long de la première bissectrice de la même façon que se plaçaient ceux des bassins de calage : les crues de faible importance sont sous-estimées, celles de moyenne et de grande importance sont plus fidèlement simulées.

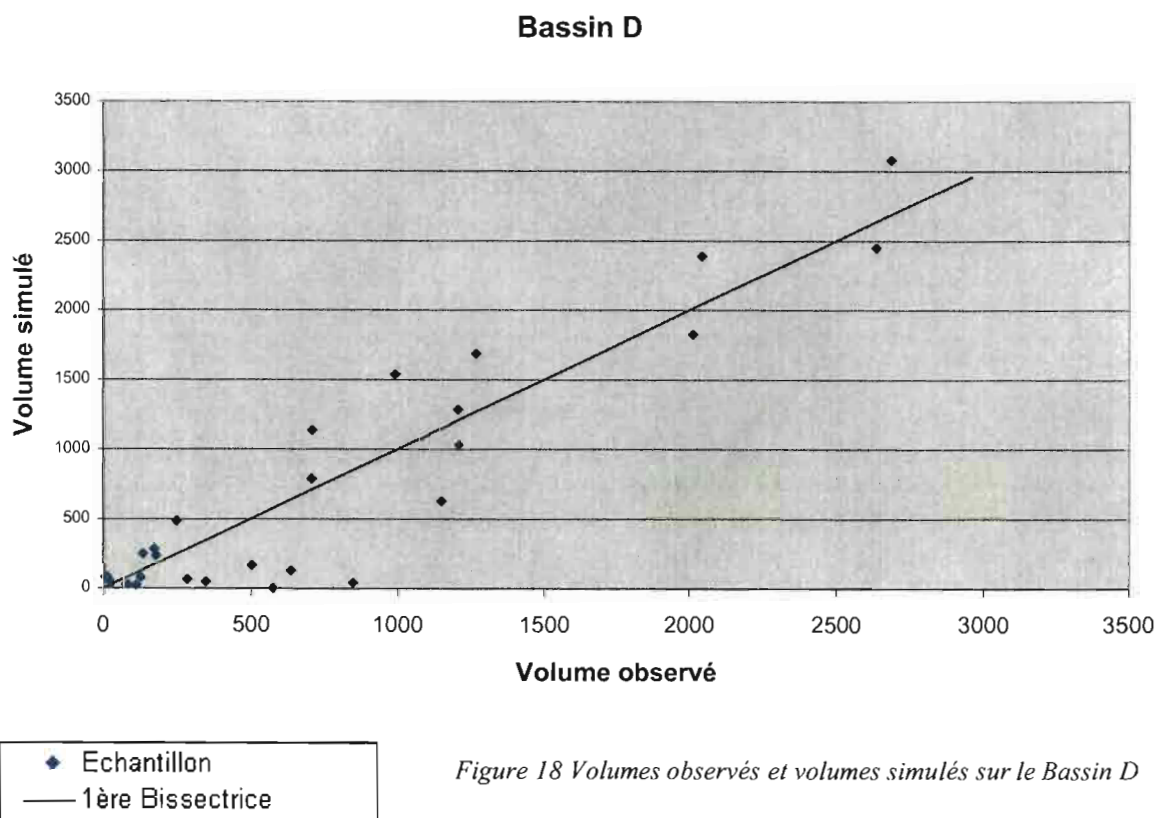


Figure 18 Volumes observés et volumes simulés sur le Bassin D

#### 4. Conclusion

Malgré la taille réduite des échantillons de validation et donc leur représentativité limitée, cette validation reste pertinente, car elle est effectuée de façon indépendante sur trois bassins, avec des jeux de pluies différents. Ils sont de plus confirmés par une validation sur un quatrième bassin, doté d'un échantillon de crues bien plus conséquent.

Les résultats sont satisfaisants et permettent de considérer que le calage sur un optimum de compromis a été un bon choix, permettant une prévision satisfaisante des événements par le modèle.

## II. Discussion

Après avoir réalisé le calage du modèle sur les bassins de Banizoumbou et obtenu des résultats satisfaisants, nous nous interrogeons à présent sur la transposabilité du modèle calé sur le bassin de Wankama.

### A. Étude de la transposabilité du calage de Wankama

#### 1. Performance du jeu de paramètres

Le calage du modèle sur le bassin de Wankama a été obtenu pour le jeu de paramètres suivant:  $K=0.75$ ,  $C=5$ ,  $M=1.25$ .

Nous nous sommes penché sur la performance de ce jeu de paramètres sur les bassins versants de Banizoumbou. Le fait est que ce jeu apparaît sur les bassins de notre étude comme étant très peu performant en terme de critère.

Bassin	Jeu de paramètres	K	C	M	F
A	Jeu de Wankama	0.75	5	1.25	0.95
	Optimum de Compromis	0.4	0.05	1.2	0.37
B	Jeu de Wankama	0.75	5	1.25	0.98
	Optimum de Compromis	0.4	0.05	1.2	0.54
C	Jeu de Wankama	0.75	5	1.25	0.99
	Optimum de Compromis	0.4	0.05	1.2	0.40

Tableau 8 Comparaison entre le jeu de Wankama et l'Optimum de Compromis

L'écart entre la valeur optimale du critère et la valeur donnée par le calage de Wankama va de 100% à 200% selon le bassin considéré. Plus significatif encore, la valeur du critère se place dans le tiers le plus élevé des valeurs obtenues lors de notre exploration de l'espace. Ainsi pour le bassin C, nous avons pu observer des valeurs du critère allant de 0.4 à 1.3, or le jeu de Wankama donne une valeur voisine de 1 (voir Figure 15).

Notons aussi que les fonctions critères  $F_v$  et  $F_q$  sont dégradées de façon voisine et que la modification de la valeur de  $F$  ne provient pas d'un seul défaut de simulation des volumes ou des débits de pointe, mais bien d'un écart sur les deux valeurs.

Une telle dégradation des fonctions critères nous force à considérer le calage de Wankama comme non performant pour les bassins de Banizoumbou.

## 2. Étude plus détaillée du jeu

Afin de mieux comprendre les raisons qui rendent le jeu de calage obtenu à Wankama aussi peu performant à Banizoumbou, nous nous sommes penchés sur l'hypothèse d'une mauvaise description du réseau.

Nous avons en effet déjà signalé que les valeurs du  $K_s$  et du coefficient  $n$  étaient définis avec une certaine précision sur les bassins versants, mais qu'en revanche ces caractéristiques étaient données avec bien moins d'assurance pour le réseau. Rappelons à cet effet que la taille des bassins de Banizoumbou et de Wankama sont très différentes ( $0.5 \text{ km}^2$  contre  $2 \text{ km}^2$ ) et que la surface accumulée en tête du réseau n'est donc pas de même importance (1 ha à Banizoumbou contre 10 ha pour Wankama). Nous avons donc émis l'hypothèse qu'une partie importante de la mauvaise performance du jeu de Wankama provenait d'une description de la perméabilité du réseau.

Nous avons recherché dans un premier temps le meilleur jeu conservant des valeurs de  $K$  et de  $M$  proches de celles du calage précédemment défini à Wankama. Le jeu minimisant  $F$  dans ces conditions est défini par  $K=0.7$ ,  $C=0.01$  et  $M=1.2$ , pour les trois bassins. Mais on observe là encore une forte dégradation du critère : le jeu est encore très éloigné de l'optimum avec 30% à 120% d'écart selon le bassin (voir Figure 19, Figure 20 et Figure 21) entre la valeur optimale du critère et la nouvelle valeur calculée. Cette dernière se place tout juste dans la première moitié de l'intervalle des valeurs : ainsi pour le bassin C, obtient-on un critère égal à 0.65 pour un intervalle observé allant de 0.4 à 1.3.

Poursuivant dans notre hypothèse, nous nous sommes limités à imposer la seule valeur de  $K$ , laissant les valeurs de  $M$  et de  $C$  être calées. La valeur de  $M$  s'impose en effet à tout le bassin, indistinctement sur les versants et sur le réseau. Ce paramètre peut donc influencer là aussi sur la représentation des processus dans le réseau.

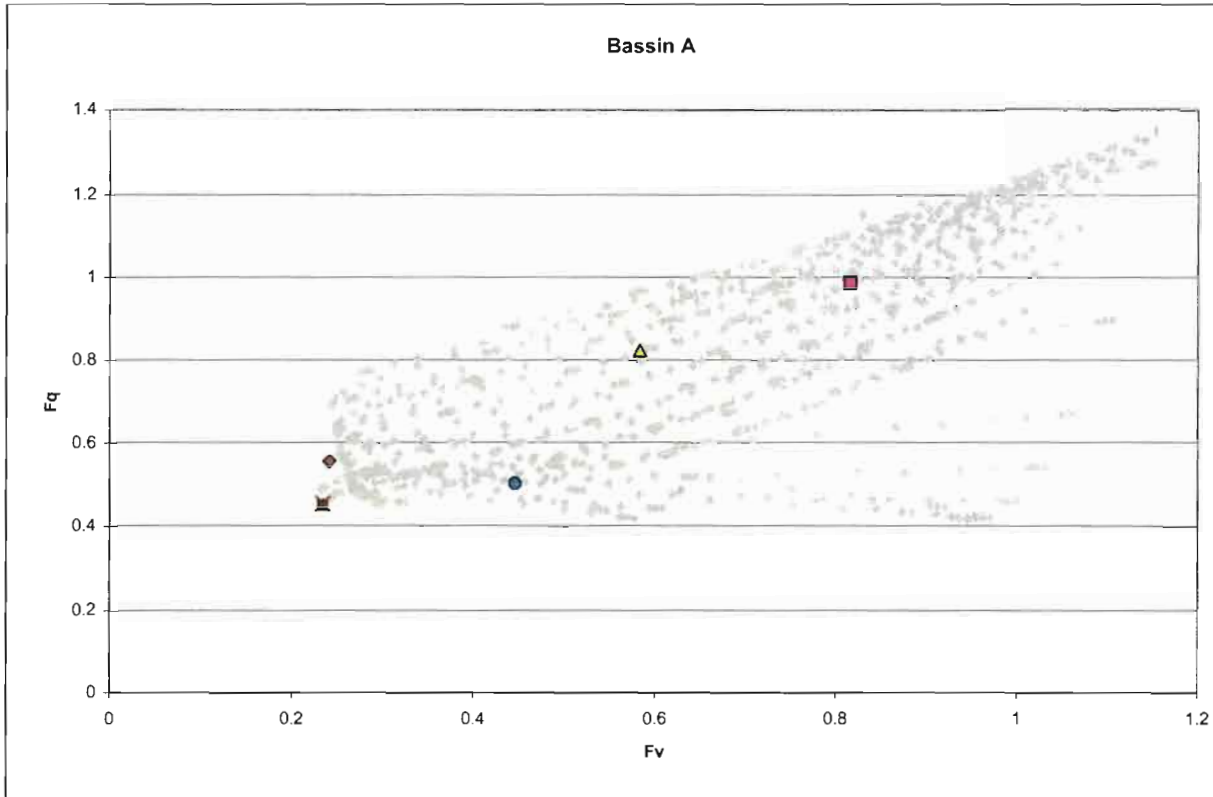
Les jeux obtenus par ce calage sont les suivants :

- $K=0.7$ ,  $C=0.01$ ,  $M= 0.4$  pour le bassin A (il s'agit d'une borne en  $M$ )
- $K=0.7$ ,  $C=0.01$ ,  $M= 0.8$  pour le bassin B
- $K=0.7$ ,  $C=0.01$ ,  $M= 0.6$  pour le bassin C

Mais ces jeux donnant la plus petite valeur du critère sont encore éloignés de l'optimum de 26% à 58% selon le bassin et n'améliorent que faiblement le jeu obtenu dans l'hypothèse précédente. La valeur de  $F_q$ , dont on sait que c'est le critère sur lequel  $M$  influe, n'est nettement améliorée que pour les bassins A et B, malgré le calage de la valeur de  $M$ , tandis

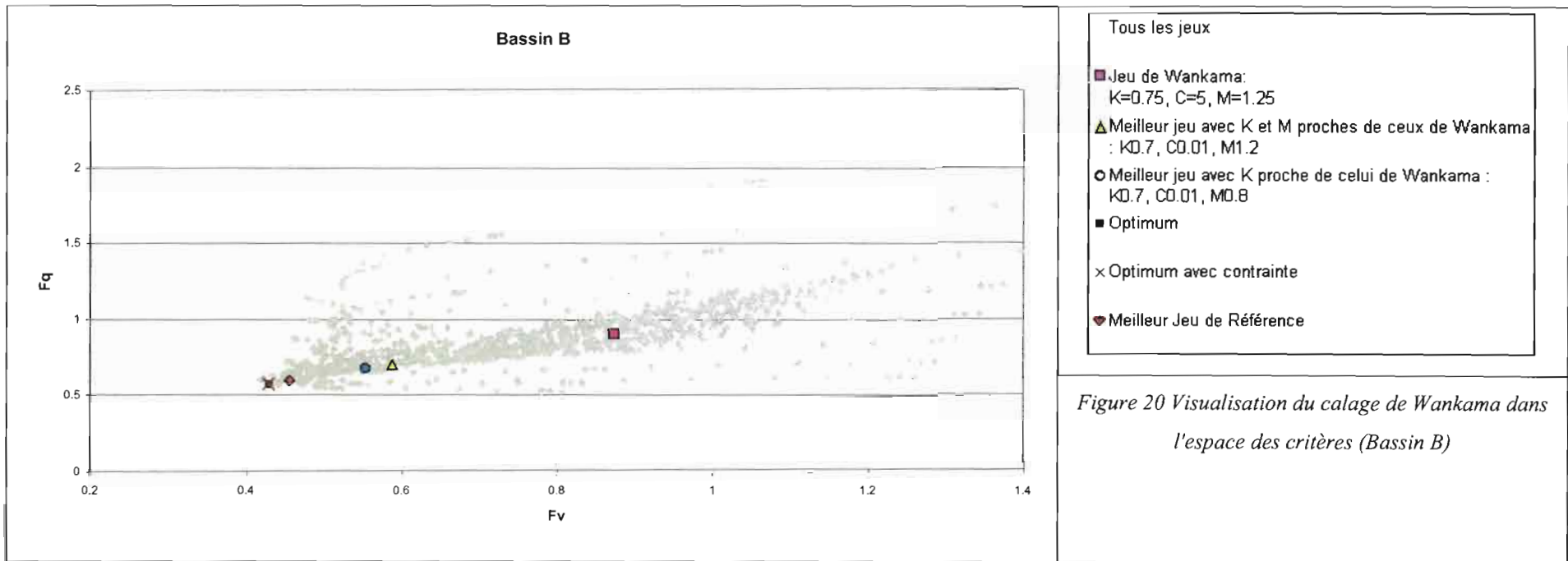
que la valeur de  $F_v$  reste bien éloignée de l'optimum. De plus, le bassin A se cale pour une valeur de  $M$  appartenant à la limite inférieure du domaine ( $M=0.4$ ).

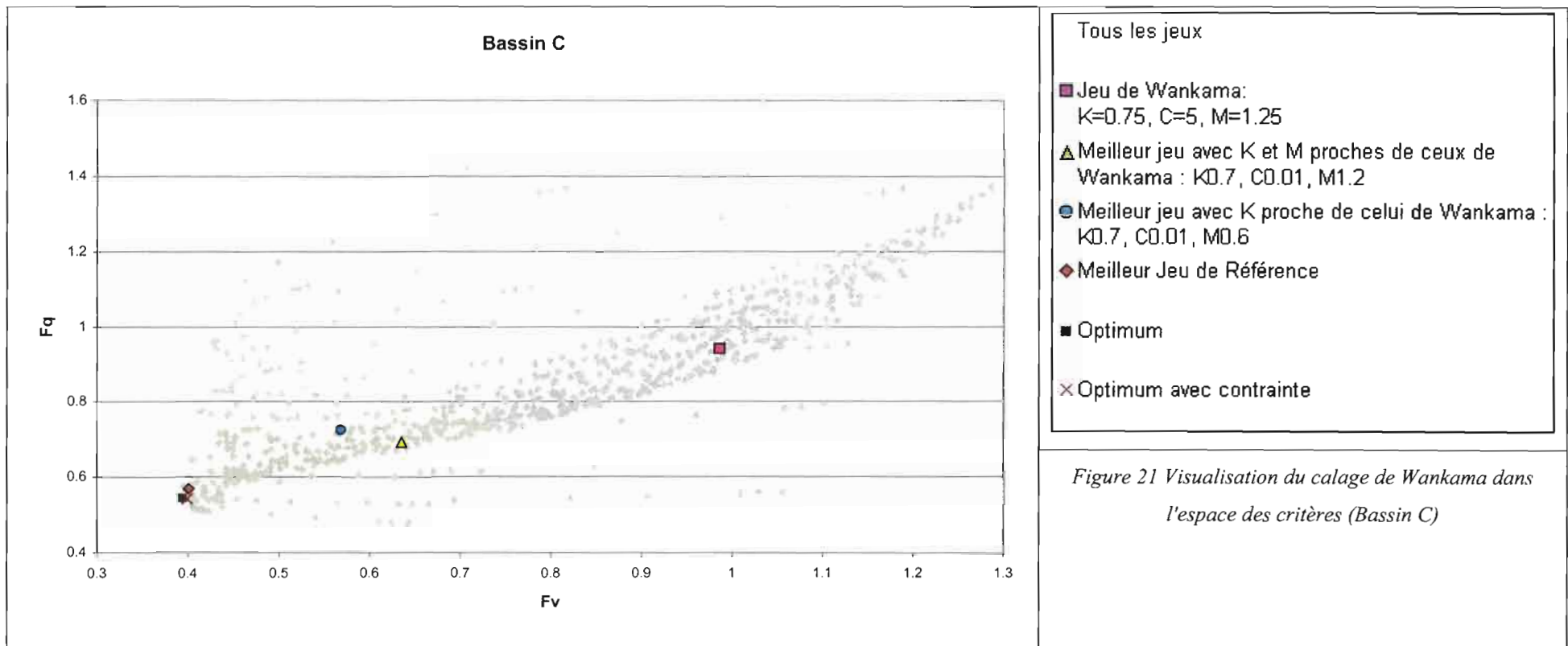
Au vu de ces résultats, nous ne pouvons déterminer si l'hypothèse d'un problème de description du réseau est ou non justifiée. Si la détermination de la valeur du paramètre  $C$  par calage a effectivement diminué les valeurs du critère, cette amélioration n'est pas suffisante pour estimer le jeu obtenu comme étant pertinent.



- tous les jeux
- Jeu de Wankama:  
K=0.75, C=5, M=1.25
  - ▲ Meilleur jeu avec K et M proches de ceux de Wankama : K0.7, C0.01, M1.2
  - Meilleur jeu avec K proche de celui de Wankama : K0.7, C0.01, M0.4
  - Optimum
  - × Optimum avec contrainte
  - ◆ Meilleur Jeu de Référence

Figure 19 Visualisation du calage de Wankama dans l'espace des critères (Bassin A)





### 3. Volumes Cumulés

Si le jeu obtenu lors du calage du bassin de Wankama n'est pas performant du point de vue des critères, il est cependant possible qu'il permette une prévision annuelle des cumuls. Pour vérifier cela, nous avons comparé la capacité des différents jeux de paramètres à permettre une bonne prévision par le modèle du cumul pour tous les événements des volumes ruisselés (voir Tableau 9).

Bassin	Jeu de paramètres	Cumul des Volumes Ruisselés	Cumul des Volumes Ruisselés	écart relatif
		<u>Observés (m3)</u>	<u>Simulés (m3)</u>	$\frac{(\text{Simulé} - \text{Observé})}{\text{Observé}}$
Bassin A	Jeu de Wankama: K=0.75, C=5, M=1.25	6414	2321	-64%
	Meilleur jeu avec K et M proches de ceux de Wankama : K0.7, C0.01, M1.2	6414	3555	-45%
	Meilleur jeu avec K proche de celui de Wankama : K0.7, C0.01, M0.4	6414	4342	-32%
	Optimum de Compromis: K0.4, C0.05, M1.2	6414	5704	-11%
Bassin B	Jeu de Wankama: K=0.75, C=5, M=1.25	10775	3949	-63%
	Meilleur jeu avec K et M proches de ceux de Wankama : K0.7, C0.01, M1.2	10775	6849	-36%
	Meilleur jeu avec K proche de celui de Wankama : K0.7, C0.01, M0.8	10775	7443	-31%
	Optimum de Compromis: K0.4, C0.05, M1.2	10775	11026	2%
Bassin C	Jeu de Wankama: K=0.75, C=5, M=1.25	13838	3616	-74%
	Meilleur jeu avec K et M proches de ceux de Wankama : K0.7, C0.01, M1.2	13838	7902	-43%
	Meilleur jeu avec K proche de celui de Wankama : K0.7, C0.01, M0.6	13838	9068	-34%
	Optimum de Compromis: K0.4, C0.05, M1.2	13838	12860	-7%

Tableau 9 Cumul des Volumes Ruisselés

Les résultats sont à nouveau en défaveur du calage de Wankama.

L'optimum de compromis rend fidèlement compte des volumes cumulés, avec une très légère sous-estimation, liée sans doute à sa difficulté à reproduire les crues de faible importance : en moyenne, ce sont les 95% du volume ruisselé qui sont simulés.

En revanche, le jeu de Wankama entraîne une sous-estimation très importante des volumes ruisselés, quel que soit le bassin : seul 35% du cumul est simulé par le modèle. Les jeux obtenus par des calages partiels (calage de C ou de C et de M), supposant une défaillance de la modélisation du réseau, ne permettent pas non plus une prévision satisfaisante, même si la sous-estimation est moins radicale. Le cumul simulé est ainsi de l'ordre de 60% du cumul observé.

Les meilleurs résultats donnés par les jeux à calage partiel sont obtenus pour le bassin B (écart relatif de -36% et -31% selon le jeu) ; mais il s'agit d'un bassin pour lequel nous pouvons remarquer que le modèle calé sur l'optimum de compromis surestime le cumul. Cette "amélioration" des résultats pour le bassin B n'est donc pas très concluante et provient probablement d'une difficulté du modèle à reproduire son fonctionnement.

## **B. Critique du calage obtenu sur Banizoumbou**

Le résultat le plus troublant de notre étude et du calage du modèle sur les bassins de Banizoumbou est le fait que la valeur du paramètre C soit calée sur sa borne inférieure. En effet, Peugeot (1995) a montré qu'une infiltration importante dans le réseau était un phénomène probable. Ce résultat avait été en particulier obtenu en observant les différences de volume ruisselé entre deux stations et il a été confirmé à Wankama par Cappelaere et al. (2003). Or une valeur de C aussi basse ne saurait traduire ce résultat.

### **1. Observation de l'infiltration dans le réseau**

Nous avons représenté graphiquement sur les figures ci-dessous les différences de volume ruisselé entre deux stations. Cette différence est généralement positive, traduisant l'augmentation progressive des écoulements transitant dans le réseau.

Or sur la Figure 22 nous observons qu'entre les exutoires des bassins B et C les volumes ruisselés observés, bien loin d'augmenter, ont diminué pour certaines crues. De plus, cette diminution a pu avoir lieu de façon très importante (crue du 22 juillet 1992 par exemple). Nous pouvons en déduire que l'infiltration dans le réseau a été très forte, jusqu'à surpasser les apports d'eaux de ruissellement. Ce résultat sur l'infiltration dans le réseau n'est pas retrouvé entre les bassins A et B ni entre les bassins A et C (Figure 23 et Figure 24).

### **2. Comparaison avec les valeurs simulées**

Le modèle calé sur l'Optimum de Compromis ne rend pas compte de façon performante de ce phénomène d'infiltration. Les différences négatives des volumes entre les bassins C et B sont certes reproduites fréquemment, mais de façon tout juste perceptible, ainsi les crues des 08, 22, 24, 28 et 30 août 1992, du 07 juillet 1993 et du 19 août 1993 de la Figure 23.

Il ne s'agit pas là d'un élément secondaire. Les pertes en eau dans le réseau peuvent être un élément important de la recharge de la nappe, qui est au cœur des études de la région. Or la valeur de calage que nous avons obtenue pour le paramètre C rend minimales ces pertes dans le réseau.

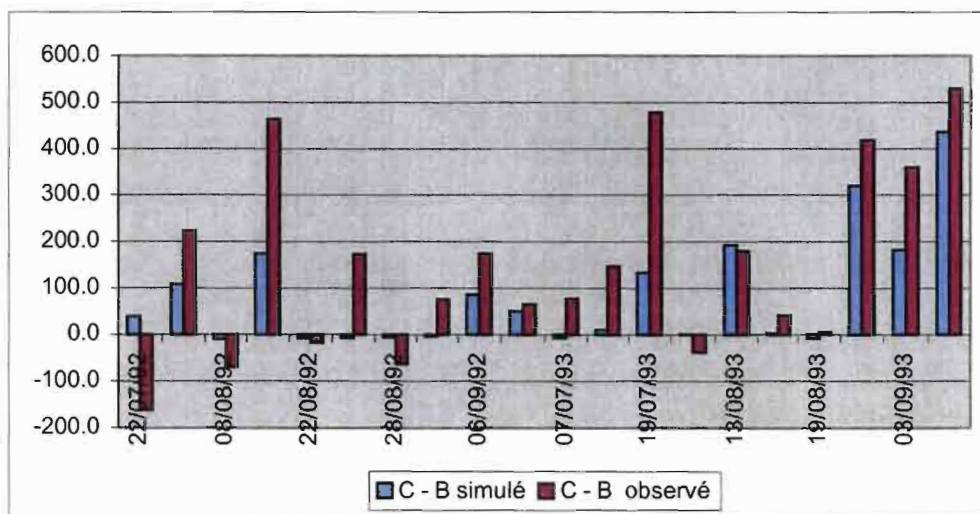


Figure 22 Différences de volume ruisselé entre les exutoires B et C

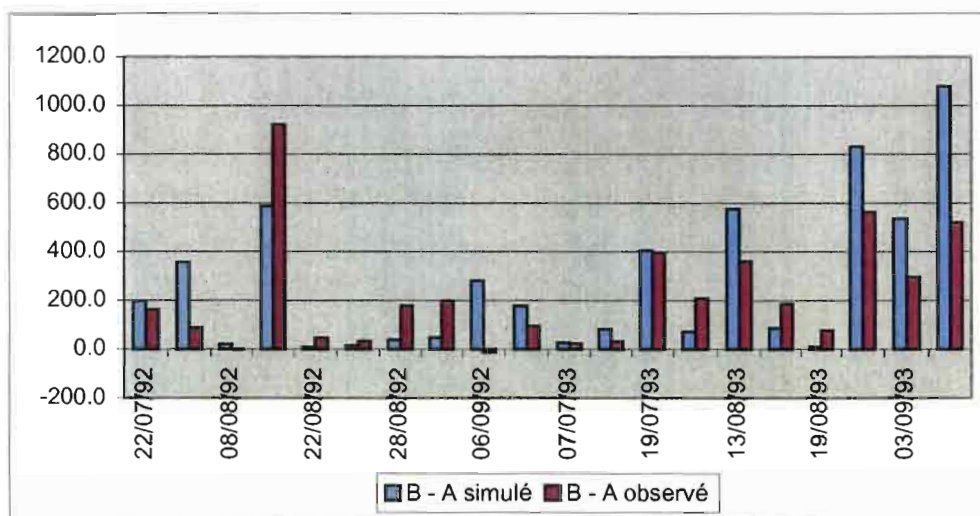


Figure 23 Différences de volume ruisselé entre les exutoires A et B

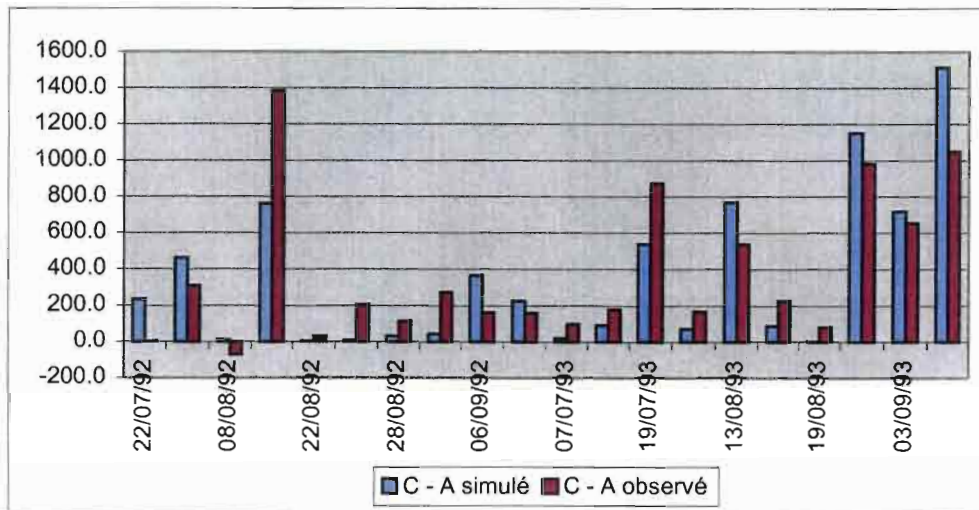


Figure 24 Différences de volume ruisselé entre les exutoires A et C

Ces résultats nous incitent à adopter la plus grande prudence vis à vis des conclusions à tirer. Si le calage de Wankama se révèle inadapté aux bassins de Banizoumbou, le calage que nous avons obtenu souligne aussi une difficulté importante du modèle à reproduire les phénomènes d'infiltration sur ces bassins. L'infiltration dans le réseau, phénomène important, n'est quasiment pas reproduite par le modèle calé de façon optimale.

# *Conclusion*

L'objectif annoncé en introduction de cette étude était d'évaluer la transposabilité du modèle calé et validé sur le bassin de Wankama à une série de bassins versants emboîtés, situés à proximité du village de Banizoumbou. Au terme de notre étude, nous devons considérer cet objectif comme n'étant que partiellement atteint.

Nous avons pu mettre en évidence que le jeu de paramètres obtenus par calage sur le bassin de Wankama était inadapté au modèle appliqué aux bassins de notre étude. La dégradation des fonctions critères entraînée par l'utilisation de ce jeu de paramètres a amplement montré que ce jeu ne permettait pas de reproduire de façon pertinente les événements observés. L'étude de la capacité à prévoir les volumes cumulés a aussi souligné la sous-estimation excessive des cumuls par le modèle calé sur le jeu de Wankama, en regard des résultats obtenus par d'autres jeux.

Cependant, nous avons dans le même temps pu constater que le modèle appliqué aux bassins de Banizoumbou présentait d'importants problèmes en terme de description des phénomènes d'infiltration dans le réseau. Le calage de compromis obtenu pour l'ensemble des bassins entraîne une représentation du réseau de drainage qui n'est pas en cohérence avec les constatations de terrain. Alors que les observations qualitatives in situ et les évaluations calculées (par différenciation des volumes ruisselées entre deux stations) concordent pour montrer l'existence d'une infiltration forte dans le réseau, le modèle calé tend à annuler cette infiltration.

Cette constatation remet en question la pertinence du modèle, du moins tel qu'il a été construit pour notre étude sur les bassins de Banizoumbou. Il devient délicat de juger de la transposabilité du calage de Wankama lorsque même le modèle calé et validé présente d'importantes limites dans sa représentation du milieu naturel.

Cela ouvre naturellement la voie à de futurs approfondissements, destinés à mieux comprendre pourquoi le modèle calé présente des fonctionnements simulés aussi éloignés des

observations de terrain. L'extrême sensibilité du modèle au paramètre K invite à se pencher plus précisément sur les versants et sur les caractéristiques physiques introduites initialement, telles que les cartes des conductivités hydrauliques, en étudiant la sensibilité du modèle aux changements de ces données. Le fonctionnement performant du modèle sur le bassin de Wankama pourrait aussi être mis en regard de son fonctionnement peu satisfaisant sur le site de Banizoumbou et l'impact des nombreuses différences entre bassin évalué.

L'objectif étant par la suite de pouvoir simuler à l'échelle régionale les modifications de la ressource en eau, une modélisation même limitée des phénomènes se déroulant sur chaque bassin est primordiale.

# Liste des Figures

FIGURE 1 LOCALISATION DE LA RÉGION ÉTUDIÉE AU NIGER OCCIDENTAL, ET DU SITE EXPÉRIMENTAL À PROXIMITÉ DE BANIZOUBOU.....	8
FIGURE 2 LES ALTITUDES DES BASSINS DE BANIZOUMBOU .....	10
FIGURE 3 LES QUATRE BASSINS VERSANTS.....	10
FIGURE 4 LES ÉTATS DE SURFACE.....	15
FIGURE 5 L'ÉCHANTILLON DE 20 PLUIES COMMUNES .....	22
FIGURE 6 CAS FICTIF D'UN OPTIMUM BIEN MARQUÉ .....	24
FIGURE 7 SENSIBILITÉ DU MODÈLE POUR LES 20 CRUES COMMUNES SIMULÉES SUR LE BASSIN C.....	25
FIGURE 8 DÉGRADATION DE LA F SELON LA VALEUR DE M .....	28
FIGURE 9 DÉGRADATION DE FV SELON LA VALEUR DE M .....	29
FIGURE 10 DÉGRADATION DE FQ SELON LA VALEUR DE M .....	29
FIGURE 11 LES SIMULATIONS DU BASSIN C DANS L'ESPACE DES CRITÈRES (FV,FQ).....	31
FIGURE 12 VOLUMES OBSERVÉS/VOLUMES SIMULÉS .....	35
FIGURE 13 DÉBITS DE POINTE OBSERVÉS/DÉBITS DE POINTE SIMULÉS .....	35
FIGURE 14 EXEMPLE D'HYDROGRAMMES LORS D'ÉVÈNEMENTS DE MOYENNE IMPORTANCE .....	36
FIGURE 15 VALIDATION DU MODÈLE SUR LES AUTRES PLUIES DISPONIBLES ; VOLUME SIMULÉ EN FONCTION DU VOLUME OBSERVÉ SUR LE BASSIN A. ....	38
FIGURE 16 VALIDATION DU MODÈLE SUR LES AUTRES PLUIES DISPONIBLES ; VOLUME SIMULÉ EN FONCTION DU VOLUME OBSERVÉ SUR LE BASSIN B.....	39
FIGURE 17 VALIDATION DU MODÈLE SUR LES AUTRES PLUIES DISPONIBLES ; VOLUME SIMULÉ EN FONCTION DU VOLUME OBSERVÉ SUR LE BASSIN A. ....	39
FIGURE 18 VOLUMES OBSERVÉS ET VOLUMES SIMULÉS SUR LE BASSIN D .....	41
FIGURE 19 VISUALISATION DU CALAGE DE WANKAMA DANS L'ESPACE DES CRITÈRES (BASSIN A) .....	46
FIGURE 20 VISUALISATION DU CALAGE DE WANKAMA DANS L'ESPACE DES CRITÈRES (BASSIN B).....	47
FIGURE 21 VISUALISATION DU CALAGE DE WANKAMA DANS L'ESPACE DES CRITÈRES (BASSIN C).....	48
FIGURE 22 DIFFÉRENCES DE VOLUME RUISSELÉ ENTRE LES EXUTOIRES B ET C .....	51
FIGURE 23 DIFFÉRENCES DE VOLUME RUISSELÉ ENTRE LES EXUTOIRES A ET B .....	51
FIGURE 24 DIFFÉRENCES DE VOLUME RUISSELÉ ENTRE LES EXUTOIRES A ET C .....	52

# *Liste des tableaux*

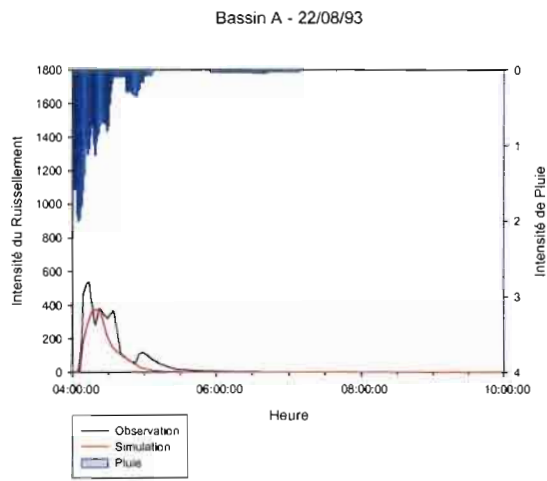
TABLEAU 1 SURFACE OBSERVÉES ET NUMÉRISÉES .....	14
TABLEAU 2 VALEURS DE $K_S$ ET DE $N$ .....	16
TABLEAU 3 L' OPTIMUM DE CHAQUE BASSIN.....	27
TABLEAU 4 L'OPTIMUM DE COMPROMIS .....	30
TABLEAU 5 LES DIFFÉRENTS JEUX DE PARAMÈTRES REMARQUABLES .....	33
TABLEAU 6 PERFORMANCE DU MODÈLE EN VALIDATION .....	40
TABLEAU 7 VALEURS DES CRITÈRES SUR LE BASSIN B À L'OPTIMUM DE COMPROMIS .....	40
TABLEAU 8 COMPARAISON ENTRE LE JEU DE WANKAMA ET L'OPTIMUM DE COMPROMIS .....	43
TABLEAU 9 CUMUL DES VOLUMES RUISSELÉS.....	49

# *Liste des Annexes*

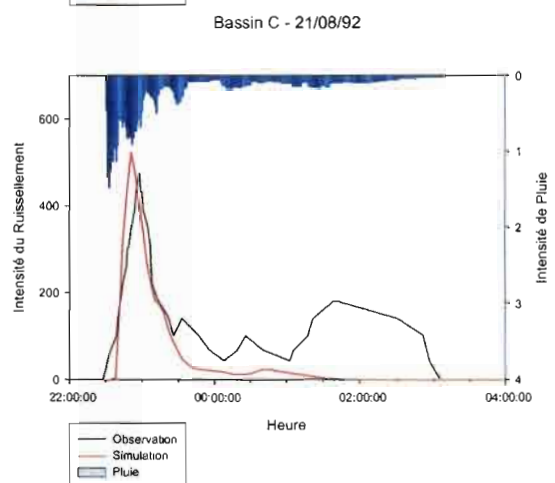
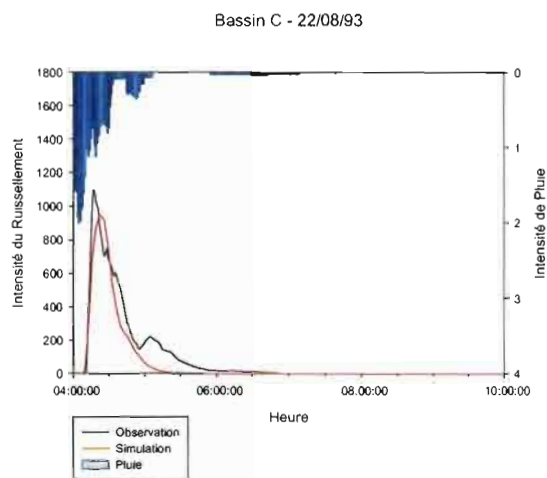
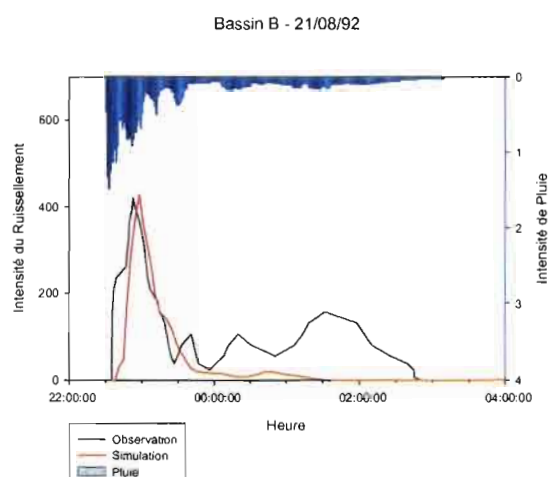
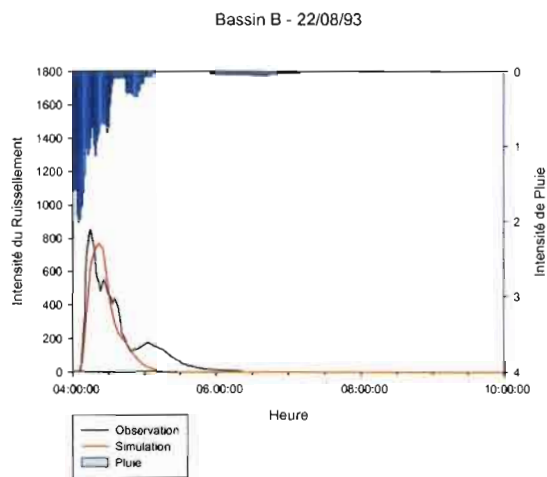
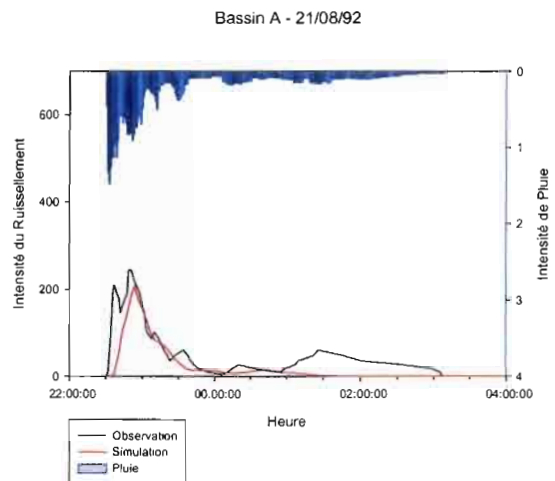
ANNEXE 1 HYDROGRAMMES LORS D'ÉVÈNEMENTS DE GRANDE IMPORTANCE .....	58
ANNEXE 2 HYDROGRAMMES LORS D'ÉVÈNEMENTS DE MOYENNE IMPORTANCE.....	59
ANNEXE 3 HYDROGRAMMES LORS D'ÉVÈNEMENTS DE PETITE IMPORTANCE .....	60

## Annexe 1 Hydrogrammes lors d'évènements de grande importance

### Exemple de simulation performante



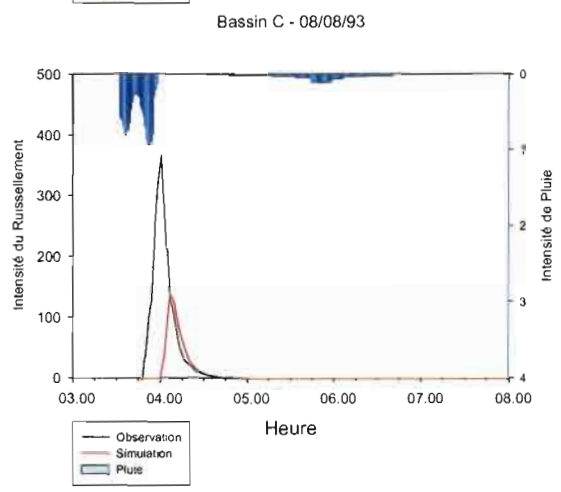
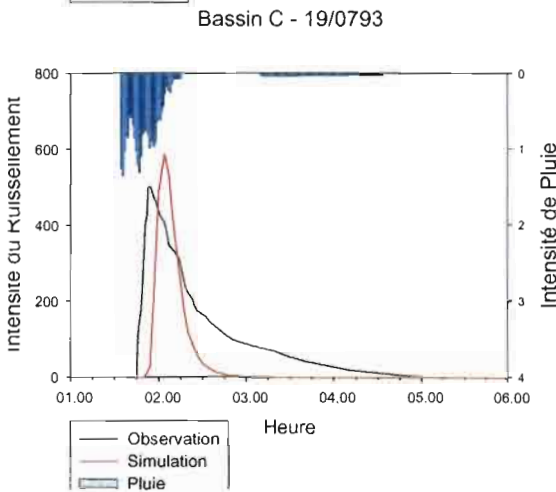
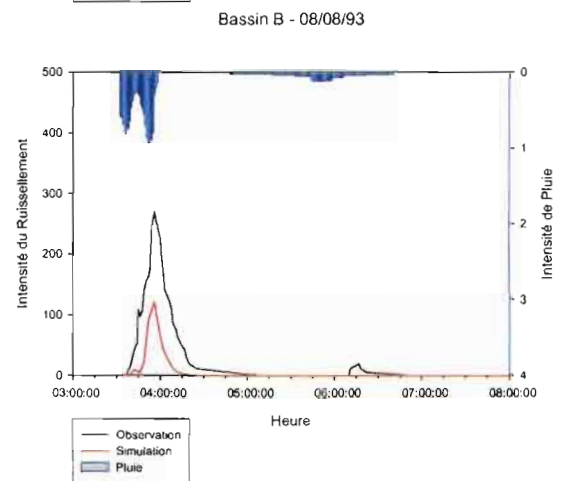
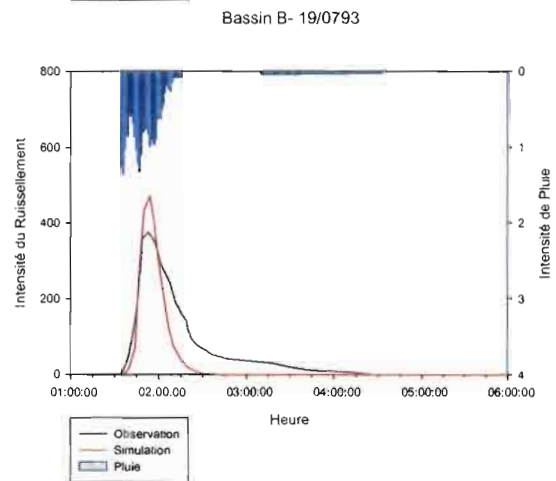
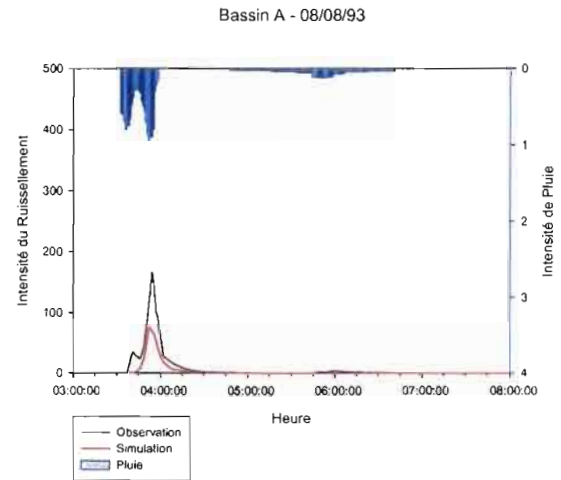
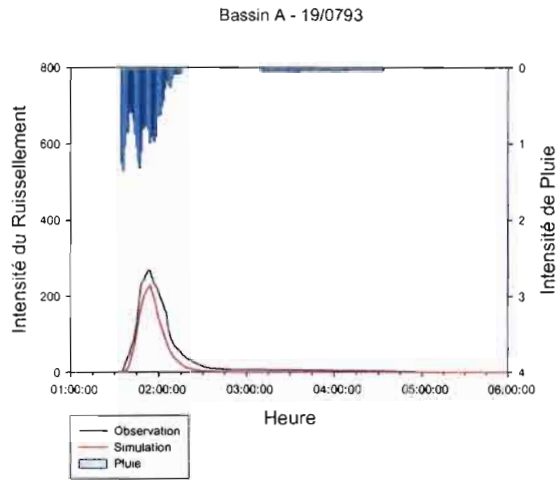
### Exemple de simulation peu performante



*Annexe 2 Hydrogrammes lors d'évènements de moyenne importance*

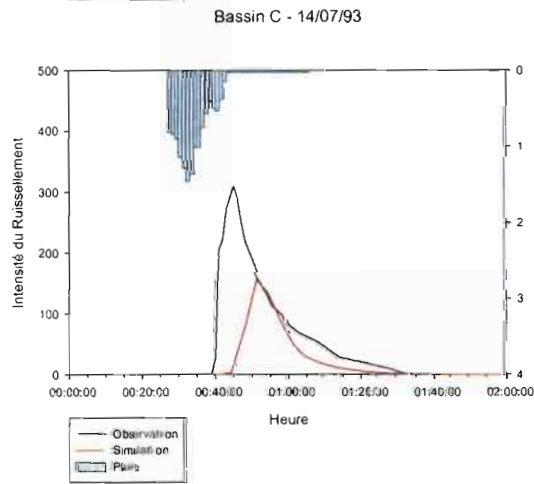
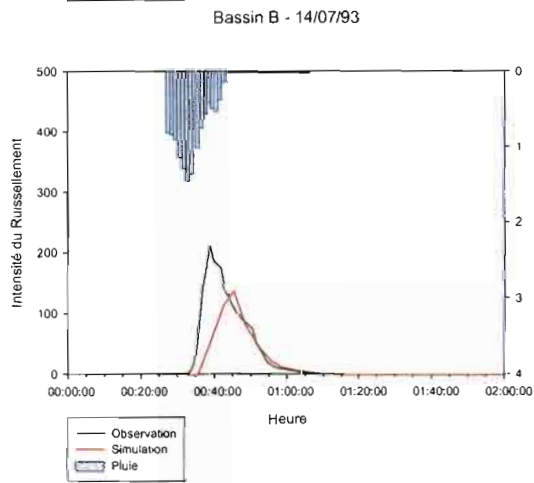
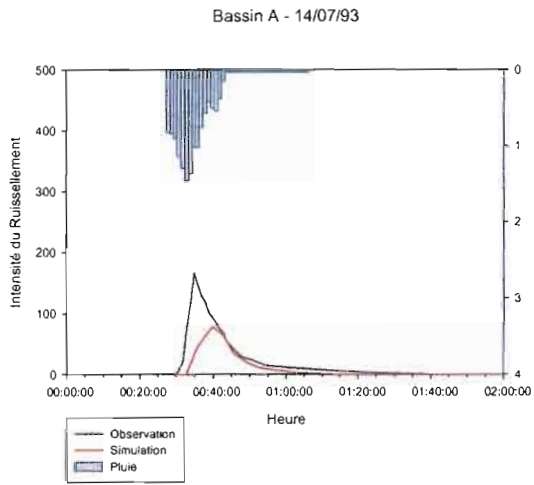
Exemple de simulation performante

Exemple de simulation peu performante

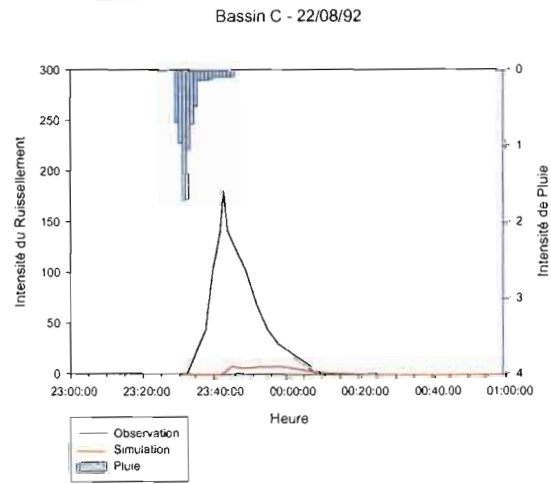
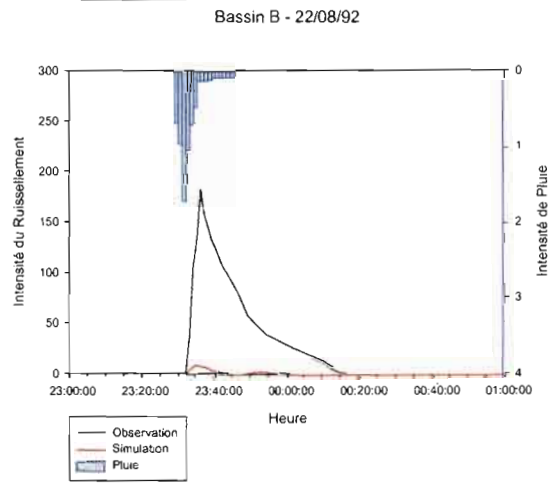
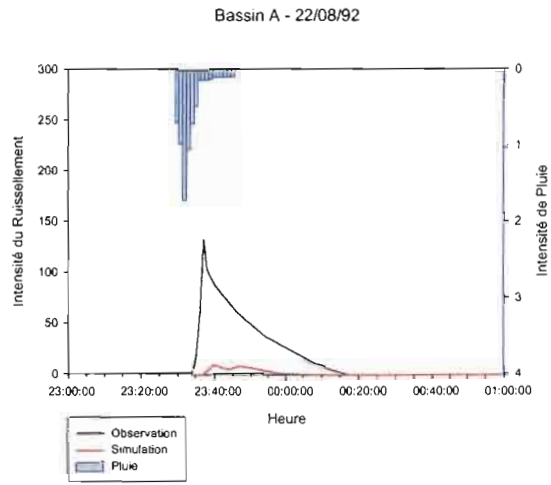


### Annexe 3 Hydrogrammes lors d'évènements de petite importance

#### Exemple de simulation performante



#### Exemple de simulation peu performante



## BIBLIOGRAPHIE

Albergel J, 1987, Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface-Application aux petits bassins du Burkina Faso, in : The influence of climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources, 355-365. IAHS Publ. No. 168

Casenave A., Valentin C., 1992, A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa, J. Hydrol., 130, 231-249

Cappelaere, B., Vieux, B., Peugeot, C., Maia, A., Séguis, L., 2003. Hydrologic process simulation of a semiarid, endoreic catchment in Sahelian West Niger, Africa: 2. Model calibration and uncertainty characterization. Journal of Hydrology, sous presse.

Desconnets, J.C., Taupin, J.D., Lebel, T., Leduc, C., 1997. Hydrology of Hapex-Sahel central super site : surface drainage and aquifer recharge through the pool systems. J. Hydrol., 188-189: 155-178.

Estèves, M., 1995. Rapport de campagne hydrologique, saison 1994 [Report of field collection of hydrological data, 1994 season]. Orstom, Niamey (Niger), 26 pp.

Leduc C., Loireau M., 1997, Fluctuations piézométriques et évolution du couvert végétal en zone sahélienne (sud-ouest du Niger). In : Sustainability of water resources under increasing uncertainty (Proceedings of the Rabat Symposium S1. April 1997), IAHS Publ.no.240

Peugeot, C., Cappelaere, B., Vieux, B.E., Séguis, L., Maia, A., 2003. Hydrologic process simulation of a semiarid, endoreic catchment in Sahelian West Niger, Africa: 1. Model-aided data analysis and screening. Journal of Hydrology. Sous presse

Peugeot C., 1995, Influence de l'encroûtement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un versant sahélien (Niger) – Expérimentation in situ et modélisation. Thèse de l'Université Joseph-Fourier Grenoble I, 356p.

Thauvin, 1992, Etude de la répartition spatiale des précipitations en milieu sahélien à l'aide du réseau dense de pluviographes de l'expérience EPSAT-Niger. Thèse, Université Montpellier II.

Vieux et Gauer, 1994, Finite-Element Modeling of storm Water Runoff Using GRASS GIS, Microcomputers in civil engineering, 1994, no.9, 263-270

Vieux, B.E., 2001. Distributed hydrologic modeling using GIS. Water Science and Technology Library, vol.38. Kluwer Academic Publishers, 293 pp.

## RÉSUMÉ

Dans une perspective globale d'évaluation du renouvellement de la ressource en eau, un modèle distribué à bases physiques a été adapté au milieu sahélien par l'équipe MEVHYS du laboratoire Hydrosociences Montpellier. Il a été calé et validé sur un petit bassin endoréique (Wankama) situé dans le degré carré de Niamey (sud-ouest du Niger).

L'objectif de notre étude vise à évaluer la transposabilité de ce modèle, dont l'outil de calcul se nomme *r.water.fea*, à trois bassins versants emboîtés, situés un peu plus au sud de Niamey, près du village de Banizoumbou.

Nous avons construit le modèle à partir de données déjà réunies pour les études sur le bassin de Wankama mais aussi à partir de données de terrain spécifiques aux bassins de Banizoumbou. Les données de forçage utilisées ont été les hyétogrammes obtenus à proximité des bassins pour les années 1992 et 1993. Ces données ont été complétées par les hydrogrammes du ruissellement, mesurées par les stations de jaugeages définissant les exutoires des bassins.

Après calage et validation du modèle sur les bassins de Banizoumbou, nous avons pu mettre en évidence que le jeu de paramètres obtenus par calage sur le bassin de Wankama était inadapté au modèle appliqué aux bassins de notre étude. L'utilisation de ce jeu de paramètres dégrade les fonctions critères (évaluant la simulation les volumes ruisselés à l'exutoire et les débits de pointe) et montre que ce jeu ne permet pas de reproduire de façon pertinente les événements observés sur ces bassins. L'étude de la capacité à prévoir les volumes cumulés a aussi souligné la sous-estimation excessive des cumuls par le modèle calé sur le jeu de Wankama, en regard des résultats obtenus par d'autres jeux.

Cependant, nous avons dans le même temps pu constater que le modèle appliqué aux bassins de Banizoumbou présentait d'importants problèmes en terme de description des phénomènes d'infiltration dans le réseau. Le calage de compromis obtenu pour l'ensemble des bassins entraîne une représentation du réseau de drainage qui n'est pas en cohérence avec les constatations de terrain. Alors que les observations qualitatives in situ et les évaluations calculées (par différenciation des volumes ruisselés entre deux stations) concordent pour montrer l'existence d'une infiltration forte dans le réseau, le modèle calé tend à annuler cette infiltration.

Le modèle mis en place sur les bassins de Banizoumbou a montré sa pertinence en terme de critère ; le calage de compromis, quoique différent de celui obtenu sur le bassin de Wankama, s'est révélé performant dans la simulation des crues, au prix d'une légère sous-estimation des cumuls d'eau ruisselée. Cependant, en l'état actuel des connaissances, nous ne pouvons interpréter les limites du modèle constatées sur l'infiltration simulées dans le réseau : notre évaluation de la transposabilité du calage obtenu à Wankama ne saurait donc être définitive.