

Chapitre III : Application du modèle HEC-HMS au bassin Versant de l'Oued Cheliff-Ghrib

Introduction

Hydrologique Engineering Centre - Hydrologique Modélisation Système (HEC-HMS) est un logiciel de modélisation hydrologique déterministe et conceptuel qui permet la simulation événementielle et continue sur une longue durée. C'est un modèle distribué (spatialisé) qui permet de diviser le bassin versant en sous-bassins élémentaires, en fonction des affluents et de la topographie. La modélisation de la réponse d'un bassin versant à un événement pluvieux est découpée en trois parties :

- La modélisation du bassin versant (basin model)
- La modélisation de la pluviométrie (Météorologic Model)
- Les spécifications particulières.

I - La modélisation du bassin avec HEC-HMS:

I-1- Les données d'entrée du modèle

I-1-1- Le modèle numérique du terrain :

Avant de procéder à n'importe quelle opération de préparation d'un fichier de simulation HMS, il est primordial d'avoir à sa possession le MNT de la zone d'étude, dont le rôle est fondamental dans la caractérisation physique du bassin et le calcul des paramètres.

I-1-2- Occupation du sol :

Vu les exigences particulières de la combinaison modulaire choisie, plus précisément la méthode NRCS CN comme fonction de production, l'établissement d'une carte d'occupation du sol sur l'ensemble de la zone d'étude était une voie incontournable. Toutefois, l'information supposée contenue dans cette carte devrait être authentique à la classification reconnue par le NRCS, par conséquent nous étions mené à faire des correspondances entre les classes de la NRCS et les informations recueillies de toutes les données bibliographiques répertoriées qui traitent ce volet.

I-1-3- La donnée pluie :

Pour chaque événement, la pluie devrait être saisie sous forme de la hauteur de pluie tombée sur le bassin pendant le jour où cet événement est survenu, au quelle nous associons

chaque fois une des quatre distributions NRCS. Dans notre cas, nous nous étions limités à la période **03/1980 - 04/1982– 03/1986-09 /1993 et 09 /1994**.

I-2- L'élaboration du modèle

Avant de débiter la calibration, nous avons préparé tous les fichiers de simulations des cinq événements préalablement présélectionnés, en prenant en compte les quatre types d'averses NRCS et les deux formalismes de la fonction de transfert pour analyser la sensibilité du modèle successivement aux types d'averse et aux formalismes. Ainsi, nous avons 40 fichiers de simulation.

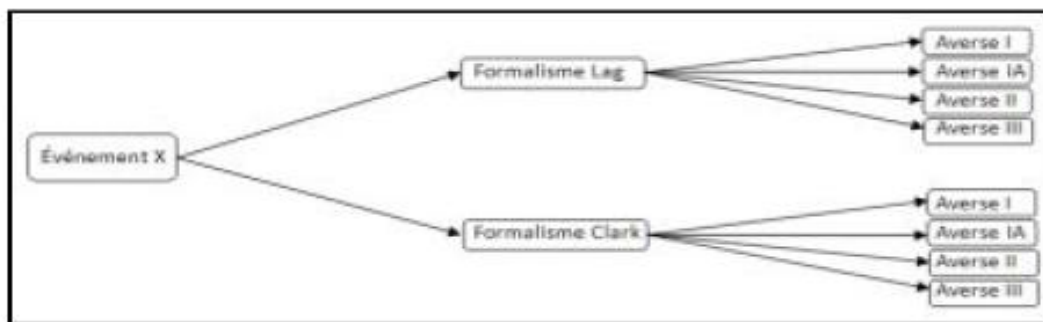


Figure 11- Nombre de fichiers de simulation préparés pour chaque événement

Pour chacun des fichiers de simulation, on aura les données suivantes :

Tableau 11- Les entrées à saisir pour chaque fichier de simulation

| Module du modèle | | Entrée | Valeur | Unité |
|-------------------------------------|---------|---|-------------------------|-----------------|
| Le bassin | | La surface | 1390.32 | km ² |
| Module météorologique | | Pluie | Fonction de l'événement | mm |
| | | Le type d'averse | - | - |
| | | Abstraction initiale « Ia » | 1 | mm |
| Module de la fonction De production | NRCS CN | Curve Number « CN » | 72 | - |
| | | Le pourcentage d'imperméable | 10 | - |
| | | Temps Lag « T _{Lag} » | 476 | Min |
| Module de la fonction de transfert | NRCS | Temps de concentration « T _C » | 13.22 | heures |
| | Clark | Coefficient destockage « S _T » | 21.52 | heures |

I-2-1- Résultats de simulation

Les résultats de simulation pour les deux fonctions de transfert lag et clark sont dans les tableaux 12 et 13 :

a- Formalisme lag :

Tableau 12- Résultats de simulation : Formalisme lag

| Evènement | Averse | Paramètres de modèle | | | Résultats de simulation | | | | | |
|-----------|--------|----------------------|----|------|-------------------------|-------|--------|--------|-------|--------|
| | | NRCS CN | | | Qp (m ³ /s) | | | V (mm) | | |
| | | Ia | CN | Tlag | Obs. | Sim. | Diff % | Obs. | Sim. | Diff % |
| 1980 | 1 | 1 | 72 | 476 | 197.14 | 276.4 | 28.67 | 8.56 | 11.73 | 27.02 |
| | 1A | | | | | 228.9 | 13.87 | | 11.73 | 27.02 |
| | 2 | | | | | 333.4 | 40.8 | | 11.75 | 27.15 |
| | 3 | | | | | 337.3 | 41.55 | | 11.75 | 27.15 |
| 1982 | 1 | 1 | 72 | 476 | 159.34 | 225.8 | 29.43 | 7.26 | 10.02 | 27.54 |
| | 1A | | | | | 189.3 | 15.83 | | 10.02 | 27.54 |
| | 2 | | | | | 274.3 | 41.9 | | 10.02 | 27.54 |
| | 3 | | | | | 274.3 | 41.9 | | 10.02 | 27.54 |
| 1986 | 1 | 1 | 72 | 476 | 351.0 | 186.5 | 46.87 | 45.03 | 8.29 | 81.59 |
| | 1A | | | | | 85.8 | 75.55 | | 8.25 | 81.59 |
| | 2 | | | | | 97.0 | 72.36 | | 8.25 | 81.59 |
| | 3 | | | | | 98.50 | 71.94 | | 8.25 | 81.59 |
| 1993 | 1 | 1 | 72 | 476 | 126.5 | 127.7 | 0.9 | 4.67 | 5.51 | 15.24 |
| | 1A | | | | | 105.8 | 16.5 | | 5.51 | 15.24 |
| | 2 | | | | | 154.2 | 17.96 | | 5.51 | 15.24 |
| | 3 | | | | | 156 | 18.91 | | 5.51 | 15.24 |
| 1994 | 1 | 1 | 72 | 476 | 126.5 | 131.6 | 3.9 | 5.63 | 5.87 | 4 |
| | 1A | | | | | 110.3 | 12.81 | | 5.87 | 4 |
| | 2 | | | | | 150.4 | 15.89 | | 5.87 | 4 |
| | 3 | | | | | 159.9 | 20.9 | | 5.87 | 4 |

NRCS CN : Natural Ressource Conservation Service, Curve Number

Clark : module de la fonction de transfert de Clark

Qp : le débit de pointe (m³/s)

Ia : perte initiale (mm)

Fct obj : la fonction objective

V : le volume en mm

CN : Nombre de courbe

Lag : temps de réponse lag (min)

Sim. : Simulé

Obs. : observé

b- Formalisme de Clark :**Tableau 13- Résultats de simulation : formalisme de Clark**

| Evènement | Averse | Résultats de simulation | | | | | | | | | |
|-----------|--------|-------------------------|----|-------|-------|------------------------|-------|-----------|--------|-------|-----------|
| | | NRCS CN | | Clark | | Qp (m ³ /s) | | | V (mm) | | |
| | | Ia | CN | Tc | St | Obs. | Sim. | Diff % | Obs. | Sim. | Diff % |
| 1980 | 1 | 1 | 72 | 13.22 | 21.52 | 197.14 | 128.9 | 34.61 | 8.56 | 11.28 | 24.11 |
| | 1A | | | | | | 122.9 | 37.65 | | 11.48 | 25.44 |
| | 2 | | | | | | 139.9 | 29.03 | | 11.47 | 25.37 |
| | 3 | | | | | | 141.3 | 28.32 | | 11.47 | 25.37 |
| 1982 | 1 | 1 | 72 | 13.22 | 21.52 | 159.34 | 108.7 | 31.78 | 7.36 | 9.17 | 19.74 |
| | 1A | | | | | | 103.7 | 34.92 | | 9.17 | 19.74 |
| | 2 | | | | | | 117.3 | 26.38 | | 9.16 | 19.65 |
| | 3 | | | | | | 119.1 | 25.25 | | 9.15 | 19.56 |
| 1986 | 1 | 1 | 72 | 13.22 | 21.52 | 351.0 | 89.8 | 74.42 | 45.03 | 8.25 | 81.62 |
| | 1A | | | | | | 85.8 | 75.56 | | 8.25 | 81.62 |
| | 2 | | | | | | 97.0 | 72.36 | | 8.25 | 81.62 |
| | 3 | | | | | | 98.5 | 71.94 | | 8.25 | 81.62 |
| 1993 | 1 | 1 | 72 | 13.22 | 21.52 | 126.5 | 63.5 | 71.15 | 4.67 | 5.72 | 18.36 |
| | 1A | | | | | | 60.6 | 52.09 | | 5.72 | 18.36 |
| | 2 | | | | | | 68.6 | 45.77 | | 5.72 | 18.36 |
| | 3 | | | | | | 69.6 | 44.98 | | 5.72 | 18.36 |
| 1994 | 1 | 1 | 72 | 13.22 | 21.52 | 126.5 | 59.8 | 52.72 | 5.63 | 4.03 | 28.42 |
| | 1A | | | | | | 57 | 54.94 | | 4.04 | 28.42 |
| | 2 | | | | | | 65 | 48.62 | | 4.01 | 28.77 |
| | 3 | | | | | | 63.5 | 49.80 | | 5.72 | 1.6 |

NRCS CN : Natural Resource Conservation Service, Curve Number

Clark : module de la fonction de transfert de Clark

Qp : le débit de pointe (m³/s)

Ia : perte initiale (mm)

Fct obj : la fonction objective

V : le volume en mm

CN : Nombre de courbe

Tc : temps de concentration (h)

St : temps de stockage (h)

Sim. : Simulé

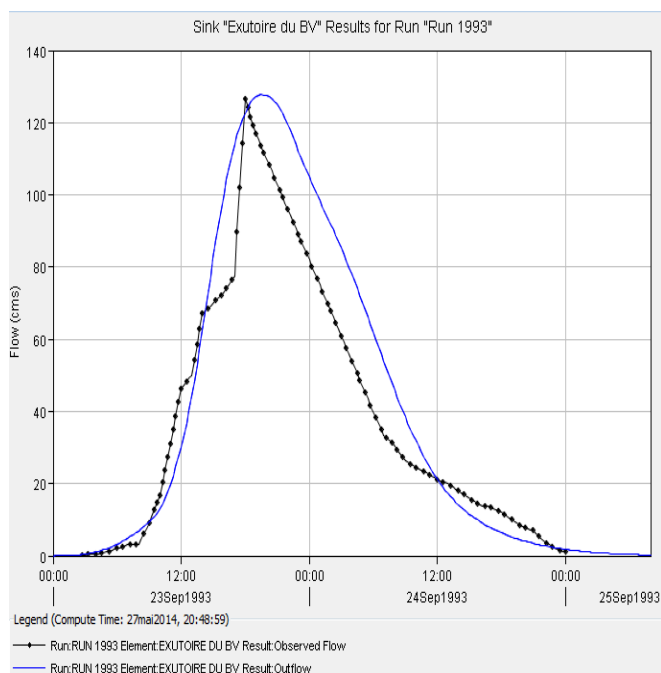
Obs. : observé

I-2-2- Les graphes de simulation :

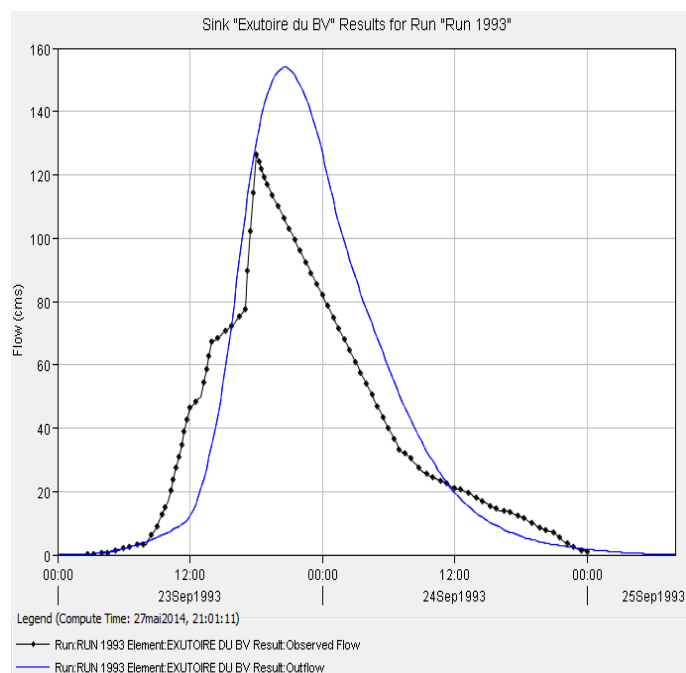
Les graphes d'évènement 1993 pour la méthode de fonction de transfert NRCS formalisme lag et formalisme de Clark sont suivants :

a- formalisme lag :

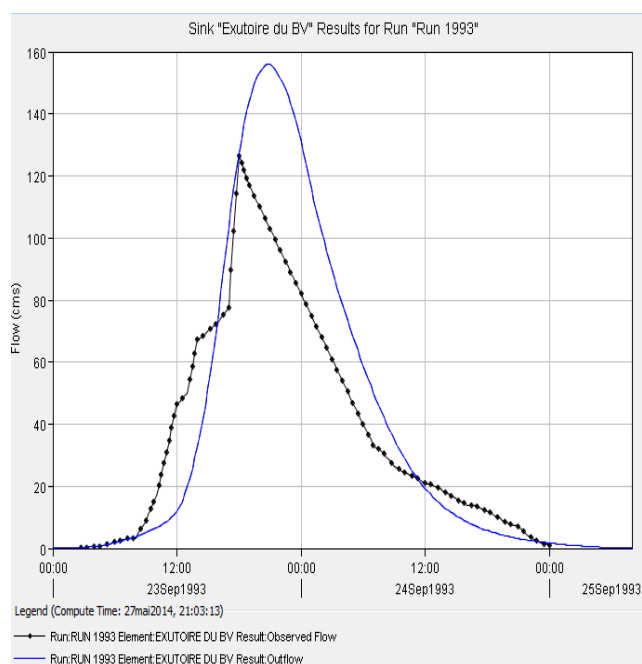
Averse type 1 :



Averse type 1A :



Averse type 2 :



Averse type 3 :

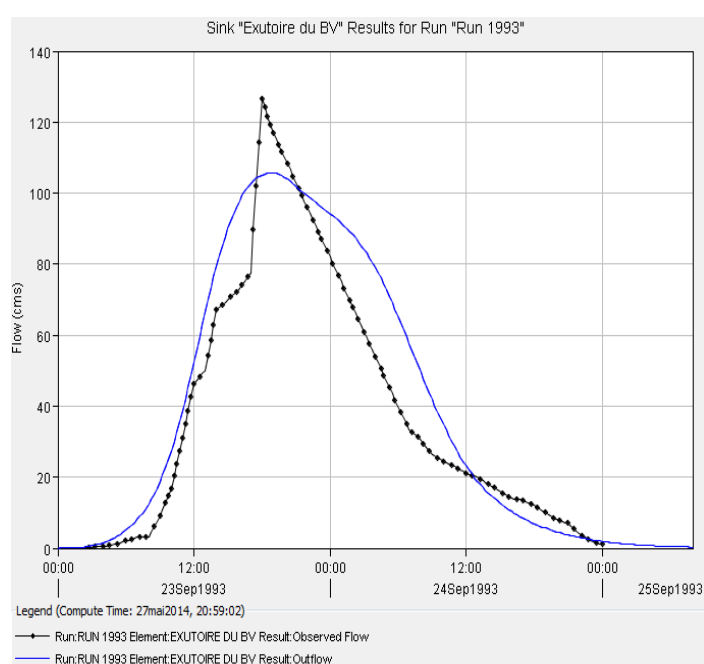
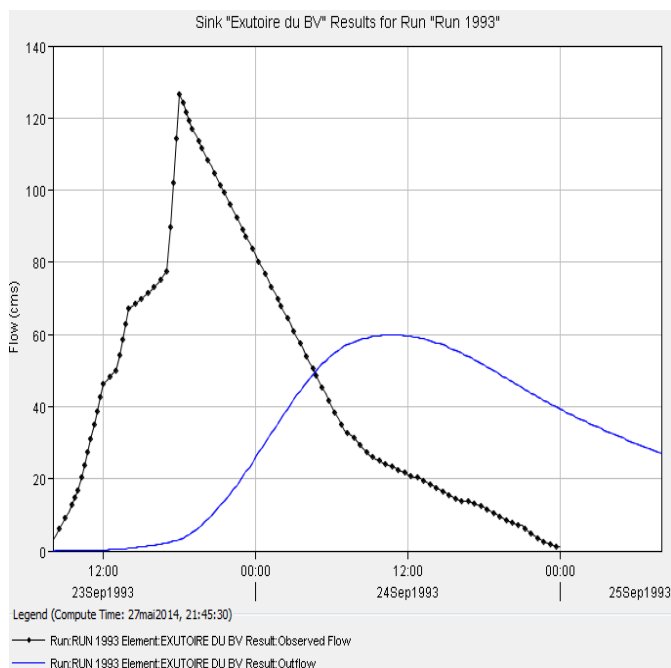


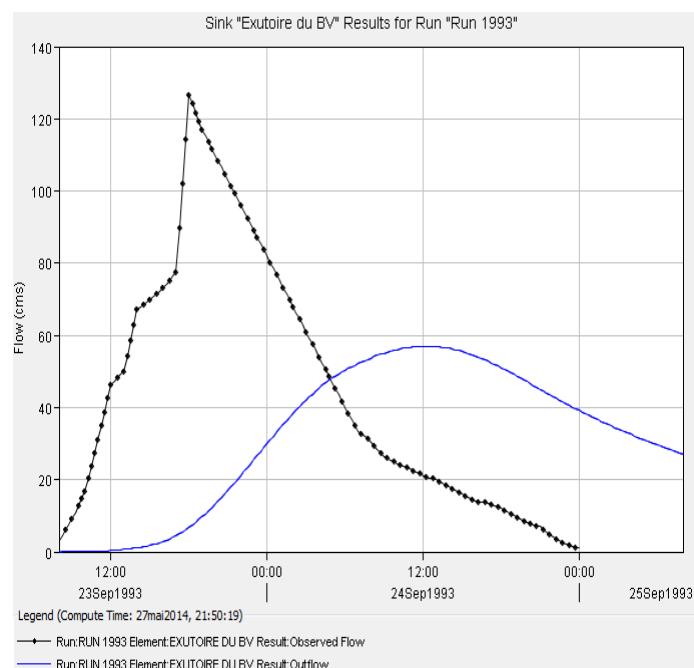
Figure 12- Hydrographes de crues de l'évènement 1993 avec la fonction de transfert Lag

b- formalisme de Clark :

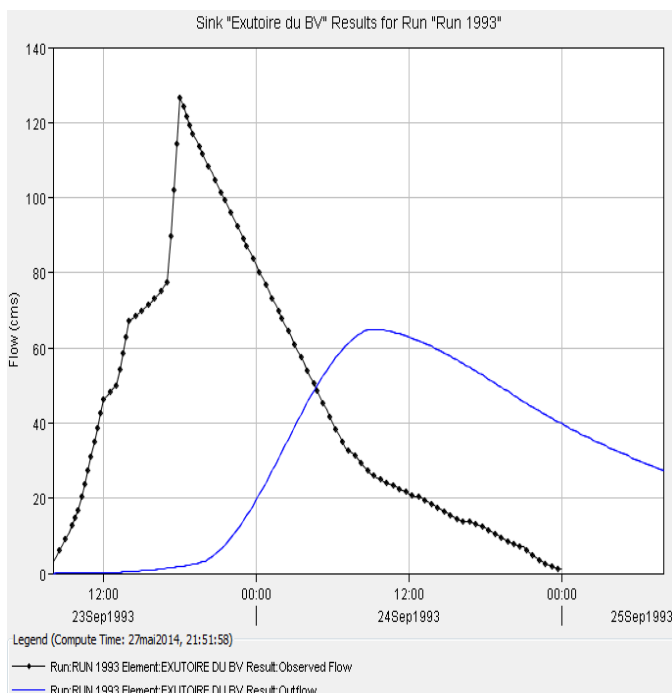
Averse type 1



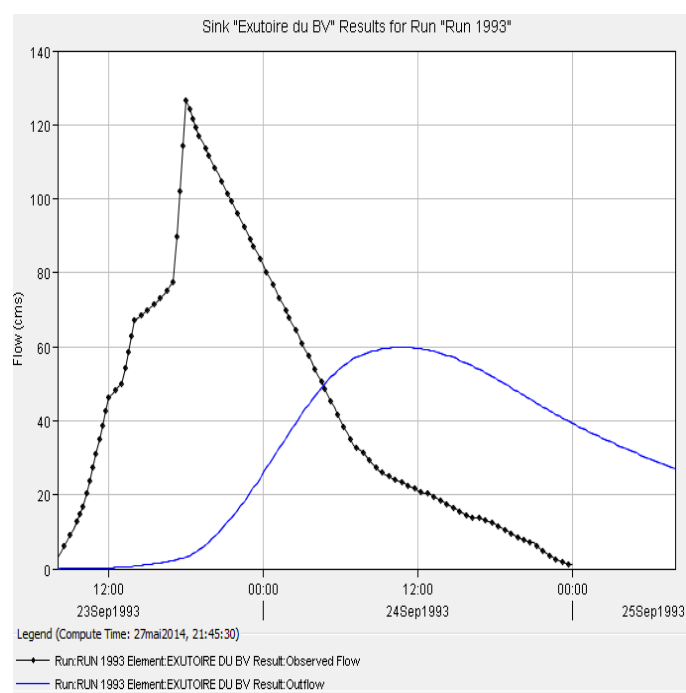
Averse type 1A



Averse type 2



Averse type 3

**Figure 13- Hydrographes des crues de l'évènement de 1993 avec la fonction de transfert de Clark**

N.B : Les hydrogrammes de crues des événements 1980, 1982, 1986 et 1994 sont trouvés dans l'Annexe.

I-3- La calibration du modèle

Afin d'aboutir aux valeurs optimisées des paramètres du modèle, la calibration a été effectuée pour les 40 fichiers de simulation en utilisant la fonction objective sur le débit de pointe.

I-3-1- Les résultats de calibration :

À partir des résultats de la calibration, nous pouvons constater d'une manière générale que la valeur de la fonction objective, les valeurs optimisées des paramètres, les débits de pointe et le volume simulés varient tous en fonction de l'événement, du type de l'averse sélectionné et du formalisme choisi pour la fonction de transfert. Les résultats de calibration de modèle se trouvent dans les tableaux suivants :

a-La calibration par le formalisme Lag :

Tableau 14- Résultats détaillés de la calibration par le formalisme Lag

| Evènement | Averse | Paramètres calibrés | | | Résultats de calibration | | | | Fonction Obj % |
|-----------|--------|---------------------|--------|--------|--------------------------|-------|---------|-------|-------------------|
| | | NRCS CN | | | Qp (m³/s) | | V (mm) | | |
| | | Ia | CN | Tlag | Obs. | Sim. | Obs. | Sim. | |
| 1980 | 1 | 1 | 85.77 | 399.68 | 197.1 | 197.1 | 8.56 | 7.58 | 0 |
| | 1A | 1 | 87.32 | 402.56 | | 169.1 | | 8.09 | 14.2 |
| | 2 | 1 | 80.10 | 403.21 | | 197.2 | | 6.18 | 0 |
| | 3 | 1 | 80.10 | 407.24 | | 197.5 | | 6.18 | 0 |
| 1982 | 1 | 1 | 60.03 | 547.4 | 159.3 | 158.8 | 7.26 | 7.64 | 0 |
| | 1A | 1 | 66.75 | 533.62 | | 159.3 | | 8.82 | 0 |
| | 2 | 1 | 47.106 | 481.38 | | 158.7 | | 6.02 | 0 |
| | 3 | 1 | 51.52 | 547.4 | | 159.6 | | 6.50 | 0 |
| 1986 | 1 | 1 | 89.74 | 457.15 | 351.0 | 354.2 | 45.03 | 14.97 | 0 |
| | 1A | 1 | 99 | 547.40 | | 492.8 | | 25.60 | 11.9 |
| | 2 | 1 | 84.05 | 422.69 | | 350.5 | | 11.91 | 0 |
| | 3 | 1 | 85.32 | 466.48 | | 350.8 | | 12.49 | 0 |
| 1993 | 1 | 1 | 71.56 | 476.0 | 126.5 | 126.4 | 4.67 | 5.45 | 0 |
| | 1A | 1 | 78.495 | 478.04 | | 126.5 | | 6.58 | 0 |
| | 2 | 1 | 68.036 | 547.07 | | 126.5 | | 5.02 | 0 |
| | 3 | 1 | 67.63 | 547.40 | | 126.8 | | 4.98 | 0 |
| 1994 | 1 | 1 | 70.56 | 478.18 | 126.5 | 126.7 | 5.63 | 5.67 | 0 |
| | 1A | 1 | 78.49 | 540.86 | | 126.5 | | 7.01 | 0 |
| | 2 | 1 | 62.98 | 483.91 | | 126.5 | | 4.81 | 0 |
| | 3 | 1 | 66.40 | 547.4 | | 127.0 | | 5.16 | 0 |

NRCS CN : Natural Resource Conservation Service, Curve Number

Qp : le débit de pointe (m³/s)

Ia : perte initiale (mm)

Fct obj : la fonction objective

V : le volume en mm

CN : Nombre de courbe

Lag : temps de réponse lag (min)

b-La calibration par le formalisme Clark:**Tableau 15- Résultats détaillés de la calibration par le formalisme Clark**

| Evènement | Averse | Paramètres calibrés | | | | Résultats de calibration | | | | Fonction Obj % |
|-----------|--------|---------------------|-------|-------|-------|--------------------------|-------|--------|-------|-------------------|
| | | NRCS CN | | Clark | | Qp (m3/s) | | V (mm) | | |
| | | Ia | CN | Tc | st | Obs. | Sim. | Obs. | Sim. | |
| 1982 | 1 | 1.50 | 78.28 | 14.90 | 14.48 | 159.3 | 159.3 | 7.36 | 11.37 | 0 |
| | 1A | 1.46 | 80.10 | 12.70 | 14.35 | | 159.4 | | 12.04 | 0 |
| | 2 | 0.98 | 80.10 | 12.71 | 19.46 | | 159.4 | | 11.78 | 0 |
| | 3 | 1.46 | 80.10 | 12.67 | 19.36 | | 159.3 | | 11.55 | 0 |
| 1986 | 1 | 1.47 | 98.85 | 14.82 | 14.33 | 351.0 | 351.0 | 45.03 | 24.88 | 0 |
| | 1A | 1.19 | 99 | 12.44 | 12.65 | | 351.0 | | 25.43 | 0 |
| | 2 | 1.47 | 99 | 12.69 | 17.56 | | 350.9 | | 25.18 | 0 |
| | 3 | 1.69 | 99 | 12.70 | 17.51 | | 351.1 | | 24.98 | 0 |
| 1993 | 1 | 0.62 | 85.77 | 5.68 | 13.73 | 126.5 | 126.5 | 4.53 | 7.84 | 0 |
| | 1A | 0.96 | 87.94 | 5.78 | 13.63 | | 126.5 | | 8.44 | 0 |
| | 2 | 0.62 | 80.10 | 8.29 | 12.63 | | 126.5 | | 6.44 | 0 |
| | 3 | 0.75 | 80.10 | 8.49 | 12.64 | | 126.5 | | 6.38 | 0 |
| 1994 | 1 | 0.67 | 85.77 | 14.89 | 14.34 | 126.5 | 126.5 | 5.63 | 9.19 | 0 |
| | 1A | 0.64 | 85.77 | 12.18 | 12.55 | | 126.5 | | 9.21 | 0 |
| | 2 | 0.55 | 80.10 | 12.44 | 12.65 | | 126.5 | | 7.55 | 0 |
| | 3 | 0.74 | 80.10 | 8.29 | 13.80 | | 126.5 | | 7.47 | 0 |

NRCS CN : Natural Resource Conservation Service, Curve Number

Clark : module de la fonction de transfert de Clark

Qp : le débit de pointe (m3/s)

Ia : perte initiale (mm)

Fct obj : la fonction objective

V : le volume en mm

CN : Nombre de courbe

Tc : temps de concentration (h)

st : temps de stockage (h)

Sim. : Simulé

Obs. : observé

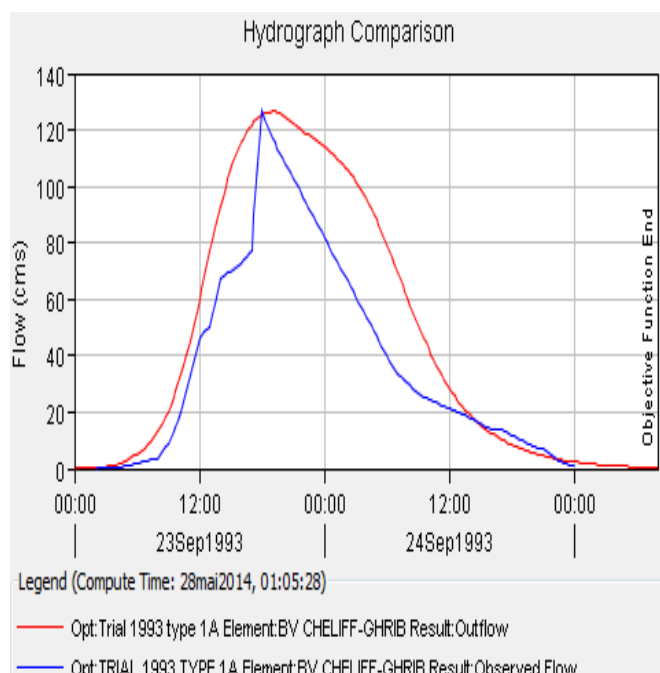
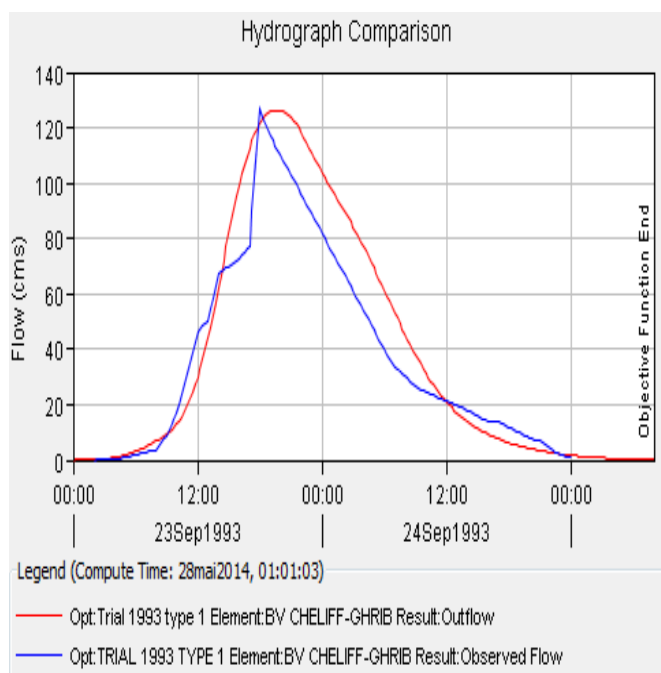
I-3-2- Les graphes de calibration :

Les graphes des hydrogrammes des crues de l'évènement 1993 sont suivants :

a-La calibration par fonction de transfert Lag :

Averse type 1

Averse type 1A



Averse type 2

Averse type 3

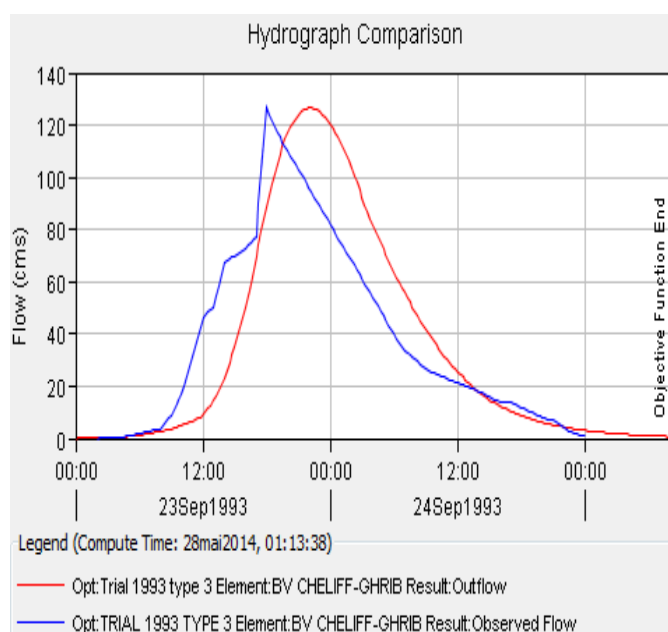
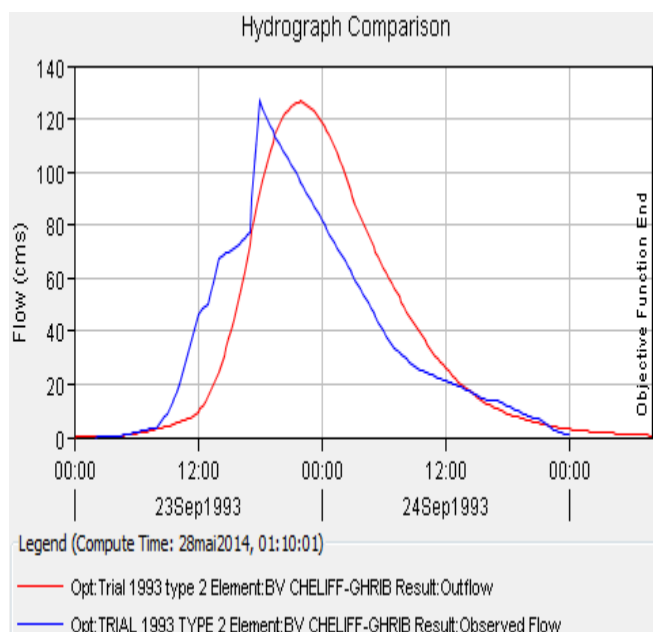
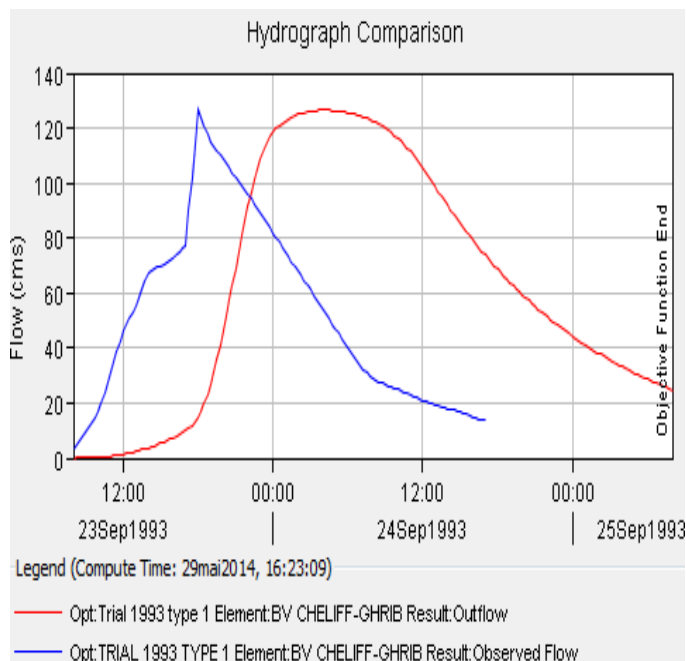


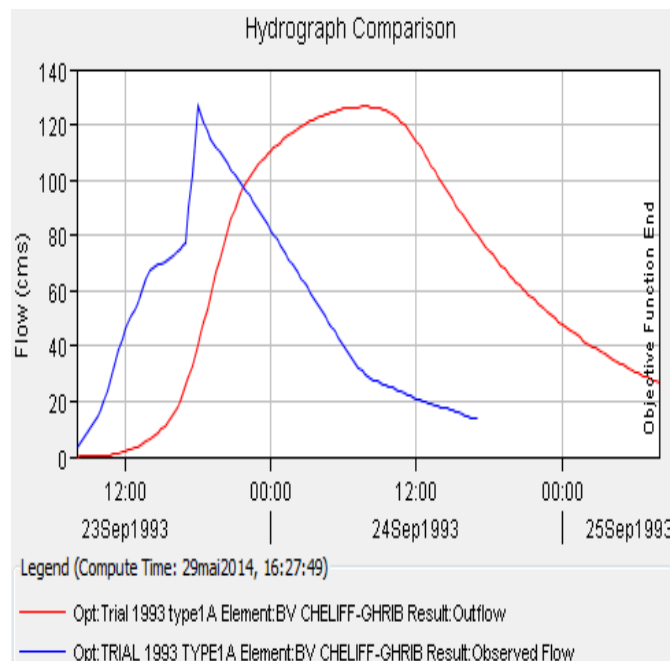
Figure 14- Hydrgrammes de crues de l'évènement 1993 après calibration par la fonction de transfert Lag

b-La calibration par la fonction de transfert Clarck :

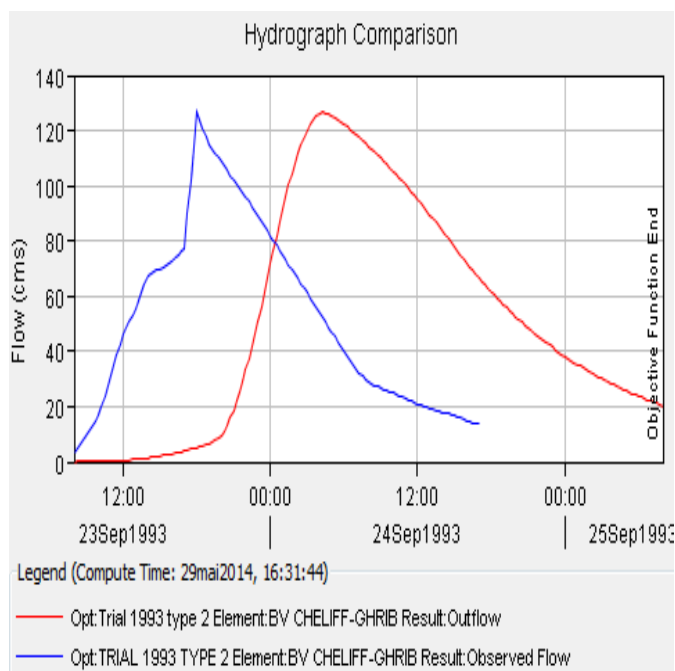
Averse type 1 :



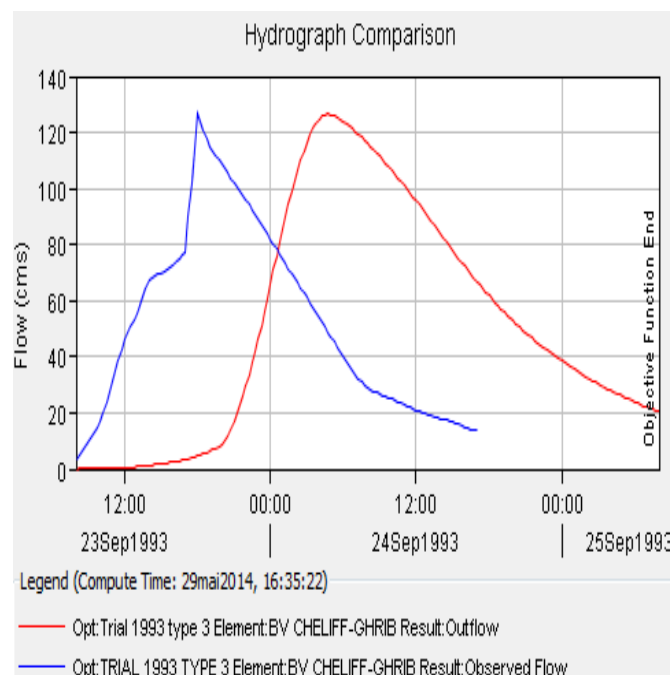
Averse type 1A :



Averse type 2 :



Averse type 3 :

**Figure 15- Hydrgrammes de crues de l'évènement 1993 après calibration par la fonction de transfert Clark**

N.B : Les hydrogrammes de crues des événements 1980, 1982, 1986, 1993 et 1994 après calibration sont trouvés dans l'annexe.

En effet, en fouillant les résultats minutieusement nous pouvons clairement remarquer que :

Dans le cas du choix du formalisme Lag: la fonction objective est nulle pour les quatre types d'averses des événements 1982, 1993 et 1994. Pour les autres événements 1980 et 1986 la fonction objective prend les valeurs nulle pour les averses 1,2 et 3 et des valeurs 14.2 et 11.9 pour les averses de type 1A. Ce constat est valide pour les débits de pointe, où ils sont mieux restitués lors de l'utilisation des averses 1, 2 et 3. Pour les volumes simulés, ils sont bien estimés pour l'événement 1980, 1982, 1993 et 1994 et sous estimés pour l'événement 1986 et quel que soit le type d'averse. En ce qui concerne les valeurs optimisées des paramètres, nous remarquons que ces paramètres changent en passant d'un événement à l'autre, et sont moins variables au sein du même événement. Ces jeux de paramètres peuvent servir pour valider le modèle puisque ils sont proches pour événement 1993 et 1994.

Dans le cas du choix du formalisme Clark : la fonction objective est nulle pour les quatre types d'averses de tous événements. Pour les volumes de crue, nous constatons que le problème de surestimation excessive persiste toujours, chose qui est bien comprise car la fonction de transfert n'a pas d'effet sur le volume de la crue, mais c'est plutôt sur le mouvement de ce volume qu'elle intervienne.

D'après cette première calibration, nous avons pu ressortir quelques conclusions, qui vont nous permettre de restreindre le nombre de simulations à partir desquelles nous en déduirons le jeu de paramètre optimal, ces conclusions sont :

- Le formalisme de l'hydrogramme unitaire de NRCS s'avère plus adapté à notre contexte d'étude que celui du Clark, donc la recherche des valeurs des paramètres optimales va être concentré dans ses résultats détaillés dans le tableau 12.
- Les averses types 1 et 2 ont été les mieux classés dans la restitution des caractéristiques de l'hydrogramme (débit de pointe et volume.
- La fonction objective sur le débit de pointe a permis sans doute de reproduire les pics des hydrogrammes avec excellence.

Pour tous les événements, l'hydrogramme simulé était comme prévu, donc leur comparaison va reposer plus sur ces trois caractéristiques : débit de pointe, volume simulés et l'allure de l'hydrogramme.

En utilisant les résultats simplifiés présentés dans le tableau 16, nous avons procédé à plusieurs approches pour aboutir au jeu de paramètres optimal, en l'occurrence :

- Méthode 1 : Utilisation de la moyenne des valeurs des paramètres des 5 événements ;
- Méthode 2 : Utilisation des maximums des valeurs des paramètres des 5 événements ;
- Méthode 3 : Utilisation des minimums des valeurs des paramètres des 5 événements ;

Tableau 16- Résultats simplifiés issus de l'utilisation du formalisme de Lag

| Averse | Evènement | Paramètres calibrés | | | Résultats de calibration | | | | Fonction Obj % |
|--------|-----------|---------------------|--------|--------|--------------------------|-------|---------|-------|-------------------|
| | | NRCS CN | | | Qp (m³/s) | | V (mm) | | |
| | | Ia | CN | Tlag | Obs. | Sim. | Obs. | Sim. | |
| 1 | 1980 | 1 | 85.77 | 399.68 | 197.1 | 197.1 | 8.56 | 7.58 | 0 |
| | 1982 | 1 | 60.03 | 547.4 | 159.3 | 158.8 | 7.26 | 7.64 | 0 |
| | 1986 | 1 | 89.74 | 457.15 | 351.0 | 354.2 | 45.03 | 14.97 | 0 |
| | 1993 | 1 | 71.56 | 476.0 | 126.5 | 126.4 | 4.67 | 5.45 | 0 |
| | 1994 | 1 | 70.56 | 478.18 | 126.5 | 126.7 | 5.63 | 5.67 | 0 |
| 2 | 1980 | 1 | 80.10 | 403.21 | 197.1 | 197.2 | 8.56 | 6.18 | 0 |
| | 1982 | 1 | 47.106 | 481.38 | 159.3 | 158.7 | 7.26 | 6.02 | 0 |
| | 1986 | 1 | 84.05 | 422.69 | 351.0 | 350.5 | 45.03 | 11.91 | 0 |
| | 1993 | 1 | 68.036 | 547.07 | 126.5 | 126.5 | 4.67 | 5.02 | 0 |
| | 1994 | 1 | 62.98 | 483.91 | 126.5 | 126.5 | 5.63 | 4.81 | 0 |

I-3-3- Résultats détaillés du premier essai de validation

Partie 1 :

Averse 1

Tableau 17- Résultats de simulation (utilisation de la moyenne des valeurs)

| Averse | Evènement | Paramètres calibrés | | | Résultats de simulation | | | | | |
|--------|-----------|---------------------|-------|--------|-------------------------|--------|---------|---------|------|---------|
| | | NRCS CN | | | Qp (m ³ /s) | | | V (mm) | | |
| | | Ia | CN | Tlag | Obs. | Sim. | Dif (%) | Obs. | Sim. | Dif (%) |
| 1 | 1980 | 1 | 75.53 | 471.68 | 197.14 | 126.1 | 36.03 | 8.56 | 5.37 | 37.26 |
| | 1982 | | | | 159.34 | 249.9 | 56.83 | 7.26 | 11 | 51.51 |
| | 1986 | | | | 351.0 | 206.3 | 41.22 | 45.03 | 9.10 | 79.79 |
| | 1993 | | | | 126.50 | 141.0 | 11.46 | 4.67 | 6.07 | 30 |
| | 1994 | | | | 126.50 | 145.20 | 14.78 | 5.63 | 6.43 | 14.2 |

Tableau 18- Résultats de simulation (utilisation des maximums des valeurs)

| Averse | Evènement | Paramètres calibrés | | | Résultats de simulation | | | | | |
|--------|-----------|---------------------|-------|--------|-------------------------|--------|---------|---------|-------|---------|
| | | NRCS CN | | | Qp (m ³ /s) | | | V (mm) | | |
| | | Ia | CN | Tlag | Obs. | Sim. | Dif (%) | Obs. | Sim. | Dif (%) |
| 1 | 1980 | 1 | 89.74 | 547.40 | 197.14 | 198.60 | 0.74 | 8.56 | 8.93 | 4.14 |
| | 1982 | | | | 159.34 | 382.8 | 41.62 | 7.26 | 17.86 | 59.35 |
| | 1986 | | | | 351.0 | 319.9 | 8.86 | 45.03 | 14.97 | 66.75 |
| | 1993 | | | | 126.50 | 221.50 | 42.88 | 4.67 | 10.12 | 53.85 |
| | 1994 | | | | 126.5 | 228.7 | 44.68 | 5.63 | 10.76 | 47.67 |

Tableau 19- Résultats de simulation (utilisation des minimums des valeurs)

| Averse | Evènement | Paramètres calibrés | | | Résultats de simulation | | | | | |
|--------|-----------|---------------------|-------|--------|-------------------------|-------|---------|---------|------|---------|
| | | NRCS CN | | | Qp (m ³ /s) | | | V (mm) | | |
| | | Ia | CN | Tlag | Obs. | Sim. | Dif (%) | Obs. | Sim. | Dif (%) |
| 1 | 1980 | 1 | 60.03 | 399.68 | 197.14 | 99.0 | 49.78 | 8.56 | 3.85 | 55.02 |
| | 1982 | | | | 159.34 | 188.2 | 15.33 | 7.26 | 7.64 | 4.97 |
| | 1986 | | | | 351.0 | 156.4 | 55.44 | 45.03 | 6.53 | 85.50 |
| | 1993 | | | | 126.50 | 109.9 | 13.12 | 4.67 | 4.29 | 8.13 |
| | 1994 | | | | 126.50 | 112.0 | 11.46 | 5.63 | 4.55 | 19.18 |

Partie 2 :**Averse 2****Tableau 20- Résultats de simulation (utilisation de la moyenne des valeurs)**

| Averse | Evènement | Paramètres calibrés | | | Résultats de simulation | | | | | |
|--------|-----------|---------------------|-------|--------|-------------------------|-------|---------|---------|------|---------|
| | | NRCS CN | | | Qp (m ³ /s) | | | V (mm) | | |
| | | Ia | CN | Tlag | Obs. | Sim. | Dif (%) | Obs. | Sim. | Dif (%) |
| 2 | 1980 | 1 | 68.45 | 467.65 | 197.14 | 128.9 | 34.61 | 8.56 | 4.52 | 47.19 |
| | 1982 | | | | 159.34 | 249.5 | 36.13 | 7.26 | 9.18 | 20.9 |
| | 1986 | | | | 351.0 | 206.3 | 41.22 | 45.03 | 7.06 | 84.32 |
| | 1993 | | | | 126.50 | 143.7 | 11.97 | 4.67 | 5.07 | 7.90 |
| | 1994 | | | | 126.5 | 146.1 | 13.41 | 5.63 | 5.40 | 4.08 |

Tableau 21- Résultats de simulation (utilisation des maximums des valeurs)

| Averse | Evènement | Paramètres calibrés | | | Résultats de simulation | | | | | |
|--------|-----------|---------------------|-------|--------|-------------------------|--------|---------|---------|-------|---------|
| | | NRCS CN | | | Qp (m ³ /s) | | | V (mm) | | |
| | | Ia | CN | Tlag | Obs. | Sim. | Dif (%) | Obs. | Sim. | Dif (%) |
| 2 | 1980 | 1 | 84.05 | 547.07 | 197.14 | 180.05 | 8.67 | 8.56 | 6.98 | 18.45 |
| | 1982 | | | | 159.34 | 352.80 | 54.83 | 7.26 | 14.33 | 49.33 |
| | 1986 | | | | 351.0 | 292.6 | 16.63 | 45.03 | 11.91 | 73.55 |
| | 1993 | | | | 126.50 | 201.8 | 37.31 | 4.67 | 7.93 | 41.11 |
| | 1994 | | | | 126.5 | 206.8 | 38.83 | 5.63 | 8.45 | 33.37 |

Tableau 22- Résultats de simulation (utilisation des minimums des valeurs)

| Averse | Evènement | Paramètres calibrés | | | Résultats de simulation | | | | | |
|--------|-----------|---------------------|-------|--------|-------------------------|--------|---------|---------|------|---------|
| | | NRCS CN | | | Qp (m ³ /s) | | | V (mm) | | |
| | | Ia | CN | Tlag | Obs. | Sim. | Dif (%) | Obs. | Sim. | Dif (%) |
| 2 | 1980 | 1 | 47.10 | 422.69 | 197.14 | 96.4 | 51.10 | 8.56 | 3.16 | 58.41 |
| | 1982 | | | | 159.34 | 174.3 | 8.58 | 7.26 | 6.02 | 17.08 |
| | 1986 | | | | 351.0 | 146.3 | 58.31 | 45.03 | 5.05 | 88.78 |
| | 1993 | | | | 126.5 | 106.03 | 16.21 | 4.67 | 3.50 | 25.05 |
| | 1994 | | | | 126.5 | 107.0 | 15.41 | 5.63 | 3.70 | 34.28 |

Ces approches ont été exécutées sur les deux types d'averse 1 et 2 afin de déceler celle qui permet, avec son jeu de paramètres, de converger vers une validation du modèle. Les résultats d'essai de validation des trois méthodes sont reportés dans le tableau III. , et montrent que :

L'averse type 1 : les pourcentages de différence entre le débit de pointe observé et simulé varie de 0.74 (méthode 2, événement 1980) jusqu'à 56.83 (méthode 1, événement 1982).

Pour l'efficacité sur volume, il apparaît qu'elle a un comportement différent en fonction de la méthode et de l'événement, par exemple elle a chuté pour l'événement 86 quelque soit la méthode, elle a augmenté pour l'événement 93 et 94. En général, le problème de surestimation des volumes persiste encore, ce qui nous oblige à vérifier les hypothèses posées auparavant.

L'averse type 2 : les résultats de validation pour les différentes méthodes sont quasiment pareils à ceux de l'averse 1.

Ce premier essai de validation a permis de qualifier la méthode de la moyenne des valeurs comme étant celle qui donne les meilleurs résultats, ceci est justifiable en partie du fait que le modèle est étroitement lié à l'état du surface du bassin, c'est-à-dire que si considère que

l'occupation du sol du Cheliff-Ghrib varie intensément sur des périodes de temps courtes, donc les jeux de paramètres optimaux des événements ne seront jamais stables puisque chacun d'eux a survécu pendant un état de surface différent.

Néanmoins, nous ne pouvons pas parler d'une validation du modèle en reposant sur ce premier essai, d'une part parce que nous n'avons pas assez d'événements dans chaque année, et d'autre part, car la mauvaise efficacité eue pendant la validation ne peut pas être liée seulement au changement dans l'occupation du sol, mais il faut aussi vérifier les hypothèses susmentionnées au début de cette partie, notamment :

- Le choix de la fonction objective.
- L'estimation du pourcentage d'imperméable.
- La distribution journalière de la pluie.

I-4- La validation du modèle

Après le premier essai de validation fait par les trois méthodes et qui n'a pas donné des résultats satisfaisants en matière de la restitution des débits de pointe et de volumes, cette nouvelle calibration effectuée sur l'événement 1993 est censée améliorer l'efficacité du modèle. En appliquant le jeu de paramètre défini dans le tableau 23 aux événements nous arrivons aux résultats suivants :

Tableau 23- le jeu de paramètres optimisé utilisé pour la validation du modèle HEC-HMS sur le bassin du Cheliff-Ghrib

| paramètres | Ia (mm) | CN | T lag | imperméabilité% | Type d'averse |
|-------------------|---------|-------|-------|-----------------|---------------|
| Valeurs optimisés | 1 | 71.56 | 476 | 10 | 1 |

Ce jeu de paramètre optimisé est composé de valeurs de paramètres acceptées et réalistes comme c'est le cas du temps de concentration égale à ce qu'on a calculé par la méthode de Giandotti, et la valeur de CN très proche de celle estimée par la carte d'occupation du sol et de type de sol. Les graphes de l'hydrogramme de crues pour les différents événements sont les suivants :

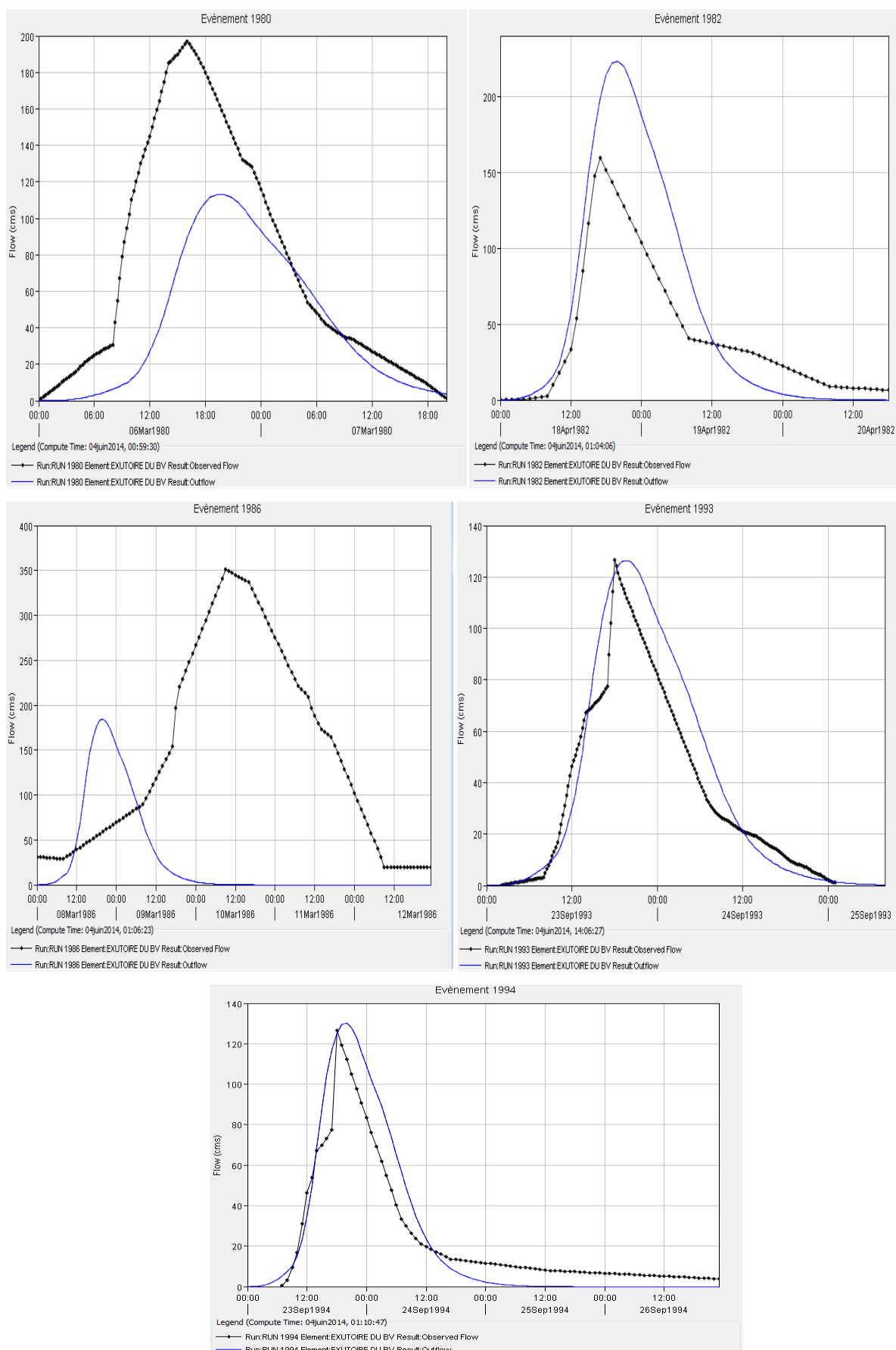


Figure 16- Hydrogrammes des crues des événements après validation du modèle

Tableau 24- Résultats de validation de modèle

| Evènement | Qp.obs. (m³/s) | Qp.sim. (m³/s) | Diff (%) | V obs. (mm) | V sim. (mm) | Diff (%) |
|------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|------------------------|------------------------|-----------------|
| 1980 | 197.14 | 113.2 | 42.58 | 8.56 | 4.85 | 43.34 |
| 1982 | 159.34 | 223.3 | 28.64 | 7.26 | 9.91 | 26.74 |
| 1986 | 351.0 | 184.4 | 47.46 | 45.03 | 8.20 | 81.79 |
| 1993 | 126.5 | 126.4 | 0 | 4.67 | 5.45 | 14.31 |
| 1994 | 126.5 | 130.1 | 2.76 | 5.63 | 5.80 | 2.93 |

Ce tableau montre qu'avec le nouveau jeu de paramètres optimisés, le modèle a pu reproduire le débit de pointe de manière juste pour l'évènement 1994, pour le reste nous apercevons une sous-estimation du débit pour l'évènement 1980 et 1986 et surestimation pour l'évènement 1982. Les volumes simulés quant à eux, ils varient entre 26.74 % pour l'évènement 1982 et 81.79 % pour 1986.

Les volumes surestimés sont provoqués essentiellement par l'utilisation des averses de projet NRCS au lieu des distributions temporelles acquises à partir des pluviographes comme nous l'avons démontré dans la partie calibration.

Cependant, si nous comparons ces résultats avec ceux du premier essai de validation fait par la méthode de la moyenne des paramètres, nous trouvons que ce nouveau jeu de paramètres est plus performant que le premier surtout pour les volumes, ainsi pour les débits de pointe.

II- La prédiction du comportement futur du Cheliff-Ghrib

II-1- Introduction

Nul ne peut nier l'effet des changements climatiques et d'occupation du sol sur les processus hydrologiques et la perturbation de l'équilibre naturel des écoulements. Par conséquent, les planificateurs et les décideurs sont censés connaître quelles seront les répercussions en aval de leurs actions anthropiques entreprises en amont du bassin versant de telle que le développement urbain, la déforestation, les reboisements,...

À la lumière de ceci, la présente partie essaie de réutiliser le modèle HEC-HMS ajusté au bassin versant du Cheliff-Ghrib pour prédire sa réponse à des scénarios positifs et négatifs prenant en considération des modifications au niveau climatique par l'exploitation des averses quantiles prédéterminées, et d'autres touchant l'occupation du sol.

Tous ces scénarios vont être exécutés sur l'événement 1994 auquel le modèle a pu restituer le débit de pointe.

Pour le volume de crue, il sera comparé à celui simulé par le modèle et ensuite à celui réellement observé à la station de l'exutoire.

II-2- Scénario 1 : Les averses quantiles

Ce premier scénario simule l'effet d'averses de périodes de retour différentes sur l'hydrogramme du débit à la station de Ghrib. Ainsi, nous avons remplacé la hauteur de pluie moyenne de l'événement par les hauteurs estimées par des lois statistiques.

II-2-1- Les données d'entrée

Le tableau suivant résume les valeurs estimées de la pluie pour des périodes de retour qui seront utilisées dans les simulations.

Tableau 25- Les hauteurs de précipitations estimées au bassin du Cheliff-Ghrib pour différentes périodes de retour

| Période de retour (ans) | Valeur estimé (mm) |
|------------------------------------|-------------------------------|
| 10 | 63.43 |
| 25 | 75.79 |
| 50 | 84.95 |
| 100 | 94.05 |
| 200 | 103.11 |
| 1000 | 124.11 |

Chaque hauteur de pluie sera additionnée au jeu de paramètres optimisés définis dans le tableau 23 pour configurer un fichier de simulation distinct. Par conséquent, nous aurons à comparer six fichiers de simulation, en plus des résultats simulés et observés pour l'événement 1994.

II-2- Les résultats de la simulation

Les résultats résumés dans le tableau III.16 et les graphes dans la figure III.7 présentent les valeurs prévues par le modèle HEC-HMS au bassin du Cheliff-Ghrib en termes du pic de l'hydrogramme et du volume du ruissellement. Ils montrent entre autres une corrélation linéaire de $R = 0.99$ pour les deux variables avec la pluie.

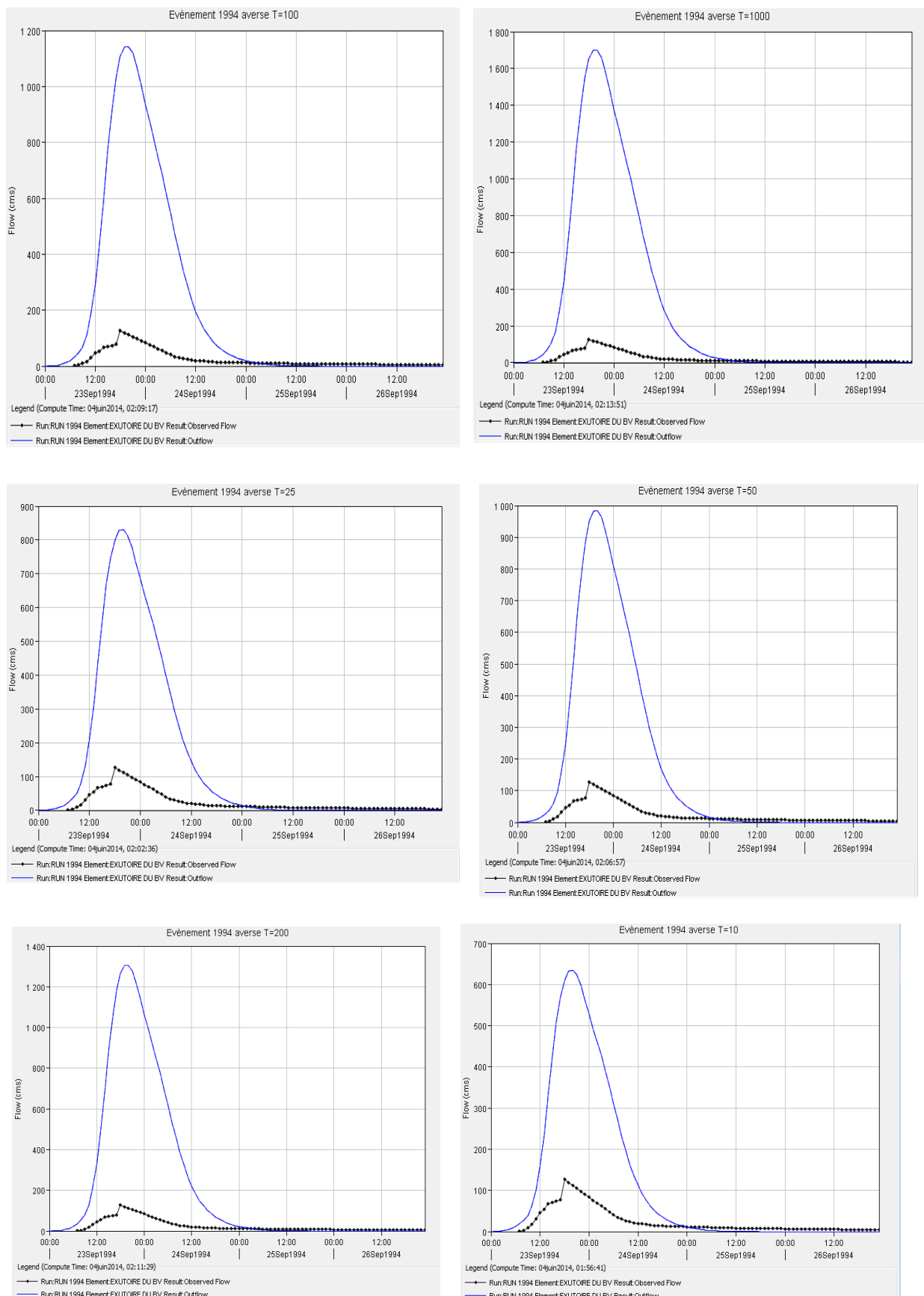


Figure 17- Hydrographes des crues pour différents évènements et différentes période de retour

Tableau 26- Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station de Ghrib pour le scénario 1

| | Observé | simulé | T=10 | T=25 | T=50 | T=100 | T=200 | T=1000 |
|------------------------------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|----------|
| Qp (m³/s) | 126.5 | 130.10 | 635.20 | 830.50 | 983.8 | 1142.0 | 1304.70 | 1700.5 |
| V(1000) m³ | 7827.50 | 8063.85 | 38669.40 | 50364.6 | 59505.4 | 68922.40 | 78586.0 | 101897.2 |

Ces résultats imposent aux responsables de renforcer la protection de l'équipement de mesure du débit à l'exutoire pour qu'il ne soit pas entraîné par les crues prévues, et de mettre en œuvre des mesures structurelles qui peuvent encaisser les énormes volumes simulés.

II-3- Scénario 2 : changement dans l'occupation du sol dans un sens négatif

II-3-1- Les données d'entrée

Dans ce scénario, nous essayons de simuler l'effet de la déforestation et de l'urbanisation sur les débits et les volumes de crue à la station de Ghrib. Mais pour des raisons liées essentiellement à l'absence d'informations et au caractère global du modèle, nous avons opté pour des modifications d'ordre général sur l'occupation du sol et le type de sol. Ces changements apportés à la carte touchent essentiellement :

- L'augmentation de la surface de la zone urbanisée ;
- La disparition de la couverture forestière dont la densité est faible (genévrier clair, chêne clair et forêt claire).
- La croissance de pourcentage des terrains dénudés en faveur des terrains déboisés ;
- L'augmentation du pourcentage d'imperméable suite à l'urbanisation.

À partir de ces modifications, nous avons recalculé le nouveau CN composite du bassin qui passe de 71.56 à 77. Le pourcentage d'imperméable est évalué à 15 %.

Ces valeurs de CN et du pourcentage d'imperméable remplaceront les anciennes dans le jeu de paramètres optimisés, puis on lance la simulation.

II-3-2- Les résultats de la simulation

Le tableau ci-joint montre les valeurs du débit de pointe et du volume obtenues pour le scénario étudié, puis les résultats en lui associant les averses quantiles.

Tableau 27- Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station de Ghrib pour le scénario 2

| | Observé | simulé | Scénario | T=10 | T=25 | T=50 | T=100 | T=200 | T=1000 |
|----------------------------------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|
| Qp (m ³ /s) | 126.5 | 130.10 | 167.1 | 750.40 | 968.3 | 1137.60 | 1311.20 | 1488.6 | 1914.1 |
| V(1000) m ³ | 7827.50 | 8063.85 | 10326.50 | 45518.9 | 58452.8 | 68451.0 | 78670.30 | 89086.0 | 113975.4 |

On voit très bien que le débit de pointe a augmenté d'environ 22 %, sachant que nous avons utilisé une hauteur de pluie identique à celle enregistrée pendant l'événement.

Si nous comparons les débits de pointe pendant les six périodes de retour avec leurs homologues du premier scénario (tableau), nous remarquons que plus la période de retour est grande plus ce pourcentage de 22 % diminue, autrement dit pour les averses extrêmes l'influence de l'occupation du sol sur les débits diminue, ce constat a été démontré dans d'autres contextes (Jenicek, M. (2007)).

Les volumes eux aussi se comportent d'une façon identique (tableau), c'est à dire que plus la fréquence d'une averse est petite moins sera l'effet de l'état de surface sur le volume ruisselé.

Tableau 28- La comparaison entre les résultats des scénarios 1 et 2

| Période de retour (ans) | T=10 | T=25 | T=50 | T=100 | T=200 | T=1000 |
|---|----------|---------|---------|----------|---------|----------|
| Qp scénario 1 (m ³ /s) | 635.20 | 830.50 | 983.8 | 1142.0 | 1304.70 | 1700.5 |
| Qp scénario 2 (m ³ /s) | 750.40 | 968.3 | 1137.60 | 1311.20 | 1488.6 | 1914.1 |
| Différence (%) | 15.36 | 14.23 | 13.52 | 12.90 | 12.35 | 11.16 |
| V scénario 1 (10 ³ m ³) | 38669.40 | 50364.6 | 59505.4 | 68922.40 | 78586.0 | 101897.2 |
| V scénario 2 (10 ³ m ³) | 45518.9 | 58452.8 | 68451.0 | 78670.30 | 89086.0 | 113975.4 |
| Différence (%) | 15.05 | 13.83 | 13.07 | 12.39 | 11.79 | 10.59 |

II-4- Scénario 3 : changement dans l'occupation du sol dans un sens positif

II-4-1- Les données d'entrée

Pour ce troisième scénario, l'action est mise sur l'évaluation de l'impact d'une urbanisation du bassin de même envergure que celle du scénario 2, mais en parallèle on entreprend des actions de reboisements des sols nus et de renforcement de la couverture forestière à densité faible, ainsi :

- Les sols nus deviendront une forêt claire ;
- La densité claire deviendra moyenne;
- La zone urbanisée est identique à celle du scénario 2 ;

À partir de ces modifications, nous avons recalculé le nouveau CN composite du bassin qui est égal à 65. Le pourcentage d'imperméable est évalué à 15 %.

Cette valeur va remplacer celle du jeu de paramètres optimisés, ensuite on lance les simulations.

II-4-2- Les résultats de la simulation

Dans ce qui suit sont représentés les résultats obtenus pour ce scénario, à savoir le débit de pointe et le volume issus de la simulation du scénario et ceux résultant en substituant la pluie de l'événement 1994 par des pluies à périodes de retour distinctes.

Tableau 29- Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station de Ghrif pour le scénario 3

| | Observé | simulé | Scénario | T=10 | T=25 | T=50 | T=100 | T=200 | T=1000 |
|----------------------------------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Qp (m ³ /s) | 126.5 | 130.10 | 135.10 | 592.7 | 769.7 | 909.10 | 1053.8 | 1203.6 | 1568.9 |
| V(1000) m ³ | 7827.50 | 8063.85 | 8347.9 | 36350.6 | 47051.4 | 55450.3 | 64136.5 | 73084.6 | 94803.50 |

Nous nous apercevons que l'ajout de 5 % de surface imperméable par rapport à l'état initiale a engendré une croissance de 4 % pour le débit et 3.4 % en termes de volume, ceci malgré que le CN a baissé de 71.56 à 65. Nous pouvons donc comprendre l'effet négatif de l'imperméabilisation des surfaces des bassins versant, par le biais de l'urbanisation par exemple, sur son régime hydrologique. En outre, nous remarquons que les deux variables débit et volume montrent des valeurs moins fortes que dans le cas du scénario 2, ceci prouve que les reboisements bien que modestes amortissent les effets de l'urbanisation prévue. Enfin, la diminution de l'influence de l'occupation du sol sur les débits et les volumes pour les averses extrêmes est aussi valide pour ce scénario.

III-Conclusion

D'après ce qui précède, nous arrivons à reconnaître l'effet positif et négatif de quelques situations susceptibles de se manifester sur le terrain dans les prochaines décennies, et que les responsables sont censés prendre en considération dans leurs plan d'aménagement du bassin du Cheliff-Ghrib. En outre, nous avons pu reconfirmer que la relation cause à effet entre le changement de l'occupation du sol d'une part et les débits et les volumes de l'autre, est de moins en moins étroite que les averses sont extrêmes.

Néanmoins, nous croyons que l'utilisation des données officielles de projections futures permettra de simuler des situations plus réalistes et plus précises que celles proposées. Mieux encore seront les bénéfices tirés de cette étude de prédiction du comportement, si nous utilisons la forme semi-distribuée (découpage en sous bassins versants) ou carrément distribuée (maillée) du modèle HEC-HMS.