Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme

de MASTER

FILIERE : Hydraulique

Option : Ouvrage Hydraulique et Aménagement

THEME

MODELISATION PLUIE-DEBIT PAR LE LOGICIEL "HEC-HMS" DE SOUS- BASSIN VERSANT L'OUED SAHEL

Dirigé par :

Mr. SAHLI.y

Présenté par :

Mokhtari Choayb

Promotion : 2015/2016.

Remerciement

Nous tenons à tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.
En second lieu, Je tiens à remercier aussi et chaleureusement ma mère nous tenons à remercier notre encadreur Dr : ***Messaoud Ghodbane*** *pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être menée au bon port.*
Nos vifs remerciements aussi à tous les enseignants :

Mr. ***BARGHOUTHE ALI*** *et Mr* ***FAROUK MEZALI*** *, Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.*

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel.

Dédicace

C'est avec un immense plaisir que je dédie ce modeste travail à :

A ma chère belle mère

Aux supports de mon âme, vous mes très chères frères : KAMAL, BRAHIM et mes sœurs.

Et a mes amies : Nasser merzoug ,madani ilyass ,benyattou elhacen, ,mahmoud ould fah , abdelbassit tiayba ,ridha tebani,kheiri mohamed,bekri mourad ,belkhir messoud,

A Tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour être un jour un master hydraulique

A tous les étudiants master hydraulique de l'université de M'sila et surtout les étudiants de deuxième Année Master « Ouvrage Hydraulique et Aménagement» *promo 2015 /2016.*

Je vous remercie tous la famille mokhtari

ABDENNASSER

INTRODUCTION GENERALE

Dans un bassin versant, la transformation de la pluie en débit résulte d'un certain nombre de mécanismes complexes qui interviennent simultanément à différentes échelles spatiales et temporelles. De ce fait le modèle pluie-débit trouve sa nécessité dans la mesure où le modèle conçu à partir des chroniques de pluies observées, peut générer des débits qui soient les plus proches possibles des débits observés, c'est à dire à partir des observations de pluie tombée, on peut arriver à reproduire (ou à prédire) la réponse en débit du bassin.

La modélisation pluie-débit permet de décrire la transformation de ces pluies en débits dans les cours d'eau d'un bassin versant en tenant compte de la réalité du terrain.

La transformation pluie- débit nous permet de maitriser la prévision des débits pour deux objectifs distincts :

- La bonne exploitation des aménagements hydrauliques. En effet, l'utilisation régulière de la prévision de débit permet d'optimiser la régulation des aménagements disposant d'une certaine accumulation, de procéder à des vidanges préventives lors des crues, d'éviter des déversements et d'augmenter les performances au sens large d'un aménagement.
- Assurer la sécurité des populations et des biens. Elle est utilisée comme une aide efficace à la décision lors de situations de crise.

Notre modélisation (pluie-débit) est appliquée à une partie du bassin versant de la Soummam qui est « Oued SAHEL ». Ce dernier est un cours d'eau très important. Des événements hydrologiques extrêmes se sont produits à son niveau. Ces crues sont intéressantes à analyser tant sur l'aspect forme que sur l'aspect de leur dynamique.

Le bassin versant d'Oued Sahel est contrôlé par des stations pluviométriques et des stations hydrométriques

Le principe de la modélisation pluie-débit par le logiciel HEC-HMS permet d'obtenir des informations sur le fonctionnement du système hydrologique du bassin versant.

Notre travail sera élaboré selon les étapes suivantes : présentation de la zone d'étude, un aperçu, présentation du modèle hec- hms , méthodologie et application du hec-hms

Description de la zone d'étude

I-1- Introduction:

L'objectif principal de ce chapitre est d'accéder à une connaissance générale des principales caractéristiques du bassin versant de la Soummam. Cette partie sera donc avant tout descriptive .

Ce chapitre est consacré à la description géographique, réseaux hydrographiques, conditions climatiques et caractéristiques hydrauliques du bassin versant de la Soummam.

I-2-Situation géographique :

D'une superficie de 9125 Km², le bassin versant de la Soummam est situé dans la partie Nord-est de l'Algérie à mi-chemin entre la ville d'Alger et la ville de Constantine, exactement entre les méridiens 3° 38' et 5° 38' et les parallèles 35° et 36° 45'. Il est limité au Nord par les chaînes montagneuses du Djurdjura et ses contreforts qui s'étendent jusqu'à la mer Méditerranée, au Sud par les contreforts des monts du Hodna, à l'Est par les chaînes des Babors et le plateau de Sétif et à l'Ouest par le plateau de Bouira.

Le bassin versant de la Soummam porte selon la codification de l'ANRH le N°15. Il est limitrophe de plusieurs bassins versants (Fig. I.1). Limité au Nord, par le bassin de l'Oued Sebaou (code 02b) et par celui du côtier Algérois (code 02a), au Nord-est par le bassin versant de l'Oued Kébir Rhumel (code 10) et par le bassin versant du côtier Constantinois (code 03), à l'Est par les basses hauts plateaux Constantinois (code 07) ; au Sud par le bassin de Chott El Hodna (code 05), et à l'Ouest par le bassin de l'Oued Isser (code 09). [1]

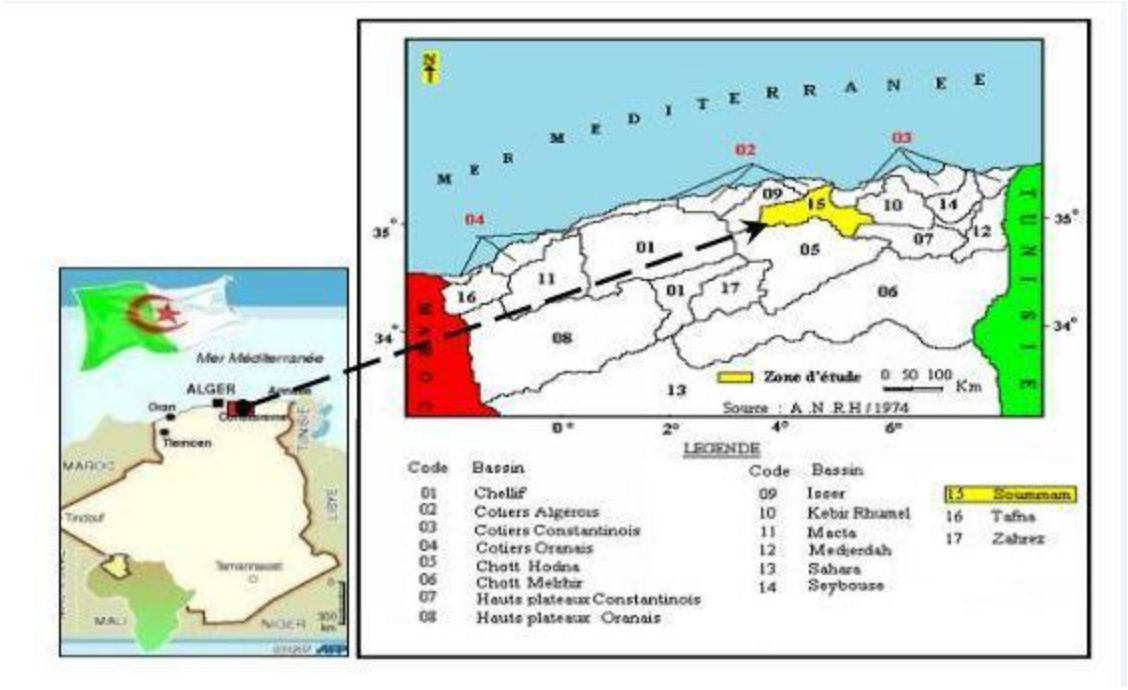


Figure I-1 : La situation de la zone d'étude par rapport au bassin hydrographique de l'Algérie du nord

Le bassin versant de l'Oued Soummam est dans ses grandes lignes constitué, sur la rive gauche, par de l'oligocène traversé par des formations du crétacé inférieur ; du miocène inférieur apparaît dans la partie aval, en bordure de l'Oued de terrasses alluviales importantes tapissent en généra le pied des pentes sauf dans la région de Sidi-Aich où le crétacé apparaît jusque dans le lit. Le versant rive droite est en majeur parti formé de crétacé inférieur moyen et supérieur ; les terrasses alluviales sont beaucoup plus restreintes. Les terrains rencontrés sont généralement imperméables : argilo grès de l'oligocène, schistes de l'alboaptien, marno calcaires du crétacé.[2]

I-3- Les sols:

Le bassin versant de la Soummam présente deux types de sols, en fonction du rapprochement de l'oued Soummam. A proximité de l'Oued les sols sont plutôt de nature alluviale donnant des sols dits alluviaux, ces derniers sont caractérisés pas une faible teneur en matière organique, texture fines et légère, teneur très faible en sels solubles résultat du charriage des eaux qui les ont déposé de part et d'autre de l'Oued.

Plus loin des rives de l'Oued, les sols sont de type calcaire, plus au moins acide, ils sont perméables, légers par la présence de la matière organique [jusqu'à 25%], leur nature minéralogique varie en fonction de la roche mer sous jacente [Figure 05].

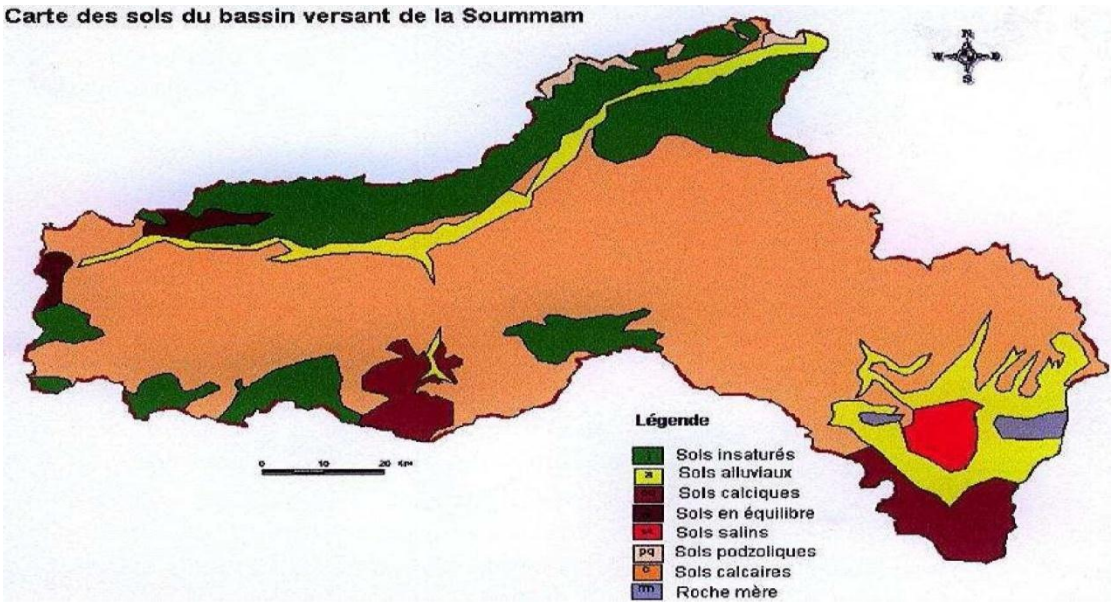


Figure I-2 : Carte des sols du bassin versant de la Soummam

I-4- Découpage administratif:

Selon le découpage administratif, la zone d'étude couvre quatre wilayas, Béjaia, Bouira, Sétif et Bordj Bou Arréridj (Fig. I.2). [1]

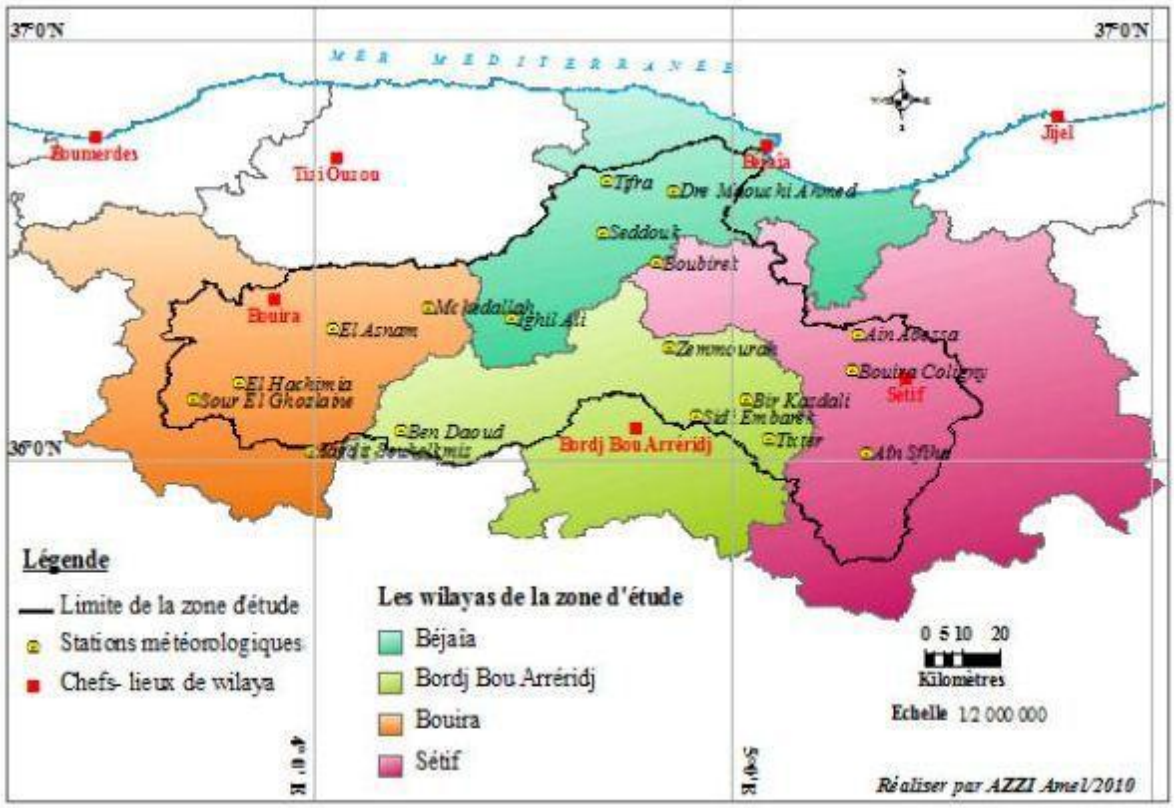


Figure I.3 : Situation de la zone d'étude par rapport aux wilayas limitrophes.

I-5- Paramètres du relief:

Le relief joue un rôle important sur le comportement hydrologique d'un bassin, il détermine en grande partie l'aptitude des terrains au ruissellement, l'infiltration et la vaporisation. Le relief de la Soummam présente une forme assez irrégulière ; au nord, le bassin est limité par les chaines de Djurdjura, au sud par les montagnes de Bibans et des Djebels Mansourah, à l'Est par les montagnes de la petites Kabylie. En allant de Bouira vers Akbou, l'orographie du bassin est très prononcée, l'altitude n'est en aucun endroit inferieur à 1500 m. C'est dans cette région, près de Maillot (M'Chedallah) qu'est situé le point culminant (Lalla Khedidja) de la Soummam (2308 m). L'altitude diminue graduellement en avançant d'Akbou vers la mer. Les montagnes de la petite Kabylie sont également prononcées de point de vue altitude, leur plus haut sommet atteint 2004 m au Djebel Babor. De même les chaines montagneuses du sud ne restent pas orthographiquement en arrière par rapport aux massifs cités précédemment, les pics sont atteint aux Bibans 1832 m et Djebel Mansourah1836m. [3]

La longueur de la vallée (longueur du lit majeur) est de 65 km pour une dénivellation de 166 m, soit une pente moyenne de 2,5 ‰. La longueur développée suivant le lit mineur (basses eaux) est de 90 km, soit une pente moyenne de 1,85 ‰. La pente varie de 3,0 ‰ à 3,5 ‰ entre Akbou et Takrietz. Puis l'on note au passage des gorges de Takrietz et de Sidi Aich un adoucissement notable, la pente étant de l'ordre de 2 ‰. A l'aval de Sidi Aich, la rivière retrouve une pente plus forte, de l'ordre de 3‰ qui varie ensuite régulièrement jusqu'à l'embouchure où elle est de l'ordre de 0,2 ‰. [3]

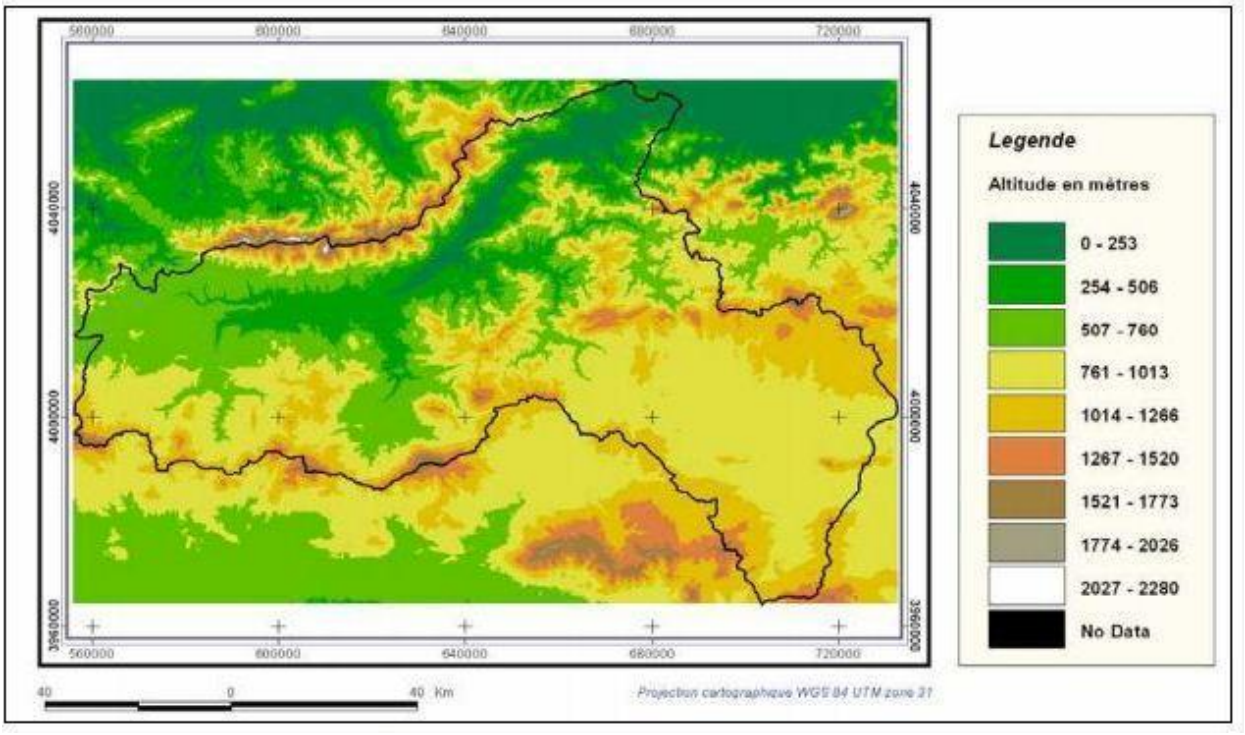


Figure I.4 : Carte du relief du bassin versant de la Soummam

I-6-La géologie:

Il y a une complexité géologique des terrains formant le bassin versant de la Soummam, on distingue:

- **Le Quaternaire** : représenté par des alluvions le long des Oueds et au niveau des hautes plaines.

- **Le Pliocène Continental** : le coteau du Sahel est couronné par des graviers siliceux et fluviaux. Ailleurs, il est conglomératique sinon caillouteux.

- **Le Miocène** : il s'agit essentiellement du Miocène inférieur. Il est continu depuis l'ouest de Bejaia jusqu'aux environs de Sidi Aich. Il affleure également du côté de Djebel Mansourah sous forme de grés.

- **L'Oligocène** : il est généralement argilo-gréseux. Il affleure en abondance à partir de Tazmalt et de part et d'autre de la vallée de la Soummam, en allant vers l'ouest. On note également sa présence au niveau de la chaîne de Gouraya et de la région de Béni-Mansour.

- **L'Eocène** : il est quasiment marneux, parfois calcaro-marneux. Il affleure surtout au niveau des hautes plaines.

- **Le Crétacé** : se présente, en général, sous forma de flysch. Il est étendu, continu depuis chaîne des Bibans jusqu'aux montagnes de la petite Kabylie. Le faciès est marneux au Crétacé supérieur (Sénonien). Il est schisteux, sous forme de bancs de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur avec quelques intercalations de grés au crétacé moyen (Albien) et apparaît dans la région de Béni-Mansour et la chaîne des Bibans. Il est gréseux pélitique, parfois carbonaté-gréseux au crétacé inférieur.

- **Le Jurassique** : il affleure surtout au niveau de la chaîne calcaire et le long de sa continuité vers l'est. Il est principalement calcairo-dolomitique.

- **Le Trias** : il est de faciès gypso-salin et apparaît le long de contacts anormaux (contact des nappes de charriage) dans le Tell méridional et est présenté par des conglomérats et des grés rougeâtres dans le Tell septentrional. [4]

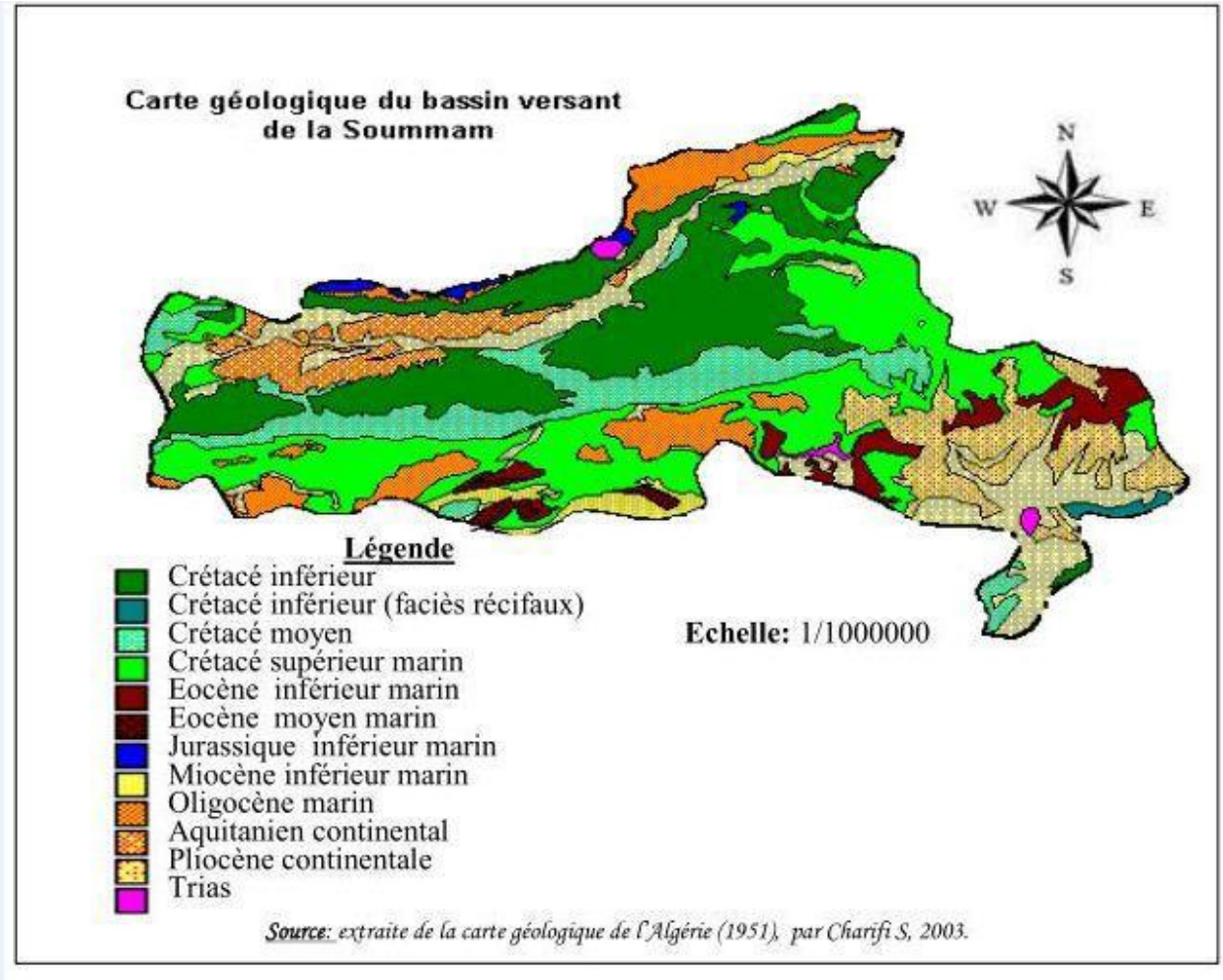


Figure I.5 : Carte géologique du bassin versant de la Soummam

I-7- Ecologie de la Soummam:

Le bassin de la Soummam est particulièrement varie au point de vue écologie (et donc agronomique) du fait de l'interférence entre l'accroissement de la sécheresse vers le sud d'une part et le compartimentage du relief de l'autre. Les chaînes constituent des obstacles au mouvement des masses d'air, qu'elles viennent du Sahara et soient desséchantes ou qu'elles soient issues de la Méditerranée donc riches en vapeur d'eau. Les reliefs raides et élevés provoquent aussi une élévation des masses d'air favorable aux condensations, notamment aux averses violentes de connexion. Ils introduisent aussi un étagement qui permet à la neige de persister des semaines sur le flanc des hautes crêtes du Djurdjura, à quelques kilomètres des oranges de la vallée. Enfin, la lithologie, la nature des roches vient encore introduire des différences supplémentaires au niveau de la nature des sols. [5]

I-8- Climatologie:

Dans chaque pays, chaque village, les caractéristiques moyennes des saisons déterminent le climat. On peut définir les climats à partir de deux phénomènes : la température et les précipitations, c'est à dire la pluie, la neige ou la grêle. Dans les grandes lignes, on décrit un type de climat, mais tant d'éléments le modifient.

Une région de montagne ne subira pas le même climat qu'une plaine. Une vallée située sur le versant d'une montagne n'a pas le même climat qu'une autre vallée sur le versant opposé, même si les deux sont à la même altitude. [6]

Le climat du bassin versant de la Soummam, montre une série de transition entre climat humide, dans les montagnes proches de la Méditerranée, et climat semi-aride des hautes-plaines (environ Sétif). Mais partout les averses sont fréquentes et règne aussi en été une sécheresse prolongée. Les argiles se dessèchent, se fendillent, ce qui favorisant certaines phénomènes (ruissellement, mouvement de masse et surtout nuit à la végétation). [7]

I-8-1- Les précipitations:

Selon la situation géologique et la saison, les précipitations se caractérisent par des intensités, une durée et une fréquence très différentes. Les pluies peuvent être de très fortes intensités, ou alors être très faibles et persister plusieurs jours durant. [7]. La pluviométrie de la Wilaya dépasse généralement 600 mm/an. Dans les montagnes, elle atteint 1000 mm et ne descend en dessous de 600 mm que dans la vallée de la Haute-Soummam et les montagnes

d'Ighil Ali [8]. En fait, plus on pénètre dans la vallée de la Soummam à partir de Béjaia, plus les précipitations diminuent. C'est la conséquence de l'effet de barrière de la chaîne de Djurdjura vis-à-vis des vents humides venant du nord-ouest, d'une part, et de l'effet de continentalité (la vapeur d'eau diminue si la distance de la mer augmente).

La part prépondérante des précipitations se limite aux mois d'hiver, les mois d'été sont secs (climat méditerranéen). Dans la vallée, il ne neige pratiquement jamais. Dans les montagnes, on enregistre, en moyenne, un minimum de 5 jours/an et un maximum de 10 jours/an de précipitations neigeuses. [9]

Les valeurs moyennes mensuelles des précipitations de la région de Bejaia sont représentées dans le tableau suivant.

Mois	J	F	M	A	M	J	JU	AU	S	O	N	D	total annuel moyen
Précpitation (mm)	53	55	107	44	57	38	1	6	39	135	162	70	63.92

Tableau I.1 : Moyennes mensuelles des précipitations de la région de Bejaia en 2010

I-8-2- La température de l'air:

La température est un élément majeur dans les phénomènes de condensation et d'évaporation de l'eau, et constitue un terme essentiel dans la définition du déficit d'écoulement [10]. Au niveau des cours d'eau, les variations de températures suivent celle de l'air même si elles sont de plus faibles amplitudes. Les êtres vivants ne peuvent subsister que dans un intervalle de température compris entre 0 et 50 °C en moyenne, ces températures étant compatibles avec une activité métabolique normale. [11]

La région de la Soummam est sous la dépendance de trois types de climat : climat littoral tempéré sur le cours inférieur de l'Oued Soummam, climat de l'Atlas Tellien sur la moyenne Soummam et sur une partie du haut bassin de la Soummam (Oueds Sahel - cours inférieur de l'Oued Boussellam) et climat des hautes plaines sur le haut bassin de l'Oued Boussellam. Une carte des étages bioclimatiques et représentée dans la figure (I.5).
Les vents dominants sont marins à dominance Nord–Ouest et s'engouffrent facilement dans la vallée de la Soummam durant toute l'année.

Période	Mois	J	F	M	A	M	J	JU	AU	S	O	N	D
2010	M	17	19	19	21	23	26	30	30	28	25	20	19
	M	8	9	10	13	13	17	20	21	19	16	12	9
	M+M/2	12.1	12.5	14.5	17	18	21.5	25	25.5	23.5	20.5	16	14

Tableau I.2 : Températures minimales et maximales et leurs moyennes mensuelles de la région de Bejaia en 2010

Source : Office National de la Météorologie Bejaïa, 2010.

M : Moyennes annuelles des maximas thermiques

m : Moyennes annuelles des minimas thermiques

M+m/2 : Températures moyennes mensuelles**.**

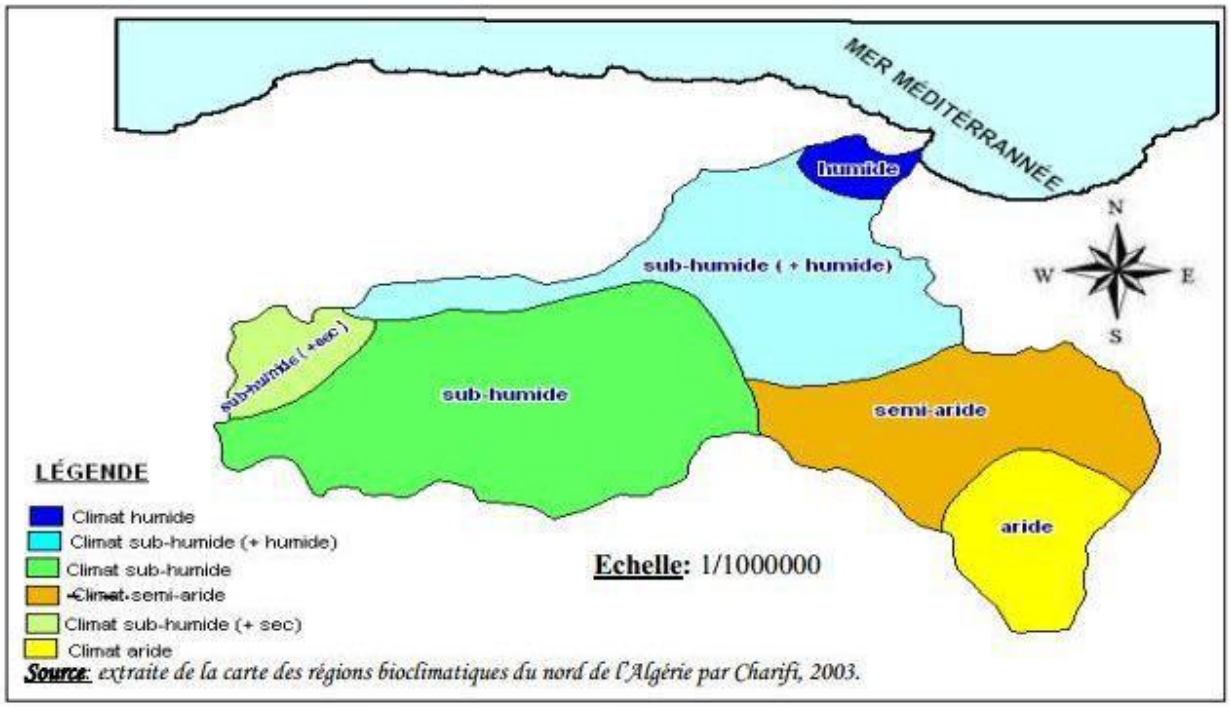


Figure I.6 : Etages bioclimatiques du bassin de la Soummam

I-9- Ressources et potentialités hydriques:

Les eaux de l'oued Soummam sont d'origine diverses et les principales ressources sont les eaux souterraines et les eaux de surfaces.

I-9-1- Ressources souterraines:

Il a été mis en évidence la présence sous les alluvions d'un réservoir s'étalant de Tazmalt à Sidi-Aich et de Sidi-Aich à Béjaia. La division en deux zones de cette réserve se justifie par la

présence à Sidi-Aich d'un seuil géologique qui, de point de vue hydraulique, constitue en quelque sorte une barrière. L'alimentation des deux nappes se fait par l'oued Sahel, et l'Oued Boussellam qui sont les affluents les plus importants de l'Oued Soummam (Fig. I.6) .[8]

I-9-2- Ressources superficielles:

Le bassin versant de l'oued Soummam est entaillé de nombreux cours d'eaux, dont le principal est l'Oued Soummam avec des débits qui montrent des grandes irrégularités inter-mensuelles et saisonnières. A son embouchure, il présente un apport annuel moyen de 700 m³/an qu'il déverse dans la méditerranée. [8]

Les principaux affluents de l'Oued Soummam sont donnés par le tableau (I.3)

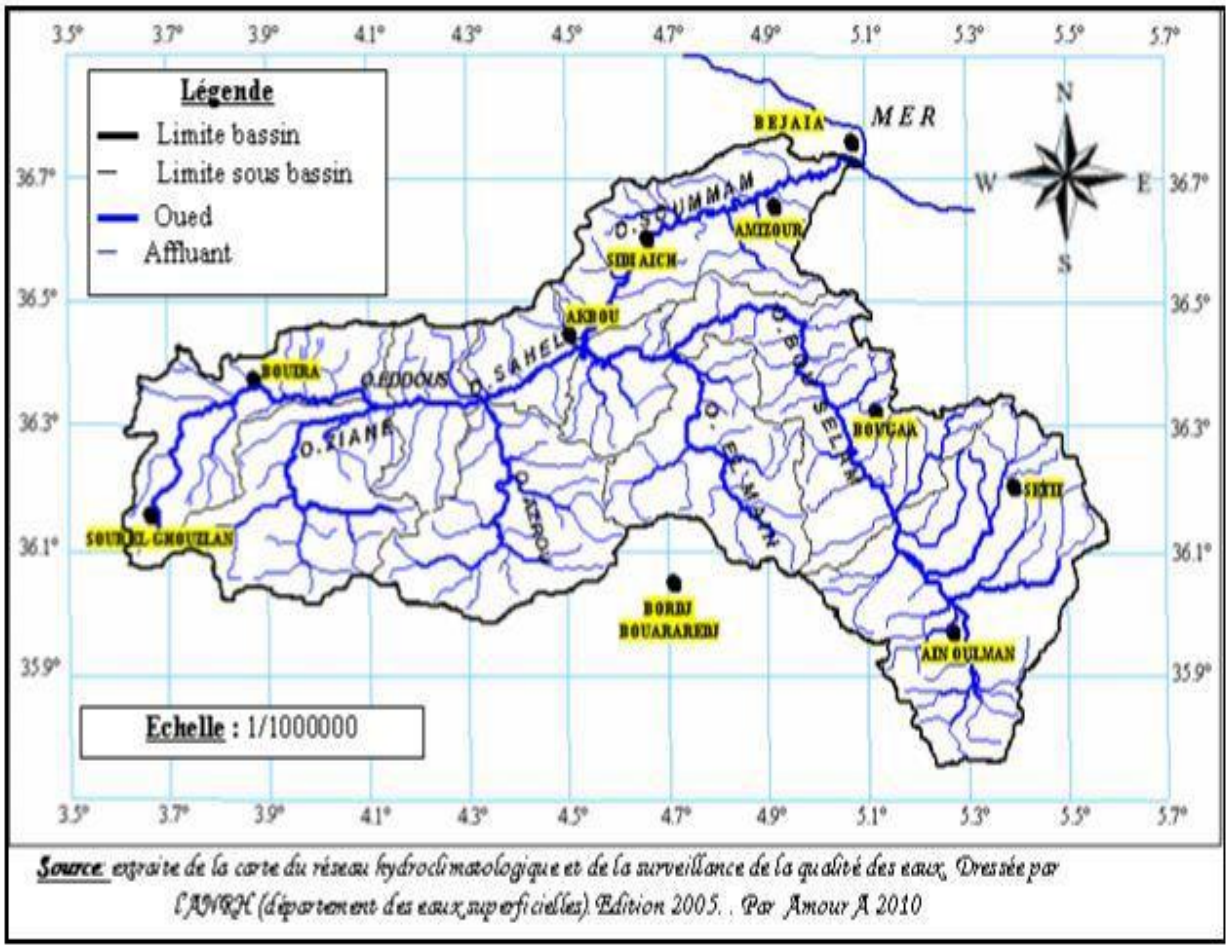


Figure I.7 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Soummam

Affluents	Superficie du bassin versant(Km^2)	Position par rapport à l'oued	Quantité d'eau (m^3/an)
Oued Sahel	3800	Amont	/
Oued Boussellam	4300	Amont	/
Oued Ighzer Amokrane	80	Rive droite	12.10^6
Oued R'mila	100	Rive droite	28.10^6
Oued EL-kseur	55	Rive droite	12.10^6
Oued Ghir	50	Rive droite	12.10^6
Oued Amizour	55	Rive droite	
Oued Amassine	195	Rive droite	15.10^6
Oued Imoula	40	Rive droite	4.10^6
Oued Seddouk	125	Rive droite	10.10^6

Tableau I.3 : Principaux affluents de l'Oued Soummam. [8]

I-10- Le couvert végétal:

La végétation est un paramètre physique important des bassins. Suivant sa nature, sa diversité et sa densité, le couvert végétal influence directement sur le cycle de l'eau au sein des bassins versants. La végétation évolue en fonction des conditions climatologiques du milieu. Ainsi, la densité de la végétation diminue avec l'altitude du fait de l'évolution des conditions climatologiques. Si la densité de la végétation diminue, alors les pertes par évapotranspiration et par interception diminuent de l'aval vers l'amont.

Sur les massifs de l'Akfadou, de Chellata, de Timezrit et des Babors, la végétation est dense et variée ; elle forme de vastes forêts de chênes, de chênes le liège et de pin d'Alep. Par contre, elle est moins dense et localisée sur les reliefs intermédiaires voire absente sur les collines marneuses. Elle est représentée par des maquis de chêne nain et d'oliviers lentisques.

Dans la plaine, la végétation est dense mais essentiellement temporaire ; elle est formée par les grands et formidables champs de cultures maraîchères diverses. Autrefois, les forêts qui couvraient la région fournissaient le bois nécessaire à une industrie du bois florissante mais malheureusement ce capital tend à disparaître sous les feux qui ravagent chaque année des

milliers d'hectares. À cela s'ajoute l'absence d'une politique claire de reboisement et de lutte contre les incendies. [12]

Sur les massifs de l'Akfadou, de Chellata, de Timezrit et des Babors, la végétation est dense et variée ; elle forme de vastes forêts de chênes, de chênes le liège et de pin d'Alep. Par contre, elle est moins dense et localisée sur les reliefs intermédiaires voire absente sur les collines marneuses. Elle est représentée par des maquis de chêne nain et d'oliviers lentisques.

Dans la plaine, la végétation est dense mais essentiellement temporaire ; elle est formée par les grands et formidables champs de cultures maraîchères diverses. Autrefois, les forêts qui couvraient la région fournissaient le bois nécessaire à une industrie du bois florissante mais malheureusement ce capital tend à disparaître sous les feux qui ravagent chaque année des milliers d'hectares. À cela s'ajoute l'absence d'une politique claire de reboisement et de lutte contre les incendies .[12]

I-11- Origine de la pollution de l'Oued Soummam:

La pollution des eaux est variable, elle peut se manifester généralement sous deux formes principales : urbaine et industrielle.

I-11-1- Pollution d'origine urbaine :

a) Eaux usées urbaines:

Les eaux domestiques, elles même divisées en eaux vannes qui comprennent les eaux des diverses toilettes et eaux ménagères qui englobent les autres eaux, notamment celles qui résultent des lavages. Les matières directement liées aux excrétions humaines sont en nature et en qualité relativement constantes. Elles fluctuent peu vis à vis des différents états de développement des populations concernées, avec cependant une tendance vers un enrichissement en matières azotées et en graisses pour les niveaux de vie les plus élevés. [13]

b) L'assainissement:

Les eaux usées de nature et d'origine diverses, produites dans l'espace vital de l'homme, doivent, à partir d'une certaine densité de population, être collectées et évacuées, du fait qu'elles répondent à une nécessité absolue aux plans de l'hygiène et de santé, les mesures prises dans ces domaines contribuent à élever le niveau et la qualité de vie des usagers. [14] La quantité d'eau usée domestique déversée dans l'Oued Soummam et ses affluents est importante et dépasse les

29810 m3/j. La commune de Bejaia à elle seule déverse 18000 m3/j, toute fois une quantité importante de ce volume d'eau est déversée directement dans la mer.

L'assainissement dans le bassin de l'Oued Soummam, accuse un retard notable; et le traitement des eaux usées est loin d'être satisfaisant. On note l'inexistence de stations d'épurations le long de la vallée excepté le chef-lieu de la wilaya de Bejaia, et la présence de 03 bassins de décantation en fonctionnement. Afin de faire face à cette pollution d'origine urbaine, il est prévu cinq (05) stations d'épuration d'eaux usées urbaines le long de la Soummam. [15]

- Tazmalt : 30000 équivalent-habitant : Q = 6400 m3/j
- Akbou : 80000 équivalent-habitant : Q = 19 200 m3/j
- Sidi-Aich : 40000 équivalent-habitant : Q = 6400 m3/j
- El Kseur : 30000 équivalent-habitant : Q = 6400 m3/j
- Amizour : 30000 équivalent-habitant : Q = 6400 m3/j.

c) Les rejets solides:

La quantité globale de déchets ménagers dans la vallée de la Soummam est estimée à plus de 24000 m3/j et un habitant de la vallée produit quotidiennement en moyenne 0,8 Kg de déchets

Solides. [16] En fait, les ordures ménagères rejetées anarchiquement dans l'environnement sans études au préalable du site, et de techniques de mises en décharge peuvent engendrer de graves problèmes de pollution portant atteinte même à l'esthétique du milieu, à la qualité de l'air, des eaux superficielles et souterraines. Les décharges de déchets solides se sont multipliées avec le développement urbain et le développement industriel. Si la collecte de ces déchets ménagers est relativement bien assurée dans la plupart des centres urbains et s'effectue dans des conditions plus ou moins acceptables, leur élimination pose un sérieux problème de protection de l'environnement dans la mesure où la mise en décharge de ces déchets s'effectue dans des conditions de précarité absolue.

I-11-2- Pollution d'origine industrielle:

a) Déchets liquides:

La vallée de la Soummam est caractérisée par l'implantation des plus importantes unités industrielles de la wilaya de Bejaia. Notamment avec l'expansion des zones industrielles d'Akbou, d'El-kseur et de Bejaia ainsi que les grandes usines telles que ; Alphaditex à R'mila,

Cevital, Sonatrach et Naftal à Bejaia et d'autres secteurs dont la majorité est spécialisé dans l'industrie alimentaire (Soummam, Danon, Eriad, Cojek …) et le textile (Alcovel …), en plus des huileries qui sont réparties tout au long des deux rives de l'Oued.

Pour toutes ces industries, l'eau est un facteur de production. Elle peut être utilisée comme matière première, et être incorporée au produit fini, ou intervenir comme auxiliaire au cours du processus de fabrication. Les utilisations industrielles de l'eau sont extrêmement diversifiées. Les propriétés physiques et chimiques très particulières de l'eau y sont évidemment mises à profit, mais c'est souvent sa relative abondance et son coût modique qui déterminent son usage pour des utilisations qui ne sont pas nécessairement spécifiques. En effet, les eaux industrielles sont extrêmement variées selon le genre d'industrie dont elles proviennent [14]. Les établissements industriels ont des productions très diverses (agroalimentaire, textile, pâtes à papier, produits chimiques, tanneries…. etc.) et rejettent plusieurs types d'eaux usées, dont le volume et le degré de contamination sont très variables. [17]

I-11-3- Pollution d'origine agricole:

L'agriculture est entrée dans un stade d'industrialisation active, il ne semble pas que cette évolution se ralentisse et l'on observe chez les autres pays une tendance croissante à la spécialisation des cultures ; une recherche des hauts rendements, une mécanisation croissante et une modification profonde des mentalités paysannes [18]. Parmi les inconvénients qui en résultent pour le milieu aquatique, on peut mentionner :

- L'érosion des sols par suite de monocultures trop étendues.

- L'usage des engrais chimiques au lieu des engrais naturels dont le recyclage est assuré par la nature.

- L'usage des pesticides, insecticides, fongicides et autres produits phytosanitaires

Quelle que soit la pollution, on distingue deux grandes classes :

- **La pollution ponctuelle** (rejets domestiques ou industriels, effluents d'élevage …)

- **La pollution diffuse** (épandage de pesticides et d'engrais sur les terres agricoles …).

I-11-4- Pollution des eaux souterraines:

Une eau souterraine est considérée comme polluée lorsqu'elle contient des substances autres que celles liées aux structures naturelles des terrains, où elle a séjourné. En particulier lorsque les concentrations des constituants dissous ou en suspension dépassent les concentrations maximales admissibles fixées par les normes nationales ou internationales.[19]

CHAPITRE 2 :
APERÇUE GENERAL SUR LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

CHAPITRE 2 : APERÇUE GENERAL HYDROLOGIQUE

Introduction

La première partie de ce chapitre est consacrée à la modélisation hydrologique à travers une présentation des différents types de modèles rencontrés dans la hydrologique et d'un exemple de procédure de modélisation .

La modélisation hydrologique a pour objectif de représenter mathématiquement les processus hydrologiques. La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants touche plusieurs domaines d'application (gestion des ressources en eau, aménagement du territoire …). Dans un contexte opérationnel, les modèles hydrologiques sont utilisés pour répondre à deux problématiques principales :

- ✓ L'évaluation des risques hydrologiques liés aux phénomènes de crues et la gestion de la ressource en eau liée à l'apparition des étiages. On définira en suite les fonctions de production et de transfert généralement utilisées dans nombre de modèles qui traitent de la transformation de la pluie en débit.
- ✓ La seconde partie traitera de la modélisation pluie-débit. Après avoir défini les objectifs de la modélisation, on donnera une classification des différents modèles hydrologiques. On terminera par une description du processus de la modélisation pluie débit.

II -1- La modélisation hydrologique:

La modélisation consiste à mettre un processus en équation. La modélisation hydrologique revient à la traduction mathématique du cycle de l'eau : ses réservoirs et processus doivent être conceptualisés et simplifiés sous forme d'équations.

Les objectifs de modélisation sont multiples : prévisions (crues, sécheresse, gestion de, l'irrigation, d'ouvrages hydroélectriques, recharge d'aquifères) ou simulations de scénarios (changement climatique ; aménagements de bassins d'un point de vue qualité ou quantité d'eau). La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants doit pouvoir décrire les différentes étapes de la transformation pluie-débit.

Un grand nombre de modèles de structures différentes, combinant généralement des fonctions linéaires et non-linéaires ont été développés depuis le début des années 1960.[20]

II-2- Bilan hydrologique d'un bassin versant:

Un bassin versant est défini par rapport à une section droite d'un cours d'eau être présente la superficie drainée par ce cours d'eau à l'amont de ladite section. Toute eau qui ruisselle à l'intérieur du bassin versant transite donc par la section droite considérée appelée exutoire. L'eau précipitée à l'échelle du bassin versant se répartit en eau interceptée, retenue à la surface du sol, infiltrée et ruisselée. La totalité de l'eau interceptée et retenue à la surface du sol et une partie de l'eau infiltrée est perdue par évaporation et évapotranspiration. La hauteur d'eau ruisselée en surface ou pluie nette se transforment ruissellement direct et constitue l'essentiel de l'écoulement vers l'exutoire. Les autres composantes de l'écoulement à l'exutoire sont l'écoulement retardé et le débit de base qui proviennent respectivement de l'eau infiltrée en zone non saturée et de l'eau des nappes souterraines.

Notre étude se basera essentiellement sur la transformation de la pluie précipitée en débit à l'exutoire du bassin versant. Les modèles utilisés dans ce travail sont des modèles à deux fonctions de transformation indépendantes et juxtaposées. La pluie observée est tout d'abord transformée en eau disponible pour le ruissellement au moyen d'une fonction de production ; le transfert de cette eau du lieu de production à l'exutoire du bassin versant se fait ensuite au moyen d'une fonction de transfert.[20]

II-3- Modèles hydrologiques de bassin versant:

La modélisation hydrologique de bassin versant s'intéresse au cycle de l'eau sur un bassin ; elle inclut donc des fonctions de production (liées aux transferts verticaux)et des fonctions de transfert (liées aux redistributions latérales). Un modèle est construit afin de répondre à une question posée dans un milieu donné et suivant une formulation de la réalité choisie. Il doit aussi tenir compte des données de forçage et de validation disponibles ainsi que de la résolution spatio-temporelle de ces données.

Il existe une très grande variété de modèles hydrologiques, car les processus pris en compte et l'approche adoptée pour les conceptualiser diffèrent selon les auteurs. [20]

II-4- La modélisation pluie-débit:

II-4-1- Définitions:

Très souvent, il y a insuffisance de données de débits alors que les données pluviométriques sont généralement abondantes. Il apparaît donc nécessaire, en vue d' une meilleure gestion des ressources en eau par une connaissance plus précise des quantités d'eau disponible, de transformer les données pluviométriques en donnée shydrométriques. D'où l'intérêt de la modélisation pluie-débit basée sur l'utilisation de modèles simulant la réalité.

Un modèle peut être défini comme la représentation simplifiée d'un phénomène naturel complexe permettant la simulation d'un processus physique. En particulier, un modèle de transformation pluie-débit est un outil qui permet de générer, à partir d'une série de données pluviométriques et d'évapotranspiration potentielle, des débits les plus proches possibles de ceux réellement observés ou potentiellement observables àl 'exutoire d'un bassin versant. Un modèle doit répondre à deux critères bien souvent antagonistes : il doit être suffisamment simple pour que sa formulation soit possible et que son exploitation soit aisée et le plus complet possible pour décrire plus fidèlement le système étudié.

Plusieurs auteurs ont proposé une classification : à titre d'exemple Refsgaard et Storm (1996) classent les modèles en trois catégories:

- **les modèles conceptuels**: considèrent le bassin versant, comme un ensemble de réservoirs interconnectés.

-**les modèles empiriques**: de type boite noire, cherchent à reproduire la dynamique des variables de sortie sans tenter de décrire les processus élémentaires.

-**les modèles distribués à base physique**: cherchent à décrire l'ensemble des processus élémentaires en tout point du bassin versant.

La notion de modèles physiques est à opposer à celle de modèles conceptuels, ainsi que l'on oppose modèles distribué à modèles global au niveau de la description spatiale du bassin versant.

Il n'y a pas de conflit entre ces différents modèles qui ont été développés à des fins différentes : les modèles physiques et distribués pour une étude plus fine des processus hydrologiques, et les modèles conceptuels pour une détermination des paramètres moyens sur le bassin étudié et des débits à l'exutoire uniquement [21]

II-5- Les modèles hydrologiques:

Un modèle est une représentation d'un phénomène physique, dans le but de comprendre les processus qui le régissent. Cette représentation peut être physique, analogique ou mathématique. Dans le premier cas, le modèle est une maquette qui reproduit d″une manière plus au moins adéquate la réalité. Les modèles analogiques se basent sur les similitudes entre le phénomène à étudier et un autre phénomène physique. La modélisation mathématique est un outilessentiel pour la connaissance des phénomènes naturels, elle essaye d'établir un lien entre les variables d'entrée et de sortie par des relations mathématiques. Au cours de ces dernières années, les efforts de la recherche pour la compréhension du cycle de l'eau dans les milieux naturels (bassins versants, rivières, nappes, etc.), associés aux développements de l'informatique, se sont concrétisés par l'apparition d'une multitude de modèles mathématiques. On peut distinguer trois types d″utilisation des modèles mathématiques en hydrologie:

- ✓ La modélisation comme outil de recherche : La modélisation peut être utilisée pour interpréter des données mesurées. Différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants peuvent être confrontés aux mesures.
- ✓ La modélisation comme outil de prévision : elle nous donne une anticipation des évolutions futures du débit d″un cours d″eau. Il s'agit de l'utilisation opérationnelle la plus courante des modèles hydrologiques. Dans la plupart des cas cependant, les modèles développés sont basés sur des régressions linéaires entre les variables indépendantes (pluie, débits amont) et les variables dépendantes (débits aval), et font peu appel aux connaissances sur les processus hydrologiques.
- ✓ La modélisation comme outil d″extrapolation : reconstitution de séries de débits plausibles. Dans certains cas, comme par exemple le dimensionnement de déversoirs de sécurité de barrages hydroélectriques ou encore la délimitation de zones inondables.

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable chaque fois qu'on s'intéresse à des problèmes liés à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire et aux différents risques hydrologiques (sécheresse, inondation. …). Cette modélisation doit décrire de manière fidèle et réaliste les différentes étapes liées à la transformation de la pluie en débit. On l'utilise aussi pour obtenir des informations intéressantes pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques.[21]

II-6- Classification des modèles hydrologiques:

Depuis l''apparition de la modélisation hydrologique, de nombreux modèles on tété développés en fonction des objectifs recherchés, sur base de différents choix d''élaboration, menant à une multitude de modèles exploitables dont chacun est doté de champs d''application et de validité restreints. Les différences portent notamment sur les options de simulation en termes de discrétisation spatiale : les modèles sont globaux ou distribués. Et enfin, ils diffèrent au point de vue de l''expression des phénomènes hydrologiques, liés soit à des équations empiriques, soit à des équations physiques, soit à une simplification plus ou moins poussée de ces équations physiques (approche conceptuelle). Bref, les critères de classification des modèles reposent principalement sur la représentation de l''espace, du temps et des processus décrits (Singh, 1995 Payraudeau, 2002). La figure I.1donne une classification des modèles hydrologiques en se basant sur ces critères.[21]

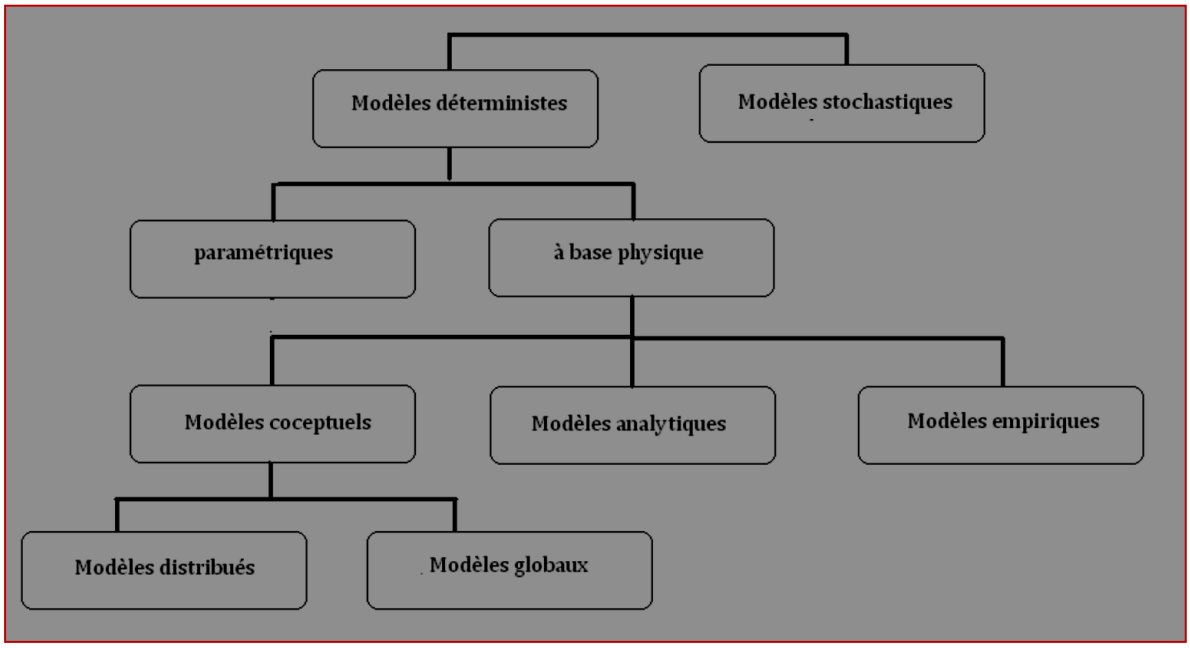


Figure III .1 : Classification des modèles hydrologiques

II-6-1- Modèles stochastiques:

La modélisation stochastique peut être envisagée dans le cas où il y a des incertitudes sur les données ou parfois même sur les processus mis en jeu. Ainsi Jensen (1992) considère qu'une approche stochastique est un moyen rationnel de traiter la caractérisation spatiale de la variabilité, et d'établir un lien entre les incertitudes des paramètres et celles des prédictions. Toutefois cette approche, qui semble par ailleurs le meilleur moyen de caractériser la variabilité

des grandeurs, nécessite la connaissance des lois de probabilité les plus courantes pour la variabilité considérée ou au moins de leurs premiers moments.[21]

II-6-2- Modèles déterministes:

Un modèle est dit déterministe (par opposition à stochastique) si aucune de ses grandeurs n'est considérée comme aléatoire, c'est à dire résultant soit de l'observation soit de grandeurs reconstituées. La plupart des modèles hydrologiques sont déterministes. Ces modèles associés à chaque jeu de variables de forçage, de variables d'état et de paramètres, une valeur de réalisation unique des variables de sortie (il s'agit essentiellement des débits simulés à l'exutoire d'un bassin versant).

II-6-3- Modèles à base physique:

Le modèle à base physique est basé uniquement sur des équations de la physique, et ne comportant idéalement aucun paramètre. Il n''existe pas de modèle à base physique au sens strict en hydrologie. L''importance de l''hétérogénéités partiales dans la réponse hydrologique des bassins versants rend cependant difficile voire impossible l''utilisation de tels modèles. La précision spatiale des données disponibles en particulier concernant les types de sols et leurs profondeurs n'est pas suffisante. Dans la pratique, les profondeurs et les conductivités moyennes des sols représentatifs de sous parties du bassin versant doivent être évaluées par calage.

II-6-4- Modèles paramétriques:

Les modèles paramétriques sont les modèles incluant des paramètres dont la valeur doit être estimée par calage.

II-6-5- Modèles empiriques:

Les modèles empiriques reposent sur les relations observées entre les entrées et les sorties de l'hydro-système considéré .Ils expriment la relation entre variables d'entrée et de sortie du système (relation pluie débit) à l'aide d'un ensemble d'équations développées et ajustées sur la base des données obtenues sur les systèmes. Un modèle empirique ne cherche pas à décrire les causes du phénomène hydrologique considéré ni de ni à expliquer le fonctionnement du système, les systèmes est vu comme une boite noire.

II-6-6- Modèles analytiques:

Ce sont des modèles pour lesquels les relations entre les variables de sortie et les variables d'entrée ont été établies par analyse de séries de données mesurées. L''exemple type est celui des modèles linéaires : les paramètres de ces modèles sont liés aux coefficients de corrélation entre les variables. Notons que l'analyse des données peut conduire au choix de relations non linéaires entre les variables.

II-6-7- Modèles conceptuels:

Les modèles conceptuels considèrent en générale le bassin versant, après quelques simplifications du cycle de l'eau, comme un ensemble de réservoirs interconnectés. Ce type de modèle reproduit donc au mieux le comportement d'un système, plutôt qu'il n'avance d'explications causales sur son comportement. Le modèle CEQUEAU est un parfait exemple de modèle conceptuel que nous présenterons dans la section suivante.[22]

II-6-8- Modèles globaux:

Dans un modèle global le bassin est considéré comme une entité unique. Des relations empiriques (issues de l'expérience) relient les entrées et les sorties sans chercher à se rapprocher d'une loi physique. Les modèles globaux offrent à l'utilisateur un choix très attractif, car il présente une structure très simplifiée, il ne demande pas trop de données, faciles à utiliser et à calibrer. La représentation du processus hydrologique est très simplifiée. Il peut souvent mener à des résultats satisfaisants, et spécialement si l'objectif majeur est la prévision d'une crue.

Conclusion:

Il s'avère que la description des processus qui entrent en jeu dans la réponse hydrologique d'un bassin versant n'est pas une tâche aussi facile, cette description demande la connaissance et la maîtrise d'une variété de facteurs et de paramètre. Des renseignements suffisants sur ces données ne sont pas toujours disponibles pour tous les bassins versants, d'où la nécessité de s'investir d'avantage dans l'étude de détermination de ces données pour développer des modèles qui représentent le mieux la réponse hydrologique du bassin versant.

III-1- La description du modèle HEC-HMS

Dans cette rubrique, l'accent sera mis sur le modèle HEC-HMS dont nous allons se servir pour la modélisation du sahel, de point de vue générale, en traitant des points tels que : sa création, son mode de fonctionnement, ses capacités, ses modules, ses formalismes, ….etc.

Notez bien que cette description ne portera que sur l'aptitude de modélisation événementielle du HEC-HMS, vu que c'est elle qui nous intéresse dans notre étude.

III-2-Les caractéristiques générales du modèle:

Le HEC-HMS est un système complet de modélisation hydrologique des bassins versants qui permet de simuler les processus pluie-débit, depuis les précipitations brutes jusqu'au débit total de ruissellement à un temps donné, à un point donné du bassin étudié. Sa conception a été lancée par l'USACE pour évoluer vers une nouvelle génération du logiciel qui va remplacer son antécédent le HEC-1, tous appartenant à la fameuse gamme HEC (HEC-RAS, HEC-GeoRAS, HEC-GeoHMS, …).

En effet, afin de s'adapter aux différents contextes d'études, ce modèle opère selon le principe de tâches distinctes, c'est-à-dire qu'il simule le bassin à un système uniforme composé de plusieurs composantes assurant chacune de représenter un aspect particulier du processus pluie-débit et agissant successivement pour produire l'hydrogramme de l'écoulement. Pour y parvenir, chaque tâche est confiée à un formalisme d'un module choisi librement par l'utilisateur en fonction des ses besoins et ses données, ainsi, en mutant les formalismes d'un module, le HEC-HMS peut changer de type de modèle, par exemple passer d'un modèle événementiel à un modèle continu, de global au distribué, d'empirique au conceptuel et ainsi de suite.

Le HEC-HMS a été largement employé et validé dans plusieurs bassins versants à climats contrastés à travers le monde ([**6**], [**3**], [**14**], [**19**], [**26**] , [**27**],**…**), il a été utilisé lors du PNPI [**22**] pour la prévention contres les dégâts des inondations dans les zones potentielles à cet aléa, ainsi que par les bureaux d'études, sur les bassins de moyenne et grande taille, pour leurs études hydrologiques de détermination des quantiles de débit.

III-3. Le processus de fonctionnement:

Comme nous venons de le mentionner ci-dessus, le HEC-HMS attribue à chaque module une étape de la transformation pluie-débit, et c'est la combinaison des résultats des modules les uns aux autres qui donne l'hydrogramme final. En général, dans le cas d'une

modélisation événementielle, c'est l'enchainement schématisé sur la figure suivante qui est suivi à la lettre pour aboutir au débit de l'exutoire :

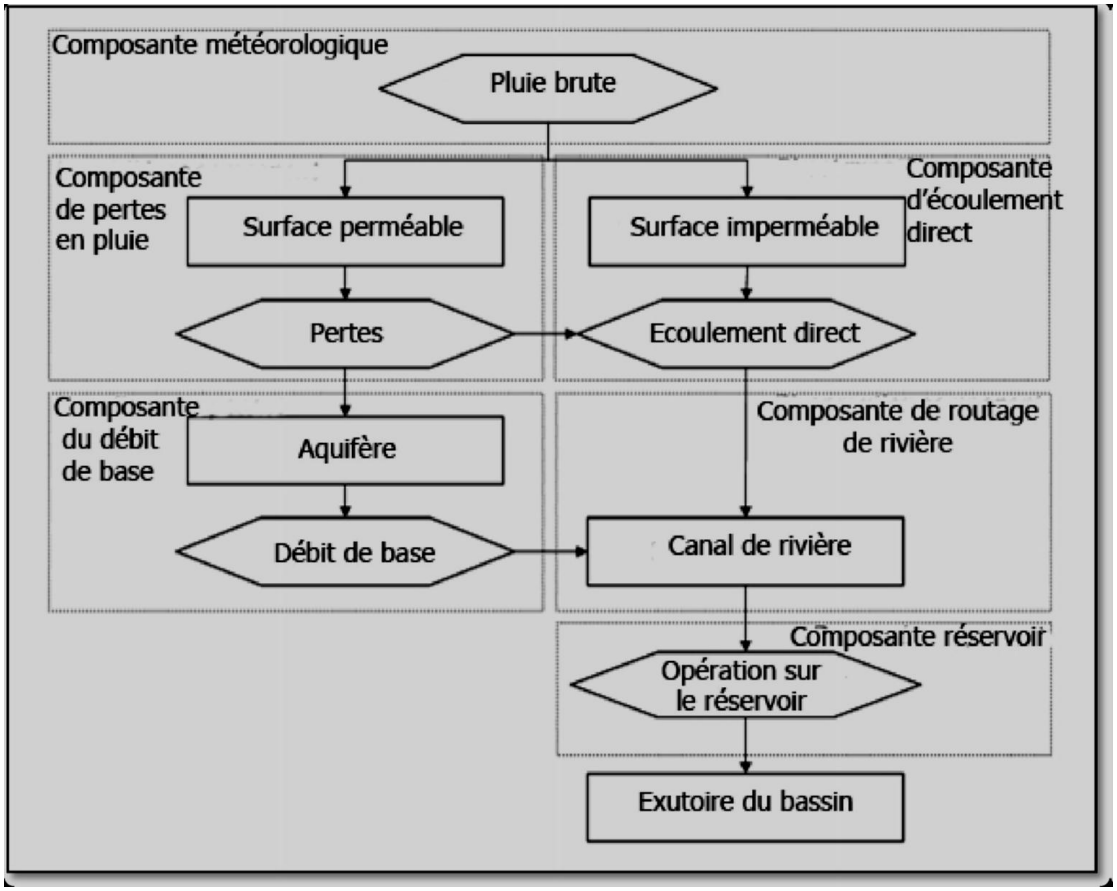


Figure III-1: L'enchainement d'intervention des différentes composantes dans la structure événementielle du modèle HEC-HMS

Le module météorologique est la première composante à agir, elle vise à répartir sur la surface du bassin, de manière uniforme dans le temps et l'espace, la hauteur des précipitations brutes saisie. Ensuite, le devenir de ces précipitations diffère selon la perméabilité de la surface :

· Pour les surfaces perméables, les précipitations brutes vont subir des pertes suite à des phénomènes d'interception, d'infiltration et d'évapotranspiration, ces pertes seront calculées par la composante de perte en pluie régie par la fonction de production, les précipitations nettes qui en résultent contribuent simultanément à l'écoulement direct et à l'écoulement souterrain dans l'aquifère.

· Pour les surfaces imperméables, les précipitations sont exonérées de toute perte et rejoignent immédiatement la composante d'écoulement direct où elles se transformeront e écoulement de surface.

Après , l'écoulement de surface et l'écoulement de su b -surface provenant de la composante du débit de base, intégreront tous les deux le canal de la rivière où se manifesteront les phénomènes d'atténuation et de translation contrôlés par la composante de routage. Finalement, l'effet des constructions hydrauliques naturelles ou artificielles (réservoir, retenue de barrage, dépression, lac, ...) est déterminé par la composante du réservoir.

III-4. L'organisation du modèle:

Pour faciliter la construction d'un modèle complet qui répond aux circonstances spécifiques de chaque étude de cas, il est strictement nécessaire que le modèle se compose d'au moins quatre modules et deux fonctions essentiels à la modélisation par HEC-HMS, deux autres modules de plus si on veut affiner nos résultats et nos analyses. Ces constituants sont classés, ci-après, par ordre de priorité de conception.

a. Le module structural du bassin:

Il consiste à schématiser le bassin versant étudié en éléments fondamentaux connectés entre eux sous forme d'un arbre ramifié. Le HEC-HMS offre l'opportunité de représenter toutes les entités naturelles ou artificielles installées dans un bassin et qui influencent le processus de transformation pluie-débit, allant depuis les sous bassins, les exutoires jusqu'aux canaux de rivières et les canaux de diversion d'eau, en passant par les réservoirs, les retenues de barrages,…etc. Dans ce qui suit, on cite ces éléments et leurs rôles dans la représentation de l'état du bassin versant :

· L'élément « Subbassin » : matérialise le bassin si la modélisation est globale, et les sous bassins si on opte pour une modélisation semi-distribuée. Parmi ses attributs de base : la surface, la fonction de production associée et la fonction de transfert associée.

- L'élément « Reach » : représente le plus souvent la rivière, et sert à faire la connexion entre les autres éléments. L'information de base attachée est la fonction de routage.
- L'élément « Reservoir » : décrit les réservoirs, les retenues de barrage,…etc. ses caractéristiques attribués permettent de définir les conditions stockage-déstockage.
- L'élément « Source » : permet d'ajouter des stations de mesure de débit ou de représenter les conditions aux limites.
- L'élément « Jonction » : utilisé pour combiner aux moins deux débits véhiculés par deux éléments ,comme dans le cas d'une confluence entre deux rivières.

- L'élément « Diversion » : représente des endroits où se produit des prélèvements d'eau, c'est le cas par exemple des seguias et des canaux de diversion.
- L'élément « Sink » : simule l'exutoire des sous bassins versants.

b. Le module météorologique:

Il a comme objectif de répartir les précipitations saisies sur toute la surface étudiée. Pour se faire, le HECHMS dispose de huit méthodes différentes, à choisir entre elles en fonction des objectifs et de la disponibilité des données, mais elles ont presque toutes la spécificité de distribuer la hauteur de pluie de manière homogène dans le temps et dans l'espace. Ces méthodes sont :

- « Specified Hyetograph » : hyétogramme spécifié, c'est l'utilisateur qui se charge de saisir son hyétogramme dont il dispose.
- « Frequency Storm » : averse de fréquence, utilisé pour développer un événement de précipitation où les hauteurs pour différentes durées dans l'averse ont une probabilité cohérente.
- « Gages weights » : stations pondérées, utilise un coefficient de pondération à chaque station de mesure de précipitations.
-« Inverse distance » : l'inverse de distance, calcule la moyenne de pluie par l'application de la méthode d'inverse carré des distances pour attribuer à chaque station un coefficient de pondération.
- « Gridded precipitations » : précipitations en maille, permet d'introduire les précipitations sous forme de grille de mesure.
- « Standard Project Storm » : averse de projet standard, répartie une hauteur de précipitations donnée sur un intervalle de temps spécifié.
- « SCS Storm » : averse SCS, applique à la hauteur de précipitations journalière une des distributions d'averse de projet définies par le SCS. Cette méthode sera exposée en détails dans le troisième chapitre. Le choix de telle ou telle méthode est imposé par l'objectif de la modélisation (détermination du débit de projet, étude de fonctionnement hydrologique du bassin versant,…), la quantité (nombre de stations, période de mesure,…), la qualité (pluviomètres, pluviographes, lacune de mesure,…) des données de précipitations et le type de modélisation envisagé (distribuée, globale).

En addition à tout ceci, le modèle possède la capacité d'intégrer l'évapotranspiration et la contribution de la fonte de neige en cas de modélisation continue.

-c. Le module de la fonction de production:

La fonction de production assure la transformation de la pluie brute en pluie nette en y retranchant toutes les pertes éventuelles causées par l'interception (obstacles, végétation, cuvettes ….) l'infiltration et l'évapotranspiration (en cas de modélisation continue).
La fonction de production du modèle HEC-HMS distinguent entre une surface perméable et imperméable. La première est considérée comme le champ d'intervention de la fonction, afin de ne pas surestimer les pluies qui participent réellement dans le ruissellement appelées pluies nettes. La deuxième quant à elle, est supposée non affectée par les pertes en pluie surtout si elle est connectée au réseau hydrographique, elle est reconnue dans le modèle par le pourcentage d'imperméable du bassin. Il existe six formalismes pour représenter cette fonction à savoir :

- « Initial and Constant Loss » : pertes initiales, à taux constant. Ce formalisme considère un taux maximum de pertes constant, et une perte initiale à saturer avant que le ruissellement commence. [**24**].
- « Deficit and Constant Loss » : à déficit et à taux de perte constant. Une variante du premier formalisme avec une possibilité de régénération des pertes initiales durant une période sans pluie au cours de l'événement modélisé [**24**].
- « Green and Ampt Loss » : formalisme qui s'intéresse plutôt aux pertes par infiltration, cette méthode repose sur l'équation de Darcy et la conservation de masse.
- « Soil Moisture Accounting Loss » : formalisme très poussé qui calcule les ‘’pertes’’ par évapotranspiration, infiltration et percolation profonde selon le principe de couche de stocka· « SCS Curve Number Loss » : formalisme qui relie les pertes en pluie à l'occupation du sol et le type de sol et l'humidité antécédente. Cette méthode sera détaillée davantage dans la section de la combinaison modulaire choisie.
- « Gridded SCS Curve Number Loss » : format maillé du formalisme précédent. L a sélection de l'un de ces formalismes est une étape délicate qui va influencer sans doute les sorties du modèle. Une toute première contrainte est que le choix peut être dicté par les formalismes utilisés pour les autres modules (module météorologique, fonction de transfert, …), la deuxième étant la nature de données disponibles (sous forme de maille, détaillées, plusieurs variables,…).

d. Le module de la fonction de transfert:

Une fois la pluie participante au ruissellement calculée, c'est le rôle de la fonction de transfert qui débute. Elle permet de déterminer l'hydrogramme résultant de la pluie nette. Le modèle offre six formalismes pour y converger :

-« User-Specified Unit Hydrograph » : Hydrogramme unitaire spécifié par l'utilisateur. Ce formalisme consiste à déterminer l'hydrogramme unitaire à partir de données complètes d'un événement pluvieux [**24**].
- « Snyder Unit Hydrograph » : Hydrogramme unitaire de Snyder.
-« Kinematic Wave » : onde cinétique. Reconnait les versants du bassin comme des canaux à surface libre dont le débit entrant correspond à la pluie nette.
- « SCS Unit Hydrograph » : Hydrogramme unitaire de la SCS. Résultant de la combinaison des hydrogrammes de plusieurs bassins versants. Ce formalisme sera détaillé davantage dans la section de la combinaison modulaire choisie.
- « Clark Unit Hydrograph » : Hydrogramme unitaire de Clark. Prend en compte les deux phénomènes de translation et d'atténuation. Ce formalisme sera détaillé davantage dans la section de la combinaison modulaire choisie.
- « ModClark » : forme maillée du dernier formalisme.
L'USACE fournit quelques recommandations pour faciliter le choix du formalisme le mieux adapté [**29**] :
- Disponibilité de données pour la calibration des paramètres ou l'estimation de leurs valeurs: connaissant que la source optimale des paramètres de ces formalismes est la calibration, la possibilité d'exécuter cette opération s'avère fructueux pour les hydrogrammes unitaires. Cependant, si cette possibilité n'est valide, la méthode de l'onde cinétique semble être la plus appropriée mais à condition d'avoir les données mesurées et observées nécessaires.
- La validation des hypothèses du formalisme sélectionné : vérifier que les hypothèses fixées pour la méthode ne sont pas violées, sinon le risque d'aboutir à des résultats aberrantes est potentiellement présent.

e. Le module du débit de base:

Celui-ci est l'un des deux modules complémentaires du modèle, à défaut duquel le HEC-HMS peut tourner, mais sa présence améliore la compréhension des mécanismes qui contrôlent le ruissellement dans le bassin sujet d'étude.

Le débit de base est la contribution du réservoir souterrain dans l'écoulement, sa connaissance est importante pour modéliser la récession de l'hydrogramme avant et après la pointe de débit et pour mieux estimer le volume de crue. 3 formalismes sont proposés par le modèle :

- « Constant Monthly » : Constante mensuelle. Il considère l'écoulement souterrain comme fixe pendant des durées d'un mois. Ce débit de base mensuel est donc ajouté au ruissellement direct issu des précipitations nettes. Cette méthode est très simple, mais non adaptée au contexte semi-aride où la variation des conditions de saturation des bassins versants se fait en moins d'un mois.
- « Linear Reservoir » : Réservoir linéaire. Il simule le stocke souterrain à un réservoir, ainsi il est toujours associé à la fonction de production type SMA.
- « Recession » : utilise une récession exponentielle du débit de base. Elle est utilisée pour les bassins ou les volumes de crue sont influencés par les événements pluvieux [**31**]. Ce formalisme sera détaillé davantage dans la section de la combinaison modulaire choisie.

f. Le module de routage:

C 'est le deuxième des deux modules complémentaires, il permet de calculer un hydrogramme en aval du bassin versant, connaissant l'hydrogramme amont. Tous ces formalismes utilisent les équations de continuité et de quantité de mouvement pour la simulation [**29**].

- « Lag » ;
-« Muskingum » ;
-« Modified Puls » ;
- « Kinematic-wave » ;
- « Muskingum Cunge ».

g. La fonction objective:

Elle mesure la qualité de l'ajustement de l'hydrogramme simulé à l'hydrogramme observé que ce soit en termes de débit, de volume ou du temps. Le HEC-HMS en compte 7 fonctions objectives à savoir :

- « Peak weighted RMS error » : modification de la fonction objective largement utilisée qui est l'erreur sur la racine moyenne des carrés de débit. Cette méthode donne plus de poids aux débits en dessus de la moyenne et moins de poids aux débits en dessous.

- « Sum of squared residuals » : la somme des résidus au carré, attribue plus de poids aux larges erreurs et moins aux petits erreurs.
- « Sum of Absolute Residuals » : la somme des résidus absolus, qui ne différencie pas entre les erreurs larges et celles restreintes.
- « Percent Error in Peak Flow » : le pourcentage d'erreur sur le débit de pointe, qui se focalise sur l'ajustement des débits de pointe.
-« Percent Error in Volume » : le pourcentage d'erreur sur le volume, qui se focalise sur l'ajustement des volumes de ruissellement.
- « RMS Log Error » : utilise l'erreur sur la moyenne de la racine carrée des log des débits pour mettre en phase les débits faibles et forts.
- « Time weighted » : donne du poids aux erreurs proches de la fin de l'événement et moins aux erreurs du début.

Le choix de telle ou telle fonction est dicté par la problématique étudiée et/ou les objectifs de la modélisation. Par exemple, si on est amené à faire une délimitation des zones inondables, la fonction objective sur le volume est appréciée, si par contre l'objectif étant de déterminer le débit de projet d'un ouvrage quelconque, la fonction objective conseillée est celle jouant sur le débit de pointe. De l'autre coté si on est en présence d'une modélisation continue pour comprendre le fonctionnement hydrologique d'un bassin, il sera préférable d'opter par exemple à la première fonction qui va s'intéresser plutôt aux grands pics de débits. Ainsi, on choisit la fonction qui nous aidera à résoudre notre problématique et atteindre nos objectifs.

h. La fonction d'optimisation automatique:

Elle sert à rechercher, sans intervention de l'utilisateur, le jeu de paramètres optimal donnant à la fonction objective sa valeur la meilleure possible. Pour exécuter cette tâche, le HEC-HMS propose 2 méthodes :

- « Univariate Gradient » : le gradient uni-varié, ajuste un seul paramètre à la fois en gardant les autres constants.
- « Nelder et Mead » : utilise une approche qui consiste à optimiser tous les paramètres simultanément. Chacune a les paramètres suivants :
- La tolérance : détermine la valeur de changement de la fonction objective en dessous de laquelle l'optimisation des paramètres s'arrête.
- Maximum d'itérations : détermine le nombre maximal de jeux de paramètres à essayer avant d'arrêter l'optimisation.

La fonction d'optimisation s'arrête une fois l'une de ces conditions est remplie :
- La valeur de la fonction objective est nulle ;
-Le nombre d'itérations est atteint et ceci quelque soit la valeur de la fonction objective ;
- La valeur de variation de la fonction objective est en inférieure à la tolérance.

En conclusion, on peut dire que la diversité des formalismes dont dispose HEC-HMS, le positionne en tète des modèles les plus robustes dans la simulation des ruissellements au sein du bassin, les plus complets dans l'intégration des différentes composantes d'écoulement et les moins exigeants de point de vue données d'entrée. En outre, sa diversité en matière de combinaisons modulaires possibles, laisse à son utilisateur la
capacité de l'adapter à ses données, ses objectifs, ses besoins mais surtout à son expérience.

III-5- La structure du modèle HEC-HMS choisie:

Dans cette section, nous allons évoquer précisément la combinaison modulaire choisie pour modéliser sahel, en expliquant ses concepts de base, en citant ses variables et ses paramètres et la façon dont nous allons les estimer et en listant ses avantages et ses limites, sans oublier la justification du choix à la fois du modèle et de la combinaison modulaire.

III-6- Le type de modélisation : événementielle:

Malgré qu'on le considère comme étant le bassin le mieux instrumenté de Tensift, avec un réseau de mesure composé de : neuf pluviomètres, deux pluviographes, une station hydrométrique, deux stations météorologiques à Aremd et Oukaimeden, le bassin versant de sahel reste encore mal renseigné, non pas parce que le réseau n'est pas aussi représentatif, mais parce que l'accès à l'ensemble de sa base de données n'était pas possible lors de cette étude vu le caractère privé de 80% de ces stations. Donc, heurté à cette réalité, où l'accès n'était ouvert en plus de la station hydrométrique qu'à trois stations pluviométriques et sans aucune information sur les stations météorologiques, nous avons décidé de laisser à part l'idée de la modélisation continue avec tout l'apport qu'elle peut constituer dans la compréhension du fonctionnement hydrologique du sahel, et des' orienter – pour le moment - vers une

modélisation événementielle qui elle aussi va être confrontée au problème d'absence des distributions temporelles des pluviographes. Mais ceci va être surmonté en essayant une nouvelle alternative nommée les averses type NRCS décrite dans la partie ci-dessous. De ce qui précède, on voit que les points forts de HEC-HMS commencent déjà à se révéler, alors qu'on n'a pas encore touché à la modélisation proprement dite.

III-7- Le module météorologique : les averses NRCS:

Le NRCS connu auparavant sous le SCS, est un service attaché au département d'agriculture des États Unis, chargé de conserver, planifier et porter de l'assistance dans les domaines de la gestion du sol, l'eau, l'air, la phone et la flore. Dans cette optique, il a développé en 1986 [**26**] une méthode pour la construction d'averses de projet nécessaire pour la prévision des débits de projets des ouvrages hydrauliques ou des constructions en contact éventuel avec les cours d'eau, et pour la protection contre les inondations. Cette approche s'est basée sur l'analyse d'un nombre considérable d'observations d'averses sur tout le pays [**26**].
Les averses de projet ainsidéfinies, attribuent une distribution temporelle à une hauteur de pluie donnée enregistrée pendant 24 heures.

Ces observations, faites à travers tout le pays, ont été analysées et ont finalement donné lieu à quatre types d'averses de projet selon la position géographique et donc le climat dominant[**28**].

Pour assimiler la différence entre ces averses, la figure 3 présente la distribution d'une averse de 20 mm selon e les quatre types :.·

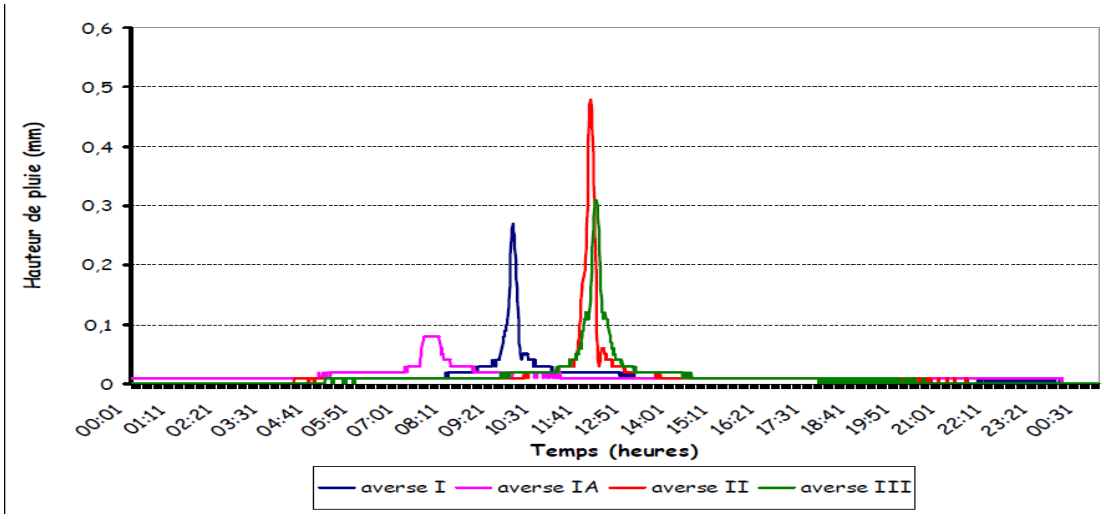


Figure III. 2 : Les distributions temporelles 24h des quatre averses de projet de la NRCS

Dès un premier aperçu, on remarque que les quatre types se distinguent par leurs intensités, leurs heures de pointe et par leurs formes. Pour ce qui est de l'intensité maximale, l'ordre décroissant commence par le type II, puis le III, ensuite le type I et enfin le IA. Ces intensités différentes vont sans doute provoquer, lors des simulations, des débits de pointe qui vont sous-estimer ou surestimer les débits observés en fonction de l'intensité maximale réelle

qu'on aurait enregistrée si on avait un pluviographe. En ce qui concerne l'heure de pointe, on constate qu'elle est avant midi pour tous les types, débutant par le IA vers 8h, le type I vers 10h et vers 12h pour le II et le III. Cette propriété d'heure de pointe, va influencer à son tour l'heure du débit pointe simulé qui va se manifester soit tôt soit tard, en fonction de l'heure de pointe réelle de l'averse qu'on aurait enregistrée si on possédait un pluviographe. Pour la forme, on voit que l'averse type IA est la plus éparpillée sur les 24h suivie par le type III, le type I et enfin le II qui est la plus serrée. La forme de l'averse va conditionner la forme de l'hydrogramme, puisque on connait que la forme de ce dernier découle de celle de l'averse, par conséquent cette forme va soit sous-estimer soit surestimer le volume de la crue, tout dépend de la forme réelle de la distribution journalière de l'averse qu'on aurait enregistrée facilement si on avait un pluviographe.

Lors de la modélisation, et puisque il n'y a pas de choix de préférence, nous allons utiliser les quatre types pour chaque événement, et essayer d'en déduire, en comparant les résultats de chaque type, l'averse la mieux appropriée à notre contexte.

III-8. La fonction de production : la NRCS CN:

8.1. Le concept de base:

De même que pour les averses, la mise en place de cette fonction a été réalisée par le NRCS en coopération, cette fois-ci, avec trois consultants privés à savoir : Horner, Horton et Sherman [**26**].

Cette fonction de production apparue en 1950 et surnommée autrefois la SCS CN est le fruit de plus de deux décennies d'analyses des relations pluies-débits sur des petits bassins. Elle relie la pluie nette participante au ruissellement à trois facteurs fondamentaux : l'occupation du sol, le type de sol et l'humidité antécédente, selon l'équation suivante [**30**] :

$$\mathbf{Pe}=\frac{(\boldsymbol{P-Ia})^{\mathbf{2}}}{\boldsymbol{P-Ia+S}}$$

Avec : Pe : les précipitations nettes au temps t ;

P : les précipitations brutes au temps t ;

Ia : l'abstraction initiale ;

S : le potentiel maximum de rétention.

Après avoir effectué de nombreuses expériences, le NRCS a proposé une relation empirique supplémentaire liant l'abstraction initiale d'un bassin versant au potentiel maximum de rétention [**30**]:

$$Ia=0.2*S \qquad (2)$$

Ainsi, l'équation (1) devient :

$$Pe=\frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \qquad (3)$$

Pour chaque pas de temps, la pluie nette est la différence de la valeur de Pe au début et à la fin du pas de temps.

L'influence des deux premiers facteurs susmentionnés est estimée par le paramètre CN qui est relié à S par l'équation [**30**] :

$$S=\frac{25400-254CN}{CN} \qquad (4)$$

A lors que pour intégrer l'influence de l'humidité antécédente, on fait appel à la hauteur de pluie tombée pendant les cinq derniers jours précédant l'événement de crue (NRCS). Ensuite, on définit soit un CN normal, sec ou humide, tout en respectant le tableau ci-après :

Types de CN	Hauteur de pluie (mm) sur les 5 jours antérieurs		
	Base annuelle	Base saisonnière	
		Période de végétation	Période hivernale
CN(I) : conditions sèches	H<12.5	H<35	H<12.5
CN(II) : conditions normales	12.5<H<37.5	35<H<53	12.5<H<27.5
CN(III) : conditions humides	H>37.5	H>53	H>27.5

Tableau-III-1: La relation pluie antérieure et type de CN pour la méthode NRCS CN

Donc, selon les conditions d'humidité antérieure propres à chaque événement, on est amené à convertir la valeur de CN normal (lue sur les tables NRCS) au CN sec (I) ou humide (III) en appliquant les formules ci-dessous[**25**] :

$$\mathbf{CN(1)}=\frac{4.2*cn(2)}{10-0.058*cn(2)} \qquad \mathbf{CN}=\frac{23*cn(2)}{10+0.13*cn(2)}$$

8.2. Les variables:

Ø **La carte d'occupation du sol** : cette donnée sert en combinaison avec la carte des sols à déterminer la valeur de CN normal pour chaque composé hydrologique de sol. Elle doit être conforme à la classification NRCS qui définit les classes d'occupation du sol en quatre grands groupes : les zones urbaines, les terres agricoles, les terres agricoles cultivées et les zones arides et semi-arides. Cette classification renferme la majorité des classes susceptibles d'être présentes sur le terrain avec une précision décisive.

Ø **La carte de sols** : elle aide à estimer la valeur de CN normal pour chaque composé hydrologique de sol. Comme la carte d'occupation du sol, la carte des sols doit être conforme à la classification NRCS des sols simplifiée dans le tableau ci-joint :

Type de sol .	Groupe	I_0(mm/h)	I_f(mm/h)
Sable, Silt	A	250	12-8
Limon Sableux	B	200	8-4
Limon argileux	C	130	4-1
Argiles, Sols salins	D	75	1-0

Tableau –III-2 : Les capacités initiales i0 et finales if d'infiltration en fonction des classes de sols définies par le NRCS (D'après Hillel, 1974)

Ø **Le pourcentage d'imperméable** : il désigne la portion de la surface du bassin considérée comme étanche et directement connectée au réseau de drainage. Ce pourcentage est déduit lors de l'élaboration de la carte d'occupation du sol.

8.3. Les paramètres:

Ø **CN** : sa valeur varie entre 100 (surface d'eau) et 30 pour des sols très perméables à haut potentiel d'infiltration [**30**]. Il est déterminé pour un composé hydrologique de sol à partir de tables NRCS (annexe 3) où on combine la nature de l'utilisation du sol, son traitement, les conditions hydrologiques avec le type de sol pour trouver la valeur de CN normal, qui va être

utilisée directement dans les équations citées, ou après l'avoir convertie selon la hauteur de pluie tombée pendant les cinq jours avant l'événement.

Pour un bassin versant composé de plusieurs classes d'occupation du sol et de type de sols, un CN composite doit être calculé par la formule :

$$\mathbf{CN}_{\mathbf{composite}} = \frac{\sum AICNI}{\sum AI}$$

Où : CN composite : le CN utilisé pour l'ensemble du bassin par la fonction de production ;

CN i : le CN d'un composé hydrologique du sol (classe d'occupation du sol +classe de sol) ;

A i : surface de drainage du composé hydrologique du sol.

Ø **Ia** : abstraction initiale mesurée en mm, elle correspond aux pertes initiales provenant durant la première phase de l'événement pluvieux, dû aux interceptions, au stockage naturel dans les dépressions,…etc.

L'écoulement ne débute qu'une fois la pluie brute dépasse la valeur de Ia. On estime sa valeur le plus souvent par calibration, cependant il existe des tableaux qui donnent des ordres de grandeur de ce paramètre :

CN normal	La(mm)	Nature
75	**9**	**Bois**
80	**8**	**Broussailles**
85	**5**	**Vergers**
85	**8**	**Labour ou nu**
89	**3**	**urbain**

Tableau –III-3: Les valeurs usuelles de l'abstraction initiale Ia et du coefficient CN (D'après SAGE INGENIERIE)

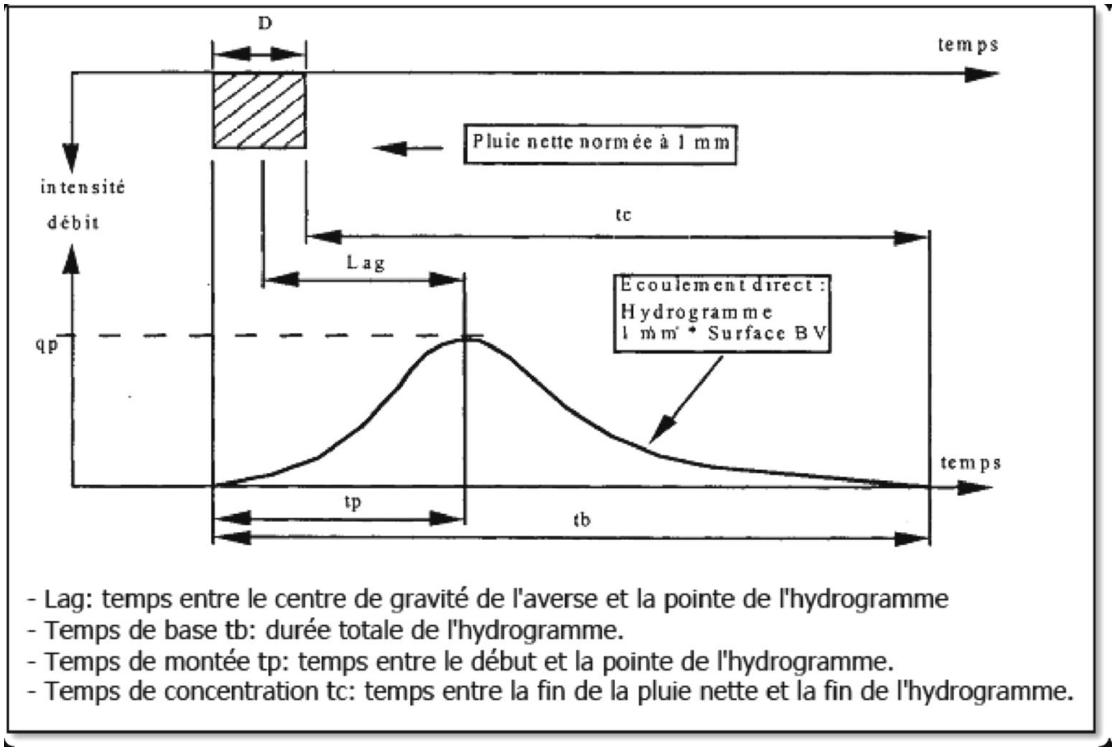
Il reste à signaler que les valeurs de ces deux paramètres peuvent être calibrées par le modèle HEC-HMS.

III-9. Les fonctions de transfert : l'hydrogramme unitaire de la NRCS et de Clark:

Puisque nous avons s'en servit de deux fonctions de transfert lors de la modélisation pour évaluer la sensibilité du modèle aux formalismes utilisés, nous présenterons chacune des deux séparément. Mais avant d'y procéder, on va traiter la notion d'hydrogramme unitaire.

9.1. L'hydrogramme unitaire:

Comme définit par Sherman en 1932, l'hydrogramme unitaire est l'hydrogramme de ruissellement direct résultant d'une pluie nette, uniforme et constante, d'une durée de référence (D), suffisamment longue pour générer un écoulement sur l'ensemble du bassin [**26**]. De cet hydrogramme unitaire on peut facilement ressortir l'hydrogramme provoquée par n'importe quelle hauteur de pluie nette, en se référant à sa règle fondamentale :
la relation pluie nette et ruissellement est linéaire. La figure ci-dessous illustre la notion de l'hydrogramme unitaire est ses paramètres clés :



FigureIII- 3 : La notion d'hydrogramme unitaire et ses caractéristiques fondamentales

Lors de l'utilisation de l'hydrogramme unitaire comme fonction de transfert, il faut valider ses hypothèses qui lui sont associées sur le bassin versant d'étude, ou au moins de les prendre en considération lors de l'analyse des résultats. Ces hypothèses sont :

- La pluie nette est uniforme sur le bassin et constante dans le temps ;
- Les caractéristiques de l'hydrogramme unitaire sont invariantes dans le temps: la durée de l'hydrogramme de ruissellement direct (temps de base tb) est constante et indépendante de l'intensité de la pluie ;

- La réponse du bassin aux pluies est linéaire: pour une même durée de référence D, les ordonnées de l'hydrogramme unitaire sont proportionnelles au volume de la pluie nette ;
- L'hydrogramme unitaire reflète l'ensemble des caractéristiques physiques du bassin versant.

9.2. L'hydrogramme unitaire de la NRCS :

a. Le concept de base

Cet hydrogramme développé par le NRCS découle d'un grand nombre de petits bassins sur tous lés États-Unis .[**30**]. Il exprime le débit Ut comme proportionnel au débit de pointe Up, pour chaque temps t, fraction du temps de pointe Tp.

$$\mathbf{Up=c\frac{A}{Tp}} \qquad (5)$$

Avec, A : surface du bassin versant ;

C : constante de conversion (2.08 pour le système international).

Le temps de pointe Tp est relié à la durée de la pluie nette par la formule :

$$T_p = T_{lag}\frac{\Delta t}{2} \qquad (6)$$

Où : Δt : la durée de la pluie nette (c'est le pas de temps de simulation) ;

TL ag : le Lag du bassin (différence entre le pic de la pluie nette et le pic de l'hydrogramme).

Une fois le TLag calculé, le modèle résout l'équation (5), puis (6) pour trouver successivement le temps et le débit de pointe de l'hydrogramme, qui vont permettre de concevoir l'hydrogramme de simulation en reposant sur le principe de linéarité de la réponse.

b. Les paramètres

Le seul paramètre de cette méthode est le TLag, il sera calculé directement par le WMS qui offre 17 formules pour le faire, parmi elles on a choisit le formule NRCS définie comme suit :

$$\mathbf{T_{log}=L^{0.8}*(((\frac{1000}{cn})-10)+1)/(1900*\sqrt{y})}$$

Avec, T_{Lag} : le lag en heures ;

L : la longueur depuis l'exutoire jusqu'à l'amont du plus grand cours d'eau en pied ;

CN : le CN composite du bassin ;

Y : pente du bassin en %.

Notez bien que la valeur de ce paramètre peut être calibrée par le modèle HEC-HMS.

9.3. L'hydrogramme Unitaire de Clark

a. Le concept de base

L'hydrogramme unitaire de Clark interprète deux processus importants dans la transformation pluie nette débit qui sont :

- L'atténuation : reflète le stockage temporaire de la pluie nette dans le bassin versant qui baisse l'ampleur du débit.
- La translation : représente le mouvement de la pluie nette le long du réseau de drainage depuis sonorigine jusqu'à l'exutoire.

L 'hydrogramme en question est fréquemment utilisé pour les modélisations événementielles [**31**], cette méthode se montre très efficace pour reproduire des hydrogrammes complexes dans des bassins présentant une topographie et occupation du sol variés (Sabol 1988 in [**31**]).

b. Les paramètres

Cet hydrogramme possède deux paramètres qui renvoient chacun à l'un des processus pris en compte:

Ø **Le temps de concentration TC** : résume le processus de translation de la pluie nette le long du réseau hydrographique.

Ø **Le coefficient de stockage St** : représente le phénomène de stockage provisoire de la pluie nette dansle bassin versant.

III- 10_ Le débit de base : la récession exponentielle:

10-1- Le concept de base:

Ce formalisme donne la possibilité de simuler la contribution du réservoir souterrain au débit avant et après le pic ou les pics de l'événement de crue, et ceci en établissant une relation exponentielle entre le débit à deux temps consécutifs, cette relation est formalisée par l'équation [**30**] :

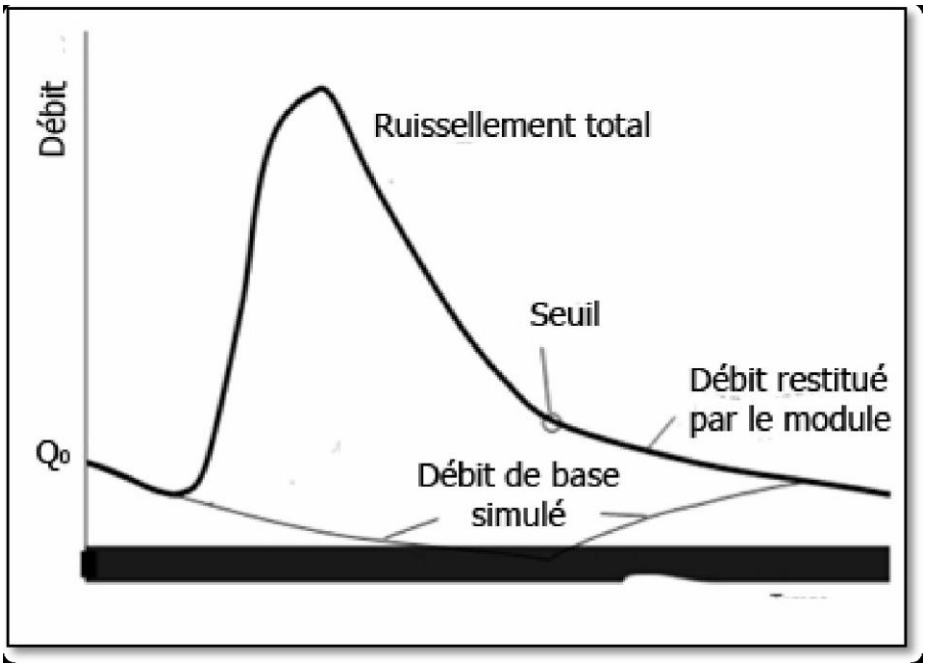
$$Q_t = Q_0 * k^t$$

Où, Q et : le débit au temps t ;

Q0 : le débit initial ;

K : la constante de décroissance exponentielle.

En effet, avant le pic de l'hydrogramme, et connaissant le débit initial, l'équation (24) s'active et commence à reproduire le débit total composé uniquement du débit de base de la rivière, jusqu'au point de début de la crue, depuis lequel ce module agira en parallèle avec le module de la fonction de transfert pour restituer le débit total composé à la fois d'un débit de base en décroissance et d'un débit de surface en forte action. Ce constat demeure actif jusqu'à un certain point nommé seuil, où l'ampleur de participation dans le débit total se renverse. La figure ci-après illustre comment intervient ce module dans le ruissellement :



FigureIII- 4 : L'illustration de la méthode de la récession exponentielle, d'après)

10.2. La variable

L a seule variable d'entrée est le débit initial pour chaque événement de crue, issu de la lecture son hydrogramme.

10.3. Les paramètres:

Les deux paramètres du module sont :

Ø **La constante de récession RC** : ce paramètre dépend des propriétés hydrogéologiques du réservoir souterrain. Elle varie entre 0 et 1. Si sa valeur vaut 1, la contribution du module sera constante avec

Qt=Q0. Puisque, on n'a pas d'informations permettant d'attribuer une valeur initiale à ce paramètre, et que sa valeur peut être calibrée, on se contentera d'une valeur bibliographique en attendant sa calibration.

Ø **Le seuil Td** : lui aussi varie entre 0 et 1. Il est lié au débit de pointe sous forme de rapport. Par exemple, une valeur de 0.1 et un débit de pointe de 10 m3/s signifie que le module reprendra son intervention une fois le débit atteint 1 m3/s. De même que le RC, nous se limiterons à une valeur bibliographique en attendant sa calibration.

III-11. Les avantages et les limites du modèle:

Malgré tous tout ce qu'on vient de dire concernant le modèle décrit ci-dessus, la combinaison modulaire choisie et la plate-forme de préparation des fichiers de simulation, le HEC-HMS sous WMS présente des limites liées essentiellement à la conception du modèle lui-même et aux conditions d'utilisation de la combinaison modulaire choisie. Dans ce qui va suivre, on listera les avantages et les limites dont les trois éléments précités sont pourvus dans la mesure de reconnaitre les performances à améliorer et les imperfections à corriger pour une éventuelle future étude.

III-12- HEC-HMS : le modèle de simulation hydrologique:

12-1- Les avantages:

P uisque, nous avons très bien détaillé la description du modèle, nous n'allons mentionner que les points forts résumés comme suit :

· Diversité dans les formalismes proposés : la variété remarquable de ces méthodes de calcul, offre à l'utilisateur l'opportunité du choix en fonction de ses moyens, ses finalités et de son expérience.

- Diversité dans les combinaisons modulaires possibles : ce critère est garanti par le principe de tâches séparées qui le distingue des autres modèles, et qui lui confie une caractéristique incroyable : « plusieurs modèles en un modèle ».

- Aptitude de calibration et nature des résultats issus : pour plusieurs modèles la calibration est effectuée par un autre programme, d'autres peuvent même la faire, mais avec un choix limité de fonctions objectives et d'optimisation. En plus, ces modèles ne peuvent afficher à la fin que les valeurs des paramètres calibrés, l'hydrogramme simulé et observé et la variation de la fonction objective. En revanche, le HEC-HMS avec ses deux fonctions d'optimisation, ses sept fonctions objectives sans oublier ses graphes explicatifs et analytiques, avec tout ceci, il accorde à la calibration une précision inédite, et à la modélisation une exploitation au bout des choses.

12.2. Les limites

-Tous les formalismes utilisent des valeurs constantes des paramètres c'est-à-dire qu'ils sont indépendants du temps, alors que pour de longues durées ces paramètres peuvent changer pour diverses motifs. il y a une alternative que le développeur propose à ceci c'est de diviser une longue simulation en plusieurs et de changer manuellement les paramètres entre les simulations [**30**]. Cette contrainte est loin de détériorer nos résultats, car nous avons opté pour une modélisation événementielle.

- Tous les modules ne sont pas accouplés, c'est-à-dire que chaque partie du modèle est calculée indépendamment de l'autre, mais l'erreur liée à ce problème est minimisée par l'utilisation de courts temps de calcul [**30**]. Cette limite touche en particulier les modèles continus de HEC-HMS qui intègrent des facteurs étroitement liés comme l'évapotranspiration, la fonte de neige et l'infiltration. Par conséquent les erreurs sont liées à cet inconvénient est à rejeter dans notre cas.

- La représentation de la structure du bassin : représentée dans le HEC-HMS, par un arbre ramifié qui rend son assimilation difficile. Un élément ne peut avoir qu'une seule sortie de débit, l'élément de diversion ne peut pas piquer le débit d'un endroit et le verser dans un autre [**30**]. Toutes ces limites de représentation sont gênantes, mais dans notre cas, leurs effets sont neutralisés, parce que notre bassin est très simplifié (un élément de « Subbasin », un élément « Reach » et un exutoire).

III-13- La combinaison modulaire choisie:

13-1- Les avantages:

- Le module météorologique adopté a permis de surmonter le problème d'absence des données de pluviographe.
- La méthode NRCS CN est simple, fidèle, ne nécessite pas d'énormes quantités de données, et dépend directement d'un seul paramètre qui renferme trois facteurs de base dans la modélisation pluie-débit (l'occupation du sol, les sols et l'humidité antécédente).
- La méthode NRCS CN va nous permettre entre autres de faire des prédictions concernant la réponse du bassin versant à des scénarios de changements susceptibles d'affecter son occupation du sol (urbanisation, déforestation, reboisement,…) et des sols (érosion des sols,…).
- Les deux fonctions de transferts sélectionnées n'exigent pas de données de plus, et montrent des résultats satisfaisants chaque fois qu'on les utilise.

- Le module de débit de base est le mieux adapté au contexte semi-aride, et va aider à mieux restituer les hydrogrammes de crues.
- La combinaison ne contient que peu de paramètres ce qui diminue les erreurs causées par les phénomènes de compensation entre les paramètres et d'équi-finalité.

13-2- Les limites:

- Le recours à une modélisation événementielle, va restreindre les bénéfices de la modélisation en matière de compréhension du fonctionnement hydrologique du Rhéraya.
- L'utilisation des averses NRCS va certainement influencer les résultats des simulations en termes du débit, du volume et de la forme de l'hydrogramme simulé.
- La méthode NRCS CN peut produire des erreurs en cas d'utilisation directe des tables NRCS, puisque ces tables sont issues de l'analyse de petits bassins des États-Unis.
- L'utilisation d'hydrogramme unitaire peut influencer les résultats si ses hypothèses ne sont pas valides pour le Rhéraya.

V. Justification du choix du modèle:

Le choix du modèle a été dicté par plusieurs contraintes de moyens et facteurs de privilège qui font de ce modèle un bon choix. Parmi ceux les plus importants :
- Les données exigées par le modèle sont plus ou moins simples, accessibles et disponibles. Donc, le modèle peut donc tourner sans soucis.
- Possibilité d'intégrer les majeurs facteurs affectant la transformation pluie-débit (morphométrie du bassin versant, occupation du sol, types de sols et humidité antérieure), et donc les résultats seront plus réalistes.
· la NRCS CN a été validée sur plusieurs bassins versants dans le monde, et ses résultats sont fiables et similaires aux modèles complexes [**27**]
-· Avoir une base commune pour la comparaison avec les deux premières études de modélisation menées sur Sahel Cette base c'est la description physique du bassin versant, plus précisément l'occupation du sol et le type de sol.
- La connaissance préalable du modèle lors d'une initiation à son utilisation et application pendant un stage antérieure.

CHAPITRE IV

METHODOLOGIE ET APPLICATION DU HEC-HMS

CHAPITRE IV : APPLICATION DU MODELE HEC-HMS

Introduction

Le HEC-HMS est un système complet de modélisation hydrologique des bassins versants qui permet de simuler les processus pluie-débit, depuis les précipitations brutes jusqu'au débit total de ruissellement à un temps donné, à un point donné du bassin étudié. Sa conception a été lancée par l'USACE pour évoluer vers une nouvelle génération du logiciel qui va remplacer son antécédent le HEC-HMS.

En effet, afin de s'adapter aux différents contextes d'études, ce modèle opère selon le principe de tâches distinctes, c'est-à-dire qu'il simule le bassin à un système uniforme composé de plusieurs composantes assurant chacune de représenter un aspect particulier du processus pluie-débit et agissant successivement pour produire l'hydrogramme de l'écoulement. Pour y parvenir, chaque tâche est confiée à un formalisme d'un module choisi librement par l'utilisateur en fonction de ses besoins et ses données, ainsi, en mutant les formalismes d'un module, le HEC-HMS peut changer de type de modèle, par exemple passer d'un modèle événementiel à un modèle continu, de global au distribué, d'empirique au conceptuel et ainsi de suite.

IV-1- Le processus de fonctionnement :

Comme nous venons de le mentionner au chapitre précèdent, le HEC-HMS attribue à chaque module une étape de la transformation pluie-débit, et c'est la combinaison des résultats des modules les uns aux autres qui donne l'hydrogrammes final.

IV-1-1 FONCTIONNALITES

Les données d'entrée peuvent être conçues pour les éléments du bassin versant comme les sous bassins et les tronçons de cours d'eau ou bien simultanément pour des groupes d'éléments analogues. Les tableaux et formulaires pour l'introduction de données nécessaires sont accessibles {partir d'un schéma visuel du bassin versant. Pour effectuer une première simulation, il est nécessaire de créer une base de données pour caractériser le bassin versant et déterminer les averses qui seront employées comme données d'entrée du modèle. Les principales étapes de la simulation sent :

- ✓ Démarrage d'un nouveau projet;
- ✓ Définition du modèle de bassin versant;
- ✓ Données de la ou des stations météorologiques;
- ✓ Définition du modèle de précipitation;

- ✓ Définition des paramètres de contrôle de la simulation;
- ✓ Création et exécution d'une simulation;
- ✓ Visualisation des résultats.

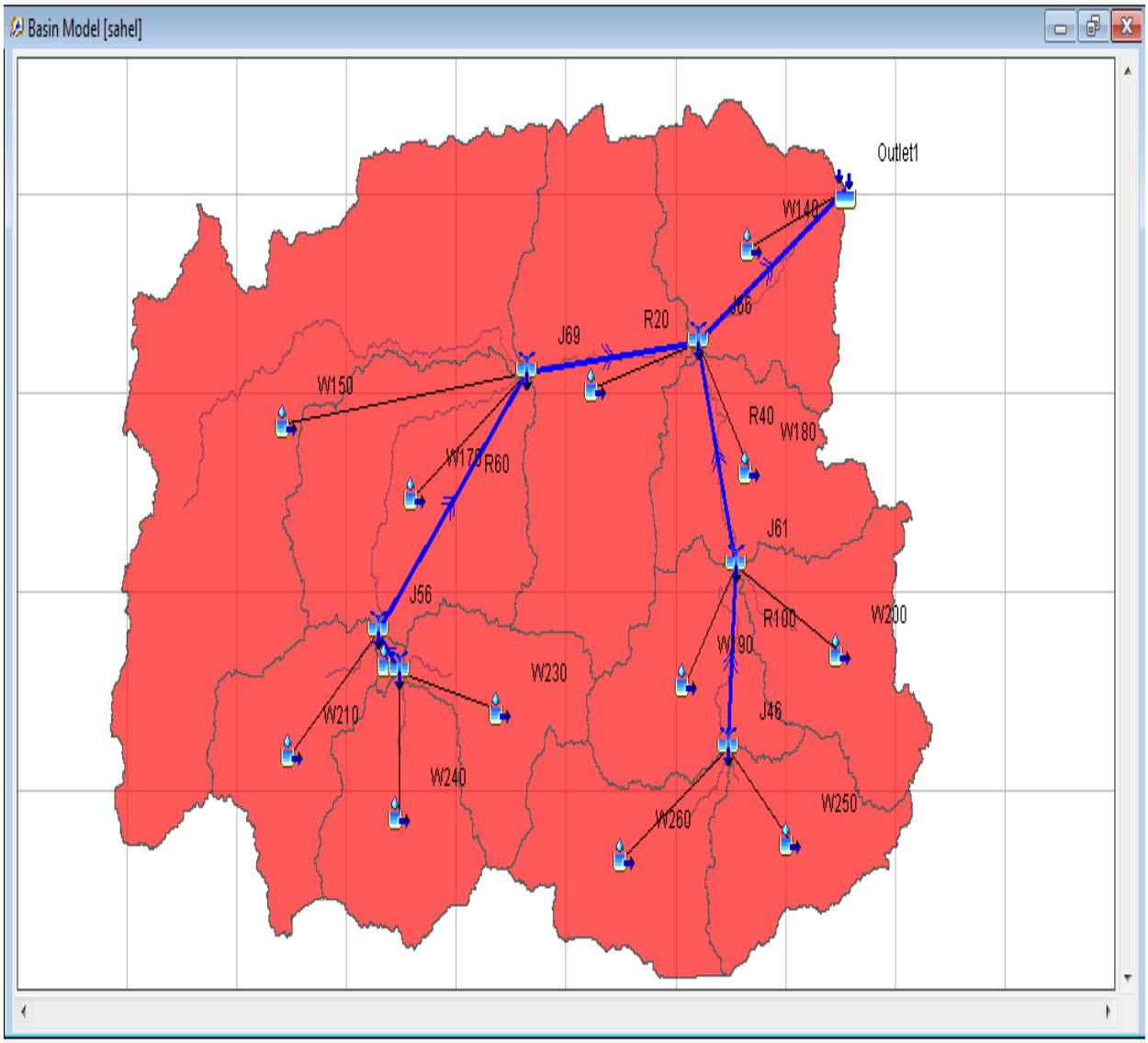


Figure IV-1: Fenêtre bassin versant Oued Sahel et ses sous bassins.

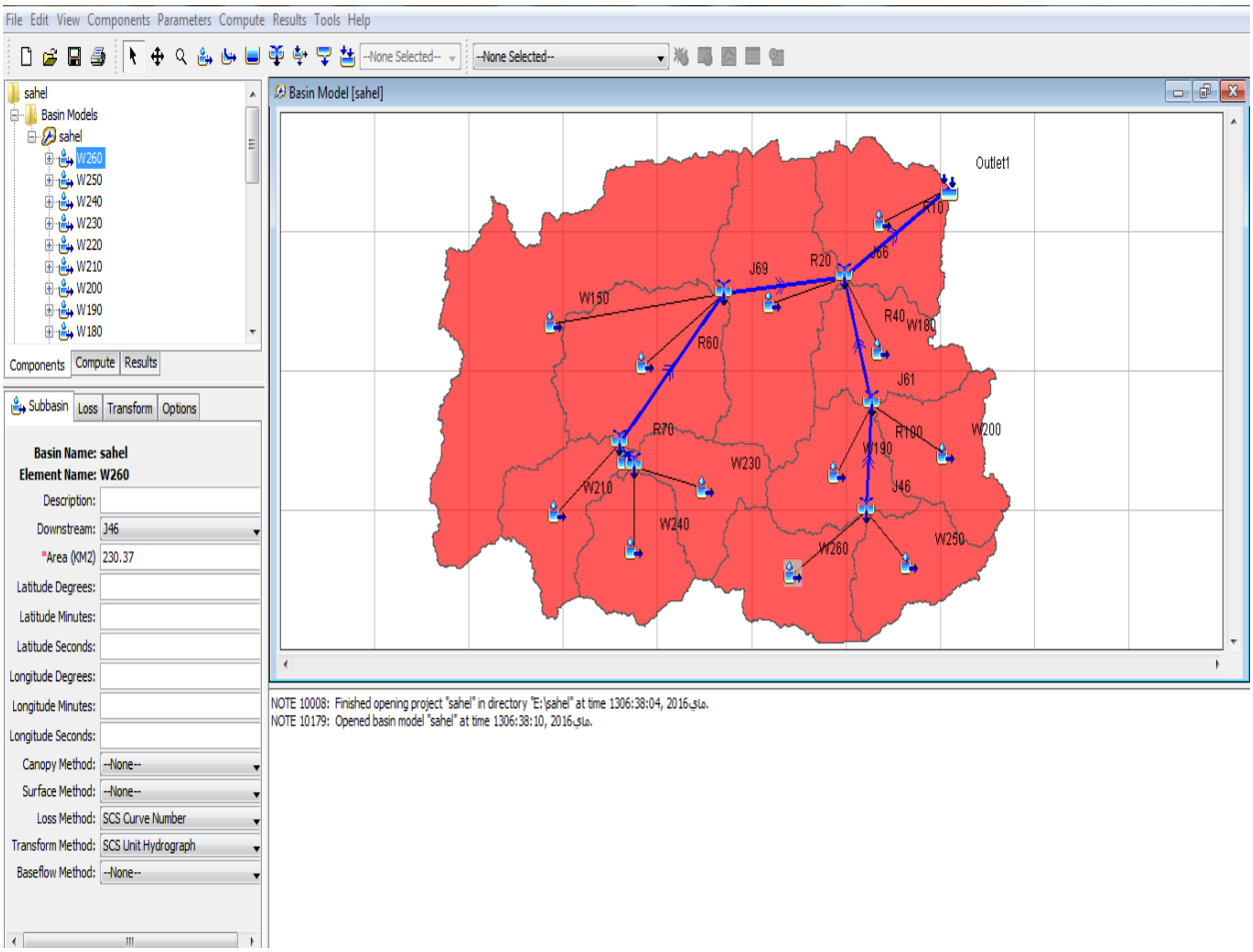


Figure IV-2 : Fenêtre de l'interface du HEC-HMS représente le Bassin versant et leurs sous bassins.

La première étape consiste à schématiser le bassin versant étudié en éléments fondamentaux connectés entre eux sous forme d'un arbre ramifié. Le HEC-HMS offre l'opportunité de représenter toutes les entités naturelles ou artificielles installées dans un bassin et qui influencent le processus de transformation pluie-débit, allant depuis les sous bassins, les exutoires jusqu'aux canaux de rivières et les canaux de diversion d'eau, en passant par les réservoirs, les retenues de barrages,…etc. Les éléments et leurs rôles dans la représentation de l'état du bassin versant sont les suivants:

- ✓ L'élément « Subbasin » : matérialise le bassin si la modélisation est globale, et les sous bassins si on opte pour une modélisation semi-distribuée. Parmi ses attributs de base : la surface, la fonction de production associée et la fonction de transfert associée.
- ✓ L'élément « Reach » : représente le plus souvent la rivière, et sert à faire la connexion entre les autres éléments. L'information de base attachée est la fonction de routage.
- ✓ L'élément « Réservoir » : décrit les réservoirs, les retenues de barrage,…etc. ses caractéristiques attribués permettent de définir les conditions stockage-déstockage.

- ✓ L'élément « Source » : permet d'ajouter des stations de mesure de débit ou de représenter les conditions aux limites.
- ✓ L'élément « Jonction » : utilisé pour combiner aux moins deux débits véhiculés par deux éléments, comme dans le cas d'une confluence entre deux rivières.
- ✓ L'élément « Diversion » : représente des endroits où se produit des prélèvements d'eau, c'est le cas par exemple des seguias et des canaux de diversion.
- ✓ L'élément « Sink » : simule l'exutoire des sous bassins versants.

Dans notre cas, cette étape sera totalement et automatiquement réalisée par le logiciel WMS lors de la phase de caractérisation physique.

IV-2-1 Les données nécessaires à l'application de simulation avec HEC-HMS :

L'application du modèle HEC-HMS nécessite une banque de données concernant le bassin ou les sites étudiés, afin qu'on puisse appliquer le modèle. Parmi les données indispensables on peut citer dans notre cas:

- ❖ Les caractéristiques morphométriques des bassins :
- ✓ Les surfaces des sous bassins versants
- ✓ Type de sol
- ✓ Couvert végétal
- ❖ Les caractéristiques météorologiques :
- ✓ Les précipitations
- ✓ L'évapotranspiration
- ✓ Les données de spécifications de contrôle
- ✓ La date initiale
- ✓ La date finale
- ✓ L'intervalle de temps de calcul

IV-2 Les données de bases d'entré :

Les données nécessaires à la modélisation des sous-bassins sont représenté dans le tableau suivant :

N°	bassin veersant	surface(km2)	pente(m/m)	lag taim	cn	Average %impervious
1	Sous-BV W260	230.37	0.024009	532.71	53	15
2	Sous-BV W250	189.68	0.015217	623.65	70	14
3	Sous-BV W240	207.16	0.028007	481.91	80	12
4	Sous-BV W230	180.66	0.03736	406.96	71	25
5	Sous-BV W220	7.7237	0.040396	213.02	83	5
6	Sous-BV W210	195.71	0.074513	302.70	57	14
7	Sous-BV W200	220.07	0.033474	451.16	83	5
8	Sous-BV W190	207.65	0.062093	334.25	70	15
9	Sous-BV W180	226.27	0.209805	195.73	91	5
10	Sous-BV W170	388.85	0.080297	352.43	83	5
11	Sous-BV W160	467.41	0.022477	674.84	86	10
12	Sous-BV W150	866.88	0.046363	581.89	86	30
13	Sous-BV W140	280.1	0.048723	405.20	90	72

Tableau IV-01 : Données de base des sous-bassins versants.

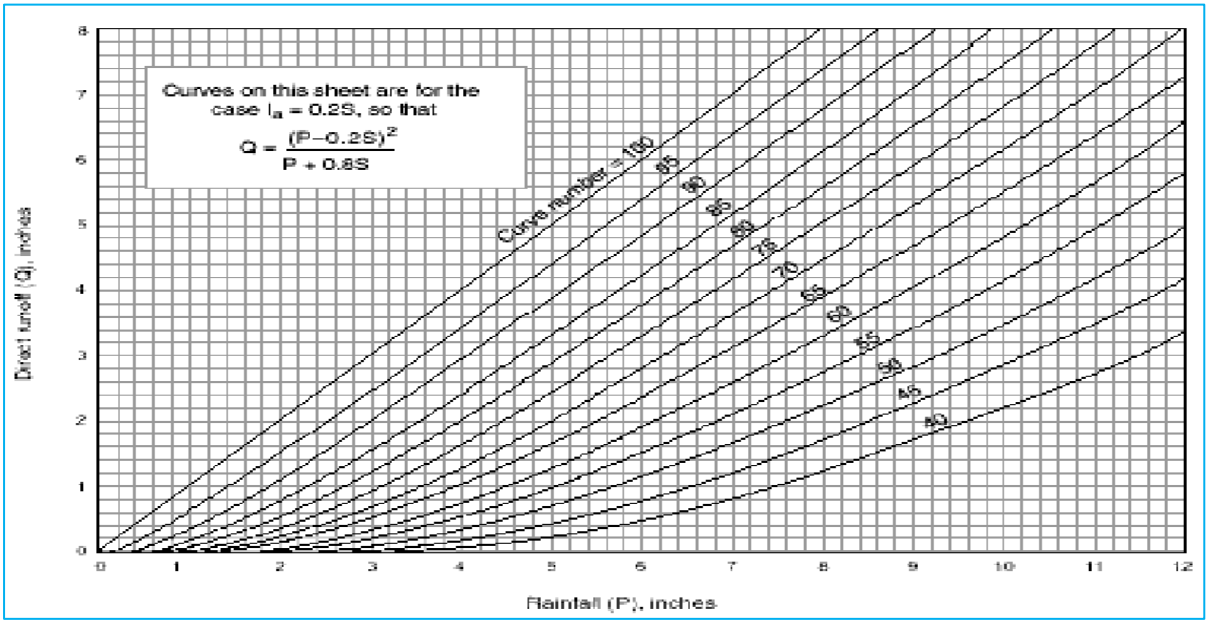


Figure IV-3 : Graphique de l'écoulement superficiel en fonction de la précipitation journalière par la méthode du SCS Curve Number.

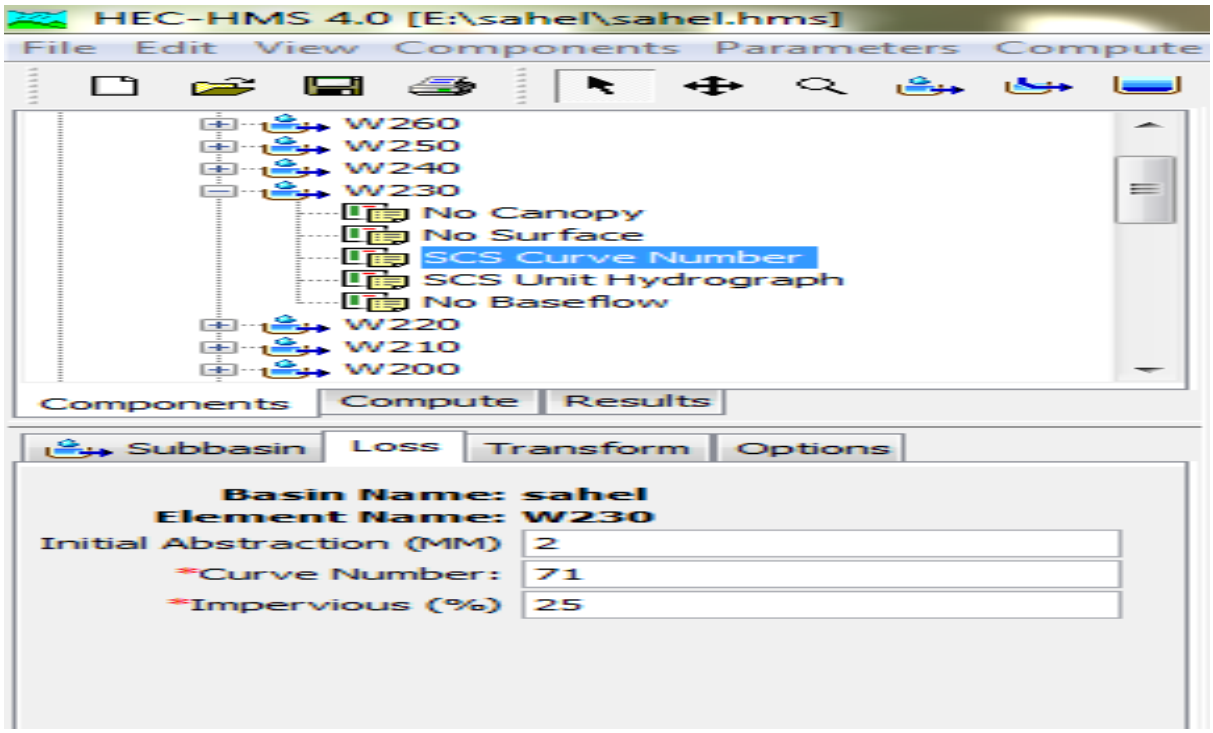


Figure IV-4 : Fenêtre de donnée de Curve Number (CN) et Imperméabilité.

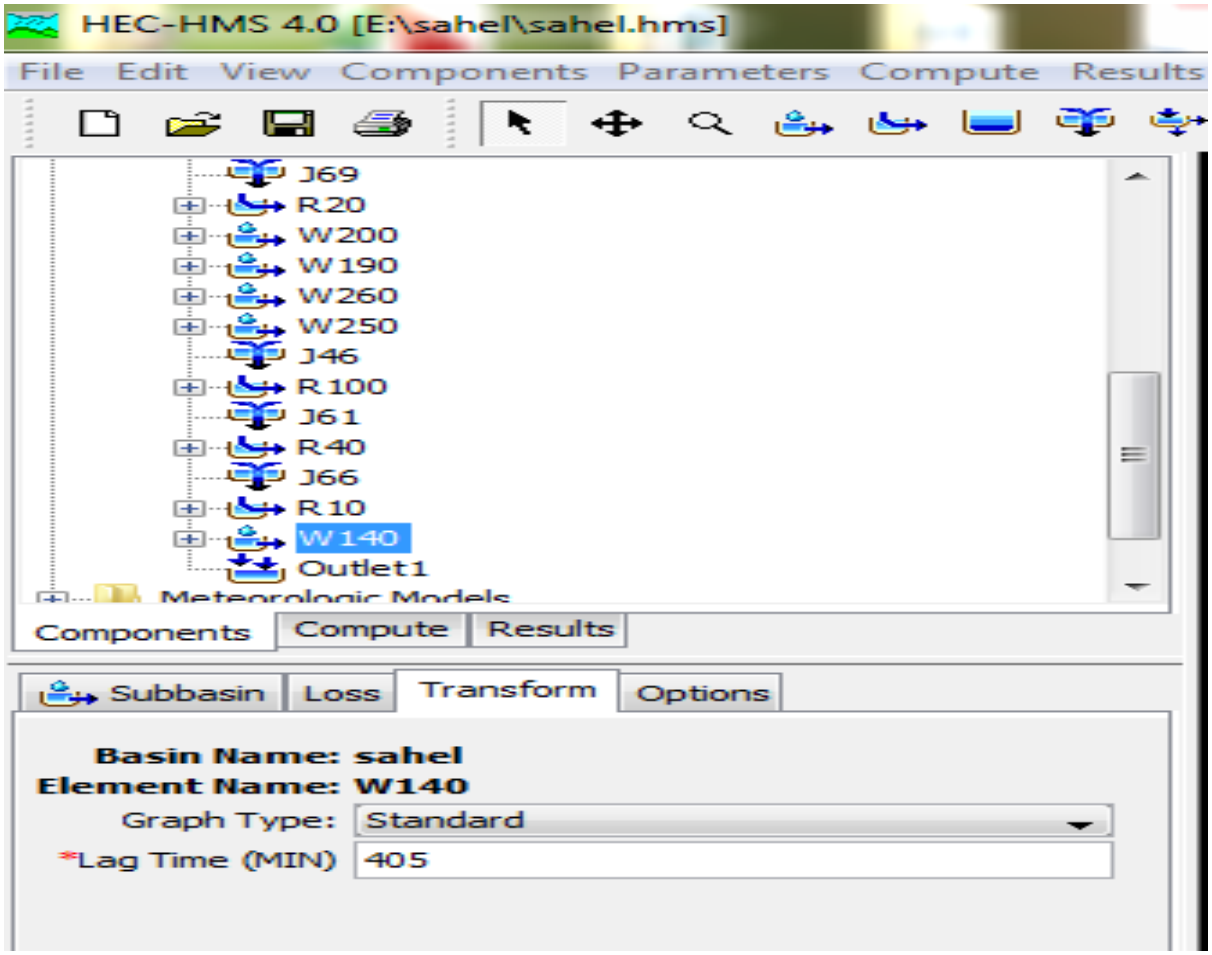


Figure IV-5 : Fenêtre représente Lag time.

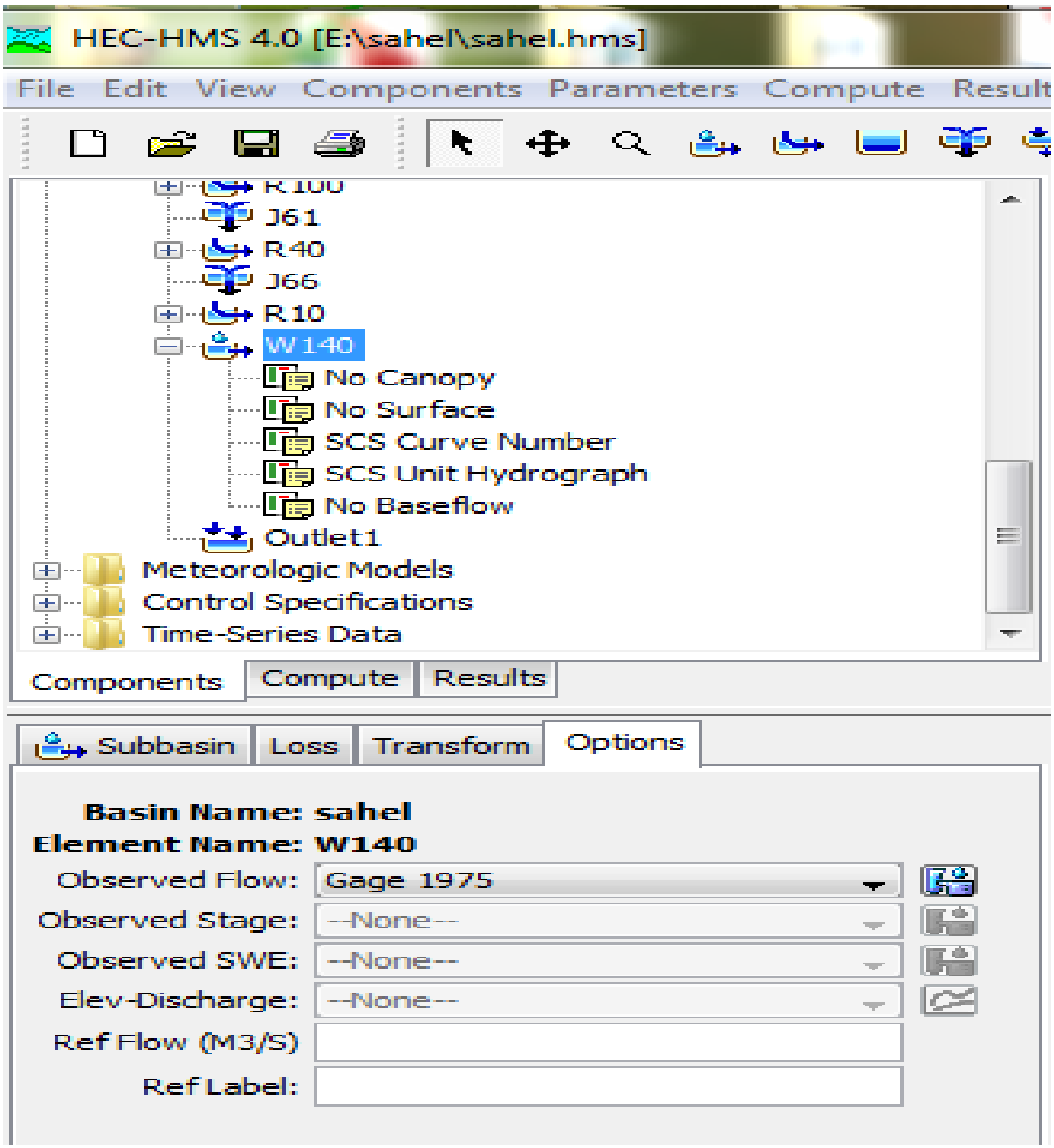


Figure IV-6 OPTION.

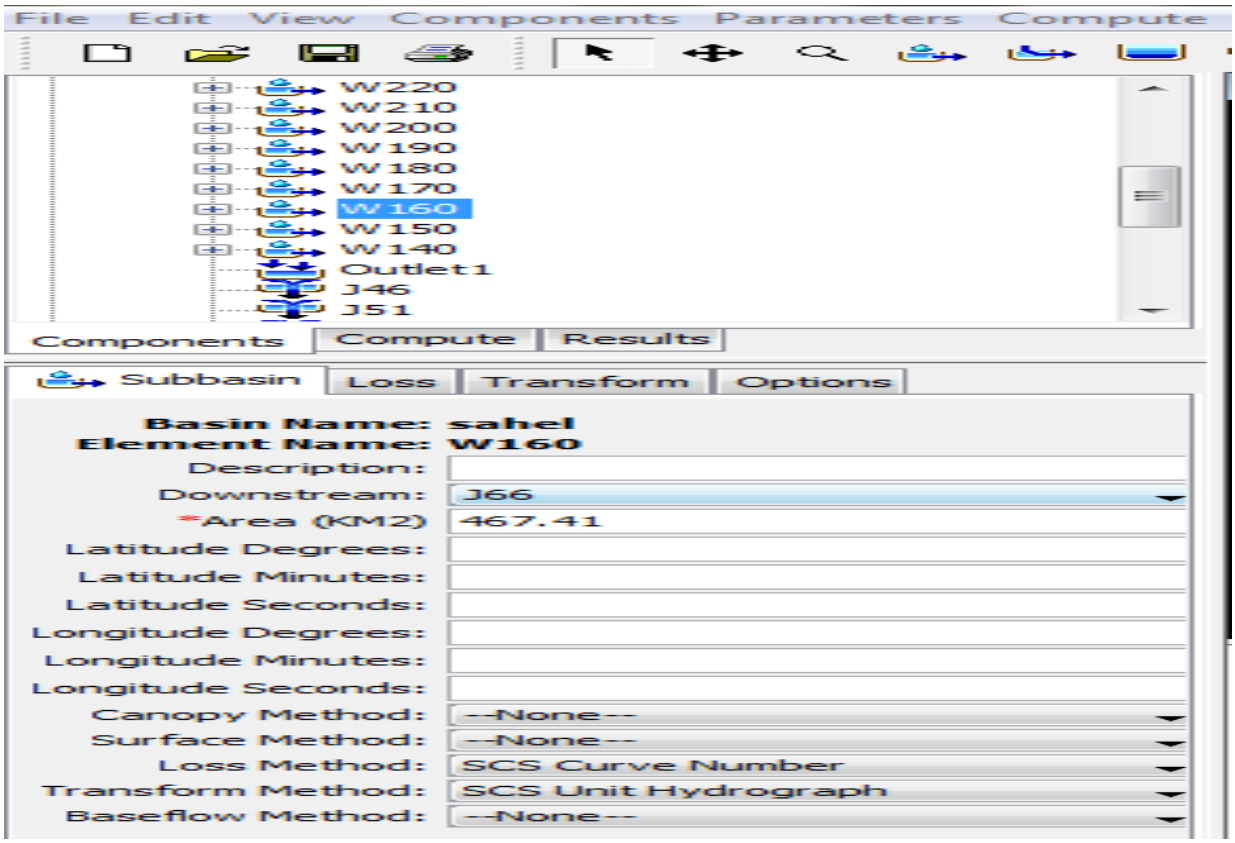


Figure IV-7: Fenêtre de surface du sous bassin calculé parHEC- GeoH.

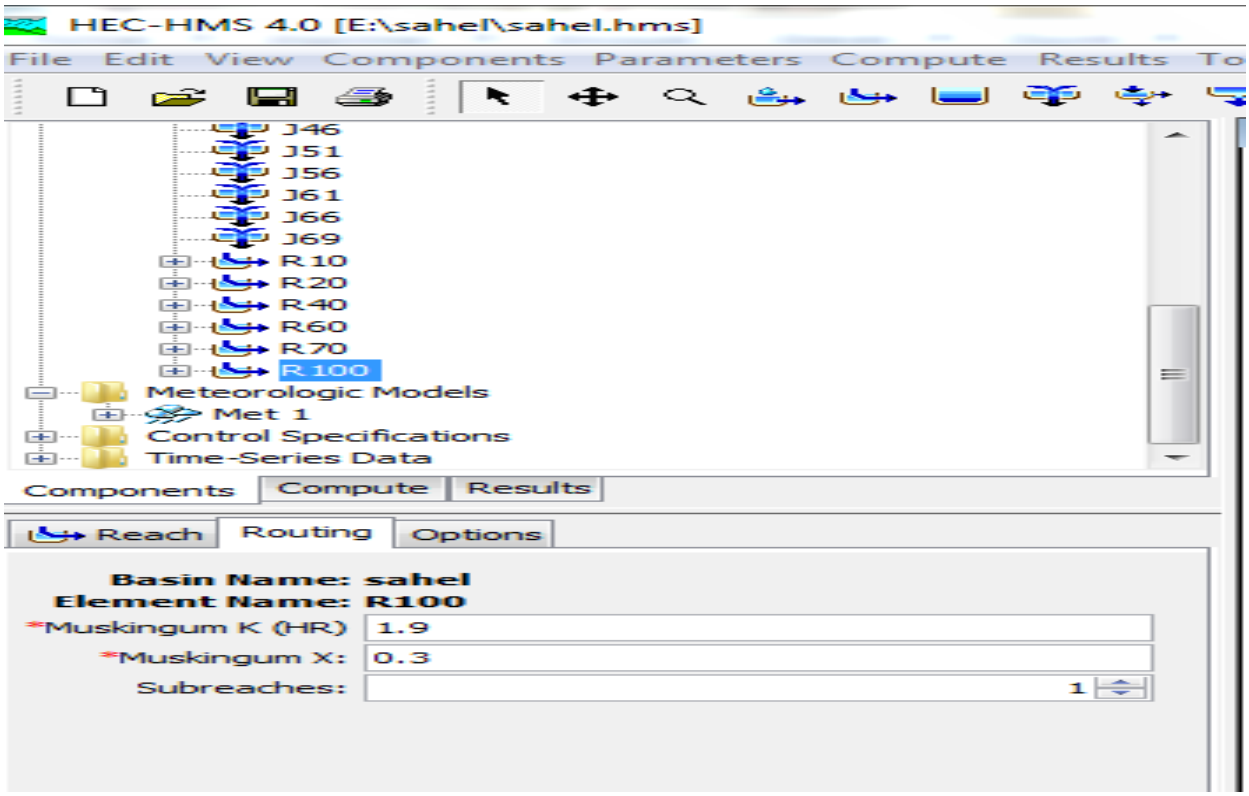


Figure IV-8 : Fenêtre de caractéristiques géométriques des talwegs et cours d'eau.

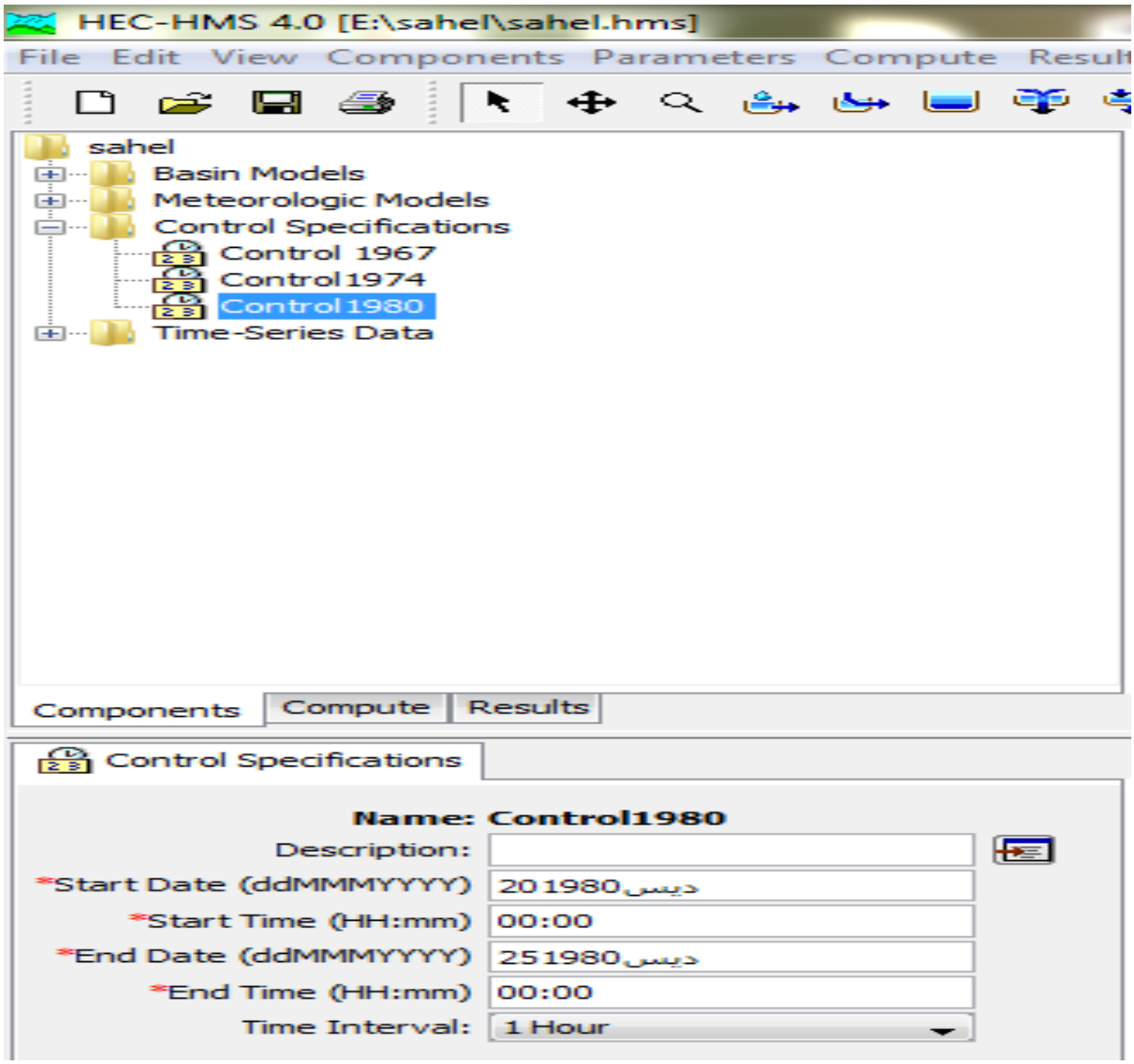


Figure IV-9 : Fenêtre de temps de démarrage de la crue et l'intervalle de temps.

La figure IV-9 présente les procédures de saisie des données (temps de démarrage du crue, l'intervalle de temps et temps du fin du crue) sur le logiciel HEC HMS.

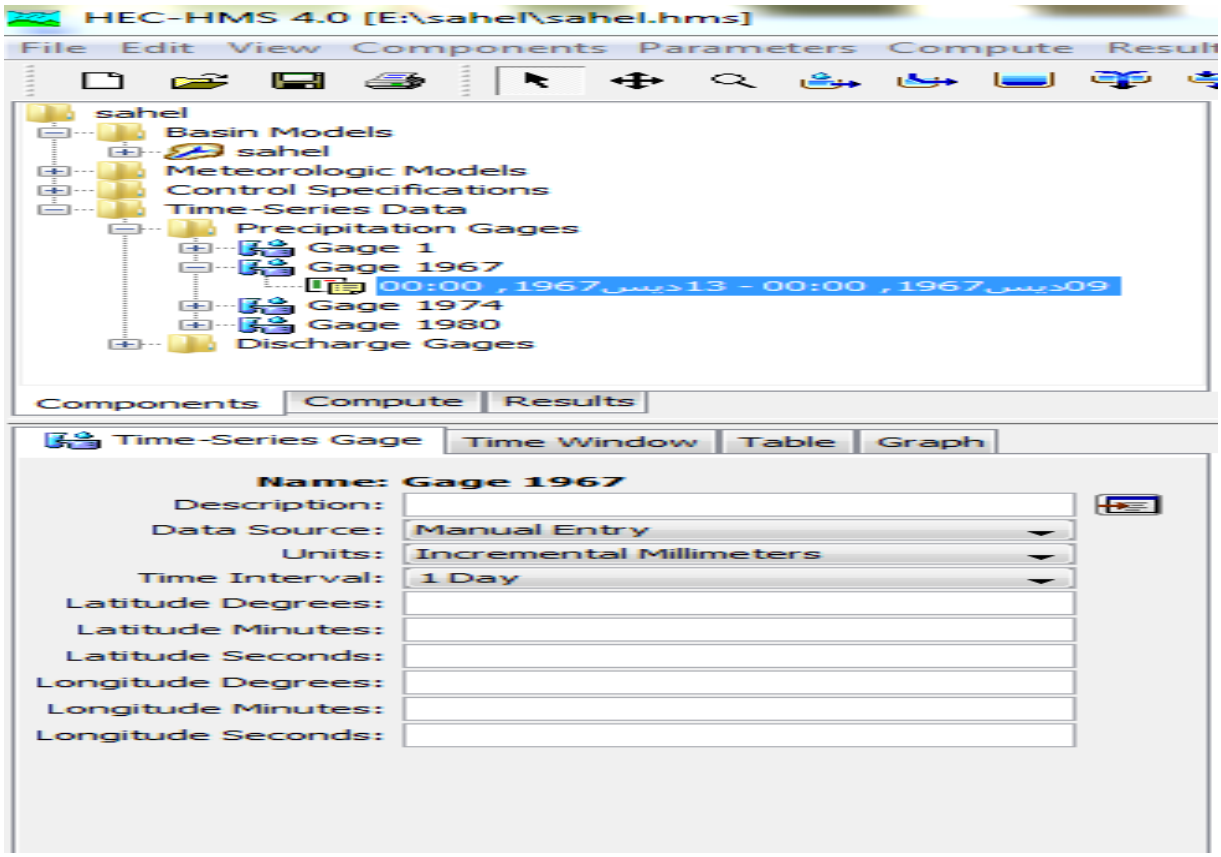


Figure IV-10 :Fenêtre de l'intervalle de temps des précipitations (pas de temps).

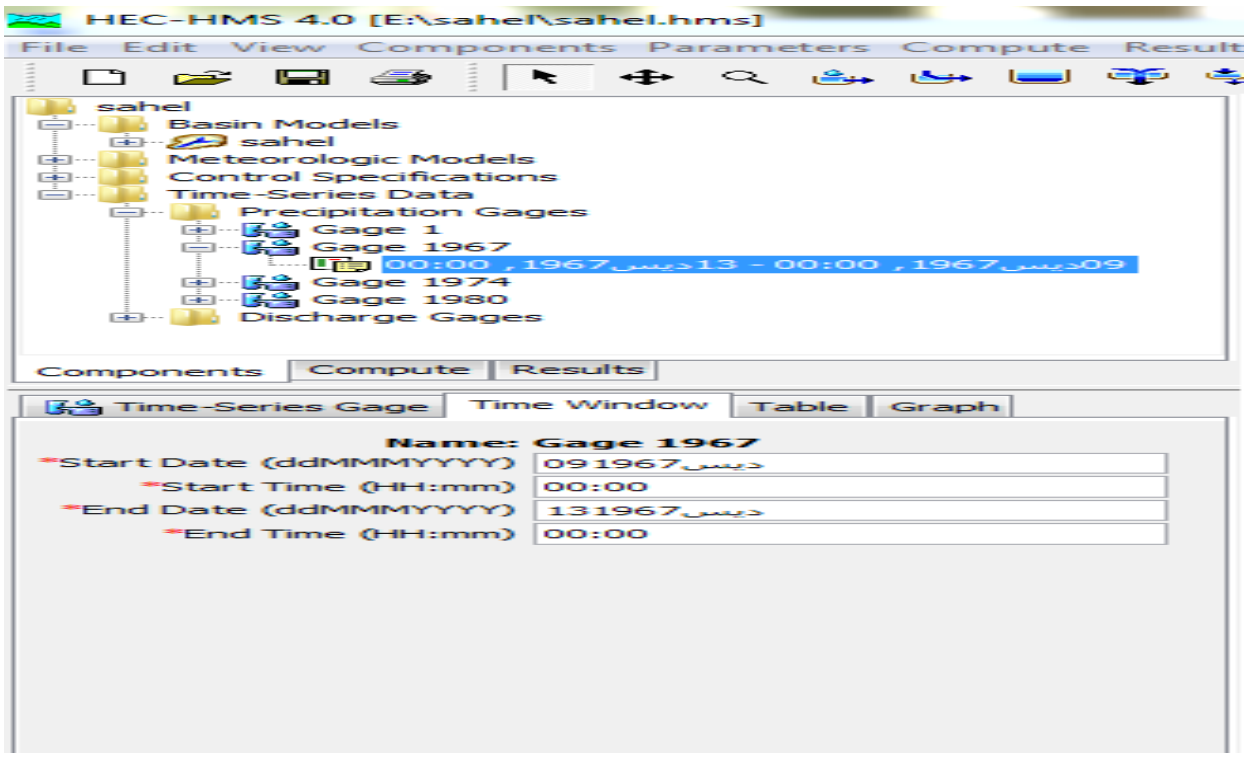


Figure IV-11 : Fenêtre représente l'annéedes précipitations. (Intervalle de temps).

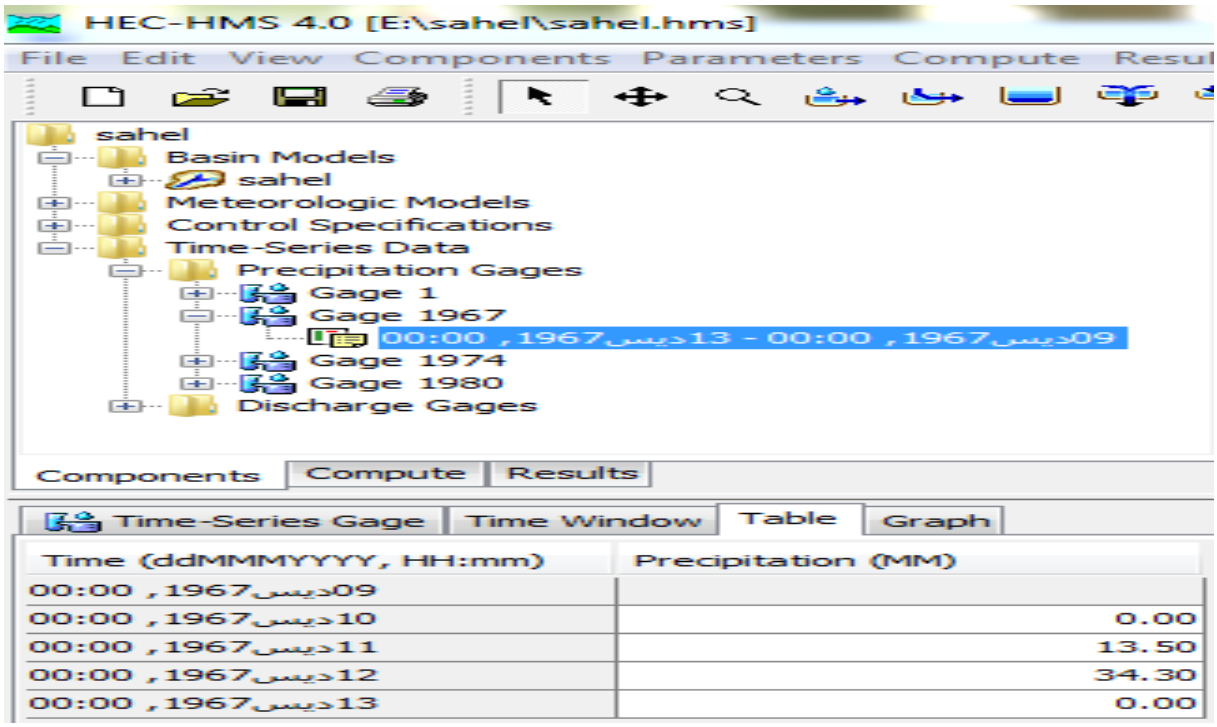


Figure IV-12 : Fenêtre de donnée de précipitations. Répartition temporelle (type I).

IV-3- Calibration du modèle : (crue 09 février 1974)

Pour trouver les valeurs les proches de la réalité des paramètres du modèle, nous avons effectué une calibration en utilisant les données des 01 fichiers de simulation (crue 09 février 1974) et en utilisant la fonction d'optimisation automatique.

Les débits de pointe et de base et le volume simulés varient tous en fonction de l'événement.

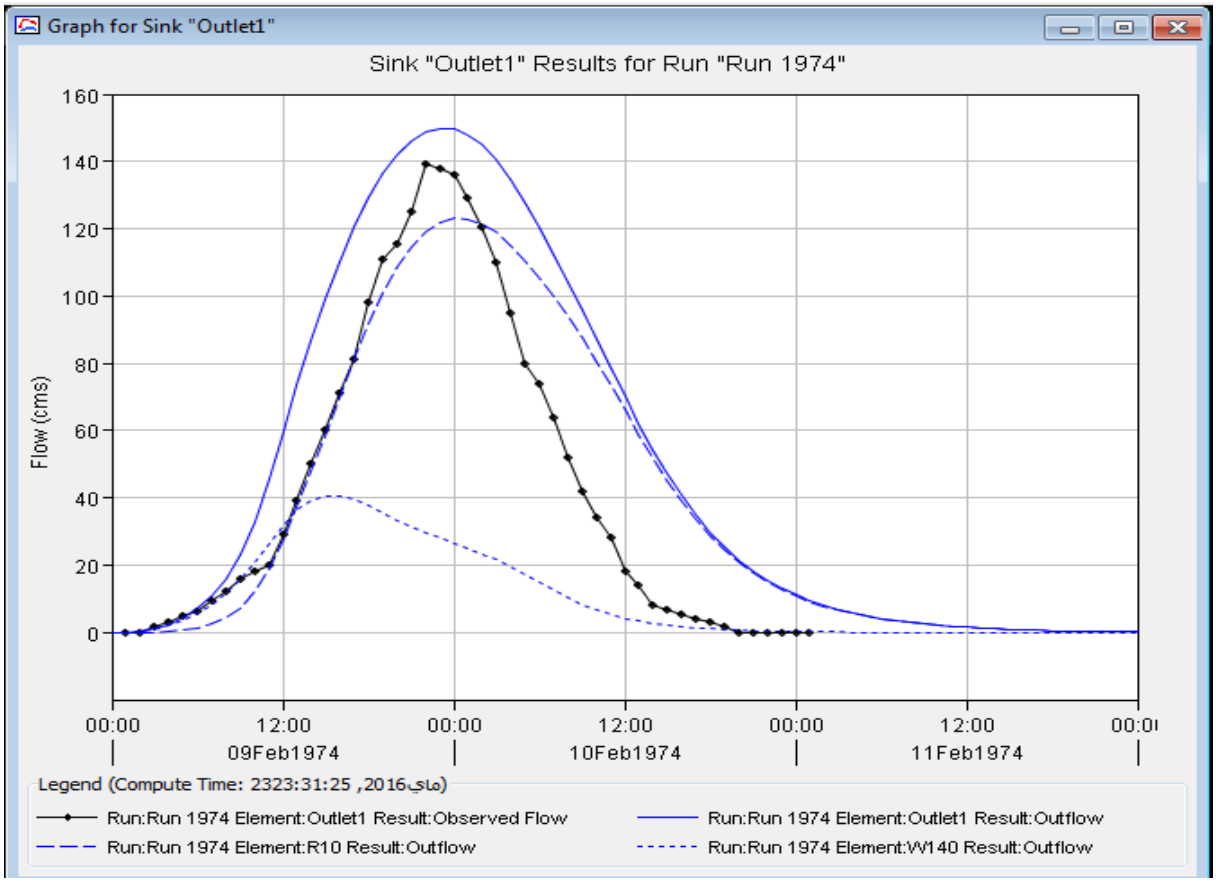


Figure IV-13 : Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simule.Sous Bassin W140 (Averse type1)

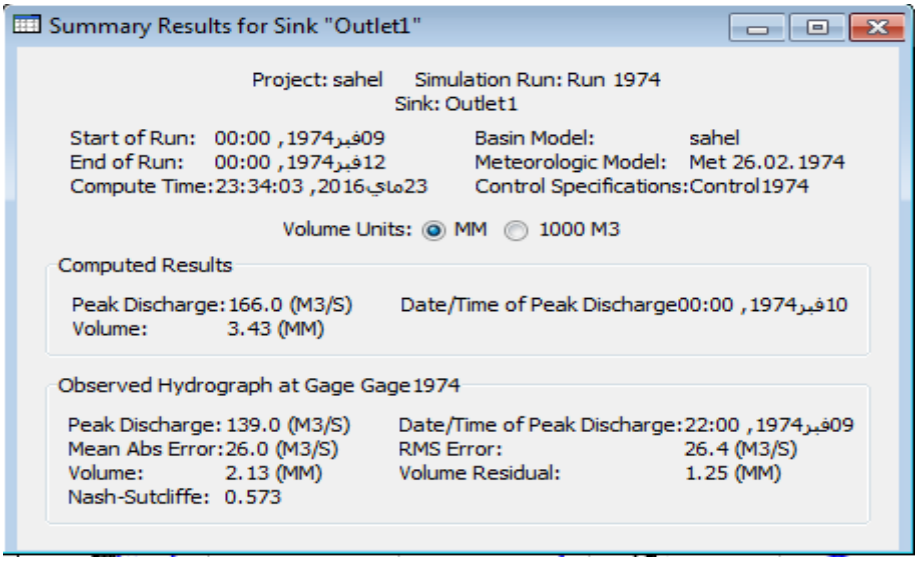


Figure IV-14 : Fenêtre représente le volume de la crue simulée. (Averse type1)

Time-Series Results for Sink "Outlet1"

Project: sahel Simulation Run: Run 1974
Sink: Outlet1

Start of Run: 00:00 ,1974فبر09 Basin Model: sahel
End of Run: 00:00 ,1974فبر12 Meteorologic Model: Met 26.02.1974
Compute Time: 23:41:17 ,2016ماي23 Control Specifications: Control1974

Date	Time	Outflow (M3/S)	Obs Flow (M3/S)
1974فبر09	00:00	0.0	0.0
1974فبر09	01:00	0.1	0.0
1974فبر09	02:00	0.3	0.0
1974فبر09	03:00	0.7	1.5
1974فبر09	04:00	1.6	3.0
1974فبر09	05:00	3.0	5.0
1974فبر09	06:00	4.8	6.2
1974فبر09	07:00	7.0	9.4
1974فبر09	08:00	9.8	12.0
1974فبر09	09:00	13.1	16.0
1974فبر09	10:00	18.0	18.0
1974فبر09	11:00	25.6	19.9
1974فبر09	12:00	37.1	29.0
1974فبر09	13:00	53.3	39.0
1974فبر09	14:00	71.5	50.0
1974فبر09	15:00	88.8	60.0
1974فبر09	16:00	104.2	71.0
1974فبر09	17:00	118.4	81.0
1974فبر09	18:00	131.1	98.0
1974فبر09	19:00	142.5	111.0
1974فبر09	20:00	151.7	115.5
1974فبر09	21:00	158.3	125.0
1974فبر09	22:00	162.9	139.0
1974فبر09	23:00	165.5	137.9
1974فبر10	00:00	166.0	136.0

Figure IV.15 : Fenêtre variation temporelle de donnée de précipitations brutes et les résultats de précipitations nettes et les débits simulés. (Averse type1)

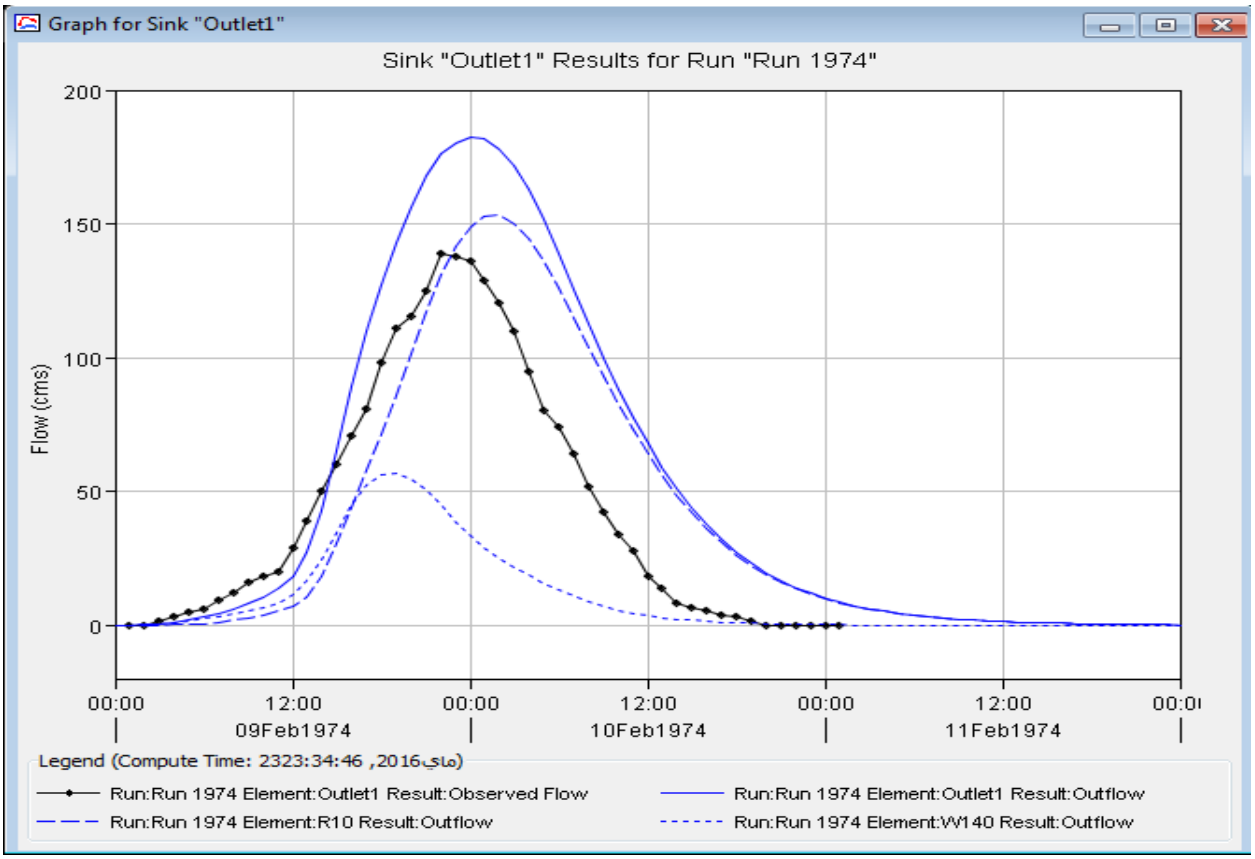


Figure IV-16: Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simule. (Averse type2)

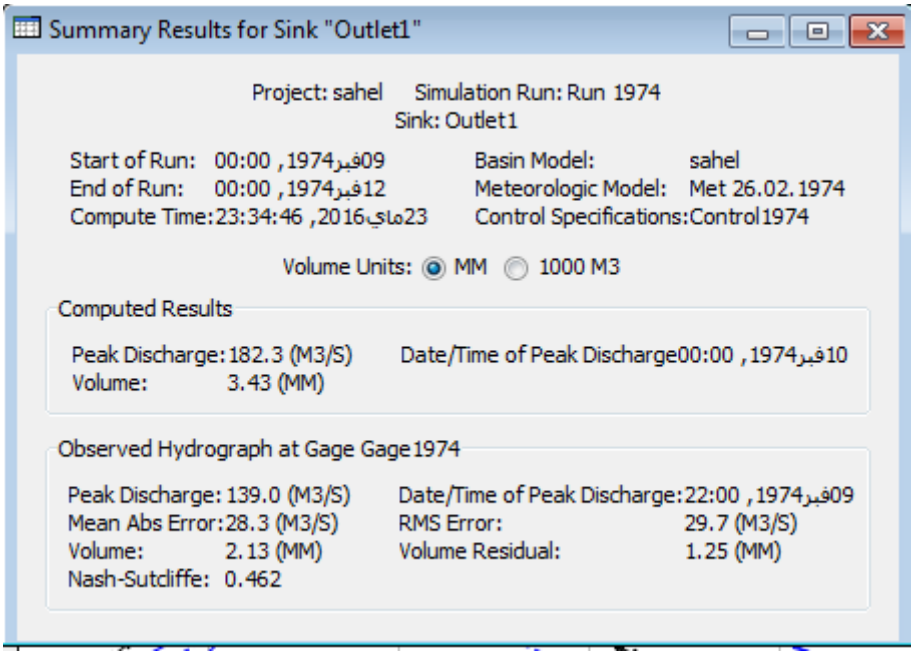
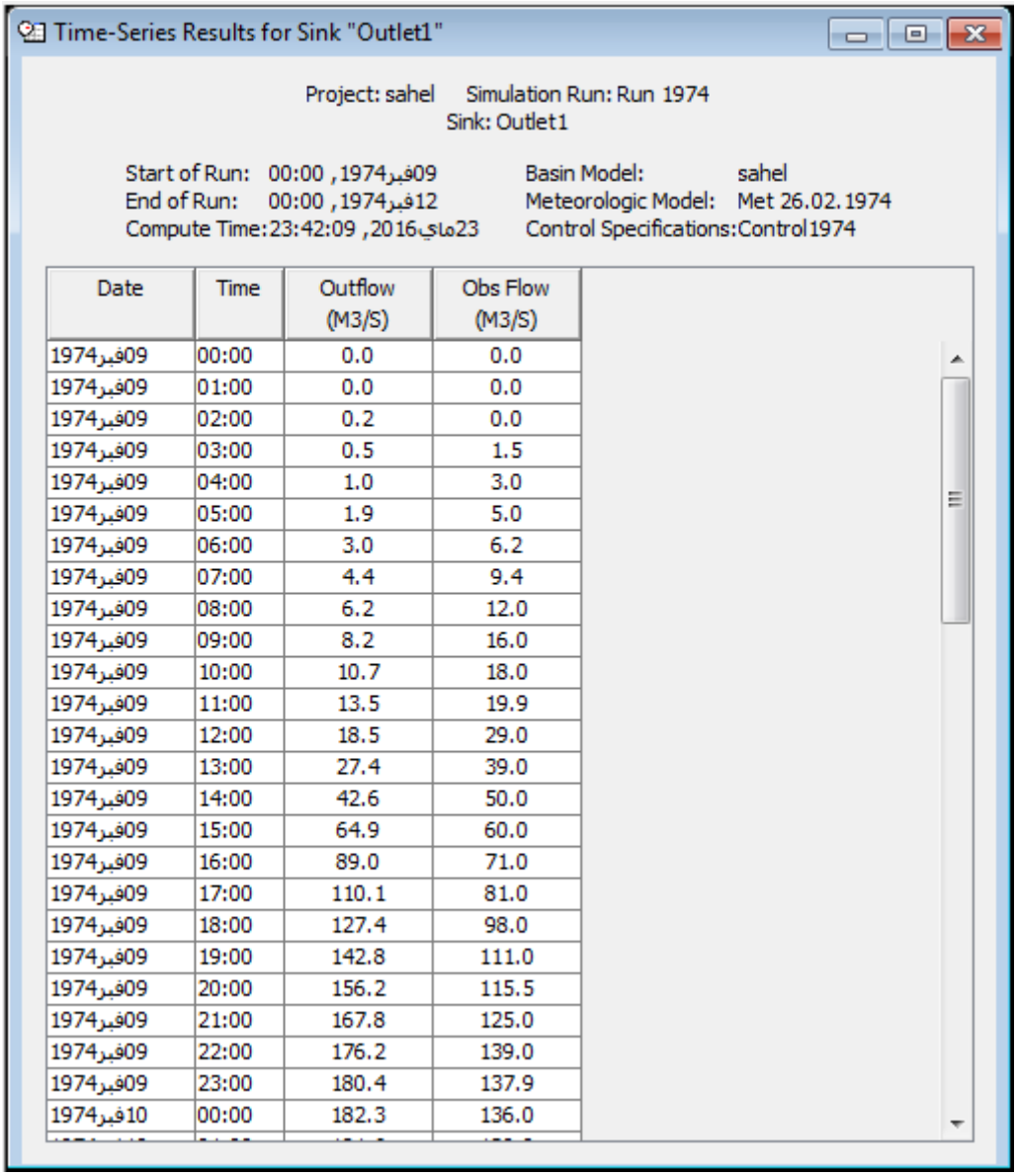


Figure IV-17: Fenêtre représente le volume de la crue simulée.(Averse type 2)



Time-Series Results for Sink "Outlet1"

Project: sahel Simulation Run: Run 1974
Sink: Outlet1

Start of Run: 00:00 ,1974فبر09 Basin Model: sahel
End of Run: 00:00 ,1974فبر12 Meteorologic Model: Met 26.02.1974
Compute Time: 23:42:09 ,2016ماي23 Control Specifications: Control1974

Date	Time	Outflow (M3/S)	Obs Flow (M3/S)
1974فبر09	00:00	0.0	0.0
1974فبر09	01:00	0.0	0.0
1974فبر09	02:00	0.2	0.0
1974فبر09	03:00	0.5	1.5
1974فبر09	04:00	1.0	3.0
1974فبر09	05:00	1.9	5.0
1974فبر09	06:00	3.0	6.2
1974فبر09	07:00	4.4	9.4
1974فبر09	08:00	6.2	12.0
1974فبر09	09:00	8.2	16.0
1974فبر09	10:00	10.7	18.0
1974فبر09	11:00	13.5	19.9
1974فبر09	12:00	18.5	29.0
1974فبر09	13:00	27.4	39.0
1974فبر09	14:00	42.6	50.0
1974فبر09	15:00	64.9	60.0
1974فبر09	16:00	89.0	71.0
1974فبر09	17:00	110.1	81.0
1974فبر09	18:00	127.4	98.0
1974فبر09	19:00	142.8	111.0
1974فبر09	20:00	156.2	115.5
1974فبر09	21:00	167.8	125.0
1974فبر09	22:00	176.2	139.0
1974فبر09	23:00	180.4	137.9
1974فبر10	00:00	182.3	136.0

Figure IV-18: Fenêtre représente le volume de la crue simulée.(Averse type 2)

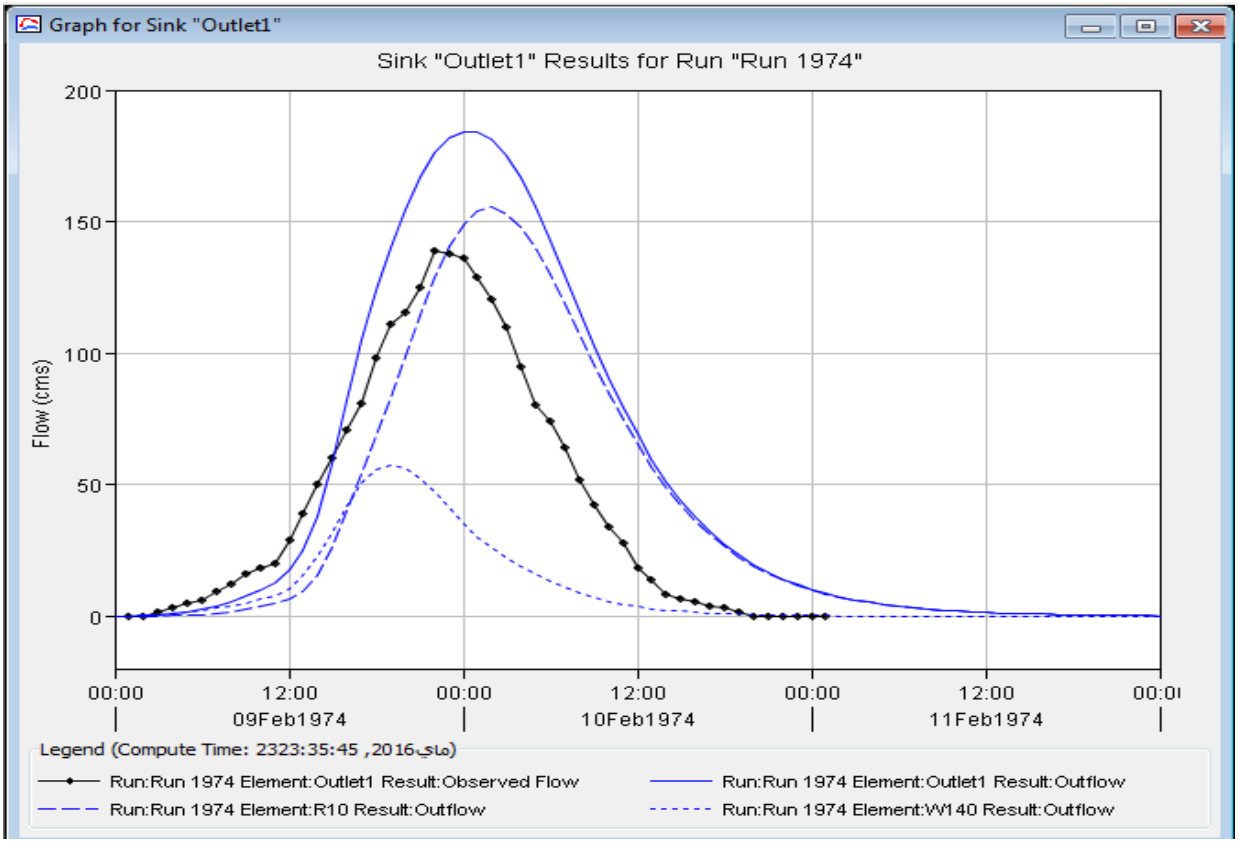


Figure IV-19: Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simule. (Averse type3)

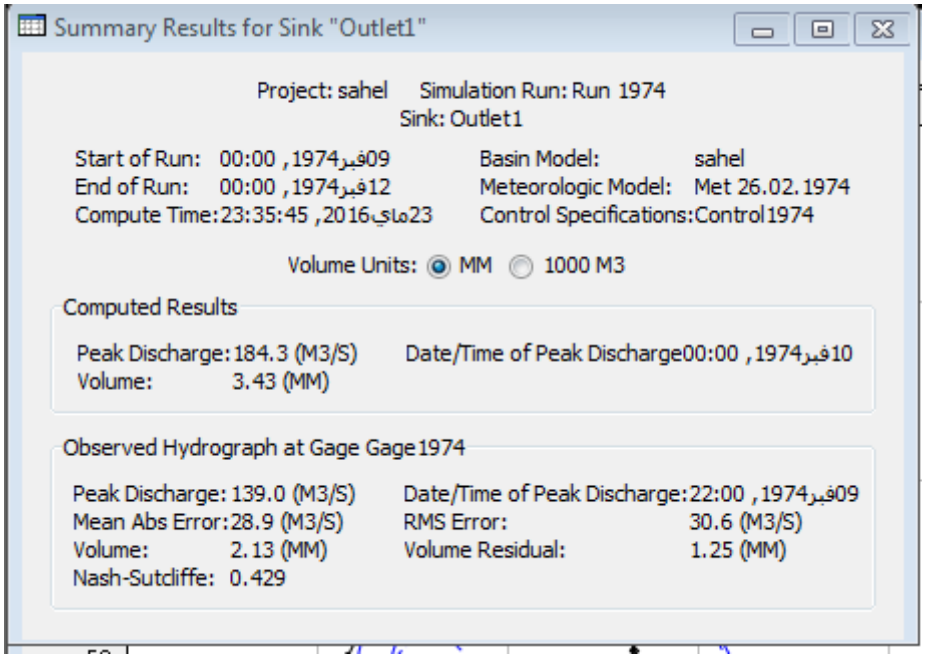
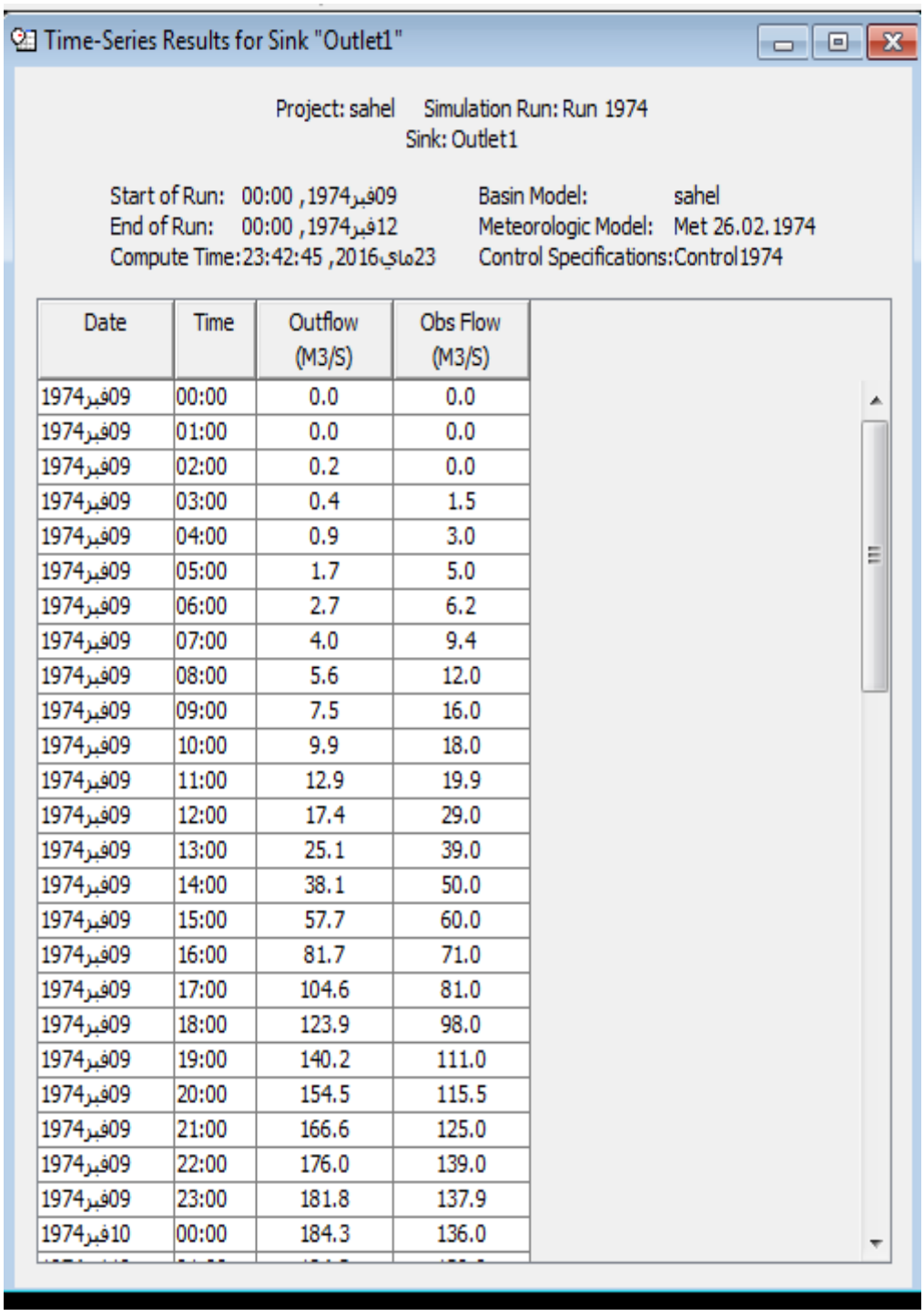


Figure IV-20: Fenêtre représente le volume de la crue simulée. (Averse type3)



Time-Series Results for Sink "Outlet1"

Project: sahel Simulation Run: Run 1974
Sink: Outlet1

Start of Run: 09فبر1974 ,00:00 Basin Model: sahel
End of Run: 12فبر1974 ,00:00 Meteorologic Model: Met 26.02.1974
Compute Time: 23ماي2016 ,23:42:45 Control Specifications: Control1974

Date	Time	Outflow (M3/S)	Obs Flow (M3/S)
09فبر1974	00:00	0.0	0.0
09فبر1974	01:00	0.0	0.0
09فبر1974	02:00	0.2	0.0
09فبر1974	03:00	0.4	1.5
09فبر1974	04:00	0.9	3.0
09فبر1974	05:00	1.7	5.0
09فبر1974	06:00	2.7	6.2
09فبر1974	07:00	4.0	9.4
09فبر1974	08:00	5.6	12.0
09فبر1974	09:00	7.5	16.0
09فبر1974	10:00	9.9	18.0
09فبر1974	11:00	12.9	19.9
09فبر1974	12:00	17.4	29.0
09فبر1974	13:00	25.1	39.0
09فبر1974	14:00	38.1	50.0
09فبر1974	15:00	57.7	60.0
09فبر1974	16:00	81.7	71.0
09فبر1974	17:00	104.6	81.0
09فبر1974	18:00	123.9	98.0
09فبر1974	19:00	140.2	111.0
09فبر1974	20:00	154.5	115.5
09فبر1974	21:00	166.6	125.0
09فبر1974	22:00	176.0	139.0
09فبر1974	23:00	181.8	137.9
10فبر1974	00:00	184.3	136.0

Figure IV.21: Fenêtre variation temporelle de donnée de précipitations brutes et les résultats de précipitations nettes et les débits simulés. (Averse type3)

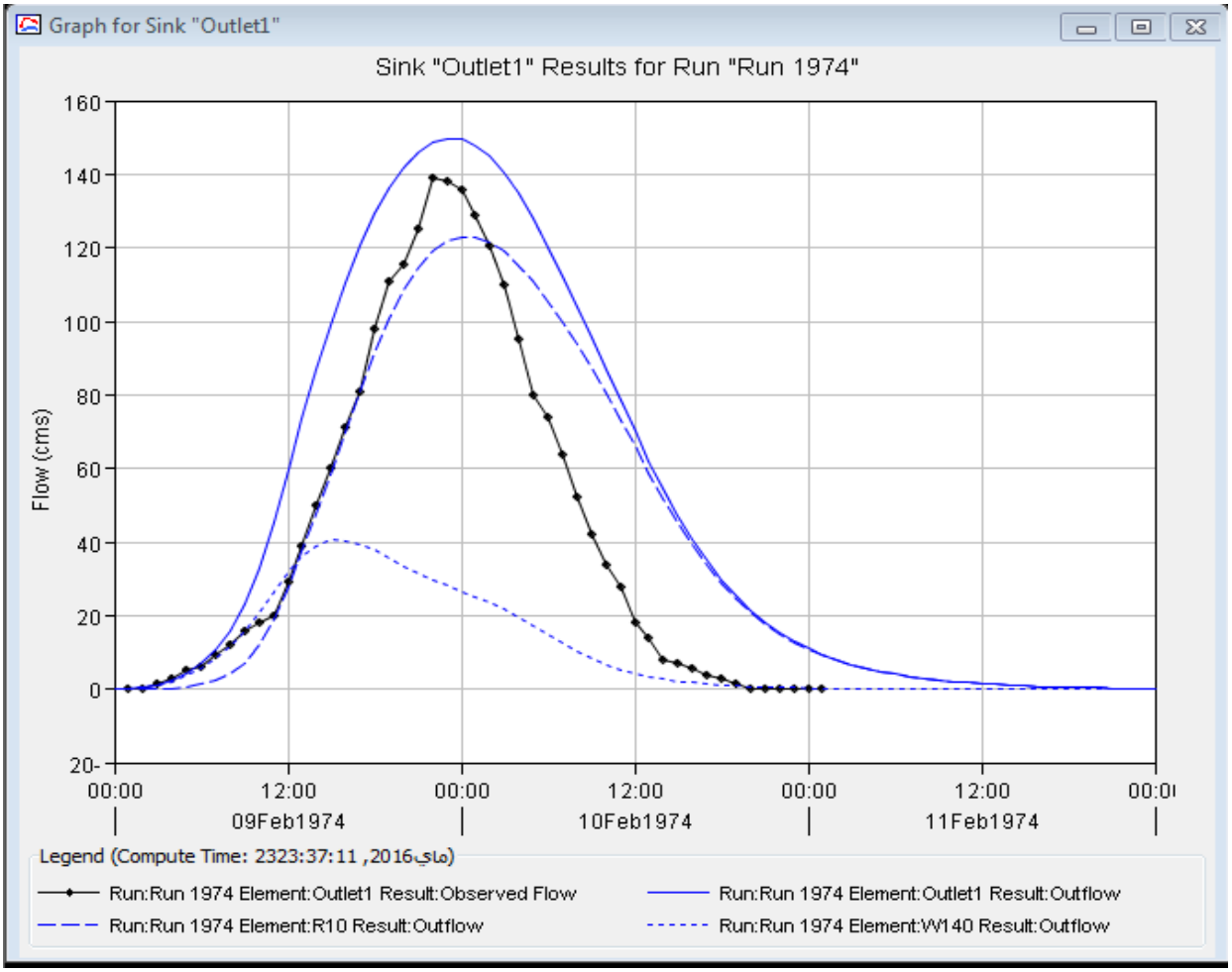


Figure IV-22: Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simule(Averse typeA1)

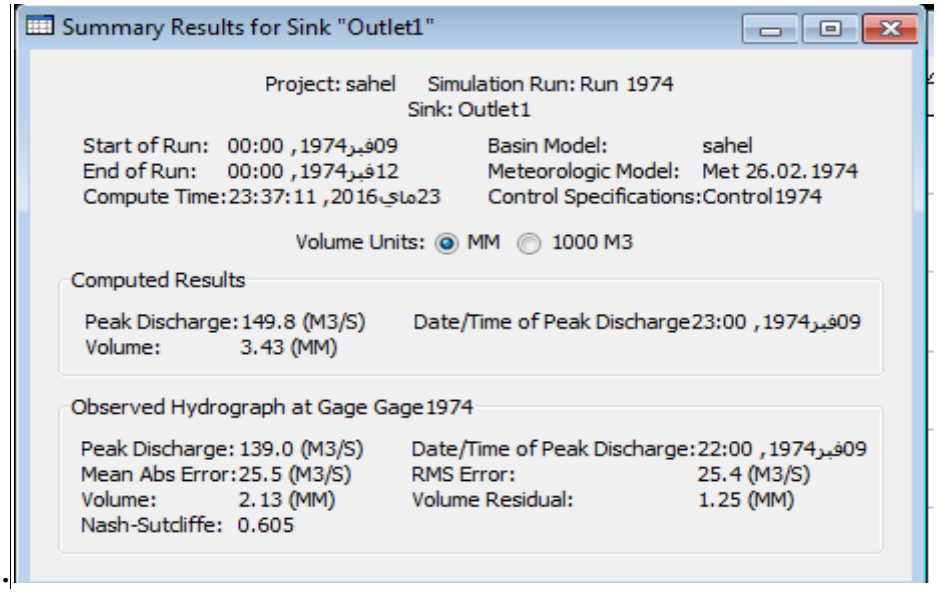


Figure IV-23: Fenêtre représente le volume de la crue simulée. (Averse typeA1)

Time-Series Results for Sink "Outlet1"

Project: sahel Simulation Run: Run 1974
Sink: Outlet1

Start of Run: 00:00 ,1974فبر09 Basin Model: sahel
End of Run: 00:00 ,1974فبر12 Meteorologic Model: Met 26.02.1974
Compute Time: 23:43:15 ,2016ماي23 Control Specifications: Control1974

Date	Time	Outflow (M3/S)	Obs Flow (M3/S)
1974فبر09	00:00	0.0	0.0
1974فبر09	01:00	0.1	0.0
1974فبر09	02:00	0.4	0.0
1974فبر09	03:00	1.0	1.5
1974فبر09	04:00	2.3	3.0
1974فبر09	05:00	4.3	5.0
1974فبر09	06:00	7.1	6.2
1974فبر09	07:00	10.8	9.4
1974فبر09	08:00	15.9	12.0
1974فبر09	09:00	23.0	16.0
1974فبر09	10:00	32.7	18.0
1974فبر09	11:00	45.4	19.9
1974فبر09	12:00	59.6	29.0
1974فبر09	13:00	73.6	39.0
1974فبر09	14:00	86.7	50.0
1974فبر09	15:00	98.9	60.0
1974فبر09	16:00	110.2	71.0
1974فبر09	17:00	120.4	81.0
1974فبر09	18:00	129.3	98.0
1974فبر09	19:00	136.4	111.0
1974فبر09	20:00	142.0	115.5
1974فبر09	21:00	146.1	125.0
1974فبر09	22:00	148.7	139.0
1974فبر09	23:00	149.8	137.9
1974فبر10	00:00	149.5	136.0

Figure IV.24: Fenêtre variation temporelle de donnée de précipitations brutes et les résultats de précipitations nettes et les débits simulés. (Averse typeA1)

Evénement	Averse	Paramètres calibrés			Résultats de simulation					
					QP			V		
		Ia	Cn	T_{LOG}	obs	sim	dif	Obs	Sim	dif
1974	1	2	90	405	139	149	6.71	2.13	3.43	37.9
	A1	2	90	405	139	166	16.2	2.13	3.43	37.9
	2	2	90	405	139	182	23.62	2.13	3.43	37.9
	3	2	90	405	139	184	24.45	2.13	3.43	37.9

Tableau IV-2. Résultats de simulation : Formalisme lag

NRCS CN : Natural Ressource 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)

Sim. : Simulé Obs. : observé

IV-4. Calibrage du modèle (CRUE 21DEC 1980)

IV4-1.Les Résultats de la 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 trouver dans les tableaux suivants :

la calibration par le formalisme lag:

Evénement	Averse	Paramètres calibrés			Résultats de simulation			
		Ia	cn	T_{LOG}	QP		V	
					obs	sim	Obs	Sim
1980	1	2	90	388.96	97	97.1	24.29	17.71
	A1	2	90	355.40	97	97	24.29	19.81
	2	2	89	469.27	97	96.6	24.29	17
	3	2	90	466.37	97	97	24.29	16.84

Tableau IV-3 : Résultats détaillés de la calibration en utilisant le formalisme de l'hydrogramme Lag comme fonction de transfert :

Les graphes de calibration

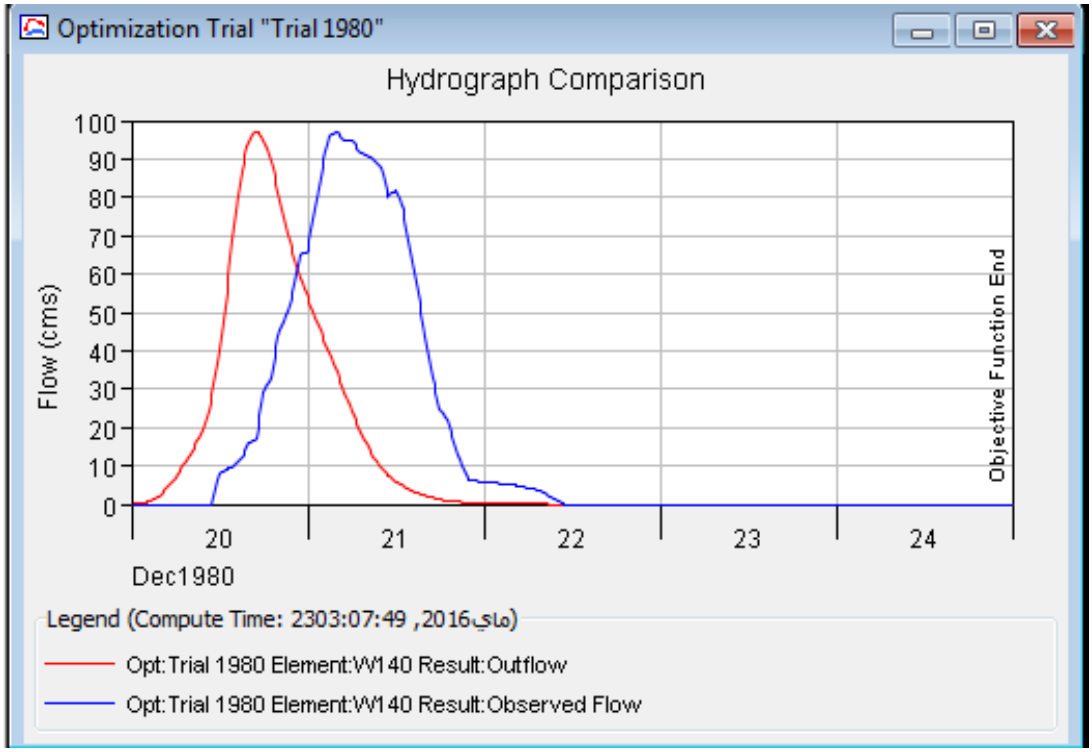


Figure IV-25: (Averse type1)

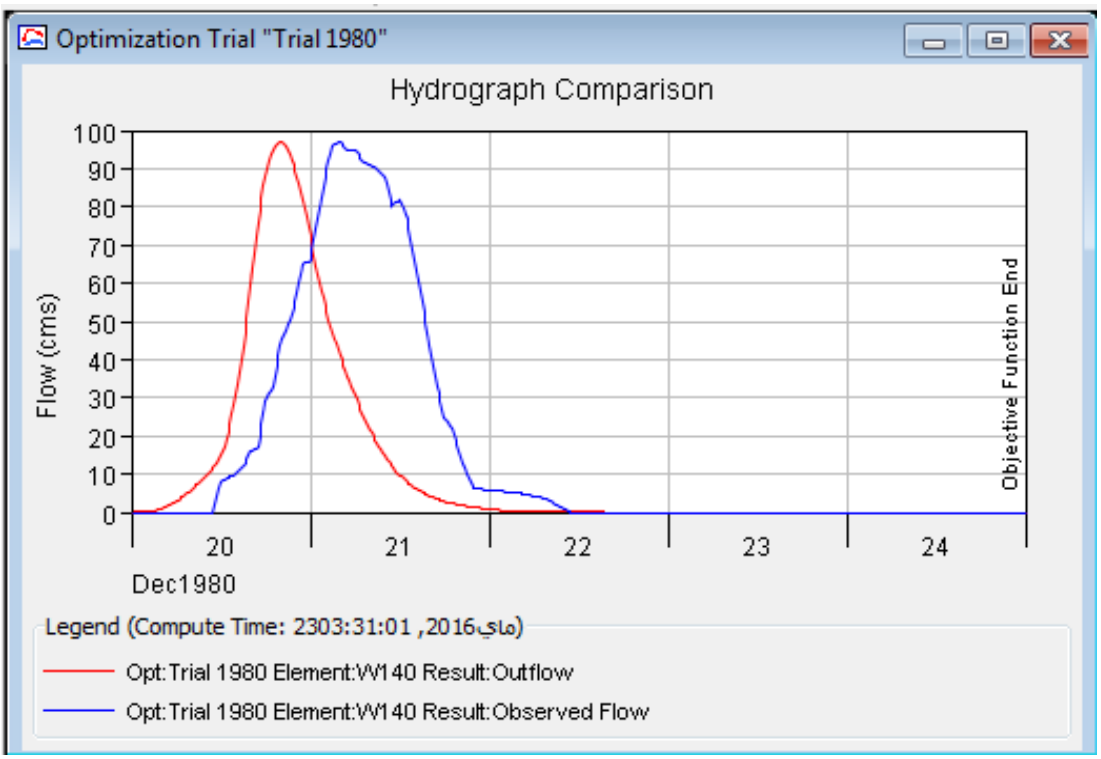


Figure IV-26: (Averse type2)

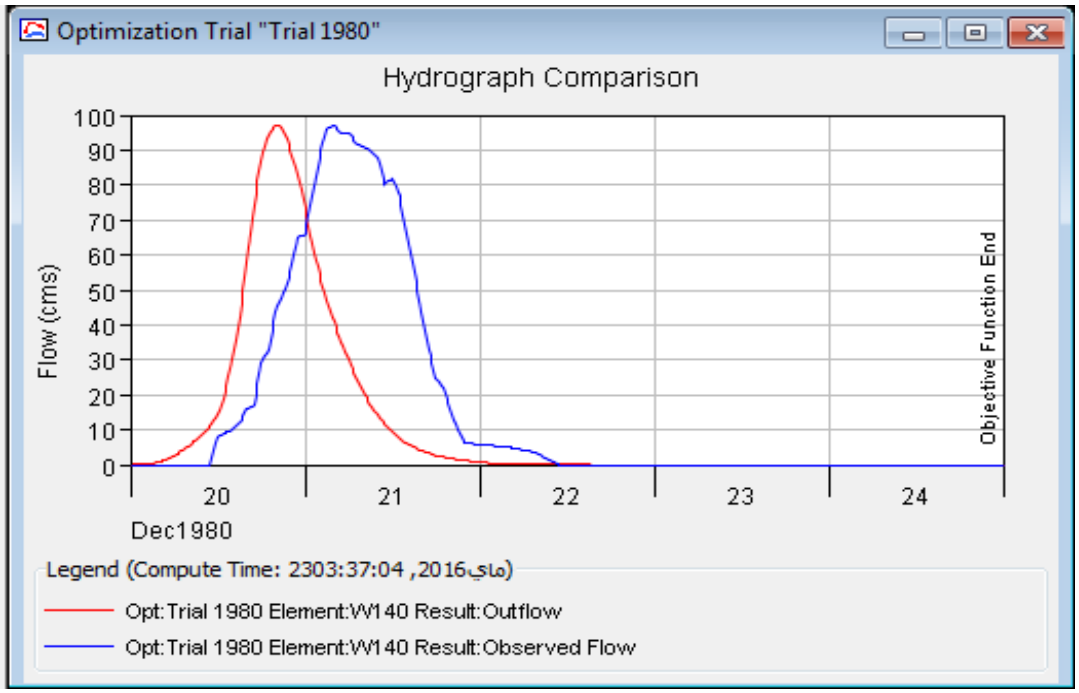


Figure IV.27: (Averse type3)

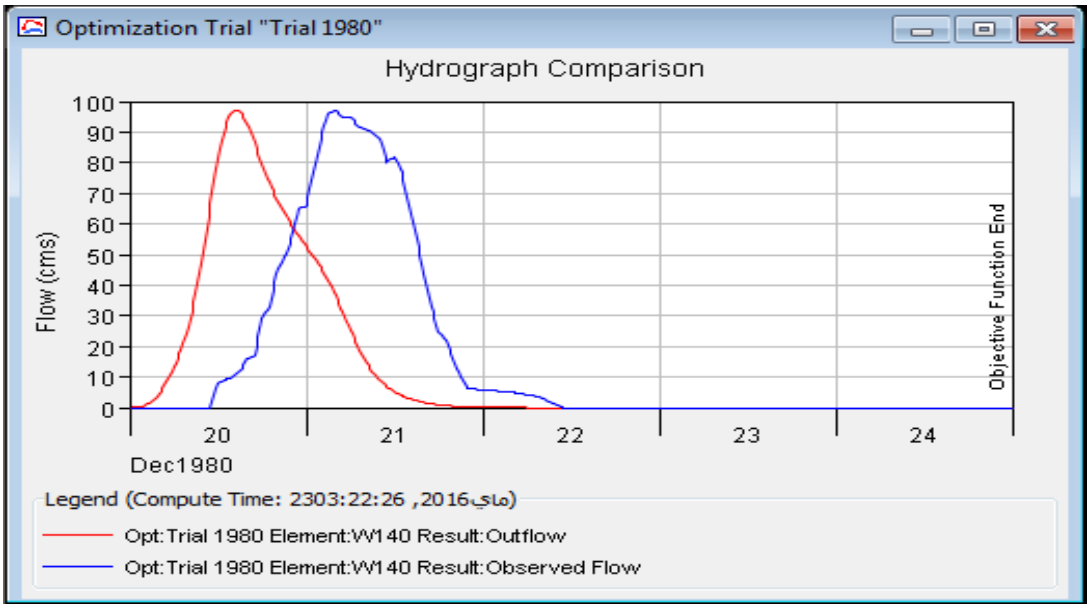


Figure IV-28: (Averse typeA1)

IV-5. Calage et validation du modèle hydrologique

Le calage sera effectué à l'aide des pluies et débits observés en décembre 1975. Le débit maximal instantané enregistré le 22 décembre 1975.

Les paramètres estimés auparavant sont à optimiser de manière à faire correspondre convenablement les hydrogrammes observés et simulés. « Le but du calage est de trouver le jeu

de paramètres qui permet la reproduction la plus fidèle possible du fonctionnement du système étudié » [Kreis, 2004].Les paramètres à caler sont les suivants

Modèle de bassin versant	Paramètres à caler
Fonction de production	- Curve Number (CN)
Fonction de transfert	Basin lag (tlag)

Tableau IV-4: Paramètres de calage

Un modèle calé permet de reproduire fidèlement les événements avec lesquels a été effectué le calage,mais pas nécessairement tous les événements [Kreis, 2004]. Avant de pouvoir exploiter le modèle, il doit être validé à l'aide d'une autre crue.

La validation des paramètres issus du calage sera effectuée à l'aide des pluies et débits observés en décembre1975 . « La validation consiste à tester la performance du modèle en utilisant le jeu de paramètres obtenu par calage pour simuler un événement observé différent de ceux utilisés pour le calage » [Kreis, 2004.[Le modèle est validé, si les paramètres obtenus par calage permettent de reproduire l'événement de validation. Il peut alors être exploité pour simuler des événements variés.

Les débits de pointe des crues de calage et de validation sont identiques, . Il aurait été préférable de valider le modèle avec la crue d décembre 1975 dont le débit maximal instantané enregistré est .Cependant nous ne disposons pas des données de débits d'exhaure en1975, et ne pouvons donc pas utiliser cet événement pour la validation.

IV-5-1. 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 1975 est censé améliorer l'efficience du modèle.

En appliquant le jeu de paramètre défini dans le tableau III.13 aux événements nous arrivons aux résultats suivants :

paramètres	**Ia (mm)**	**CN**	**T lag**	**imperméabilité%**	**Type d'averse**
Valeurs optimisés	2	90	466.37	10	3

Tableau IV-5: le jeu de paramètres optimisé utilisé pour la validation du modèle HEC-HMS sur le bassin du Soummam- sahel

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 Giandothi, 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'hydro gramme de crues pour les différents évènements sont les suivants

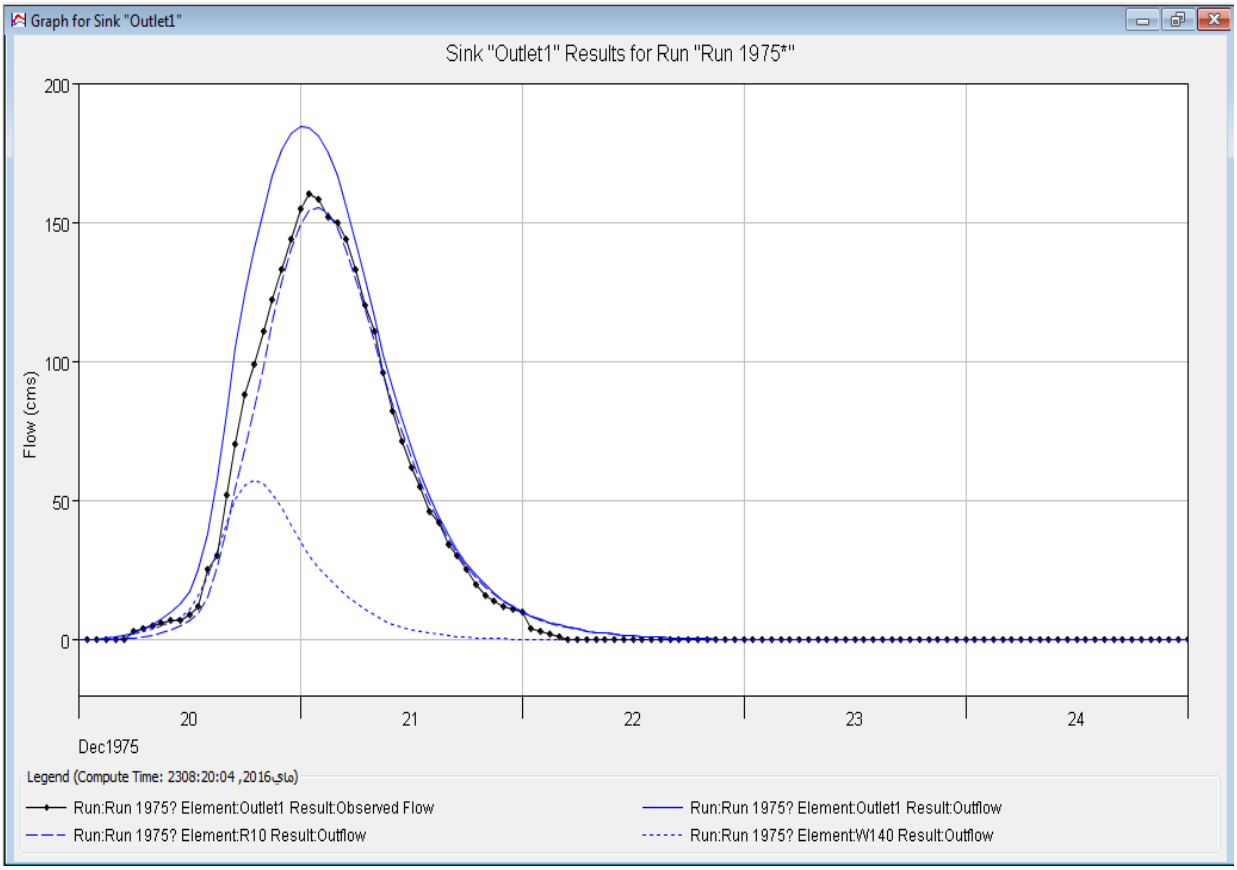


Figure IV-29. Hydrogrammes des crues des évènements après validation du modèle

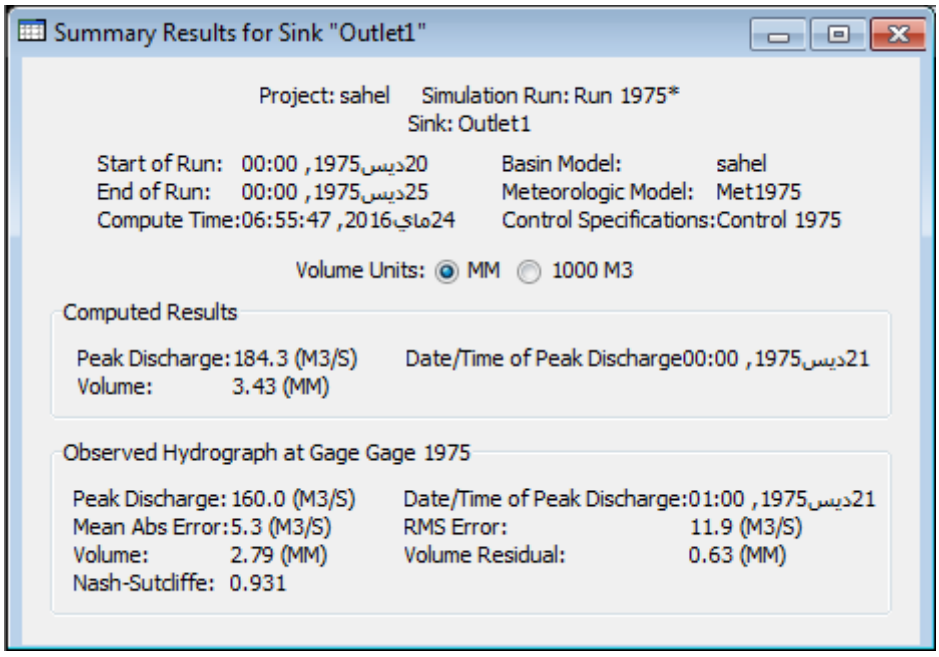


Figure IV-30. Fenêtre représente le volume de la crue simulée

IV-5-2Critère de performance

Les objectifs principaux de la procédure de calage des modèles vont être de:

- Reconstituer ‘correctement’ la forme générale de l’hydrogramme observé ;
- Arriver à un ‘bon’ accord entre les débits de pointe calculés et observés ;
- Obtenir un bilan ‘convenable’ sur les volumes.

Afin de quantifier le degré d’accomplissement de ces différents objectifs, des critères de performance sont utilisés.

Pour le calage, le critère de performance retenu est le critère de NASH. Ce dernier donne une appréciation globale de la reconstitution de la crue.

La formulation du critère de Nash est la suivante :

$$\mathbf{NASH=1}\frac{\sum(\boldsymbol{Qsim-Qabs})\mathbf{2}}{\sum\boldsymbol{Qabs-Qabs})\mathbf{2}}\mathbf{=0.931}$$

Ce critère vaut 100% pour une reconstitution parfaite de la crue et s’annule pour le modèle dit à toute heure, le débit calculé est égal au débit moyen de la crue. Ainsi, il indique si la simulation issue du modèle est meilleure qu’une estimation qui donnerait le débit moyen sur toute la période de calage.

Comme il utilise les carrés d’écarts, il est sensible à la reconstitution des forts débits. Nous considérons comme mauvais un Nash inférieur à 80%.

IV-6-2. Exploitation du modèle hydrologique

Une fois le modèle calé et validé, il pourra servir à simuler les crues de projet à partir des pluies de projet synthétiques de période de retour 10, 20, 50 et 100 ans. Ces hydrogrammes de projet seront ensuite injectés dans le modèle hydraulique .

Conclusion générale

La mise en service de la modélisation comme outil pour la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants, et d'aide à la décision est l'une des meilleures méthodes reconnues à la fois simple et fructueuse.

Dans cette optique, la présente étude s'intéressait premièrement à appliquer une combinaison modulaire appropriée du modèle HEC-HMS au bassin versant de l'oued Sahel. Ensuite, après la calibration du modèle, il doit être validé sur au moins l'un des événements présélectionnés.

En revanche, avant de procéder à la réalisation de cette objectif, il nous a été d'une grande utilité de passer en revue l'historique de modélisation du bassin en question et la description du modèle HEC-HMS et de sa combinaison modulaire choisie, puis l'étude hydro-géomorphologique. Pour la première partie, elle expose les différentes phases de modélisation pour les quatre études sans oublier les problèmes que leurs auteurs ont confrontés, en l'occurrence la mauvaise qualité et quantité des données, la sur-paramétration et l'hétérogénéité spatio-temporelle des pluies, ensuite cette partie décrit le modèle HEC-HMS. La deuxième quant à elle, visait à déceler les propriétés spéciales du bassin versant, telles que : la morphologie du bassin versant, la géologie et les problèmes d'hétérogénéité spatio-temporelle des précipitations,…etc. Les conclusions tirées de cette étude étaient décisives dans la compréhension et l'anticipation des résultats de la modélisation.

L'étape de la modélisation a été précédée par la détermination de Curve numbre (CN) a partir des cartes d'occupation du sol et type de sol conformes aux prescriptions du NRCS, et la présélection des événements de simulation. Une fois fini, on a commencé par la calibration du modèle pour étudier la sensibilité de notre contexte aux formalismes de la fonction de transfert et aux types d'averses de projet.

Les résultats obtenus de point de vue fonction objective ont permis de classer l'averse NRCS type 1 et le formalisme de Lag comme les mieux appropriés au bassin versant de Sahel, et d'éliminer les événements faute de leurs valeurs de fonctions objectives.

Une fois le modèle calé et validé, il pourra servir à simuler les crues de projet à partir des pluies de projet synthétiques de période de retour 10, 20, 50 et 100 ans.

A long terme, on envisage pour les études postérieures de soulever des défis beaucoup plus enthousiastes comme par exemple :

Conclusion générale

Après avoir validé complètement le modèle HEC-HMS sur le bassin versant du Sahel, on peut l'utiliser pour la protection contre les inondations, en utilisant ce qu'on appelle la modélisation à temps réel qui repose sur le principe de reconstitution du débit à l'exutoire pour chaque pas de temps pour lequel la donnée pluie est mesurée, par conséquent on peut reconstituer l'hydrogramme d'une crue au fur et à mesure de l'enregistrement de la hauteur de pluie. Ce système d'alarme s'avère plus efficace que celui qui se base sur la mesure de la hauteur d'eau dans la rivière en amont du bassin versant.

Chapitre I

Description de la zone d’étude

CHAPITRE III

PRESENTATION DU MODELE HEC HMS

Liste des figures

Figure I-1 : La situation de la zone d'étude par rapport au bassin hydrographique de l'Algérie du nord…….3
Figure I-2 : Carte des sols du bassin versant de la Soummam ……4
Figure I.3 : Situation de la zone d'étude par rapport aux wilayas limitrophes……4
Figure I.4 : Carte du relief du bassin versant de la Soummam……6
Figure I.5 : Carte géologique du bassin versant de la Soummam ……...7
Figure I.6 : Etages bioclimatiques du bassin de la Soummam ……10
Figure I.7 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Soummam ……..11
Figure III .1 : Classification des modèles hydrologiques ……22
Figure III-1: L'enchainement d'intervention des différentes composantes dans la structure événementielle du modèle HEC-HMS ……27
Figure III. 2 : Les distributions temporelles 24h des quatre averses de projet de la NRCS……..35
Figure III- 3 : La notion d'hydrogramme unitaire et ses caractéristiques fondamentales…….40
Figure III- 4 : L'illustration de la méthode de la récession exponentielle, d'après) ……43
Figure IV-1: Fenêtre bassin versant Oued Sahel et ses sous bassins……..……...49
Figure IV-2 : Fenêtre de l'interface du HEC-HMS représente le Bassin versant et leurs sous bassins……....50
Figure IV-3 : Graphique de l'écoulement superficiel en fonction de la précipitation journalière par la méthode du SCS Curve Number.....……52
Figure IV-4 : Fenêtre de donnée de Curve Number (CN) et Imperméabilité……..…….53
Figure IV-5 : Fenêtre représente Lag time……..…….....53
Figure IV-6 OPTION……...…….…….54
Figure IV-7: Fenêtre de surface du sous bassin calculé parHEC- GeoH…….……55
Figure IV-8 : Fenêtre de caractéristiques géométriques des talwegs et cours d'eau…..……...55
Figure IV-9 : Fenêtre de temps de démarrage de la crue et l'intervalle de temps……..…...56
Figure IV-10 :Fenêtre de l'intervalle de temps des précipitations (pas de temps)……....57
Figure IV-11 : Fenêtre représente l'annéedes précipitations. (Intervalle de temps)……..…57
Figure IV-12 : Fenêtre de donnée de précipitations. Répartition temporelle (type I)……...58
Figure IV-13 : Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simule.Sous Bassin W140 (Averse type1)……...59
Figure IV-14 : Fenêtre représente le volume de la crue simulée. (Averse type1)… ……. 59
Figure IV.15 : Fenêtre variation temporelle de donnée de précipitations brutes et les résultats de précipitations nettes et les débits simulés. (Averse type1) …….…….….60

Figure IV-16: Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simule. (Averse type2)……..….61
Figure IV-17: Fenêtre représente le volume de la crue simulée.(Averse type 2)……..…61
Figure IV-18: Fenêtre représente le volume de la crue simulée.(Averse type 2) ……....62
Figure IV-19: Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simule. (Averse type3)……...63
Figure IV-20: Fenêtre représente le volume de la crue simulée. (Averse type3) ……..…....63
Figure IV.21: Fenêtre variation temporelle de donnée de précipitations brutes et les résultats de précipitations nettes et les débits simulés. (Averse type3)…….…...64
Figure IV-22: Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simule(Averse typeA1) ….…....65
Figure IV-23: Fenêtre représente le volume de la crue simulée. (Averse typeA1)……..….65
Figure IV.24: Fenêtre variation temporelle de donnée de précipitations brutes et les résultats de précipitations nettes et les débits simulés. (Averse typeA1) ……..…..66
Figure IV-25: (Averse type1) ……..69
Figure IV-26: (Averse type2) ……..69
Figure IV.27: (Averse type3) ……...…70
Figure IV-28: (Averse typeA1)…….…….70
Figure IV-29. Hydrogrammes des crues des évènements après validation du modèle……72
Figure IV-30. Fenêtre représente le volume de la crue simulée……73

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Moyennes mensuelles des précipitations de la région de Bejaia en 2010 9
Tableau- I-2 : Températures minimales et maximales et leurs moyennes mensuelles de la région de Bejaia en 2010 10
Tableau -I-3 : Principaux affluents de l'Oued Soummam 12

Tableau -III-1 : La relation pluie antérieure et type de CN pour la méthode NRCS CN ……...37

Tableau -III-2 : Les capacités initiales i0 et finales if d'infiltration en fonction des classes de solsdéfinies par le NRCS (D'après Hillel, 1974)…….....…38
Tableau -III- 3: Les valeurs usuelles de l'abstraction initiale Ia et du coefficient CN (D'après SAGE INGENIERIE in)…….……..39

Tableau IV-01 : Données de base des sous-bassins versants……..52

Tableau IV-2. Résultats de simulation : Formalisme lag……...67

Tableau IV-3 : Résultats détaillés de la calibration en utilisant le formalisme de l'hydrogramme Lag comme fonction de transfert …….……..…68

Tableau IV-4: Paramètres de calage…….…...…71

Tableau IV-5: le jeu de paramètres optimisé utilisé pour la validation du modèle HEC-HMS sur le bassin du Soummam- sahel…….…71

Conclusion générale

REFRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1]AMEL AZZI , Analyse des changements climatiques dans le bassin versant de la Soummam :réflexion en termes de conséquences hydrologiques. Université HOUARI BOUMEDIEN2013.

[2]PERRIER ,Défense contre les eaux nuisibles de l'oued Soummam mémoire préliminaire, PARIS 1964.

[3] CHARIFI .S: Application du modèle hydrologique GR2M sur les le bassin versant de la Soummam et de l'Isser. Mémoire de magistère. Ecole National polytechnique. Alger.2006.

[4]AMOUR abdellh, caractérisation des crues pluviales dans les sous le bassin versant de la Soummam .

[**5]COYEN Bellier** ,La météo et ses secrets , Edition Fernand Nathan France ,1982 Technologie des eaux résiduaires ,production ,collecte ,traitement et analyse des eaux résiduaires, Edition Springer- verlag PARIS.

[6]A.GILLOT-PETRE, La météo et ses secrets, Edition Fernand Nathan France,1982

[7]Technologie des eaux résiduaires production , collecte, traitement et analyse des eaux résiduaires, Edition Springer-verlag PARIS.

[8] VIZITERV,GAUFF, Etude d'approvisionnement en eau potable et industrielle des agglomérations du couloir AKBOU-BEJAIA à partir du Barrage Tichi-HAF ,rapport de synthèse de la collecte des données 1987.

[9]Résultats météorologique, station météorologique de Bejaia,2002.

[10]NALOUF FARID, Estimation du bilan hydrologique à l'échelle du bassin versant de la Soummam.

[**11]BESSOUH Abdellah et DJADDA Sami** ,Estimation du bilan particulière en milieu estuarien de bassin versant de la Soummam .mémoire de fin de cycle.

[12]DHWB :Etude de la protection de la ville de Bejaia contre les inondations(Rapport de la mission C).BUREAU d'etude : INGEROP?2006.

[13]C.GOMELLA,H.GUERREE ,Le traitement des eaux publiques , industrielles et privées ,Edition EUROLLES 1978.

[14]H.GUERREE,C.GOUMELLA , les eaux usées dans les agglomérations urbaines ou rurales, Edition EYROLLES PARES,1982.

[15] Direction de la planification et de l'aménagement de territoire, Annuaire statistique de la wilaya de Bejaia ,Résultats 2003.

[16] POLLUTION de la Soummam ,rapport service d' environnement, 1997.

[**17]S.HEBERT,S.LEGERE**, Suivi de la qualité de l'eau des rivières et petit cours d'eau ,Québec, Octobre 2000.

[18]J.LEROY, La pollution des eaux, Edition Paris, 1999.

[19]G de MARSILY ,Hydrogéologie Quantitative, Edition MASSON,1981.

[**20]AHBARI Abdellatif ,(Anné2013),**Le bassin versant de la Soummam .

[21] MAME Samir,(Anné 2014);Protection de la ville de Beni-ounif.

[22]MEFTAH Abderrahmane,(Promotion:2014),modélisation pluie-débit par le logiciel HIC-HMS ces de BV OUDE CHELIFF-GHRIB, Mémoire Master.

[**23**] **BOUZIANE A.** (2009) : Cours de modélisation hydrologique. École MOHMMADIA d'ingénieurs, Université Mohmmed V, Rabat. 120p.

[**24**] **Chang C.W.** (2009) : Application of SCS CN Method in HEC-HMS in ShihMen Watershed - Simulation of Rainfall-Runoff Hydrologic Model. Electronic Theses, Treatises and Dissertations, Paper 3900. 96p.

[**25**] **Musy A. et Higy C.** (1998) : Hydrologie appliquée, Edition *H*G*A*, Bucarest,. ISBN:

[**26**] **Motevalli S., Hosseinzadeh M., Esmaili R., Derafshi K. et Gharehchahi S.** (2012) : Assessing the Effects of Land useChange on Hydrologic Balance of Kan Watershed using SCS and HEC-HMS Hydrological Models – Tehran, IRAN.Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 6(8): 510-519, 2012. ISSN 1991-8178.

[**27**] **United States, Department of Agriculture** (1986) : Urban hydrology for small watersheds, Technical Release 55 (TR-55). (Second Edition). Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division. 160p.

[**28**] **USACE** (1994) : Flood-Runoff Analysis Engineering Manuel. N° 110-2-1417, Washington

[**29**] **USACE** (2000) : Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual version 3.5. HydrologicEngineering Center. 138 p.

[**30**] **TRAMBLAY Y.** (2012) : Modélisation des crues dans le bassin du barrage Makhazine. Rapport interne de l'ABH deLoukous. Maroc. 34p.

Résumé :

Notre étude représente une contribution à l'élaboration d'une méthodologie de travail et de planification pour la prévision du risque par l'utilisation de la modélisation hydrologique et la simulation du comportement pluie-débit.

Notre modélisation (pluie-débit) est appliquée à une partie du bassin versant de la Soummam qui est « Oued SAHEL » en utilisant le logiciel HEC-HMS qui permet d'obtenir des informations sur le fonctionnement du système hydrologique du bassin versant.

Abstract :

Our study representsa contribution to the development of a methodology of work and planning for risk prediction by the use of hydrological modeling and simulation of rainfall-runoff behavior.

Our modeling (rainfall-runoff) is applied to a part of the watershed of Soummam is "Oued Sahel" using the HEC-HMS software that provides information about the functioning of the hydrological system of the watershed.

ملخص

تمثل دراستنا بمساهمة في تطوير منهجية العمل والتخطيط للتنبؤ بالمخاطر عن طريق استخدام النمذجة الهيدرولوجية ومحاكاة السلوك الأمطار والسيول.

لدينا نماذج (الأمطار والسيول) يتم تطبيقها على جزء من المجمع المائي Soummam هو "وادالساحل" باستخدام برنامج HEC-HMS أن يوفر معلومات حول أداء النظام الهيدرولوجي لمجمعات المياه.

Sommaire

Introduction générale……...1

CHAPITRE I : DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

I.1. Introduction …..... 2

I.2. Situation géographique 2

I-3- Les sols……...……..3

I.4. Découpage administratif 4

I.5. Paramètres du relief 5

I.6. La géologie 6

I.7. Ecologie de la Soummam 8

I.8. Climatologie 8

I.8.1. Les précipitations 8

I.8.2. La température de l'air 9

I.8. Ressources et potentialités hydriques 10

I.8.1. Ressources souterraines 10

I.8.2. Ressources superficielles..... 11

I.9. Le couvert végétal 12

I.10. Origine de la pollution de l'Oued Soummam 13

I.10.1. Pollution d'origine urbaine 13

I.10.2. Pollution d'origine industrielle 14

I.10.3. Pollution d'origine agricole 15

I.10.4. Pollution des eaux souterraines 16

CHAPITRE II: APERÇU GENERAL SUR LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

Introduction……18

Π.1 La modélisation hydrologique……...……18

Π.2 Bilan hydrologique d'un bassin versant**…**…….19

Π.3 Modèles hydrologiques de bassin versant……..19

Π.4 La modélisation pluie-débit……20

Π.4.1 Définitions……..…….……20

Π.5 Les modèles hydrologiques…….....……21

Π.6 Classification des modèles hydrologiques…….……22

Conclusion……24

CHAPITRE III PRESENTATION DU MODELE HEC HMS

III-1- La description du modèle HEC-HMS 26

III-2-Les caractéristiques générales du modèle:..... 26

III-3. Le processus de fonctionnement:..... 26

III-4. L'organisation du modèle:..... 28

III-5- La structure du modèle HEC-HMS choisie:..... 34

III-6- Le type de modélisation : événementielle:..... 34

III-7- Le module météorologique : les averses NRCS:..... 35

III-8. La fonction de production : la NRCS CN:..... 36

8.1. Le concept de base:..... 36

8.2. Les variables:..... 38

8.3. Les paramètres:..... 38

III-9. Les fonctions de transfert : l'hydrogramme unitaire de la NRCS et de Clark:..... 39

9.1. L'hydrogramme unitaire:..... 40

9.2. L'hydrogramme unitaire de la NRCS :..... 41

9.3. L'hydrogramme Unitaire de Clark..... 42

III- 10_ Le débit de base : la récession exponentielle:..... 42

10-1- Le concept de base:..... 42

10.2. La variable..... 43

10.3. Les paramètres:..... 43

III-11. Les avantages et les limites du modèle:..... 44

III-12- HEC-HMS : le modèle de simulation hydrologique:..... 44

12-1- Les avantages:..... 44

12.2. Les limites..... 45

III-13- La combinaison modulaire choisie:..... 45

13-1- Les avantages:..... 45

13-2- Les limites: 46

CHAPITRE IV : METHODOLOGIE ET APPLICATION DU HEC-HMS

Introduction ..... …48

IV-1- Le processus de fonctionnement : 48

IV-1-1 FONCTIONNALITES ..... .48

IV-2-1 Les données nécessaires à l'application de simulation avec HEC-HMS :. 51

IV-2 Les données de bases d'entré :..... 51

IV-3- Calibration du modèle :..... 57

IV-4-1. La calibration du modèle..... 66

4-1-1.Les Résultats de la calibration: 66

IV-5. Calage et validation du modèle hydrologique ..... …69

IV-5-1. La validation du modèle… ..... ……..……...70

IV-5-2Critère de performance..... 72

IV-6-2. Exploitation du modèle hydrologique ..... .72

CONCLUSION GENERALE.....73