

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique.
Université Abderrahmane Mira de Bejaia



Faculté de Technologie



Département d'Hydraulique

Laboratoire de Recherche en Hydraulique
Appliqué et Environnement

Mémoire de Magister

Présenté par :

BECHROUNE Abdelhakim

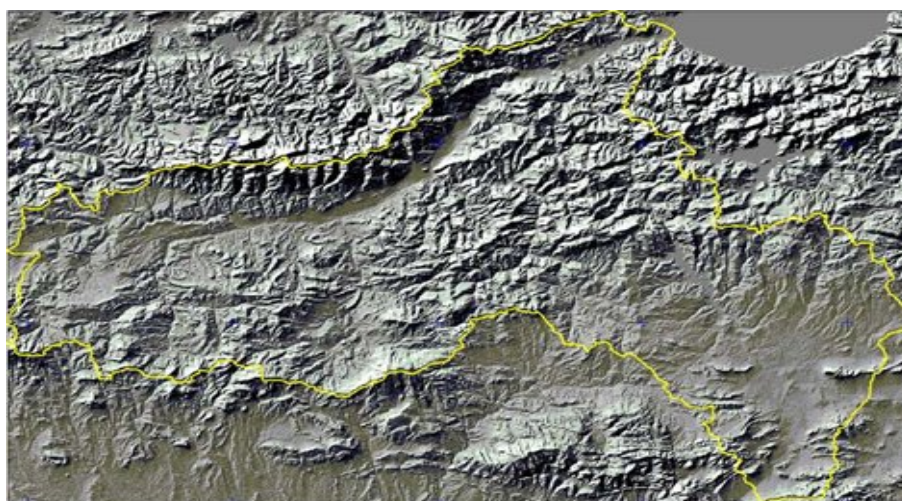
Ingénieur d'Etat en Hydraulique

En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Hydraulique

Option : Hydraulique Générale

Thème :

Elaboration d'une base de données Hydrologique du Bassin Versant de la Soummam via le modèle hydrologique HEC-HMS



Le Jury :

<u>Président :</u>	<i>Mr M. MAZA : Maître de Conférences – Université de Béjaia</i>
<u>Directeur de Mémoire :</u>	<i>Mme S. BENMAMAR : Maître de Conférences à l'ENP d'Alger</i>
<u>Examineurs :</u>	<i>Mr K. MADANI : Maître de Conférences – Université de Béjaia</i> <i>Mr M. KADRI : Maître de Conférences – Université de Boumerdes</i>
<u>Invité :</u>	<i>Mr A. HAMMOUCHE : Maître assistant – Université de Béjaia</i>

Année Universitaire : 2009/2010

Résumé :

Notre travail s'inscrit dans le cadre de la problématique liée à la lutte contre les inondations dans le bassin versant de la Soummam. Cela, par l'élaboration d'une base de données hydrologiques des caractéristiques physiques et morphométriques du bassin et la simulation du comportement hydrologique de son réseau hydrographique lors des crues.

Ce travail 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 de la transformation pluie-débit.

Dans ce travail, nous avons présenté les étapes de la préparation des données nécessaires à la simulation, cela, tout d'abord par la construction du modèle numérique du terrain, ensuite la détermination d'une base de données des caractéristiques et paramètres du bassin versant et enfin l'application d'un modèle hydrologique, en l'occurrence HEC-HMS, pour la prévision des crues.

Mots clés : Modélisation hydrologique – Inondations – transformation pluie-débit - MNT – SIG – HEC-GéoHMS - HEC-HMS.

Summary :

Our work lies within the scope of the dependent problems has the fight against the floods in the catchment area of Soummam. That, by the development of a hydrological data base of the physical and hydrological characteristics of the basin and the simulation of the hydrological behavior of its hydrographic network at the time of the risings.

This work represents a contribution to the development of a methodology of work and planning for the forecast of the risk by the use of hydrological modeling and the simulation of the behavior of transformation rain-flow.

In this work, we presented the stages of the preparation of the data necessary to simulation, that, first of all by the digital construction of the models of the ground, then determination of a data base of the characteristics and parameters of the catchment area, and finally the application of a hydrological model, in fact Hec-HMS, for the forecast of the risings.

Key words : Hydrological modeling - Floods - transformation rain-flow - DTM – GIS – HEC-GéoHMS - HEC-HMS.

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Allah le clément et le miséricordieux de m'avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce travail.

Je tiens à remercier chaleureusement ma directrice de mémoire Mme. S. BENMAMAR, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, de m'avoir suivi et dirigé tout au long de la réalisation de ce travail, je lui exprime ma reconnaissance pour ses grandes qualités pédagogiques, son encadrement, sa serviabilité, et sa confiance.

Mes vifs remerciements vont à Monsieur le professeur A. Kettab de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire LRS-Eau, et pour tout le matériel qu'il a mit à ma disposition.

J'adresse mes sincères remerciements à messieurs les membres de jury : Monsieur MAZA M. de m'avoir fait l'honneur de présider ma soutenance ; Monsieur MADANI K. et Monsieur KADRI, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant d'être examinateurs de ce mémoire.

J'exprime mes plus sincères remerciements à Monsieur MADANI K. et Mme MAANE de la faculté de Biologie de l'université de Béjaïa, de m'avoir ouvert les portes de leur laboratoire 3BS et de m'avoir facilité l'accès à des données sur le BV de la Soummam.

Je remercie vivement Monsieur ZEROUROU M. et Monsieur Abba A. de la DHW de Béjaïa de m'avoir facilité l'accès à la documentation et aux données sur le BV de la Soummam.

Je remercie les étudiants de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Messieurs : AMZAL Amirouche, GOUDJIL Samir et SEMAOUNE Mansour de m'avoir aidé lors de mes premières utilisations des SIG et de m'avoir facilité mon séjour à Alger.

Je remercie Messieurs HAMMOUCHE A. et Monsieur BEDJOU A. du département Hydraulique de l'université de Béjaïa, de m'avoir aidé lors de mes premiers pas de travail avec les SIG et de m'avoir offert des cartes topographiques de la région de la Soummam.

Qu'il me soit permis de rendre hommage à tous mes enseignants, sans exception, qui ont contribué à ma formation depuis mes études primaires jusqu'à mes études de Magister, qu'ils trouvent tous ici, ma profonde reconnaissance et qu'ils en soient vivement remerciés.

Je remercie chaleureusement mes amis : BACHIR BEY Mustapha, AMOUR Abdallah, AMIROUCHE Mokrane, Lyès, pour leur sympathie et leur soutien moral et matériel tout au long de réalisation de ce mémoire.

Un remerciement spécial va à mes très chers parents, que dieu les garde, et à tout le reste de ma famille de m'avoir soutenu et encouragé tout au long des mes études, surtout pour leur patience, leur sympathie et leur générosité.

Et finalement, je remercie toutes autres personnes qui ont contribués de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Liste des figures

Figure I.1 : Composants d'un modèle	4
Figure I.2 : Schéma fonctionnel du modèle pluie-débit.....	5
Figure I.3: Développement d'un modèle numérique hydrologique à fin prévisionnelles	10
Figure I.4 : Classification des modèles proposée par Singh (1995).....	12
Figure I.5 : La fonction de production du modèle hydrologique CEQUEAU	23
Figure I.6 : La fonction de transfert du modèle CEQUEAU	23
Figure I.7 : Structure simplifiée du modèle SHE.....	25
Figure I.8 : Transfert d'information entre les modules du modèle SHE	26
Figure I-9 : Schéma du modèle ORAGE	27
Figure II.1 : Schéma général du processus de transformation pluie-débit	32
Figure II.2 : Illustration de la méthode des polygones de Thiessen et des isohyètes	48
Figure II.3 : Exemple de la distribution de la Pluie basée sur la fréquence	49
Figure II.4 : Répartition de la précipitation au cours de l'évènement.....	49
Figure II.5 : Importation du modèle de bassin dans HEC-HMS.....	51
Figure II.6 : Modèles de pertes, de ruissellement et des écoulements souterrains	52
Figure II.7 : Modèles de transfert.....	53
Figure II.8 : Spécification du mode d'introduction des données de précipitations	54
Figure II.9 : Fenêtre du modèle météorologique.....	54
Figure II.10 : Fenêtre des Spécifications de contrôle.....	55
Figure III-1 : Position géographique du bassin de la Soummam	60
Figure III-2 : Etages bioclimatiques du bassin de la Soummam	63
Figure III-3 : Carte géologique du bassin versant de la Soummam.....	64
Figure III-4 : Carte des sols du bassin de la Soummam	65
Figure III-5 : Carte du réseau hydrographique du bassin de la Soummam	66
Figure III-6 : Longueur des principaux oueds du bassin	66
Figure III-7 : Profil en long de l'oued Soummam.....	67
Figure III.8 : Carte du relief du bassin versant de la Soummam.....	72
Figure III.9 : Courbe hypsométrique du bassin de la Soummam	74
Figure IV-1 : SIG; un ensemble de couches d'information superposées	82

Figure IV-2 : Fonctionnalités d'un SIG	83
Figure IV-3 : Base de données géographiques BDG	85
Figure IV-4 : Mode de représentation Raster et Vecteur	86
Figure IV-5 : Les deux modes de représentation MNT	90
Figure IV-6 : Sources d'informations d'un M.N.T.....	93
Figure IV-7 : MNT sous forme de grille régulière.....	94
Figure IV-8 : Exemple d'un MNT sous forme de T.I.N.....	94
Figure IV-9 : Exemple d'une surface représentée par grille triangulée.....	95
Figure IV-10 : Surface représentée par des courbes isohypses	95
Figure IV-11 : Les étapes principales de réalisation du MNA.....	98
Figure IV-12 : Exemple de carte scannée en mode trait (<i>Noir & blanc</i>).....	99
Figure IV-13 : Importation de fichier image sous l'interface AutoCadMap & CadOverly	99
Figure IV-14 : Carte topographique à l'échelle 1/25000 importée sous AutoCadMap- CadOverly	100
Figure IV-15 : Les outils de vectorisation du logiciel adOverly 2000i	101
Figure IV-16 : Numérisation des courbes de niveau sous CadOverly 2000i	101
Figure IV-17 : Introduction des altitudes 'z'.....	102
Figure IV-18 : Exportation du fichier sous format « .dxf ».....	102
Figure IV-19 : Conversion du fichier «.dxf » en format «.tab » sous Mapinfo.....	103
Figure IV-20 : Transformations des polygones en de points par vertical Mapper.....	104
Figure IV-21 : Lancement de l'interpolation et choix de maillage TIN.....	105
Figure IV-22 : Différents types de maillage proposés par Vertical Mapper	105
Figure IV-23 : Une partie du MNA du BV de la Soummam en 3 dimensions	106
Figure V-1 : Relation entre le SIG, HEC-GeoHMS et HEC-HMS	108
Figure V-2 : Téléchargement des extensions sous ArcView	109
Figure V-3 : Importation du MNT sur la vue ArcView et découpage de la zone du BV de la Soummam.....	110
Figure V-4 : Fonctions du programme " <i>Terrain Preprocessing</i> "	110
Figure V-5 : Chargement du Grid sur <i>MainView</i>	111
Figure V-6 : MNT corrigé.....	111
Figure V-7 : Direction de l'écoulement	112
Figure V-8 : L'accumulation de l'écoulement	112

Figure V-9 : Définition des cours d'eau	113
Figure V-10 : Segmentation des cours d'eau.....	113
Figure V-11 : Délimitation des lignes de partages	114
Figure V-12 : Polygone des lignes de partage	114
Figure V-13 : Représentation vectorielle des cours d'eau	115
Figure V-14 : Agrégation des lignes de partage	115
Figure V-15 : Définition de l'exutoire.....	116
Figure V-16 : Lancement d'un nouveau projet.....	116
Figure V-17 : Génération du nouveau projet	117
Figure V-18 : Programme traitement des sous bassins.....	117
Figure V-19 : Programme de calcul des caractéristiques des sous bassins.....	118
Figure V-20 : Caractéristiques du BV de la Soummam	118
Figure V-21 : Caractéristiques des sous bassins	119
Figure V-22 : Caractéristiques des cours d'eau.....	119
Figure V-23 : Caractéristiques des centroides des sous bassin.....	119
Figure V-24 : Caractéristiques des chemins d'écoulement.....	120
Figure V-25 : Centroides des cours d'eau principaux.....	120
Figure V-26 : Schématisation du bassin en HMS.....	121
Figure V-27 : Représentation des éléments par la légende HMS.....	121
Figure V-28 : Coordonnées des différents éléments points HMS.....	122
Figure V-29 : Coordonnées des différents connections HMS	122
Figure V-30 : Position du sous bassin d'application (1504).....	123
Figure V-31 : Importation du modèle de bassin sur HEC-HMS.....	124
Figure V-32 : Modèle du bassin.....	125
Figure V-33 : Création de la station météorologique.....	126
Figure V-34 : Visualisation des données de pluie introduites	127
Figure V-35 : Fenêtre du modèle météorologique.....	127
Figure V-36 : Introduction des paramètres «spécification de contrôle»	128
Figure V-37 : Visualisation des résultats de simulation.....	129
Figure V-38 : L'hydrogramme de crue résultant sous forme de graphe et de tableau détaillé.....	129
Figure V-39 : Tableau récapitulatif des résultats.....	130

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Ordre de grandeur du taux de perte constant selon le type de sol.....	34
Tableau II.2 : Diverses informations à connaître pour chaque élément du bassin	40
Tableau II.3 : Les valeurs minimales et maximales des modèles acceptées par le HEC-HMS	45
Tableau III.1 : La numérotation des bassins de l'Algérie d'après le service A.N.R.H.....	60
Tableau III.2 : Paramètres hydrographiques du bassin de la Soummam	69
Tableau III.3 : Caractéristiques du bassin de la Soummam.....	74
Tableau III.4 : Estimation des eaux souterraines dans le bassin de la Soummam.....	75
Tableau III.5 : Potentialités en eaux superficielles du bassin de la Soummam.....	75
Tableau III.6 : Caractéristiques des barrages du B.V Soummam	75
Tableau III.7 : Mobilisation de la ressource en eaux souterraines.....	76
Tableau III.8 : Stations de mesures hydrométriques	77
Tableau III.9 : Stations de mesures pluviométriques	77



Sommaire



Sommaire

Introduction	1
Chapitre I :	
Aperçu bibliographique sur la modélisation hydrologique	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Définitions	3
I.2.1 Le modèle	3
I.2.2 La modélisation hydrologique.....	4
I.2.3. Le fonctionnement du modèle pluie-débit.....	5
I.3. Principes de la modélisation	6
I.3.1 Développement d'un modèle.....	7
I.4. Objet des modèles hydrologiques	10
I.4.1. La prévision	11
I.4.2. La simulation	11
I.4.3. Evaluation d'impact.....	11
I.4.4. Le contrôle.....	11
I.5. Classification et typologie des modèles hydrologiques.....	11
I.5.1. Classification.....	11
I.5.2. Différenciations entre les approches des modèles	12
I.6. Présentation de quelques modèles hydrologiques.....	19
I.6.1. Modèles déterministes.....	19
I.7. Choix d'un modèle hydrologique.....	28
I.8. Conclusion	30
Chapitre II :	
Présentation du modèle hydrologique HEC-HMS.....	31
II.1. Introduction.....	31
II.2. Principes généraux	31
II.3. La Modélisation sous le HEC-HMS	32
II.3.1. Modélisation du bassin versant	33
II.3.2. Modélisation de la météorologie	46

II.3.3. Les spécifications particulières de contrôle	50
II.4. Réalisation de la simulation avec le HEC-HMS.....	50
II.4.1. Préparation des entrées du modèle de bassin.....	51
II.4.2. Modélisation du bassin.....	52
II.4.3. Modèle météorologique	53
II.4.4. Paramètres de contrôle.....	55
II.4.5. Exécution de la simulation et visualisation des résultats	55
II.4.6. Le calage du modèle.....	56
II.5. Conclusion.....	57
Chapitre III :	
Présentation des caractéristiques du bassin versant de la Soummam.....	59
III.1. Introduction.....	59
III.2. Définitions	59
III.3. Situation géographique du bassin de la Soummam.....	59
III.4. Aspect socio économique de la région.....	60
III.5. Le climat de la région	61
III.5.1 Climat littoral.....	61
III.5.2 Climat de l'Atlas tellien	61
III.5.3 Climat des hautes plaines telliennes	62
III.6. Couvert végétal.....	63
III.7. La Géologie	63
III.8. Les sols	65
III.9. Réseau Hydrographique.....	66
III.9.1. Description de l'oued de la Soummam.....	67
III.9.2. Classification du chevelu hydrographique.....	68
III.9.3. Le degré de développement du réseau	68
III.10. Caractéristiques physiques et morphométriques	70
III.10.1. Paramètres morphométriques	70
III.10.2. Paramètres du relief	72
III.11. Les potentialités en eau dans le bassin de la Soummam	74
III.11.1. Les eaux souterraines	74
III.11.2. Eaux superficielles.....	75

III.12. Mobilisation de la ressource en eau.....	75
III.12.1. Eaux superficielles (Barrage et retenues collinaires).....	75
III.12.2. Eaux souterraines.....	76
III.13. La météorologie.....	76
III.13.1. Pluviométrie.....	76
III.13.2. Evapotranspiration.....	76
III.14. Réseau hydro-pluviométrique.....	76
III.14.1. Stations de mesures hydrométriques.....	77
III.14.2. Stations de mesures pluviométriques.....	77
III.15. Conclusion.....	78
Chapitre IV :	
Elaboration du modèle numérique de terrain du bassin versant de la Soummam	80
IV.1. Introduction.....	80
IV.2. Présentation des SIG.....	80
IV.2.1. Définition.....	80
IV.2.2. Mise en œuvre des SIG.....	81
IV.2.3. Principe de fonctionnement.....	82
IV.2.4. Fonctionnalités du SIG.....	82
IV.2.5. Les composantes d'un SIG.....	84
IV.2.6. Modèles de représentation des données dans un SIG.....	86
IV.2.7. Types des SIG.....	87
IV.2.8. Intérêts des SIG.....	87
IV.2.9. Questions auxquelles peuvent répondre les SIG.....	88
IV.3. Modèle Numérique de Terrain (MNT).....	88
IV.3.1. Définition.....	88
IV.3.2. Représentation du MNT.....	89
IV.3.3. Les caractéristiques d'un MNT.....	90
IV.3.4. Acquisition de données.....	91
IV.3.5. Sources d'informations.....	91
IV.3.6. Les formats d' MNT.....	93
IV.3.7. Précision d'un MNT.....	95
IV.3.8. Utilisations des MNTs.....	96

IV.4. Elaboration du Modèle Numérique d'Altitude du B.V de la Soummam	97
IV.4.1. Construction du MNA.....	97
IV.5. Conclusion	06
Chapitre V :	
Application du modèle HEC-HMS sur le bassin versant de la Soummam.....	107
V.1. Introduction	107
V.2. Préparation des entrées par l'élaboration de la base de données	107
V.3. Schématisation du bassin par Hec-GéoHms	108
V.4. Procédure de schématisation du bassin.....	109
V.4.1. Chargement des extensions sous ArcView	109
V.4.2. Importation du MNT	109
V.4.3. Traitement du MNT	110
V.4.4. Installation du modèle hydrologique	115
V.4.5. Traitement des sous bassins.....	117
V.4.6. Caractéristiques des sous bassins	117
V.4.7. Conversion en HMS	120
V.5. Modélisation du comportement du BV de la Soummam par le HEC-HMS	123
V.5.1. Importation du modèle de bassin dans HEC-HMS	123
V.5.2. Estimation des paramètres théoriques	124
V.5.3. Configuration et exécution de la simulation.....	128
V.5.4. Visualisation des résultats.....	128
V.6. Conclusion.....	130
Conclusion générale.....	131
Références bibliographiques	133

Introduction générale

Introduction générale

L'eau source de vie, elle est l'enjeu de tout potentiel économique considérable. Cette eau qui est indispensable pour le développement de la vie de l'homme sur terre, est parfois la cause de son malheur suite à des situations catastrophiques causées par les effets dévastateurs des inondations.

Les pluies exceptionnelles qui sont particulièrement violentes provoquent des situations d'inondations dont l'origine est l'augmentation du débit des cours d'eau jusqu'à un niveau maximal, causant ainsi le débordement de l'eau sur les rives.

La connaissance du comportement hydrologique du bassin versant et l'étude du comportement physique des cours d'eau révèle donc d'une importance majeure et devient une nécessité actuelle qui permet aux services concernés de mieux maîtriser les apports des cours d'eau, de mieux contribuer ainsi à assurer la sécurité des personnes et de leurs biens.

Les progrès de la recherche sur ce phénomène visent à approfondir et améliorer sa gestion en procédant à l'établissement des mesures de prévention et de prévision. C'est dans ce contexte, que dès les années 1940, les hydrologues se préoccupèrent de développer des modèles de calcul mathématique des relations entre les pluies et les débits générés sur les bassins versants de façon à pouvoir prédire l'impact d'évènements spécifiques sur les écoulements. Si l'usage de ces modèles hydrologiques, traités manuellement à l'origine, demeura longtemps laborieux, l'utilisation de l'informatique a permis de notables progrès dans la conception et le calcul de ces modèles. Aujourd'hui, l'ingénieur ou l'hydrologue s'oriente de plus en plus vers des modèles qui intègrent la composante spatiale vu que les systèmes naturels étudiés sont si complexes qu'il est nécessaire de les représenter schématiquement par des modèles.

L'application de ces modèles spatialisés, nécessite la connaissance de toutes les caractéristiques en tout point d'un bassin versant. C'est pour cela, que leur utilisation est directement liée à la représentation du terrain naturel avec toutes ses informations caractéristiques dans des systèmes bien structurés appelés Systèmes d'Information Géographiques (SIG).

Destinés à rassembler les informations et utilisés pour permettre leur diffusion, les systèmes d'informations géographiques (SIG) sont devenus les outils indispensables à toute entité gérant de l'information. Ces systèmes rassemblent et gèrent des masses importantes d'information et permettent d'avoir ainsi accès à cette dernière en retrouvant les renseignements recherchés ou en indiquant au minimum l'endroit où le support les contenant. Cela fourni ainsi, un outil de travail pouvant être partagé par

l'ensemble des collaborateurs qui ont accès à la totalité de l'information et non uniquement ceux qu'ils les possèdent ou ceux dont ils connaissent l'existence. L'information disponible est alors valorisée car son organisation autorisera une consultation poussée, permettant la réalisation de produits à valeur ajoutée (analyses, calculs, références etc.).

Ces systèmes d'information et leurs produits dérivés sont utilisés comme outils d'aide à la décision permettant l'acquisition, l'archivage, l'analyse et l'affichage des données, par abstraction afin de modéliser le monde réel.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail qui a pour but l'élaboration d'une base de données hydrologiques du bassin versant de la Soummam et la simulation de la transformation pluie-débit sur ce bassin afin de déterminer son comportement hydrologique approprié.

Pour cela, notre travail est structuré en cinq chapitres de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique sur les modèles hydrologiques où nous donnons les définitions des notions du modèles et de la modélisation avec les différentes approches utilisées, comme nous présentons quelques modèles les plus utilisés dans le domaine de la modélisation hydrologique ainsi que des logiciels les plus courants et disponibles dans le domaine public.

Dans le deuxième chapitre, nous nous proposons de décrire le modèle hydrologique HEC-HMS, et de présenter les différents modèles mathématiques qu'il utilise pour le calcul et la modélisation des différents processus du cycle de l'eau.

Dans le troisième chapitre, nous présentons un résumé sur les caractéristiques du bassin versant de la zone d'étude qui est celui de la Soummam.

Au quatrième chapitre, nous entamons les systèmes d'informations géographiques et les modèles numériques de terrain, avec la présentation de toutes les étapes suivies pour l'élaboration du modèle numérique d'altitude du bassin versant de la Soummam.

Enfin, en cinquième et dernier chapitre, nous présenterons une application du modèle HEC-HMS sur le bassin versant de la Soummam, tout en exploitant les informations déterminées, qui sont stockées dans la base de données spatiale élaborée, afin de réaliser la simulation du comportement hydrologique et de déterminer les hydrogrammes de crues possibles à générer suite à des pluies rares à très forte pluviométrie.

A la fin, nous terminons notre travail par la présentation d'une conclusion générale sur le travail réalisé.

Chapitre I :

*Aperçu bibliographique sur la
modélisation hydrologique*

Chapitre I**Aperçu bibliographique sur la modélisation hydrologique****I.1. Introduction**

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable dès que lors on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire, ou à l'une des différentes formes du risque hydrologique. Elle doit pouvoir décrire les différentes étapes de la transformation pluie-débit et en particulier les processus liés à la formation des crues et à l'apparition des étiages. Elle est censée aussi fournir des informations exploitables pour le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, la protection contre les inondations ou pour la gestion hydrologique du bassin versant.

Dans la littérature, il existe de nombreux modèles hydrologiques de bassins versants ayant chacun leurs spécificités et leur domaine d'application. Une fois le modèle choisi, il faut évaluer sa capacité à représenter la réalité. Ceci se fait le plus souvent en comparant les résultats du modèle avec les observations de la réalité, dans une étape de modélisation appelée calage du modèle.

Dans ce chapitre, nous allons définir la modélisation hydrologique et ses principes, présenter les différents types d'approches des modèles, leur mise en œuvre, ensuite présenter quelques modèles à réputation prononcée dans le domaine de la modélisation pluie-débit. La dernière partie de ce chapitre sera consacrée aux techniques de choix et de sélection des modèles.

I.2. Définitions**I.2.1 Le modèle**

Bien que le terme « modèle » soit d'utilisation très générale, il est habituellement utilisé pour décrire un ensemble de formules mathématiques et d'algorithmes représentant l'état d'un système et son évolution sous l'influence de certaines variables (*Morin et col.*, 1981).

Un modèle hydrologique du bassin versant est une représentation simplifiée sous une forme compréhensible du système complexe de cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant dans le but d'expliquer ou de déterminer la réponse du bassin aux différentes conditions ou sollicitations auxquelles il est soumis.

Les modèles hydrologiques sont généralement utilisés pour l'évaluation, la valorisation ou la gestion des ressources en eau. Les modèles mis au point par les hydrologues permettent de mieux comprendre et prévoir les variations de débit à l'exutoire d'un bassin versant.

Selon la figure suivante un modèle est caractérisé par cinq éléments constitutifs : la géométrie du système (bassin versant), les entrées dans le système, les lois de formalisation des processus, l'état initial et les conditions aux limites du système et enfin les sorties.

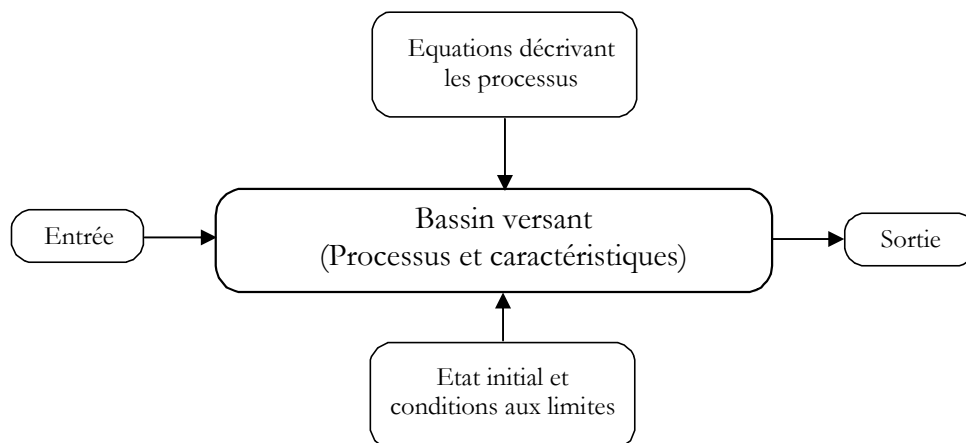


Figure I.1 : Composants d'un modèle (*Singh*, 1995)

Notons, qu'un abus de langage associe le terme de modèle au logiciel informatique qui met en œuvre plusieurs modèles de comportements hydrologiques. Par exemple, un logiciel de simulation hydrologique est en fait un programme qui fait appel à différents modèles hydrologiques d'infiltration, de transfert, de routage etc. (*Musy et col.*, 1998). Cette expression risque de transparaître dans la suite du texte mais sans apporter de difficulté de compréhension.

I.2.2 La modélisation hydrologique

La modélisation est la simplification du comportement du système complexe. A chaque stade de la modélisation, des approximations sont réalisées: perception du phénomène, formalisation dans un cadre conceptuel, traduction dans un langage de programmation (*Gnouma*, 2006).

La modélisation hydrologique est donc la représentation mathématique simplifiée de la partie continentale du cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant dans le but d'en simuler le fonctionnement pour étudier l'effet de certains paramètres, ou pour faire des prévisions.

Les techniques de modélisation hydrologique peuvent être utilisées opérationnellement pour étudier les impacts hydrologiques et hydrauliques (inondations, ...), des scénarios de changements climatiques et des scénarios d'aménagement du territoire, dès qu'elles sont validées par des observations de terrain ou par les résultats de la télédétection.

En hydrologie, la modélisation fait ressortir deux grands types d'approches de modèles: déterministe et stochastiques.

Un modèle déterministe ne contient pas d'éléments aléatoires et détermine de manière

« certaine » l'état et l'évolution du système en fonction des variables considérées.

Le modèle stochastique, en plus de variables mesurables et observables, interviennent une ou plusieurs variables aléatoires correspondant à l'effet possible de facteurs non contrôlés par les variables définissant le modèle.

I.2.3. Le fonctionnement du modèle pluie-débit

Principe

Le fonctionnement du modèle pluie-débit permet de distinguer trois contributions à l'écoulement total (**Graff**, 2004) :

- un écoulement de base, représenté par le débit initial de la crue ;
- un écoulement lent et différé, représenté par la vidange du réservoir ;
- un écoulement rapide, modélisé par le coefficient d'écoulement direct.

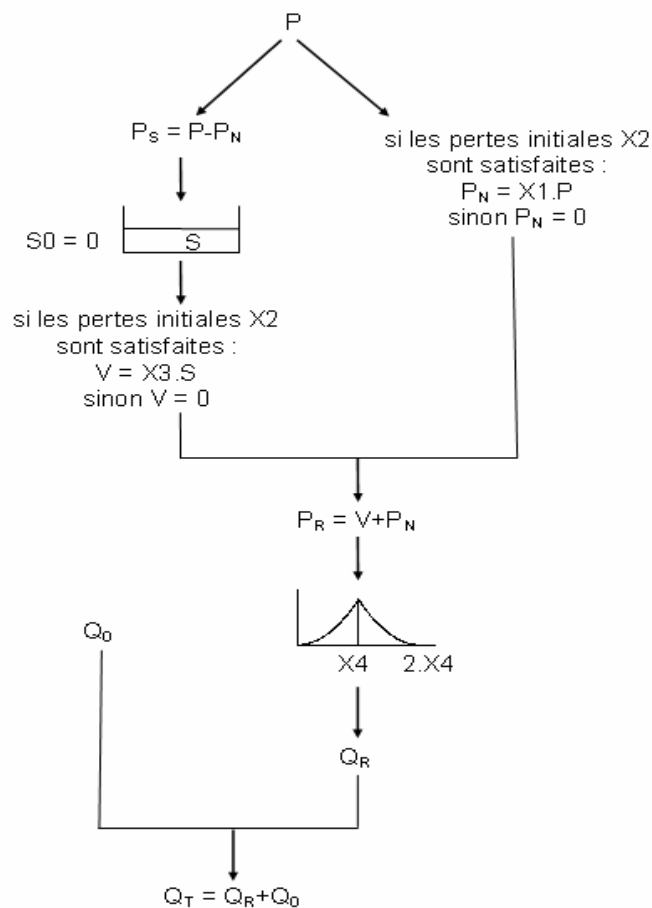


Figure I.2 : Schéma fonctionnel du modèle pluie-débit (**Graff**, 2004).

avec : P la pluie brute ; P_S la pluie stockée dans le réservoir ; P_N la pluie nette ; S le volume d'eau stockée dans le réservoir ; V la vidange du réservoir ; Q₀ le débit initial de la crue ; Q_T le débit total. Toutes ces variables sont en mm.

X₁, coefficient d'écoulement direct ; X₂, les pertes initiales avant le début de

l'écoulement (mm); X_3 , paramètre de vidange linéaire du réservoir (%); X_4 , le temps de montée de l'HU (h)

Les contributions des écoulements lent et rapide à l'écoulement total sont calculées de la manière suivante :

$$P_{NT} = P_{NV} + P_{ND}$$

$$P_{NT} = P_T - SFIN$$

$$P_{ND} = (P_T - X_2) \times X_1$$

$$P_{NV} = P_T - (P_T - X_2) \times X_1 - SFIN$$

$$CEM = \frac{P_{NT}}{P_T} = \frac{P_{ND}}{P_T} + \frac{P_{NV}}{P_T}$$

avec : P_{NT} , la pluie nette totale (mm) ; P_{ND} , la pluie nette directe (mm) ; P_{NV} , la pluie nette issue de la vidange du réservoir (mm) ; P_T , le cumul de pluie total de l'événement (mm) ; $SFIN$, le niveau final du réservoir (mm) ; CEM , le coefficient d'écoulement de la crue modélisée.

Par conséquent, la définition exacte du sens des contributions à l'écoulement total utilisé dans un modèle ainsi que de la répartition des écoulements est difficile à donner. Néanmoins, il est certain qu'un fort pourcentage d'écoulement direct représente une réponse rapide du bassin.

Une valeur forte du pourcentage d'écoulement direct associée à une valeur forte de X_1 signifie que l'aléa crue sur un bassin donné est élevé. Ainsi, nous obtenons des résultats indicatifs des tendances de fonctionnement des bassins versants.

I.3. Principes de la modélisation

La motivation inhérente à la construction d'un modèle vient de la nécessité de résoudre des problèmes d'un intérêt pratique. Il s'agit de tous les problèmes de gestion de situations impliquant l'écoulement d'eau et le transport de polluant dans la zone saturée et/ou la zone non-saturée.

Dans un problème de gestion d'une situation, des décisions sont à prendre concernant le planning et les opérations à effectuer pour atteindre un but fixé, cela avec des contraintes techniques ou autres qui sont imposées. Une bonne gestion requiert un outil permettant de réaliser des prédictions concernant les conséquences de l'application de telle décision.

I.3.1 Développement d'un modèle

La construction d'un modèle hydrologique requiert les principales étapes décrites ci-après (Figure I.3, page 10) :

1. Modèle conceptuel

En réalité, le système réel à modéliser est très complexe et compliqué. Par conséquent, il faut se poser la question de ce qu'on peut faire pour simplifier la description du système réel.

La **conceptualisation** ou la construction d'un modèle conceptuel du problème à étudier consiste à choisir les hypothèses fondamentales qui vont sous-tendre toute la modélisation. Ces hypothèses réduisent le problème réel en un problème simplifié qui doit être acceptable au vu des objectifs de modélisation et des questions spécifiques auxquelles il faut répondre.

Les hypothèses peuvent être relatives aux aspects suivants :

- géométrie des frontières;
- dimensionnalité du modèle : 1D, 2D, quasi-3D, 3D;
- types de matériaux géologiques dont est composé le domaine;
- homogénéité/hétérogénéité, isotropie/anisotropie ;
- mécanismes de transport à l'intérieur du domaine;
- régimes d'écoulement des fluides impliqués (laminaire, turbulent);
- variables d'état considérées, volumes ou surfaces sur lesquelles on peut prendre des valeurs moyennes ou équivalentes;
- conditions aux frontières du domaine pour l'écoulement et le transport;
- conditions initiales à l'intérieur du domaine.

La bonne sélection des hypothèses acceptables pour chaque cas spécifique est importante à plus d'un titre. Elle permet, bien sûr, de simplifier le problème mais il est très important de s'en souvenir lors de l'interprétation des résultats donnés par le modèle.

Si on simplifie trop, le modèle ne fournira peut-être pas les informations requises. Si on simplifie trop peu, peut-être n'aura-t-on pas tous les paramètres nécessaires ou les moyens de résolution nécessaires pour obtenir une réponse. Si des hypothèses inadéquates sont choisies, on tronque la réalité. C'est malheureusement dès le stade de la conceptualisation que sont commises la plupart des erreurs de modélisation (**Carbonnel et col.**, 1995). Cette conceptualisation doit être réalisée, si possible, par un spécialiste ayant une bonne connaissance des processus hydrologiques.

2. Modèle mathématique

La deuxième étape de la modélisation consiste à transcrire le modèle conceptuel en un modèle mathématique, en équations mathématiques. Le modèle mathématique existera à partir de la définition de la géométrie, des équations exprimant les bilans des quantités extensives considérées, des équations de flux (flux exprimés en fonction des variables d'état), des équations constitutives décrivant les propriétés des différents fluides, des conditions initiales et des conditions aux frontières décrivant les interactions du domaine étudié avec son environnement.

3. Modèle numérique

Cette étape consiste à la transformation des équations mathématiques sous forme d'un code informatique.

Dans la pratique, les solutions analytiques ne sont pas possibles car les limites sont irrégulières, le milieu est hétérogène. De plus, beaucoup de problèmes peuvent être qualifiés de non-linéaires, exprimant la variation d'un paramètre en fonction d'une variable d'état dont la valeur est la réponse attendue du modèle. Lors de la résolution d'un problème de ce type, le modèle numérique effectue un cycle interne d'itérations sur la valeur du paramètre non-linéaire.

4. Vérification du code

Les méthodes de résolution induisent toujours des erreurs numériques en relation avec la discrétisation spatio-temporelle choisie. La vérification du code consiste au contrôle de la qualité des réponses fournies par le modèle numérique sur différents problèmes classiques, résolus par d'autres méthodes (analytiques ou numériques). En cette étape, le programme est testé quant à sa convergence, sa stabilité et sa précision. Le modèle numérique doit en quelque sorte passer de façon positive tous les tests d'une procédure assurant sa qualité.

5. Validation du modèle

Cette opération consiste à vérifier que les résultats du modèle correspondent à la réalité; il faut que, malgré les simplifications, le modèle décrive de façon fiable la réalité. Cette opération est plus souvent intégrée à la calibration.

6. Calibration du modèle (Calage des paramètres)

Dans la plupart des cas d'étude, la connaissance quantitative des propriétés du terrain est le problème majeur lors de l'élaboration d'un modèle, à cause de l'insuffisante connaissance quantitative des paramètres hydro spatiaux du milieu étudié. Dans le meilleur des cas, les valeurs des paramètres ne sont connues que dans certaines zones locales et on doit fournir des estimations pour les autres zones. De plus, bien souvent

viennent s'ajouter des *effets d'échelle*: lorsqu'un paramètre est mesuré à une certaine échelle et qu'il doit être utilisé dans le modèle à un niveau d'échelle supérieure.

Ces constatations démontrent l'obligation de vérifier si les résultats d'un modèle sont réalistes ou non par rapport à la réalité. Cette procédure est appelée *calibration* : elle consiste à minimiser la différence entre mesures et résultats par l'ajustement des données d'entrée jusqu'à ce que le modèle reproduise les conditions du champ mesuré avec un niveau de précision acceptable.

La calibration est menée en ajustant la répartition et la valeur des paramètres (et éventuellement des conditions aux frontières) de manière à ce que les résultats calculés soient similaires aux données mesurées pour une même sollicitation du système (**Carbonnel et col.**, 1995).

En fait, durant la calibration, on détermine les valeurs des coefficients (paramètres) du modèle pour le site considéré, en résolvant le problème inverse sur base de toutes les informations et données dont on dispose.

7. Analyse de sensibilité aux paramètres

L'analyse de la sensibilité du modèle consiste en l'essai de différentes valeurs d'un même coefficient (paramètre) afin de déterminer l'influence de ce dernier sur la réponse du modèle,

Une analyse de sensibilité tente habituellement de couvrir les aspects suivants :

- étudier les interactions entre paramètres (relations éventuelles);
- déterminer la plage de variation optimum pour un paramètre et l'influence d'une variation (choisie dans cette plage) sur certains résultats;
- déterminer éventuellement les importances respectives des différents paramètres intervenant dans la modélisation.

Ce type d'analyse est réalisé en principe au voisinage immédiat des valeurs optimum des paramètres pour lesquels la calibration a été jugée satisfaisante.

Une analyse de sensibilité peut être unidimensionnelle (relative à 1 seul paramètre) ou multidimensionnelle dans le cas où plus d'un paramètre sont modifiés par rapport à la valeur optimale.

8. Exploitation du modèle - Simulations

Après la calibration, le modèle est prêt à l'emploi pour la simulation. Le modèle aura donc la capacité de calculer des extrapolations, et de fournir des résultats pour les différentes sollicitations. De nouvelles conditions peuvent être essayées dans le modèle par ajustement des données, et les réponses permettent d'estimer les effets engendrés et fournissent ainsi une base solide pour la prise de décision.

Le schéma de la Figure I.3 montre la procédure suivie lors de la construction d'un modèle mathématique à des fins prévisionnelles (*Carbonnel et col., 1995*) :

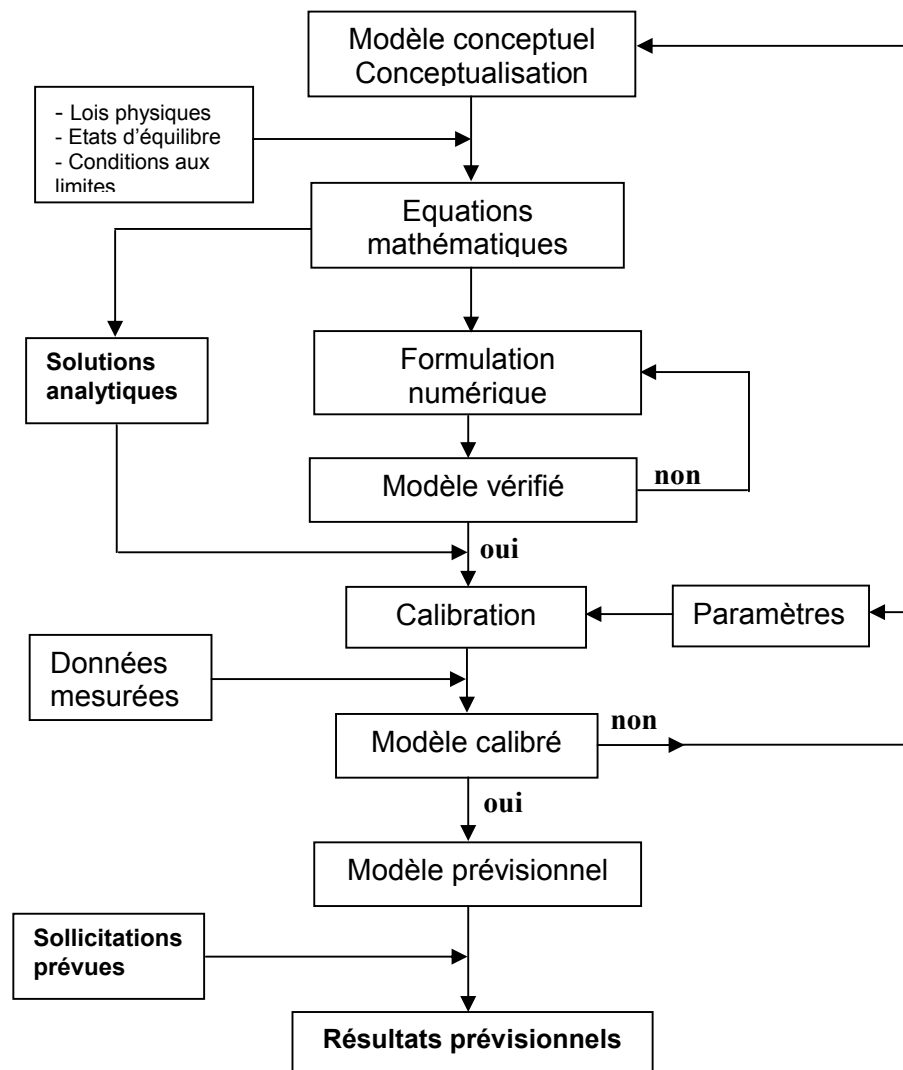


Figure I.3 : Développement d'un modèle numérique hydrologique à des fins prévisionnelles (*Peck et col., 1988*)

I.4. Objet des modèles hydrologiques

L'utilisation des modèles en hydrologie a essentiellement pour objectif d'effectuer des prévisions en fonction des différents scénarios météorologiques, de simuler des débits sur des cours d'eau où les mesures sont insuffisantes, dimensionner des ouvrages d'art, délimiter des zones inondables, ou de contrôle et la gestion de la ressource en eau.

Les objectifs essentiels de la modélisation hydrologique, en générale, sont :

I.4.1. La prévision

La prévision des débits à l'exutoire du bassin versant est l'un des aspects les plus importants auquel souvent sont appliqués les modèles hydrologiques. Elle intervient nécessairement pour le contrôle des inondations, la régularisation des cours d'eau, la production hydro-électrique, le dimensionnement des ouvrages hydrauliques et, compte tenu de l'utilisation toujours plus intense des ressources en eau, la prévision devient de plus en plus nécessaire pour la gestion de la ressource et le contrôle de la pollution.

I.4.2. La simulation

La simulation est l'analyse du comportement du système pour un signal particulier. En hydrologie, la simulation est utilisée Pour :

- compléter des données manquantes ;
- la prédétermination des crues ;
- générer des séries de données utiles à la gestion d'ouvrage de retenue.

I.4.3. Evaluation d'impact

L'impact des changements climatiques éventuels peut être évalué à l'aide des modèles hydrologiques et hydrauliques : au lieu de prendre les données météorologiques observées, il suffit de fournir au modèle hydrologique d'autres données artificielles créées selon les scénarios de changement climatique supposés. Sur base de ces nouvelles données (pluies, températures, ...), le modèle hydrologique simule le volume d'eau évacué par la rivière. Ce volume d'eau est alors utilisé ensuite par les modèles hydrodynamique pour simuler le niveau d'eau dans la rivière et le débordement éventuel.

I.4.4. Le contrôle

Il consiste à agir sur le signal d'entrée pour obtenir une sortie ayant certaines caractéristiques (gestion de réservoir).

I.5. Classification et typologie des modèles hydrologiques

I.5.1. Classification

Plusieurs auteurs ont proposé une classification des modèles hydrologiques (*Gnouma*, 2006). A titre d'exemple, Refsgaard et Storm (1996) classent les modèles hydrologiques en trois catégories : les modèles empiriques, les modèles conceptuels et les modèles distribués à base physique. D'après Refsgaard (1997), les modèles hydrologiques peuvent être classés selon la description des processus physiques en tant que conceptuels ou physiques et selon la description spatiale des processus au niveau du bassin versant en tant que globaux ou distribués.

Chocat (1997), propose de classer les modèles hydrologiques par type d'utilisation en (modèles cognitifs, modèles prévisionnels, modèles décisionnels et modèles normatifs) et par type d'approche en (physique/analogique/symbolique, déterministe/probabiliste (stochastique), empirique / théorique et spéculative / pragmatique).

Singh (1995) a proposé trois critères pour classer les modèles hydrologiques qui sont : la description des processus, l'échelle spatio-temporelle et la méthode utilisée pour résoudre les équations: Selon la description des processus, on peut avoir plusieurs niveaux de classification : modèles globaux ou distribués, déterministes ou stochastiques ou mixtes. Selon l'échelle spatio-temporelle, les modèles événementiels et continus. Et selon la méthode de résolution employée, les modèles conceptuels et empiriques.

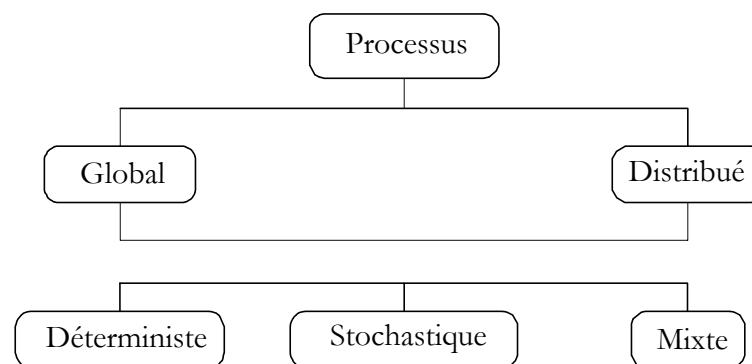


Figure I.4 : Classification des modèles proposée par Singh (1995)

En raison de l'ambiguïté de certains critères, une certaine confusion règne encore sur l'appartenance de tel ou tel modèle à une classe ou une famille donnée (*Gnouma*, 2006).

La difficulté de trouver une classification unifiée provient du fait de la grande diversité des approches entraînant une grande diversité des caractéristiques des modèles. Il est alors presque impossible de distinguer des catégories de modèles nettement distinctes, et ce d'autant plus que la terminologie employée est encore fluctuante.

I.5.2. Différenciations entre les approches des modèles

La classification à l'image des modèles varie selon le point de vue, et ne peut être définitive et sans chevauchement. Néanmoins, quelques différenciations sont reconnues par les utilisateurs. Pour cela, nous nous contentons, dans ce qui suit, par la présentation de ces distinctions existantes entre les différentes approches des modèles.

1. Modèles physiques, modèles mathématiques

Les modèles physiques sont des **maquettes** par exemple d'ouvrages hydrauliques, de biefs de cours d'eau voire de bassins versants. Ils permettent de quantifier l'influence

d'ouvrages tels que des canaux de rejets, des évacuateurs ou des bassins de rétention de manière simple, là où la résolution d'équations mathématiques est trop complexe ou impossible. Les principales difficultés d'application et d'interprétation de ces modèles résident dans le problème d'échelle et dans la transposition des résultats sur le terrain. Il est en effet impossible d'éviter des distorsions dans les phénomènes, qui se traduisent souvent par des échelles différentes pour les différents paramètres d'écoulement. Pratiquement, il est nécessaire de négliger certains aspects pour se concentrer sur le phénomène dominant. Par exemple, si les forces de gravité dominent, les forces de viscosité sont négligées (similitude de Froude - rapport entre les forces d'inertie et de gravité). Si au contraire les forces de gravités peuvent être négligées, (similitude de Reynolds - rapport entre les forces d'inertie et de viscosité). Dans ces deux cas, il est relativement aisé de construire une maquette en faisant attention au choix du matériau et au liquide utilisé. Si les deux forces ne peuvent pas être négligées, le problème devient complexe et les échelles des phénomènes différeront.

Notons enfin la possibilité de simuler un comportement hydrologique avec des modèles hybrides (analogiques et numériques) où certaines résolutions d'équations différentielles complexes s'effectuent par analogie et dont les résultats à chaque pas de simulation sont intégrés dans les développements des schémas numériques de résolutions. Cette approche a tendance à disparaître en raison de l'évolution de l'informatique moderne, disposant de puissants moyens de calcul et permettant de résoudre par voie numérique l'ensemble des équations décrivant un système (*Musy et col.*, 1998).

En opposition aux modèles physiques (**maquettes**), il y a les **modèles mathématiques** : ils occupent la place prépondérante dans le domaine de la modélisation hydrologique. Ils se composent d'une ou plusieurs équations, dont l'origine, le degré de complexité et de réalisme multiplient les possibilités de leur construction.

Remarque : Les distinctions énoncées ci-dessous concernent les modèles mathématiques seuls.

2. Déterministes, stochastiques

Les différences entre ces deux types de modèles relèvent tant de la philosophie que des mathématiques (*Musy et col.*, 1998). Transposée dans le milieu hydrologique, **l'approche déterministe** permet d'affirmer, par exemple, qu'une crue n'est fonction que des conditions hydrométéorologiques qui prévalaient avant son apparition. Si ces conditions réapparaissent, la même crue se produirait. En conséquence, il est possible de prédire des crues si les conditions hydrométéorologiques sont posées et un modèle adéquat établi.

La grande majorité des modèles hydrologiques sont de type déterministe : il existe une et une seule sortie pour chaque entrée et pour une même entrée, la même sortie sera calculée (**Musy et col.**, 1998). C'est le cas de la méthode rationnelle, de l'hydrogramme unitaire, des modèles à bases physiques, etc. Il faut relever aussi que les modèles statistiques sont également déterministes : l'application d'une loi des extrêmes (Gumbel par exemple) donnera toujours les mêmes quantiles pour des paramètres donnés.

Contrairement qu'aux modèles déterministes, **l'approche stochastique** permet de passer outre les limites des connaissances physiques du système. Elle prend en compte l'aspect aléatoire des phénomènes (**Riad**, 2003).

Les modèles stochastiques simulent les processus qui dépendent en partie ou totalement du **hasard**. Une même entrée du modèle ne donnera pas deux fois la même sortie. Ces modèles sont utilisés pour simuler des phénomènes physiques si complexes qu'ils semblent relever pour une grande partie d'entre eux de l'aléatoire. Les exemples de modèles stochastiques les plus simples sont les séries temporelles où la variable en un instant donné est fonction de ses valeurs aux instants précédents et d'une erreur aléatoire. Dans ce cas, la fonction qui relie les valeurs de la variable en différents temps est déterministe, et l'erreur est stochastique.

En fait, les modèles déterministes et stochastiques sont de plus en plus souvent utilisés conjointement (**Musy et col.**, 1998). L'aspect déterministe permet de simuler les phénomènes physiques identifiables, et l'aspect stochastique prend en compte les phénomènes à caractère aléatoire prédominant et les incertitudes inhérentes à l'estimation des paramètres. Bien que pour l'instant utilisé principalement dans le milieu de la recherche, ce couplage déterministe-stochastique est appelé à court terme à entrer dans le monde de la pratique, les principales difficultés liées au temps de calcul étant résolues grâce à l'évolution informatique.

3. Modèles conceptuel, empirique, à base physique

Les Modèles **conceptuels** essaient de reproduire la réponse d'un bassin versant en remplaçant la réalité de l'écoulement par une idéalisation fort simplifiée de la situation réelle tant de la géométrie du bassin versant que de l'écoulement lui-même. Ils reflètent, par leur structure interne, une conception du système modélisé. Ainsi, moins de données sont nécessaires pour obtenir des prévisions précises. Cependant, la spécification incorrecte du modèle peut causer un biais qui ne pourra être corrigé par l'acquisition de données supplémentaires (**Riad**, 2003).

Les modèles **empiriques** sont représentés par des formules et des équations reposantes sur des observations et un jugement. Ils caractérisent globalement les relations pluies débits par des traitements de séries chronologiques où n'intervient en général aucune donnée sur la nature physique du bassin versant : c'est typiquement le cas des modèles régressifs pluie débit et des méthodes basées sur les fonctions de

transfert, comme celle de l'hydrogramme unitaire.

La différence conceptuelle, empirique, revient que, les modèles conceptuels s'attachent à décrire les relations fonctionnelles liant les sollicitations aux réponses du système, en reproduisant dans les équations l'ensemble des processus physiques clairement identifiés. Dans un modèle empirique, on néglige ces processus et on considère le système auquel il doit s'appliquer comme une boîte noire. Cependant, des interprétations physiques peuvent parfois être données aux paramètres. La distinction entre conceptuel et empirique correspond donc plutôt à deux moments du travail scientifique (ni l'un ni l'autre ne constituent jamais un terme ultime), qu'à deux approches contradictoires (*Musy et col.*, 1998).

Les modèles à **base physique** - appelés aussi modèles **mécanistes** - résolvent une forme aussi complète que possible des équations de continuité et de quantité de mouvement liées au transport d'eau et/ou de substances ou d'énergie. Ces systèmes d'équations censés décrire les divers phénomènes rencontrés, sont par exemple celui de Barré et de St Venant pour des écoulements en surface libre ou de Darcy-Richards pour les écoulements souterrains. Le modèle à base physique le plus complet en matière d'écoulement serait celui qui résout le système de Barré de St Venant en deux dimensions pour l'écoulement de surface et l'équation de Darcy-Richards en trois dimensions pour l'écoulement souterrain. Un tel modèle nécessite trois éléments complexes :

1. Une description détaillée du bassin versant, par un maillage fin tridimensionnel.
2. Des schémas numériques robustes (et si possible rapides...).
3. Des valeurs de paramètres pour chaque maille et dans chaque direction.

Ces trois difficultés majeures expliquent le nombre restreint de modèles de ce type et leurs modestes applications. En hydrologie, le modèle le plus célèbre de cette famille est le **SHE** (Système Hydrologique Européen).

Parmi les difficultés énoncées ci-dessus, la plus sévère concerne la détermination des paramètres. En principe, tous les paramètres ayant un sens physique (paramètre de friction, conductivité hydraulique, ...) devraient être mesurables sur le terrain d'une manière ou d'une autre. Malheureusement, la pratique montre que la mesure de ces paramètres et la détermination de leur répartition spatiale compromet souvent l'utilisation rigoureuse des modèles à base physique complexes tel que le SHE. De plus, des distorsions des modèles, même pour les plus détaillés, sont inévitables. En effet, les simplifications inévitables impliquent que certains processus ne sont pas simulés correctement. Ainsi pour retrouver un débit observé à l'exutoire d'un bassin versant, les paramètres des modèles doivent endosser les incertitudes liées aux simplifications.

Il ressort de ces constats que les modèles à base physique complexes peuvent être utilisés en recherche, par exemple sur des bassins test ou pour simuler des expériences de laboratoire. Mais leur utilisation pratique reste difficile.

Toutefois, les nouveaux problèmes posés en l'hydrologie exigent l'emploi de modèles aussi complets que possible et sont immanquablement à base physique. Il convient dès lors de ne pas forcément prendre le modèle le plus complet, mais celui qui est le plus en adéquation avec la problématique abordée et dont les faiblesses peuvent être cernées. A titre d'exemple, le ruissellement de surface pour des crues importantes peut être modélisé par le principe de propagation d'ondes cinématiques dont le paramètre inconnu, la rugosité, peut être déterminé par un calage basé sur des mesures sur site. Un tel modèle est dit à **base quasi-physique**.

Les distinctions précédentes permettent d'identifier les modèles déterministes des plus simples (modèles empiriques) aux plus complexes (modèles à base physique).

4. Global vs. distribué

Lorsqu'un certain cadre géographique doit être représenté dans un modèle mathématique, deux options sont possibles: On peut estimer que les variations spatiales des paramètres et des variables d'entrée sont négligeables. On construit alors un **modèle global**. Au contraire, l'étendue ou l'hétérogénéité du cadre géographique comme la concentration ou la diversité spatiale sur le système hydrologique peut conduire à faire une partition de l'espace étudié en unités plus petites à l'intérieur desquelles on pourra de nouveau négliger les variations spatiales des entrées et des paramètres. On construit alors un **modèle maillé (distribué)**. Le maillage peut être arbitraire (mailles carrées, par exemple) ou fondé sur des divisions naturelles (découpages en sous-bassins).

La différenciation des modèles globaux et distribués, ou semi-distribués, se réfère donc à la prise en compte de la dimension spatiale du bassin versant, c.-à-d., suivant que le bassin versant est considéré dans l'espace comme une seule entité homogène, ou qu'il est divisé en sous-unités supposées homogènes (éventuellement des sous-bassins) ou qu'il est finement discrétisé en mailles. Un modèle global se contente d'une information générale sur la taille du bassin versant, éventuellement sur sa pente moyenne et sa longueur caractéristique. Le modèle distribué (ou spatialisés) se servent des variables d'entrées et des paramètres à l'échelle des sous unités discrétisées.

Notons que, la discrétisation se retrouve aussi au niveau de la variable temps, dans la plupart des modèles dynamiques où l'on estime le calcul par la moyenne sur un pas de temps. Par exemple, les modèles à base physique qui contiennent des équations aux dérivées partielles spatio-temporelles, sont nécessairement discrétisés (ou distribués) dans l'espace et dans le temps; la résolution des équations s'effectue à l'échelle spatio-temporelle selon un découpage, en principe, irrégulier.

Comme souvent dans le compromis: entre modèles globaux et discrétisés, la meilleure solution se trouve dans le mode semi-distribué. Les modèles bâtis sur de tels concepts essaient de tenir compte des principales particularités du bassin versant, mais n'entrent pas dans de très fins détails.

5. Modèles continus, modèles événementiels

L'application usuelle d'un modèle hydrologique en ingénierie concerne la détermination d'une crue de projet à partir d'une pluie de projet. Dans un tel cas, le but de la modélisation se limite à la recherche d'un événement unique, le modèle à choisir sera en conséquence **événementiel**, il calcule une seule crue sur la base d'une seule entrée (précipitation).

Comme les conditions initiales sont souvent difficilement quantifiables, il apparaît souhaitable de simuler non seulement des événements spécifiques (crues), mais également des débits en continu, en particulier lorsqu'il ne pleut pas. Un modèle qui travaille sous ce mode est dit **continu**. La principale différence avec les modèles événementiels réside dans l'existence d'équations permettant le calcul du débit de base et tenant compte de facteurs météorologiques supplémentaires à la pluie, comme l'évaporation ou la fonte de neige. Des exemples de modèles continus sont tous les modèles à base physique et certains modèles conceptuels comme le GR3.

6. Modèles linéaires, modèles non-linéaires

Un modèle **linéaire** propose une relation linéaire entre les entrées du modèle (principalement la précipitation) et les sorties (les débits). Les modèles **non-linéaires** sont les modèles à base physique ainsi qu'une importante famille de modèles conceptuels. Ces derniers se servent souvent de relations entre le stockage et le débit : $S = a Q^c$. Une autre possibilité réside dans l'écriture du temps de réponse k du bassin versant en fonction du débit ou de l'intensité de la pluie: $k = aQ^b$ ou $k = ai^d$.

Les relations linéaires font partie des plus grandes simplifications qui peuvent être faites en hydrologie et proviennent des temps où l'informatique n'était pas encore venue soutenir cette discipline scientifique. Les modèles de transfert linéaires typiques sont les hydrogrammes unitaires. Il faut toutefois noter que si certaines hypothèses sont vérifiées, les modèles linéaires sont parfaitement applicables sans grande perte de précision. Mais fondamentalement, tout écoulement est non-linéaire. Les mouvements de fluides sont entièrement décrits par les relations non-linéaires de Reynolds qui tiennent compte des phénomènes dynamiques et de la turbulence.

Un autre phénomène important à l'origine de la non-linéarité du comportement hydrologique provient de l'existence de seuils dans la réponse hydrologique. Les plus immédiats sont les phénomènes de débordement, qui provoquent un fort ralentissement d'une partie du volume de crue. L'embâcle et la débâcle suite à une

formation de barrages naturels (par des troncs d'arbres, par exemple) sont d'autres effets connus.

Ainsi, bien que le phénomène de non-linéarité reste un domaine très controversé en hydrologie, force est d'admettre que nombreuses sont les possibilités d'apparition de réactions non-linéaires. Il est reconnu que la non-linéarité agit principalement sur les régimes de basses eaux et s'atténue dans les régimes de crue. Mais comme le calage des modèles hydrologiques utilise dans la plupart des cas des observations qui n'ont pas de caractéristiques de crue importante, l'utilisation de ces modèles pour extrapoler les résultats vers des débits de projet de temps de retour élevé peut s'avérer dangereuse. Pour ces raisons, il est opportun de mettre en œuvre une modélisation non-linéaire là où les conditions l'exigent (*Musy et col.*, 1998).

7. Modèles stationnaires, non-stationnaires (permanents, transitoires)

Selon que le modèle est cinématiques (descriptifs) ou dynamiques (explicatifs), et suivant que l'évolution temporelle du système est simplement décrite ou mise en relation avec les forces qui en sont la cause, on définit les deux types stationnaires ou non-stationnaires.

Un modèle non-stationnaire (transitoire, ou bien dynamique) est un modèle où l'évolution des variables au cours du temps est explicitement prise en compte. De manière générale, les phénomènes hydrologiques naturels sont transitoires, mais si l'on s'intéresse à l'équilibre vers lequel ils tendent, s'ils sont stables à l'échelle de temps de l'étude, où si l'on peut se contenter de raisonner en termes moyens, il peut être avantageux de décrire un système hydrologique par un modèle permanent (ou stationnaire) d'où la variable temps sera absente.

La plupart des modèles utilisés en hydrologie sont stationnaires, c'est-à-dire que leurs caractéristiques, et principalement leurs paramètres, ne varient pas dans le temps. Toutefois, il peut arriver que certains phénomènes naturels voient leurs caractéristiques statistiques évoluer de manière importante. En terme statistique, la non-stationnarité apparaît lorsque la moyenne de la série augmente ou diminue, ou lorsque la variance évolue dans le temps. Certains modèles statistiques particuliers peuvent tenir compte de cette non-stationnarité, comme certains modèles de séries temporelles. Mais c'est là une exception.

8. Simulation - optimisation

Simulation et optimisation se distinguent par le statut de leurs variables mais surtout par le rôle dévolu au critère de performance en optimisation. Un modèle utilisé en **simulation** est destiné à reproduire des phénomènes ou à prévoir le comportement d'un système soumis à des sollicitations données, telles que prise de décision concernant l'implantation d'un ouvrage, d'une prise d'eau, d'un pompage etc...Les

paramètres du système, comme les variables de décision, sont alors connus et on calcule les variables inconnues (les sorties) en fonction des variables connues (les entrées). Eventuellement, un ou plusieurs critères de performances peuvent être calculés, mais a posteriori. On peut donc dire que la simulation ignore les objectifs de la gestion. Elle indique seulement les conséquences d'un choix donné, en répondant à une question que l'on peut formuler comme : « que se passe-t-il si tel situation y avait lieu (comme entrée)? ».

Dans un modèle utilisé en **optimisation** au contraire, l'objectif de la gestion est primordial. Le critère de performances devient explicitement un critère de choix (fonction objectif). De plus, il devient possible d'imposer des contraintes aux variables. On recherchera alors quelles sont les variables de décision permettant d'obtenir la meilleure performance possible du système, relativement au critère retenu. L'optimisation permet de répondre à une question que l'on peut formuler comme: « quelles décisions faut-il prendre pour maximiser (ou minimiser) tel ou tel critère de performance? ». L'optimisation semble a priori très séduisante pour l'aménagement et la gestion, puisqu'elle permet de déterminer la meilleure solution possible.

I.6. Présentation de quelques modèles hydrologiques

Dans ce qui suit, nous allons décrire quelques modèles hydrologiques fréquemment utilisés dans la modélisation pluie-débit. Cette description se veut volontairement courte, car, elle a pour but de mentionner quelques modèles courants plutôt que de les décrire précisément. Des informations complémentaires sur de nombreux modèles se trouvent dans des ouvrages de plusieurs auteurs tels que Singh (1995). Le choix proposé ici n'est évidemment pas exhaustif et quelque peu arbitraire.

I.6.1. Modèles déterministes

1. Modèles conceptuels spatialisés et semi-spatialisés

i. Le modèle OTTHYMO

OTTHYMO est un logiciel développé à l'université d'Ottawa à partir d'un modèle de base HYMO, conçu en 1972 par J.R. Williams et R.W. Hann. Ce programme permet de modéliser l'écoulement de surface ainsi que le transport solide d'un bassin versant. Il est ainsi possible de transformer une précipitation en hydrogramme de ruissellement (fonction de production de type SCS-CN, par exemple) puis d'effectuer le transfert de cet hydrogramme en milieu rural (hydrogramme unitaire de Nash) ou urbain (réservoir non linéaire STANDHYD). De plus il est aussi possible d'effectuer l'acheminement en cours d'eau (Muskingum). Finalement, le programme additionne les hydrogrammes acheminés ou calculés aux différentes jonctions de bassins versants ou de cours d'eau.

ii. Le modèle HEC-1

Le modèle HEC-1 représente la partie hydrologique des logiciels de la famille HEC qui comprennent des outils hydrauliques, statistiques et autres. Le concept de modélisation de HEC-1 est proche de celui d'OTTHYMO, bien qu'il ne contienne pas les mêmes outils hydrologiques et qu'il soit plus complet. Ainsi, les pertes peuvent être calculées par la méthode du SCS-CN, par les formules de Horton ou Holtan, à l'aide d'une fonction exponentielle, d'une Constante, etc. La fonction de transfert est soit linéaire (hydrogrammes unitaires de Clark, Snyder ou SCS) soit non-linéaire (ondes cinématiques). La fonction d'acheminement en cours d'eau est calculée par Muskingum ou à l'aide d'autres fonctions dérivées. HEC-1 propose en outre des possibilités de laminage de crue dans des réservoirs, de calcul de fonte de neige et peut proposer un ensemble de solutions pour une étude donnée. La possibilité d'estimer les paramètres de manière automatique constitue un avantage probant par rapport à OTTHYMO, bien que la routine d'optimisation ne soit pas optimale.

iii. Le Modèle HEC-HMS

Le modèle hydrologique HEC-HMS (**H**ydrologic **E**ngineering **C**enter - **H**ydrologic **M**odelling **S**ystem) est un modèle conceptuel semi-spatialisé développé par le corps de l'armée américaine des ingénieurs «The Hydrologic Engineering Center, HEC, U.S. Army Corps of Engineers (USACE)». HEC-HMS appartient à la nouvelle génération des logiciels de simulation pluie-débit de l'«USACE», et remplace le logiciel HEC-1 (son prédécesseur). Le HEC-HMS apporte des améliorations significatives par rapport à HEC-1 et cela aussi bien sur le plan informatique que sur le plan de l'ingénierie hydrologique.

HEC-HMS simule le comportement hydrologique du bassin versant suite à des événements pluvieux prédéterminés. Il permet de subdiviser le bassin en plusieurs éléments appelés « sous-bassins » considérés comme ayant chacun des caractéristiques homogènes. Le débit de chaque bassin sera calculé à travers les quatre processus: ruissellement, transfert, confluence et dérivation. Les hydrogrammes de l'écoulement sont calculés à partir des données de précipitations, de pertes (infiltration) et d'hydrogramme unitaire ou de l'onde cinématique.

Le HEC-HMS nécessite plusieurs données d'entrée pour le fonctionnement, à savoir: le "modèle du bassin" qui est une sémantisation complète (base de données) du bassin versant à étudier basée sur le traitement du modèle numérique d'altitude (MNA). Le MNA est utilisé comme un système d'information préliminaire pour établir les données d'entrée, à savoir: le schéma du bassin, délimitation des sous-bassins, le calcul des caractéristiques du bassin et des rivières, etc. En plus du "modèle du bassin", le HEC-HMS requiert les données de précipitations, d'évapotranspirations, ainsi que les différentes caractéristiques des processus modélisés (ruissellement, infiltrations,

écoulement souterrain, et écoulement de surface).

Les résultats calculés par le HEC-HMS sont des hydrogrammes de crues disponibles sous forme de graphiques et de tableaux pour chaque nœud de calcul, ainsi qu'un tableau de synthèse calculé pour l'ensemble de la simulation. Le logiciel transfère les résultats calculés dans le système de stockage de données DSS (Data Storage System) dans le but de leur utilisation future dans ce modèle ou dans d'autres modèles de simulation.

Puisque le HEC-HMS est le modèle choisi pour notre application, une description détaillée de sa structure ainsi que de tous les modèles de calcul qu'il utilise sera présentée dans le chapitre suivant.

iv. Le modèle HYDROTEL

Le Modèle hydrologique HYDROTEL est un modèle spatialisé développé à l'institut INRS-Eau de France et l'institut Terre et Environnement du Canada depuis 1985.

HYDROTEL est formé de deux modèles de calcul, le premier dénommé PHYSITEL est utilisé pour la création de la base de données géospatiales servant à la modélisation hydrologique. PHYSITEL permet l'intégration de la variabilité spatiale de la surface (couvert végétal, catégorie du sol) sur les unités hydrologiques de simulation. Le deuxième modèle est utilisé pour le calcul des processus hydrologiques.

Lors de la simulation, HYDROTEL prend en compte six processus hydrologiques qui interviennent depuis la chute de la pluie jusqu'à l'écoulement dans la rivière :

- Précipitations (interpolation des données météorologiques) ;
- évolution et fonte du couvert nival ;
- évapotranspiration potentielle ;
- bilan d'eau vertical ;
- écoulement sur la partie terrestre du bassin ;
- écoulement dans le réseau hydrographique .

Ces processus sont décrits par des algorithmes à base physique, conceptuels ou empiriques. Pour chaque processus, HYDROTEL offre la possibilité de choix entre plusieurs sous modèles en fonction des données disponibles, ce qui lui offre l'avantage d'applicabilité à une large gamme de bassins versants.

HYDROTEL nécessite plusieurs types de données, à savoir :

- données géographiques : modèle numérique d'altitude (MNA), limites du bassin versant, réseau hydrographique, occupation du sol, catégories du sol, localisation des stations hydrométéorologiques ;
- données attributaires associées aux données géographiques ;
- données de modélisation (conditions aux limites, paramètres de calage, unités de

calculs, etc.).

v. *Le modèle CEQUEAU*

Le modèle hydrologique CEQUEAU, développé à l'INRS-Eau (France) depuis 1971, est un modèle paramétrique matriciel à bilan. CEQUEAU est un modèle d'usage souple, qui prend en compte la variation spatiale des caractéristiques du bassin versant par la discrétisation de celui-ci en éléments de même dimension. Cette discrétisation se fait à l'aide de deux découpages:

Le premier découpage divise le bassin versant en surfaces élémentaires appelées "carreaux entiers" à dimensions dépendantes principalement de la superficie du bassin versant, des données météorologiques disponibles, et de la topographie du terrain. Le deuxième découpage subdivise les "carreaux entiers" en éléments partiels appelés "carreaux partiels" et cela en fonction des lignes de partage des eaux.

Les données physiographiques nécessaires pour chaque "carreau entier" sont: l'altitude, les pourcentages de forêts, de lacs et de marais, et pour les "carreaux partiels" le sens de l'écoulement et le pourcentage de superficie par rapport au "carreau entier" qu'il subdivise. Ces données sont principalement déterminées à partir des cartes topographiques ou des systèmes d'information géographique. En plus des données physiographiques des carreaux, le modèle requiert sur chacun de ces carreaux, à chaque pas de temps, les données de précipitations liquides ou solides ainsi que les températures maximales et minimales de l'air.

Le modèle CEQUEAU compte deux parties principales visant à décrire l'écoulement de l'eau vers l'exutoire du bassin versant. La première appelée fonction de production a pour but de transformer les précipitations réelles en précipitations utiles sur chaque carreau entier et à chaque pas du temps. Les principaux phénomènes de cette partie sont la pluie, la fonte de neige, l'évapotranspiration, l'infiltration et les variations des réserves superficielles et souterraines. La deuxième partie appelée fonction de transfert concerne le cheminement de l'eau entre les carreaux partiels. Cette partie est schématisée par un ensemble de réservoirs communiquant entre eux à l'aide de relations mathématiques reproduisant les différents transferts de masse.

Les figures suivantes représentent la fonction de production et la fonction de transfert du modèle CEQUEAU:

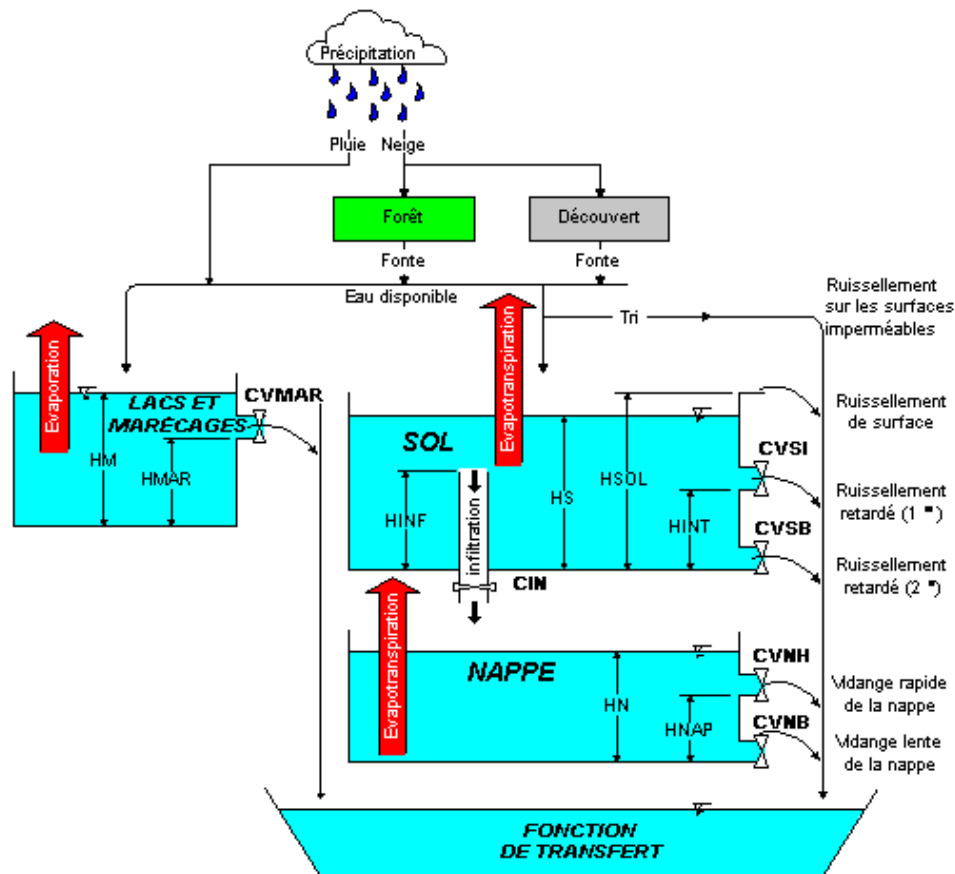


Figure I.5 : La fonction de production du modèle hydrologique CEQUEAU.

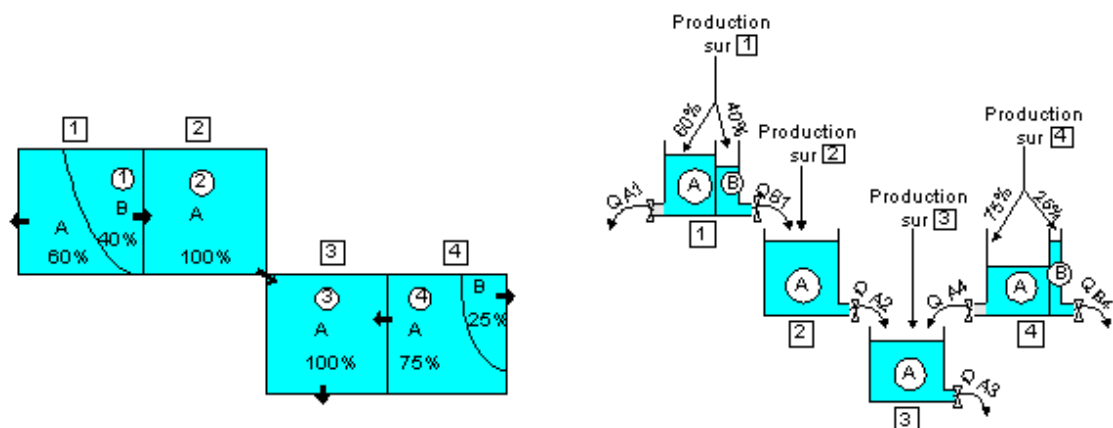


Figure I.6 : La fonction de transfert du modèle CEQUEAU

2. Modèles conceptuels globaux

- Le modèle IHACRES

Le modèle IHACRES (**I**dentification of unit **H**ydrographs **A**nd **C**omponent flow from **R**ainfalls, **E**vaporation and **S**teamflow data) est le résultat d'une collaboration entre le CEH (Centre for Ecology and Hydrology) de Royaume-Uni et l'Université Nationale de l'Australie (ANU). IHACRES est un modèle conceptuel global appliqué pour des

investigations dans des petits bassins versants équipés pour des études spéciales ou pour des études régionales dans de grands bassins versants.

Le modèle IHACRES utilise la fonction de transfert à partir de trois modèles de stockages conceptuels : Le modèle non-linéaire qui détermine les précipitations effectives et deux modèles de stockage en parallèle (stockage de surface et souterrain) qui assurent le transfert des précipitations effectives au cours d'eau.

Les données demandées par ce modèle sont: les dimensions du bassin versant, les précipitations, la température de l'aire et l'ETP. En sortie du modèle on récupère : un hydrogramme de crue modélisé, l'humidité du bassin et les incertitudes indicatives associées aux paramètres d'hydrogramme unitaire.

3. Modèles à base physique et à base quasi-physique

i. SHE

Le Système Hydrologique Européen (SHE) est le produit d'une recherche européenne et constitue sans doute le modèle à base physique¹ actuellement le plus complet. Développé par l'Institute of Hydrology (Angleterre), le Danish Institute of Hydrology (Danemark) et la société française SOGREAH durant la période 1978-1982, SHE simule l'ensemble des processus hydrologiques comme le rappelle la liste ci-après.

Chacun de ces processus ou ensemble de processus constitue une composante du SHE.

1. Interception (*modèle de Rutter*) et Evapotranspiration (*modèle de Penman-Monteith*).
2. Fonte de neige (*bilan d'énergie ou degrés jours*).
3. Ecoulement de surface et en cours d'eau (*ondes diffusantes*).
4. Ecoulement en zone non-saturée (*équation de Richards*).
5. Ecoulement en milieu saturé (*équation de Boussinesq*).

Ces composantes s'articulent autour d'une composante centrale qui organise l'introduction et le flux des données entre les composantes tout en faisant office de poste de contrôle de l'exécution des sous-modèles. Cette composante centrale nommée **FRAME** va aussi gérer les conditions aux limites des sous-modèles. La figure I.8 montre le schéma de principe du SHE, tandis que la figure I.9 illustre le transfert de l'information au sein du modèle.

De par son architecture modulaire, les sous-modèles de SHE peuvent être utilisés indépendamment les uns des autres. De plus, il est aussi possible de modifier les composantes selon les besoins des utilisateurs.

¹ SHE est un modèle à base physique en ce sens où les processus hydrologiques sont représentés par des équations aux dérivées partielles traduisant la conservation de l'énergie, de la masse ou de la quantité de mouvement. Ces équations sont résolues à l'aide de méthodes numériques. D'autres processus sont aussi décrits à l'aide de relations empiriques.

L'inconvénient principal de ce modèle est sa lourdeur, voire même sa complexité ainsi que le nombre important de paramètres à prendre en considération, bien que certains ne soient pas mesurables. Malgré cela, le modèle SHE est utilisé dans un bon nombre de situations (*Jordan et col., 1987*), car il propose une nouvelle manière de modéliser les relations pluies-débits et permet de tester l'impact des activités humaines sur le comportement hydrologique des bassins versants².

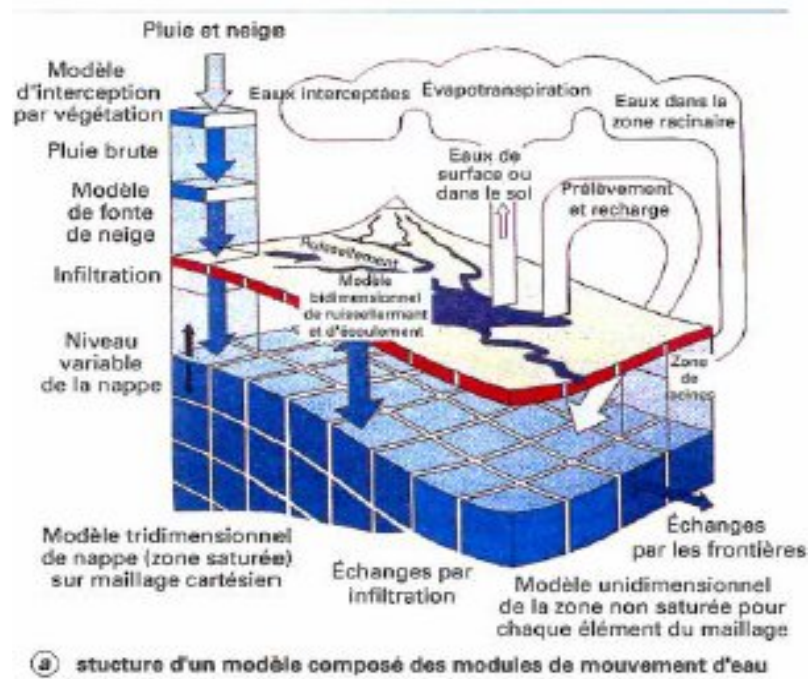


Figure I.7 : Structure simplifiée du modèle SHE
(Source: Laboratoire d'Hydraulique de France).

² Les modifications apportées au bassin versant peuvent être très diverses: déforestations, incendies, urbanisation, changement d'affectation etc.

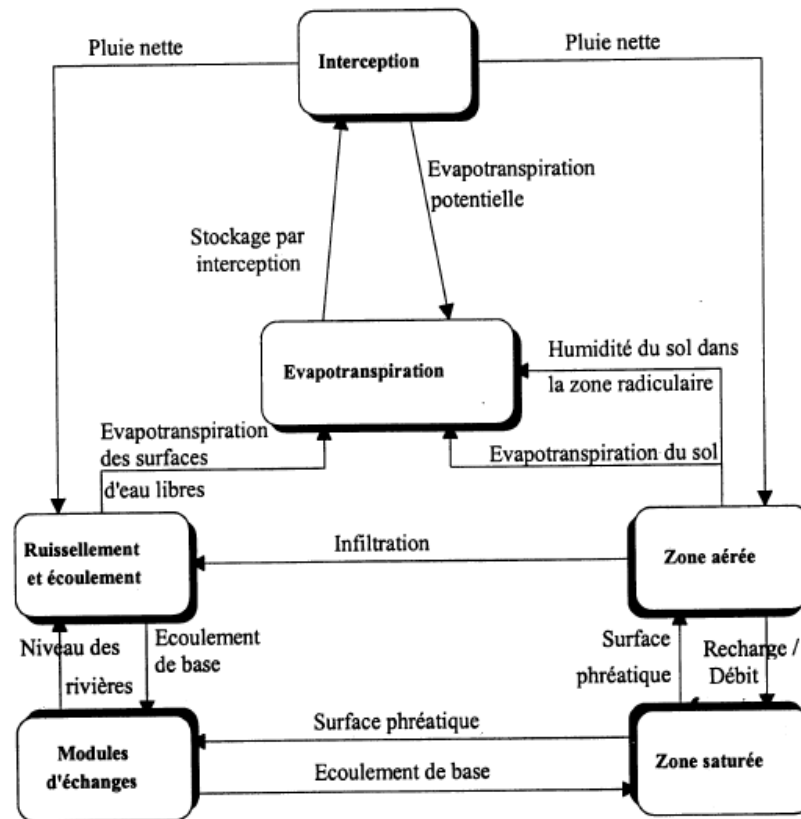


Figure I.8 : Transfert d'information entre les modules du modèle SHE (d'après Jordan, 1992, Abbot *et col.*, 1986), (**Musy *et coll.*, 1998**).

ii. TOPMODEL.

Le TOPMODEL (acronyme de TOPography based MODEL) est considéré comme un modèle quasi-physique³ semi-distribué développé initialement par Beven et Kirby vers la fin des années 1970 à l'université de Lancaster au Royaume-Uni. TOPMODEL est articulé autour de deux idées centrales, à savoir que le ruissellement se produit sur des **surfaces contributives variables** d'une part et, d'autre part, que la topographie influence la manière dont se produit le ruissellement. TOPMODEL définit alors une nouvelle variable hydrologique que l'on nomme **indice topographique**. D'une façon générale, l'indice topographique constitue une estimation directe des écoulements dans le bassin et traduit le potentiel d'un point du bassin à se saturer. Pour déterminer la valeur de l'indice, on recourt à un modèle numérique d'altitude. De plus, sans entrer dans une description détaillée, soulignons que TOPMODEL recourt à plusieurs hypothèses lors de l'établissement de la formulation de l'indice topographique :

1. *Décroissance exponentielle de la conductivité hydraulique à saturation avec la profondeur.*
2. *Dépendance de la conductivité hydraulique à saturation en fonction de la profondeur.*
3. *La zone non saturée est considérée comme un simple réservoir gravitaire.*

³ Plus qu'un véritable modèle, TOPMODEL peut être perçu comme un concept. Il est en effet adaptable selon les besoins de l'utilisateur. Il est ainsi possible d'implanter différentes modélisations de processus que l'utilisateur souhaite analyser.

4. La zone non saturée n'influence pas les écoulements latéraux.
5. Pendant un pas de temps, le régime du bassin versant est considéré comme permanent.
6. La pente de la zone saturée est localement égale à celle de la surface du sol.

Ainsi, l'indice topographique s'exprime pour la i -ème maille du modèle numérique de la manière suivante :

$$IT(i) = \frac{\alpha_i}{\tan(\beta_i)}$$

où, α_i est la surface drainée au point i , $\tan(\beta_i)$ la pente de la surface drainée, et $IT(i)$ l'indice topographique de la i -ème maille.

iii. Le modèle ORAGE/SOCONT.

Le modèle ORAGE (**O**nde cinématique pour la simulation du **R**uissellement avec **A**pplication de la **G**éomorphologie pour la description du bassin versant en **E**léments) a été développé à l'IATE/HYDRAM pour répondre à une problématique de crues (Bérod, 1994). C'est un modèle à base quasi-physique orienté vers le ruissellement de surface. L'idée maîtresse de ce modèle est d'utiliser une équation hydraulique (ondes cinématiques) sur une caractérisation simplifiée du bassin versant. Cette caractérisation repose sur la description géomorphologique du bassin versant qui utilise la classification de Strahler pour identifier l'importance des cours d'eau et des sous-bassins qui s'y rapportent. Cette identification de bassins permet de résoudre les équations pour les classes de bassins similaires et donc seulement sur ces types de sous-bassins versants plutôt que sur tous les sous-bassins réels du bassin entier. Cette description étant effectuée, les sous-bassins types sont alors schématisés sous forme de plans rectangulaires connectés entre eux par des canaux, comme l'illustre la figure suivante :

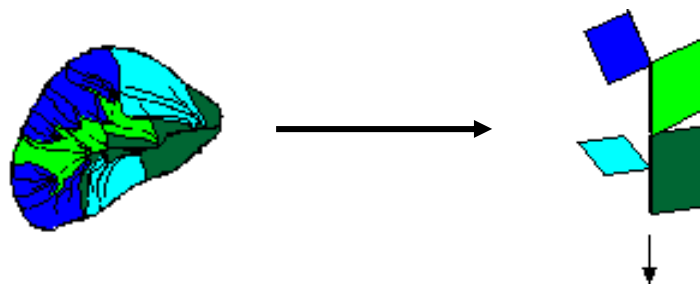


Figure I-9 : Schéma du modèle ORAGE.

Le modèle ORAGE a été utilisé sur différents bassins versants et offre aussi l'avantage de pouvoir prendre en considération une composante stochastique. Une version améliorée d'ORAGE a été également développée afin de résoudre le même type de problèmes sur des bassins beaucoup plus grands (jusqu'à quelques milliers de km²) et plus complexes. Cette version baptisée SOCONT résout le problème de

l'acheminement à l'aide de la méthode des ondes cinématiques ainsi qu'à l'aide d'une méthode simplifiée dérivant de cette dernière. De plus, il est encore possible avec SOCONT d'effectuer des opérations de laminage de crues en rivières et dans des réservoirs ainsi que de traiter des problèmes des adductions et des dérivations d'eau.

I.6.2. Modèles stochastiques

Dans cette famille, nous citons le modèle particulier de **Neyman-Scott**. Conçu à l'origine pour calculer la distribution spatiale des galaxies, ce modèle hydrologique permet de générer des séries d'averses sous l'hypothèse que celles-ci sont composées de *clusters*, c'est-à-dire d'une juxtaposition de cellules superposées pour créer une averse (**Musy et col.**, 1998).

Les variables à générer aléatoirement sont :

- L'origine des averses (*selon un processus de Poisson*).
- Le nombre de cellules dans une averse (*loi de Poisson ou loi géométrique*).
- La position de chaque cellule dans l'averse (*loi exponentielle*).
- La durée de chaque cellule (*loi exponentielle*).
- L'intensité de chaque cellule (*loi exponentielle*).

Le modèle Neyman-Scott est utilisé notamment à l'IATE/HYDRAM pour générer de très longues séries de précipitations (quelques milliers d'années) qui sont par la suite introduites dans un modèle pluie-débit afin de générer des séries de débits. Un des avantages du modèle Neyman-Scott se trouve dans la possibilité de travailler à n'importe quel pas de temps, ce qui n'est pas le cas de la plupart des autres modèles stochastiques. Son inconvénient majeur réside dans la difficulté d'estimation des paramètres sur la base d'observations, bien que cette difficulté se soit trouvée considérablement aplanie grâce à la recherche menée à l'IATE -HYDRAM (**Favre et Overney**, 1995).

I.7. Choix d'un modèle hydrologique

La grande diversité des modèles hydrologiques complique le choix d'un tel outil pour une application donnée. Afin d'éviter certains inconvénients ou de réduire certaines erreurs, il est nécessaire de se baser sur quelques critères avant d'opter pour un modèle.

Le choix d'un modèle doit s'effectuer en règle générale en fonction de l'objectif de l'étude hydrologique. Ce qui semble évident n'est pas toujours pris en compte car un modèle est souvent utilisé parce qu'il est disponible ou parce qu'on en a l'habitude, sans prêter une grande attention à son adéquation à la problématique posée. De surcroît, il est fréquent de constater que les modèles hydrologiques sont employés en dehors de leur domaine de validité. Toutefois, il est correct d'envisager le modèle le

plus simple possible pour une étude. La simplicité est un critère de choix important, mais le modèle doit être aussi simple que possible, mais pas trop simple.

Toutefois, le choix optimum d'un modèle se base généralement sur les critères suivants:

- **Problématique** : Parmi les nombreuses applications de l'hydrologie, les plus couramment rencontrées sont liées aux problèmes d'aménagements (cours d'eau, ouvrages hydrauliques) et aux problèmes de sécurité (prévision des crues, dimensionnement d'ouvrages de sécurité, ...). Ces deux problématiques permettent de distinguer deux groupes de modèles : les modèles linéaires et les modèles non-linéaires. Pour les questions de bilan, le modèle à retenir devra prendre en compte les variations de la nappe, l'évaporation etc., mais par contre pourra négliger, ou tout au moins simplifier, la formation des crues. Les modèles de dimensionnement doivent présenter des qualités contraires, avec des fonctions d'infiltration simplifiées par exemple.

- **Possibilité de détermination des paramètres** : Cette contrainte se reporte sur deux aspects: les données hydrométéorologiques d'une part, la complexité et la taille du bassin versant d'autre part. La plupart des modèles conceptuels simples nécessitent quelques événements simultanés de pluie et de débit pour en assurer le calage. Les modèles plus complexes ont souvent besoin de données supplémentaires qui doivent être mesurées ou estimées. Si ce n'est pas possible, le recours à un modèle plus simple s'impose. Un autre point à considérer porte sur la possibilité d'estimer les paramètres du modèle par régionalisation, c'est-à-dire en utilisant des techniques d'interpolation ou d'autres règles qui permettent de transposer les paramètres estimés sur un bassin versant jaugé vers des bassins sans mesure. La préférence devrait donc être donnée aux modèles qui offrent cette possibilité, en vue d'applications futures.

- **Possibilités de simulation** : Il devient de plus en plus normal de proposer des analyses de sensibilité aux paramètres ou aux valeurs hydrométéorologiques retenues, ce qui implique une utilisation répétée du modèle. Certains modèles offrent la possibilité de fonctionner automatiquement de manière itérative; leur emploi présente des avantages certains.

- **Facilité d'utilisation** : Toutefois, il est conseillé d'adopter des programmes récents, qui souvent adoptent les idées de base des anciens modèles, mais les présentent sous une forme conviviale grâce aux systèmes de fenêtrage actuels. Les difficultés hydrologiques restent évidemment les mêmes, mais sont dans ce cas camouflées sous la facilité d'usage.

La facilité d'utilisation est également liée au nombre d'utilisateurs. Toutefois, il est recommandé de veiller à ne pas être le premier utilisateur externe au "développeur".

Une mise en réseau des utilisateurs d'un modèle apporte une certaine garantie dans l'assistance technique, lors de la mise en oeuvre du modèle et de son exploitation.

- **Le coût d'un modèle:** (ou de sa licence d'utilisation), ceci peut influencer également le choix du modèle (en fonction du coût de l'étude à réaliser). A ce sujet, il convient également de prendre en considération non seulement le coût du modèle lui-même mais également celui de l'équipement qu'il nécessite et surtout celui lié à la formation de ses utilisateurs.

I.8. Conclusion

Nous pouvons conclure, à travers cette synthèse bibliographique sur la modélisation hydrologique que la modélisation pluie-débit est l'outil nécessaire, même obligatoire, pour l'anticipation des conséquences hydrométriques des pluies aux exutoires des bassins versants, ainsi que pour comprendre les variations de la réponse d'un système hydrologique suite à un changement des conditions hydrométéorologiques.

Dans ce chapitre nous avons défini les notions du modèle et de la modélisation, présenté les différentes étapes suivies pour la construction d'un modèle. Et suite à l'ambiguïté dans les classifications des modèles hydrologiques (selon les hauteurs), on a préféré de présenter les distinctions existantes entre les différentes approches, au lieu de donner une classification quelconque des modèles. Comme on a présenté aussi, dans ce chapitre quelques modèles à réputation prononcée dans le domaine de la modélisation pluie-débit. En outre, on a cité les processus pris en compte par chaque modèle, ainsi que les données nécessaires pour la simulation. A la fin on a présenté les critères de choix optimum de type du modèle.

La dernière partie de notre travail portera sur le calage des paramètres d'un modèle pluie-débit sur un bassin versant algérien, qui est "le bassin versant de la Soummam" dans le but la prévention des crues et la protection contre les inondations. Pour cela notre choix s'est porté sur le modèle HEC-HMS.

Notre choix pour le HEC-HMS a été motivé par : sa grande liberté dans la modélisation du bassin versant grâce aussi bien aux nombreux éléments composant le bassin, qu'à la variété des théories proposées pour modéliser les différents processus. En outre, ce modèle a donné des résultats très satisfaisants sur les bassins versants américains dont le climat est proche du climat méditerranéen où les conditions y intervenant sont celles des bassins du nord algérien. Pour cela, nous estimons que ce modèle donnera de bons résultats sur nos données du bassin versant de la Soummam.



Chapitre II :

*Présentation du modèle hydrologique
HEC-HMS*



Chapitre II**Présentation du modèle hydrologique HEC-HMS****II.1. Introduction**

Le HEC-HMS est un système de modélisation hydrologique, employé pour la simulation du comportement hydrologique des Bassins Versants soumis à des phénomènes pluvieux prédéterminés. Il permet de modéliser le processus pluie-débit et de calculer les hydrogrammes de crues pour plusieurs objectifs, comme pour les études de prévisions des écoulements, de drainage urbain, de conception de réservoirs, et de réduction des effets d'inondations.

Le modèle hydrologique HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) a été développé par le Hydrologic Engineering Center (HEC) d'U.S. Army Corps of Engineers (USACE), et a été pour longtemps un modèle appliqué à la simulation des événements hydrologiques. Ce modèle offre une grande liberté dans la modélisation des bassins versants grâce à la variété des méthodes proposées pour modéliser les différents processus de cycle de l'eau à savoir, le ruissellement, les infiltrations, l'écoulement en rivière ou la répartition moyenne des pluies. Le HEC-HMS est un modèle particulièrement bien adapté pour simuler le comportement hydrologique de bassins non urbanisés.

II.2. Principes généraux**Fonction de production et fonction de transfert**

La modélisation de la transformation pluie-débit a pour objectif de produire un hydrogramme d'eau pluviale à l'exutoire du bassin versant étudié. Bien que physiquement tous les processus contribuant à la transformation soient fortement interdépendants, les hydrologues décomposent la modélisation en deux étapes distinctes et successives :

- fonction de production ;
- fonction de transfert.

❖ La fonction de production permet de définir la partie de la pluie précipitée (pluie brute) qui va effectivement s'écouler à l'exutoire du bassin versant. Le résultat de cette première transformation est un hydrogramme de pluie nette. Il s'agit d'une grandeur fictive. La pluie nette est calculée par différence entre la pluie brute et les pertes à l'écoulement (évaporation, rétention par la végétation, stockage dans les dépressions, infiltration). La pluie nette est ensuite exprimée sous la forme d'un

débit de pluie nette en multipliant l'intensité instantanée de pluie nette par la surface du bassin versant.

- ❖ La fonction de transfert a pour objectif de transformer le débit de pluie nette en débit à l'exutoire. Il s'agit là d'un opérateur conservatif (le volume de l'hydrogramme de pluie nette est le même que celui de l'hydrogramme à l'exutoire). Son seul but est de représenter les transformations de la forme de l'onde de débit lors de son passage à travers le bassin versant.

Ces différentes transformations sont schématisées dans la figure suivante :

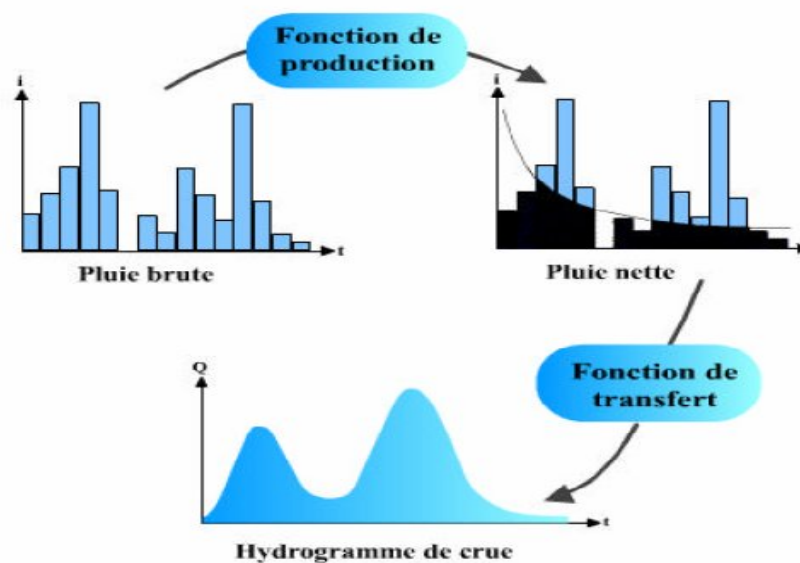


Figure II.1 : Schéma général du processus de transformation pluie-débit (*Chocat, 1997*)

II.3. La Modélisation sous le HEC-HMS

Le modèle HEC-HMS utilise différents types de méthodes pour modéliser les phénomènes physiques composant le cycle de mouvement de l'eau dans le bassin versant.

Afin de déterminer le comportement hydrologique, le modèle HEC-HMS passe par trois étapes principales de calcul, à savoir :

- La modélisation du bassin ;
- La modélisation de la météorologie ;
- Les spécifications particulières de contrôle.

Ces trois étapes de calcul permettent donc d'obtenir la réponse du système hydrogéologique global à un changement de conditions hydrométéorologique.

II.3.1. Modélisation du bassin versant

La modélisation d'un bassin versant consiste, en premier lieu, en un découpage de celui-ci en plusieurs sous-bassins élémentaires, ensuite, spécifier les méthodes à utiliser pour calculer les différentes composantes : les pertes par (interception, infiltration, stockage ou évaporation), le ruissellement direct, l'écoulement souterrain, et l'écoulement fluvial dans le lit de la rivière.

1. ***Modélisation des pertes***

Le HEC-HMS désigne par « pertes » les quantités d'eau stockées, infiltrées ou évaporées lors de leur trajet sur le bassin versant, et il calcule l'écoulement en soustrayant ces pertes aux précipitations.

Les surfaces du bassin versant sont partagées en deux catégories; Les surfaces imperméables et directement connectées où l'écoulement est direct et se fait sans pertes, dans ce cas on utilise le modèle «sans pertes» ; et les surfaces perméables soumises à des pertes décrites par les différents modèles suivants:

- modèle de perte initiale et à taux constant ;
- modèle à déficit et à taux de perte constant
- modèle basé sur le Curve Number (CN)
- modèle de Green et Ampt

Pour tous ces modèles, les pertes sont calculées pour chaque intervalle de temps et soustraites à la moyenne surfacique des précipitations de cet intervalle. La quantité d'eau restante désigne l'excès de précipitation. Cette quantité est considérée uniforme sur tout le bassin versant et représente le volume d'écoulement de surface.

a. Modèle de pertes initiales et à taux constant

Les hypothèses sur lesquelles se base ce modèle sont les suivantes:

- Le taux de pertes potentiel maximum, noté f_c , est constant ;
- Il existe une perte initiale I_a qui représente l'interception et le stockage dans les dépressions. Et tant que I_a n'est pas atteint il n'y aura pas de ruissellement.

L'interception est la conséquence de l'absorption de la pluie par les feuilles de la végétation, et le stockage dans les dépressions de surface est la conséquence de la forme du terrain du bassin versant ; l'eau interceptée sera évaporée, et celle stockée dans les dépressions sera soit évaporée soit infiltrée.

On peut résumer ce fonctionnement de la manière suivante:

On note : P_t : La moyenne surfacique des précipitations au temps t ;

P_{et} : Le ruissellement au temps t ;

$$* \text{ si } \sum_i p_i \leq I_a \text{ alors } p_{et} = 0$$

$$* \text{ si } \sum_i p_i \geq I_a \text{ et } p_t \geq f_c \text{ alors } p_{et} = p_t - f_c$$

$$* \text{ si } \sum_i p_i \geq I_a \text{ et } p_t \leq f_c \text{ alors } p_{et} = 0$$

Avec,

$$P_{et} = \left\{ \begin{array}{ll} P_t - f_c & \text{si } P_t > f_c \\ 0 & \text{ailleurs} \end{array} \right\}$$

La difficulté de cette méthode réside dans :

- La détermination des pertes initiales : qui dépendent des conditions qui ont précédé l'événement pluvieux à étudier (par exemple si le sol était déjà saturé en eau par des pluies précédentes, les pertes initiales seront quasiment nulles). Ces pertes dépendent aussi de l'aménagement et de la nature des sols.
- La détermination du taux de perte constant qui correspond au pouvoir d'absorption du sol exprimé en mm/h.

Si le sol du bassin versant est saturé, I_a tend vers zéro. Si le sol est drainé, alors I_a représentera la quantité d'eau qui tombe sur le bassin versant sans qu'il y ait de ruissellement ; cette quantité est fonction de la nature de terrain du bassin versant, l'occupation du sol, le type et l'utilisation du sol. On peut toutefois se servir des valeurs données dans le tableau suivant :

Tableau II.1 : Ordre de grandeur du taux de perte constant selon le type de sol

Type du sol	Ordre de grandeur du taux de pertes (mm/h)
Sable profond, lœss profond, limons agrégés	7.5 à 11
Lœss peu profond, terre sableuse	3.5 à 7.5
Terre argileuse, terre sableuse peu profonde, sols à faible teneur en matière organique, sols argileux	1.2 à 3.5
Sols gonflant fortement sous l'effet de l'eau, argiles plastiques lourdes, sols salins.	0 à 1.2

Une autre variante de ce modèle est le modèle "Déficitaire et à taux constant". C'est un

modèle quasi continu qui prend en compte des périodes sans pluie au cours de l'évènement et qui intègre une régénération des pertes initiales. Pour utiliser ce modèle avec le HEC-HMS on doit spécifier le taux de pertes initiales, le taux de pertes constant et le taux de régénération. Ce dernier peut être estimé comme étant la somme du taux d'évaporation et du taux de percolation.

En général on ne détermine pas directement les pertes initiales et le taux de pertes constant mais on procède plutôt à un calage du modèle à partir de données réelles.

b. Modèle du nombre de courbe (Curve Number)

Ce modèle estime l'excès de précipitations P_e comme une fonction des précipitations cumulées, de la couverture du sol et de son humidité initiale.

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (\text{II-1})$$

Où, P : est le total des précipitations cumulées au temps t ; I_a : est la perte initiale et S le potentiel maximum de rétention et S : est le potentiel maximum de rétention.

On a par ailleurs la relation qui a été développée à partir d'une analyse pour un ensemble de petits bassins versants expérimentaux qui donne I_a en fonction de S :

$$I_a = 0.2S \quad (\text{II-2})$$

On obtient donc :

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

Or le potentiel de rétention maximum S , et les caractéristiques du bassin versant sont reliés par le numéro de courbe «Curve Number» CN par :

$$S = \frac{25400 - 254 \text{ CN}}{\text{CN}} \quad (\text{II-3})$$

CN peut être estimé comme une fonction du type du sol, d'occupation du sol et des conditions hydriques précédentes du bassin versant. Pour un bassin versant composé de différents types de sols ou de couvertures végétales, on peut établir un CN moyen par la relation suivante :

$$\text{CN}_{\text{moy}} = \frac{\sum_i a_{ij} \text{CN}_i}{\sum_i A_i} \quad (\text{II-4})$$

où, j : L'indice associé à la subdivision du bassin de type de sol uniforme ; a_{ij} : l'aire de la subdivision j dans le sous-bassin i et A_i : l'aire du sous-bassin i .

C'est un modèle conceptuel d'infiltration des précipitations dont la fonction de production est fondée sur la loi de Darcy généralisée aux milieux non saturés et combinée avec le principe de conservation de la masse. Il calcule les pertes sur la zone perméable par la formule suivante :

$$f_t = K \left[\frac{1 + (\phi - \theta_i) S_f}{F_t} \right] \quad (\text{II-5})$$

où, K : la conductivité hydraulique saturée ; ϕ : la porosité ; $(\phi - \theta_i)$: le volume du déficit hydrique ; S_f : un paramètre tabulé qui exprime l'aspiration avant mouillage ; F_t : représente les pertes cumulées aux temps t .

c. Modèle continu SMA (Soil Moisture Accounting)

Contrairement aux modèles précédents, le SMA est un modèle qui permet d'étudier de longues périodes avec alternance de pluie et de temps sec. SMA simule le mouvement de l'eau à travers les différents éléments d'un bassin versant. A partir des données de précipitations et d'évapotranspiration, le modèle calcule le ruissellement de surface, les infiltrations, l'évaporation et la percolation profonde. Alors le bassin versant est représenté par une série de couches de stockage interconnectées :

- Stockage par interception végétale: cette couche représente l'eau retenue par la végétation (arbres, herbes...) et qui n'atteint donc pas le sol. L'évaporation est le seul moyen de vider cette couche ;
- Stockage par interception de surface (dans les petites dépressions du sol): cette couche se remplit quand l'infiltration maximale est atteinte. Lorsqu'elle est pleine, elle déborde pour créer le ruissellement de surface ;
- Stockage de sub-surface (soil-profile storage): il représente l'eau retenue dans le sol à faible profondeur et susceptible d'être soumise à l'évaporation ;
- Stockage d'eau souterraine: Cette eau est obtenue par percolation (dont le taux est à définir) et considérée comme perdue pour le système.

Les taux d'infiltration, de percolation et d'évapotranspiration sont calculés à chaque instant à partir des taux potentiels maximums respectifs et de l'état du système au temps précédent. Cela permet de simuler les flux entre les différentes couches à chaque pas de temps.

2. Modélisation du ruissellement direct

Le HEC-HMS se rapporte à ce processus comme une transformation de l'excès de

précipitation pour chacun des sous-bassins versants en un écoulement à son exutoire, et il emploie deux options pour calculer le volume de ce ruissellement [Henine, 2005] :

- Un modèle empirique : dont le but est d'établir un lien causal entre le ruissellement et l'excès de précipitation sans considérations détaillées des processus internes.
- Un modèle conceptuel : c'est le modèle de l'onde cinématique de l'écoulement de surface qui représente, le mieux possible, les mécanismes physiques régissant le mouvement de l'excès de précipitation sur la surface et dans les petits canaux du bassin versant.

a. Modèles liés à la méthode de l'hydrogramme unitaire (HU)

Ces modèles donnent une relation entre l'excès de précipitations et le ruissellement sans considération détaillée des processus internes. En conséquence les équations et les paramètres introduits ont une signification physique limitée. L'hydrogramme unitaire détermine le débit de ruissellement par l'unité de précipitation excédentaire tombée sur le bassin versant. Cette méthode repose donc principalement sur l'hypothèse de linéarité entre l'excès de précipitations et le ruissellement.

On a donc l'équation suivante :

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq m} P_m U_{n-m+1} \quad (\text{II-6})$$

Où, Q_n : est le débit de ruissellement au temps $n \cdot \Delta t$, P_m : est l'excès de précipitation entre $m \Delta t$ et $(m+1) \Delta t$ (en hauteur d'eau) et U_{n-m+1} : est la valeur de l'hydrogramme unitaire au temps $(n-m+1) \Delta t$.

Les modèles de l'hydrogramme unitaire sont les suivants :

Hydrogramme unitaire spécifié par l'utilisateur

Ce modèle consiste à déterminer l'hydrogramme unitaire à partir de la formule ci-dessus et des données complètes d'un événement pluvieux. En pratique, cette méthode n'est que très peu utilisée car elle nécessite des données trop complètes. De plus, l'hydrogramme obtenu ne pourra s'appliquer qu'à des événements pluvieux qui ont la même durée.

Hydrogramme unitaire paramétrique

Un hydrogramme unitaire paramétrique est obtenu par calcul à partir de plusieurs paramètres. Par exemple, l'amplitude et l'instant du pic suffisent à calculer entièrement

un hydrogramme unitaire triangulaire. Un hydrogramme unitaire synthétique met en relation les paramètres d'un hydrogramme unitaire paramétrique et les caractéristiques du bassin versant. Cette méthode permet d'adapter l'hydrogramme unitaire obtenu dans certaines conditions pour un bassin versant à d'autres conditions. Par exemple, on peut relier l'amplitude du pic d'un hydrogramme unitaire triangulaire à l'aire drainée par le bassin.

b. Modèles d'hydrogrammes unitaires synthétiques

Le modèle de SNYDER

Ce modèle permet d'estimer l'hydrogramme unitaire à partir des caractéristiques du bassin versant. Il est basé sur trois paramètres : l'amplitude du pic, la base du temps total et le décalage entre le maximum de l'hydrogramme de la pluie excédentaire et le pic de l'hydrogramme. Ce modèle est fondé par ailleurs sur un événement standard tel que le décalage temporel (t_p) qui est déterminé par la relation: $t_p = 5.5.t_r$ (II-7) où : t_r est la durée de l'évènement pluvieux.

Pour ce type d'évènement, Snyder a établi une relation entre le décalage temporel et le pic de l'hydrogramme unitaire :

$$\frac{U_p}{A_d} = C \frac{C_p}{t} \quad (\text{II-8})$$

8) Où, U_p : Le pic de l'hydrogramme unitaire ; A_d : La surface drainée ; C_p : Coefficient du pic de l'hydrogramme unitaire ; C : Constante de conversion=2.08 pour le Système international d'unités (SI) ; t : Le temps de décalage ; Il est égal à t_p pour des événements standards et à t_{pR} pour d'autres durées.

Il a par ailleurs fourni des formules permettant d'adapter ces résultats à des événements non standards. La détermination des divers paramètres se fait essentiellement par le calage.

Le modèle du SCS (Soil Conservation Service)

Ce modèle repose sur l'hydrogramme unitaire normalisé (qui est la moyenne de nombreux hydrogrammes unitaires calculés pour différents bassins versant). Cet hydrogramme normalisé représente le débit d'écoulement, U_t , comme une fraction du débit maximal, U_p , et, T_p , l'instant du pic. On a par ailleurs les relations empiriques suivantes :

$$U_p = 2.08 \frac{A_d}{T_p} \text{ et } T_p = \frac{\Delta t}{2} + 0.6T_c \quad (\text{II-9})$$

où, Δt : La durée de l'excès de précipitation et T_c : le temps de concentration du bassin.

Ainsi, il suffit de connaître le temps de concentration pour remonter à T_p et U_p et d'obtenir l'hydrogramme unitaire désiré par simple multiplication de l'hydrographe unitaire normalisé.

Le modèle de CLARK (ModCLARK)

Il s'agit d'un modèle quasi-conceptuel puisqu'il prend en compte les deux processus intervenant dans la transformation d'un excès de précipitation en ruissellement, à savoir le mouvement de l'eau de son origine jusqu'à l'exutoire du bassin versant et l'atténuation de cette quantité d'eau par stockage lors de son parcours. Le modèle de Clark modifié, fait intervenir un maillage du bassin versant qui permet de mieux modéliser les temps de parcours.

c. Modèle de l'onde cinématique

Il s'agit d'un modèle conceptuel qui représente les versants du bassin comme des canaux à surface libre dont le débit entrant correspond à l'excès de précipitations. Il résout donc les équations qui régissent les écoulements instationnaires (de continuité et de quantité du mouvement) en eau peu profonde pour tracer l'hydrogramme de ruissellement.

Le HEC-HMS représente le ruissellement de la manière suivante : le bassin versant est découpé en deux plans séparés par le cours d'eau dans lequel les écoulements se déversent, et le ruissellement représente les écoulements de surface sur ces plans.

Sans rentrer dans la théorie complète, on retiendra que sous quelques hypothèses simplificatrices, l'équation de mouvement et celle de continuité donnent :

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \alpha^{m-1} \frac{\partial A_T}{\partial x} = q \quad \text{avec,} \quad \alpha = 1.486 \frac{S^{0.5}}{n} \quad \text{et} \quad m = 5/3n \quad (\text{II-10})$$

où, A_T : La section transverse ; S : est la pente ; n : est un coefficient de rugosité tabulé ; q : est le débit d'apport latéral par unité de longueur du canal.

HEC-HMS représente les écoulements de surface sur un canal rectangulaire de largeur unité. Cette méthode est aussi utilisée pour les écoulements fluviaux. Dans les deux cas, la résolution des équations se fait par la méthode des différences finies pour assurer la précision et la stabilité.

Pour utiliser la méthode de l'onde cinématique dans la modélisation du ruissellement, le

bassin versant est décomposé en trois types d'éléments :

- Les plans de ruissellement de surface ;
- Les canaux de collection ;
- Le cours d'eau principal.

Les informations nécessaires à connaître pour chacun de ces éléments sont représentées sur le tableau ci-dessous.

Tableau II-2 : Diverses informations à connaître pour chaque élément du bassin.

Plans de ruissellement de surface	Collecteurs	Cours d'eau principal
Longueur caractéristique	Aire drainée par le canal	Longueur du canal
Pente représentative	Longueur caractéristique	Pente du canal
Coefficient de rugosité	Pente du canal	Forme de la section
Aire représentée par le plan	Forme de la section	Dimensions représentatives de la section
Paramètres de pertes	Dimensions représentatives de la section	Coefficient de Manning
	Coefficient de Manning	

3. Modélisation des écoulements souterrains (Base flow)

En plus des pertes, et du ruissellement le logiciel HEC-HMS permet de modéliser les écoulements souterrains. Ces écoulements prennent en compte à un instant donné :

- Les précipitations antérieures stockées temporairement dans les nappes souterraines;
- Les ruissellements dans le sous-sol dus à la tempête actuelle.

HEC-HMS propose trois modèles d'écoulement souterrain pour le choix :

a. Le modèle constant

Cette méthode est la plus simple des trois. Elle considère l'écoulement souterrain comme constant pendant des périodes d'un mois. Ce débit supplémentaire est ainsi additionné au ruissellement direct issu des précipitations à chaque itération du calcul global.

Pour pouvoir utiliser ce modèle, on doit connaître la valeur du débit de ces écoulements souterrains lorsqu'il n'y a pas de tempête, grâce à des mesures sur le terrain. Cet écoulement peut être négligé dans le cas de petits bassins versants et pour la plupart des bassins versants dits urbains.

b. Le modèle à récession exponentielle

Dans ce cas, on modélise le débit souterrain Q_t à un instant t , par la formule :

$$Q_t = Q_0 K \quad (\text{II-11})$$

Où : Q_0 est le débit souterrain à l'instant $t = 0$; K est défini comme étant le rapport du débit souterrain au temps t sur celui du lendemain.

La modélisation de Q_t peut être appliquée à la fois au début du modèle ou après un certain intervalle de temps appelé seuil, défini comme temps au bout duquel le débit global a atteint un certain pourcentage de son pic d'intensité maximale (exemple : 10%).

Q_0 est défini comme le débit moyen qui existe au début des précipitations mais est souvent ajusté à la valeur du débit moyen annuel. La constante K dépend quant à elle du bassin versant étudié et varie de 0.3 à 1 : $K \approx 1$ pour des grands bassins versants; et K se rapproche de 0.3 pour des petits bassins versants.

c. Le modèle à réservoir linéaire

Ce modèle est utilisé en combinaison avec le modèle SMA déjà présenté. Son principe est la comparaison du stockage et du mouvement de l'eau souterraine aux stockages et aux mouvements de l'eau dans un réservoir. Ce réservoir est dit linéaire car le débit sortant à chaque itération est une fonction linéaire du stockage moyen durant un pas de temps.

1. Modélisation des écoulements fluviaux

L'écoulement fluvial c'est le mouvement de l'eau sur le lit de la rivière. Pour la modélisation de ce processus, le HEC-HMS utilise différents modèles permettant de calculer un hydrogramme en aval du bassin versant, connaissant l'hydrogramme amont. Tous ces modèles utilisent les équations de continuité et de quantité de mouvement.

❖ Equation de continuité

Elle s'écrit sous la forme suivante : $A \frac{\partial V}{\partial x} + VB \frac{\partial y}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} = q$ (II-12)

où, B : Largeur de la surface libre ; q : Le débit unitaire, calculé par unité de longueur du canal et A : L'aire de la section du cours d'eau ;

❖ Equation de la quantité de mouvement

L'équation du mouvement s'écrit comme suit :

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (\text{III-13})$$

où, S_f : est le gradient hydraulique; S_0 : est le gradient au fond du canal ; V : vitesse d'écoulement ; y : hauteur hydraulique ; x : la longueur du chemin de l'écoulement; $\frac{\partial y}{\partial x}$: le gradient de pression ; $\frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x}$: l'accélération convective et $\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$: l'accélération locale.

Les principales hypothèses retenues lors de l'élaboration des ces équations sont :

- La vitesse est constante sur la surface et elle reste horizontale sur chaque section du cours d'eau ;
- La pression reste hydrostatique en chaque point du cours d'eau ;
- Aucune circulation latérale et secondaire ne se produit ;
- Le lit du canal est fixé ; l'érosion et le dépôt ne changent pas la forme de la section du canal ;
- La résistance à l'écoulement peut être décrite par des formules empiriques, telles que l'équation de Manning ou de Chézy.

a. Modèle de Puls (modified puls)

Ce modèle est basé sur une approximation en différences finies de l'équation de continuité, et sur une représentation empirique de l'équation de quantité de mouvement. On considère qu'il n'y a pas d'apports latéraux. L'équation de continuité devient alors :

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (\text{II-14})$$

On utilise alors la méthode des différences finies en écrivant que :

$$I_t - O_t = \frac{\Delta S_t}{\Delta t} \quad (\text{II-15})$$

Où, I_t et O_t sont les débits moyens respectivement amont et aval pendant une période Δt , ΔS_t étant la variation du stock d'eau durant le même pas de temps.

On obtient alors l'équation suivante :

$$\left(\frac{S_t}{\Delta t} + \frac{O_t}{2} \right) = \left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2} \right) + \left(\frac{S_{t-1}}{\Delta t} - \frac{O_{t-1}}{2} \right) \quad (\text{II-16})$$

Ainsi, au temps t , on connaît les termes de droite, et l'on cherche à déterminer les termes de gauche. On a donc deux inconnues S_t et O_t , et l'on doit donc connaître une

relation supplémentaire entre ces deux variables. Une fois cette relation déterminée, on résout le nouveau système d'équations par récurrence. En ce qui concerne la relation liant S_t à O_t , on peut la déterminer par des observations historiques des valeurs des débits et du volume d'eau stocké au cours du temps.

b. Modèle de Muskingum

Ce modèle utilise comme le modèle précédent une approximation simple en différences finies de l'équation de continuité :

$$\left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2}\right) - \left(\frac{O_{t-1} + O_t}{2}\right) = \left(\frac{S_t - S_{t-1}}{\Delta t}\right) \quad (\text{II-17})$$

On écrit ensuite que le volume d'eau stocké est la somme d'un volume stocké constant et d'une variation du stock :

$$S_t = T_p O_t + T_p X (I_t - O_t) = T_p (X I_t + (1 - X) O_t)$$

(II-18)

avec, T_p temps de parcours, et X paramètres permettant une pondération ($0 < X < 0.5$).

Ainsi, si le stockage d'eau dans la rivière est contrôlé par les conditions aval, on met $X = 0$ (On retrouve alors le modèle de réservoir linéaire présenté plus haut). Au contraire, on prendra $X = 0.5$, pour donner un poids similaire aux débits entrants et sortants.

Finalement, on obtient l'équation suivante :

$$O_t = \left(\frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) + \Delta t}\right) I_t + \left(\frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t}\right) I_{t-1} + \left(\frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t}\right) O_{t-1} \quad (\text{II-19})$$

Connaissant les valeurs de T_p , X , Δt pour tous les instants t , et de la condition initiale (O_0), HEC-HMS calcule par récurrence l'hydrogramme amont.

Les paramètres T_p et X peuvent être évidemment estimés par une série d'essais successifs corrigés au fur et à mesure. T_p , peut être aussi mesuré comme l'intervalle de temps entre deux points similaires appartenant respectivement aux hydrogrammes amont et aval.

c. Le modèle de l'onde cinématique

Ce modèle est basé sur une approche différences finies de l'équation de continuité et une approche simplifiée de l'équation de quantité de mouvement. Cette approche est déjà décrite en détail dans la section précédente. Les informations nécessaires à ce modèle sont :

- Le type de la section du cours d'eau : trapézoïdale, rectangulaire ou circulaire ;
- Les dimensions principales : la base de la section du canal, le diamètre de la conduite ;
- Pente des berges ;
- La longueur du bief ;
- La pente de ligne d'énergie ;
- Coefficient de la rugosité de Manning (n).

d. Le modèle du décalage (lag model)

Dans ce modèle on considère que l'hydrogramme aval est simplement l'hydrogramme amont décalé dans le temps d'une certaine durée (lag): La valeur de ce décalage peut être estimée comme la durée entre les deux pics des deux hydrographes (ou leurs centres de gravité respectifs). Ce modèle est le plus simple que tous les autres et est extrêmement utilisé surtout pour modéliser le drainage urbain.

e. Le modèle Muskingum-Cunge

Le modèle Muskingum est facile à utiliser mais emploie des paramètres qui n'ont pas de signification physique et qui sont donc difficiles à évaluer. De plus ce modèle est basé sur des approximations qui s'avèrent souvent fausses. Le modèle de Muskingum-Cunge évite ces erreurs. Il est basé sur l'équation de continuité incluant un débit latéral et sur la forme diffusive de l'équation de quantité de mouvement :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial X} = q \quad (\text{II-20})$$

$$S_f = S_0 - \frac{\partial Y}{\partial X} \quad (\text{II-21})$$

En combinant ces deux équations, on obtient alors l'équation de diffusion-convection de Miller et Cunge, 1975.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial X} = \mu \frac{\partial^2 Q}{\partial X^2} + cq_1 \quad (\text{II-22})$$

avec, c : La célérité et μ : La diffusivité hydraulique définie par :

$$c = \frac{\partial Q}{\partial X}, \quad \mu = \frac{Q}{2BS_0}$$

L'approximation en différences finies des dérivées partielles permet d'obtenir l'équation suivante:

$$O_t = C_1 I_{t-1} + C_2 I_t + C_3 O_{t-1} + C_4 (q_1 \Delta X) \quad (\text{II-23})$$

Avec :

$$C_1 = \frac{\frac{\Delta t}{K} + 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \quad C_2 = \frac{\frac{\Delta t}{K} - 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)}$$

$$C_3 = \frac{-\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \quad C_4 = \frac{2 \frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)}$$

$$K = \frac{\Delta X}{c} \quad X = 0.5 \left(1 - \frac{Q}{BS_0 C \Delta X} \right)$$

C, Q et B étant variables, les quatre paramètres C_i sont aussi variables. Ils sont recalculés à chaque pas de temps et d'espace par HEC-HMS.

En conclusion, le tableau suivant présente les seuils (minimale et maximale) acceptées par le logiciel le HEC-HMS pour les différents paramètres des modèles déjà cités :

Tableau II.3 : Les valeurs minimales et maximales des modèles acceptées par le HEC-HMS.

Modèle	Paramètre	Minimum	Maximum
Perte initiale et à taux constant	Perte initiale	0 mm	500mm
	Taux de perte constant	0mm/h	300mm/h
Modèle de perte SCS	Rétention initiale	0 mm	500 mm
	Curve Number (CN)	1	100
Modèle de perte de GREEN et AMPT	Déficit hydrique	0	1
	Conductivité hydraulique	0 mm/h	250mm/h
	Wetting front suction	0 mm	1000 mm
Hydrographe unitaire de CLARK	Temps de concentration	h	500 h
	Coefficient de stockage	0 h	150 h
Hydrographe unitaire de SNYDER	Décalage	0.1 h	500 h
	C_p	0.1	1.0
Hydrographe unitaire du SCS	Décalage	0.1 min	30 000min
Onde cinématique	Coefficient de Manning (n)	0	1
Ecoulement souterrain	Ecoulement souterrain initial	0 m ³ /s	100 000m ³ /s
	Facteur de récession	0.000011	-
	Rapport débit/pic max	0	1
Modèle de Muskingum	K	0.1 h	150h
	X	0	0.5

Onde cinématique pour les écoulements fluviaux	Nombre de pas	1	100
	Facteur N	0.01	10
Décalage	Décalage	0 min	30 000 min

II.3.2. Modélisation de la météorologie

La modélisation météorologique comprend la simulation de deux processus : les précipitations et l'évapotranspiration, deux composantes essentielles pour le calcul de la réponse hydrologique du bassin versant.

1. Modélisation des précipitations

Les précipitations peuvent être des données correspondantes à des relevés pluviométriques réels, à des événements pluvieux ordinaires ou exceptionnels, ou à des événements pluvieux théoriques basés sur une étude statistique.

a. Méthodes basées sur les coefficients de pondération

La modélisation de cette composante se fait par deux étapes : calcul de la moyenne surfacique des précipitations (P_{moy}), ensuite : détermination de la répartition temporelle des précipitations à partir de la répartition typique de l'évènement pluvieux ($P_{typ}(t)$).

La précipitation moyenne

La répartition moyenne des précipitations sur la surface du bassin versant est calculée par la moyenne arithmétique des relevées des stations pluviométriques en associant à chaque station un coefficient de pondération :

$$P_{moy} = \frac{\sum_i \left(w_i \sum_T p_i(t) \right)}{\sum_i w_i} \quad (\text{II-24})$$

Avec, w_i : Coefficient de pondération affecté au pluviomètre i et $P_i(t)$: hauteur des précipitations mesurée au pluviomètre i au temps t .

Les coefficients de pondération peuvent être calculés par des considérations surfaciques où le poids affecté à un pluviomètre est d'autant plus grand qu'il est représentatif d'une grande surface. On peut choisir pour cela, soit la méthode des polygones de Thiessen, soit celle du tracé des isohyètes. A défaut, on pourra aussi affecter des coefficients égaux pour tous les pluviomètres (i.e: $w_i = 1 / (\text{nombre de pluviomètres})$). Les méthodes utilisées pour le calcul de ces coefficient de pondération

sont :

- Moyenne arithmétique

Cette méthode calcul le même coefficient de pondération pour l'ensemble des stations se trouvant sur le bassin versant. Ce coefficient égal à l'inverse du nombre de stations.

$$w_i = \frac{1}{N} \quad (\text{II-25})$$

Avec, N : Nombre de stations pluviométriques.

- Polygones de Thiessen

Cette méthode permet de déterminer les coefficients de pondération en utilisant les polygones de Thiessen (figure II-2-a). Les coefficients de pondération sont calculés par

la formule : $w_j = \frac{a_{ij}}{A_i}$ (II-26)

Avec, a_{ij} : Surface d'intersection du « polygone j » et le « sous bassin i » et A_i : Surface totale du sous bassin i .

- Les isohyètes

Les isohyètes sont des lignes d'égale précipitation (de même pluviosité ou isovaleurs) (figure II-2-b). Les coefficients de pondération peuvent être calculés de la manière

suivante : $w_j = \frac{b_{ij}}{A_i}$ (II-27)

Avec, b_{ij} : Surface délimitée par le sous-bassin i et les deux isohyètes j et $j+1$ et A_i : Surface totale du sous-bassin i .

La pluie moyenne sur le sous-bassin i est calculée par la suite en utilisant la formule suivante :

$$P_{\text{moy}} = \sum_{j=1}^k w_j P_j, \quad \text{avec :} \quad P_j = \frac{h_j + h_{j+1}}{2} \quad (\text{II-28})$$

Avec, P_j : Précipitation moyenne entre deux isohyètes j et $j+1$; K : nombre total d'isohyètes

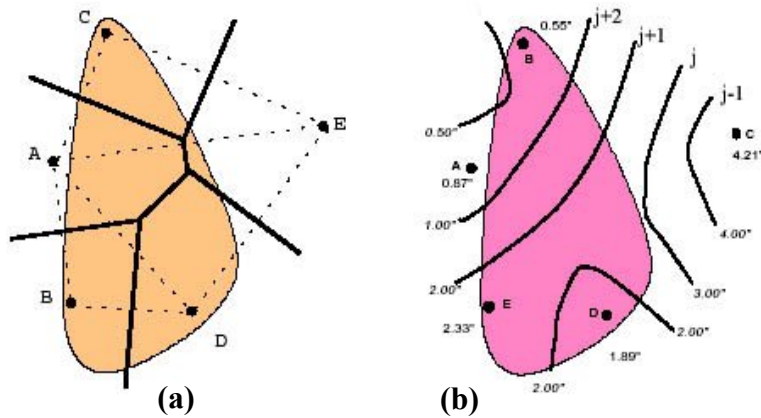


Figure II.2 : Illustration de la méthode des polygones de Thiessen et des isohyètes

Répartition temporelle

Une fois la moyenne surfacique des précipitations est calculée, il faut ensuite donner la répartition temporelle des précipitations à partir de la répartition typique de l'évènement pluvieux $P_{typ}(t)$:

$$P_{moy}(t) = \left[\frac{P_{typ}(t)}{\sum_t P_{typ}(t)} \right] P_{moy} \quad \text{où :} \quad P_{typ}(t) = \frac{\sum_j w_j P_j(t)}{\sum_j w_j} \quad (\text{II-29})$$

Avec : w_j : coefficients de pondération affectés au pluviomètre j .

b. Evènements pluvieux hypothétiques

On peut créer avec le logiciel HEC-HMS des évènements pluvieux (ou plus simplement : pluies) hypothétiques, c'est à dire réaliser une simulation à partir de données qui ne sont pas issues de relevés réels. Cela peut s'avérer utile en particulier lorsqu'on veut connaître les volumes d'écoulements pour dimensionner des ouvrages d'art.

On peut créer trois types d'évènements pluvieux standards :

- Pluie hypothétique basée sur la fréquence ;
- Pluie de projet standard : cette méthode fait intervenir des paramètres définis uniquement pour le territoire américain par certains organismes ;
- Pluie hypothétique dont la distribution est définie par l'utilisateur.

Pluie hypothétique basée sur la fréquence

L'objectif de cette méthode est de définir un évènement pour lequel la hauteur et la durée des précipitations sont déterminées pour une probabilité de dépassement donnée. Pour définir cet évènement avec HEC-HMS l'utilisateur doit spécifier la

hauteur de précipitation en chaque pas de temps pour une probabilité de dépassement choisi. Les hauteurs des précipitations peuvent être déduites à partir des courbes HDF (Hauteur Durée Fréquence). Généralement, la distribution de l'intensité des précipitations est non uniforme sur le bassin versant, la hauteur moyenne sur la surface du bassin est inférieure à la hauteur donnée par les courbes HDF. Pour palier à ce problème, le U.S. Weather Bureau, a défini des facteurs qui permettent d'ajuster les hauteurs données par les courbes HDF à la hauteur moyenne. Ces facteurs, exprimés en pourcentage, sont fonction de la surface du bassin et de la durée de la pluie.

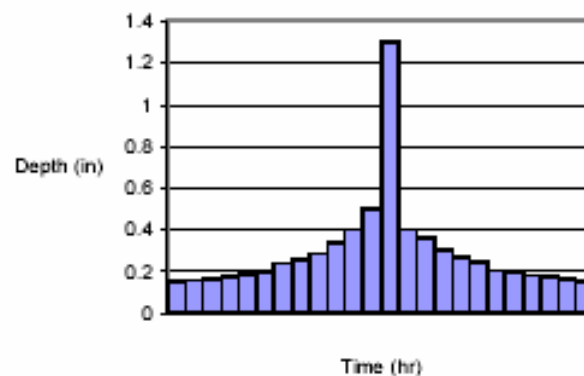


Figure II.3 : Exemple de la distribution de la Pluie basée sur la fréquence.

Pluie hypothétique dont la distribution est définie par l'utilisateur

Cette méthode permet à l'utilisateur de définir la hauteur et la distribution de la pluie hypothétique. On peut aussi donner la quantité totale d'eau tombée sur le bassin versant et la fraction de cette quantité à chaque instant, avec une courbe du type.

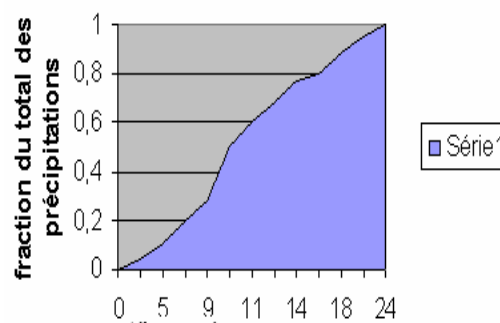


Figure II.4 : Répartition de la précipitation au cours de l'évènement

Il est important de définir un évènement pluvieux hypothétique d'une durée suffisamment longue pour que tout le bassin versant participe à l'écoulement. A titre indicatif un temps total égal à 3 fois le temps de concentration du bassin versant donne de bons résultats.

c. Modélisation de l'Évapotranspiration (ETP)

L'évapotranspiration, comme modélisée dans HEC-HMS, inclut la vaporisation de l'eau directement du sol et la transpiration des végétaux. Pendant les inondations, le HEC-HMS ne tient pas compte des détails de cette entité, parcequ'elle reste insignifiante pendant cette période. Dans le cas des orages plus courts, telle que la pluie de projet standard, il est approprié d'omettre cette entité. Cependant, avec le modèle SMA, déjà décrit dans la section Modélisation de pertes, il est possible d'analyser la réponse du bassin versant à des séries de précipitations de longue durée qui incluent les périodes de précipitation et des périodes sans précipitations. Pendant les périodes sans précipitations, l'état d'humidité du sol continue à changer et l'évapotranspiration est la composante critique de ce mouvement.

Dans HEC-HMS on représente l'Évapotranspiration par des valeurs et des coefficients de correction en pas de temps mensuel. Le taux d'évapotranspiration mensuel est calculé ensuite par le produit des valeurs de l'ETP par ces coefficients.

II.3.3. Les spécifications particulières de contrôle

À cette étape on définit les instants de départ et de la fin de la simulation, ainsi que le pas de temps pour lequel s'effectue le calcul. Cette étape est la dernière composante indispensable pour effectuer la simulation (*Beisée*, 2001).

a. La date

Le HEC-HMS est assez flexible quant à la manière de rentrer les dates. Il est conseillé toutefois de les rentrer de la façon suivante : 02 Jun 2008.

b. Le pas de temps

Le pas de temps peut varier de 1 minute et 24 heures. Pour le temps total de la simulation, le HEC-HMS réalise une interpolation linéaire pour obtenir les valeurs correspondant à un multiple entier du pas de temps dans lequel les données hydrométéorologiques sont mesurées.

II.4. Réalisation de la simulation avec le HEC-HMS

Le fonctionnant du Logiciel HEC-HMS sous l'environnement Windows est très souple. Les informations nécessaires pour la simulation sont groupées sous forme de projet qui peut-être sauvé sur un disque. Néanmoins, ce logiciel nécessite une étape de préparation de données, qui consiste en une schématisation du bassin versant en dehors de ce logiciel, ensuite l'importation des informations des différents éléments du bassin dans HEC-HMS.

II.4.1. Préparation des entrées du modèle de bassin

La préparation des données d'entrées 'modèle de bassin' est une partie incontournable pour toute modélisation hydrologique avec HEC-HMS. Cette préparation nécessite l'utilisation de plusieurs logiciels de SIG avec leurs extensions : Mapinfo, Arcview, Hec-GéoHMS, Spatial analyst, 3D analyst etc.

1. Schématisation du bassin versant

La préparation du modèle du bassin consiste à une schématisation du bassin versant à l'aide d'un logiciel de SIG, en le découpant tout d'abord en plusieurs sous-bassins élémentaires, ensuite récupérer l'ensemble des informations spatiales relatives au sous-bassins et aux cours d'eau et nécessaires pour la modélisation.

Cette schématisation, se réalise principalement par le traitement du modèle numérique d'altitude (MNA) avec le logiciel Hec-GéoHMS. Les informations récupérées seront ensuite traduites à des informations hydrologiques stockées dans le HEC-HMS. Les informations concernant les sous-bassins et les cours d'eau seront enregistrées dans un fichier d'extension « .Basin ». Ce fichier sera saisi par HEC-HMS après son importation. Un deuxième fichier d'extension « .map » contient l'information géographique des frontières des sous-bassins et des alignements des cours d'eau.

2. Importation du modèle de bassin dans HEC-HMS

Après avoir ouvert le logiciel HEC-HMS en, on passe à l'importation des entées du modèle de bassin. Pour ce faire, on clique sur le menu déroulant « component/Basin model/Import » puis on spécifie l'emplacement du fichier « .basin » (Figure (II.5)).

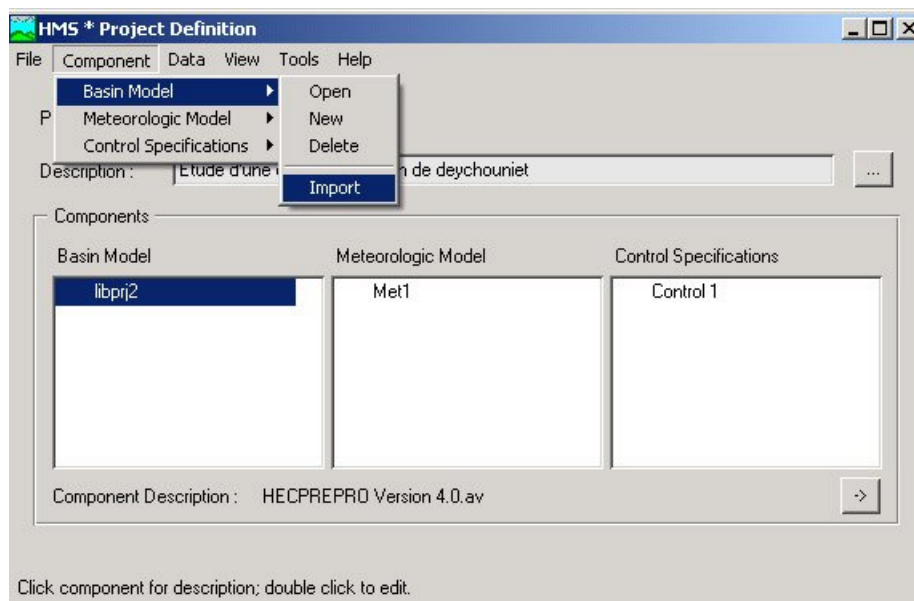


Figure II.5 : Importation du modèle de bassin dans HEC-HMS

II.4.2. Modélisation du bassin

Une fois que le modèle du bassin est importé sous l'interface HEC-HMS, nous devons spécifier, les modèles à utiliser pour calculer : les infiltrations, le ruissellement, les écoulements souterrains, et l'écoulement en rivière, et cela pour chaque élément composant le bassin (sous bassins et biefs). Chaque un de ces éléments possède un éditeur qui permet de sélectionner les méthodes de calcul permettant de le modéliser. Pour accéder à un éditeur d'élément il suffit de double-cliquer avec le bouton gauche de la souris sur l'élément en question (*BEISEE*, 2001) :

Les éditeurs d'éléments tels qu'ils sont affichés par HEC-HMS sont :

- L'éditeur de sous bassins : pour la modélisation des pertes, de ruissellement direct et des écoulements souterrains. L'utilisateur doit sélectionner un modèle pour chacun de ces processus grâce aux trois onglets de l'écran d'éditeur de sous bassin.
- L'éditeur de biefs : permet de choisir entre les différents modèles de calcul d'écoulement fluvial (transfert dans la rivière).

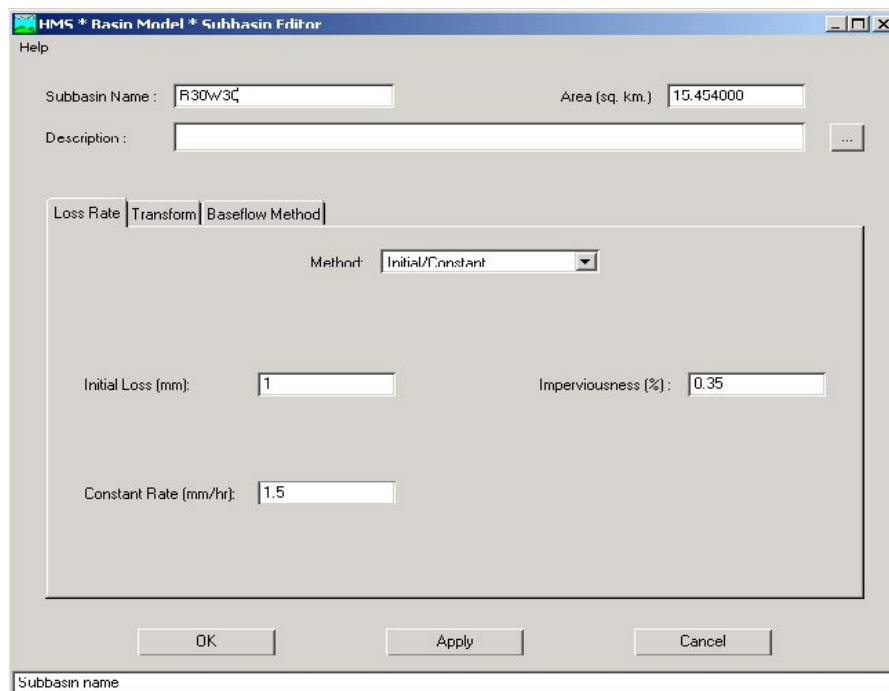


Figure II.6 : Modèles de pertes, de ruissellement et des écoulements souterrains

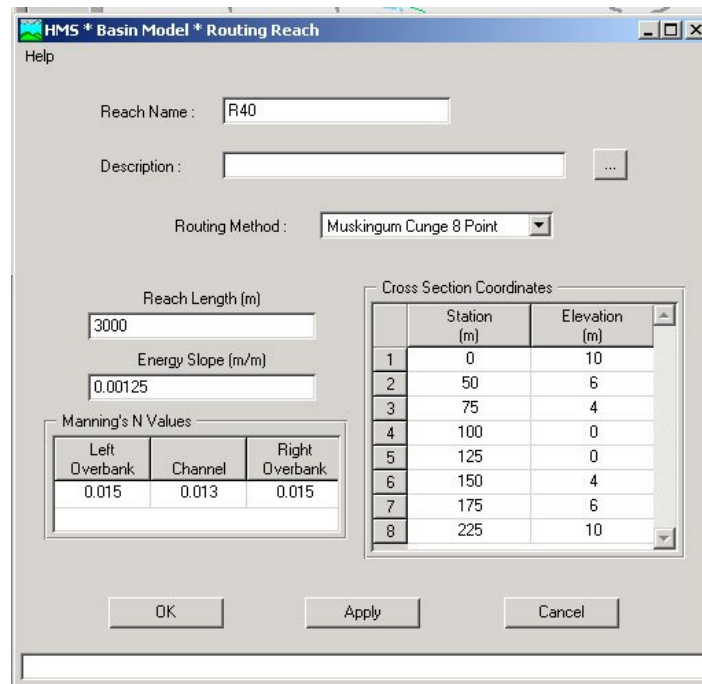


Figure II.7 : Modèles de transfert

II.4.3. Modèle météorologique

Les données météorologiques sont les données de précipitations et d'évapotranspiration mesurées sur le bassin versant. Elles sont données par les services de la météorologie dans des fichiers à format libre ou dans des tableaux. Le HEC-HMS saisit toutes ces données à partir d'un fichier d'extension « .DSS » (Data Storage System). Ce fichier est écrit en binaire sous un format bien spécifique.

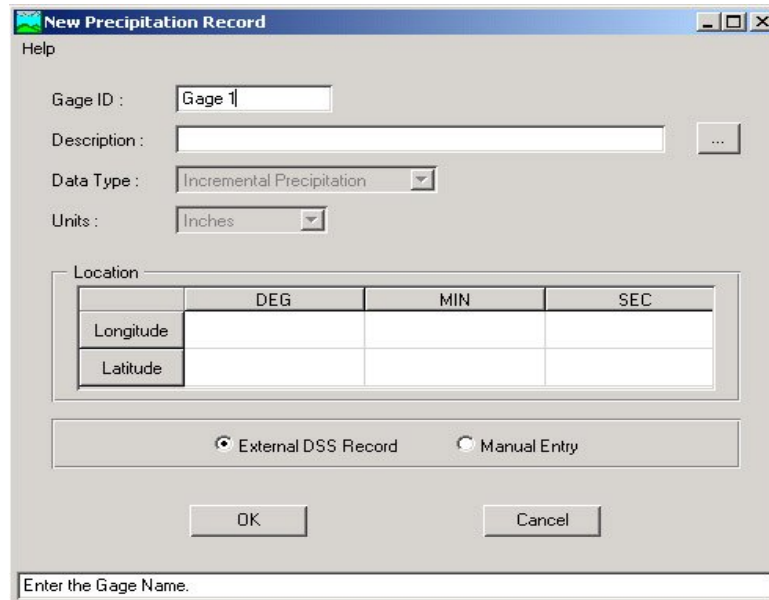
1. Introduction des précipitations

Pour introduire les données de précipitations dans HEC-HMS, on peut procéder de deux manières : Manuellement en saisissant directement les données sur un fichier du HEC-HMS, ou bien en moyennant le programme DSSUTL, qui nous permet de transférer automatiquement les données dans ce fichier.

DSSUTL est un programme écrit en fortran, il fournit les moyens d'exécuter des requêtes sur les données stockées dans le fichier DSS utilisé par HEC-HMS. Ces requêtes incluent : tabuler, éditer, copier, renommer et supprimer les données. Le programme offre également les possibilités du formatage et du copiage des données dans un fichier séquentiel ASCII pour pouvoir le transférer sur un autre ordinateur ou l'utiliser par un autre programme ou autre application.

Pour rentrer ces données dans HEC-HMS, sur le menu principale du logiciel, on clique sur « Data/precipitation Gages... ». Une fenêtre Windows s'affiche à l'écran

demandant à l'utilisateur de spécifier le mode d'introduction de données (Figure (II.8)), Soit via un fichier DSS externe, dans ce cas l'utilisateur doit spécifier le fichier DSS où sont stockées les données des précipitations, ou par une saisie manuelle directe des données.



	DEG	MIN	SEC
Longitude			
Latitude			

Figure II.8 : Spécification du mode d'introduction des données de précipitations.

Après avoir chargé les données de précipitations, on crée un nouveau modèle météorologique, pour ce faire, on clique sur le menu « Edit-Météorologic Model/New) de la fenêtre d'accueil de HEC-HMS, l'écran modèle météorologique apparaît (Figure (II.9)) avec deux onglets : Précipitation et Evapotranspiration.

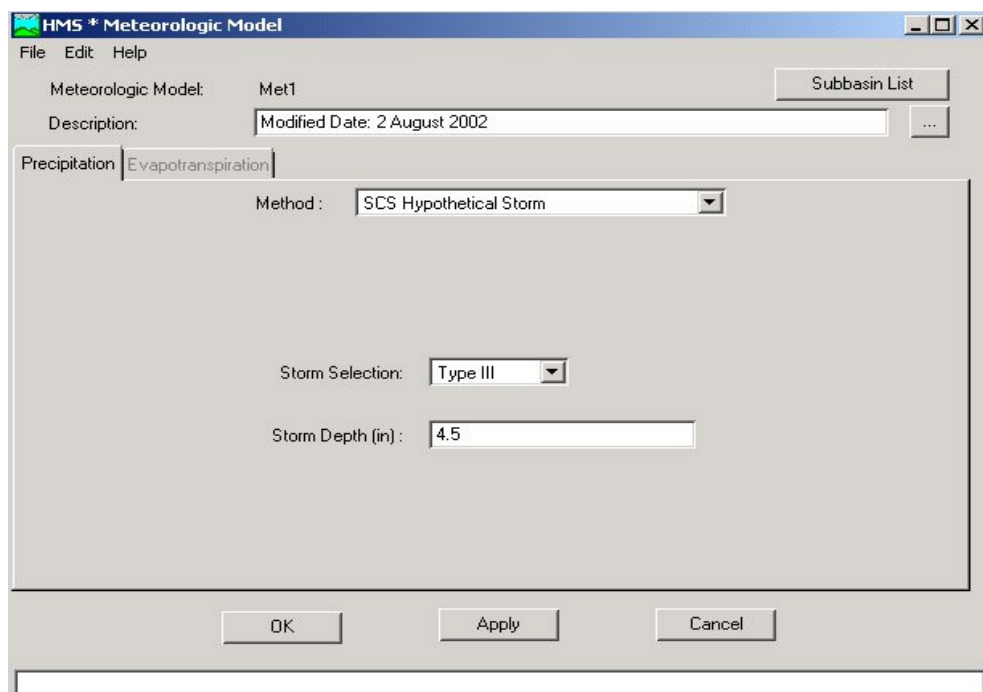


Figure II.9 : Fenêtre du modèle météorologique

HEC-HMS offre un choix de plusieurs modèles de calcul de précipitations. L'utilisateur doit sélectionner un modèle dans la case « Method » de l'onglet « Precipitation », puis sélectionner dans la rubrique « Subbasin List » (haut à droite) les sous bassins auxquels il va l'appliquer.

2. Introduction de l'évapotranspiration

Dans l'onglet Evapotranspiration, en général on sélectionne « No Evapotranspiration ». Le seul cas où l'on sélectionne « Monthly Average » est celui où l'on a choisi le modèle de perte SMA (déjà décrit dans la partie modélisation des pertes).

II.4.4. Paramètres de contrôle

Une fois que toutes les étapes précédentes sont réalisées, et toutes les données déjà citées sont entrées. On passe à la dernière étape avant l'exécution de la simulation. Cette étape est celle de spécifications de contrôle. Dans cette étape on définit les instants de départ et de la fin de la simulation ainsi que le pas de temps de calcul. (Figure (II.10)).

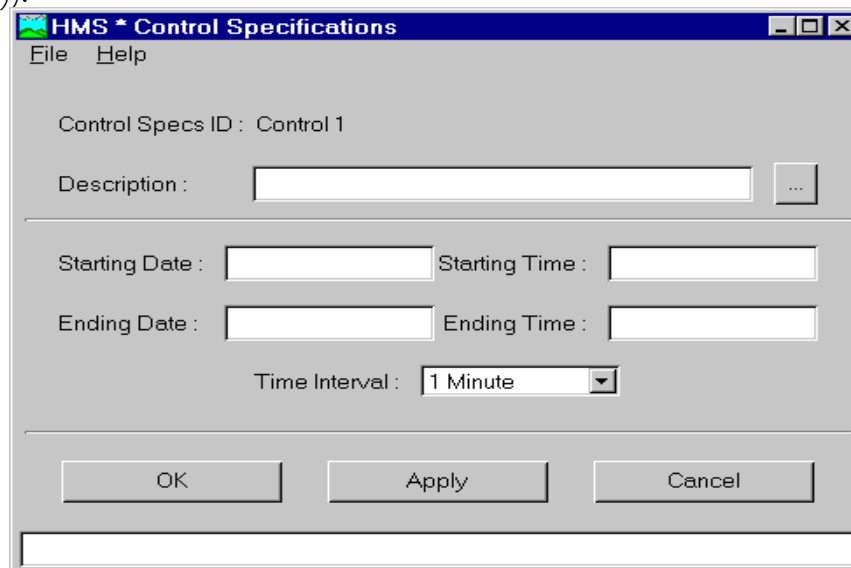


Figure II.10 : Fenêtre des Spécifications de contrôle.

II.4.5. Exécution de la simulation et visualisation des résultats

Après avoir introduit toutes les données concernant les trois parties de modélisation, il reste que le lancement de l'exécution. L'outil principal de cette opération est le gestionnaire d'exécution que l'on obtient à partir de l'écran « Basin Model ». L'exécution est lancée après avoir sélectionné un « Run ».

Les résultats de la simulation peuvent être visualisés à partir de l'écran modèle de bassin sous différentes formes, à savoir :

- Graphe (graph), pour chaque élément constituant le bassin versant : exutoires des sous bassins, biefs, jonctions, etc.
- Tableau de synthèse (Summary table), permettant d'obtenir des informations relatives aux pics d'intensité et aux volumes écoulés pour chaque élément du bassin versant ;
- Tableau détaillé (Time Series Table) relatif aux résultats calculés à chaque pas de temps.

II.4.6. Le calage du modèle

Le calage du modèle est la phase où l'on compare les résultats calculés lors de la simulation à ceux observés dans la réalité. On se sert pour cela d'un hydrogramme observé et d'un autre calculé, et on cherche à trouver une fonction mathématique représentant l'écart entre les deux résultats, ensuite réduire cet écart d'une manière à avoir la similitude.

Le but de ce calage est l'optimisation des paramètres du modèle, en trouvant un jeu de paramètres qui rapproche le plus possible le comportement modélisé à celui réel du bassin. La similitude des deux comportements étant qualifiée par une fonction critère (fonction objectif) mesurant l'écart entre les deux résultats.

La phase de calage contribue également à compenser les erreurs internes ou les imprécisions du modèle et les erreurs généralement contenues dans les données d'entrée.

1. Critères de comparaison

Le calage demande à la fois le choix d'un critère de qualité, d'une méthode pour identifier les paramètres, ainsi que de séries de données destinées à fournir l'information nécessaire au calage. On distingue deux types de critères d'évaluation des performances d'un modèle hydrologique :

- Les critères qualitatifs, qui font appel à des évaluations numériques ;
- Les critères quantitatifs, qui s'appuient généralement sur des observations graphiques.

Certains auteurs ont souligné qu'il n'existe pas de critère d'évaluation universel permettant de juger de la qualité d'un ajustement d'un modèle hydrologique. Ceci provient du fait que les gammes de variation des événements hydrologiques sur un bassin versant sont souvent assez étendues et que chaque classe de débit ne présente pas le même intérêt pour l'utilisateur du modèle. Au même titre que le choix de la forme d'une fonction objectif pour le calage du modèle. Celui de critères quantitatifs

d'évaluation reste lié aux objectifs de l'utilisateur (prévision des crues, simulation des étiages, gestion de la ressource en eau, etc.).

Le calage du modèle et le choix du critère de comparaison sont une phase délicate. Mais avec l'amélioration des moyens de calcul, on opte de plus en plus pour des méthodes automatiques de calage, par opposition à des techniques manuelles utilisant généralement des représentations graphiques.

2. Calage du HEC-HMS

Le calage du modèle s'effectue à partir de l'écran du gestionnaire de l'optimisation (Optimisation Manager). On crée un calcul d'optimisation en cliquant sur (Simulate-Optimization Run Configuration), et en choisissant les différents modèles utilisés, puis on lance les essais de calage en sélectionnant le bouton New Trial.

L'affichage des résultats des différentes tentatives d'optimisation des paramètres peut se faire de plusieurs manières :

- Résultats de chaque essai (Trial Results): permet de visualiser les paramètres symbolisant les écarts entre les hydrographes observés et calculés (Volume écoulé, pic d'intensité, ...);
- Graphe de comparaison (Flow Comparison Graph): permet de comparer les deux hydrographes visuellement;
- Graphique de dispersion (Scatter Graph): permet de visualiser le rapport hydrographe observé/hydrographe calculé par rapport à une droite d'angle 45°;
- Graphique des résidus (Residual Graph): permet de visualiser le débit résiduel pour chaque pas de temps;
- Objective (Function Graph): montre la valeur de la fonction servant à l'approximation de l'écart hydrographe observé calculé à chaque pas de temps;

II.5. Conclusion

Le HEC-HMS est un modèle hydrologique employé pour modéliser le processus pluie-débit et calculer les hydrogrammes de crues suites à des événements pluvieux intenses. La modélisation pluie-débit est menée pour plusieurs objectifs, comme : la prévision des crues, études des drainages urbains, la conception de réservoirs, la réduction des effets d'inondations. Le HEC-HMS offre une grande liberté dans la modélisation des bassins versants grâce aussi bien aux nombreux éléments composant le bassin, qu'à la variété des théories proposées pour modéliser les différents processus de cycle de l'eau.

Par à sa conception, le logiciel HEC-HMS fonctionnant sous l'environnement Windows offre une grande souplesse lors de la simulation. Il comprend une interface

graphique conviviale, des capacités pour la manipulation, la gestion et le stockage de données, ainsi que des possibilités d'affichage et d'impression des résultats. Néanmoins, ce logiciel nécessite l'intervention de quelques logiciels de SIG (Système d'Information Géographique) pour la préparation de ses données d'entrée.

Chapitre III :

*Présentation des caractéristiques du
bassin versant de la Soummam*

Chapitre III**Présentation des caractéristiques du bassin versant de la Soummam****III.1. Introduction**

Afin d'aboutir à une analyse des crues résultantes des précipitations, il est nécessaire de prendre connaissance en premier lieu de toutes les caractéristiques du bassin versant qui reçoit ces précipitations ; il convient donc dans ce chapitre de donner un aperçu sur les différentes caractéristiques du bassin, comme sa situation géographique et les climats dominants qui jouent un rôle déterminant sur les eaux précipitées. Nous aborderons également les caractéristiques morpho-métriques du bassin intervenant dans les modalités de l'écoulement superficiel durant les crues pluviales.

III.2. Définition

(*Loup J.*, 1974) définit le bassin versant de la manière suivante : le bassin versant est la surface réceptrice des eaux précipitées qui alimentent une nappe souterraine, un lac, une rivière ou un réseau complexe; on le définit par sa morphométrie, ses caractères climatiques, sa géologie, sa végétation, ses sols.

Le bassin versant est donc la surface élémentaire sur laquelle le cycle hydrologique peut être numériquement exprimé. C'est une surface fermée, qui suppose qu'il n'y a pas d'écoulement de surface ou hypodermique y pénétrant de l'extérieur et que tout les excédents de précipitation qui tombent sur cette surface s'écoulent à travers un cours d'eau principal. Le bassin versant est limité par la ligne de partage des eaux, et par l'exutoire qui est le point final de sortie du cours d'eau.

III.3. Situation géographique du bassin de la Soummam

Le bassin versant de la Soummam est situé dans la patrie Nord-Est de l'Algérie entre les longitudes 3°38' et 5°38' et les de 35°45' et 36°45' de latitude. Il est subdivisé en 10 sous bassins versants et il couvre une superficie de 9125km².

Le bassin de la Soummam s'étendant dans les directions Nord-Est, Sud-Ouest et vers le Sud-Est. Il se compose de trois régions principales : les plateaux de Sétif, les plateaux de Bouira et de la vallée de la Soummam. Il est limité au nord par les montagnes de la grande Kabylie (massif de Djurdjura), à l'est par les montagnes de la petite Kabylie, au sud par les montagnes de Bibans et de Mansourah, au sud-est par le contrefort des monts Hodna et à l'ouest, il est limité par les cours de l'Isser, et du Sébaou. Il présente donc une forme très irrégulière, et c'est dans cela que réside toute l'originalité de ses caractères physiques nettement contrastés : en quelques dizaines de km à vol d'oiseau,

on passe d'un secteur relativement plat et dénudé à un secteur montagneux à très forte pente, et d'un domaine semi-aride à un domaine humide Méditerranéen.

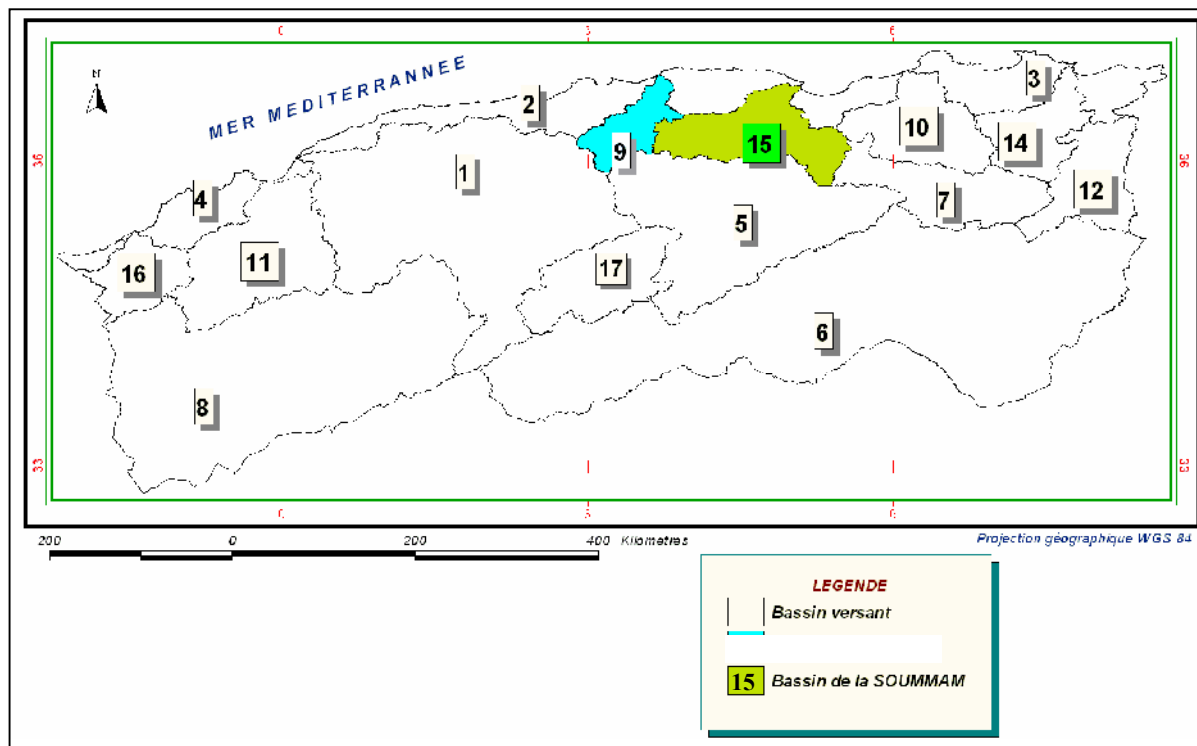


Figure III-1 : Position géographique du bassin de la Soummam

Tableau III.1 : La numérotation des bassins de l'Algérie d'après le service A.N.R.H

01 Cheliff	07 H.plaines constantinoises	13 Sahara
02 Côtiers algérois	08 H.plaines oranaises	14 Seybouse
03 Côtiers constantinois	09 Isser	15 Soummam
04 Côtiers oranais	10 Kebir Rhumel	16 Tafna
05 Chott hodna	11 Macta	17 Zahrez
06 Chott melghir	12 Medjerdah	

III.4. Aspect socio économique de la région

La région du bassin de la Soummam joue un rôle essentiel dans le développement de l'économie régionale et nationale :

- Dans le domaine agricole, elle représente un potentiel important de terres irrigables. Ces terres sont situées dans les plateaux sétifiens et les plateaux de Bouira, aussi en bordures immédiates de l'oued Soummam. Les principales spéculations agricoles sont : les agrumes, les oliviers, les vignes, les arbres fruitiers, et les cultures maraîchères.
- L'industrie occupe une place importante dans la région.

- La région abrite un certain nombre de villes et villages qui attirent et sédentarisent de plus en plus la population montagnarde de la région.
- Dans le domaine des communications, elle représente un axe très important et vital, à la fois régional et national sur le plan routier, ferroviaire, portuaire (port de Bejaia) et aérien (aéroport de Sétif et de Bejaia).
- Elle est empruntée sur toute sa longueur par l'Oléoduc Hassi Messaoud /Bejaia qui assure l'évacuation jusqu'au port de Bejaia d'une partie de pétrole extrait au sud de l'état.

III.5. Le climat de la région (Charifi, 2006).

Les caractéristiques climatiques dans le bassin versant de la Soummam ne sont pas uniformes. Il 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 Bou-Sellam) et climat des hautes plaines sur le haut bassin de l'Oued Bou-Sellam. Une carte des étages bioclimatiques est représentée dans la figure (III-2).

III.5.1 Climat littoral

La température moyenne varie de 18°C sur la côte à 15°C sur les reliefs très accentués. L'amplitude annuelle des moyennes mensuelles varie de 14°C à 16°C. L'humidité relative est assez élevée et présente un cycle diurne de très faible amplitude. Les moyennes annuelles sont de 70% à 18 heures et de 60 à 65 % à 13 heures. La pluviométrie moyenne annuelle croît modérément d'Ouest en Est, mais de façon plus nette avec l'altitude. Elle passe de 400 - 500 mm dans la vallée de la Soummam à 800 mm en altitude. Le régime pluviométrique présente un maximum de précipitations en Décembre et un minimum en Juillet. L'alternance des brises de mer et de terre constitue un des traits les plus caractéristiques de ce type de climat. Le sirocco souffle de 20 à 30 jours par an. Les gelées blanches sont excessivement rares, de 0 à 2 jours par an en moyenne.

III.5.2 Climat de l'Atlas tellien

Le climat de l'Atlas Tellien présente un degré de continentalité qui croît très rapidement au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la mer. Les températures moyennes annuelles décroissent de 17° C à 10° C par effet orographique et l'amplitude des moyennes mensuelles varie de même de 16° C à 20° C. L'humidité relative présente un cycle diurne assez marqué (moyennes annuelles : 70% à 7 heures et 50% à 13 heures). La pluviométrie annuelle moyenne décroît très sensiblement du Nord vers le Sud ainsi que des sommets vers les plaines. L'Atlas Tellien agit donc comme un rempart provoquant les précipitations les plus abondantes sur les

massifs les plus élevés et les plus proches de la mer. Ainsi, sur l'Oued Sahel, les précipitations annuelles peuvent atteindre 600 mm mais ne dépassent pas 400 mm sur la chaîne des Bibans.

Sur l'Oued Boussellam, la partie du bassin versant régie par le climat de l'Atlas Tellien reçoit des précipitations annuelles allant de 500 mm dans le Nord, à 200 mm dans le Sud. Il pleut en moyenne de 70 à plus de 100 jours par an. Le régime des pluies mensuelles présente généralement un maximum en Janvier et un minimum en Juillet et Août. L'enneigement est un trait caractéristique du climat de l'Atlas Tellien. La neige tombe en moyenne 20 jours par an sur les sommets (au dessus de 1200 m). La couche au sol est variable mais atteindrait 50 à 60 cm en moyenne aux altitudes dépassant 1.000 à 1.100m (Djebel Djurdjura et Babors principalement). Les gelées blanches ont une fréquence annuelle allant de 10 à 50 jours en moyenne et la vallée de la Soummam y est la plus exposée (plus spécialement dans les régions de Bouira - EL-Asnam et Maillot). Le sirocco souffle en moyenne de 30 à 75 jours par an, et là encore, sa fréquence est maximale dans la vallée de la Soummam (El-Asnam en particulier).

III.5.3 Climat des hautes plaines telliennes

Le climat des hautes plaines telliennes est typiquement continental :

Les températures moyennes annuelles varient de 15 à 10 °c en fonction de l'altitude croissante et l'amplitude des moyennes mensuelles oscille entre 20 et 21 °c.

La pluviométrie moyenne annuelle varie de 250 à 500 mm avec l'accroissement d'altitude. En général, il pleut de 50 à 100 jours par an. Le régime des pluies mensuelles présente un maximum principal en Janvier mais les pluies orageuses d'automne et de printemps prennent sous ce climat une importance non négligeable, principalement en Mai où l'on observe fréquemment un maximum secondaire.

Les gelées blanches sont très fréquentes (60 à 70 jours par an en moyenne). Elles se produisent de Novembre à Avril avec un maximum en Janvier (15 jours en moyenne). Le sirocco est également fréquent (40 à 55 jours par an en moyenne). Il faut toutefois noter la position privilégiée de Sétif pour laquelle les fréquences des gelées blanches et du sirocco sont respectivement de 34 et 15 jours par an.

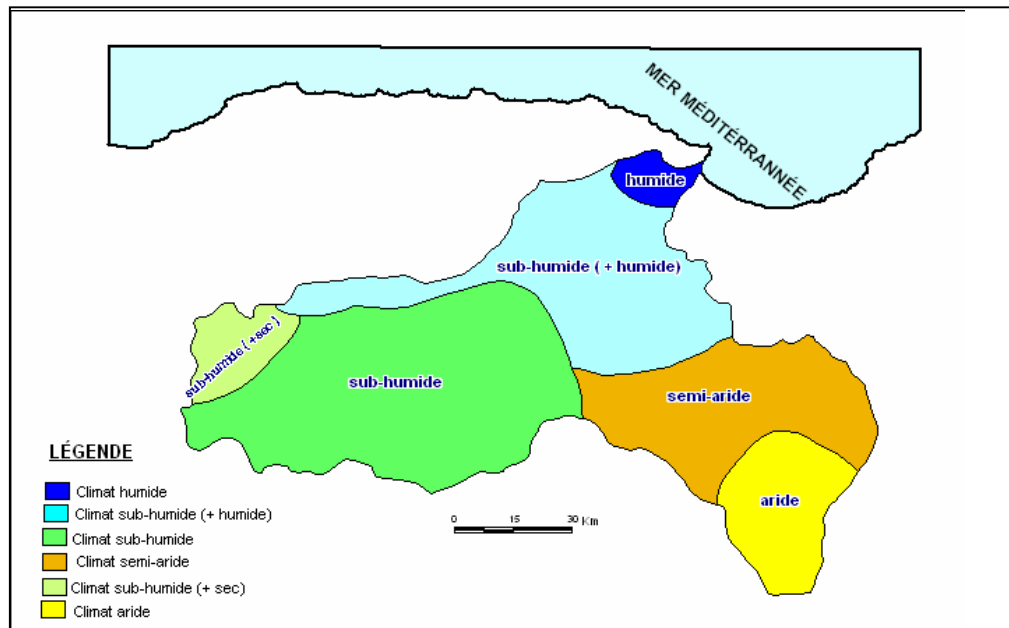


Figure III-2 : Etages bioclimatiques du bassin de la Soummam (Charifi, 2006)

III.6. Couvert végétal

La végétation est un paramètre physique important des bassins. Suivant sa nature, sa diversité et sa densité, le couvert végétal influence directement 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.

La végétation du bassin versant de la Soummam est de type Méditerranéen et est très variée. Les régions alluvionnaires de la haute Soummam sont occupées par des chênaies. La basse et moyenne Soummam sont occupées par des oliveraies et des vignobles. Dans la région de la moyenne Soummam, le couvert végétal est moins dense.

Dans la plaine, la végétation est dense mais essentiellement temporaire ; elle est formée par les grands et formidables champs de cultures maraîchères diverses. Jadis, 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.

III.7. La Géologie

La figure (III-3) représente les différentes formations géologiques de la région de la Soummam :

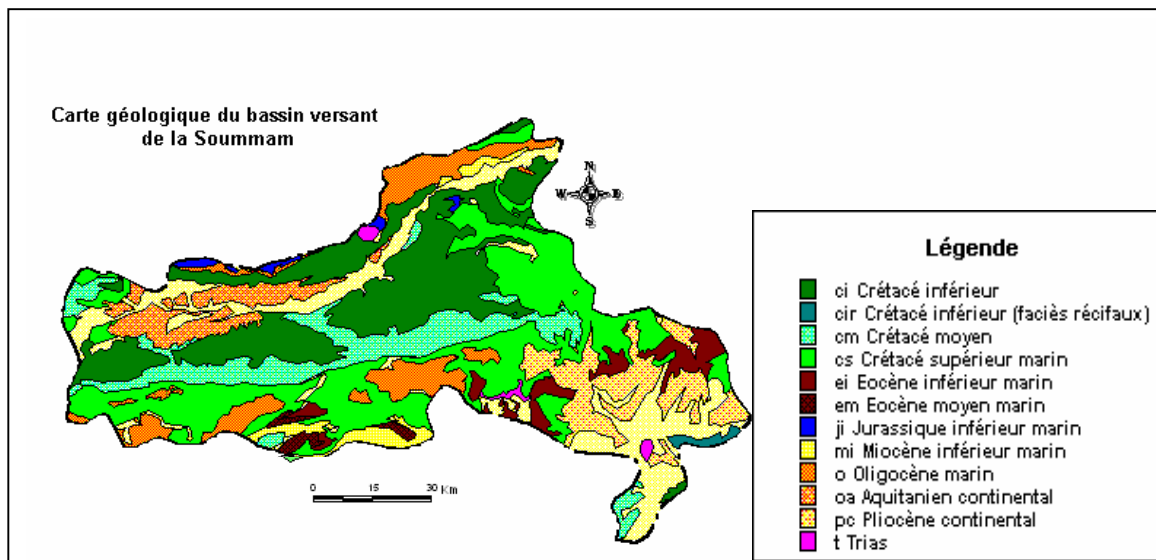


Figure III-3 : Carte géologique du bassin versant de la Soummam (Charifi, 2006)

Les éléments de la légende :

- **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 Dj. 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 forme de flyschs. Il est étendu, continu depuis la 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 grésopélimitique, 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 calcaro-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 grès rougeâtres dans le Tell septentrional.

III.8. Les sols

La carte des sols du bassin de la Soummam a été extraite de la carte des sols de l'Algérie au 1/500.000^e. La numérisation de cette carte est présentée dans la figure suivante :

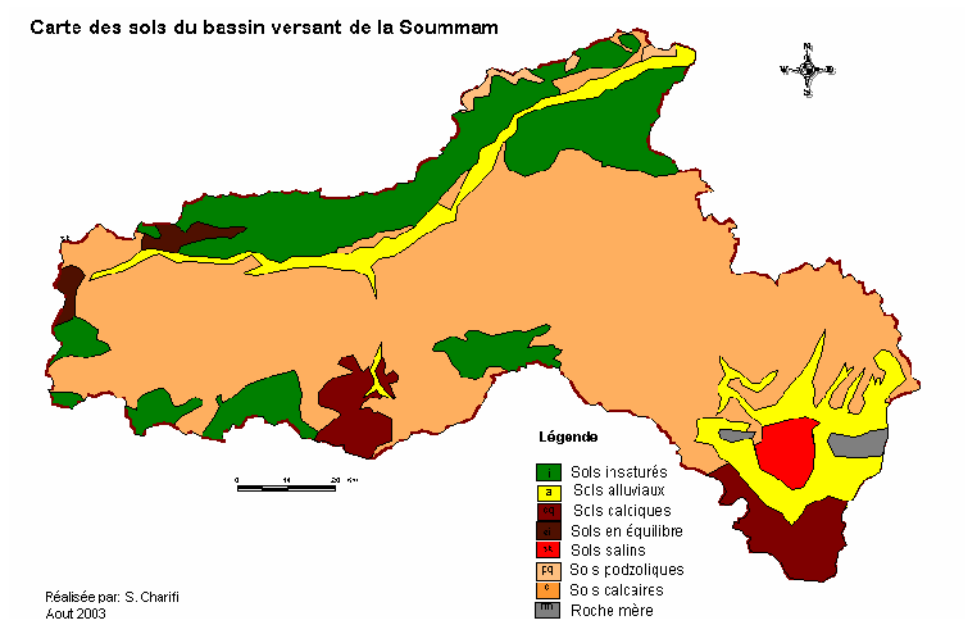


Figure III-4 : Carte des sols du bassin de la Soummam

La majorité des sols dans le bassin de la Soummam sont des sols calcaires (riches en calcaire). Leur complexe absorbant est modifié par l'eau d'une façon telle que H peut atteindre 20% de la capacité totale. Ces sols ont généralement une texture légère et sont donc perméables. Lorsque les matières organiques atteignent 25%, on est en présence de la variété humifère de ces sols, qui peuvent présenter alors une texture relativement lourde allégée par la présence des matières organiques.

Au nord du bassin, on rencontre des sols insaturés qui ne contiennent pas de calcaire dont l'argile peut être plus abondante en surface qu'en profondeur ; leurs roches mères sont généralement imperméables ou donnent des produits de décomposition imperméables.

Le long des oueds, les sols existants sont des dépôts alluviaux appelés sols alluviaux à profil indifférencié ou présentent une simple accumulation de matières organiques en surface. En outre on rencontre, en petites quantités, des sols calciques et des sols en équilibre peu épais, plus ou moins riches en calcaire et très pauvres en sels solubles.

III.9. Réseau Hydrographique

Le bassin versant de la Soummam possède un réseau hydrographique très développé. Trois rivières et leurs affluents constituent son squelette hydrographique fondamental : le Sahel, affluent venant du nord-ouest, le Boussellam venant du sud-est et la Soummam, qui se forme à Akbou à la confluence du Sahel et du Boussellam et coule en direction du nord-est vers la mer (figure III-5).

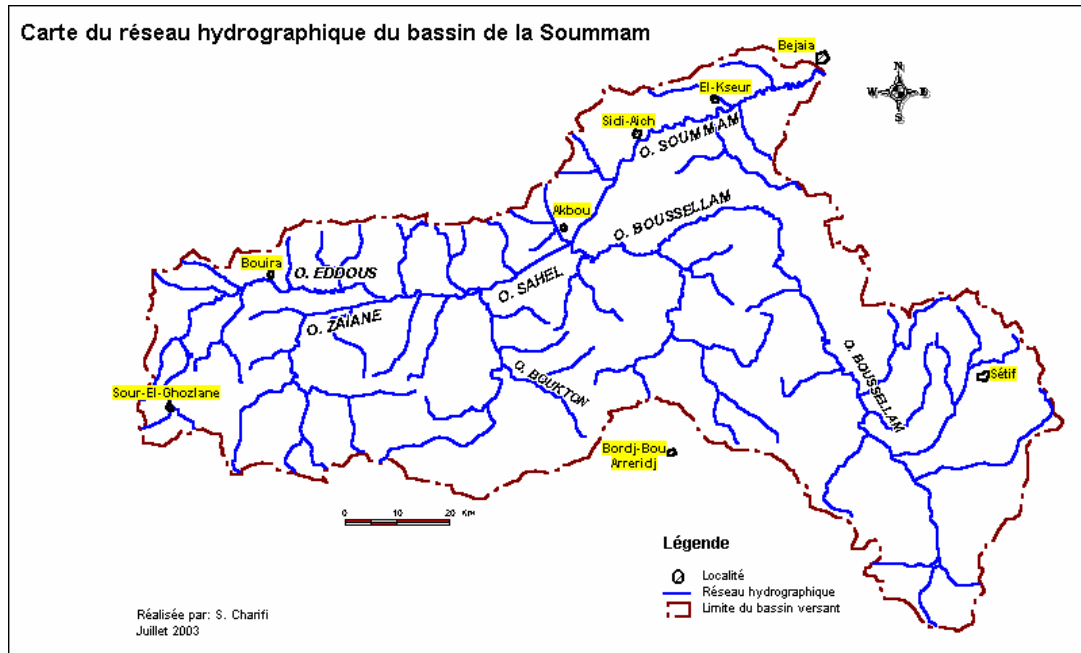


Figure III-5 : Carte du réseau hydrographique du bassin de la Soummam

Le réseau hydrographique du bassin de la Soummam compte 09 principaux oueds totalisant une longueur de 726 Km qui varie de 23 à 226 Km.

Le graphe ci – dessous représente les principaux oueds du bassin.

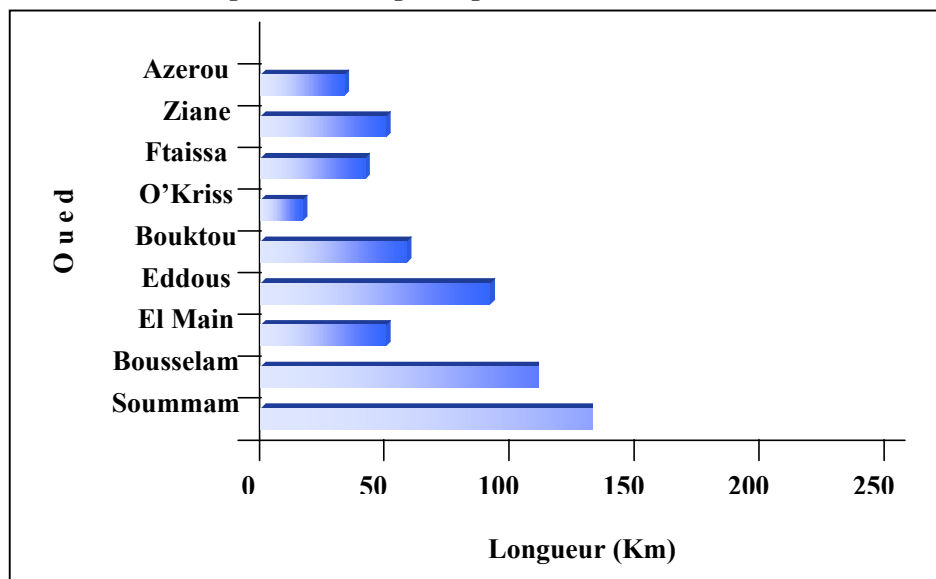


Figure III-6 : Longueur des principaux oueds du bassin

III.9.1. Description de l'oued de la Soummam

L'oued Soummam résulte de la jonction à l'amont immédiat de la ville d'Akbou de deux oueds importants : L'oued Bou-Sellam qui prend naissance aux hauts plateaux de Sétif (Fermatou) et l'oued sahel formé par la confluence de l'oued Ziane et l'oued Ed-Dous provenant de Bouira (Sour el Ghozleane), Il atteint la mer immédiatement à Bejaia.

Son lit mineur, de 90 km de largeur, se développe dans une vallée comprise entre deux massifs montagneux élevés aux pentes assez raides : la grande Kabylie au Nord-Ouest, la petite Kabylie et la chaîne des Bibans au Sud-Est.

Le fond de la vallée proprement dit a une largeur de l'ordre de 2 km, avec des resserrements jusqu'à 100 m de largeur comme dans la gorge à l'amont de Sidi- Aich et des élargissements jusqu'à 4 ou 5 km comme dans la région d'El Kseur ou la plaine de Bejaia à l'embouchure.

La direction générale de l'écoulement dans la vallée est de Sud-Ouest/Nord-Est, sa longueur 60 km ; la vallée d'Akbou est située à l'extrémité Sud-Ouest (limite amont) et la ville de Bejaia, au bord de la mer Méditerranée, à la limite Nord-Est.

Le débit moyen d'oued Soummam est estimé à 25 m³/s environ, mais il est le siège de crues violentes et dévastatrices. La plus grand crue observée est celle de décembre 1957 à un débit estimé à 3000 m³/s.

La figure III-7 suivante représente le profil en long de l'oued Soummam :

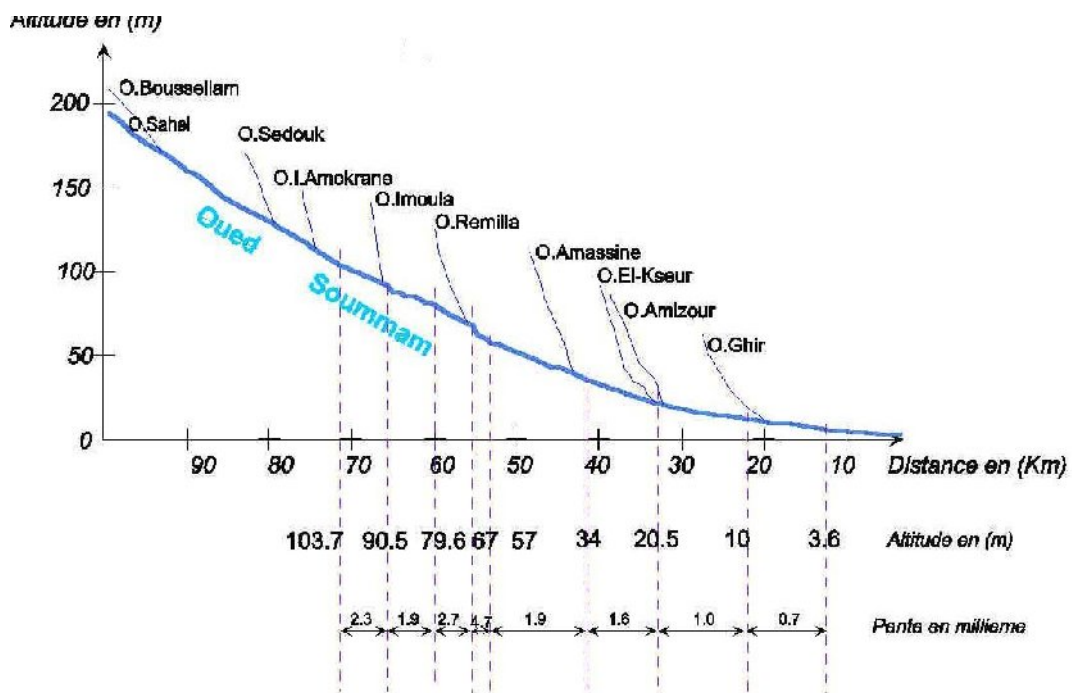


Figure III-7 : Profil en long de l'oued Soummam

III.9.2. Classification du chevelu hydrographique

De nombreuses études se sont intéressées à la classification des cours d'eau d'un réseau hydrographique, dans le but de donner une information synthétique de la morphologie du bassin d'alimentation. Plusieurs classifications ont été proposées dont les deux plus usuelles sont celles de Horton (1945) et de Strahler (1952). Ces deux classifications utilisent le terme de bief, qui correspond à la fraction du réseau hydrographique comprise soit entre deux confluences soit entre une source et une confluence. Le bief est dit bief intérieur dans le premier cas et bief extérieur s'il est issu d'une source. Comme la classification de Horton (1945) se définit par des règles d'indexation des biefs à partir de la notion de cours d'eau le plus long, on lui préfère la classification de Strahler (1952) régie par les trois règles suivantes :

1. tout bief sans affluent est d'ordre 1
2. quand deux biefs d'ordre i et j différents, avec $i > j$, convergent, le bief aval est d'ordre i
3. quand deux biefs de même ordre i convergent, le bief aval est d'ordre $i+1$.

Cette classification permet de hiérarchiser les biefs suivant leur degré de connexion. On définit le tronçon comme l'ensemble des biefs de même ordre, successifs dans le sens de l'écoulement. L'ordre du bassin appelé magnitude du réseau et noté Ω , est défini comme l'ordre le plus élevé des tronçons du bassin ; c'est par conséquent l'ordre du tronçon à l'exutoire. Le chevelu hydrographique du bassin versant de la Soummam classé selon STRAHLER est d'ordre 7.

III.9.3. Le degré de développement du réseau

Le degré de développement du réseau hydrographique est mesuré par les paramètres suivants :

1. La densité de drainage

Le drainage du bassin est habituellement caractérisé par la **densité de drainage**, définie comme le rapport entre la longueur cumulée des drains du bassin et sa surface.

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \quad (\text{III.1})$$

avec, D_d : densité de drainage [km/km^2] ; L_i : longueur de cours d'eau [km] et A : surface du bassin versant [km^2].

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques. En pratique, les valeurs de densité de drainage varient de 3 à 4 pour des régions où l'écoulement n'a atteint qu'un

développement très limité et se trouve centralisé ; elles dépassent 1000 pour certaines zones où l'écoulement est très ramifié avec peu d'infiltration. Selon Schumm, la valeur inverse de la densité de drainage, $C=1/D_d$, s'appelle « constante de stabilité du cours d'eau ». Physiquement, elle représente la surface du bassin nécessaire pour maintenir des conditions hydrologiques stables dans un vecteur hydrographique unitaire (section du réseau).

2. La densité hydrographique

La densité hydrographique appelée aussi la fréquence de drainage, est définie comme le nombre de drains du bassin par unité de surface.

$$F = \frac{\sum N_i}{A} \quad (\text{III.2})$$

où, F : densité hydrographique [km^{-2}] ; N_i : nombre de cours d'eau ; A : superficie du bassin [km^2].

Il existe une relation assez stable entre la densité de drainage D_d et la densité hydrographique F , de la forme :

$$F = a \cdot D_d^2 \quad (\text{III.3})$$

Où, a est un coefficient d'ajustement.

3. Coefficient de torrentialité

Le coefficient de torrentialité est obtenu à l'aide de la relation :

$$C_t = \frac{N_1}{A} \cdot D_d \quad (\text{III.4})$$

avec, N_1 : nombre de talwegs d'ordre 1 ; A superficie du bassin en Km^2 ; D_d : densité de drainage en Km / Km^2 et C_t : coefficient de torrentialité

Le tableau suivant donne les valeurs de différentes caractéristiques du réseau hydrographiques du bassin de la Soummam.

Tableau III.2 : Paramètres hydrographiques du bassin de la Soummam

Paramètres	Valeurs
Classification du chevelu hydrographique	Ordre 7
Densité de drainage	0.70 km / km ²
Densité hydrographique	0.20 km ⁻²
Coefficient de Torrentialité	0.108
Constante de stabilité	1.43

III.10. Caractéristiques physiques et morphométriques

Le milieu physique dans lequel évolue le cycle hydrologique varie d'un bassin à un autre en fonction d'un certain nombre de paramètres physiques, morphologiques et géométriques qui interviennent, et souvent de façon combinée, dans les modalités l'écoulement fluvial. L'analyse et la mesure de ces paramètres permettent une meilleure compréhension des causes de variation des régimes hydrauliques d'un bassin.

Le bassin versant de la Soummam se compose de dix sous bassins dont les limites correspondent à celles des unités hydrologiques contrôlées par des stations hydrométriques, c'est pourquoi l'étude des caractéristiques physiques se fait pour chaque partie contrôlée par les stations de jaugeage.

III.10.1. Paramètres morphométriques

Les différents paramètres morphométriques d'un bassin versant (forme, altitude, pente, relief, etc.) jouent un rôle essentiel dans son comportement hydrologique. Ils ont l'avantage de se prêter à une analyse quantifiée qu'il convient de préciser autant que possible, dès le début de toute étude.

La forme du bassin joue un rôle important sur l'allure de l'hydrogramme de crue résultant d'une averse donnée à l'exutoire du bassin. Un bassin très allongé ne réagira pas de la même manière qu'un bassin de la forme très ramassée (Roche, 1963), plus sa forme est allongée et tourmentée, plus les pointes de crue seront petites et indifférentes à la dimension du bassin. Les bassins en forme d'éventail ont les plus forts points de la crue.

La forme des bassins versants qui peut être traduite par **l'indice de compacité de Gravelus** a également une influence certaine sur l'écoulement.

Les différentes grandeurs déterminantes la forme d'un bassin versant sont les suivantes :

1. L'indice de compacité de Gravelus

Il est établi en comparant le périmètre stylisé du bassin considéré à celui d'un cercle ayant la même surface.

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{III.5})$$

$$P = 2\sqrt{\pi A}, \text{ et } \frac{1}{2\sqrt{\pi}} = 0,28$$

Où, P : périmètre du bassin en km et A : superficie du bassin en km².

L'indice de forme kc est égal à l'unité pour un bassin circulaire, et croît d'autant plus que la compacité diminue.

Les valeurs de l'indice de compacité permettent de montrer que le bassin de Bou-Sellam amont contrôlé par la station de Fermatou constitue le bassin le plus compact ($K_G = 1,09$) alors que le bassin le plus allongé correspond à celui de l'oued Soummam ($K_G = 1,46$) au niveau de la station de Sidi Aich.

2. Dimensions du rectangle équivalent

La notion du rectangle équivalent permet de ramener la forme quelconque d'un bassin versant à une forme rectangulaire ayant la même superficie, le même périmètre et le même indice de compacité. Cette notion a été introduite pour pouvoir comparer des bassins entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques géométriques sur l'écoulement.

Ses dimensions sont données par les expressions suivantes :

$$K_G = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{III.6})$$

$$L \cdot I = A$$

$$2(L + I) = P = \frac{1}{0,28} K_G \cdot \sqrt{A}$$

Avec, L : longueur du rectangle équivalent ; I : largeur du rectangle équivalent ; P : périmètre du bassin versant ; A : surface du bassin versant et K_G : indice de compacité du bassin versant.

La résolution de ce système d'équation nous donne :

$$\mathbf{L} = \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_G} \right)^2} \right] \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1,128} ; \text{ et } \mathbf{I} = \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_G} \right)^2} \right] \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1,128} \quad (\text{III.8})$$

$$\text{avec : } K_G \geq 1,128$$

Les dimensions du rectangle équivalent du BV de la Soummam sont regroupées dans le tableau (III.3).

Les dimensions d'un bassin n'ont pas une influence essentielle sur la moyenne à long terme du volume d'écoulement, mais sont très importants pour les crues et la répartition des débits au cours de l'année. Plus le bassin est petit, plus les débits de crues par unité de surface sont grands et moins les écoulements sont repartis dans le temps.

III.10.2. Paramètres du relief

Le relief joue un rôle indéniable sur le comportement hydrologique d'un bassin versant, 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 chaînes de Djurdjura, au sud par les montagnes de Bibans et des Djebels Mansourah, à l'est par les montagnes de la petite Kabylie. En allant de Bouira vers Akbou, l'orographie du bassin est très prononcée, l'altitude en ces régions n'est en aucun endroit inférieure à 1500 m. C'est dans cette région qu'est situé le point culminant de la Soummam (2306m). L'altitude diminue graduellement en avançant d'Akbou vers la mer.

Les montagnes de la petite Kabylie sont également prononcées du point de vue altitude, leur plus haut sommet atteint les 2004m au Djebel Babor. De même, les chaînes montagneuses du sud ne restent pas orthographiquement en arrière par rapport aux massifs cités précédemment, les pics sont atteints à Bibans (1832m) et Djebel Mansourah (1836m).

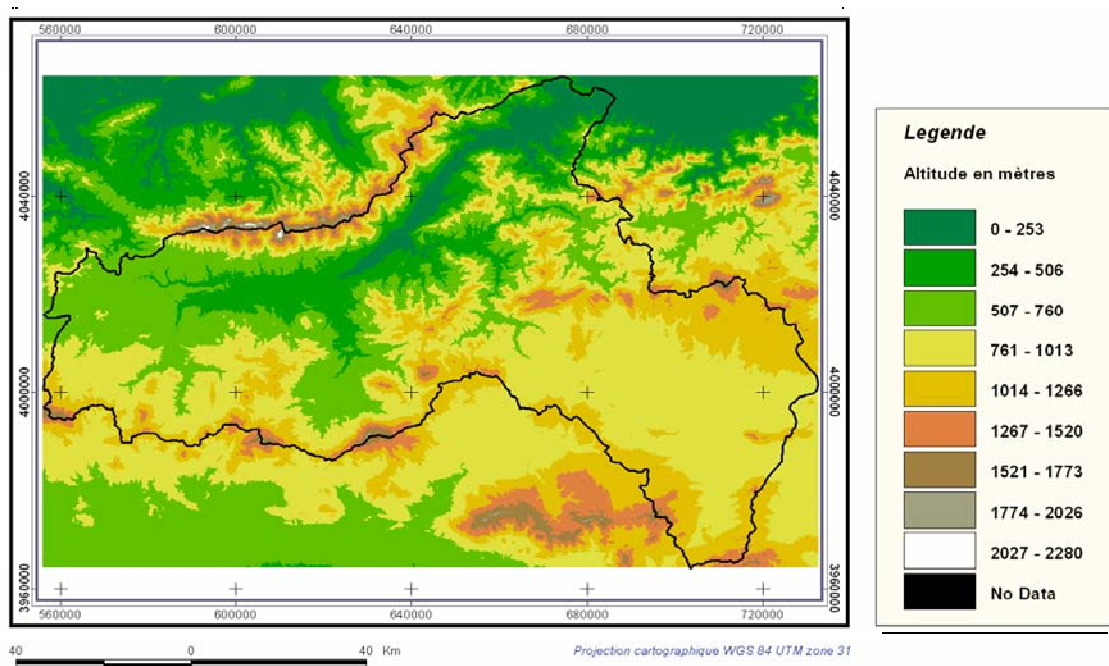


Figure III.8 : Carte du relief du bassin versant de la Soummam

1. Les altitudes caractéristiques

L'altitude joue un rôle important dans le comportement des facteurs hydrologiques, il est intéressant de calculer la répartition du bassin versant (en km² et en % de la superficie totale) par tranches d'altitude. Il existe quatre types d'altitudes caractéristiques qu'on peut calculer à partir de la courbe hypsométrique :

a - L'altitude moyenne

Les altitudes moyennes des sous bassins contrôlés par des stations hydrométriques ont été calculées par les services de l'A.N.R.H à partir de leurs courbes hypsométriques respectives.

$$\bar{H} = \frac{A}{L} \quad (\text{III.9})$$

\bar{H} : Hauteur moyenne à partir du plan de base adoptée ; A : superficie planimétrée de la courbe enveloppe représentant le volume du bassin et L : longueur (abscisse de la courbe) représentant par définition la surface du bassin en projection sur un plan horizontal qui est celui de la carte.

b - L'altitude médiane

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière.

c - Les altitudes maximale et minimale

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire. Ces deux données deviennent surtout importantes lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologiques telles que la température, la précipitation et le couvert neigeux. Elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente.

2. La courbe hypsométrique

Le relief est caractérisé par la courbe hypsométrique qui donne la répartition des altitudes des sous bassins en fonction des surfaces correspondantes. Elle est obtenue en portant sur l'axe des abscisses les surfaces cumulées des surfaces partielles comprises entre deux courbes de niveau successives (I_i , I_{i+1}) et les altitudes correspondantes sur l'axe des coordonnées.

La courbe hypsométrique demeure un outil pratique pour comparer plusieurs bassins entre eux ou les diverses sections d'un seul bassin. Elle peut en outre servir à la détermination de la pluie moyenne sur un bassin versant et donnent des indications quant au comportement hydrologique et hydraulique du bassin et de son système de drainage. La courbe hypsométrique est obtenue par le cumul de l'histogramme des altitudes et elle permet de calculer l'altitude moyenne, l'altitude la plus fréquente et l'indice de pente globale du bassin

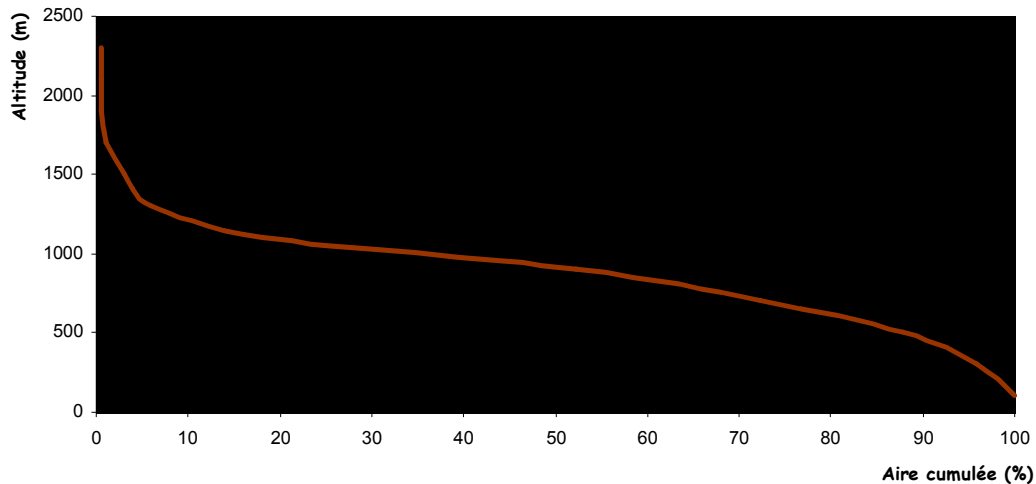


Figure III.9 : Courbe hypsométrique du bassin de la Soummam

Le tableau suivant résume les différentes caractéristiques morphométriques du bassin versant de la soummam.

Tableau III.3 : Caractéristiques du bassin de la Soummam

Caractéristiques	Valeurs
Aire	9200.00 km ²
Périmètre	655.00 km
Indice de compacité (Gravelius, 1914)	1.63
Altitude maximale	2308.00
Altitude minimale	2.00 m
Altitude moyenne	785.00m
Altitude médiane	900.00 m
Indice de pente global	0.45 %
Largeur du rectangle équivalent	40.00 km
Longueur du rectangle équivalent	240.00 km

III.11. Les potentialités en eau dans le bassin de la Soummam

III.11.1. Les eaux souterraines

Les unités hydrogéologiques du bassin de la Soummam se répartissent comme suit :

- Nappe de la haute et moyenne Soummam,
- Nappe de la basse Soummam,
- Nappe d'El Asnam,
- Nappe des hautes plaines Sétifiennes.

L'estimation de la ressource en eau souterraine dans le bassin de la Soummam faite sur la base des résultats du PNE (Plan Nationale de l'Eau), basée sur la méthode

d'approche Pluie –Infiltration. Cette méthode a abouti aux résultats donnés dans le tableau suivant :

Tableau III.4 : Estimation des eaux souterraines dans le bassin de la Soummam

Source de l'étude	Méthode utilisée	Potentialité (Hm ³ /an)
PNE	Pluie -Infiltration	153

III.11.2. Eaux superficielles

Les potentialités en eaux superficielles sont données dans le tableau III.5 suivant :

Tableau III.5 : Potentialités en eaux superficielles du bassin de la Soummam

Sous B.V	Code	Sup. du B.V .5Km ²	Apport annuel (Hm ³)
Bousselam	150401	4.309	165.4
Eddous -Sahel	150302	3.755	167.0
Soummam	151001	1.061	132.7
Total		9.125	465.1

III.12. Mobilisation de la ressource en eau

III.12.1. Eaux superficielles (Barrage et retenues collinaires)

Le bassin de la Soummam compte :

- ⇒ 02 barrages en exploitation, d'une capacité totale de 155Hm³.
- ⇒ 02 barrages en cours de construction d'une capacité de 247 Hm³
- ⇒ 73 retenues collinaires d'une capacité totale de 13 Hm³

Tableau III.6 : Caractéristiques des barrages du B.V Soummam (Source A.N.R.H, 2006)

Barrage	Oued	Surface (Km ²)	Capacité (Hm ³)	Volume régularisé (Hm ³)	Destination	Année de mise en service
Ain Zada	Bousselam	2080	125	50	-Sétif, BBA, El Eulma	1986
Lekhal	lakhal	189	30	17	-Ain Bessam, Sour El ghozlane, El Hachimia	1985
Sous Total			155	67		
Tichy Haf	Bousselam	1520	80	150	-AEP et AEI de Bouira et ville limitrophe	En construction
Tilesdit	Eddous	843	167	73	-AEP et AEI du couloir Akbou -Bejaia	

Sous Total	-	-	247	223	-	-
TOTAL	-	-	402	290	-	-

III.12.2. Eaux souterraines

La mobilisation de la ressource en eau est donnée dans le tableau III.7.

Tableau III.7 : Mobilisation de la ressource en eaux souterraines

Wilaya	Nombre de forage	Volume produit (hm ³)	Affectation		
			Eau potable	Irrigation	Industrie
Bouira	27	2.3	2.3	0	0
Bejaia	207	145.00	60.00	71	14
B.B.A	29	7.00	5.00	2	0
Sétif	47	25.00	21.00	2	2
Total	310	179.30	88.30	75	16

III.13. La météorologie

III.13.1. Pluviométrie

La pluviométrie moyenne annuelle pour l'ensemble du bassin de la Soummam est de **511** mm, oscillant entre **300** et **1000** mm en augmentant de l'Ouest vers l'Est.

Le bassin englobe **41** stations pluviométriques et **11** stations hydrométriques les écoulements annuels de surface sont estimées à **684** millions de m³.

III.13.2. Evapotranspiration

Du point de vue répartition spatiale, l'évapotranspiration potentielle (ETP) s'accroît du nord au sud contrairement à l'évapotranspiration réelle (ETR) qui évolue parallèlement à l'augmentation des températures et des précipitations ; les plus fortes valeurs de l'ETR sont atteintes dans le bassin inférieur où toutes les conditions favorables se trouvent réunies : températures élevées, précipitations abondantes et couvert forestiers dense.

L'évapotranspiration potentielle annuelle calculée d'après l'ANRH varie entre **1214** et **1569** mm, et pour la majeure partie du bassin, elle est de l'ordre de **1382** mm.

III.14. Réseau hydro-pluviométrique

Le bassin de la Soummam est équipé d'un réseau de mesure hydrométrique et pluviométrique important. La plus parts des sous bassin contiennent donc des stations de jaugeage, seulement par manque d'entretiens plusieurs stations ont connues de disfonctionnement durant plusieurs années, ce qui rend la présence des lacunes dans la plus parts des séries statistiques.

III.14.1. Stations de mesures hydrométriques

Le tableau suivant donne la liste des stations hydrométriques existantes, avec leurs positions géographiques, période d'observation, ainsi que la moyenne des prélèvements interannuelle.

Tableau III.8 : Stations de mesures hydrométriques

Code	Station	Oued	S. B.V (Km ²)	X (Km)	Y (Km)	Période d'observation	Apport interannuel	Etat
150106	Tilsdit	Eddous	842	626.3	340.6	1964-1986	107.00	OP
150114	Ain testa	Lekhal	190	591.4	329.6	1973-1993	10.20	OP
150204	El Asnam	Ziane	800	620.4	335.5	1967-1993	16.40	OP
150401	Porte de Fer	Azerou	605	650.7	342.0	1968-1993	102.00	OP
150601	Fermatou	Bousselam	105	742.0	329.4	1970-1995	12.50	OP
150701	Ain Zada	Bousselam	105	741.0	329.4	1971-1982	15.95	OP
150702	Magraoua	Bousselam	2350	713.2	333.1	1986-1994	13.50	OP
150703	Boubirek	Bousselam	2950	689.6	354.5	1971-1993	123.80	OP
150709	o.Mosley	Bousselam	1443	723.3	313.9	/	/	OP
150901	Sidi Yahia	Bousselam	4050	670.4	347.1	1971-1995	165.40	OP
151001	Sidi Aich	Soummam	84.20	678.2	369.7	1953-1990	465.10	OP
Total	11							

III.14.2. Stations de mesures pluviométriques

Le tableau suivant présente les stations pluviométriques, avec leurs coordonnées planimétriques et altimétriques.

Tableau III.9 : Stations de mesures pluviométriques

Code	Station	X (Km)	Y (Km)	Altitude (m)	Pluviométrie* (mm)
150101	Sour El Ghozlane	589.3	317.6	850	457
150102	Ain Bassem	587.55	332.9	682	492
150103	El Hachimia	600.7	325.1	730	404
150104	Sidi Attaf	685.75	342.55	836	663
150105	Bouira	607.85	342.95	531	479
150109	Assameur	628.7	348.00	1000	1037
150110	Ain Allouane	624.1	348.35	1025	811
150111	Irorhat	617.3	345.1	580	625
150201	Taghdit souk el kh	616.5	303.18	1000	519
150204	El assnam sh	620.4	335.5	440	379
150301	Michedallah	640.9	341.7	465	422
150311	El adjiba	633.8	339.00	390	354
150401	Portes de fer	650.7	324.2	445	303
150403	Mansourah	659.2	310.10	700	303
150501	Tazmalt	652.7	344.2	350	427

150503	Ighil Ali	658.9	338.9	650	467
150603	Guellal	737.1	308.15	908	326
150606	Sétif pc	743.6	323.8	1081	487
150607	Ain Arnat	734.9	323.55	1100	401
150608	Bouira Coligny	732.00	326.65	1017	471
150609	Elouricia	743.55	334.9	1089	491
150610	Fermatou	742.00	328.6	1043	384
150611	Mahouane	737.75	332.95	1178	475
150612	Sétif INGC INRA	740.10	321.8	970	397
150613	Zeiri	745.75	337.5	1130	510
150614	Tixter	715.00	308.25	956	352
150703	Bou Birek	689.6	354.5	400	652
150704	Bougaa	714.65	339.6	886	500
150706	Ain Abessa	733.10	336.4	1070	546
150707	Bir kasdali	709.5	318.4	980	378
150708	Beni Ourtilane	693.00	351.4	1020	606
150720	Titest mc	700.2	332.5	1120	660
150801	Sidi Embrarek	699.1	313.9	1011	331
150802	Zemmourah	692.8	331.8	950	579
150902	Guelaa	669.00	334.7	1060	417
151002	Akbou	665.4	353.00	240	481
151003	El kseur	692.9	377.75	85	717
151005	Dom.R.Messaoud	700.7	377.70	25	659
151006	Seddouk	678.00	362.10	370	520
151007	Tifra	678.70	375.70	450	891
151014	Sidi Aich	678.60	370.15	105	595
Total	41	-	-	-	511**

*Pluviométrie calculée à partir des séries d'observation entre (1922-1960 et 1960-1989).

**Moyenne arithmétique.

III.15. Conclusion

L'analyse des caractéristiques du bassin versant de la Soummam nous a permis de tirer les synthèses suivantes :

- Le bassin de la Soummam a une forme allongée très irrégulière, il s'étendant dans les directions Nord-Est, Sud-Ouest et le Sud-Est. Il est composé de trois régions principales : les plateaux Sétifiennes, les plateaux de Bouira et de la vallée de la Soummam.
- Le climat dans le bassin est non uniforme. Il est sous la dépendance de trois types de climat : climat littoral tempéré, climat de l'Atlas Tellien et climat des hautes plaines ;

- Le bassin possède un réseau hydrographique très développé (ordre 7). Trois rivières et leurs affluents constituent son squelette hydrographique fondamental : le Sahel, affluent venant du nord-ouest, le Boussellam venant du sud-est et la Soummam, qui se forme à Akbou à la confluence du Sahel et de Boussellam et coule en direction du nord-est vers la mer ;
- Le relief a une forme très irrégulière, et la ligne de partage des eaux est formée par des chaînes de montagnes dont l'altitude allant de 1000 à 2004m ;
- Un couvert végétal de type Méditerranéen et une qualité du sol très variée.

La connaissance de ces différentes caractéristique ainsi que leurs paramètres représentatifs nous permis de déterminer les données exigés par les codes de calculs pour la simulation du comportement du bassin versant ainsi que dans les études de prévision des crues.

Chapitre IV :

*Elaboration du modèle numérique
du B.V de la Soummam*

Chapitre IV**Elaboration du modèle numérique de terrain
du bassin versant de la Soummam****IV.1. Introduction**

Les enjeux majeurs auxquels il faut faire face aujourd'hui (environnement, aménagement de territoire...), ont tous un lien étroit avec le géoréférencement et la géographie. Il apparaît donc nécessaire que pour une meilleure connaissance des phénomènes liés à la nature ou à l'activité humaine de disposer d'un ensemble d'informations sur le milieu naturel considéré. Pour satisfaire ce besoin, on fait recours aux nouvelles technologies apparues, notamment à celles dites des systèmes d'informations géographiques.

Les techniques de représentation par les systèmes d'Informations Géographiques (**SIG**) relèvent de la mise en commun des dernières technologies de l'information, des sciences géographiques et de la cartographie pour regrouper les données de sources diverses. Ces techniques permettent le recueil, l'analyse et l'exploitation des données ainsi que leur partage par l'intermédiaire du réseau parmi plusieurs utilisateurs.

Les modèles numériques de terrain (MNT) sont l'une des manifestations des systèmes d'informations géographiques, élaborés dans le but de représentation de l'espace naturel avec toutes ces informations caractéristiques : le relief (topographie) et l'occupation du sol (hydrographie, ressources naturelles, type du sol, couvert végétal, ...). Ces informations sont groupées dans des systèmes appelés Bases de Données (BD), et l'information particulière contenue est utilisée pour plusieurs objectifs, à savoir : l'analyse, la compréhension et la représentation des phénomènes liés à la surface terrestre.

IV.2. Présentation des SIG**IV.2.1. Définition**

De nombreuses définitions des SIG existent mais toutes incluent des expressions communes et de même ensemble de fonctions touchant à la cartographie, aux bases de données et à l'analyse spatiale. On se limite ici à une seule définition qui est la suivante :

« Un système d'information géographique est un système informatique permettant à partir de diverses sources, de rassembler, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement contribuant notamment à la gestion de l'espace », cette définition est celle adoptée par le comité

scientifique du colloque international : (Intégration de la photogrammétrie et de la télédétection dans les SIG : utilisation et qualité) (*Ider*, 2004).

L'acronyme SIG signifie :

- **Système** : est : « Combinaison d'éléments réunis de manière à former un ensemble ».
- **Information** : est : « élément de connaissance susceptible d'être codé pour être conservé, traité ou communiqué ».
- **Géographique** est « relatif à la géographie ayant pour objet la description de la surface de la terre ».

Un SIG est donc simplement un ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire des synthèses utiles à la décision.

Le rôle du système d'information géographique est de proposer une représentation plus ou moins réaliste de l'environnement spatial en se basant sur des primitives géographiques tels que des points, des arcs, des polygones (vecteurs) ou des maillages (raster). A ces primitives sont associées des informations qualitatives ou tout autre information contextuelle.

Le SIG s'avère un outil puissant au travers de sa capacité à représenter la réalité sous la forme de cartes thématiques par couches d'informations (distribution spatiale d'une catégorie d'entité paramétrable). Il permet de croiser les données de sources différentes ainsi que de gérer de larges bases de données (SGBD).

Les mesures et les échantillons de la base de données doivent représenter le monde réel de manière aussi exhaustive et consistante que possible. Néanmoins, la complexité du monde réel est si grande que l'on crée des modèles de la réalité qui ne sont que des représentations simplifiées. Le contenu d'une base de données (BD), à référence spatiale, présente donc une vue partielle du monde réel (représentation aussi particulière).

IV.2.2. Mise en œuvre des SIG

Pour mettre en œuvre un SIG, il est nécessaire de suivre la démarche décrite par les étapes suivantes :

- définir l'objectif du projet de SIG ;
- acquérir les données pertinentes ;
- géoréférencer les données acquises ;
- traiter les données et interpréter les résultats ;
- établir le rapport final.

L'objectif d'un projet de SIG est lié à son domaine d'application, qui peut être : militaire, administratif (urbanisme, transport, télécommunication), économique

(ressources naturelles, agriculture, etc.), d'éducation, de recherche (hydrologie, géologie, etc.).

IV.2.3. Principe de fonctionnement

Un SIG stocke l'information sous forme de couches thématiques (figure IV-1) pouvant être reliées les une aux autres par la géographie. Ce concept, à la fois simple et puissant, a prouvé son efficacité pour résoudre de nombreux problèmes concrets (*Gilliot, 2000*).

L'information géographique contient soit une référence géographique explicite : latitude et longitude, grille de coordonnées, etc. ou une référence implicite : adresse, code postal, nom d'une route,...etc. Le géocodage, processus automatique, est utilisé pour transformer les références implicites en références explicites et permettre ainsi de localiser les objets et les événements sur la terre afin de les analyser.

Une autre décomposition est souvent utilisée : l'information spatiale qui décrit la localisation et la forme des objets géographiques, et l'information descriptive qui renseigne sur la nature et les caractéristiques des objets géographiques.

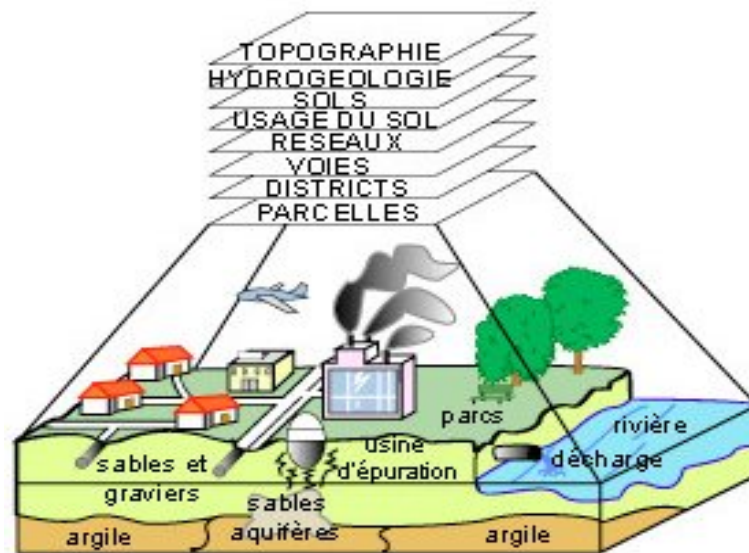


Figure IV-1 : SIG; un ensemble de couches d'information superposées

(Source : [www.Seig.ensg.ign.fr])

IV.2.4. Fonctionnalités du SIG

Les fonctions principales exécutées par un SIG se résument généralement par la règle des cinq (5) « A » suivants (*Laaribi, 2000*) :

- ❖ **Acquisition (entrée de données)** : fonction de numérisation et d'importation de transformation des données spatiales et thématiques (Digitalisation, Scannage, Saisie au clavier (Manuelle), etc.);
- ❖ **Archivage (stockage de données)** : Les fonctions de stockage et de gestion des données permettent de structurer les données spatiales et leurs informations

attributaires, dans une forme qui leur permettent d'être rapidement mobilisées par l'utilisateur pour diverses opérations. Cela implique l'utilisation d'un système de gestion de base de données (SGBD) pour le maintien des données attributaires.

- ❖ **Analyse (manipulation de données)** : Les fonctions de l'analyse et la manipulation des données permettent à l'utilisateur de définir et d'exécuter un traitement spatial des données pour produire des informations dérivées. Ce sous-système est généralement considéré comme le cœur du SIG, et le distingue des autres systèmes de dessin assistés par ordinateur (CAO).
- ❖ **Affichage** : cette fonction permet à l'utilisateur de visualiser l'information géographique (Cartes, tables, rapports et graphiques, documents textes ...)
- ❖ **Accès à distance** : cette fonction permet l'accès à l'information pour plusieurs utilisateurs même à distance à travers des réseaux internes ou externes.

Le schéma ci-dessous représente les fonctionnalités principales des SIG :

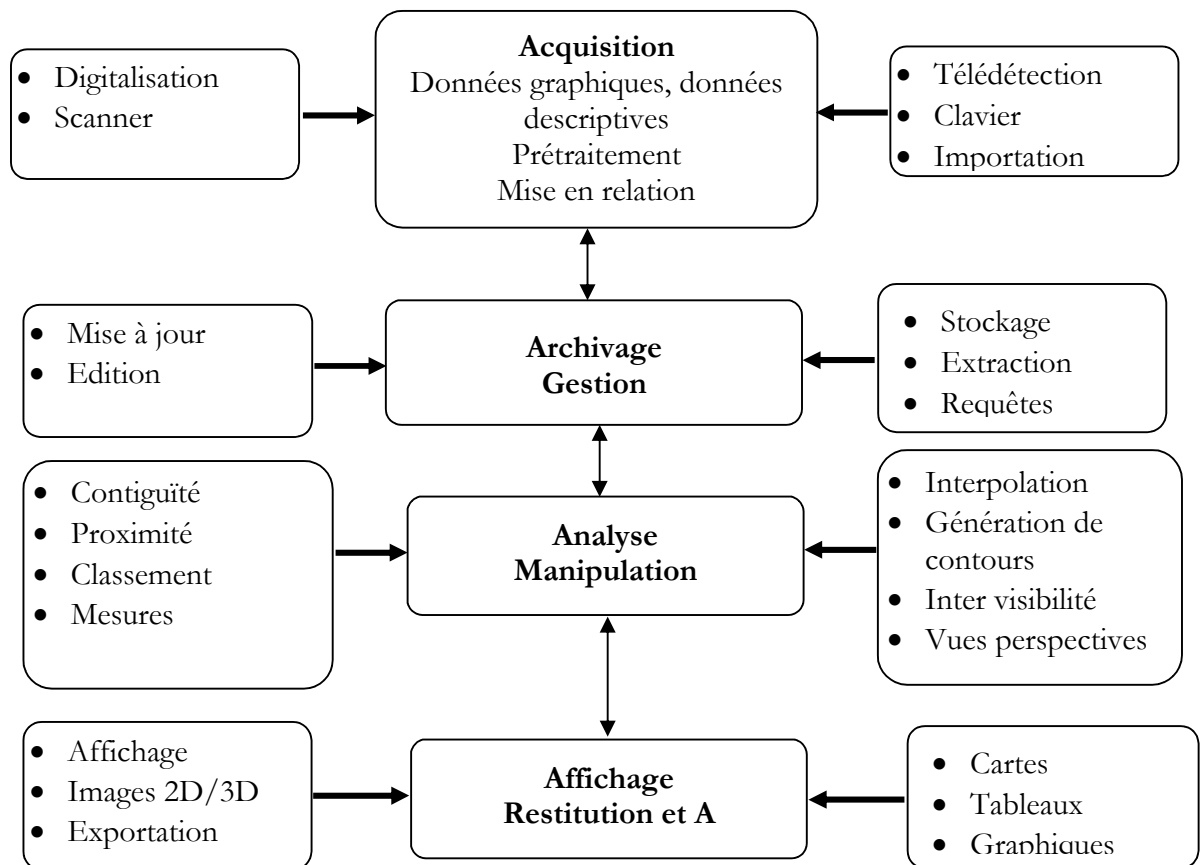


Figure IV-2 : Fonctionnalités d'un SIG (*Florence, 2000*)

IV.2.5. Les composantes d'un SIG

Un Système d'Information Géographique est constitué de cinq composants majeurs (**C. Collet**, 1994)

1. **Matériel** : Le traitement des données à l'aide des logiciels ne peut se faire sans un ordinateur. Pour cela, les SIG fonctionnent aujourd'hui sur une très large gamme d'ordinateurs.
2. **Logiciels** : Les logiciels de SIG offrent les outils et les fonctions pour l'exécution des 5 fonctionnalités des SIG : (Acquisition, Archivage, Analyse, Affichage, Accès).

Les principaux composants d'un logiciel SIG sont :

- Outils de saisie et de manipulation des informations géographiques ;
 - Système de Gestion de Base de Données ;
 - Outils géographiques de requête, d'analyse et de visualisation ;
 - Interface graphique utilisateur pour une utilisation facile.
3. **Données** : Les données sont la composante la plus importante des SIG (données graphiques spatiales, données alphanumériques...). Les données géographiques peuvent être, soit importées à partir de fichier, soit saisies manuellement par l'opérateur.
 4. **Le savoir-faire** : Tous les éléments décrits précédemment ne peuvent prendre vie sans une connaissance technique de ces derniers. Un SIG fait appel à de divers savoir-faire, donc à des divers métiers qui peuvent être effectués par une ou plusieurs personnes. On retiendra notamment la nécessité d'avoir des compétences en analyse des données et des processus, en traitement statistique, en sémiologie cartographique et en traitement graphique.
 5. **Les utilisateurs** : Les SIG s'adressent à une très grande communauté d'utilisateurs depuis ceux qui l'ont créés et le maintiennent jusqu'aux utilisateurs ordinaires.

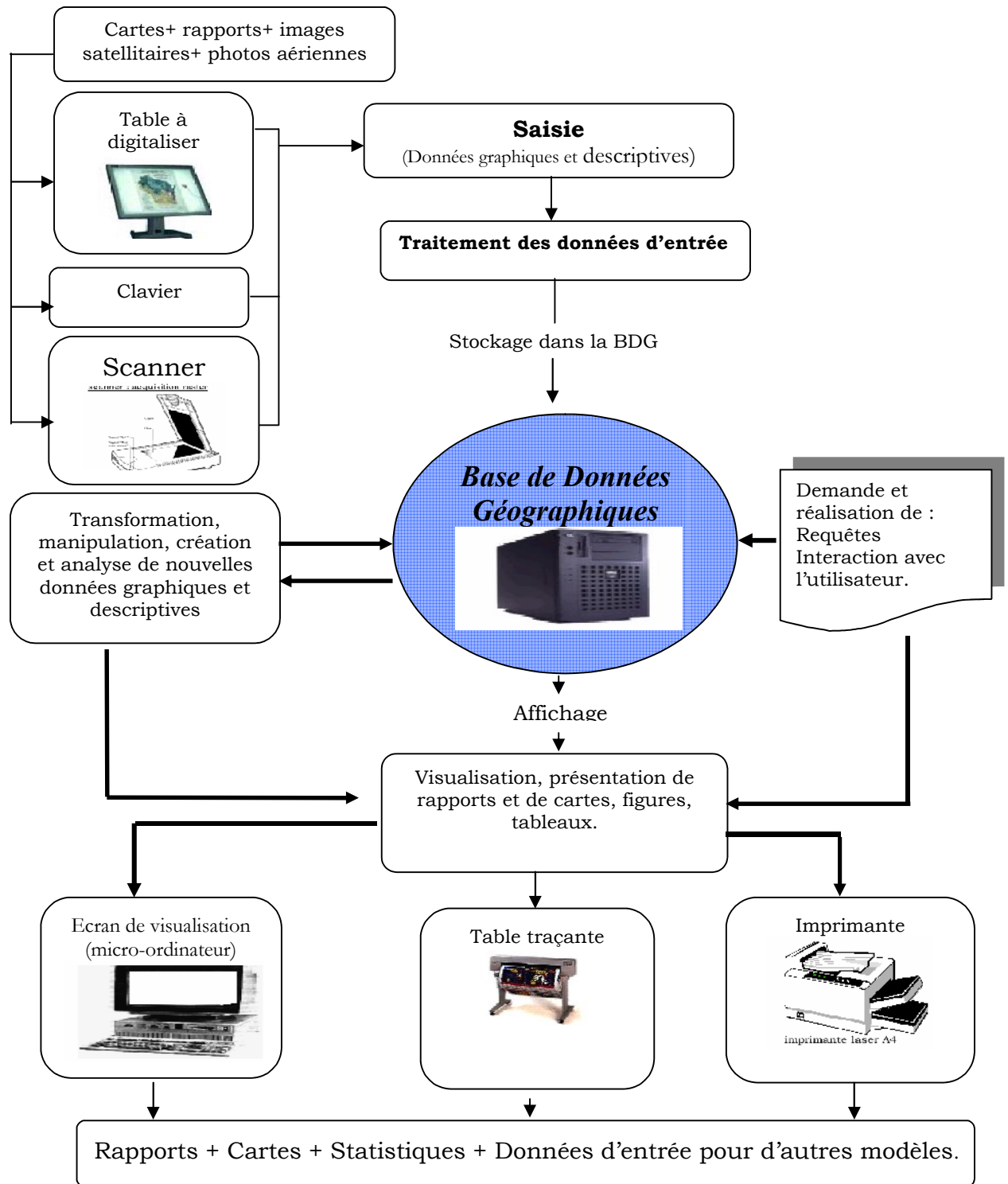


Figure IV-3 : Base de données géographiques BDG (Ider, 2004)

IV.2.6. Modèles de représentation des données dans un SIG

On distingue deux modes de représentation des données spatiales par les SIG : Mode Raster et Mode vecteur (*Drioueche*, 2004).

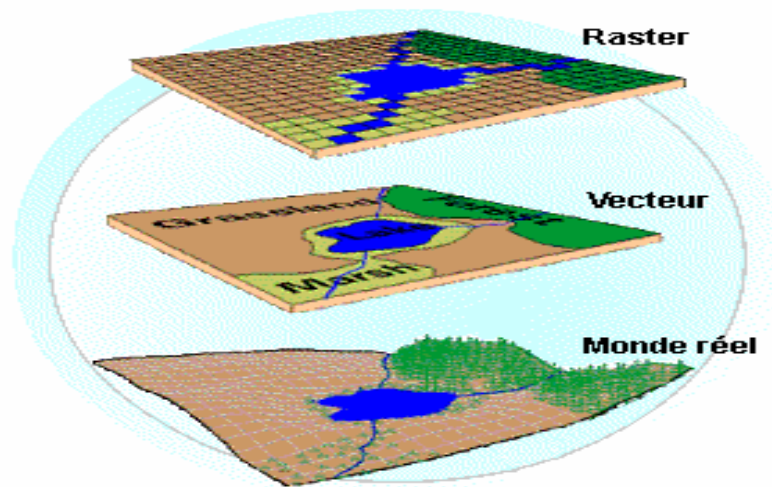


Figure IV-4 : Mode de représentation Raster et Vecteur (*Collet*, 1994).

1. SIG Raster

Le mode Raster correspond à une division régulière de l'espace géographique en cellules élémentaires (**carrés ou pixels**). Ce découpage correspond à un tableau de valeurs numériques dont chaque cellule (**pixel**) est référencée en ligne et en colonne par un système de coordonnées. Chaque pixel contient une valeur correspondante à une grandeur numérique (valeur radio métrique) ou alphanumérique (code descriptif).

Les données Raster sont obtenues par le scannage des cartes ou par l'imagerie satellitaire. L'image raster est toujours caractérisée par une taille et une couleur particulière dite la **résolution**.

2. SIG vecteur

Le mode vecteur se rapproche beaucoup de la notion de cartes traditionnelles. Ce mode utilise les objets ponctuels (points), linéaires (arc et lignes) ou surfaciques (figures planes) pour représenter des entités géométriques localisées dans l'espace par des coordonnées géographiques ou dans un référentiel cartésien (x, y) pour le cas d'un levé topographique.

Ces deux modèles sont complémentaires. Le raster est mieux adapté à certains types d'applications qui se contentent de scanner des fonds de plans, et le vecteur pour les types d'applications qui nécessitent des définitions par formes géométriques, la gestion des données localisées et la manipulation des relations entre objets spatiaux.

Cependant, il existe des méthodes permettant le passage du modèle vecteur au modèle raster et vice versa.

IV.2.7. Types des SIG

1. SIG fonctionnant sur station

Ce sont des systèmes compliqués et difficiles à manier. Ils s'adressent à des utilisateurs qui maîtrisent à la fois les domaines informatique et géographique ou qui nécessite un travail de collaboration.

2. SIG sur micro-ordinateur

Ce SIG est différent de celui travaillant sous une station du fait qu'il ne peut traiter qu'une faible quantité de données. Il peut fournir des statistiques sur les données descriptives comme il peut stocker l'information sous des couches thématiques. Comme il peut effectuer une représentation et une communication de l'information.

3. SIG de cartographie thématique et statistique

Ce produit sert de communication et de présentation de travail cartographique. En plus de cela, il fournit des statistiques sur les données (moyenne, régression, écart-type, histogramme,...). Ces systèmes travaillent avec de faible quantité de données.

4. SIG dédiés aux applications de topographie

Ces systèmes sont dits : Modèles Numériques d'altitude (MNA), sont des systèmes permettant la représentation du relief après la réalisation d'un levé topographique. Ils peuvent réaliser des profils en long, profils en travers des cours d'eau. Ils s'adressent principalement aux géomètres et topographes.

IV.2.8. Intérêts des SIG

Les SIG sont utilisés par de nombreux usagers, ils sont utilisés par les administrations, les services techniques municipaux, les organismes responsables de la gestion de l'environnement, les sociétés pétrolières, les banques, les instituts d'enseignement et de la recherche, les entreprises de travaux publics, les entreprises de gestion des ressources en eaux, etc. (*Ider*, 2004).

Les systèmes d'information géographique permettent en effet :

- D'établir des cartographies rapides et de mettre en œuvre des processus de choix spatiaux interactifs ;
- De réunir dans un même système des données issues de sources différentes et de les combiner entre elles ;
- De réagir rapidement après des événements ou des catastrophes ayant un impact sur le territoire ;
- D'offrir un environnement de travail complet pour l'analyse des données à référence spatiale.

- D'améliorer la précision et la vitesse d'exécution de certaines opérations réalisables manuellement (extraction de tous les objets situés à une distance donnée d'un champ de captage, d'un barrage, ...) ;
- Une mise à jour rapide, voire à temps réel ;
- Effectuer à faible coût certaines analyses difficiles, voire impossible à réaliser manuellement (extraction des pentes, valeur d'ensoleillement...);
- De fusionner des objets ayant une caractéristique commune (toutes les maisons raccordées au réseau d'alimentation en eau potable ou d'assainissement, toutes les localités traversées par une route donnée...).

IV.2.9. Questions auxquelles peuvent répondre les SIG

Quelque soit le domaine d'application, le SIG doit répondre aux cinq questions suivantes (**Dangermonde**, 2001) :

- Où : où se situe le domaine d'étude et quelle est son étendue géographique ?
- Quoi : quels objets peut-on trouver sur l'espace étudié ?
- Comment : comment les objets sont répartis dans l'espace étudié, et quelles sont leurs relations ? C'est l'analyse spatiale.
- Quand : quel est l'âge d'un objet ou d'un phénomène ? C'est l'analyse temporelle.
- Et si : que se passerait-il s'il se produisait tel événement ?

IV.3. Modèle Numérique de Terrain (MNT)

La nouvelle technologie de l'information géographique a permis de construire de nouveaux produits dérivés dont le Modèle Numérique de Terrain (MNT). Celui-ci est une information numérique qui nous renseigne sur le relief et la topographie. Ce produit numérique offre des représentations de terrain variables suivant les données sources utilisées (cartes, mesures, images) (**Kadir**, 2006).

La demande pour les modèles numériques d'altitudes s'accroît de manière spectaculaire avec l'amélioration de l'information extraite des données d'altitudes (cartographie des zones d'inondation, des zones forestières, de l'érosion, etc.). Le but principal de la modélisation de terrain est de représenter la surface naturelle de la manière la plus exacte et la plus précise possible (**Ider**, 2004).

IV.3.1. Définition

Un modèle numérique de terrain est un ensemble de mesures altimétriques localement distribuées au-dessus de la surface terrestre, utilisées pour l'analyse de la topographie (**Abdelali**, 1999) .

Le Modèle Numérique de Terrain « **MNT** » est une représentation de la topographie (altimétrie et / ou bathymétrie) de la surface naturelle sous une forme adaptée à son utilisation par un ordinateur numérique (ordinateur) (**Lebreton**, 1999). Un MNT peut recevoir plusieurs couches d'informations sur la couche première (les altitudes). Par exemple, on peut y ajouter les contours des bassins versants, le réseau hydrographique (couche vecteur) etc. (**Elasri**, 2006).

Le modèle numérique de terrain est un élément important qui permet l'exploitation et la mise à jour des bases de données numériques, soit pour la cartographie topographique de base, ou la cartographie thématique dérivée (**Demargne**, 2001).

IV.3.2. Représentation du MNT

Le MNT joue le rôle de couches d'information prêtes à être manipulées à travers un SIG. Son utilisation permet une analyse globale et une gestion du milieu naturel. Le MNT peut avoir une représentation matricielle (raster) ou vectorielle (vecteur) (**Floissac**, 1997) :

- a. **La représentation matricielle** : dit aussi mode raster, cette représentation se forme d'une matrice de valeurs numériques d'altitudes régulièrement espacées. Chaque valeur représente une moyenne d'altitude d'un élément de surface de terrain. Cette distribution définit le maillage de la surface, la dimension des mailles définit la résolution du MNT. Plus la résolution est grande plus le MNT est riche en détails topographiques. Ce type de MNT est obtenu essentiellement par :
 - ***photographies aériennes*** : Il s'agit d'un long travail de photo-interprétation à l'aide de couples d'images stéréoscopiques et d'un stéréo-restituteur ;
 - ***images numériques satellitaires*** : Il s'agit de méthodes automatiques de traitement d'images permettent de calculer l'altitude à partir d'un couple d'images stéréoscopiques numériques.
- b. **La représentation vectorielle** : Le mode de représentation vectorielle signifie que sont les éléments vecteurs (points, lignes et polygones) qui permettent de définir le MNT et de rendre compte de l'altitude. Dans ce genre de représentation, on retrouve par exemple les courbes de niveau, les profils, les points cotés ainsi que toutes les entités ponctuelles et linéaires du terrain tel que : réseau hydrographique, limites du Bassin versant, les limites administratives, etc.

La figure ci-après illustre les deux modes de représentation des MNT :

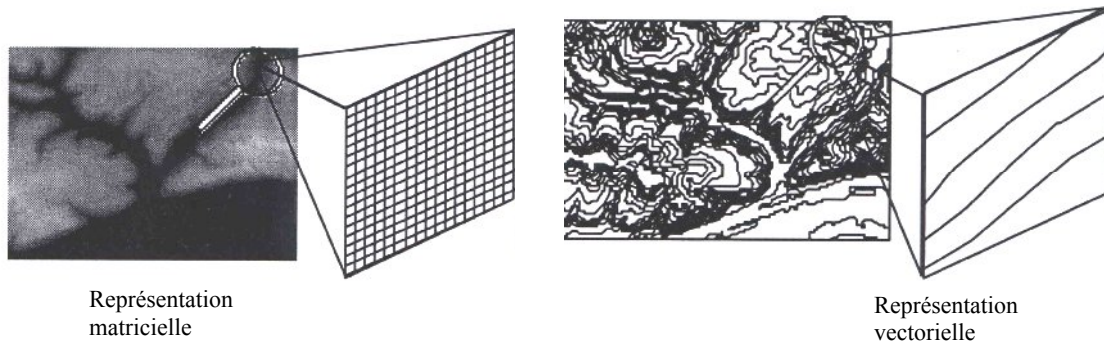


Figure IV-5 : Les deux modes de représentation MNT

Suivant la technique de construction du MNT, celui-ci peut donner une représentation du terrain naturel avec son occupation du sol, ou bien sans l'occupation du sol mais juste une représentation du relief. De ce fait, on différencie les types des modèles suivants :

- **Modèles Numériques de Terrain** : En anglais Digital Terrain Model (**DTM**). Ce modèle nous renseigne sur l'ensemble de la topographie du terrain et sur l'occupation du sol. Il ne traite pas seulement les hauteurs mais d'autres caractéristiques naturelles (oued, crête, rivière...) et les objets au dessus du sol sont représentés. Avec cette représentation (MNT) on peut inclure les données dérivées sur le terrain (pente, apparence, ensoleillement, ombrages ...).
- **Modèle Numérique de Surface** : Il nous informe sur les altitudes de la surface topographique. Cette représentation consiste en une grille régulière qui possède en chaque point une altitude. Elle est utilisée en milieu urbain pour la représentation des altitudes des structures artificielles (lots, routes.....).
- **Modèle Numérique d'Altitude (MNA)** : En anglais Digital Elevation Model. Ce modèle est caractérisé par la seule information altimétrique du terrain.

IV.3.3. Les caractéristiques d'un MNT

Trois caractéristiques principales permettent d'avoir un aperçu rapide d'un modèle numérique de terrain et de juger son adéquation à un besoin particulier :

- **sa résolution**, c'est-à-dire la distance entre deux points adjacents du MNT ;
- **sa couverture géographique** : les zones géographiques pour lesquelles les données et les informations sont disponibles ;
- **sa qualité de données** : qui dépend de l'application ou non de traitements de correction des données après leur récupération. En effet, certaines méthodes d'acquisition laissent des artefacts dans les données (des zones brouillées sur des lignes côtières du fait de l'écume des vagues qui fausse les échos radar, des « trous » lorsque des nuages étaient présents lors d'un relevé satellitaire...).

IV.3.4. Acquisition de données

Les données nécessaires à la construction d'un modèle numérique de terrain peuvent être de sources très diverses. En effet, la base de données altimétriques peut être obtenue par de nombreux moyens et procédés selon le but recherché (*Floissac*, 1997):

- ◆ A partir de levés sur le terrain en procédant à des mesures topographiques à l'aide d'un appareil appelé théodolite. Cette méthode a l'inconvénient d'être très lente à réaliser mais représente l'avantage d'être très précise.
- ◆ A partir de la numérisation des courbes de niveau d'une carte topographique en utilisant la table à digitaliser. Cette méthode est extrêmement pratique lorsqu'on s'intéresse à une zone d'étude de taille relativement petite.
- ◆ A partir des images satellites et radar : ce sont les méthodes les plus répandues de nos jours.

IV.3.5. Sources d'informations

Les données peuvent être obtenues à partir d'un levé topographique si la surface de la zone d'étude est faible. Sinon par la numérisation des courbes de niveau à partir d'une carte papier qui représente le relief, ou bien à partir de photographie aérienne et d'images satellites et radar (*Floissac*, 1997).

1. Cartes topographiques

Les cartes topographiques représentent les documents de base pour l'établissement des MNT. La saisie des courbes de niveau qui sont des informations essentielles peut se faire de deux (02) manières différentes : la digitalisation ou le scannage.

Le scannage est défini par le Conseil National de l'Information Géographique (CNIG) comme étant « *la numérisation automatique par balayage d'un document graphique en un fichier informatique décrivant une matrice composée d'une trame de points d'intensités lumineuses et de couleurs différentes* ». Le fichier obtenu est un fichier image (raster).

Après le scannage, on obtient une image constituée d'un seul bloc. Un point donné de cette image est appelé « **Pixel** ».

L'obtention des images raster de carte passe par les trois (03) étapes :

- *Image cartographique numérique brute 'scannage brute'* : dans ce cas la carte n'a subi aucun traitement ;
- *Image cartographique numérique rectifiée géométriquement* : l'image subit une rectification géométrique à partir d'un nombre de points limites de référence ;
- *Image cartographique numérique géoréférencée* : A tout point on lui associe des coordonnées cartographiques rapportées à un système de projection connu.

Le pas de scannage est défini comme étant la taille du pixel de l'image. Ce pas qui est généralement le même en ligne et en colonne est défini particulièrement par le terme Résolution.

La digitalisation est l'opération qui permet de récupérer des objets figurants sur une carte. Cette opération est menée à l'aide d'une table à numériser dont le principe de fonctionnement est le suivant (**Kadir**, 2006) :

La carte est fixée sur la table de numérisation. Celle-ci est reliée à un micro-ordinateur et un curseur magnétique ayant une loupe avec une mire graduée. Lorsqu'on positionne le curseur magnétique sur la courbe de niveau, il y aura enregistrement automatique des coordonnées de table se référant à la courbe de niveau. Ces coordonnées sont transformées en coordonnées géographiques de la projection choisie ; puis stockées en format vecteur. Le résultat de cette numérisation est un fichier mode vecteur à une grille régulière.

2. Photographie aérienne (ou photogrammétrie)

La photogrammétrie constitue la source principale et la plus précise pour la réalisation d'un MNT. Les développements récents de la photographie digitale font de cette technique un outil de plus en plus utilisé, notamment en géomorphologie fluviale (**Bouchaibi**, 1998).

L'information topographique est numérisée à partir des photographies aériennes en utilisant des appareils spéciaux appelés : Stéréo-restituteurs (appareils de restitution photo-grammétrique). Le relief est en général restitué sous la forme de courbes de niveau. Ce procédé a l'inconvénient d'être très coûteux et très long.

3. Imagerie satellite et radar

La réalisation automatique des MNTs à partir de deux scènes du satellite SPOT formant un couple stéréoscopique est rendue possible grâce aux stéréo restituteurs analytiques et moyennant quelques changements de logiciels pour l'adaptation à la géométrie des images de satellites.

La figure suivante présente les modes d'acquisition de l'information des MNT :

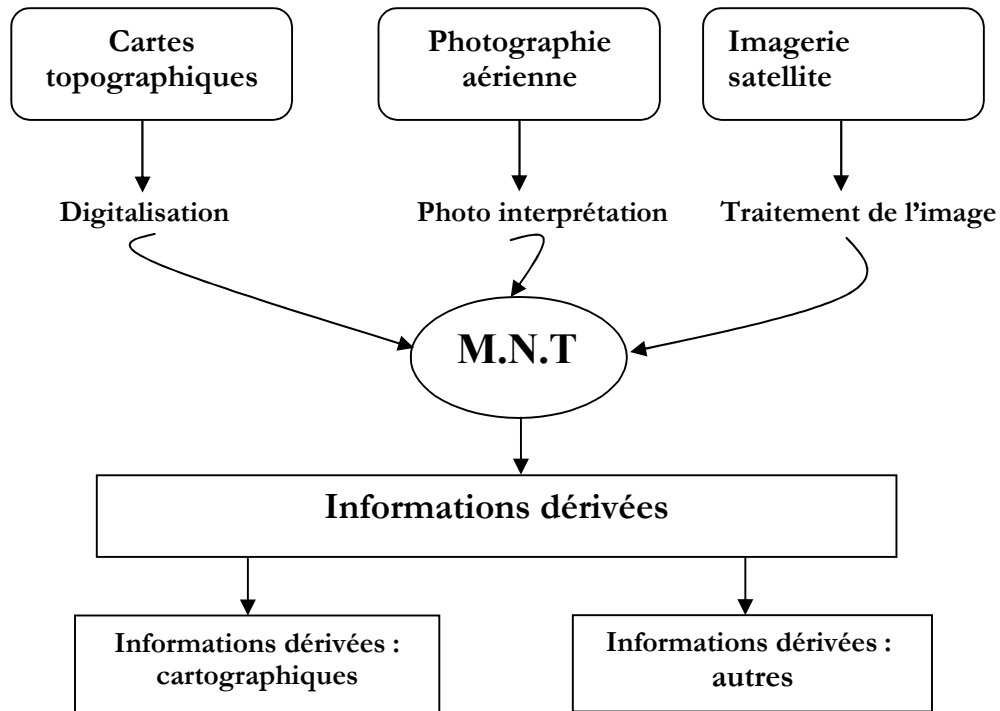


Figure IV-6 : Sources d'informations d'un M.N.T. (*Bouchaibi*, 1998)

IV.3.6. Les formats d' MNT

On peut représenter le MNT sous plusieurs formats suivant son exploitation. Le terrain est divisé en éléments géométriques simples (triangles, carrés, cercles, polygones). Ces éléments géométriques forment des tessellations pouvant être régulières ou irrégulières.

Cependant, il existe plusieurs types de maillages arbitraires. Les plus courants étant le maillage carré régulier et le maillage triangulaire irrégulier. Ce dernier est souvent le fruit d'un algorithme de génération de Modèle Numérique d'Altitude (MNA) qui crée le maillage en fonction des discontinuités du milieu et de la densité locale des courbes de niveau (*Ider*, 2004).

Il existe quatre formes différentes pour la représentation d'un modèle numérique de terrain (*Abdelali*, 1999) :

1. Les MNT sous forme de grilles régulières (maillé ou raster)

Dans ce cas le MNT est un ensemble de valeurs numériques représentant des altitudes, espacées de manière régulière et ordonnée selon un balayage du terrain (exemple : W-E ou N-S). Chaque valeur d'altitude représente la moyenne d'un élément de surface de terrain. Cette distribution de points définit alors : un maillage de la surface de la terre.

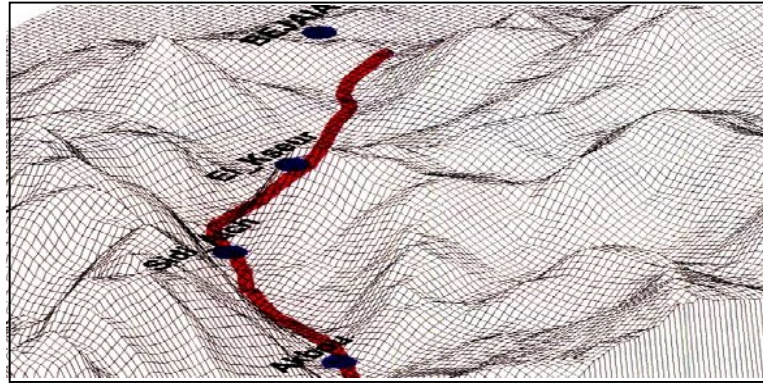


Figure IV-7 : MNT sous forme de grille régulière

2. MNT. sous forme de (TIN)

Dans ce cas, les points qui sont irrégulièrement espacés sont connectés pour former un réseau de triangles selon le critère de triangulation de Delaunay : *(les points sont reliés de manière à minimiser la dimension du cercle inscrit entre les trois points du triangle de telle façon que : le cercle passant par les sommets de chaque triangle ne contient aucun autre point coté).*

Contrairement à la grille régulière, le TIN s'adapte mieux à la variabilité du terrain (un échantillonnage dense dans les zones à relief accidenté et moins dense dans les zones où le terrain est uniforme) (Figure IV-8).

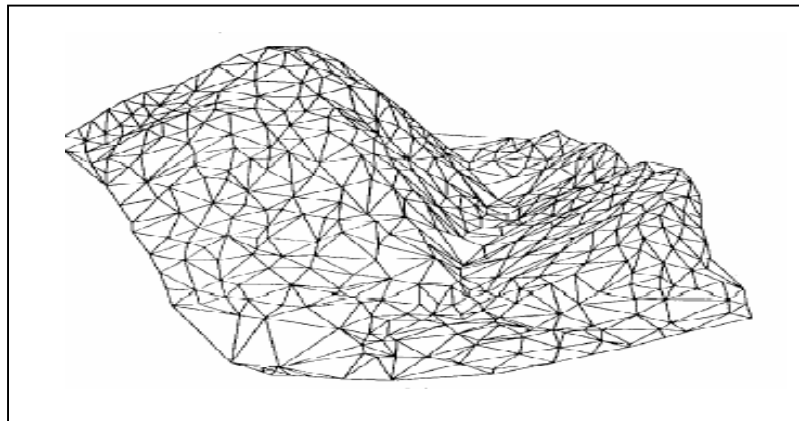


Figure IV-8 : Exemple d'un MNT sous forme de T.I.N

3. Grille triangulée

C'est un modèle qui combine à la fois les avantages des deux modèles cités antérieurement (modèle TIN et Grille). Il est souvent utilisé lorsqu'on s'intéresse à la modélisation des surfaces comportant des arêtes vives que le modèle Grilles ne respecte pas.

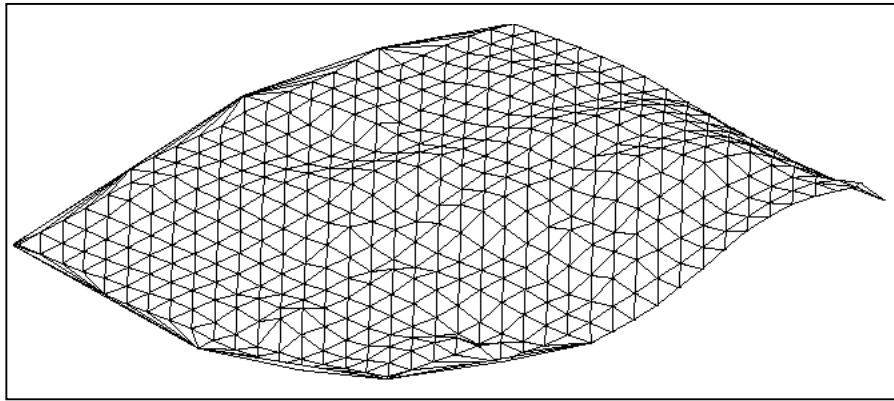


Figure IV-9 : Exemple d'une surface représentée par grille triangulée

4. Contours

Les contours sont des polygones qui suivent la position d'une altitude 'z' donnée. En d'autres termes, il s'agit de courbes de niveau interpolées une certaine coordonnée qui est elle-même lue sur un TIN ou une grille. L'interpolation des coordonnées z est linéaire.

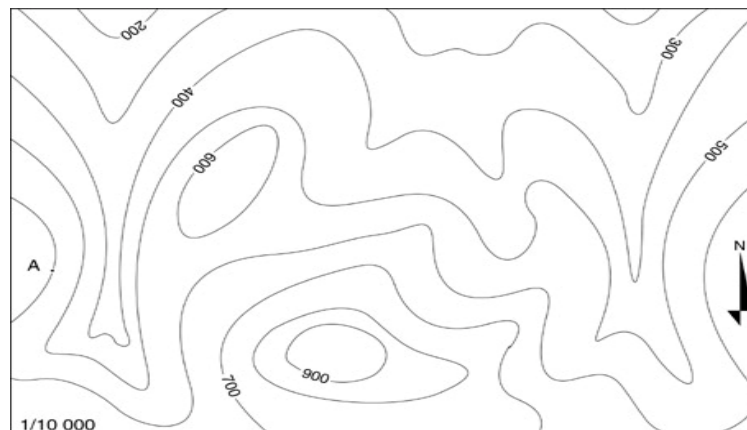


Figure IV-10 : Surface représentée par des courbes isohypses
(Courbes égales altitudes)

Actuellement, les deux grandes classes de MNT les plus utilisées sont : les grilles irrégulières triangulaires (TIN) et les grilles régulières (*Ider*, 2004).

IV.3.7. Précision d'un MNT

La précision du modèle numérique de terrain (qui est impossible d'ailleurs à formaliser) est globalement évaluée en fonction de plusieurs paramètres en particulier (*Henry*, 2001) :

- L'échelle des cartes topographiques utilisées ;
- Equidistance entre les courbes de niveau ;
- L'échelle de la résolution des images (ou photographies) utilisées ;
- La densité des points, réellement mesurés sur le terrain et la précision des levés ;

- La répartition de ces points en fonction du caractère plus au moins accidenté du terrain en particulier pour les (TIN).

IV.3.8. Utilisations des MNT

Les MNT fournissent les informations nécessaires à la visualisation, l'analyse et la modélisation des phénomènes liés au relief. En particulier, à partir du plan de base d'information altimétrique correspondant au modèle géométrique, de nombreux paramètres peuvent être extraits comme futurs éléments du modèle conceptuel. Le calcul des dérivées premières permet de définir les plans de pente et d'azimut, ceux des dérivées secondes définissent les plans thématiques tels que les crêtes, les talwegs, les bassins versants ou de mener des calculs d'inter-visibilité ou d'ensoleillement. C'est grâce à cette richesse que les MNT sont utilisés dans de multiples domaines nécessitant une connaissance approfondie du relief et qu'ils sont intégrés dans des systèmes d'informations géographiques (SIG) (*Demargne, 2001*).

Toutefois, les utilisations les plus fréquentes des MNT conduisent à (*Floissac, 1997*) :

- ☞ Reconstitution d'une vue de synthèse du terrain.
- ☞ Détermination des trajectoires du survol du terrain.
- ☞ Calcul des surfaces ou des volumes.
- ☞ Traçage des profils.
- ☞ Etablissement des cartes de pentes ;
- ☞ Etablissement des cartes d'exposition des versants ;
- ☞ Détermination automatique des écoulements dans un bassin versant. Cette dernière permet de retrouver l'essentiel des écoulements superficiels d'une région donnée grâce à des algorithmes de traitement bien spécifiques ;
- ☞ Extraction des rivières et détermination de leurs ordres.

Dans notre travail, notre besoin de MNT s'inscrit dans ces deux derniers points de types d'utilisation, tel que : élaboration d'une base de données hydrologiques du bassin versant de la Soummam en Algérie qui renseigne sur l'ensemble de l'information hydrologique : le réseau hydrographique, les limites des sous bassins versants, l'écoulement superficiel, les débits de crues, ainsi que toutes autres caractéristiques hydrologiques et morphométriques possibles, et cela, tout en utilisant le modèle hydrologique HEC-HMS.

Ainsi, à partir du MNT, il est possible de créer un certain nombre de fichiers dérivés qui seront utilisés dans de nombreuses analyses de terrain. Les informations dérivées peuvent être scindées en deux parties suivantes (*Bouchaibi, 1998*) :

➤ Informations dérivées cartographiques :

- Pentés et orientations : Dérivées à partir du fichier d'altitude ;

- Extraction de points singuliers : Il est souvent utile d'extraire les points singuliers d'un MNT. ceux ci peuvent être des cuvettes, des pitons, des lignes de crête ou de drainage ;
- Cartes d'ensoleillement et d'ombrage.

➤ **Informations dérivées autres**

Ces informations peuvent être linéaires, exemple : profils en long de l'oued ou coupes de terrain. Elles peuvent aussi être complexes, exemple: vue en perspective.

IV.4. Elaboration du Modèle Numérique d'Altitude du BV de la Soummam

Lors de la collecte des données pour la réalisation d'une n'importe quelle étude, il s'avère souvent que la plupart des données (informations) se retrouve sous format papier, imprimé voir même manuscrites (cartes, levés...), ceci demande à chaque fois des efforts de numérisation pour pouvoir les utiliser en format informatique.

L'un des buts de notre étude est la détermination de la forme du relief du bassin versant de la Soummam par l'élaboration du Modèle Numérique d'Altitude (MNA) qui est une représentation numérique simplifiée de la surface du terrain en coordonnées altimétriques (plus souvent exprimées en mètres par rapport au niveau de la mer) et planimétriques calées dans un repère géographique. Ce MNA représente la donnée de base pour la réalisation ensuite de la base de données hydrologique.

Cette base de données va servir comme outil d'aide à la décision représentée dans un système d'information géographique contenant l'ensemble des informations sur le bassin versant. Chaque type d'information est représenté par une couche thématique séparée : (réseau hydrographique, lignes de partage des eaux, limites des sous bassins, courbes de niveau, zones exposées aux risque d'inondations, réseau routier, infrastructures hydraulique, les aménagements hydrauliques, les points d'eau, les ouvrages de mobilisation des ressources en eau, ...etc.).

IV.4.1. Construction du MNA

Les méthodes de construction des MNA sont nombreuses car elles dépendent de la source de données de références, de la technique de la saisie des données, de la méthode d'interpolation choisie, et de format final du MNA recherché. Cette construction du MNA s'effectue en deux phases principales : le calcul de la position d'un jeu de points relatif au système cartographique et au système d'altitude choisi, puis re-échantillonnage de ce jeu de points par l'interpolation pour avoir l'altitude ou la valeur 'z' n'est pas connue.



Figure IV-11 : Les étapes principales de réalisation du MNA

Pour l'élaboration de cet MNA, les cartes topographiques à l'échelle 1/25000^{ème} représentent les données de base qu'il faut acquérir. Après avoir scanné toutes les cartes sous le format A0, nous effectuons la digitalisation (vectorisation) des courbes de niveaux de toute la surface contenant les limites physiques du bassin versant. Cela va nous donner un ensemble d'arcs ou polygones auxquels on va introduire à chacun la valeur de l'altitude « z » correspondante. Ces valeurs seront ensuite interpolées pour trouver de nouvelles valeurs et reliées par un type de maillage choisi pour déterminer la forme finale du MNA.

Dans ce qui suit, nous donnerons les détails des étapes suivies pour l'élaboration du MNA.

Etape N°1 : Collecte des cartes topographiques

Les données nécessaires à la réalisation d'un MNA peuvent être de sources très diverses. Il existe en effet de très nombreux moyens de mesure des altitudes, mais ceux-ci sont plus au moins bien adaptés au but recherché. Dans notre cas, nous optons pour la source de base des données altimétriques qui sont les cartes topographiques à l'échelle 1/25000^{ème}.

Etape N°2 : scannerisation des cartes

Une fois les cartes topographiques sont collectées, la prochaine étape est de scanner toutes ces cartes sous le format A0. Cela nous permet d'obtenir des fichiers images type raster pour chacune des cartes scannées.

Deux modes de scannerisation sont possibles (*Becheraier, 2002*) :

- ❖ Mode couleurs : c'est un mode normale dont les but sont : la précision de calage et mettre une couche raster pour l'aide dans la restitution des données. La résolution souhaitable est plus de 400dpi.
- ❖ Mode traits (*noire & blanc*) : ce mode est effectué dans le but de vectorisation par les méthodes automatiques et semi-automatiques. Plus la résolution est grande, plus la vectorisation est rapide et les erreurs diminuent.

Dans notre cas, nous optons pour le deuxième type : (*noire & blanc*) afin de pouvoir numériser les courbes de niveau par un logiciel de vectorisation semi-automatique (CadOverly).

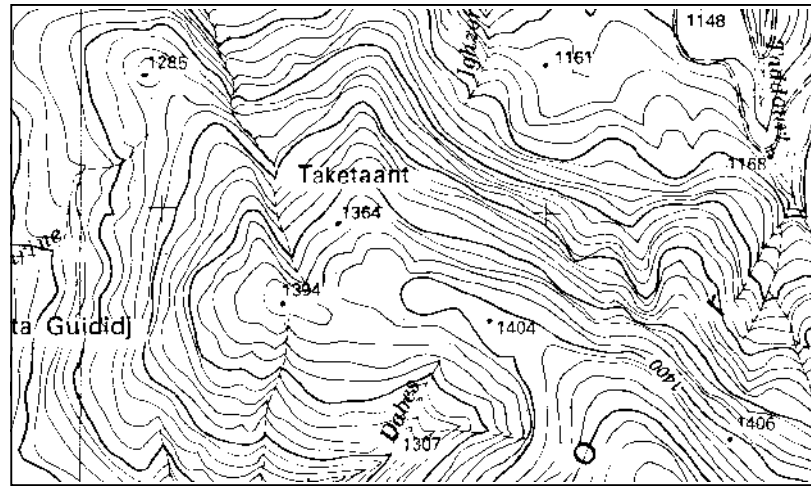


Figure IV-12 : Exemple de carte scannée en mode trait (*Noir & blanc*)

Etape N°3 : importation sous le logiciel AutoCad Map 2000i

L'AutoCad Map 2000i permet les meilleures solutions pour créer, numériser, maintenir, analyser, et produire les cartes dans un environnement de D.A.O. L'AutoCad Map 2000i contient les outils orientés objet du logiciel d'AutoCad aussi bien sa propre gestion de données spatiales uniques et les avantages de dessin d'accès multiples.

L'AutoCad Map 2000i représente la plateforme d'installation de logiciel de vectorisation CadOverly. Pour pouvoir importer le fichier image sous l'interface AutoCad Map, on utilise le bouton « **insert** » qui se trouve sur le menu de la barre d'outils CadOverly (Figure IV-13).

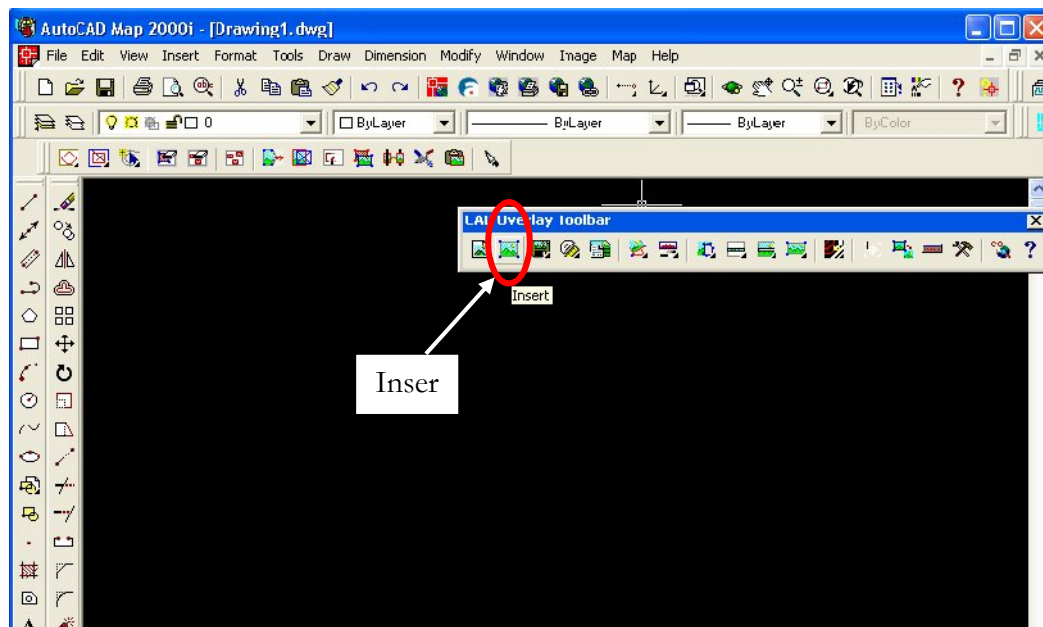


Figure IV-13 : Importation de fichier image sous l'interface AutoCadMap & CadOverly

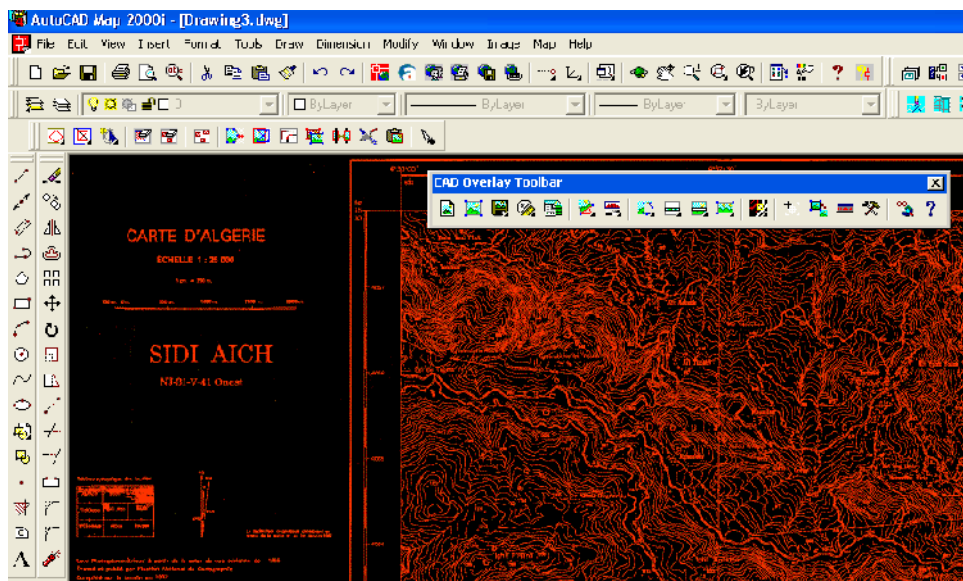


Figure IV-14 : Carte topographique à l'échelle 1/25000^{ème} importée sous AutoCadMap-CadOverly

Etape N°4 : Numérisation ou vectorisation des courbes de niveau

Cette étape est l'une des étapes les plus longues et plus coûteuses lors de la mise en place d'un modèle numérique d'altitude d'une région donnée. Le travail consiste à numériser les objets (points & courbes de niveau) figurants sur la carte scannée, c'est-à-dire les transformer en points et les courbes de format raster au format vecteur reconnu et modifiables par le système de Dessin Assisté par Ordinateur (D.A.O). Ce processus est appelé vectorisation. Il crée un ensemble de segments encore appelés vecteurs qui reconstituent l'image initiale. L'information dont on aura besoin n'est pas seulement les arcs et polygones obtenues après la vectorisation, mais leur information attributaire formée des coordonnées x, y et altimétriques z de chaque point.

Pour transformer raster à vecteur, il y a trois méthodes possibles (**Becheraier**, 2002) :

- Vectorisation manuelle : c'est une méthode lente et coûteuse. Et on utilise pour cela les logiciels disponibles sur le marché comme MapInfo, AutoCadMap, ...etc.
- Vectorisation semi-automatique : c'est une méthode plus rapide que la première. Cette méthode consiste en la vectorisation courbe après courbe. Pour cela, il existe plusieurs types de logiciels, par exemple : CadOverly.
- Vectorisation automatique : c'est une méthode très rapide, mais à condition d'avoir une qualité spéciale du scanner, c'est-à-dire scanner à séparation de couleurs. Et les logiciels nécessaires sont très chers.

La méthode utilisée dans notre cas est la méthode semi-automatique, avec le logiciel CadOverly2000i et sa plateforme d'installation AutoCadMap2000i.

CadOverlay est un logiciel de vectorisation semi-automatique qui offre des outils d'édition raster qui nous permettent de modifier les entités raster en vecteur, cela à l'aide des commandes d'édition vectorielle standard. CadOverlay offre une intégration transparente à AutoCad et aux produits basés sur AutoCad, garantissant une compatibilité DWG intégrale (Autodesk, 2000).

Les figures suivantes présentent la méthode de vectorisation par le logiciel CadOverlay :

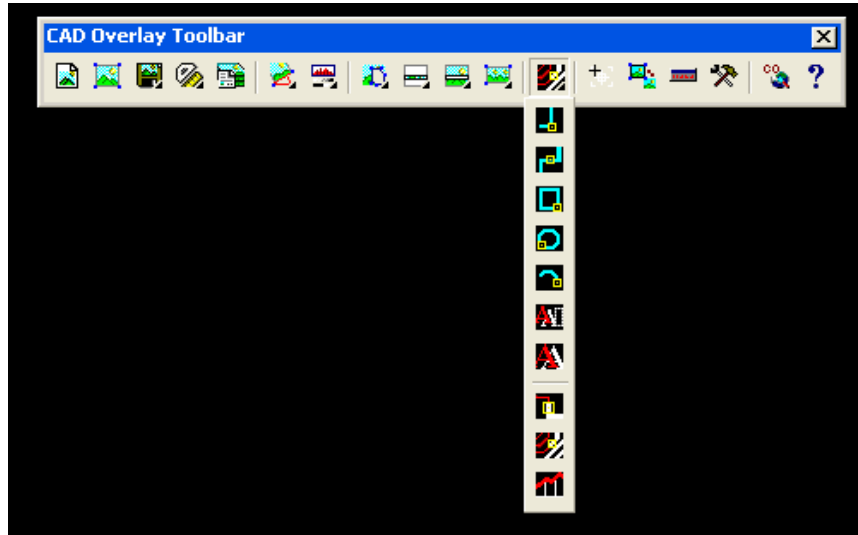


Figure IV-15 : Les outils de vectorisation du logiciel CadOverlay 2000i

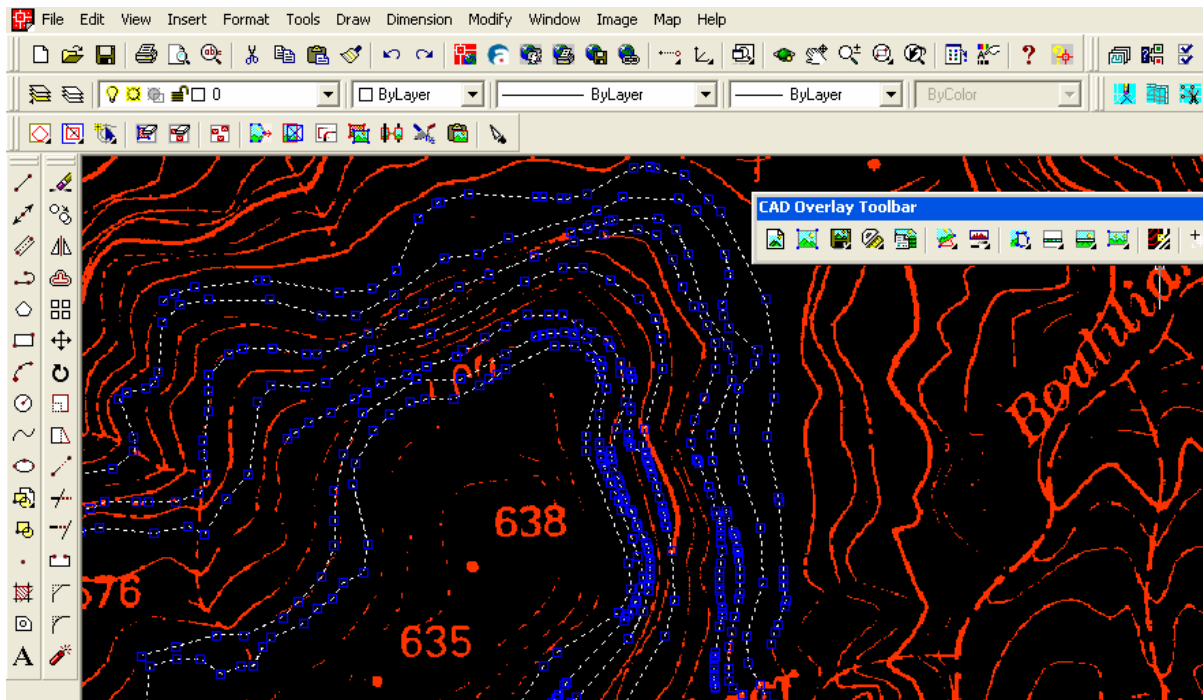


Figure IV-16 : Numérisation des courbes de niveau sous CadOverlay 2000i

Etape N°5 : introduction des altitudes

Chaque courbe de niveau numérisée, nous lui introduisons son altitude correspondante. Cette opération se réalise par la sélection tout d'abord de polyline vectorisé, en cliquant dessus avec le bouton droit de la souris, et en sélectionnant « propriétés », une fenêtre flottante des propriétés du polyline apparaît, ou on trouve l'icône « Elevation » devant laquelle nous pouvons introduire la valeur de l'altitude (Figure IV-17).

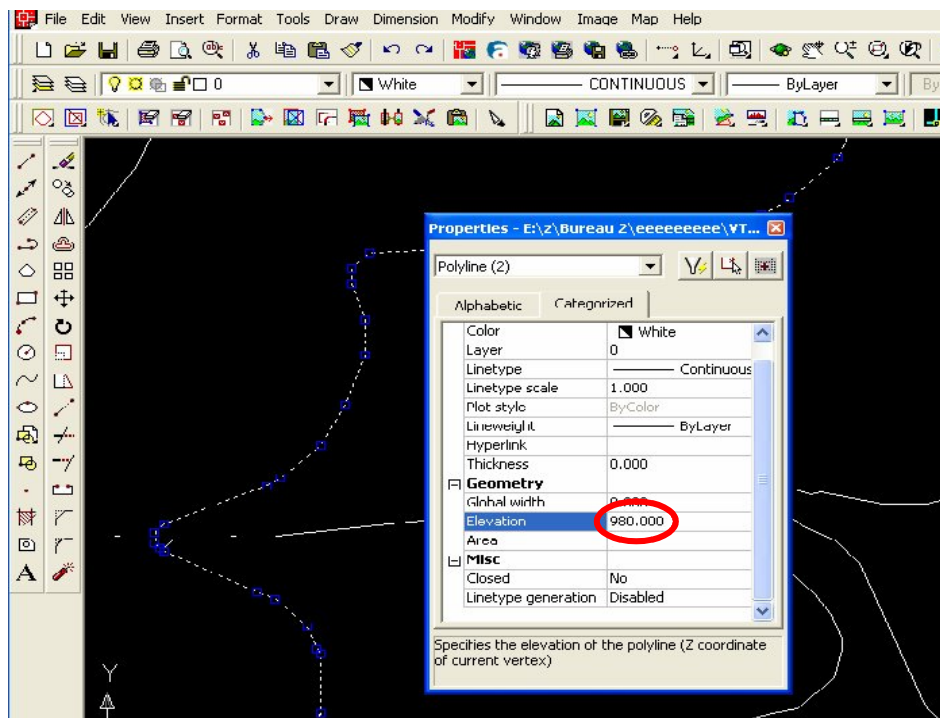


Figure IV-17 : Introduction des altitudes 'z'

Etape N°6 : exportation du fichier sous format « .dxf »

Une fois les opérations de numérisation des courbes de niveau et l'introduction de leurs altitudes correspondantes sont terminées, nous enregistrons le fichier sous le format «.dxf», pour qu'il puisse être reconnu et utilisé par le logiciel MapInfo.

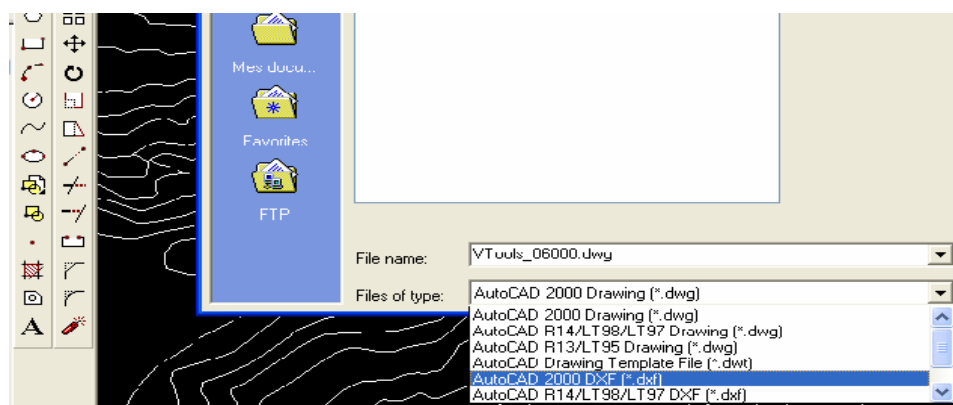


Figure IV-18 : Exportation du fichier sous format « .dxf »

Etape N°7 : Conversion en format « .tab » sous Mapinfo

Le fichier réalisé sous AutoCadMap sous l'extension (.dxf) est converti sous Mapinfo grâce à l'option « **Traducteur universel** » en format (*.tab), tout en choisissant la projection de Lambert Nord Algérie de la catégorie Lambert Conique Conforme Algérie (figures IV-19).

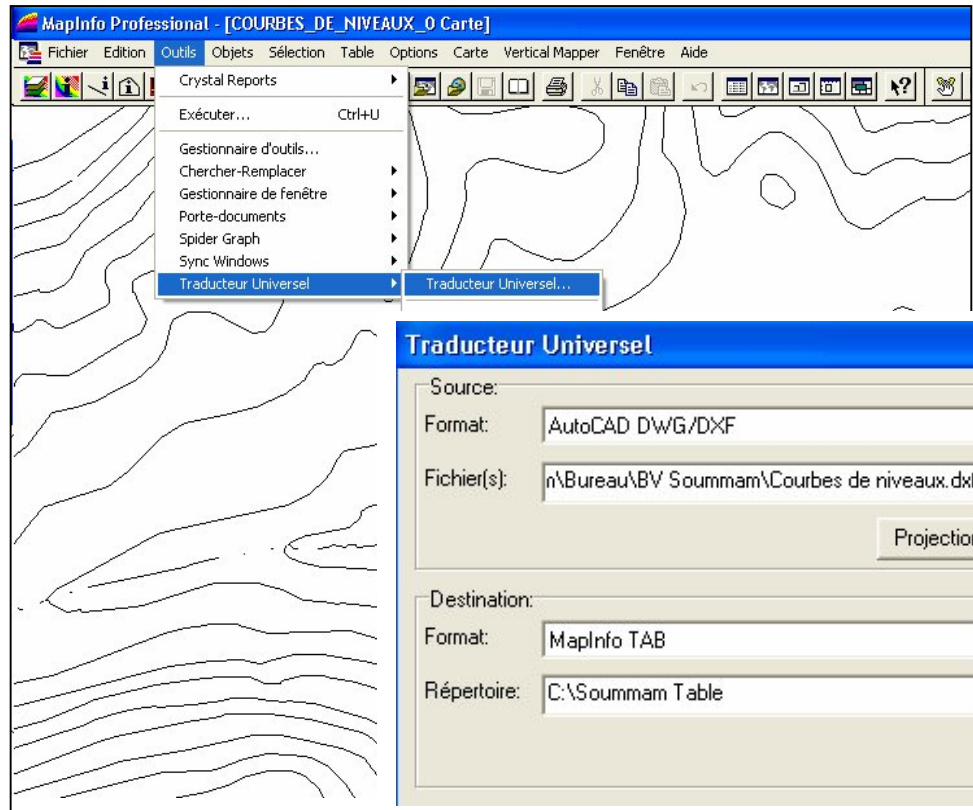


Figure IV-19 : Conversion du fichier «.dxf » en format «.tab » sous Mapinfo

Une fois la table est enregistrée, elle sera rendue active et modifiable.

La même procédure est renouvelée pour toutes les cartes. Une fois les fichiers « .dxf » (vectorisée) sont importés sous Mapinfo, leur assemblage se fait automatiquement après chaque calage. Nous formons ainsi une carte unique de la zone d'étude. C'est cette dernière (carte) qui va nous servir, après interpolation, comme document de base pour l'élaboration du modèle numérique d'altitude.

Etape N°8 : Transformations des polygones en points par le logiciel Vertical Mapper

Une fois le fichier « .tab » est obtenu, nous transformons le réseau des polygones en un échantillon de points. Cela est possible à l'aide du logiciel d'interpolation Vertical Mapper, comme l'illustre la figure suivante :

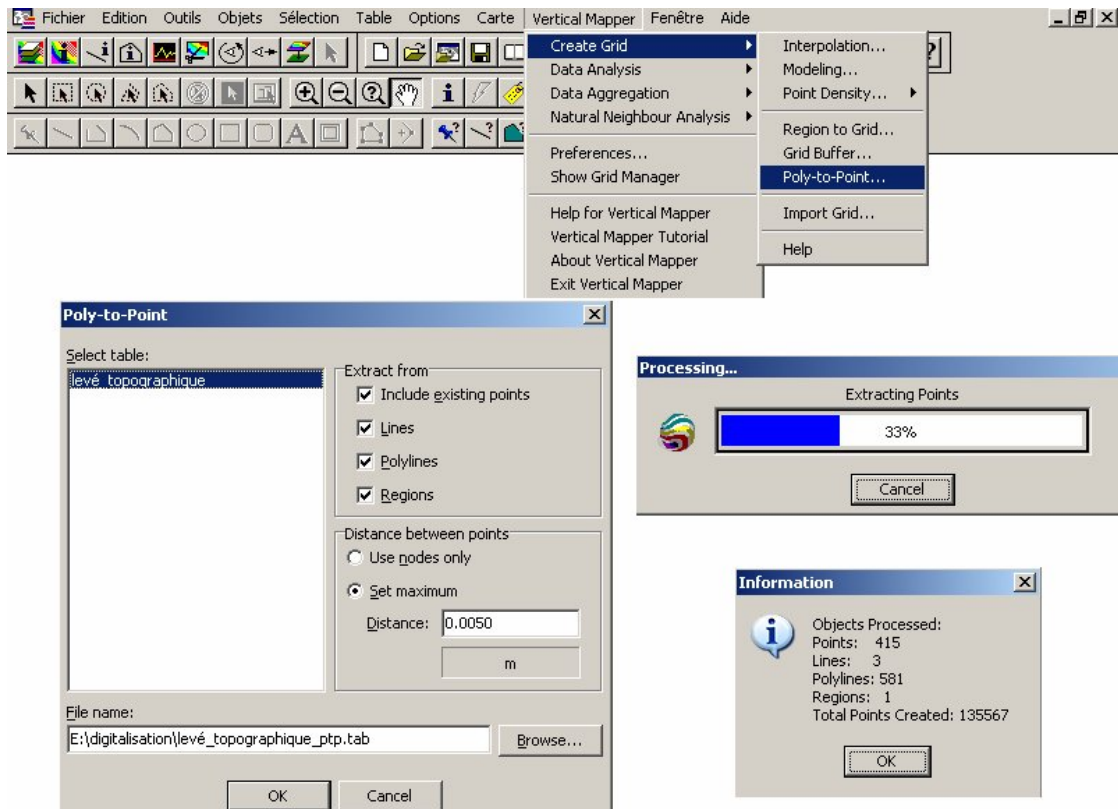


Figure IV-20 : Transformations des polygones en points par vertical Mapper

Etape N°9 : lancement de l'interpolation et création du Grid (grille de maillage)

Le calcul des points finaux est basé sur l'interpolation des coordonnées tridimensionnelles des points à partir du jeu de points de référence.

Après avoir transformé les polygones en points, on procède à une interpolation dans l'objectif d'estimer les valeurs de l'altitude 'z' dans les zones où aucune donnée n'existe ;

A l'aide du logiciel Vertical Mapper, nous effectuons l'interpolation tout en sélectionnant la méthode d'interpolation choisie pour construire le maillage. Dans notre cas, nous choisissons le TIN (puisque le relief est très accidenté), puis nous lançons l'interpolation sur le fichier (figure IV-21). Après cette étape, nous obtenons la grille des points (x, y, z) qui nous permet de visualiser le produit final du Modèle Numérique d'Altitude.

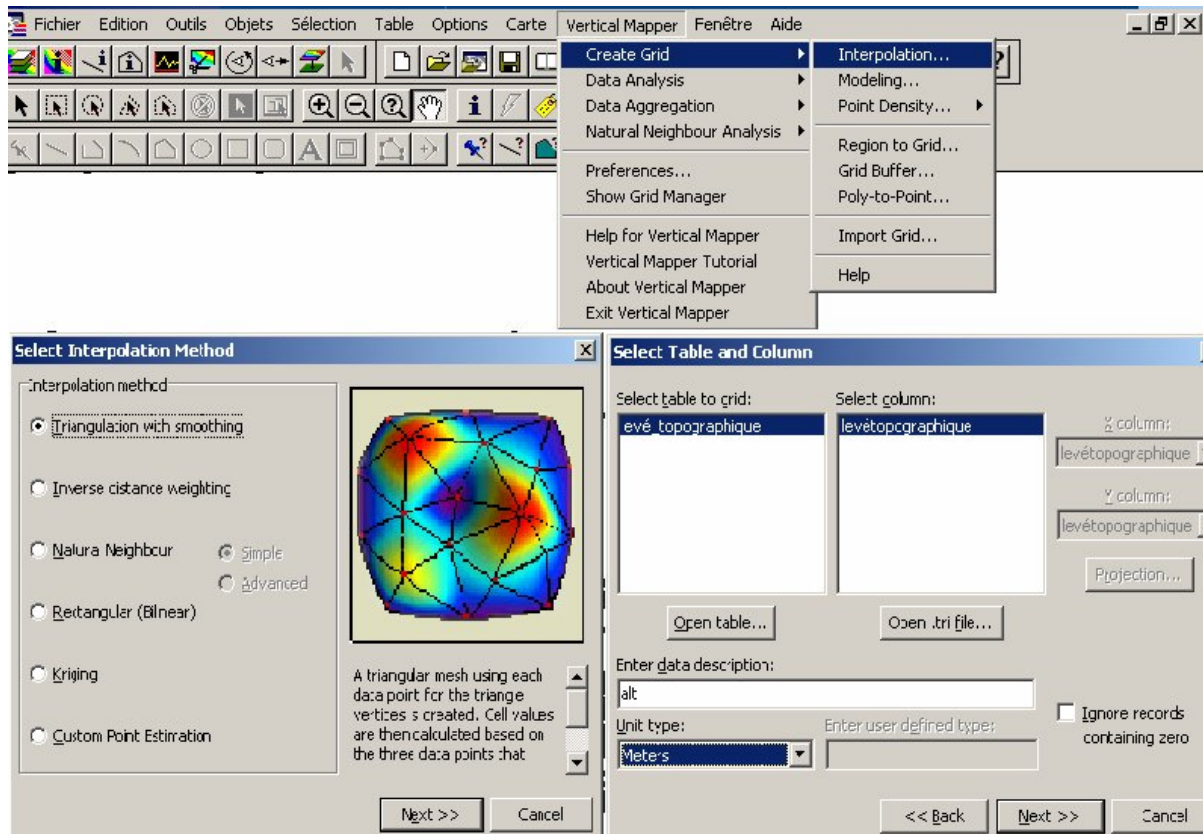


Figure IV-21 : Lancement de l'interpolation et choix de maillage TIN

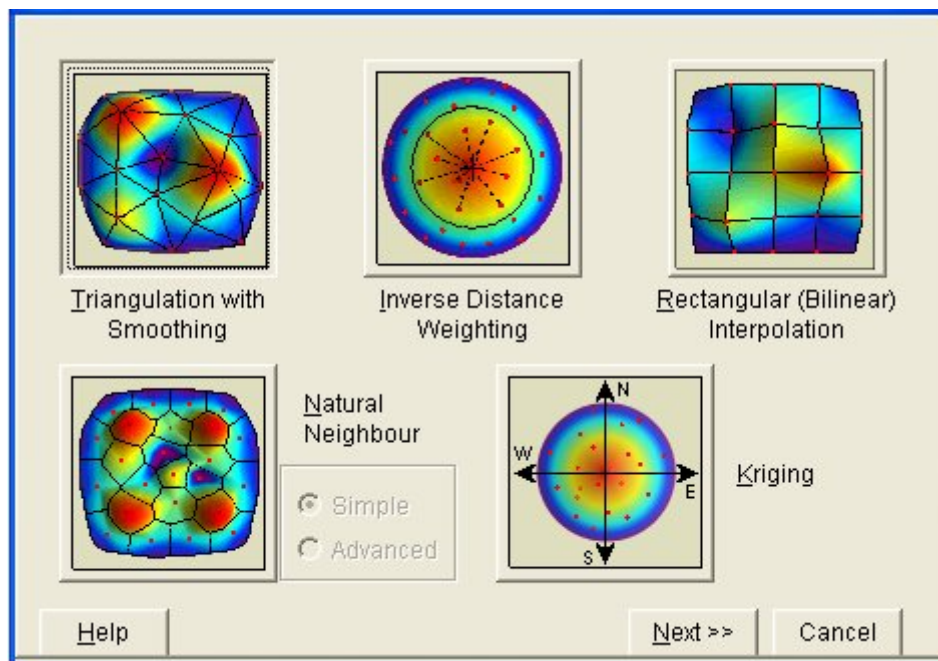


Figure IV-22 : Différents types de maillage proposés par Vertical Mapper

Etape N°10 : Affichage du produit final (MNA)

Après avoir traité toutes les cartes Topographiques du bassin versant de la Soummam, de la manière déjà citée, et avec tous les logiciels présentés, nous obtenons le MNA que nous visualisons ci-dessus en 3 dimensions :

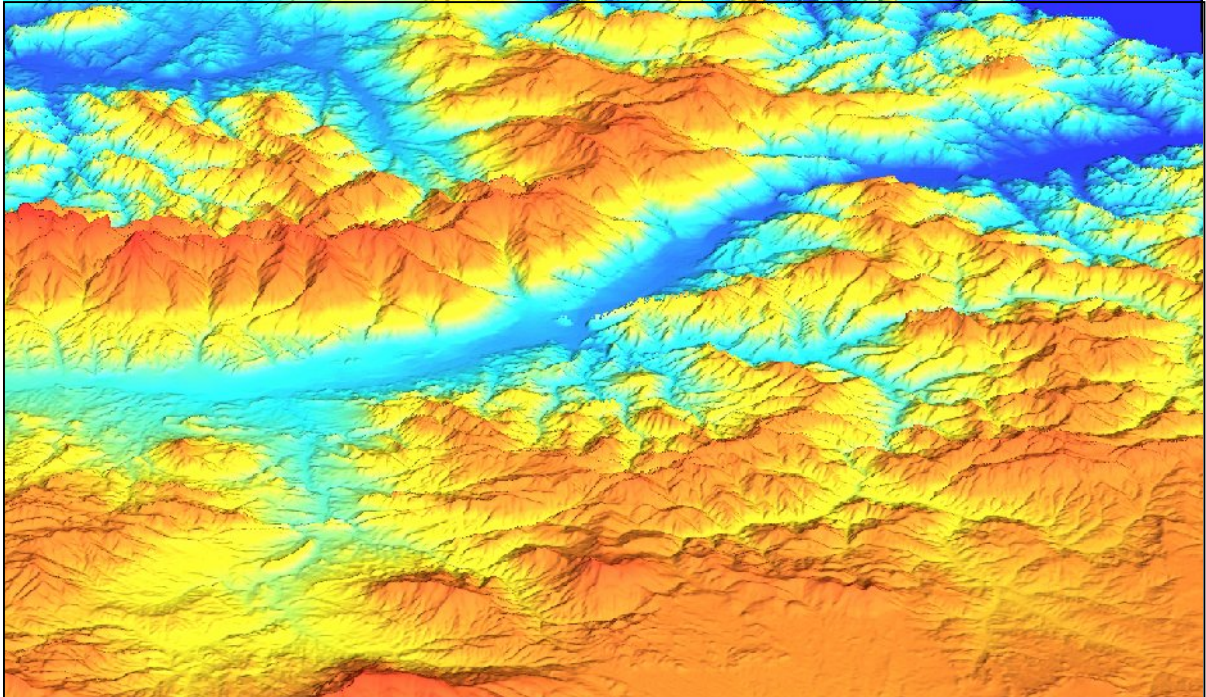


Figure IV-23 : Une partie du MNA du BV de la Soummam en 3 dimensions

De ce résultat des cartes dérivées peuvent être extraites telles que : cartes des directions, carte des pentes...etc.

IV.5. Conclusion

L'utilisation du SIG vis-à-vis de notre travail est la préparation des données nécessaires pour la modélisation. L'échantillon des coordonnées planimétriques X, Y et altimétriques Z des points obtenus par la numérisation des courbes de niveau des cartes topographiques est utilisée pour la construction du modèle numérique d'altitude (MNA), qui représente la couche de base de la base de données à réaliser.

Dans ce qui suit nous allons faire la simulation du phénomène de transformation pluie-débit sur le bassin versant de la Soummam par l'application du modèle hydrologique HEC-HMS. Cela après avoir fait la schématisation du bassin par le logiciel HecGéo-Hms pour la préparation des paramètres d'entrée.

Chapitre V :

*Application du modèle HEC-HMS
sur le bassin de la Soummam*

Chapitre V**Application du modèle HEC-HMS sur le bassin versant de la Soummam****V.1. Introduction**

L'étude du risque naturel constitue le centre d'intérêt vers lequel plusieurs approches convergent, à savoir : la prévision, la simulation, la modélisation mathématique etc.

La prévision hydrologique consiste en la prédétermination des variables hydrologiques à un horizon temporel fixé. Il s'agit essentiellement des hauteurs, des débits et des apports des cours d'eau, afin de gérer les risques : d'inondation, d'étiage prolongé ou de pollution. A partir des données disponibles, on cherche à améliorer notre connaissance de l'état des risques dans les conditions actuelles de topographie et d'occupation des sols.

Pour une meilleure utilisation en prévision, l'utilisation des modèles hydrologiques s'impose. Les modèles hydrologiques relèvent d'outils importants pour l'analyse des répercussions des changements climatiques principalement liés aux processus de cycle de l'eau. L'application de ces modèles exige la connaissance de toutes les caractéristiques physiques et hydrologiques des bassins versants, d'où la nécessité de calcul de ces paramètres et de les stocker dans des systèmes de bases de données.

Dans ce chapitre, notre travail consiste en l'application du modèle hydrologiques HEC-HMS sur bassin versant de la Soummam pour la détermination de ces paramètres, ainsi que les hydrogrammes de crues générés aux différents exutoires de ses sous bassins suites à des événements pluvieux potentiels.

V.2. Préparation des entrées par l'élaboration de la base de données

Avant de procéder à l'application du HEC-HMS, une étape de préparation des données est nécessaire. Cette préparation se fait par la schématisation du bassin versant qui correspond à l'élaboration d'une base de données de toutes les caractéristiques du bassin versant. Cette schématisation passe par différentes étapes que nous devons réaliser comme la détermination des lignes de partages, détermination des surfaces et des limites des sous bassins, les caractéristiques du réseau hydrographique, cours d'eau principal, etc.

Ce traitement saisit comme donnée principale le MNT du bassin versant qui nous parvienne des SIG. En sortie de ce traitement on récupère l'ensemble des informations nécessaires à la modélisation stockées sous formes de fichiers dans une base de données spatiale. Les paramètres convenables à la modélisation peuvent être extraits et saisis d'entrées pour l'application des modèles hydrologiques.

V.3. Schématisation du bassin par Hec-GéoHms

La schématisation du bassin versant en sous bassins et la détermination de leurs paramètres est réalisée à l'aide du logiciel HEC-GeoHMS. C'est une extension du système d'information géographique ArcView et du Spatial Analyst qui a été développé comme un outil hydrologique géospatial pour les ingénieurs et hydrologues (HEC-GeoHMS, 2003). Ce logiciel produit un certain nombre d'inputs qui sont directement employées par HEC-HMS. Il assiste l'utilisateur pour l'évaluation des paramètres hydrologiques en fournissant des tables des caractéristiques physiques des cours d'eau et des lignes de partage. Elle permet en outre aux utilisateurs de visualiser l'information spatiale, d'exécuter le « Spatial Analyst », et de délimiter les bassins et les ruisseaux.

La relation entre le SIG, le HEC-GeoHMS et le HEC-HMS est illustrée par la figure (V-1), (HEC-GeoHMS, 2003).

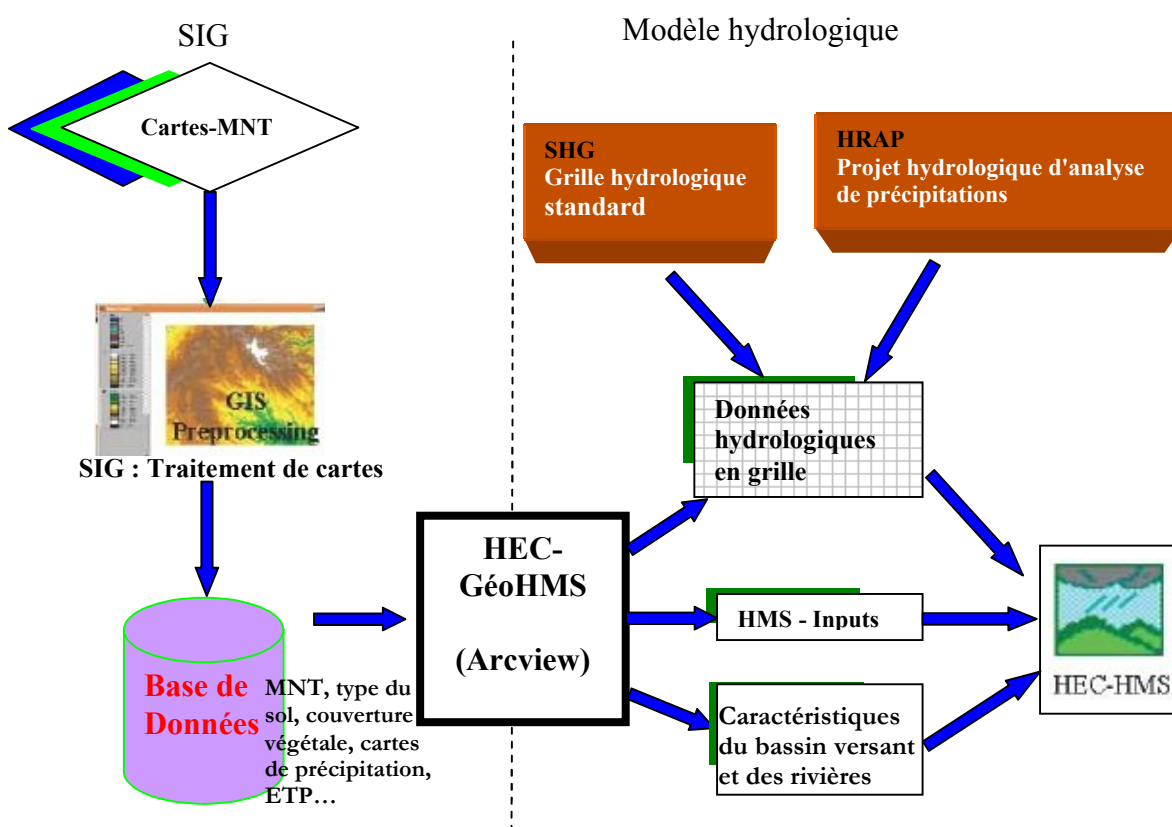


Figure V-1 : Relation entre le SIG, HEC-GeoHMS et HEC-HMS

Le SIG permet la digitalisation des cartes géographiques et topographiques et leur traitement. De ce traitement, il en résulte une base de données altimétrique géospatiale qui se compose du MNT du bassin, du type du sol, de la couverture végétale, etc. Le HEC-GeoHMS opère dans le MNT via le logiciel ArcView pour réaliser la schématisation en sous-bassins. Les fonctionnalités du SIG et du modèle hydrologique

sont séparées par la ligne indiquée par des tirets sur la figure. Le HEC-GeoHMS assure le raccordement entre ces deux domaines, ainsi il traduit l'information spatiale des SIG en une information hydrologique. Si les données radar de précipitations sont utilisées, l'utilisation des grilles de SHG ou de HRAP peut assurer un plus grand alignement et compatibilité entre les précipitations et les grilles de chaque sous-bassin.

V.4. Procédure de schématisation du bassin

La schématisation du bassin consiste en la réalisation d'un ensemble d'opérations permettant d'avoir vers la fin une base de données des paramètres de notre bassin à étudier. L'ensemble des opérations sont présentées dans la section suivante.

V.4.1. Chargement des extensions sous ArcView

Une première étape consiste au téléchargement des extensions sous le logiciel Arcview. Nous chargeons les extensions : 3D Analyst ; Géoprocessing ; Grid Analyst Extension ; Hec-Geohms ; Spatial Analyst ; Grid Generalization ; Grid Transformation. Après cette procédure, de nouvelles barres d'outils propres à chaque extension apparaissent.

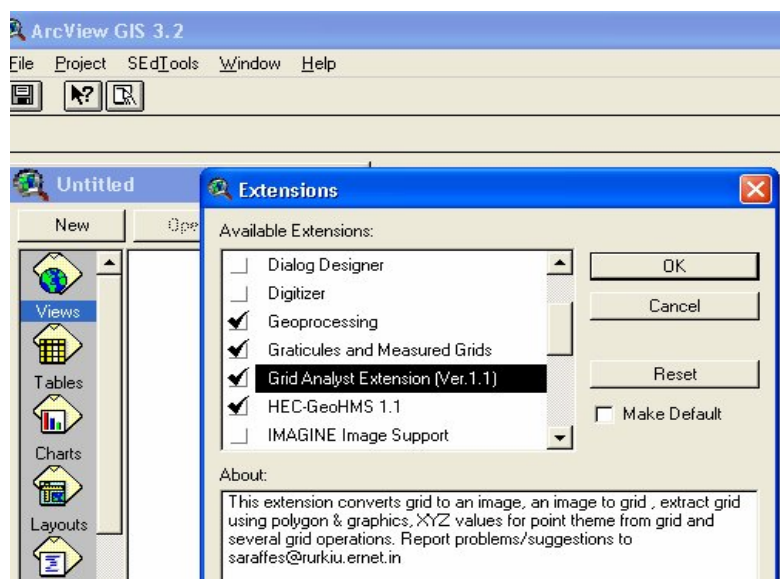


Figure V-2 : Téléchargement des extensions sous ArcView

V.4.2. Importation du MNT

Cette étape consiste à l'importation du modèle numérique du terrain «*thème*» de la région qui contient les limites géographiques de notre bassin d'étude, sur la vue principale d'ArcView pour pouvoir ensuite effectuer les étapes de traitement du MNT.

Après cette importation, un découpage du MNT d'une façon à extraire juste la zone d'étude est possible. Ce découpage est réalisé dans le but d'augmenter la vitesse de traitement des étapes (Figure V-3).

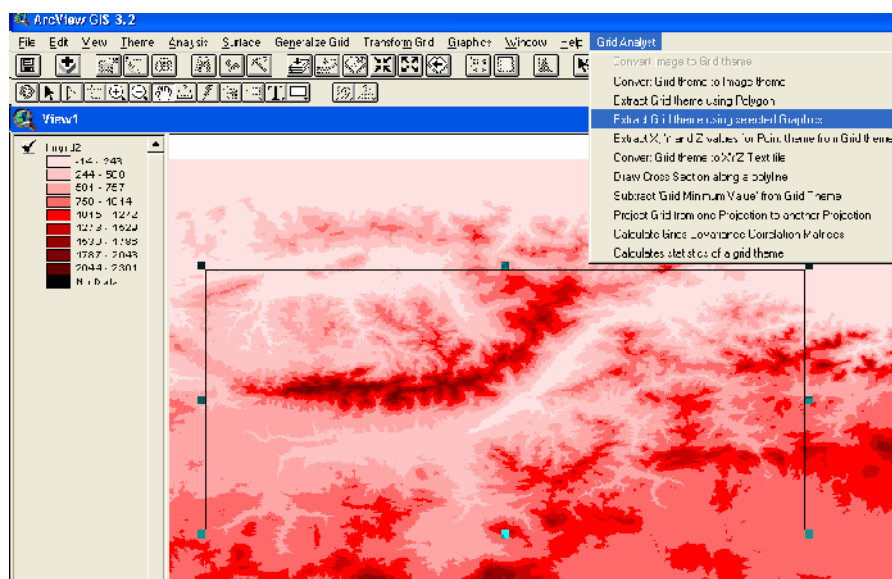


Figure V-3 : Importation du MNT sur la vue ArcView et découpage de la zone du BV de la Soummam

V.4.3. Traitement du MNT

Après avoir accompli les étapes précédentes, on procède au traitement du MNT par l'exécution du programme de pré-traitement du terrain «*Terrain Preprocessing*» de la vue principale «*MainView*» de l'extension HEC-GeoHMS.

Les principales fonctions de ce programme sont les suivantes, (figure V-4) :

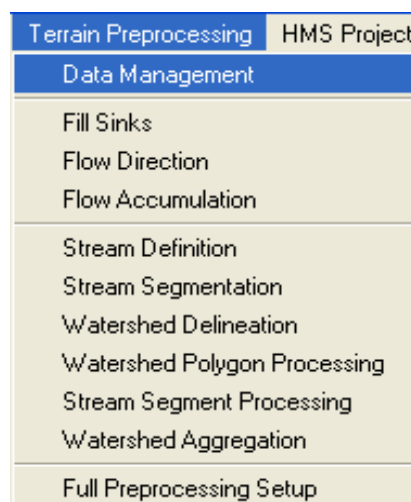


Figure V-4 : Fonctions du programme «*Terrain Preprocessing*».

Avant de démarrer l'exécution du programme pré-traitement de terrain, on doit tout d'abord charger le MNT (Grid) sur la vue *MainView* de HEC-GeoHMS. Pour se faire, nous utilisons le programme «*Add theme*», nous sélectionnons le type de données «*Grid Data Source*» puis nous chargeons le MNT, (figure V-5).

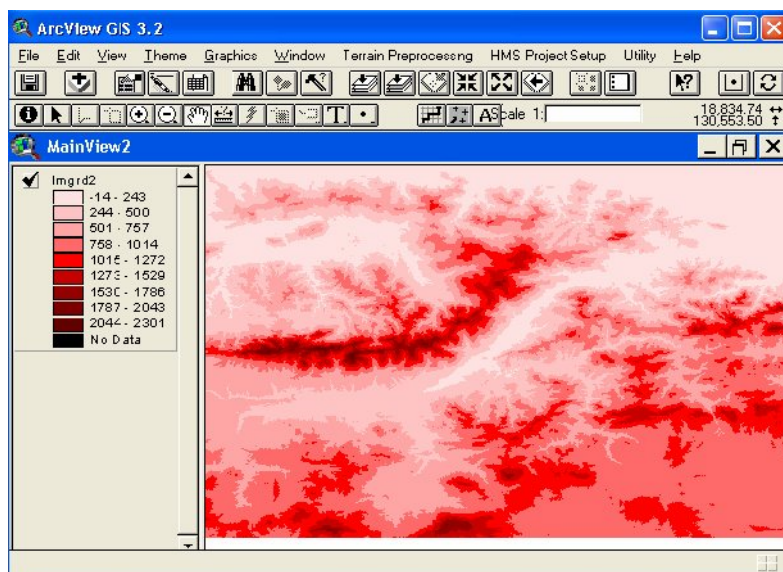


Figure V-5 : Chargement du Grid sur *MainView*

Le pré-traitement de terrain englobe l'ensemble des opérations représentées ci-dessous:

1. Correction du MNT

Lors de la réalisation du MNT plusieurs erreurs ont été commises et qui sont dues essentiellement aux prélèvements et aux interpolations effectuées, dans cette étape on procède à une correction du MNT par le remplissage des dépressions en augmentant l'altitude des cellules au niveau du terrain environnant afin de déterminer le sens d'écoulement. Cette opération permettra à l'eau de couler à travers le paysage.

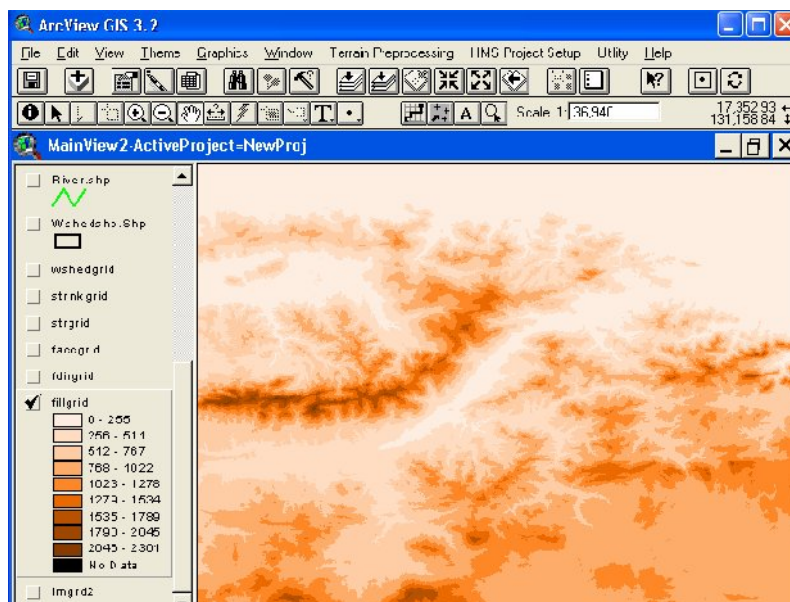


Figure V-6 : MNT corrigé

2. Sens d'écoulement

Cette étape définit le sens de écoulement suivant la direction de chaque cellule du terrain selon les huit directions possibles (Nord, Sud, Est, Ouest, Nord-est, Nord-ouest, Sud-est, Sud-ouest); (figure V-7).

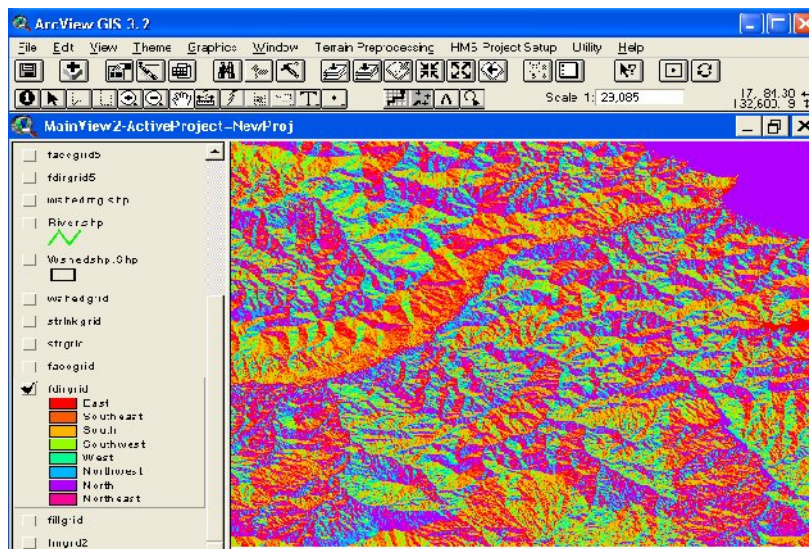


Figure V-7 : Direction de l'écoulement

3. Accumulation de l'écoulement

Cette étape détermine le nombre de cellules ascendantes (amont) s'écoulant à une cellule donnée ; (figure V-8).

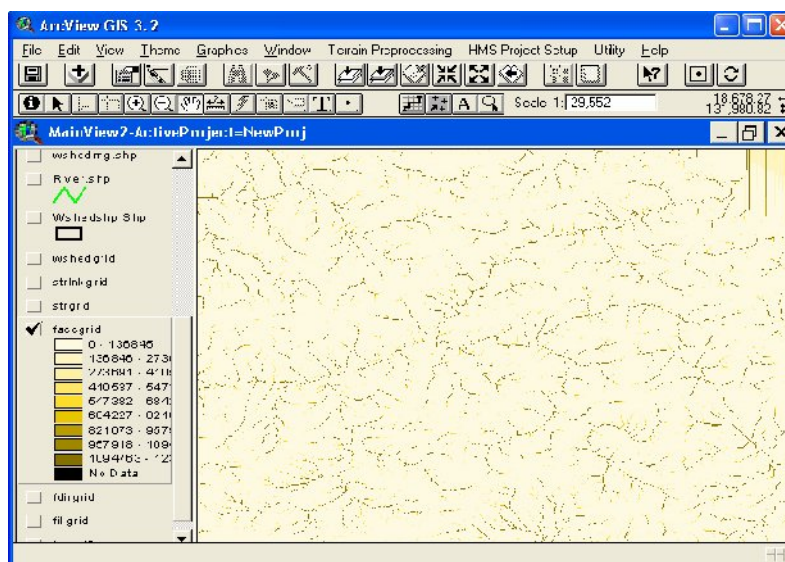


Figure V-8 : L'accumulation de l'écoulement

4. Définition des cours d'eau

Cette étape classe toutes les cellules dont l'accumulation d'écoulement est plus grande qu'un seuil défini par l'utilisateur; (figure V-9).

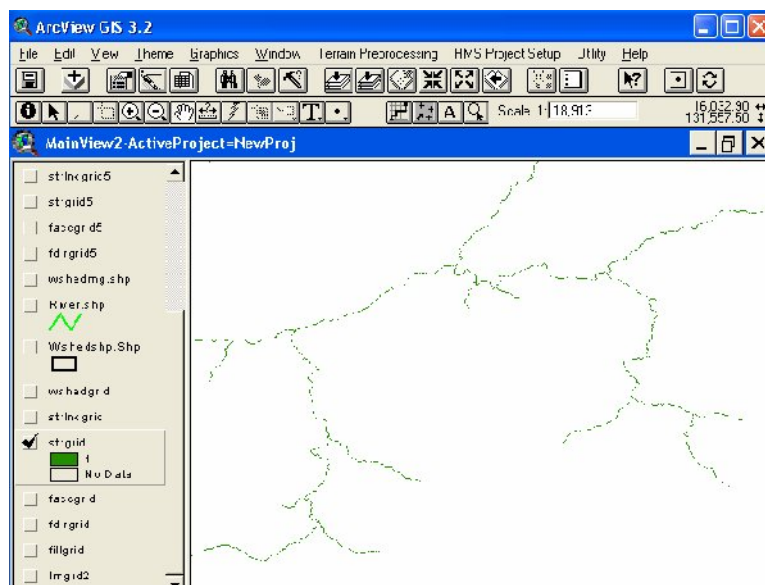


Figure V-9 : Définition des cours d'eau.

5. Segmentation des cours d'eau

Cette étape divise les cours d'eau en des segments. Les liens entre les segments sont les sections des cours d'eau qui relient deux jonctions successives ou une jonction et une sortie ; (figure V-10).

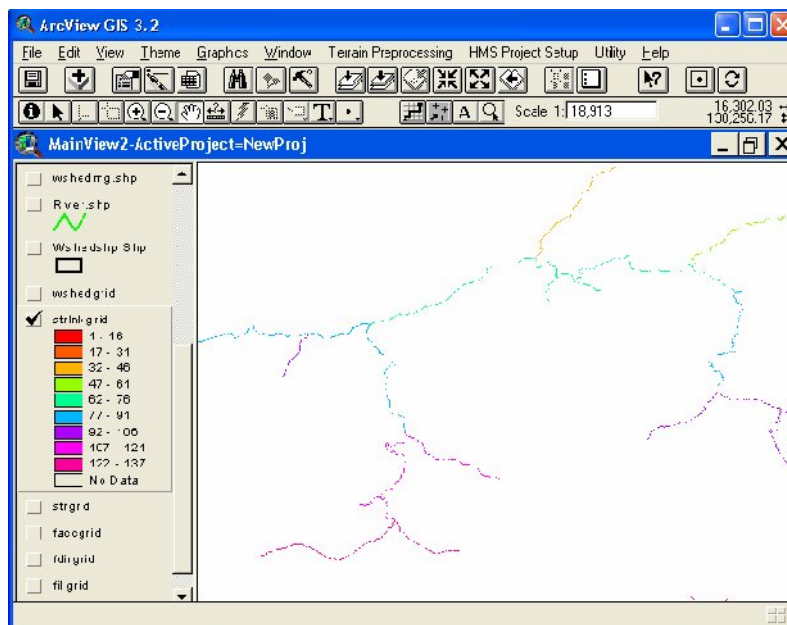


Figure V-10 : Segmentation des cours d'eau

6. Délimitation des lignes de partage

Cette étape trace les limites des sous bassins ou les lignes de partage pour chaque segment du cours d'eau.

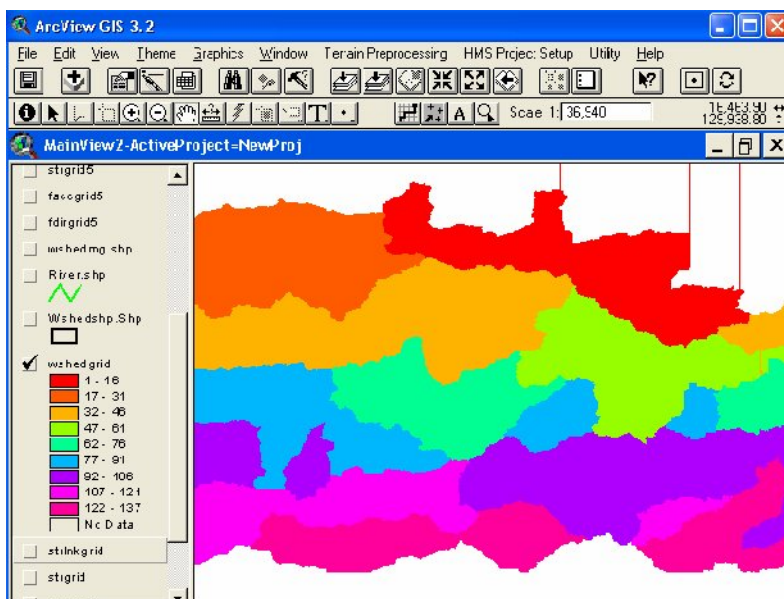


Figure V-11 : Délimitation des lignes de partages.

7. Polygones des lignes de partage

Cette étape convertit la représentation en grille des sous bassins en représentation vectorielle (figure V-12).

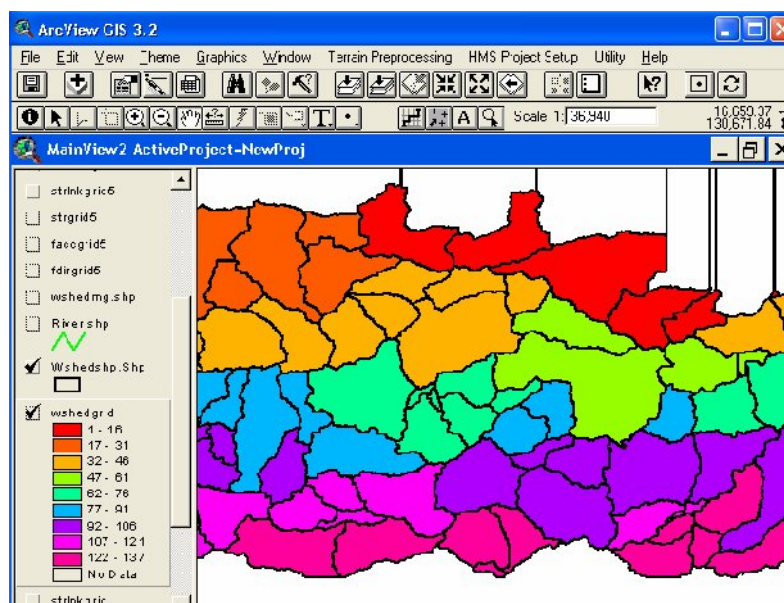


Figure V-12 : Polygone des lignes de partage

8. Traitement des segments du cours d'eau :

Cette étape convertit les cours d'eau et les ruisseaux de la représentation en grille en représentation vectorielle (figure V-13).

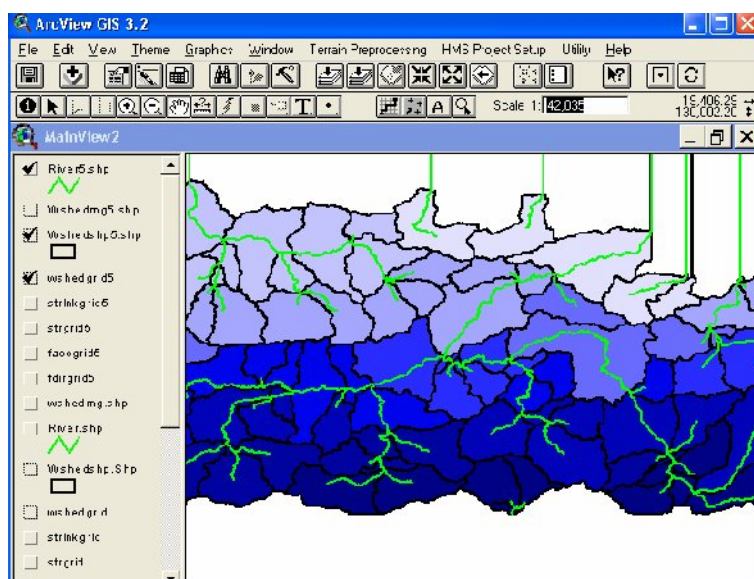


Figure V-13 : Représentation vectorielle des cours d'eau.

9. Agrégation des lignes de partage

Cette étape agrège les sous bassins à chaque confluence de ruisseaux. C'est une étape exigée et elle est exécutée pour tracer interactivement les sous bassins et relever les données déterminées des étapes précédentes ; (figure V-14).

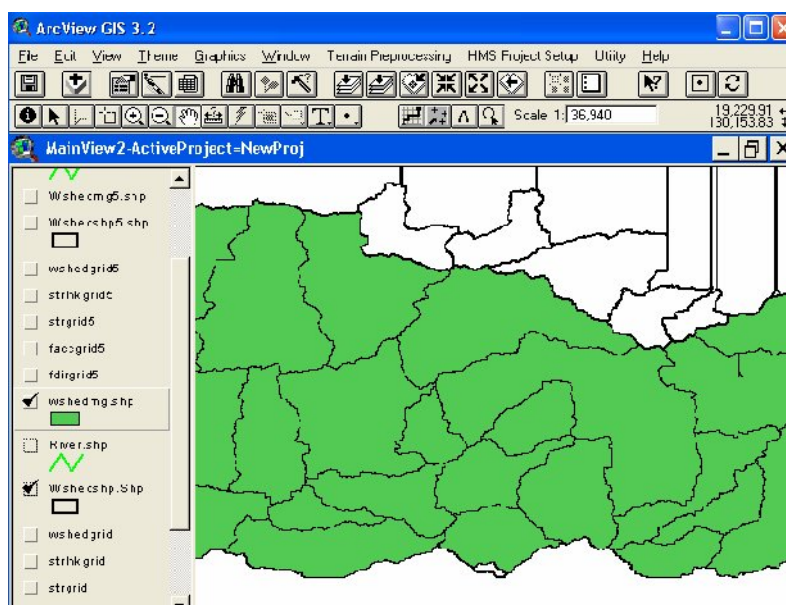


Figure V-14 : Agrégation des lignes de partage.

V.4.4. Installation du modèle hydrologique

Ce menu réalisé sur la vue principale MainView est responsable de l'extraction des informations nécessaires à partir de la base de données spatiale et de la création d'un projet de HMS. Cette étape consiste à :

- Déterminer l'exutoire ;
- Lancer un nouveau projet ;
- Lancer de nouvelles fenêtres concernant l'HMS.

1. Définition de l'exutoire

La définition d'exutoire consiste à poser le point sur l'exutoire du cours d'eau principal, ainsi nous déterminerons notre bassin d'étude.

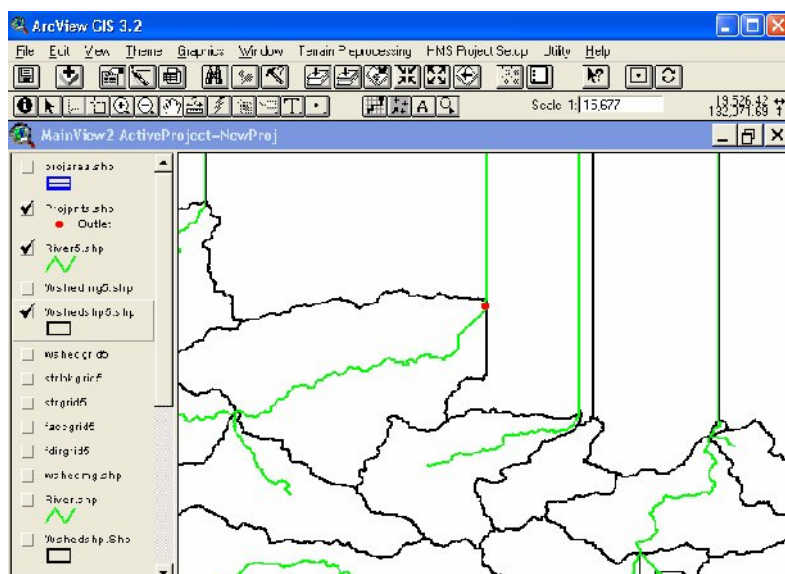


Figure V-15 : Définition de l'exutoire.

2. Lancer un nouveau projet

Permet de définir un nouveau projet et créer un annuaire qui va contenir toutes les données extraites et les fichiers créés.

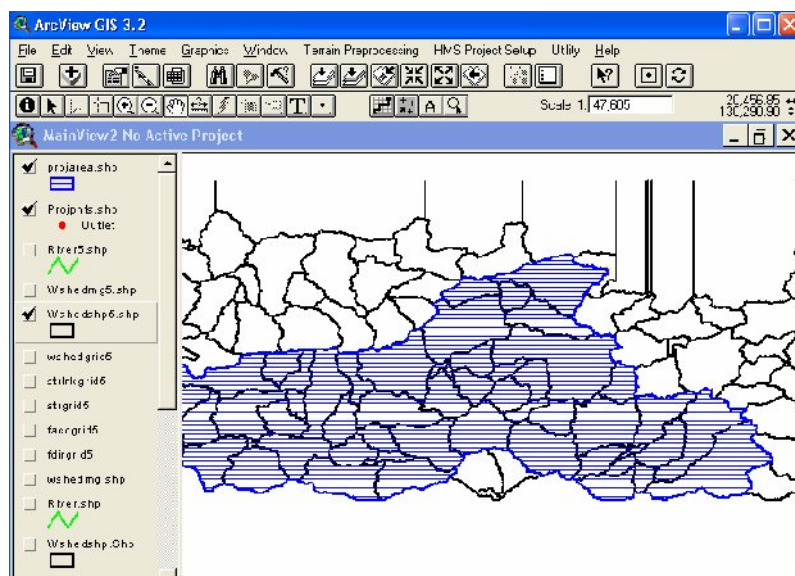


Figure V-16 : Lancement d'un nouveau projet.

3. Générer la vue de projet

Permet de générer une vue de projet (Project-view), après que l'utilisateur aurait défini la zone d'étude en donnant l'exutoire du bassin (figure V-17).

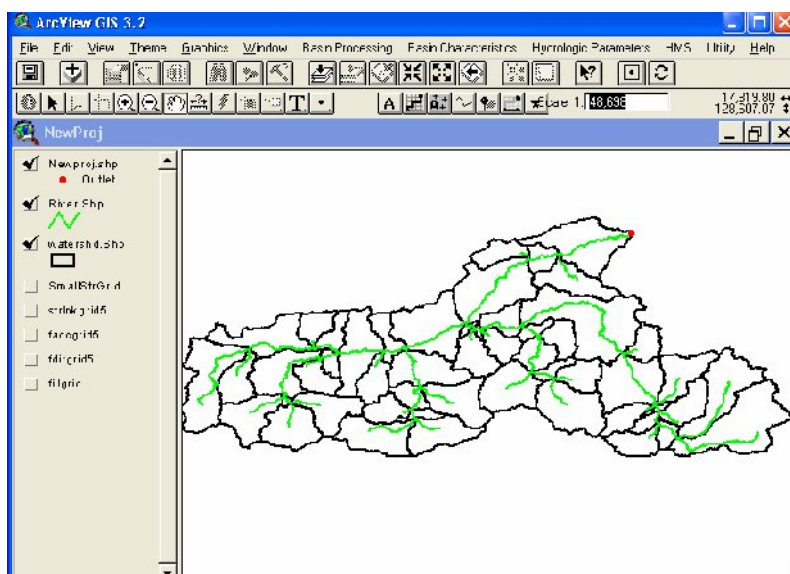


Figure V-17 : Génération du nouveau projet.

V.4.5. Traitement des sous bassins

Après que le pré-traitement du terrain est exécuté dans la vue principale, les données extraites pour le modèle HMS sont produites et placées dans la « vue de projet », ce qui permettra à l'utilisateur de mettre à jour les délimitations des sous bassins et des cours d'eau. Cette étape offre les possibilités de fusion de bassins, de subdivision de bassins, de fusion de cours d'eau et d'obtention de profils en long des cours d'eau.

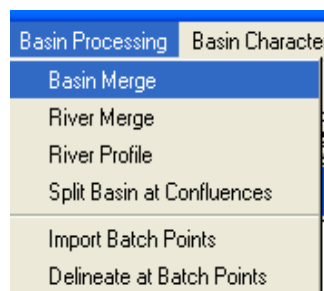


Figure V-18 : Programme traitement des sous bassins.

Dans notre cas, nous avons fait l'agrégation des petits sous bassins de manière à avoir les dix (10) sous bassins selon le découpage de l'A.N.R.H. (voir figure V-20).

V.4.6. Caractéristiques des sous bassins

Le logiciel Hec-GeoHMS donne la possibilité de calculer les caractéristiques hydrologiques et topographiques des cours d'eau et des lignes de partage. Ces

caractéristiques sont nécessaires pour la comparaison des sous bassins entre eux et l'estimation des paramètres des modèles hydrologiques.

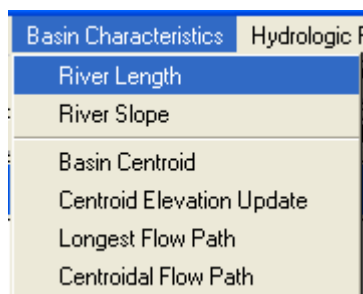


Figure V-19 : Programme de calcul des caractéristiques des sous bassins

Le programme « *Bassin Characteristics* », donne la possibilité de calculer les différentes caractéristique, à savoir : longueur et pente des cours d'eau, surfaces et périmètre des sous bassins, centroides des sous bassins, centroides des cours d'eau, plus long chemin d'écoulement,...etc. Ces différentes caractéristiques sont stockées dans des tables d'attributs dans le système de base de donnée crée par le logiciel.

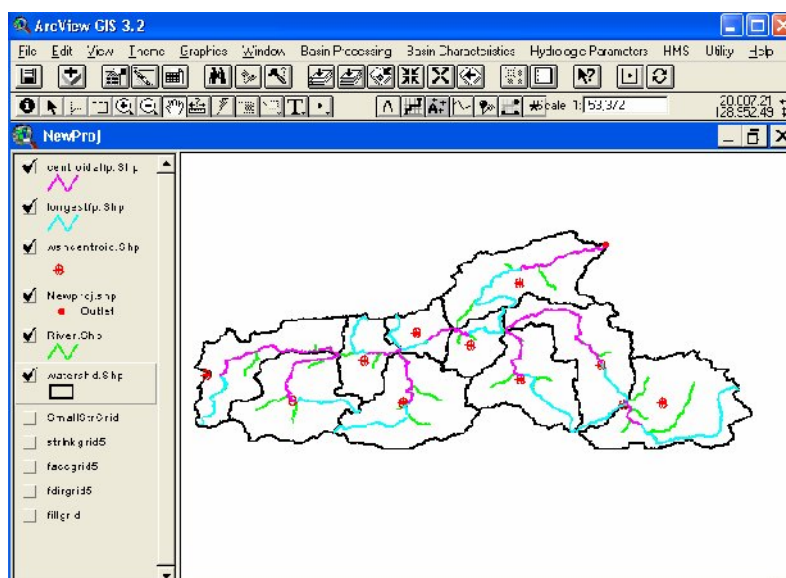


Figure V-20 : Caractéristiques du BV de la Soummam

Nous retrouvons l'ensemble des caractéristiques déterminées et calculées auparavant dans les tables d'attributs accessibles à partir de la fenêtre « Attribute Table » de menue principale.

Dans ce qui suit, nous présentons des copies écran de ces différentes tables :

- **Tables des caractéristiques des sous bassin** : nous retrouvons dans cette table l'ensemble des caractéristiques suivantes de chaque sous bassin : surface, périmètre, pente, altitudes ...etc. (figure V-21).

Shape	Id	Gridcode	Area	Wshid	Perimeter	Elevation	Slp_endpt	Slp_1065	Longestfl	Centroidal
Polygon	3	6	1394163.000	6	8724.000000	895.0000	0.425	0.103	3196.417	1462.587
Polygon	5	58	1360314.000	58	9738.000000	1109.0000	0.199	0.180	3902.468	2331.667
Polygon	6	70	437643.0000	70	4176.000000	666.0000	1.150	0.523	1511.741	450.073
Polygon	8	68	464238.0000	68	4266.000000	475.0000	0.638	0.275	1348.426	360.463
Polygon	11	73	1206135.000	73	7524.000000	831.0000	0.313	0.279	2487.277	1108.212
Polygon	12	81	1165311.000	81	9558.000000	721.0000	0.430	0.166	3300.424	2194.182
Polygon	18	85	599931.0000	85	5022.000000	362.0000	1.285	0.675	1412.065	496.404
Polygon	23	95	1267461.000	95	7554.000000	757.0000	0.363	0.235	2472.542	1429.852
Polygon	25	87	1399941.000	87	7620.000000	586.0000	0.458	0.262	2582.248	1048.087
Polygon	31	105	1667979.000	105	9198.000000	964.0000	0.150	0.099	2733.189	501.286
Polygon	34	117	747.0000000	117	168.0000000	848.0000	0.155	0.000	58.243	29.743

Figure V-21 : Caractéristiques des sous bassins.

- **Tables des caractéristiques des rivières :** ici, nous retrouvons la longueur, la pente, altitudes, coordonnées,...etc. de chaque segment des cours d'eau (figure V-22).

Shape	Anctid	Grid_code	From_node	To_node	Wshid	Rivid	Length	Riv_length	Slp_endpt	Uls_elev	Dls_elev
PolyLine	1	6	3	1	6	6	1101	1101.4	0.0327	36.0000	0.0000
PolyLine	2	33	2	4	6	33	152	151.6	0.4551	136.0000	67.0000
PolyLine	3	34	4	3	6	34	504	504.3	0.0615	67.0000	36.0000
PolyLine	4	48	5	3	6	48	480	480.0	0.3646	211.0000	36.0000
PolyLine	5	37	6	4	6	37	1342	1341.7	0.0730	165.0000	67.0000
PolyLine	6	71	8	6	68	71	183	182.6	0.1533	193.0000	165.0000
PolyLine	7	68	7	9	68	68	670	670.0	0.1134	291.0000	215.0000
PolyLine	8	74	9	8	68	74	153	153.1	0.1437	215.0000	193.0000
PolyLine	9	76	10	9	68	76	121	120.9	0.5459	281.0000	215.0000
PolyLine	10	73	11	7	73	73	259	259.0	0.2162	347.0000	291.0000
PolyLine	11	78	12	11	73	78	48	48.0	0.4796	370.0000	347.0000
PolyLine	12	75	13	8	68	75	167	167.5	0.4718	272.0000	193.0000
PolyLine	13	70	15	6	70	70	884	883.7	0.1109	263.0000	165.0000
PolyLine	14	81	14	17	81	81	106	106.4	0.3195	455.0000	421.0000
PolyLine	15	82	16	17	81	82	1005	1004.8	0.0965	518.0000	421.0000
PolyLine	16	85	19	15	85	85	323	323.0	0.1207	302.0000	263.0000
PolyLine	17	58	20	7	58	58	2209	2208.5	0.1508	624.0000	291.0000
PolyLine	18	83	17	21	81	83	404	404.1	0.1163	421.0000	374.0000

Figure V-22 : Caractéristiques des cours d'eau.

- **Tables des Centroïde :** À cette étape, nous retrouvons les informations sur l'ensemble des centres de gravité des sous bassins.

Shape	Wshid	Elevation
Point	6	895.0000
Point	58	1109.0000
Point	70	666.0000
Point	68	475.0000
Point	73	831.0000
Point	81	721.0000
Point	85	362.0000
Point	95	757.0000

Figure V-23 : Caractéristiques des centroïdes des sous bassin.

- **Table des plus long chemin d'écoulement :** Cette table présente des information sur les plus longs chemins d'écoulement de chaque sous bassin.

Shape	Wshid	Dselv	Slp_endpt	Slp_1085	Elv85ft	Longestfl	Elv10ft	Uselv
PolyLine	6	0.0000	0.425	0.103	836.6125	3196.417	29.5275	1358.0000
PolyLine	58	293.0000	0.199	0.180	2972.4350	3902.468	1240.1550	1070.0000
PolyLine	70	167.0000	1.150	0.523	2542.6458	1511.741	597.1117	1906.0000
PolyLine	68	166.0000	0.638	0.275	1515.7450	1348.426	603.6733	1026.0000
PolyLine	73	293.0000	0.313	0.279	2841.2017	2487.277	1131.8875	1071.0000
PolyLine	81	374.0000	0.430	0.166	2696.8450	3300.424	1351.7033	1792.0000
PolyLine	85	263.0000	1.285	0.675	3264.4292	1412.065	918.6333	2078.0000
PolyLine	95	374.0000	0.363	0.235	2759.1808	2472.542	1332.0183	1271.0000
PolyLine	87	264.0000	0.458	0.262	2726.3725	2582.248	1059.7092	1447.0000
PolyLine	105	848.0000	0.150	0.099	3461.2792	2733.189	2798.5508	1257.0000
PolyLine	117	848.0000	0.155	0.000	2782.1467	58.243	2782.1467	857.0000

Figure V-24 : Caractéristiques des plus longs chemins d'écoulement

- **Table des centres des cours d'eau principaux :** Ces centres sont calculés par la projection du centre de gravité des sous bassin sur le courant principal du même bassin. Le centre du courant principal est alors mesuré depuis le point projeté sur le cours d'eau principal jusqu'à l'exutoire du bassin approprié (figure V-25).

Shape	Wshid	Centroidal
PolyLine	6	1462.587
PolyLine	58	2331.667
PolyLine	70	450.073
PolyLine	68	360.463
PolyLine	73	1108.212
PolyLine	81	2194.182
PolyLine	85	496.404
PolyLine	95	1429.852
PolyLine	87	1048.087
PolyLine	105	501.286

Figure V-25 : Centroides des cours d'eau principaux

V.4.7. Conversion en HMS

Le programme HMS permet l'exécution d'un certain nombre de fonctions, à savoir :

1. Contrôle de données

Cette fonction examine toutes les données entrées et les résultats calculés pour s'assurer de l'uniformité de la description de la structure hydrologique du modèle. Par exemple, le programme vérifie si les noms des biefs, des sous bassins et de l'exutoire sont uniques. En outre, le programme vérifie que les cours d'eau et les centres des

bassins sont contenus dans les sous bassins et que les cours d'eau sont reliés aux points appropriés.

2. Schématisation HMS

Cette étape convertit l'ensemble des objets déjà calculés : centroides, chemin d'écoulement, en une schématisation HMS par des points et des segments de droites ;

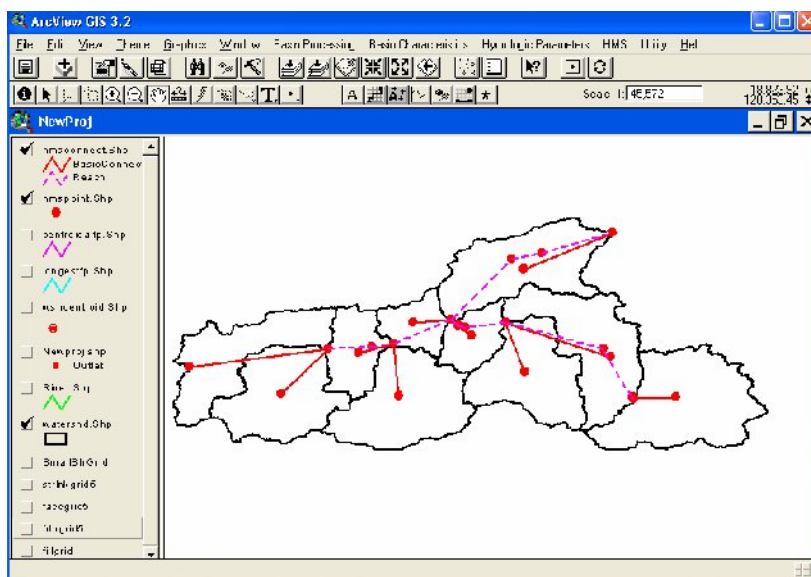


Figure V-26 : Schématisation du bassin en HMS

3. Légende HMS

Ce processus met en application des signes conventionnels de HMS pour représenter d'une manière plus descriptive les points et les segments en éléments hydrologiques, tels que : sous bassins, biefs, jonctions,...etc.

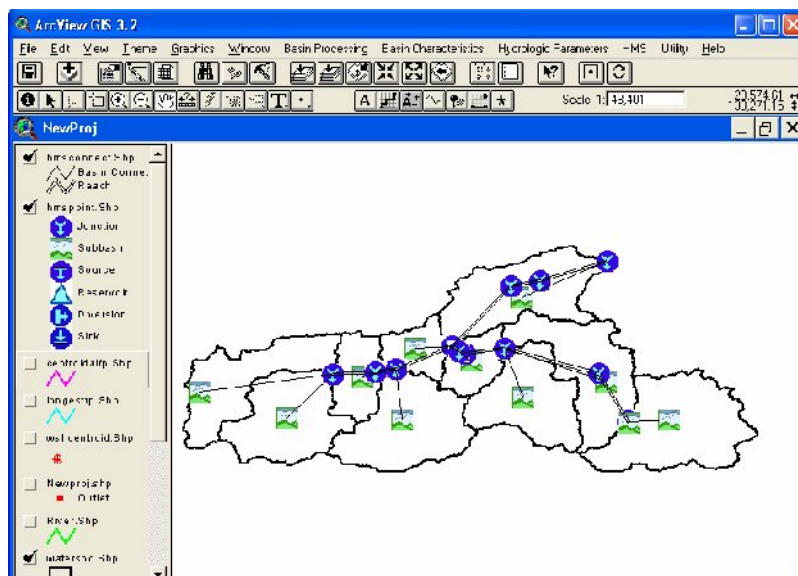
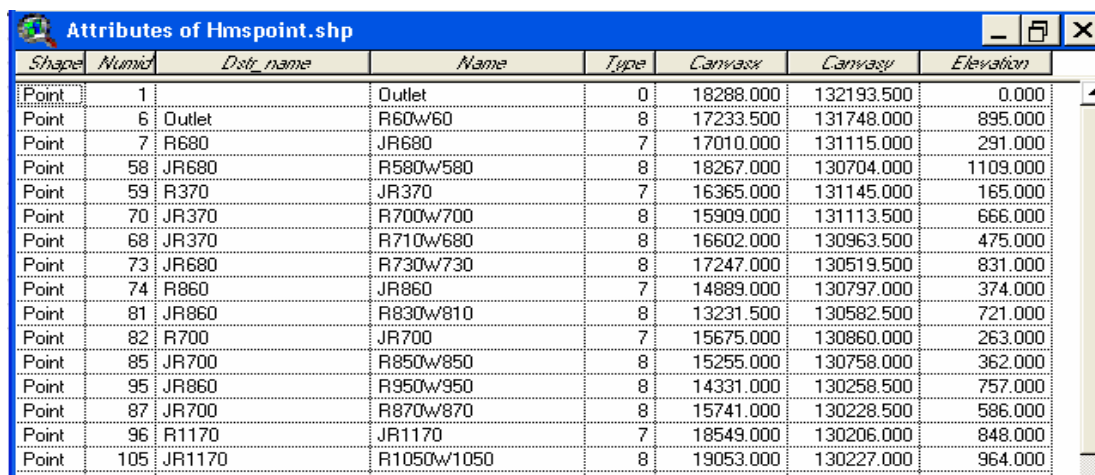


Figure V-27 : Représentation des éléments par la légende HMS.

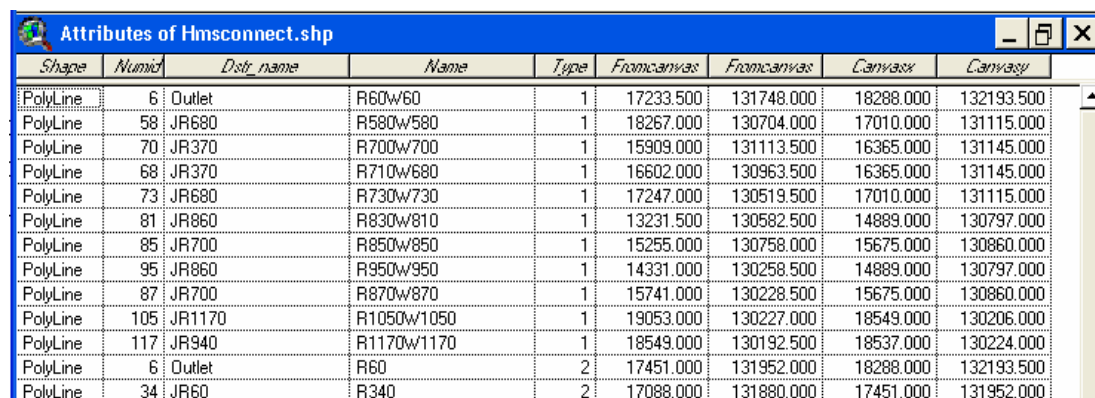
4. Ajout des coordonnées

Dans cette étape, nous assignons des coordonnées géographiques aux différents éléments hydrologiques dans des tables d'attribues. Cette opération permet l'exportation des données du système d'information géographique (format ASCII) vers un format non approprié tout en préservant l'information géospatiale (figure V-28 et V-29).



Shape	Numid	Dist_name	Name	Type	Canvasx	Canvasy	Elevation
Point	1		Outlet	0	18288.000	132193.500	0.000
Point	6	Outlet	R60w60	8	17233.500	131748.000	895.000
Point	7	R680	JR680	7	17010.000	131115.000	291.000
Point	58	JR680	R580w580	8	18267.000	130704.000	1109.000
Point	59	R370	JR370	7	16365.000	131145.000	165.000
Point	70	JR370	R700w700	8	15909.000	131113.500	666.000
Point	68	JR370	R710w680	8	16602.000	130963.500	475.000
Point	73	JR680	R730w730	8	17247.000	130519.500	831.000
Point	74	R860	JR860	7	14889.000	130797.000	374.000
Point	81	JR860	R830w810	8	13231.500	130582.500	721.000
Point	82	R700	JR700	7	15675.000	130860.000	263.000
Point	85	JR700	R850w850	8	15255.000	130758.000	362.000
Point	95	JR860	R950w950	8	14331.000	130258.500	757.000
Point	87	JR700	R870w870	8	15741.000	130228.500	586.000
Point	96	R1170	JR1170	7	18549.000	130206.000	848.000
Point	105	JR1170	R1050w1050	8	19053.000	130227.000	964.000

Figure V-28 : Coordonnées des différents éléments points HMS



Shape	Numid	Dist_name	Name	Type	Fromcanvas	Canvasx	Canvasy
PolyLine	6	Outlet	R60w60	1	17233.500	131748.000	18288.000
PolyLine	58	JR680	R580w580	1	18267.000	130704.000	17010.000
PolyLine	70	JR370	R700w700	1	15909.000	131113.500	16365.000
PolyLine	68	JR370	R710w680	1	16602.000	130963.500	16365.000
PolyLine	73	JR680	R730w730	1	17247.000	130519.500	17010.000
PolyLine	81	JR860	R830w810	1	13231.500	130582.500	14889.000
PolyLine	85	JR700	R850w850	1	15255.000	130758.000	15675.000
PolyLine	95	JR860	R950w950	1	14331.000	130258.500	14889.000
PolyLine	87	JR700	R870w870	1	15741.000	130228.500	15675.000
PolyLine	105	JR1170	R1050w1050	1	19053.000	130227.000	18549.000
PolyLine	117	JR940	R1170w1170	1	18549.000	130192.500	18537.000
PolyLine	6	Outlet	R60	2	17451.000	131952.000	18288.000
PolyLine	34	JR60	R340	2	17088.000	131860.000	17451.000

Figure V-29 : Coordonnées des différentes connections HMS

5. Installation du projet

Cette étape d'installation du projet valide toutes les étapes précédentes et rend le projet prêt à la simulation hydrologique par le HEC-HMS.

Toutes les étapes citées ci-dessus sont nécessaires, même obligatoires, chaque étape est traitée avec ordre, et chaque élément des tables d'attribues se trouve dans un fichier spécifique. Ces fichiers permettent, par la suite, au logiciel HEC-HMS de procéder à ces calculs d'hydrogrammes de crues, et de présenter les résultats selon les caractéristiques des tables définies.

V.5. Modélisation du comportement du BV de la Soummam par le HEC-HMS

Le modèle hydrologique HEC-HMS permet la simulation des événements averses crues observés aux bassins versants, et relatives à des événements de fortes pluies. Le but de ce travail est de déterminer les débits de crues maximales aux zone à risques d'inondation sur tout le long du cours d'eau principale du bassin versant.

Remarque : En raison du manque des données des pluies horaires du bassin versant étudié, aussi en raison du manque du temps, nous allons appliquer le HEC que sur un seul sous bassin de la Soummam. Pour cela, nous avons choisi le sous bassin dit d'**Azerou** qui porte le numéro "1504" sur l'annuaire de l'A.N.R.H., ce sous bassin entoure la région d'**Ighil Ali**, et se relie au **Oued El-Sahel** par son exutoire, dans une région d'agglomération de la commune de **Guindouze**.

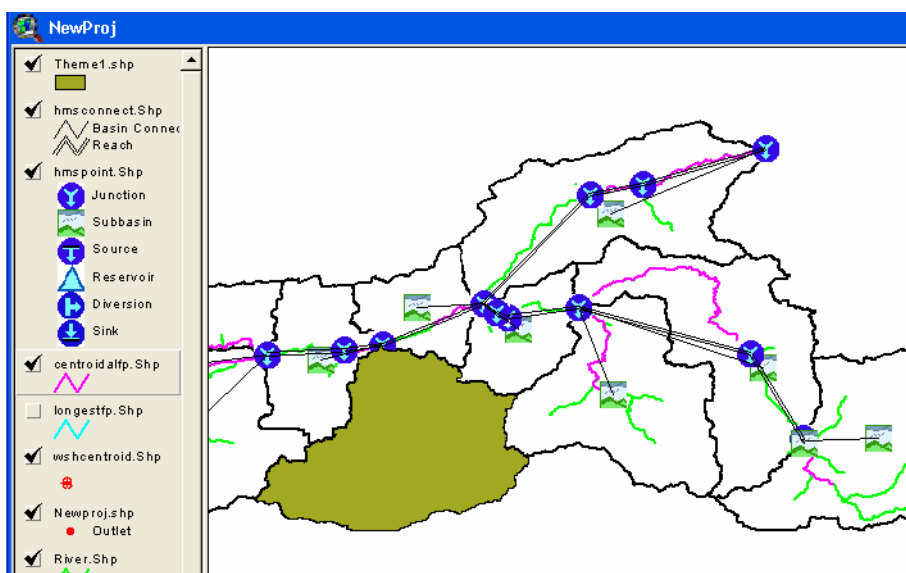


Figure V-30 : Position du sous bassin d'application (1504).

- Application du HEC-HMS sur le sous bassin d'Azerou (1504)

Avant de procéder à l'application du modèle HEC-HMS, il est nécessaire de préparer quelques de ses entrées nécessaires, ces entrées sont :

- Modèle de bassin (fichier.map et fichier .basin) ;
- Coordonnées de la station pluviographique en coordonnées Lambert ;
- Evénements pluvieux (Pluies) ;

V.5.1. Importation du modèle de bassin dans HEC-HMS

Une fois toutes les étapes de l'élaboration de la base de données des paramètres hydrologiques géospatiales sont effectuées avec le Hec-GeoHms, nous procédons à l'importation du notre modèle de bassin sur la vue de logiciel HEC-HMS pour la simulation du comportement pluie-débit.

Pour ce faire, en ouvrant la fenêtre principale du logiciel HEC-HMS, on appuie sur « *Component-Basin Model-Import* », on donne le chemin de l'emplacement du projet, et le bassin sera importé sur l'interface HEC-HMS. Une fois le bassin importé, on retrouve juste la légende HMS du modèle, pour retrouver le schéma du bassin, il faudra importer le fichier « *.map* », qui a été créé lors de lancement de projet.

Les fichiers ainsi importés sont les deux suivants : « *fichier.Map* » et « *fichier.Basin* ». Ces fichiers contiennent l'information géographique et hydrologique de sous bassin, tel que :

- *Schéma modèle de bassin (*.basin)* : représente le modèle hydrologique du bassin, ses éléments (biefs, jonctions) et leurs connectivités,
- *Fichier carte de fond (*.Map)* : Ce fichier comprend l'information géographique des frontières des sous bassins et des alignements des cours d'eau dans un fichier texte qui peut être lu par HMS.

Le résultat de ces opérations est illustré sur la figure suivante :

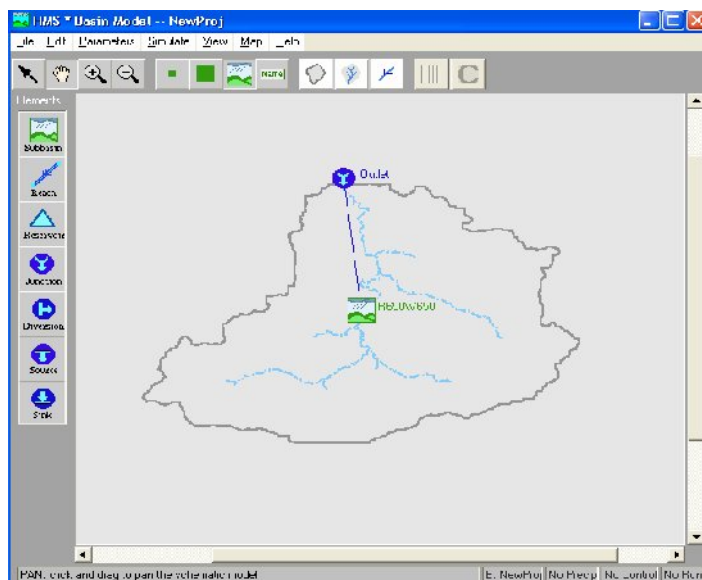


Figure V-31 : Importation du modèle de bassin sur HEC-HMS

V.5.2. Estimation des paramètres théoriques

La modélisation de la réponse hydrologique d'un bassin versant sous le logiciel HEC-HMS se compose de trois parties principales (HEC-HMS, 2002), chaque partie offre la possibilité de choix entre plusieurs méthodes de calcul. Les trois parties nécessaires sont les suivantes :

1. Modélisation du bassin versant ;
2. Modélisation de la météorologie ;
3. Spécifications de contrôle.

1. Modélisation du sous bassin

La modélisation du sous bassin par HEC-HMS est caractérisée par la modélisation des trois phénomènes suivants : les pertes par infiltrations, le ruissellement, et l'écoulement souterrain. Pour chacun de ces phénomènes, on choisit, dans une liste, une méthode de calcul, ensuite introduire dans les champs à remplir, les valeurs correspondantes pour chaque un des paramètres de la méthode choisie.

Le choix des modèles de calcul dépend essentiellement des données disponibles chez l'utilisateur et des connaissances sur le terrain sur le type des sols et le couvert végétal de chaque sous bassin.

Dans notre cas, nous avons opté pour les méthodes suivantes :

- Les pertes (*loss rate*) : Méthode de « Perte initiale, et à taux constant » ;
- Le ruissellement (*Transform*) : Méthode de « Clark » ;
- L'écoulement souterrains : (*Baseflow*) : « noBaseflow ».

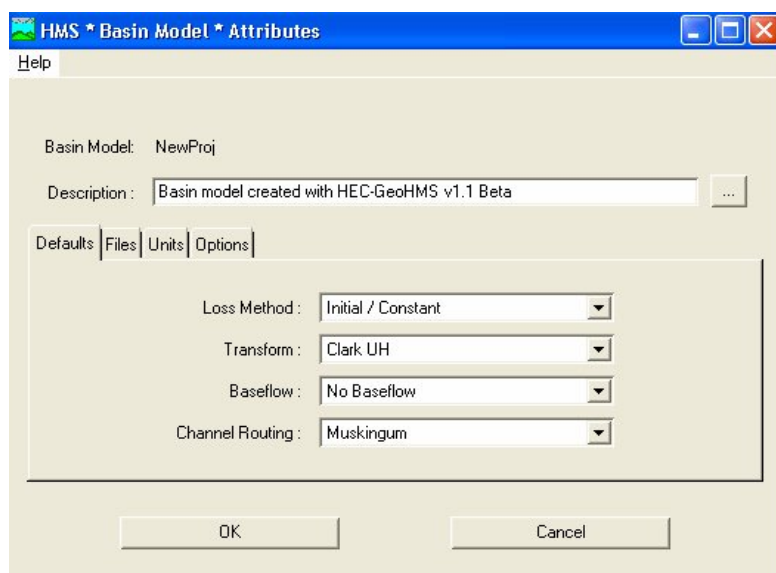


Figure V-32 : Modèle du bassin

2. Modèle météorologique

Le modèle météorologique est au même titre que le modèle de bassin indispensable à la simulation. Avant de procéder à la création du modèle météorologique, on doit tout d'abord créer une station pluviométrique, ensuite introduire les données de précipitations. Pour cela, Il existe plusieurs modèles de précipitations disponibles pour le choix, l'utilisateur doit sélectionner une méthode ensuite désigner le sous bassin auxquels elle s'applique.

a. Introduction des précipitations

Pour créer une station météorologique, dans l'interface principale, ouvrons le menu «data» et choisissons «precipitations gage ». Sur la fenêtre «precipitations gage Manager», ouvrons le menu « Edit » et choisissons « Add Gage », (figure V-33)

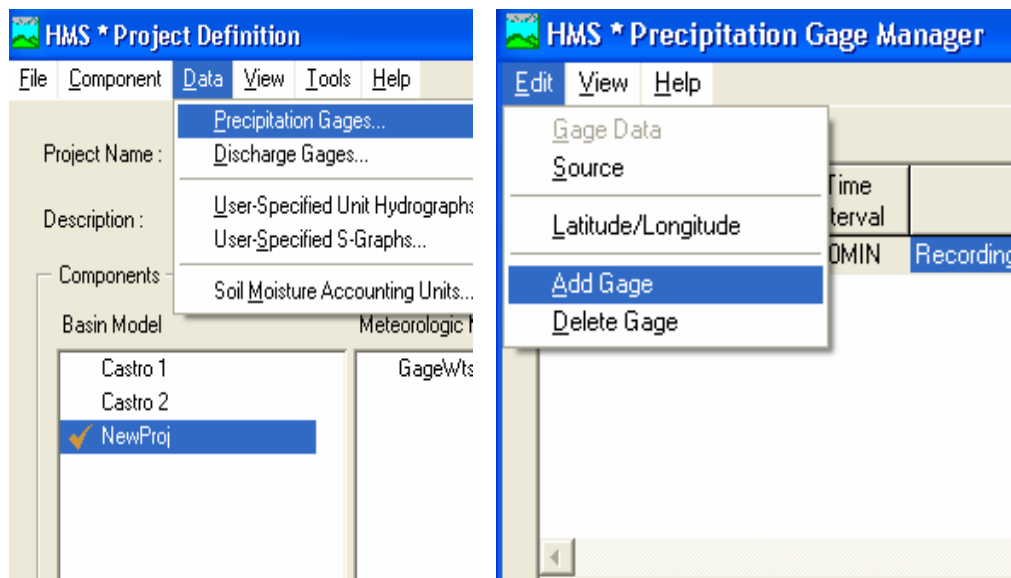


Figure V-33 : Création de la station météorologique.

Après cette opération, l'utilisateur doit introduire les données de précipitations avec un pas de temps choisi de manière à calculer l'hydrogramme de crue.

Remarque : Pour notre cas, la difficulté rencontrée dans cette étape est de s'acquitter d'évènements pluvieux réels et bien caractérisés du bassin versant de la Soummam. Et comme nous ne disposons pas de pluies réelles cumulées, nous avons utilisé une pluie hypothétique (théorique) dont nous avons défini la distribution (figureV-34).

Après introduction de données, nous pouvons les visualiser sous la forme que nous voulons (de graphe ou de tableau), (figure suivante) :

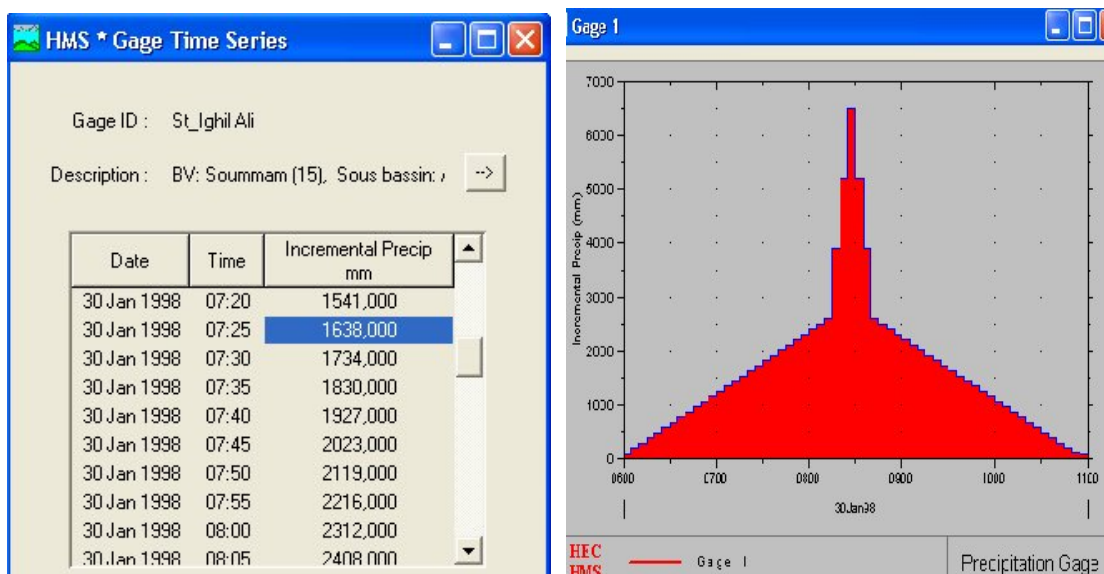


Figure V-34 : Visualisation des données de pluie introduites.

b. Nouveau modèle météorologique

Après avoir réalisé les étapes précédentes, nous créons un nouveau modèle météorologique, en procédant par (*Edit-Météorologic Model-New*), l'écran modèle météorologique apparaît. Le bouton (*Subbasin list*) en haut à droite de la fenêtre permet d'afficher la liste des sous bassins auxquels va être appliqué le modèle météorologique. Nous pouvons alors ajouter ou supprimer des sous bassins grâce aux fonctions *Add* et *Delete*.

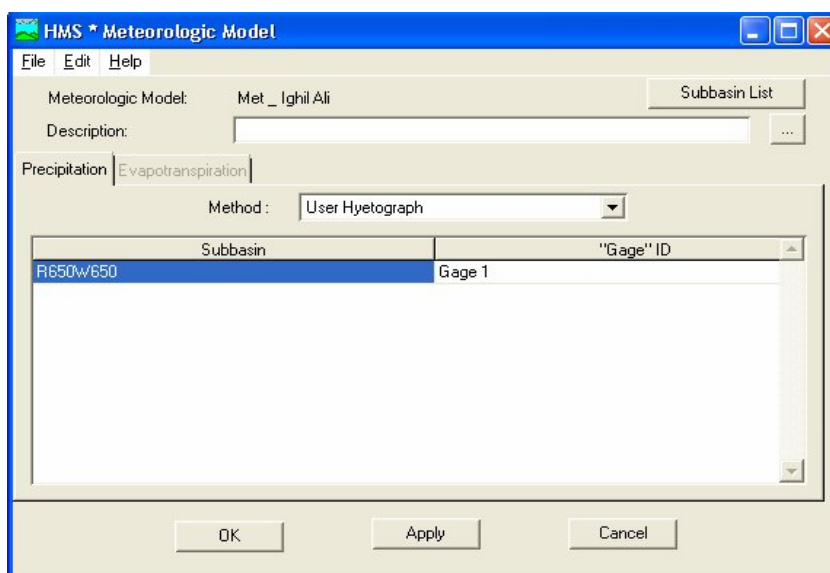


Figure V-35 : Fenêtre du modèle météorologique

3. Spécifications de contrôle

Les spécifications de contrôle sont la dernière composante nécessaire pour effectuer la simulation. A cette étape, nous définissons les instants de départ et de fin de la simulation ainsi que le pas de temps de calcul (figureV-36).

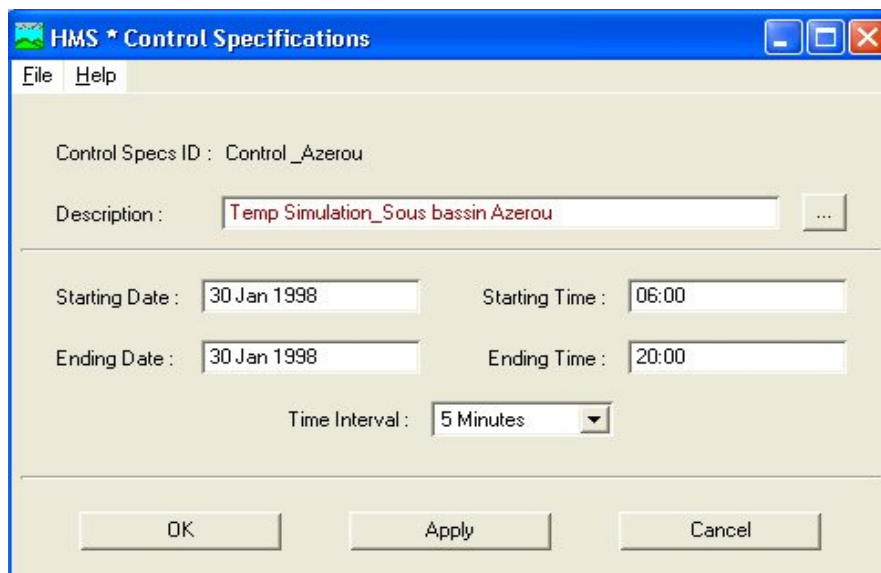


Figure V-36 : Introduction des paramètres «spécification de contrôle».

V.5.3. Configuration et exécution de la simulation

Dans HEC-HMS, une simulation est réalisée par la sélection d'un modèle de bassin, d'un modèle de précipitation et de paramètres de contrôle. Pour exécuter la simulation, nous devons tout d'abord la configurer : A partir du menu *Tools - Run Configuration*, nous choisissons le Bassin, le modèle météorologique, et les spécifications de contrôle, ensuite nous lançons l'exécution.

Une fois l'exécution est lancée, le logiciel récupère le nombre de fautes effectuées pendant l'introduction des données ou les méthodes choisies, et s'il ne trouve pas d'erreur, nous pourrions alors visualiser les résultats.

V.5.4. Visualisation des résultats

Les résultats de la simulation peuvent être visualisés de deux manières différentes :

- En utilisant le logiciel HecDssVue : qui permet l'affichage des résultats, dans des tableaux ou des graphes, et les enregistre dans les fichiers DSS (Base de données de HEC-HMS).
- En utilisant l'écran du modèle de bassin en chaque élément du bassin (sous-bassins jonctions, exutoire) sous forme de :
 - Graphe (*graph*) ;

- Tableau détaillé relatif aux résultats calculés à chaque pas de temps (*Time Series Table*).
- Tableau récapitulatif des résultats (*summary table*).

En notre cas, nous visualisons à l'aide de l'écran du modèle de bassin, et les résultats peuvent être imprimés, ou exportés sous forme de fichiers vers d'autres applications.



Figure V-37 : Visualisation des résultats de simulation

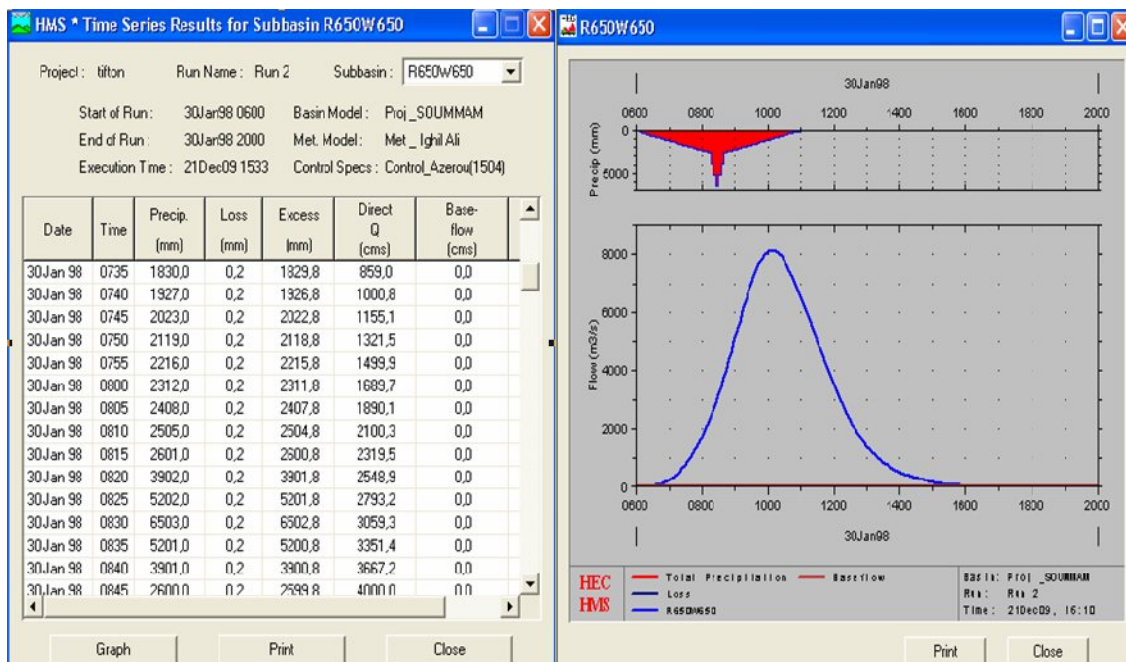


Figure V-38 : L'hydrogramme de crue résultant sous forme de graphe et de tableau détaillé.

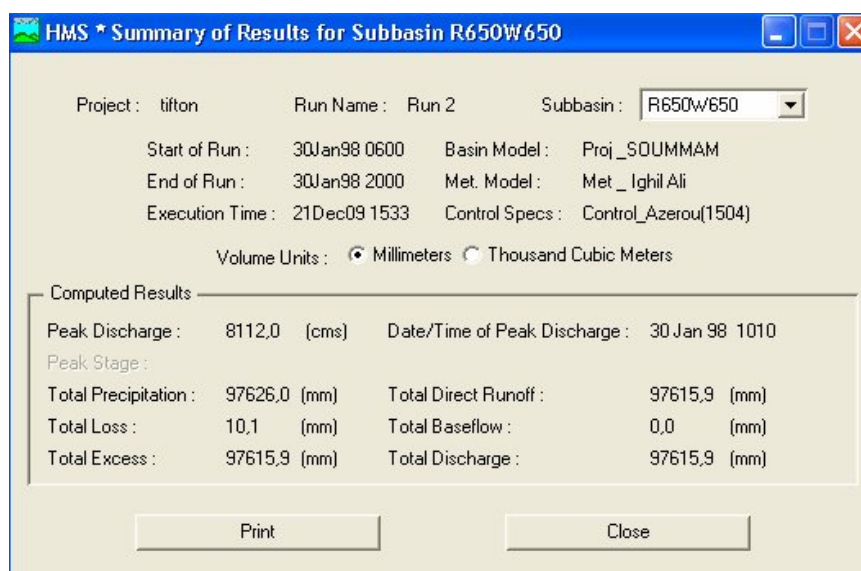


Figure V-39 : Tableau récapitulatif des résultats.

V.6. Conclusion

L'acquisition de données nécessaires à l'application est l'un des problèmes cruciaux de la modélisation hydrologique des bassins versants. La plus part des modèles utilisés exigent une étape de préparation de données pour pouvoir réaliser la simulation, le modèle HEC-HMS fait partie de type de ces modèles.

Le modèle hydrologique HEC-HMS permet la simulation des évènements averses - crues observés aux niveaux des bassins versants. Pour pouvoir l'appliquer sur le bassin versant de la Soummam, nous avons élaboré une base de données de toutes les caractéristiques physiques et hydrologique du bassin par le logiciel Hec-Géohms qui a saisi comme la donnée principale le MNT du bassin étudié.

Cette base de donnée, nous a permis d'extraire l'ensemble des caractéristiques des éléments composants, à savoir : caractéristiques des sous bassins, des cours d'eau, jonctions, de plus longs chemins d'écoulements, ...etc.

La schématisation du bassin par le Hec-Géohms nous a permis de créer un projet HMS, dans le but de réaliser la simulation de transformation pluie-débit. Pour cela, on a réalisé une application sur le sous bassin N°1504, dit Azerou, pour lequel nous avons déterminé l'hydrogramme de crue généré à l'exutoire suite à une journée de forte pluie.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans la littérature, de nombreux modèles hydrologiques existent, ayant chacun sa spécificité et son domaine d'application. Le modèle HEC-HMS est l'un des modèles les plus utilisés dans ce domaine d'application.

Le modèle HEC-HMS est employé dans la simulation hydrologique des Bassins Versants soumis à des phénomènes pluvieux prédéterminés.

Dans ce mémoire, notre travail s'est porté sur l'application de ce modèle sur le bassin de la Soummam dans le but de la connaissance du comportement hydrologique de celui-ci suite à des pluies violentes probables. Pour pouvoir appliquer ce modèle, nous avons besoin, en premier lieu, de la détermination de toutes les caractéristiques physiques et hydrologiques du bassin versant. Pour cela, nous avons élaboré une base de données, comme par exemple, le modèle numérique d'altitude qui est une information qui nous renseigne sur le relief de chaque point du terrain, et pour pouvoir le réaliser, nous avons utilisé un certain nombre des logiciels de dessin et des SIG, avec leurs extensions complémentaires. Nous avons aussi présenté les différentes étapes à suivre pour l'élaboration de ce modèle.

Dans la dernière partie de notre travail, nous avons procédé à la détermination des caractéristiques physiques et hydrologiques de notre bassin versant, tout en faisant une schématisation complète avec l'élaboration d'une base de données de toutes les caractéristiques et paramètres nécessaires à la modélisation. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel HEC-GéoHMS de la famille HEC, qui est une extension du SIG ArcView, et destiné à la préparation des inputs du modèle HEC-HMS.

Les différentes caractéristiques déterminées par HEC-GéoHMS sont stockées dans des tables d'attributs dans le système de base de données créé. Pour l'illustration de la méthodologie de travail, nous avons présenté des copies écrans de toutes les étapes suivies pour la création de la base de données et l'affichage des paramètres calculés.

La dernière étape a été consacrée pour la simulation du comportement hydrologique du bassin dans le but de la détermination des débits de crues relatifs à des événements de fortes pluies, aux zones à risques d'inondations, par l'application du modèle HEC-HMS. Seulement, en raison du manque de données des pluies horaires cumulées enregistrées, nous avons présenté une application sur un seul sous bassin que nous avons choisi. Celui-ci est le sous bassin dit AZEROU qui porte le code '1504' sur l'annuaire hydrologique de l'A.N.R.H. Ce bassin qui entoure la région d'Ighil Ali, se relie à l'oued Sahel par son exutoire qui se trouve dans une région d'agglomération dans la Commune de Guendouze.

Notre simulation de la transformation pluie-débit sur le sous bassin '1504' a donné les résultats suivants : (1) la valeur des pertes par infiltration est constante durant toute la période de la crue et égale à 0,2 mm, (2) la valeur de l'écoulement souterrain est nulle.

Le débit d'écoulement à l'exutoire du sous bassin varie selon le ruissellement. Le pic de l'hydrogramme de la crue résultant est enregistré à l'heure de dix heures (10 H) du matin et il correspond à 8000 m³/s.

Sur le tableau récapitulatif des résultats, on lit ce qui suit :

(1) Le volume total des précipitations est de 97626 mm, (2) le total des pertes est égal à 10,1 mm, (3) le total de ruissellement est de 97615 mm, ce qui a fait un total d'écoulement à l'exutoire du sous bassin de 97614 mm.

Enfin, nous espérons que ce travail a constitué une contribution significative pour la connaissance des caractéristiques du bassin versant de la Soummam et la détermination de son régime hydrologique tout en utilisant les nouveaux progrès de la science moderne constitués des modèles hydrologiques et des systèmes d'information géographique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Abdelali, K., (1999). « Proposition d'un plan d'aménagement de la vallée de l'Ourika suite à la crue du 17 août 1995 par l'élaboration d'une base de données multi-sources (haut atlas de Marrakech) », Thèse de doctorat 3eme cycle, université Mohamed V-AGDAL.

Becheraier, L., (2002). « Acquisition des données géographiques dans un SIG, applications sur le bassin de la basse Soummam par GéoConcept », Mémoire d'ingénieur, ENP, Alger. 82 pages.

Beisée, (2001) «Ecrêtage des crues de la Lèze par implantation d'ouvrages hydrauliques», Bureau d'Etudes Industrielles Sciences de l'Eau et Environnement (BEISEE), INP-Toulouse.

Benouis, A., (2004). « Étude des ressources en eau souterraines de la vallée de la basse Soummam », Mémoire d'ingénieur ENP, Alger. 74 pages.

Bouchaibi, J., (1998). « Elaboration d'un TIN (Triangulated Irregular Network) pour la modélisation numérique de bassin versant », mémoire d'ingénieur (E.M.I. Maroc).

Carbonnel, J. P. & Drobot, R. (1995). « Modèles mathématiques en hydrogéologie ». Université Pierre et Marie Curie, 131 pages.

Charifi, S., (2006). « Application du modèle hydrologique GR2M sur les bassins versants de la Soummam et de l'Isser », Mémoire de Magister, ENP, Alger. 143 pages.

Chocat, B., (1997). « Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement », Editions Tec&Doc - Lavoisier 1136 pages.

Collet, C., (1994). « Systèmes d'information géographique en mode image », presses polytechniques et universitaires Romandes.

Dangermonde, J., (2001). « L'information géographique : un langage puissant et universel ». Interview.

Demargne, C. L., (2001). « Qualité des modèles numériques de terrain pour l'hydrologie - Application à la caractérisation du régime de crues des bassins versants », Thèse de Doctorat, spécialité : Sciences de l'Information Géographique, Université de Marne La Vallée, 350 pages.

Denegre, J. & Salge, F. (1997). « Les systèmes d'information géographiques ». Presse universitaire de France, collection « Que sais-je ? », 128 pages.

Djokie, D. Maidement, D. R., (1991). « Terrain analysis for urban storm drainage.

Terrain analysis and distributed modelling in hydrology», hydrological processes, N°1, Vol. 5, pp115-124.

Driouèche, M., (2004). « Initiation aux Systèmes d'Information géographique : Map-Info ». Polycopier de cours, ENHS Blida.

Floissac, F., (1997). « Traitement automatique des MNTs pour l'analyse géomorphologique. Application aux Afars et à Taiwan », Thèse Universitaire de Toulouse II, 266 pages.

Florence, L., (2000). « Sig pour l'étude et l'aménagement touristique de la montagne ». Projet de Fin d'Etude d'ingénieur ESGT, France, 79 pages.

Frédérique, S., (1999). « Délimitation du bassins versants à partir d'un modèle numérique de terrain. Comparaison de différentes méthodes pour le bassin du Rio Negro (Amazone) ».

Gaouas, A. (2004). « Les SIGs ». Polycopier de cours de l'Institut National d'Agronomie d'Alger.

Gaume, E. (2000). « Cycle de l'eau et modélisation pluie-debit ». Cours Ecole Nationale des Ponts et des Chaussées (ENPC), Paris, 45 pages.

Gilliot, J., (2000). « Introduction aux Systèmes d'Informations Géographiques », Institut National Agronomique Paris Grignon, 61 pages.

Gnouma, R., (2006), « Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron », Thèse de Doctorat, Université : INSA de Lyon, 412 pages.

Graff, B., (2004). « Prédétermination des débits de crue des petits bassins versants torrentiels », Thèse de Doctorat, spécialité : Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental, Université Montpellier II, 376 pages.

Hammouche, A., (2004). « Simulation hydrodynamique des crues - cas de l'oued Soummam- », Mémoire de Magister, Université A.MIRA de Béjaia. 130 pages.

HEC-GeoHMS, (2003). « Hydrologic Engineering Center, Geospatial Hydrologic Modelling Extension », User's Manuel, USACE, 281 pages.

HEC-HMS, (2002). « Hydrologic Engineering Center, Hydrologic Modelling System, HEC-HMS, Applications Guide », USACE, 235 pages.

Henine, H., (2005). « Interfaçage entre un modèle hydrologique/modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluent les SIG », Mémoire de Magister, ENP, INRIA, Alger. 115 pages.

Henry, J. B., (2001). «Génération de MNT par photogrammétrie aérienne de petit format, application au versant instable de Super ».

Ider, K., (2004). « Modélisation hydrodynamique d'un cours d'eau, Application à l'Oued Soummam », Mémoire de Magister, ENP, Alger. 124 pages.

Jordan J. P., Bathurst J.C., (1987) «Modélisation hydrologique à base physique sur un bassin versant rural en climat tempéré », Symposium AISH, Vancouver.

Kadir, O., (2006). « Délimitation des zones inondables cas de l'oued SEBAOU », Mémoire de Magister, ENP, Alger. 122 pages.

Laaribi, A., (2000). « SIG et analyse multicritère ». Editeur Hermès science Publications, 192pages.

Laborde, J. P., (2000). « Eléments d'hydrologie de surface ». Université de Nice-Sophia Antipolis, [pdf] Ouvrage disponible sur le web, 204 pages.

Lebreton, L., (1999). « Un système d'information a référence spatiale comme outil d'aide à la gestion intégrée de l'eau en Tunisie centrale ». ENSA de Toulouse, 179 pages.

Leffad, K. (2005). «Application du modèle hydrologique HEC-HMS sur le bassin versant de Sidi Bel Abbès». Mémoire d'Ingénieur ENP, Alger. 80 pages.

Loup, J., (1974). « Les eaux terrestres. Hydrologie continentale ». Editeur Masson, 175 pages, Paris.

Musy, A., Higy, C., (1998). « Hydrologie Appliquée ». Edition H.G.A, Bucarest, 204 pages.

Ouazar, D., Hasnaoui, M. D., Aqid, N., (2003). «Water supply watershed planning and management: An Integrated approach », INCO MEDII/MPC-2000, EMI, Maroc. 46 pages.

Peck, A., Gorelick, S., De Marsily, G., Foster, S., Koralevski, V., «Conséquences of spatial variability in aquifer properties and data limitations for groundwater modelling practice», Int Corn, on Groundwater (ICGW) de IAHS, IAHS publication n° 175, 1988.

Rahai, A., (2006). « Délimitation des zones inondables - Application à l'oued Allalah - Bassin Versant de Ténès ». Mémoire de Magister, ENP, Alger. 104 pages.

Riad, S., (2003), « Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles a partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc ». Thèse de Doctorat, spécialité : Hydrologie de surface, Université d'Agadir, 154 pages.

Singh V. P. (1995) «Computer Models of Watershed Hydrology ». Water Resources

Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA,.

Soltan, A., (2006). « Utilisation du logiciel SIG GéoConcept pour l'élaboration d'une base de donnée de la Soummam ». Mémoire d'ingénieur, ENP, Alger. 78 pages.

Tradkhodja, W., (2007). « Essai de délimitation des zones inondables par SIG, Cas d'étude : bassin versant de la Seybouse ». Mémoire d'ingénieur, ENP, Alger. 78 pages.