



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences
de la Terre et de l'Univers
Département d'écologie et environnement

Laboratoire N 31, Gestion Conservatoire des Eaux, Sols et Forêts et développement durable
des montagnes de la région de Tlemcen, Algérie

Thèse en vue d'obtention du diplôme de doctorat en écologie végétale

**Modélisation hydrologique et hydraulique pour la cartographie de
la zone inondable de la ville de Sidi Bel Abbès en vue d'une
gestion participative du risque en Algérie**

Présenté par : M. BENMANSOUR Nadir

Soutenue publiquement le : 03/07/2019

Jury :

Karima ABDELLAOUI, Professeur, Université de Tlemcen
Driss HADDOUCHE, Professeur, Université de Tlemcen
Abderezak BOUANANI, Professeur, Université de Tlemcen
Abdellah MEDJBER, Professeur, Université de Saida
Abderrahmane HAMIMED, MCA, Université de Mascara

Présidente
Directeur de Thèse
Examineur
Examineur
Examineur

Remerciements

Au terme de ce travail, je remercie Allah le tout Puissant qui m'a donné la force, la patience ainsi que le courage afin de parvenir à terminer ce travail.

Je tiens à remercier mon Directeur de Thèse Monsieur **Driss HADDOUCHE**, Professeur à l'Université de Tlemcen, de m'avoir intégré dans son équipe de recherche (Gestion conservatoire de l'eau, du sol et des forêts et développement durable des zones montagneuses de la région de Tlemcen) et d'avoir accepté la direction de cette Thèse. Je le remercie pour ses encouragements ainsi que pour ses critiques et conseils constructifs pour aboutir à ce travail.

Je remercie aussi Madame la Professeur **Karima ABDELLAOUI**, d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance.

Mes remerciements vont aussi au Professeur **Abderezak BOUANANI**, au professeur **Abdellah MEDJBER** et au docteur **Abderrahmane HAMIMED** pour avoir bien voulu accepter d'examiner ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à :

- À tous les représentants des institutions qui m'ont aidé dans la procuration des données et informations nécessaires à l'élaboration de ce travail (ANRH, INTC, DHW Sidi Bel Abbès, Direction de la protection civil de la wilaya de Sidi Bel Abbès, Ministère des ressources hydriques, INRA) ;
- Je remercie mes amis et confrères Mustapha et El Hadj pour leur aide précieuse dans le SIG ;
- Je remercie Monsieur **BENHASSAINI** Professeur à l'université de Sidi Bel Abbès pour toute sa sympathie, ces conseils et ces encouragements.
- Ma sœur, professeur **Radia BENYELLES** de l'université de Tlemcen pour son aide et son soutien.

En fin toute ma gratitude à l'ensemble de ma famille qui m'ont tout le temps soutenu, en particulier ma mère. Aussi je remercie ma femme et mon fils pour leur patience durant l'accomplissement de ce travail. En espérant n'avoir oublié personne !

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	5
------------------------------	----------

CHAPITRE I : CARACTERISATION DU BASSIN VERSANT DE LA MEKERRA	12
I.1 Le contexte géographique	12
a. La localisation géographique	12
b. Le climat	13
I.2 Les entités géographiques	13
I.3 L'occupation des sols	14
I.4 Organisation et fonctionnement hydrologique de la Mekerra	16
I.4.1 Zone de réception ou de production des crues	17
I.4.2 Zone de transfert : de Mouley Slissen à Boukhanéfis	18
I.4.3 Zone d'expansion des crues : de Boukhanéfis à Sidi Bel Abbès	19
I.5 Caractéristiques hydrologiques de la Mekerra	19
I.5.1 Localisation des stations météorologiques	19
I.5.2 La variabilité spatio-temporelle des précipitations	21
I.5.3 Les débits	22
I.5.4 Aperçu géologique et hydrogéologique	22
<i>Aquifère des calcaires et Dolomies jurassico-cretace</i>	25

PARTIE I: « MODELISATION PLUIE-DEBIT DES SOUS BASSIN AMONTS DE LA MEKERRA EN VUE D'UNE PREVISION EN TEMPS REEL DES CRUES EXTREMES »

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES PROCESSUS HYDROLOGIQUES ET LEURS MODELISATION	30
II.1 Introduction	30
II.2 Les méthodes statistiques de prédétermination des débits de crues	31
II.3 La compréhension des processus hydrologiques une nécessité pour la modélisation déterministe	32
II.3.1 Approches de Modélisations Déterministes : globale contre distribuée	32
II.3.2 Description des processus hydrologiques	33
II.3.2.1 Processus hydrologiques susceptibles d'être responsables de la genèse et de la propagation des crues éclair	33
a. Pluie	34
b. Fonction de production	35
b.1 Théorie de Horton à propos du ruissellement	36
b.2 Théorie des aires contributives saturées	39
b.3 Processus modifiant la structure superficielle du sol	42
b.4 Limitations de la production du ruissellement surfacique par les macropores	42
b.5 Processus modifiant la fonction de production (l'interception et l'évaporation)	43
c. Fonction de transfert	43
c.1 Propagation des crues éclair dans les cours d'eau	45
c.1.1 propagation de crue dans les chenaux à forte pente	46
c.1.2 propagation de crue dans les chenaux à faible pente	46
c.1.3 Conclusion sur la propagation des crues en rivière	48
c.2 Bilan de la genèse des crues éclair dans un bassin versant classique	48

II.3.2.2 Les écoulements dans la roche fissurée	51
a. Qu'est-ce qu'un karst ?	51
b. Description et fonctionnement d'un karst	52
b.1 Zone d'alimentation d'un karst (impluvium)	53
b.2 Écoulements dans les karsts	53
c. Karst et crues éclair	54
CHAPITRE III : DESCRIPTION DES CONCEPTS ET DES OUTILS UTILISES POUR LA MODELISATION	
DISTRIBUEE DE LA HAUTE ET MOYENNE MEKERRA.	56
III.1 Introduction	56
III.2 Les données de précipitations	56
III.3 Vue d'ensemble du SIG	57
<i>Utilisation des SIG dans la modélisation hydrologique</i>	59
III.4 Présentation du logiciel HEC HMS	59
III.4.1 La modélisation des précipitations	61
III.4.1.1 Méthode basée sur le coefficient de pondération	61
a. Précipitation moyenne	61
b. Répartition temporelle	61
III.4.1.2 Inverse du carré de la distance	61
III.4.1.3 Evènements pluvieux hypothétiques	61
III.4.2 Modélisation de l'EvapoTranspiration (ETP)	62
III.4.3 Modélisation des pertes	62
<i>Concept de base</i>	62
III.4.4 Modélisation du ruissellement direct	62
III.4.5 Modélisation des écoulements fluviaux avec HEC HMS	63
III.4.6 La modélisation des écoulements souterrains	63
III.5 Description du fonctionnement du HEC HMS	63
III.5.1 Préparation des entrées du modèle HEC HMS	63
III.5.1.1 Préparation du modèle de bassin versant	64
<i>Le prétraitement du MNT</i>	64
III.5.1.2 Modélisation du bassin versant	65
a. Traitement du MNT	65
b. Procédure de schématisation du bassin versant	67
c. Établissement des éléments hydrologiques du bassin	69
d. Traitement des sous bassins	70
e. Importation du modèle de bassin dans HEC HMS	72
III.6 Le cadre de la modélisation	73
III.7 Description du modèle utilisé	74
III.7.1 Méthode de production du SCS	74
III.7.2 Le modèle de l'onde cinématique	76
CHAPITRE IV : MODELISATION DISTRIBUEE DE LA HAUTE ET MOYENNE MEKERRA SOUS HEC HMS	80
IV.1 Introduction	80
IV.2 Sélection des évènements extrêmes pour la modélisation pluie-débit	81
IV.2.1 Sélection des évènements	82
IV.2.2 Classification selon l'état d'humidité initiale du sol	84

IV.3 Présentation des évènements	85
<i>Evènement 1 : crue du 23 aout 2002</i>	85
<i>Evènement 2 : crue du 26 mai 2006</i>	87
<i>Evènement 3 : crue du 19 avril 2007</i>	88
IV.4 Discussions des résultats	90
IV.5 Synthèse des résultats	91

PARTIE II: « MODELISATION DETERMINISTE DE L'OUED MEKERRA POUR L'ETUDE DE L'IMPACT DES AMENAGEMENTS HYDROTECHNIQUES DE PROTECTION ET LA CARTOGRAPHIE DE LA ZONE INONDABLE AU NIVEAU DE LA VILLE DE SIDI BEL ABBES »

<u>CHAPITRE V : FORMULATION POUR LA CONCEPTION DU HYETOGRAMME ET DE L'HYDROGRAMME DE PROJET</u>	96
V.1 Introduction	96
V.2 Définition de l'aléa	97
V.3 Analyse critique des pratiques techniques conventionnelles	97
V.4 Rappels sur l'approche QdF	100
V.5 L'analyse QdF pour la construction d'hydrogrammes de projet	102
V.6 Conception du hyétogramme de projet	105
V.7 La modélisation déterministe pour l'étude du laminage de l'hydrogramme de crue de projet	106
V.7.1 Le modèle Muskingum Cunge, un modèle adapté aux faibles pentes	106
V.7.2 Utilisation du modèle de Muskingum-Cunge dans le HEC HMS	107
V.8 Concepts de base du fonctionnement des grands ouvrages de protection contre les inondations	108
V.8.1 Zones d'épandages et barrage écrêteur	108
<i>Equation de base</i>	109
V.8.2 Canal de dérivation	109

<u>CHAPITRE VI : ETUDE HYDROLOGIQUE POUR LA CONCEPTION DE L'HYDROGRAMME DE PROJET DE LA BASSE MEKERRA</u>	112
VI.1 Introduction	112
VI.2 L'étude hydrologique	112
VI.2.1 Recensement des données pluviométriques et hydrométriques	112
VI.2.2 Analyse des données disponibles	115
a. Pluies journalières extrêmes	115
b. Pluie à pas de temps fin	116
c. Débit moyen journalier	116
d. Débit de pointe	116
VI.2.3 Synthèse des données analysées	117
VI.2.4 Modélisation hydrologique pour l'étude de l'aléa sur la plaine de Sidi Bel Abbès	118
VI.2.4.1 Approche adoptée pour la détermination de l'hydrogramme de crue de projet	118
VI.2.4.2 Préparation des entrées du modèle	120
a. Hydrogramme synthétique à Sidi Ali Benyoub	120
a.1 Structure de la crue (crue moyenne)	120
a.2 Construction des courbes QdF et de l'HSMF à la station Sidi Ali Benyoub	121
b. Pluie de projet sur le faciès plaine	124
VI.2.4.3 Calage du modèle sur le faciès « plaine »	129

a. Calage de la fonction de cheminement entre les stations de Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbès	129
b. Calage de la fonction de production sur la plaine alluviale	131
VI.2.5 Impact des aménagements sur l'hydrogramme de projet centennal	133
a. Barrage retenu à Tabia (barrage écrêteur)	134
b. Zone d'épandage de l'oued Mouezen	136
c. Ouvrage de dérivation des eaux par le sud depuis l'amont de Sidi Bel Abbès	138

CHAPITRE VII: MODELISATION HYDRAULIQUE DE L'OUED MEKERRA ET CARTOGRAPHIE DE LA ZONE

INONDABLE DE LA VILLE DE SIDI BEL ABBES. **141**

VII.1 Introduction	141
VII.2 Etat de l'art	141
VII.2.1 Modèle hydraulique et données topographiques	142
VII.2.2 Les différents modèles hydrauliques de rivières	142
VII.3 Présentation du HEC RAS	144
<i>Equations de base pour le calcul dans HEC-RAS</i>	145
VII.4. Préparation des données topographiques pour la modélisation hydraulique	146
VII.4.1 Modélisation de l'oued sous forme d'un canal trapézoïdale	146
VII.4.2 Panachage des données altimétriques	149
VII.5 Test et validation de la tache inondable	149
VII.6 Un cadre juridique qui doit être complété	151

CONCLUSION GENERALE **155**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUESZ **160**

ANNEXE **166**

Liste des figures

Figure 1: Phase de gestion des risques d'inondations (Estupina, 2004).	6
Figure 2 : Situation géographique du bassin versant de la Mekerra.	12
Figure 3 : Carte des altitudes (a) et des pentes (b) du bassin versant de la Mekerra	14
Figure 4 : Carte d'occupation des sols du bassin versant de l'oued Mekerra.	16
Figure 5 : organisation hydrogéomorphologique du bassin de l'oued de la Mekerra (source : Hallouche, 2007).	17
Figure 6 : Répartition spatiale des pluviomètres et pluviographes sur le bassin versant de la Mekerra.	21
Figure 7 : caractéristiques des pluies maxima journalières annuelles (mm) observées sur six pluviomètres du bassin versant de la Mekerra entre 1980 et 1994.	22
Figure 8 : Carte hydrogéologique du bassin versant de la haute Mekerra.	24
Figure 9 : Délimitation du bassin versant de la Mekerra sur la carte géologique de l'Oranaie (Fenet, 1975).	27
Figure 10 : Classification des grandes catégories des modèles hydrologiques	31
Figure 11 : Taux d'infiltration pour une pluie uniforme (source : Musy, 2005).	37
Figure 12: schéma d'une zone contributive saturée (source : Musy, 2005).	40
Figure 13: processus de génération d'écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration ainsi que sur surfaces saturées (source : Musy, 2005).	42
Figure 14: front de l'onde cinématique (source : Degoutte, 2007)	46
Figure 15 : amortissement (ou étalement) de l'onde diffusive (l'onde de crue en pointillé a parcouru la distance x) (source : Degoutte, 2007)	47
Figure 16: relation (Q-y) non univoque (source : Degoutte, 2007).	48
Figure 17: comparaison de la propagation d'une crue avec ou sans épandage amont dans le lit majeur (source : Degoutte, 2007).	48
Figure 18: Courbes enveloppes du temps de montée en fonction de la surface du bassin versant classique (source : Jones, 1997).	50
Figure 19: Bloc-diagramme d'un paysage karstique synthétique (source : Bakalowicz, 1999)	52
Figure 20: photo d'un pluviographe à augets basculeurs (source : http://www.hellopro.fr)	57
Figure 21: MNT brut de l'ouest Algérien.	65
Figure 22: Délimitation du MNT du bassin versant de la Mekerra.	65
Figure 23: Vue d'ensemble du SIG et du modèle hydrologique (source : HEC GeoHMS manuel d'utilisateur, 2003).	67
Figure 24: le sens de l'écoulement.	68
Figure 25: le chevelu hydrographique de la haute et moyenne Mekerra.	68
Figure 26 : les sous bassins versants et les cours d'eau principaux et localisations des stations hydrométriques sur la haute et moyenne Mekerra.	69
Figure 27: lancement d'un nouveau projet HMS.	70
Figure 28 : Caractéristiques des sous-bassins et des cours d'eau de la haute et moyenne Mekerra.	71
Figure 29: Schématisation du modèle du bassin.	71
Figure 30: Résultat d'importation des fichiers map et bassin dans le modèle HEC HMS.	72
Figure 31: Schématisation d'un modèle de bassin pour la fonction de l'onde cinématique.	76
Figure 32 : Schéma général du modèle hydrologique (modélisation opérationnelle)	81
Figure 33 : saisonnalité de la base de données.	81
Figure 34 : événements classés suivant l'intensité du débit de pointe.	82
Figure 35 : Aires affectées à chaque pluviographe selon la méthode des polygones de Thiessen.	83
Figure 36 : les enregistrements des quatre pluviographes sur le bassin de la Mekerra lors du 23 aout 2002.	85
Figure 37 : hydrogrammes observé et simulé du 24 aout 2002 à la station de Sidi Ali Benyoub.	86
Figure 38 : Les enregistrements pluviographiques sur le bassin de la Mekerra au 26 mai 2006.	87
Figure 39: Hydrogrammes observé et simulé du 26 mai 2006 à la station Sidi Ali Benyoub.	88
Figure 40: Les enregistrements des quatre pluviographes sur le bassin de la Mekerra au 18 avril 2007.	89
Figure 41: hydrogrammes observé et simulé du 19 avril 2007 à la station de Sidi Ali Benyoub.	89
Figure 42: Carte des affleurements des ensembles karstiques (en bleu) autour de la Méditerranée (source : Bakalowicz et Dörfliger, 2005).	92

Figure 43: Distributions théorique et empirique des débits de pointe pour le Volp (a) et pour la Seille (b). (source : Sauquet, 2003)	98
Figure 44: Hydrogrammes de crue observés sur le Volp (a) et sur la Seille (b) (source : Sauquet, 2003).	99
Figure 45: Définition des variables examinées pour l'analyse QdF. (source : Sauquet, 2003)	100
Figure 46: Représentation des courbes QdF. (source : Sauquet, 2003)	100
Figure 47 : Etapes de la construction de l'Hydrogramme Synthétique Mono-Fréquence (source : Sauquet, 2003).	104
Figure 48: Format descriptif du profil en travers à huit (08) points (source : HEC HMS manuel de référence technique, 2000).	108
Figure 49: Schéma simplifié de la structure d'un ouvrage écrêteur de crue (source : HEC HMS manuel de référence technique, 2000).	109
Figure 50: illustration d'une structure de déviation de canal (source : HEC HMS manuel de référence technique, 2000).	110
Figure 51: répartition des stations de mesure à notre disposition pour l'étude du bassin versant de la Mekerra.	113
Figure 52: Schéma général du modèle hydrologique.	120
Figure 53: Structure de la crue à la station Sidi Ali Benyoub.	121
Figure 54 : Courbes QdF de la station Sidi Ali Benyoub.	122
Figure 55: Hydrogrammes synthétiques Mono-Fréquence de la station Sidi Ali Benyoub	122
Figure 56: courbes intensité durée fréquence pour la station Tabia selon la méthode K.BODY.	125
Figure 57: Courbes intensité durée fréquence pour la station Lamtar selon la méthode K.BODY.	126
Figure 58: Courbes intensité durée fréquence pour la station Sidi Bel Abbès selon la méthode K.BODY.	127
Figure 59: Courbes intensité durée fréquence pour la station Sidi Ali Benyoub selon la méthode K.BODY.	128
Figure 60 : Aires affectées à chaque pluviomètre selon la méthode des polygones de Thiessen.	129
Figure 61: Choix d'une section moyenne pour la forme de la coupe en travers d'un tronçon de l'Oued Mekerra (Google Earth pro, 2018).	130
Figure 62: Evolution de CN en fonction de l'IPA.	132
Figure 63:Crue de projet selon modélisation (T=100 ans).	133
Figure 64: Schéma général du modèle hydrologique intégrant les aménagements de protection	134
Figure 65: Image du barrage écrêteur de Tabia (source : http://www.dknews-dz.com).	135
Figure 66: Impact du barrage Tabia sur l'hydrogramme de crue centennale.	136
Figure 67: Zone d'épandage sur l'oued Mouezen et ouvrage d'écrêtement.	137
Figure 68: impacte de la zone d'épandage sur la crue centennale de l'oued Mouezen.	137
Figure 69: Déviation de l'oued Mekerra (canal sud).	138
Figure 70: Résultats de simulation de la crue centennale écrêtée sur les ouvrages amonts et arrivant à la dérivation sud.	139
Figure 71: Différentes pertes de charge dans un écoulement en lit composé (source : Proust, 2005). QDM.	143
Figure 72: digitalisation de l'oued Mekerra entre Sidi Khaled et Sidi Bel Abbès.	147
Figure 73: Dédoublment de la ligne d'écoulement.	148
Figure 74: Points altimétriques créés pour la modélisation du canal trapézoïdale.	148
Figure 75: Schéma du MNT haute résolution interpolé à partir des trois variantes.	149
Figure 76: Comparaison entre la tache inondable issue de la méthode utilisée et celle issue de la méthode hydrogéomorphologique.	150
Figure 77: Vérification des zones d'anomalies.	150
Figure 78: Tache inondable de la ville de Sidi Bel Abbès pour la période de retour de 100 ans.	151

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification du réseau hydrographique (Hallouche, 2007)	13
Tableau 2 : caractéristiques des stations de mesure sur la Mekerra.	20
Tableau 3 : divers éléments à connaître pour les sous bassins utilisant le modèle de l'onde cinématique sous HEC HMS.	78
Tableau 4 : caractéristiques des évènements de crue.	83
Tableau 5: paramètres calés sur l'hydrogramme du 24 aout 2002 à la station Sidi Ali Benyoub.	86
Tableau 6 : paramètres calés sur l'hydrogramme du 26 mai 2006 à la station Sidi Ali Benyoub.	88
Tableau 7 : paramètres calés sur l'hydrogramme du 16 avril 2007 à la station Sidi Ali Benyoub.	89
Tableau 8 : stations de mesures limnimétriques sur la Mekerra	113
Tableau 9 : Stations pluviométriques et pluviographiques sur le bassin versant de la Mekerra	114
Tableau 10 : ajustement des pluies extrêmes sur les quatre stations à une loi de Gumbel.	115
Tableau 11 : ajustements statistiques des débits moyens journaliers extrêmes pour les stations hydrométriques sélectionnées.	116
Tableau 12 : ajustements statistiques des débits de pointes pour les stations hydrométriques sélectionnées.	117
Tableau 13 : ajustements statistiques des débits de pointes pour les station de Sidi Ali Benyoub.	123
Tableau 14 : caractéristiques pluviométriques pour les quatre stations d'étude.	124
Tableau 15 : Valeurs des intensités maximales en fonction de la durée et du temps de retour	125
Tableau 16 : valeurs des intensités maximales en fonction de la durée et du temps de retour	126
Tableau 17 : valeurs des intensités maximales en fonction de la durée et du temps de retour	127
Tableau 18 : valeurs des intensités maximales en fonction de la durée et du temps de retour	128
Tableau 19 : récapitulatif des caractéristiques des extensions de cheminement entre les stations de Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbès.	131
Tableau 20 : les principaux résultats obtenus lors de l'analyse pluie-débit.	132

Liste des abréviations

1D : Unidimensionnel

2D : Bidimensionnel

3D : Tridimensionnel

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques

ASCII : American Standard Code for Information Interchange

CE : Communauté Européenne

CN : Curve Number

CRED : Centre de Recherche sur l'Epidémiologie des Catastrophes

DHW : Direction Hydraulique de Wilaya

DSS: Decision Support System

ESRI: Environmental Systems Research Institute

GeoTIFF: Georeferenced Tagged Image File Format

GPS: Global Positioning System

HEC HMS: Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System

HEC RAS: Hydrologic Engineering Center's River Analysis System

HSMF : Hydrogramme Synthétique Mono Fréquence

IDF : Intensité Durée Fréquence

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

IPA: L'Indice de Précipitations Antérieures

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NGA : Nivellement Générale de l'Algérie

OPS : Organisations Pelliculaires Superficielles

PDAU : Plan D'Aménagement Urbain

Pe: Précipitation excessive

QdF : Débit-durée-Fréquence

RN : Route Nationale

S : Surface

SCS : Soil Conservation Service

SIG : Système d'Information Géographique

UTM: Universal transverse Mercator

WGS: World Geodetic System

RESUME

L'Algérie est touchée par le phénomène des inondations causant à chaque fois d'importants dégâts humains et matériels, notamment pour les deux dernières décennies. Malgré cela, il n'existe que peu de travaux scientifiques sur ce phénomène dans notre pays. Cela est dû, entre autre, à l'insuffisance et au manque de fiabilité des mesures de terrain. De ce fait, le présent travail de recherche s'inscrit dans la problématique générale de la caractérisation de l'aléa inondation. Il s'agit d'une recherche appliquée sur les problèmes des inondations de la ville de Sidi Bel Abbès. Ce terrain d'étude, et à l'instar d'une majorité de bassins versants algériens, souffre de l'insuffisance et/ou de l'absence de données de terrain indispensables à l'ingénieur pour l'identification des zones à risque.

Pour pallier à ce manque de données, plusieurs alternatives sont proposées dans le présent travail. Ces dernières ont été intégrées dans une modélisation hydrologique déterministe pour l'étude de la possibilité d'élaborer un modèle hydrologique de prévision en temps réel, par la suite, la crue de projet a été définie et une modélisation hydraulique a été réalisée pour la cartographie des zones inondables. Cette approche méthodologique, combinée à la topographie du terrain, conditionne l'extension de la zone inondable.

Les résultats obtenus dans cette thèse, intégrant les outils de modélisation pour l'estimation de la crue de projet et la cartographie des zones inondables, arborent des solutions prometteuses en vue d'une gestion participative du risque. Autant, la méthode proposée pour la cartographie des zones inondables a été testée et validée à 85%, bien que la présence d'un milieu karstique sur les faciès amonts a, probablement, mis en échec le développement du modèle de prévision.

Mots clés : Risque inondation ; Modélisation hydrologique ; Modélisation hydraulique ; Cartographie ; Sidi Bel Abbès ; Algérie.

ABSTRACT

“Hydrological and hydraulic modeling for the mapping of the flood area in the town of Sidi-Bel Abbes for participatory management of the risk in Algeria.”

During the last two decades, Algeria has been affected by the phenomenon of floods. It has caused significant human and material damage. This is due to the inadequacy and unreliability of field measurements. Therefore, the present research work is part of the general problematic of flood hazard characterization. The research investigates the problems of floods of the city of Sidi Bel Abbes. Like a majority of Algerian watersheds, this field of study suffers from the insufficiency and / or the absence of necessary field data for the identification of risk areas.

To overcome this lack of data, several alternatives are proposed in this work. These alternatives have been incorporated into a deterministic hydrological modeling for the study of the possibility of developing a real-time hydrologic prediction model. Then, the project flood has been defined and a hydraulic modeling has been carried out for the mapping of flood zones. This methodological approach combined with the topography of the terrain conditions the extension of the flood zone.

The results obtained in this thesis offer promising solutions for participatory risk management. The proposed method for mapping flood zones has been tested and validated at 85%, although the presence of a karstic environment on the ‘upstream facies’ has probably defeated the development of the forecasting model.

Keywords: Flood risk; Hydrological modeling; Hydraulic modeling; Mapping; Sidi Bel Abbes; Algeria

الملخص

"النمذجة الهيدرولوجية والهيدروليكية لرسم خرائط منطقة الفيضان لمدينة سيدي بلعباس بهدف إدارة تشاركية للمخاطر في الجزائر."

تفشيت ظاهرة الفيضانات في الجزائر خاصة خلال العقدين السابقين مما تسبب في أضرار بشرية ومادية جسيمة. والسبب في ذلك يرجع إلى عدم كفاية القياسات الميدانية وعدم موثوقيتها. ولذلك ، فإن موضوع البحث الحالي جزء من الإشكالية العامة لتوصيف خطر الفيضان حيث يركز على مشاكل الفيضانات لمدينة سيدي بلعباس. ومثلما هو الحال في الكثير من مستجمعات المياه الجزائرية، يعاني هذا المجال من الدراسة من عدم كفاية و / أو عدم وجود بيانات ميدانية ضرورية لتحديد مناطق خطر الخاصة .

يهدف موضوع البحث للتغلب على هذا النقص في البيانات ، لذلك يتم اقتراح العديد من البدائل؛ وقد أدرجت هذه البدائل في وضع نموذج هيدرولوجي دقيق لدراسة إمكانية تطوير نموذج تنبؤ هيدرولوجي فعلي. بعد ذلك ، تم تحديد مشروع الفيضان وتم تنفيذ نموذج هيدروليكي لرسم حدود مناطق الفيضان. يتعلق هذا المنهج المتبع بتضاريس الأرض التي تسهم في تمديد منطقة الفيضان.

النتائج التي تم الحصول عليها في هذه الرسالة تقدم طويلاً واعدة لإدارة المخاطر بالمشاركة. تم اختبار الطريقة المقترحة لرسم خرائط لمناطق الفيضان والتحقق منها بنسبة 85% ، على الرغم من وجود بيئة كارستية على "الأوجه السطحية للأشجار" التي من المحتمل تكون قد أفشلت تطوير نموذج التنبؤ.

الكلمات المفتاحية: خطر الفيضان. النمذجة الهيدرولوجية النمذجة الهيدروليكية. رسم الخرائط. سيدي بلعباس. الجزائر.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

La gestion de l'eau est d'une importance capitale dans le développement de l'occupation du territoire. Elle pose des problèmes d'usage, de pénurie et d'inondation. Les inondations sont à l'origine de la plupart des catastrophes naturelles enregistrées dans le monde. Selon le CRED (2018) (Centre de Recherche sur l'Epidémiologie des catastrophes). Parmi les catastrophes naturelles d'origine météorologique, hydrologique et climatologique, les inondations sont celles qui ont le plus augmentés. Toujours et selon le même centre, ce sont près de 145 millions de personnes qui font face à ce phénomène tous les ans dans le monde, ce qui le classe comme la catastrophe naturelle qui produit le plus de dégâts.

Une directive européenne (2007/60/CE) définit l' «inondation» comme suit : « submersion temporaire par l'eau de terres qui ne sont pas submergées en temps normal. Cette notion recouvre les inondations dues aux crues des rivières, des torrents de montagne et des cours d'eau intermittents méditerranéens ainsi que les inondations dues à la mer dans les zones côtières et elle peut exclure les inondations dues aux réseaux d'égouts ».

Il y a dans la littérature plusieurs autres définitions dont une plus simplifiée : « Le terme inondation fait traditionnellement référence au débordement d'un cours d'eau, le plus souvent en crue, qui submerge les terrains voisins. Il est souvent étendu aux débordements d'ouvrages artificiels tels que retenues ou réseaux d'assainissement ».

Les deux définitions reprennent le terme « submersion », ceci induit un risque pour tout ce qui se trouve sur les rives et les alentours du cours d'eau. De façon systématique, l'analyse de ce risque consiste en une synthèse entre l'aléa qui est considéré comme étant le phénomène générateur du risque et la vulnérabilité qui reprend tous les dégâts qui sont engendrés. La méthode connue sous le nom de « méthode inondabilité » comprend l'association de ces deux concepts. Elle repose sur l'idée d'exprimer l'aléa (intensité physique du phénomène naturel) et vulnérabilité (sensibilité d'un usage du sol aux inondations), avec une même unité hydrologique et une même période de retour. En d'autres termes, la vulnérabilité est une analyse du domaine socio-économique. L'analyse de l'aléa est une combinaison entre des études météorologiques et hydrologiques.

Estupina (2004) arrange la gestion du risque « inondation » en trois phases (figure 1):

- ❖ La phase préventive qui constitue la phase préliminaire de la gestion du risque. Elle est relative à la décision d'occuper un territoire. Les méthodes d'identification des zones à risque sont basées essentiellement sur des outils statistiques qui ont besoin de séries d'observations historiques assez documentées pour être utilisables ;
- ❖ La phase de gestion de la crise qui consiste en la surveillance, l'annonce et la prévision d'un événement de crue potentiel. Le but étant de minimiser les conséquences possibles en mettant en place une série de mesure pour minimiser les dégâts, surtout humains ;
- ❖ L'analyse dite analyse post crise, elle se base sur le retour d'expérience en analysant les événements passés et de leurs conséquences. Cette analyse permet d'enrichir les deux premières phases de la gestion du risque.

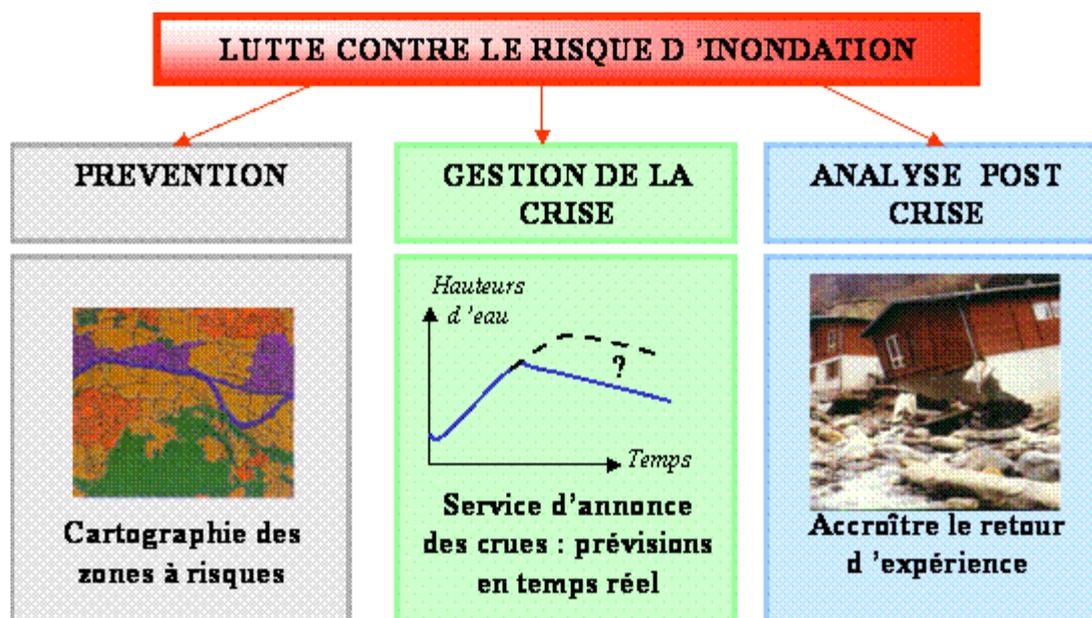


Figure 1: Phase de gestion des risques d'inondations (Estupina, 2004).

Ce sont les inondations issues de fortes crues qui causent le débordement d'un cours d'eau qui sont les plus à craindre. Ces crues, selon leurs cinétiques et leurs origines, peuvent être classifiées en trois types:

- Les crues lentes : elles surviennent généralement après de long épisodes pluvieux ;
- Les crues éclair : c'est l'un des types de crue les plus dévastateurs (fait l'objet de nos investigations) ;
- le troisième type : les inondations marines appelées communément « Tsunami ».

Le présent travail est surtout relatif aux crues éclair. Estupina (2004) donne la définition suivante à ce type de crue: « *la terminologie de crue éclair rassemble un ensemble de crues caractérisées par leurs évolutions et leurs conséquences : il s'agit de crues difficilement prévisibles qui font suite à de violentes pluies localisées, dont l'évolution est soudaine et de courte durée et dont les impacts humains et socio-économiques sont lourds de conséquences. Cependant, les nombreux exemples de crues éclair survenues dans le passé laissent supposer que différents processus physiques peuvent générer, dans différentes conditions, des crues qui seront toutes éclair* ». Cette définition renseigne surtout sur le caractère délicat de l'étude de ce genre d'évènement.

Le territoire national n'est pas épargné par le phénomène des inondations (multiplicité des régions et des périodes). Parmi les cas recensés ces dernières années, nous pouvons citer les plus importants: ceux de Sidi Bel Abbès (Ouest Algérien) où le bilan des trente dernières années fait état de 885 morts et des dizaines de milliards de dinars de dommages matériels ; ceux de Bab El Oued à Alger en 2001 avec 800 morts et des dégâts matériels estimés à plus de 33 milliards de dinars ; ceux de Ghardaia (Sud Algérien) en 2008 avec 43 mort ; ceux de Béchar (Sud-Ouest Algérien) en 2008. Rien qu'en 2014, on a recensé des inondations importantes au niveau national dans les régions de Ain Defla, Ouergla, Tebessa, Djelfa, Tiaret, Naama, Medea, Adrar et Bechar avec un bilan catastrophique de plus de 63 morts et environ 2000 logements endommagés et 2300 autres sérieusement affectés. La principale cause de l'étendu de ces dégâts est, sans doute, la proximité des agglomérations des cours d'oueds qui connaissent des crues dont la fréquence tend à s'agrandir ces dernières années. Après les inondations qu'a connues Bab El Oued et plusieurs localités de l'Algérois en novembre 2003, les autorités algériennes ont décidé de faire un pas pour lutter contre ce phénomène catastrophique. Ils ont adopté pour cela une législation spécifique dont les différents articles sont portés dans la loi relative à l'eau N°05/12 du 04 aout 2005 Chapitre 5 de la prévention contre les risques d'inondation (annexe 1). Cependant, les mesures prises restent insuffisantes compte tenu de la multiplicité des derniers cas recensés. En effet, aucun de ces articles ne prend en charge la phase de lutte préventive qui consiste à identifier les zones à risque avant de décider de l'occupation du sol.

La région de Sidi Bel Abbès se trouve parmi les régions qui ont connu le plus d'inondations dans le territoire national. Ceci est dû aux crues de grande importance que connaît l'oued Mekerra qui traverse plusieurs localités. La réponse des autorités a été de mettre en place une série de mesures pour la protection des agglomérations que traverse cet oued. Ces mesures se présentent par une série d'aménagements hydrotechniques et de moyens d'alerte en temps réel de ces crues tant redoutées. Cette région du territoire national représente pour nous un très bon terrain d'investigation, notamment pour juger de l'efficacité des moyens de lutte mis en place. Aussi, essayer de tester des solutions techniques qui pourraient être utilisées dans le contexte algérien.

Pour régler le problème des crues de l'oued Mekerra, deux opérations d'études confiées à des moyens nationaux et internationaux ont abouti à la formulation d'une série d'aménagements qui ont porté sur :

- la capacité de transit du cours de l'oued dans l'agglomération de Sidi Bel Abbès a été augmentée en redimensionnant les ouvrages de franchissements encombrants et en diminuant la rugosité du lit de l'oued, et enfin par une rectification légère de sa pente;
- La création d'un canal de dérivation, d'une capacité de transit de l'ordre de $150\text{m}^3/\text{s}$. Celui-ci prend son origine à l'amont de la ville de Sidi Bel Abbès;
- La création de zones d'épandage sur deux des principaux affluents de l'oued Mekerra à savoir :
 - L'oued Mouzen avec une zone d'épandage d'une capacité de 2 millions de m^3 ,
 - Et l'oued Mellah avec une zone d'épandage de 2.4 millions de m^3 ;

Ces trois variantes sont destinées à protéger la ville de Sidi Bel Abbès contre une crue d'une période de retour décennale et constitue donc une protection à court terme.

- En fin, la variante, la plus importante qui a été adoptée, est la création du barrage écrêteur de Tabia. Il s'agit du plus important ouvrage de protection. Ce barrage doit protéger la ville de Sidi Bel Abbès contre une crue centennale. Il a une capacité de 25 millions de m^3 pour un débit de restitution de $100\text{m}^3/\text{s}$.

Outre ces aménagements d'autres mesures ont été prises, nous pouvons citer :

- La protection civile de la Wilaya est impliquée dans le dispositif de lutte contre les inondations par la mise en œuvre d'un système de prévention et d'action contre les inondations ;
- Identifications des moyens matériels disponibles au niveau des entreprises en cas d'intervention ;
- Réalisation d'un modèle hydrologique déterministe pour représenter la propagation de l'onde de crue dans les champs d'inondation.

Théoriquement ces mesures devraient protéger la ville de Sidi Bel Abbès contre les crues dévastatrices comme celles qu'elle a connue par le passé.

Ce travail de doctorat s'inscrit dans une démarche à la fois **descriptive, théorique et méthodologique**. Il est organisé en deux grandes parties précédées d'un premier chapitre descriptif du milieu physique du bassin versant de la Mekerra.

La première partie est dédiée à l'étude de la possibilité de concevoir un modèle hydrologique (en fonction des données disponibles) permettant une prévision opérationnelle et visant à anticiper l'avènement d'une crue importante (anticipation de quelques heures qui donnera un temps d'avance aux éventuelles opérations de secours). Cette première partie s'intitule « **Modélisation pluie-débit des sous bassin amonts de la Mekerra en vue d'une prévision en temps réel des crues extrêmes** » et est abordée en trois (03) chapitres :

- **Chapitre II:** Généralités sur les Processus Hydrologiques et leur Modélisation
- **Chapitre III:** Description des concepts et des outils utilisés pour la modélisation distribuée du bassin de la Mekerra.
- **Chapitre IV:** Modélisation distribuée du bassin versant de la Mekerra sous HEC HMS.

La seconde partie s'intitule : « **Modélisation déterministe de l'oued Mekerra pour l'étude de l'impact des aménagements hydrotechniques de protection et la cartographie de la zone inondable au niveau de la ville de Sidi Bel Abbès** ». Elle traite du moyen de lutte préventif et qui consiste à définir les zones à risque d'inondation. Là, nous avons étudié une modélisation hydrologique déterministe pour la définition de la

crue de projet. Par la suite, nous avons testé l'efficacité des aménagements hydrotechniques sensés protéger l'agglomération de Sidi Bel Abbès. Et enfin, c'est au travers d'une modélisation hydraulique que la zone inondable de cette ville a été identifiée et validée. Cette deuxième partie de notre travail est scindée en une introduction suivit de trois (03) chapitres:

- **Chapitre V:** Formulations pour la conception du hyétogramme et de l'hydrogramme de projet.
- **Chapitre VI:** Conception de l'hydrogramme de projet et étude de l'impact des aménagements hydrotechniques de protection.
- **Chapitre VII:** Modélisation hydraulique de l'oued Mekerra sur le tronçon allant de la ville de Sidi Khaled à l'aval de la ville Sidi Bel Abbès.

Tout au long de ce travail, l'insuffisance des mesures de terrain ou leur manque de fiabilité a nécessité, dans plusieurs cas, de mettre au point des outils parfois empiriques mais dont l'efficacité a été testée. Ces outils peuvent avoir une résonance opérationnelle et pourraient être adaptés à d'autres bassins versants algériens où le manque de données nécessaires à une modélisation déterministe est avéré.

Chapitre I

CARACTÉRISATION DU BASSIN VERSANT DE LA MEKERRA

CHAPITRE I : CARACTERISATION DU BASSIN VERSANT DE LA MEKERRA

De par ses caractéristiques morphologiques, géologiques et son régime pluvial extrême, le bassin versant de la Mekerra est soumis à de graves événements extrêmes. Dans ce chapitre, c'est les paramètres physiques et morphologiques de ce bassin qui sont étudiés. Ces paramètres jouent un rôle déterminant dans le développement des crues de l'oued Mekerra et de ses affluents. Ces crues se traduisaient le plus souvent par des inondations périodiques d'une bonne partie de la plaine de Sidi Bel Abbès.

I.1 Le contexte géographique

a. La localisation géographique

Le bassin versant de l'oued Mekerra est situé au Nord-Ouest du territoire algérien. Il fait partie du bassin de la Macta (bassin versant ANRH N°11). Il prend son origine dans la steppe des hautes plaines oranaises au Sud de Ras El Ma à une côte avoisinant les 1450 m. La côte moyenne de Sidi Bel Abbès est d'environ 480 m.

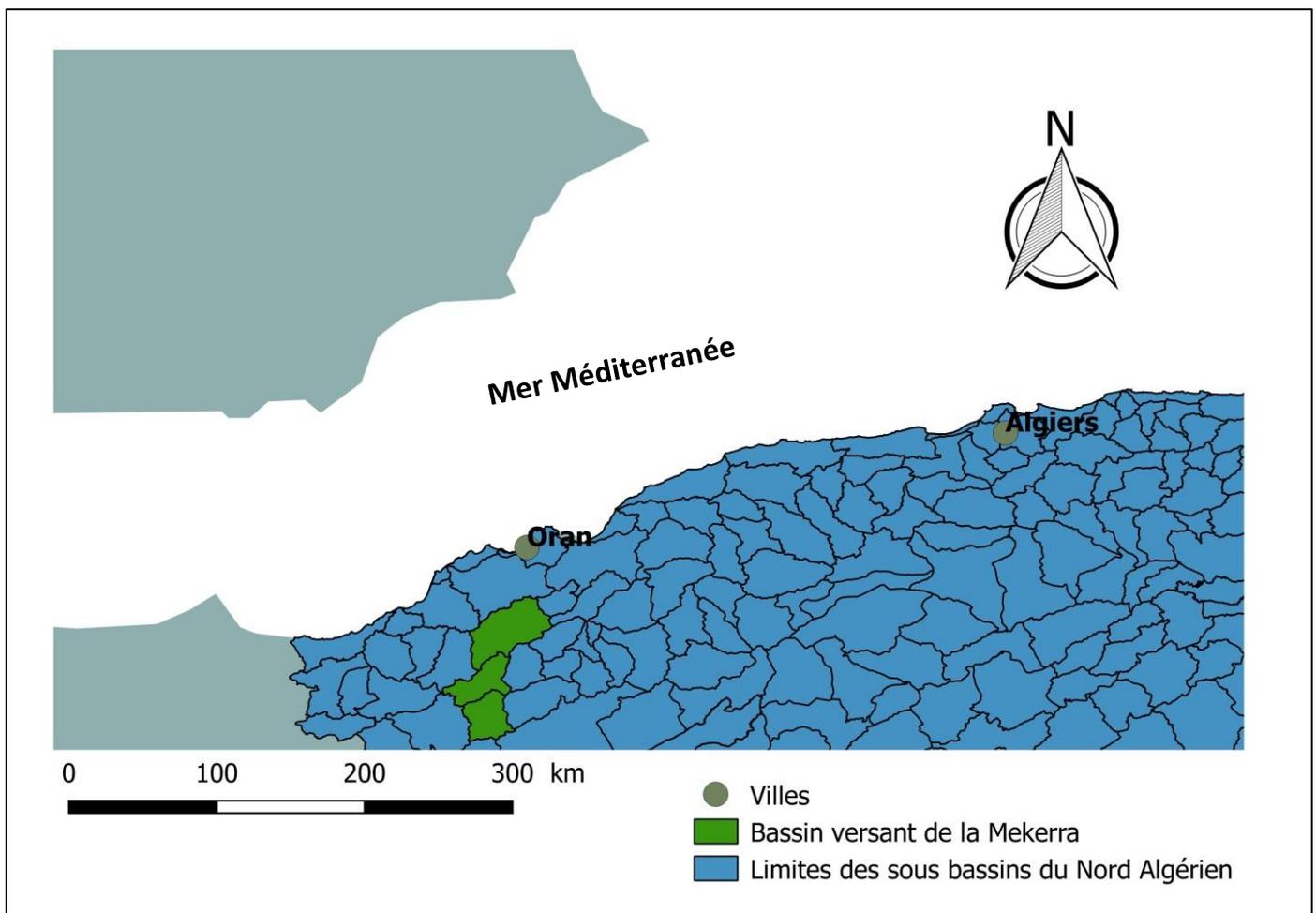


Figure 2 : Situation géographique du bassin versant de la Mekerra.

L'oued Mekerra draine une superficie totale de 3000 km² sur un talweg d'environ 134 km, depuis les hautes vallées de la steppe au Sud de Ras El Ma jusqu'à la ville Sidi Bel Abbès. Le réseau hydrographique est composé par de nombreux affluents. Hallouche (2007) a classé le réseau hydrographique de l'oued Mekerra (les résultats sont représentés sur le tableau 1). Ces résultats ont été obtenus à partir des cartes topographiques au 1 / 50 000. La figure 2 donne un aperçu général du chevelu hydrographique. Il est à remarquer que ce dernier est très développé, mais la plus part de ces cours d'eau sont temporaires. Les oueds sont alimentés par des précipitations et par des sources dont la plus importante est Ain – Skhouna.

Tableau 1 : Classification du réseau hydrographique (Hallouche, 2007)

Ordre	1	2	3	4	5	6	Total
Nombre	280	59	20	6	2	1	358
Longueur(m)	2454	812	380	138	69	34	3887

b. Le climat

C'est un facteur important qui conditionne l'hydrographie. Le bassin de l'oued Mekerra subit les influences maritimes au Nord et saharienne au sud ; l'influence saharienne est toutefois prépondérante. On distingue d'une façon générale une saison sèche avec une température maximale absolue de 35°C et une saison humide avec une température minimale absolue de 0,2°C. Du Tell au littoral, on peut dire que le bassin de la Mekerra a un climat semi-aride. Les vents dominants sont du Nord-Ouest. Ils soufflent en toute saison pendant 10 à 15 jours par mois. Le sirocco souffle environ 15 jours par mois lors des mois d'été (Hallouche, 2007).

I.2 Les entités géographiques

Le bassin versant a une forme allongée du Sud au Nord (fig.3). La superficie du bassin est à 50% située à une côte dépassant les 1000 m. La pente moyenne de l'oued jusqu'à Sidi Ali Benyoub est d'environ 1 à 1,5%. Elle n'est plus que de 3 à 8 ‰ entre Boukhanéfis et Sidi Bel Abbès. L'altitude moyenne du bassin est de 960 m, avec une altitude minimale à Sidi Bel Abbès de 437 m et l'altitude maximale à Djebel Ouargla 1714 m.

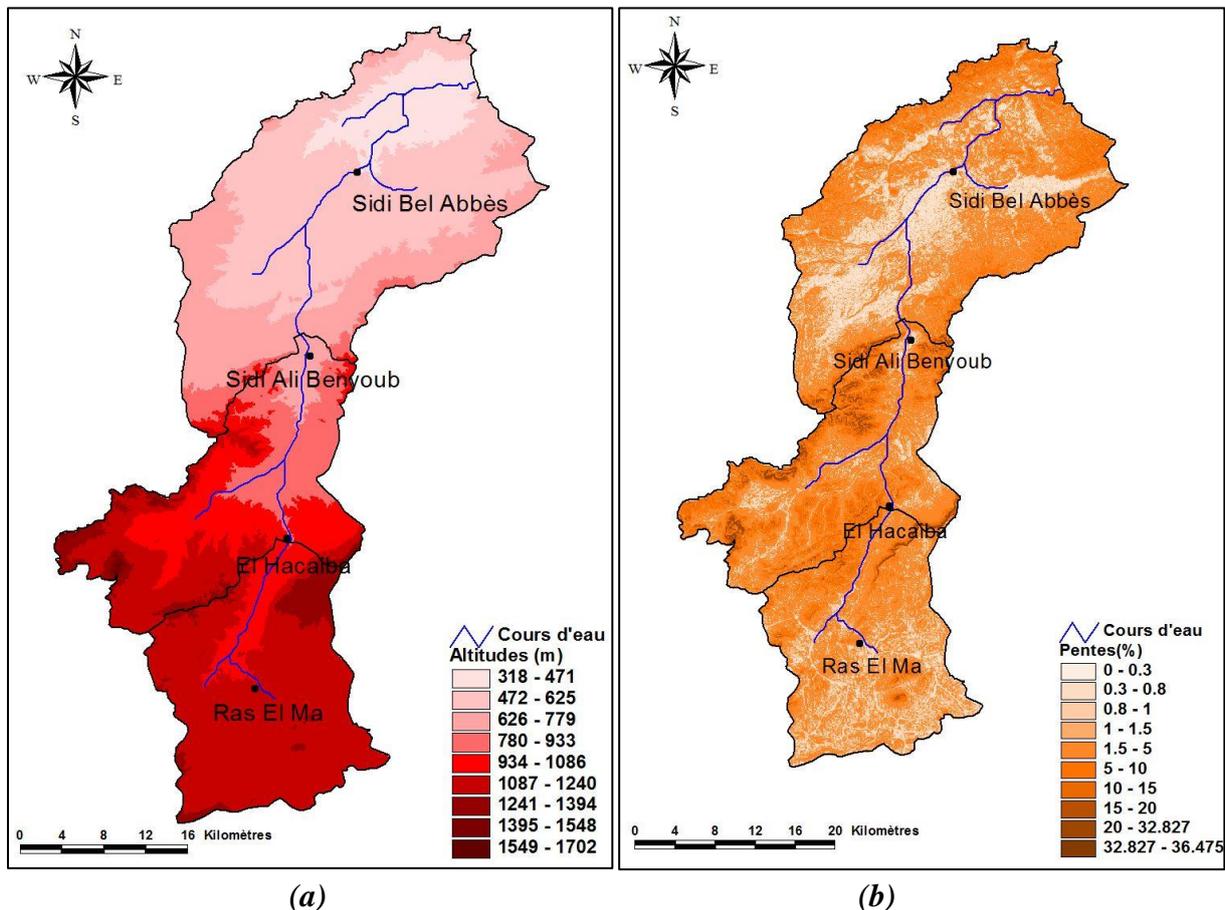


Figure 3 : Carte des altitudes (a) et des pentes (b) du bassin versant de la Mekerra

Du point de vue géomorphologique, le bassin versant de l'oued Mekerra peut être subdivisé en trois parties :

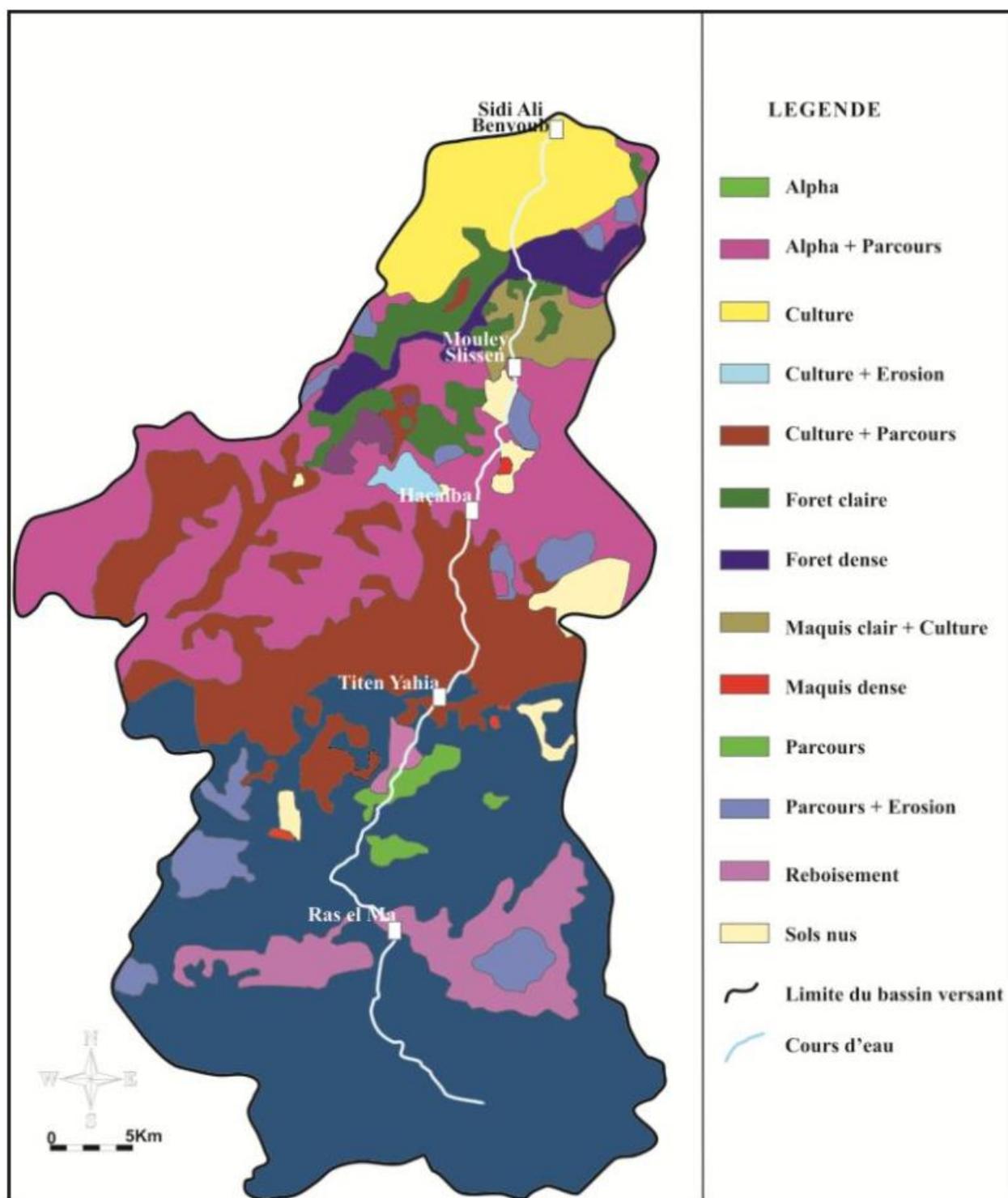
- **la haute Mekerra** : Elle s'étend depuis la source de ce cours d'eau au Sud de Ras El Ma jusqu'à Sidi Ali Benyoub ;
- **la moyenne Mekerra** : Occupe la zone comprise entre Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbès ;
- **la basse Mekerra** : Elle correspond à toute la partie du bassin versant située en aval de la ville de Sidi Bel Abbès.

I.3 L'occupation des sols

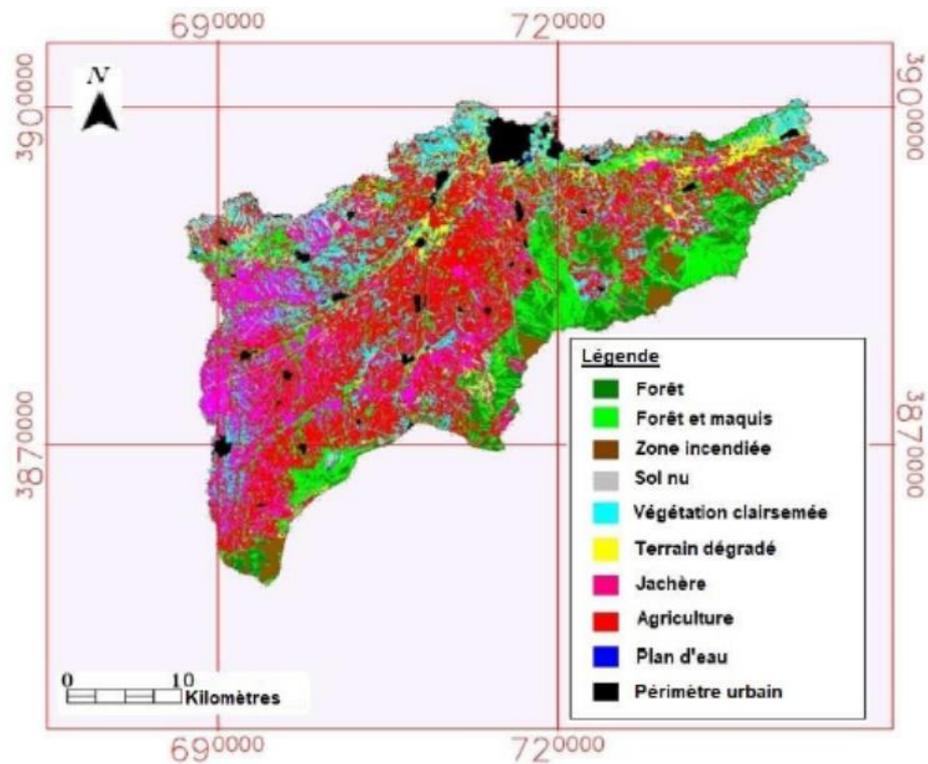
L'urbanisation du bassin versant est faible, à l'exception de la ville de Sidi Bel Abbès. Elle est concentrée autour des petites villes (Ras El Ma, El Haçaiba, Moulay Slissen, Boukhanèfis, Sidi Khaled, Sidi Lahcen), implantées le long de l'oued Mekerra.

Seule une partie du bassin versant est occupée par les forêts (20%), principalement au niveau des massifs montagneux de la région comprise entre Haçaiba et Moulay Slissen et peut s'étendre jusqu'à Sidi Ali Benyoub. La périphérie du bassin ainsi que certaines

zones collinaires non cultivables, sont elles aussi occupées par des petites formations forestières. Cette couverture forestière n'assure qu'une très faible protection des sols vis-à-vis de l'érosion. La figure 4 donne un aperçu général de l'occupation de la haute et moyenne Mekerra ainsi que de la plaine.



(a) Haute et moyenne Mekerra (source : Hallouche, 2017)



(b) Plaine de la Mekerra (source : Bentkhissi, 2018)

Figure 4 : Carte d'occupation des sols du bassin versant de l'oued Mekerra.

I.4 Organisation et fonctionnement hydrologique de la Mekerra

Selon Hallouche (2007), d'une manière générale le bassin versant de l'oued Mekerra peut être subdivisé schématiquement en trois (03) grandes sections en fonction de leur rôle hydrologique comme cela est illustré sur la figure 5 :

- Zone de production appelée aussi de réception ;
- Zone de transfert ;
- Zone d'expansion.

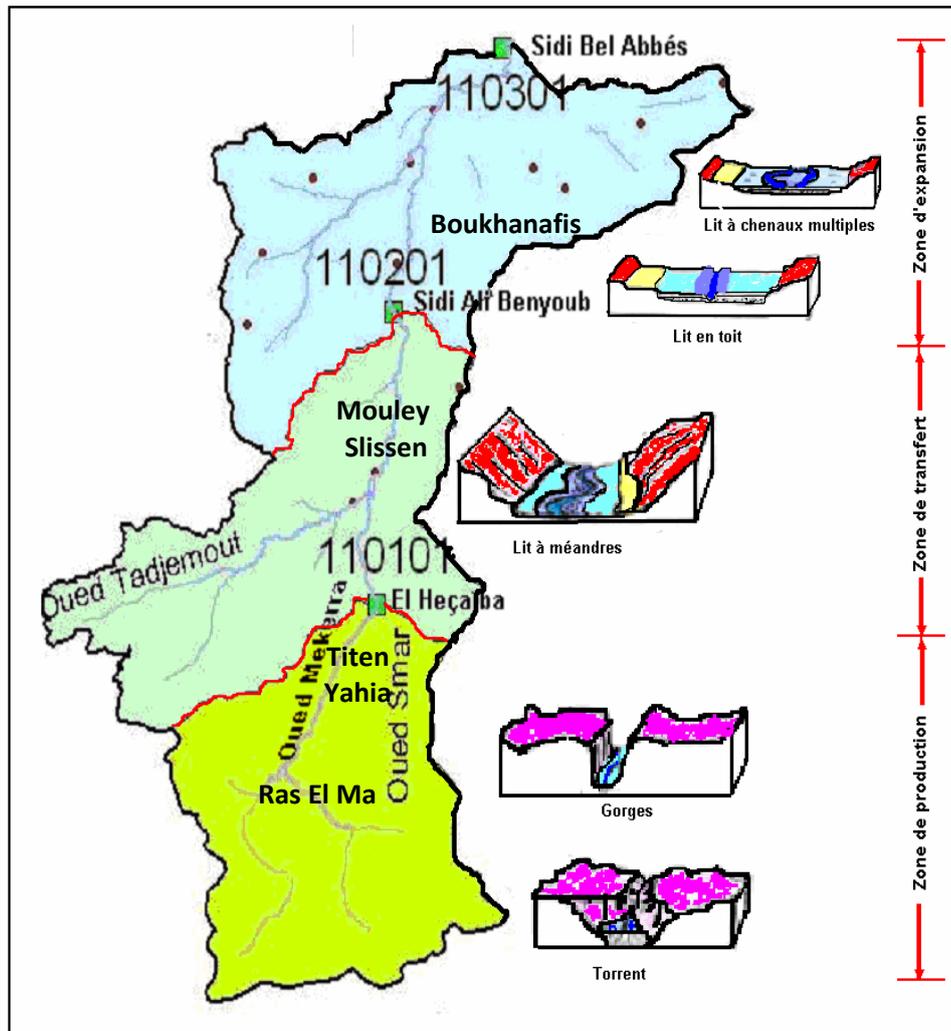


Figure 5 : organisation hydrogéomorphologique du bassin de l'oued de la Mekerra (source : Hallouche, 2007).

I.4.1 Zone de réception ou de production des crues

Cette zone est comprise entre la source de l'oued et Mouley Slissen. Elle correspond à la partie supérieure montagneuse du bassin versant, où se forment généralement les crues en réponse à des précipitations intenses. Elle présente une forme allongée Sud-Nord en fonction de l'organisation du réseau hydrographique. Celui-ci est particulièrement dense et composé d'oueds intermittents et de ravins drainant des vallons encaissés, qui confluent vers la vallée principale, la plus large. Les versants et les talwegs présentent des pentes fortes (un coefficient de ruissellement important) et la couverture pédologique est peu épaisse. Soumise à une érosion intense, la zone de production des crues fournit l'essentiel de la charge solide transportée par le cours d'eau. Cette zone peut être divisée en deux sous tronçons :

1. On peut considérer que la principale zone de production des crues s'étend au Sud de Ras El Ma jusqu'à la station de Titen Yahia : elle est alors constituée par les vastes

surfaces des hauts plateaux où les pentes moyennes à faibles ne compensent pas la fragilité du sol et sa sensibilité à l'érosion. Les oueds qui forment des torrents incisent ces surfaces régulières de talwegs profondément marqués et aux zones inondables bien délimitées ;

2. En aval de Titen Yahia, la vallée de la Mekerra pénètre dans des massifs montagneux et ce sous tronçon assure la transition avec la zone de transfert qui débute à Mouley Slissen : la densité du réseau hydrographique diminue légèrement et la Mekerra reçoit moins d'affluents, tandis que sa vallée s'encaisse dans les massifs calcaires.

Sur ce secteur, l'oued Mekerra présente une vallée large, sans véritables champs d'expansion de crues. La localité de Ras El Ma est la principale zone à enjeu sur ce tronçon où sont déjà survenues de grandes inondations (Octobre 2002 et Avril 2007 et tout récemment septembre 2018).

I.4.2 Zone de transfert : de Mouley Slissen à Boukhanéfis

Le bassin de réception est relayé par une section de gorges qui assure le transfert des débits liquides et solides vers l'aval du bassin versant. Sur ce tronçon, la plaine s'organise et les différents lits s'individualisent ; l'oued principal présente un chenal unique qui méandre au fond de la vallée au sein d'une petite plaine alluviale étroite et encaissée dominée par les versants rocheux. La diminution de la pente permet le dépôt d'une partie de la charge solide. Ces dépôts peuvent être repris lors des crues. Lors de la rupture des pentes fortes, l'oued Mekerra décrit des sinuosités en cherchant à dissiper son excès d'énergie. C'est sur ces tronçons qu'on peut rencontrer les dynamismes érosifs les plus intenses : les berges de l'oued sont particulièrement instables et soumises à des érosions latérales importantes au niveau des méandres. L'incision verticale est limitée car les formations les plus résistantes affleurent dans le lit mineur.

Au niveau de Sidi Ali Benyoub, l'oued quitte les massifs montagneux et poursuit son cheminement jusqu'à Boukhanéfis qui fait partie de la zone de transfert. Puisque la Mekerra est très encaissée dans d'anciens sédiments, la vallée conserve son profil en gorges.

I.4.3 Zone d'expansion des crues : de Boukhanéfis à Sidi Bel Abbès

C'est la zone la plus exposée aux effets des inondations périodiques dont les conséquences sont catastrophiques. Ce secteur est situé à l'aval de Boukhanéfis où la vallée change brutalement de forme. La vallée encaissée et étroite s'ouvre très rapidement, un lit majeur se met en place, tandis que l'encaissement général par rapport à l'encaissement se réduit. C'est à partir de la localité de Boukhanéfis que commence la vraie plaine alluviale de la Mekerra. Cette dernière constitue un vaste champ d'épandage de crues. La plaine est une vaste zone d'expansion des crues de la Mekerra très ancienne puisqu'on y trouve plusieurs niveaux alluviaux étagés. Sa largeur atteint généralement plusieurs centaines de mètres et peut atteindre 3 kilomètres par endroits. Elle s'étend jusqu'à Sidi Bel Abbès où elle est fermée par des collines de marnes et de grès Miocène (lieudit le Rocher). Dans cette plaine, la dynamique des écoulements est liée aux faibles pentes transversales qui divergent à partir du lit mineur : celui-ci est perché au-dessus du lit majeur, dans une configuration de lit en toit. Cette plaine n'est donc pas inondée uniformément sur toute sa largeur par chaque crue. Les eaux débordant du lit mineur s'écoulent dans le lit majeur dans les chenaux plus ou moins marqués, mais toujours de faibles profondeurs (inférieurs à 1 m).

La faiblesse de la pente favorise le développement de chenaux multiples et l'accumulation des sédiments, d'où un exhaussement progressif du plancher alluvial qui explique cette configuration de lit en « toit ».

I.5 Caractéristiques hydrologiques de la Mekerra

I.5.1 Localisation des stations météorologiques

La figure 6 présente la répartition spatiale des stations de mesures à travers le bassin versant. Comme on peut remarquer, cette répartition se concentre exclusivement à la partie aval du bassin (cette remarque concerne pluviomètres et pluviographes). On peut dire que cette répartition n'est pas très équilibrée puisqu'elle ne recouvre pas uniformément tout le secteur. Un grand intérêt doit être donné à la partie amont qui représente un plus grand intérêt hydrologique.

Les stations hydrométriques se situent à la sortie de chaque zone hydrologique, à savoir :

Hacaiba, Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbès.

Le tableau 2 représente les caractéristiques de l'ensemble des stations hydrométriques et pluviographiques :

Tableau 2 : caractéristiques des stations de mesure sur la Mekerra.

Code ANRH	Nom	Type	Coordonnées (UTM, WGS84)		
			x (m)	y (m)	Altitude (m)
11 01 02	Ras El Ma	Pluviographe	697 944	3 819 633	1 115
11 01 01	Hacaiba	pluviographe+hydromètre	703 492	3 841 938	974
-	El Gor	Pluviographe	671173	3 837 115	1224
11 03 31	Lamtar	Hydromètre+pluviographe	706 381	3 885 276	552
11 03 34	Taftamane	Pluviographe	699 100	3 869 906	705
11 02 01	Sidi Ali Ben Youb	Hydromètre+pluviomètre	706 843	3 872 679	635
11 03 01	Sidi Bel Abbès	pluviographe+hydromètre	717 707	3 903 174	437
11 03 04	Sarno	Pluviographe	719 812	3 895 527	502
11 03 22	Tabia	Pluviomètre	707 601	3 877 430	632

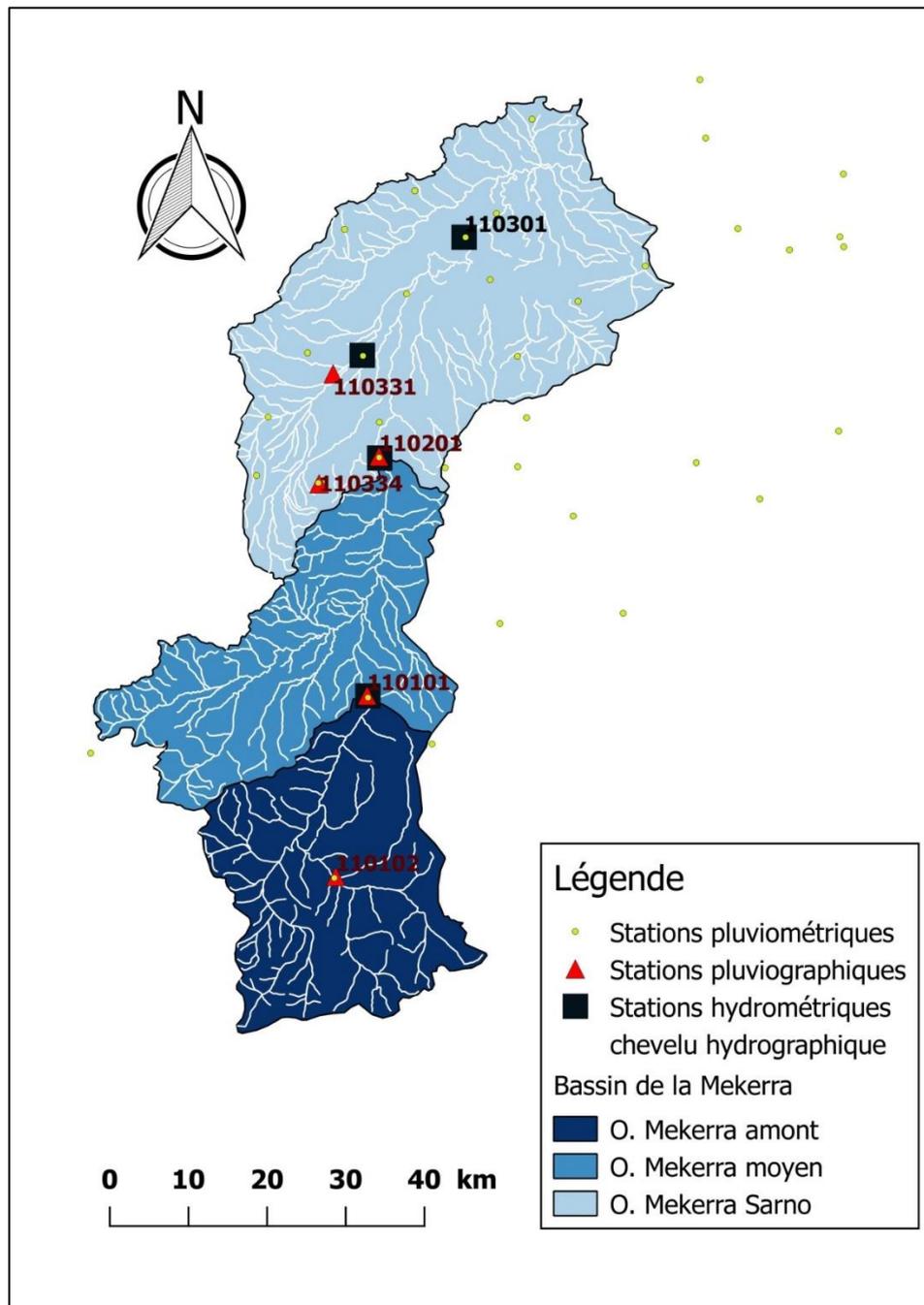


Figure 6 : Répartition spatiale des pluviomètres et pluviographes sur le bassin versant de la Mekerra.

I.5.2 La variabilité spatio-temporelle des précipitations

La pluviométrie moyenne annuelle sur le bassin versant de la Mekerra est de 340 mm (une moyenne calculée sur l'enregistrement de dix stations). Cette variabilité est illustrée dans la figure 7 qui représente les relevés pluviométriques journaliers sur six stations couvrant la longueur du bassin.

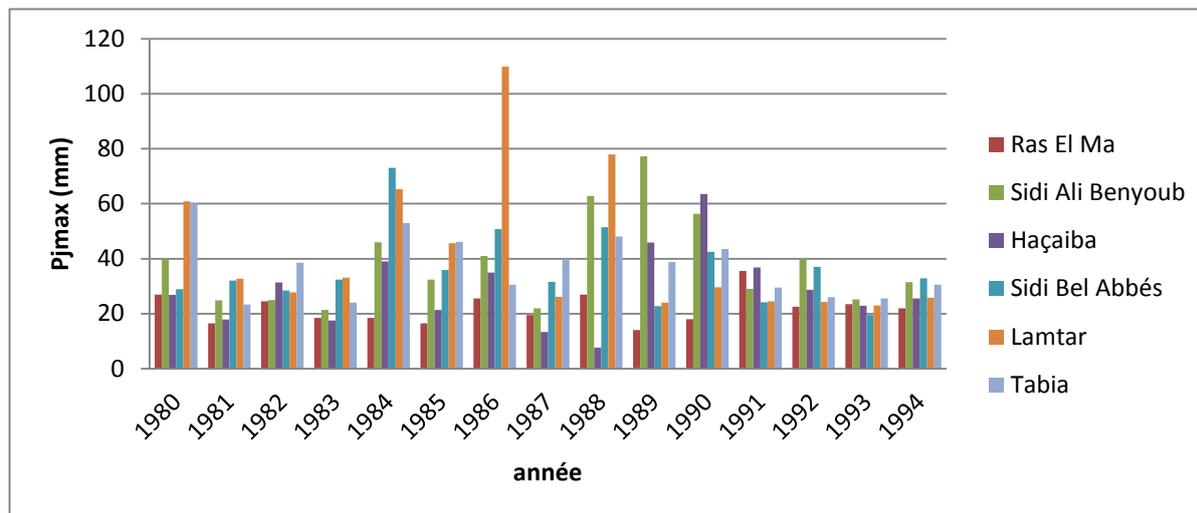


Figure 7 : caractéristiques des pluies maxima journalières annuelles (mm) observées sur six pluviomètres du bassin versant de la Mekerra entre 1980 et 1994.

Les pluies maximales journalières peuvent variées entre 120 mm, comme cela a été observé à la station de Lamtar en 1986 jusqu'à la plus petite valeur observée en 1988 pour la station Hacaiba.

La moyenne des pluies maxima annuelles est de l'ordre de 35 mm en 24 h sur l'ensemble du bassin versant. Pour l'étude de la réponse hydrologique du bassin versant de la Mekerra, des données pluviographiques serviront à la caractérisation des crues.

I.5.3 Les débits

Le régime pluvial de la région est à l'origine de fortes variabilités inter-saisonnières et interannuelles des débits. Par année et en période d'étiage estivale, le débit est de l'ordre de 0.1 l/s et peut atteindre en aval du bassin 800 m³/s lors d'épisodes pluvieux intenses (entre 900 et 1500 m³/s débits respectifs pour une période de retour de 100 et 500 ans).

La réactivité du bassin versant de la Mekerra est extrême dont les crues ont des temps de monté entre 2 et 7 heures (voir le chapitre VI).

I.5.4 Aperçu géologique et hydrogéologique

Une attention particulière est à accorder à cet aspect. En effet, le bassin versant de la haute et moyenne Mekerra présente des particularités géologique et hydrogéologique qui, comme nous le verrons au « chapitre V », peuvent expliquer les réponses hydrologiques en crue disproportionnées par rapport aux caractéristiques de la pluie et du bassin en lui-même. L'analyse bibliographique que nous avons présentée dans ce même chapitre met

en exergue la relation directe entre les crues éclaires et le milieu géologique, si ce dernier s'avérait être « karstique ».

Le bassin versant de la Mekerra est caractérisée par la présence de cinq aquifères (Hallouche, 2017) :

- la plaine alluviale Plio - quaternaire de Sidi Bel Abbès,
- les calcaires et dolomies Jurassico - Crétacés des monts de Sidi Ali Benyoub,
- les calcaires de Zigyne (Aptien) de la forêt domaniale de Belarbi,
- les calcaires éocènes de Sidi Ali Boussidi,
- les grés pliocènes de la forêt de Tenira.

D'après Hallouche (2017), l'aquifère de Ras El Ma présente des écoulements qui convergent vers le drain principal du bassin versant (oued Mekerra) donnant ainsi, un axe de drainage principal orienté vers le nord. Le gradient hydraulique de cette nappe aquifère augmente du sud (5‰) vers le nord (13‰). Le même auteur, bien qu'il ne caractérise pas la géologie comme étant karstifiée, il parle de fissure sur cette même aquifère en citant : *La répartition spatiale des niveaux réservoir de l'aquifère de Ras El Ma montre l'existence de quatre principales classes lithologiques, à savoir : Calcaires fissurés, sables à passées calcaires, sables argileux et argiles sableuses* (fig.8).

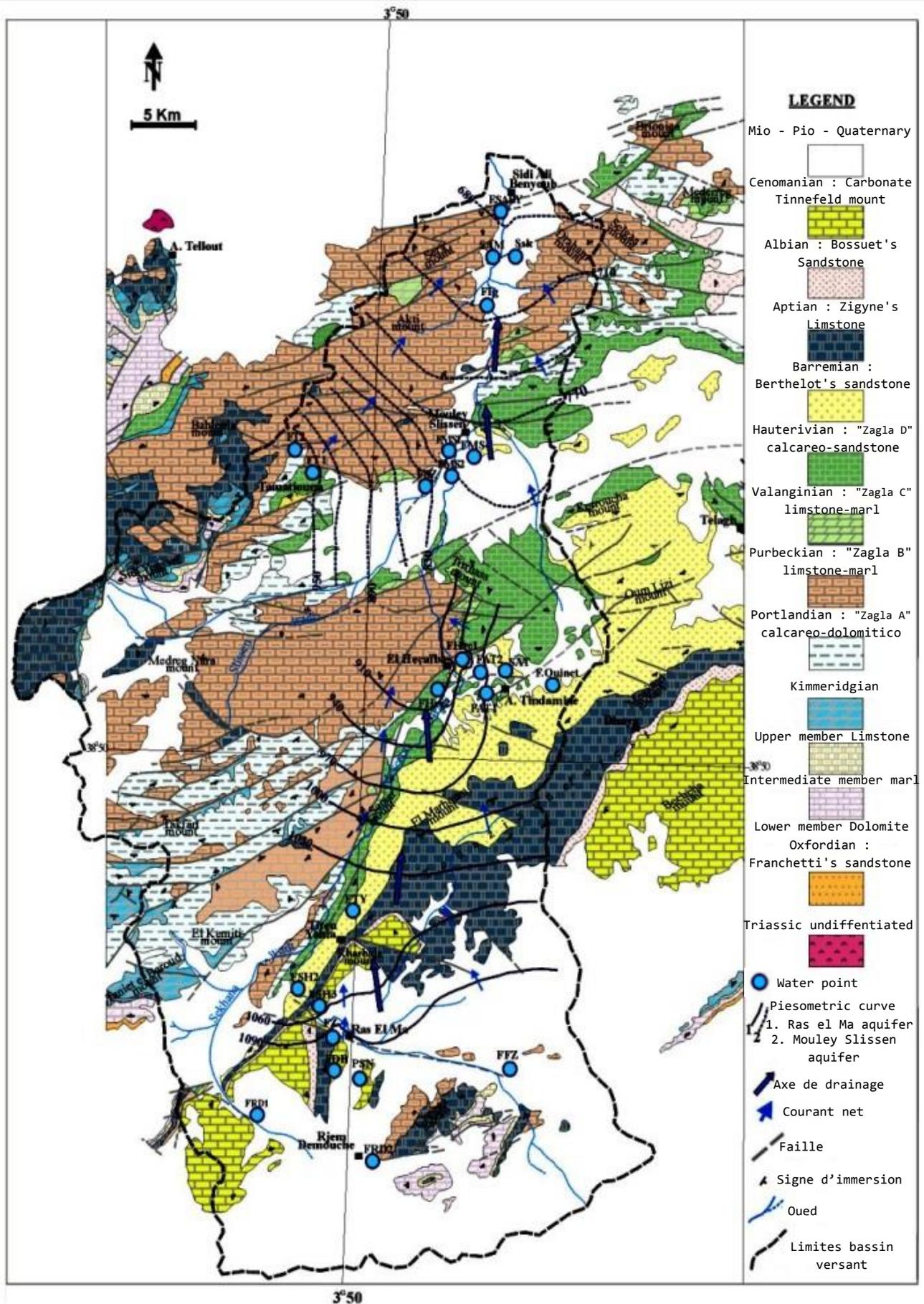


Figure 8 : Carte hydrogéologique du bassin versant de la haute Mekerra.
 Source : Hallouche et .al, (2017) in Hallouche (2017).

Sur une notice explicative (1975) de la carte hydrogéologique du bassin versant de la Mekerra il est cité :

Aquifère des calcaires et Dolomies jurassico-cretace

Située dans la partie Sud de la plaine de Sidi Bel Abbès, les calcaires et Dolomies jurassico-cretacé sont hydrogéologiquement mal connus. Nous pensons qu'il est vraisemblable de considérer cet ensemble de faciès (**faciès Dolomie bien karstifié, faciès calcaire fissuré**) comme un aquifère unique : les zones de bonne perméabilité étant probablement en contact par de nombreuses failles.

L'aquifère de cet ensemble, bien alimentée grâce à une position haute, favorable à une bonne pluviométrie, communique avec la nappe alluviale de deux manières :

- Par infiltration directe dans les alluvions et les conglomérats. La capacité d'écoulement de ces eaux étant principalement réglée par la perméabilité de conglomérats des hauts plateaux.
- Par l'intermédiaire des sources (l'eau se réinfiltrant après utilisation).

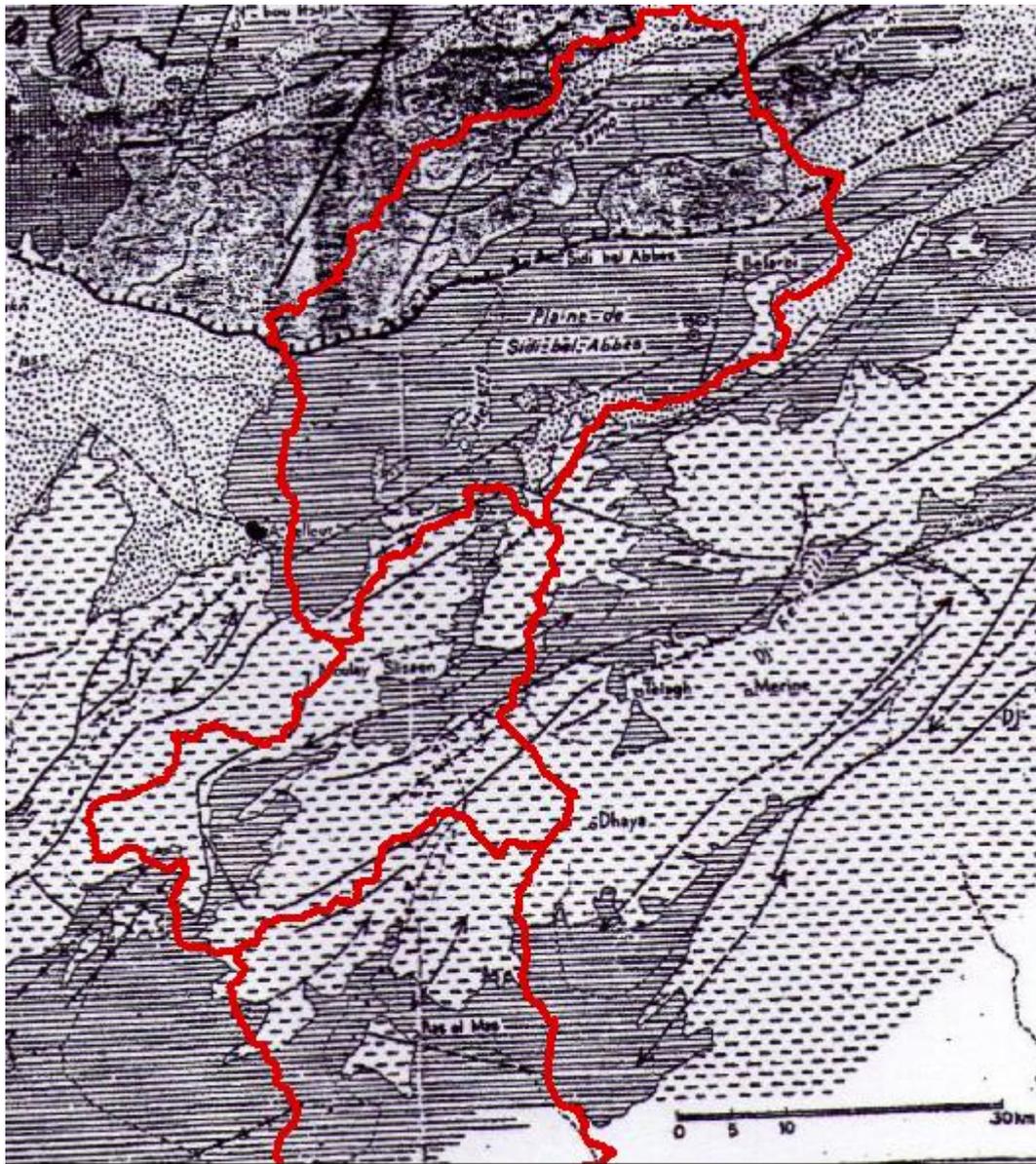
Cette description est intéressante du fait que Sidi Ali Benyoub est à la porte de la plaine de Sidi Bel Abbès (plaine alluviale) et qu'il est fort probable que c'est la même structure karstifiée qu'on retrouve plus en amont, ceci a son importance dans l'étude menée dans le chapitre V.

L'autre document géologique disponible est une carte de l'Oranaie (fig.9) où on fait allusion à des failles et des fractures profondes qu'on auraient vues ou supposées. On en trouve principalement :

- ❖ A la zone hauts plateaux (zone de production): avec une faille juste au Sud-Est de Hacaiba (exutoire du faciès) et une autre qui est parallèle à la première et qui passe par Hacaiba au Nord. Elle est plus longue et s'étire même au-delà des limites du bassin versant (on parle dans ce cas de bassin hydrogéologique) ;
- ❖ A la zone Atlas (zone de transfert) une faille dépassant elle aussi les limites du bassin versant. Une autre faille en forme de lambda « λ » se situe au milieu de ce faciès, localisée elle au Centre-Est de ce faciès ;
- ❖ Deux autres failles parallèles longent les limites avales de la zone « hauts plateaux ».

Le dernier argument confortant notre suspicion que la géologie de notre bassin versant est un karst bien développé, est un témoignage d'un cadre de la protection civile de la wilaya de Sidi Bel Abbès qui a révélé : « *les précipitations qu'a connu la commune de Telagh (Est de la zone de transfert du bassin versant de la Mekerra) en septembre 2008 a vu l'oued Mekerra en crue sans qu'il y en est eu une du côté de Ras El Ma* ». Cela ne pourrait s'expliquer que par une communication géologique entre le sous bassin de la moyenne Mekerra et le sous bassin versant de l'oued Louza.

Dans ce qui suit (partie I), nous étudierons la possibilité de concevoir un modèle hydrologique pluie-débit (sur la haute et moyenne Mekerra) pour la prévision en temps réel de l'avènement des crues exceptionnelles. Cela en faisant abstraction de ce que nous venons de discuter sur la partie ci-dessous. C'est une recherche qui nous permettra d'étudier la possibilité que les événements extrêmes que connaît la Mekerra soient directement liés aux écoulements de surface dus aux fortes pluies.



- | | | | |
|--|--|---|--|
| Plio-pléistocène | | Faille chevauchante | |
| Miocène du bassin synchronappes et des 1 ^{er} et 2 ^e cycles postnappes | | Front des nappes | |
| Nappes telliennes | | Transversales | |
| Massifs à schistosité | | Sources thermo-minérales | |
| Couverture jurassico-crétacée des Hautes-Plaines | | Volcans anciens | |
| Volcanisme néogène | | Epicentres et âges des principaux séismes | |
| Diapirs de Trias | | | |
| Synclinal, anticlinal | | | |
| Faille vue ou supposée (Hautes-Plaines) | | | |
| Fractures profondes vues ou pressenties (Régions telliennes) | | | |



Figure 9 : Délimitation du bassin versant de la Mekerra sur la carte géologique de l'Oranaie (Fenet, 1975).

Partie 1

Modélisation pluie-débit des sous bassins amont de la Mekerra en vue d'une prévision en temps réel des crues extrêmes

Chapitre II

GÉNÉRALITÉS SUR LES PROCESSUS HYDROLOGIQUES ET LEUR MODÉLISATION

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES PROCESSUS HYDROLOGIQUES ET LEURS MODELISATION

II.1 Introduction

Sur ce chapitre, il sera donné un état de l'art de la relation pluie-débit et les différentes méthodes pour la modéliser. Parmi ces méthodes, deux grandes classes ont fait l'objet (et le font encore...) de développements importants de la part de la communauté hydrologique: les méthodes statistiques et les méthodes déterministes basées sur l'identification des processus de la transformation pluie-débit. Chacune des classes comporte ses avantages et bien entendu ses inconvénients.

Avant toute chose, il est nécessaire de définir ce qu'est une modélisation et quels sont les différents critères typologiques pour différencier ces différents modèles. Selon le petit Larousse (2008) : un modèle est une représentation schématique (donc simplifiée) d'un processus ou d'une démarche raisonnée. Marchandise (2007), quant à lui, définit la modélisation hydrologique comme une représentation, partielle ou totale, du cycle de l'eau. Dans cette partie, on se limite à l'étude des modèles pluie-débit qui représentent la transformation de la pluie en écoulement sur les surfaces continentales.

Les processus hydrologiques sont souvent décrits par plusieurs types de modèles classés par antinomie de la façon suivante : Stochastique / Déterministe, Empirique / A base physique, Global / Distribué (fig.10). A cette définition, on peut ajouter la distinction Evénementiel / Continu, en considérant que certains modèles ont des champs d'application temporels plus élargis que d'autres liés à des événements particuliers. Toutefois les distinctions ne sont pas si nettes ; le terme «Conceptuel » par exemple peut être sujet à controverse. Nous considèrerons dans ce rapport que tout modèle hydrologique est conceptuel dans le sens où le concept est la représentation générale et abstraite d'un objet ou d'un ensemble d'objets. Il se définit selon sa compréhension et selon son extension (Petit Larousse 2008). L'expression « à base physique » est préférée dans le sens où c'est tirée d'un raisonnement par opposition à empirique qui lui, en revanche, s'appuie sur l'observation et l'expérience.

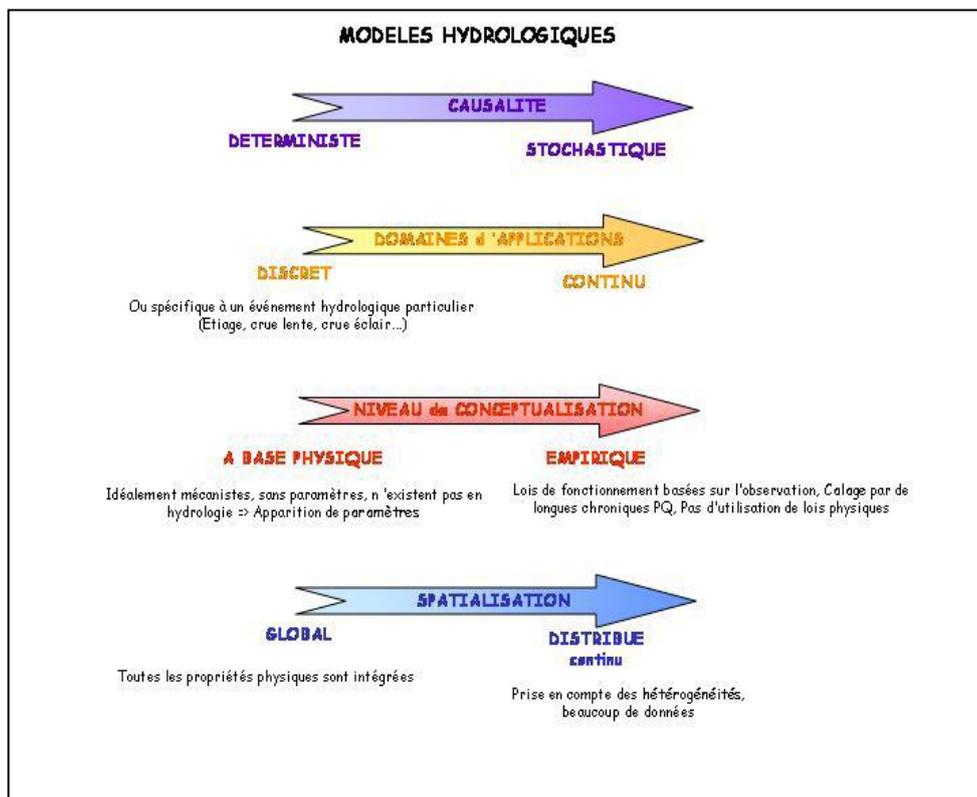


Figure 10 : Classification des grandes catégories des modèles hydrologiques (source : Estupina, 2004)

II.2 Les méthodes statistiques de prédétermination des débits de crues

Les méthodes statistiques de prédétermination de crues extrêmes consistent à étudier les événements passés pour évaluer les probabilités d'apparition future. C'est-à-dire qu'elles permettent d'estimer une valeur (débit de pointe, débit journalier,...) de probabilité de non dépassement fixée, sur la base d'un échantillon de données mesurées. L'inverse de cette probabilité de non dépassement n'est autre que la période de retour : des crues de fréquence décennale et centennale respectivement pour 10% de chances de dépassement et rares 1% de chances de dépassement et moins.

La loi de Gumbel qui est la plus utilisée, est une loi d'ajustement dont la densité de probabilité est une double exponentielle à deux paramètres. Gaume (2002) constate que parmi les autres lois statistiques couramment utilisées (lognormale, normale, exponentielle), c'est celle dont les écart-types d'erreur associés à un quantile donné sont les plus faibles. Il voit deux (02) perspectives pour l'amélioration des méthodes statistiques appliquées à l'hydrologie :

- Diminution de l'intervalle de confiance sur la distribution des débits par l'augmentation de la taille de l'échantillon (utilisation de l'information historique

et des archives) ou par regroupement d'informations (à l'échelle régionale par exemple).

- Amélioration de la connaissance théorique sur les distributions statistiques des débits de pointe afin de contraindre la loi d'extrapolation utilisée.

La modélisation systémique empirique a rendu bien des services aux ingénieurs et continuera d'en rendre. Seulement, des auteurs tels que Gaume (2003) reprochent aux méthodes de modélisations systémiques de mimer les situations observées, il cite : *la compétence hydrologique ne peut se résumer à un savoir académique et à la maîtrise de quelques outils mathématiques. Cette compétence doit reposer aussi sur l'expérience, la compréhension intime des processus de genèse des écoulements née de l'observation : une expertise !*

Autre argument et pas des moindres, les cas tels que celui que nous allons étudier (temps réel et temps différé), pour une utilisation opérationnelle en prévision, on a besoin d'une modélisation spécifique fort différente des besoins de l'hydrologie appliquée à la compréhension et à la reconstitution du cycle de l'eau (caractère d'imprévisibilité de la crue éclair). Ainsi, dès la première phase de réflexion sur la définition du modèle hydrologique à utiliser pour modéliser les crues éclair, les futures contraintes liées au caractère opérationnel des prévisions qui seront à réaliser, orientent les hydrologues dans le choix de la nature même du modèle hydrologique.

II.3 La compréhension des processus hydrologiques une nécessité pour la modélisation déterministe

Différents types de modèles déterministes peuvent être définis. Les critères de différenciation entre ces types sont dus au fait de globaliser ou de prendre ces phénomènes à l'échelle spatiale appropriée.

II.3.1 Approches de Modélisations Déterministes : globale contre distribuée

Les modèles hydrologiques déterministes fournissent un résultat spécifique (réponse) pour une entrée particulière en résolvant un ensemble d'équations régissant le flux de fluide ou un autre rapport empirique. Selon les classifications, il y a deux ou trois types de base de modèles déterministes, global, distribué, la troisième étant considérée comme de transition et qui est semi distribuée. Les modèles globaux sont ceux qui assument que

les propriétés d'un bassin versant demeurent constantes dans l'espace, les modèles distribués quant à eux considèrent la variabilité spatiale. Puisqu'ils n'expliquent pas la variabilité spatiale, les modèles globaux sont considérés plus simplistes que les modèles distribués et de ce fait ces derniers produisent des résultats bien meilleurs parce qu'ils peuvent expliquer des variations telles que la différence dans le potentiel d'écoulement entre un champ et un secteur urbanisé par exemple. D'une façon simple, la différence entre les deux modèles est une question de résolution. En terme historique, les modèles globaux ont fait leur apparition bien avant les modèles distribués, ce n'est que ces vingt dernières années avec la disponibilité croissante des données spatiales sous forme raster du SIG, couplées à une évolution remarquable de la vitesse de traitement par ordinateur que la transition s'est faite. Comme résultat de cette transition, on peut retrouver aujourd'hui des modèles qui sont presque entièrement distribués dans l'espace, mais maintiennent toujours une grande partie de la terminologie et le cadre de la traditionnelle version globale.

II.3.2 Description des processus hydrologiques

La nature de la problématique de ce travail veut qu'on s'intéresse à un type précis de crue, il s'agit de la crue éclair. La surveillance de ces crues est essentielle pour mieux les anticipées. Pour ce faire, seule la modélisation déterministe est à même de nous permettre un suivi en temps réel des crues éclair. Ce type de modèle prend en compte des considérations physiques et peut inclure de ce fait l'hétérogénéité spatiale du bassin versant, ce qui rend nécessaire la compréhension des processus hydrologiques rentrant en jeu. Nous présentons dans ce qui suit, un état de l'art sur ces processus.

II.3.2.1 Processus hydrologiques susceptibles d'être responsables de la genèse et de la propagation des crues éclair

Sur cette partie, nous avons essayé de faire une recherche bibliographique sur l'ensemble des processus hydrologiques. Cette étape de notre travail est primordiale pour le choix et la conception d'un modèle qui soit le plus apte à la représentation de la genèse et la propagation des crues sur notre bassin versant.

Lors d'un événement pluvieux, toute la difficulté réside dans le partage de l'eau précipité entre ces différentes destinations possibles (évaporation, infiltration, ou

ruissèlement...). Classiquement, deux étapes sont à considérer pour reconstituer le trajet de l'eau à l'exutoire :

- ✚ la **production** qui assure le passage de la pluie brute en une pluie infiltrée et une autre ruisselée ou nette ;
- ✚ le **transfert** qui achemine la pluie ruisselée à l'exutoire de l'unité hydrologique (le bassin versant).

Pour ces deux fonctions, plusieurs modèles mathématiques ont été développés ; nous identifierons quelles sont les fonctions probables de production et de transfert du bassin versant au cours de ce type d'événement extrême.

L'évaporation associée à l'interception par les végétaux a un effet négligeable en termes de volume lors d'une crue extrême. En effet, Gaume (2003) a démontré que, suivant le couvert végétal, 0.02 à 1% seulement d'eau sont interceptés par la végétation au cours d'un événement pluvieux (ils ont une part importante du bilan hydrique annuel seulement). Par contre, la quantification de ces deux phénomènes est déterminante entre deux épisodes pluvieux pour fixer les conditions initiales d'humidité des sols qui ont un effet prépondérant sur le déclenchement des crues.

Le type de précipitations à l'origine d'une crue éclair est un paramètre qui doit être systématiquement analysé et donc une recherche bibliographique nous a amené à caractériser ces différentes pluies.

Nous constaterons alors, au cours de cette analyse, que nous ne pouvons pas raisonnablement trancher pour un mode de genèse de crue éclair particulier, mais que plusieurs processus physiques de natures différentes peuvent être à l'origine de cette catégorie de crues.

a. Pluie

L'étude des crues éclair nécessite l'observation des pluies à une échelle temporelle fine (moins d'une heure). Nous nous intéressons donc particulièrement à l'orage qui engendre la crue éclair.

D'après Rivrain *et al.* (1997), les processus météorologiques complexes à l'origine des pluies diluviennes de Méditerranée se font à une méso échelle (de une à plusieurs centaines de kilomètres). Toujours selon le même auteur, dans certaines conditions

météorologiques, les cellules convectives s'organisent en vastes systèmes appelés « systèmes convectifs de méso échelle ». Leur forme peut être quasi linéaire, parmi lesquelles se trouvent les systèmes en forme de V qui restent quasi stationnaires pendant plusieurs heures ou qui se déplacent lentement produisant ainsi de grandes quantités de précipitations. Les fortes intensités de pluies apparaissent alors plutôt en début d'événement. Estupina (2004) rappelle que les avis sont partagés quant à l'importance de la connaissance de l'extension spatiale de la pluie dans la modélisation d'une crue. Les études spécifiques sont rares et bien souvent les auteurs parlent d'averses au sens large du terme.

D'un certain point de vue, il semblerait que cette information ne joue qu'un rôle mineur dans la genèse de la crue. D'un autre point de vue, celle-ci pourrait avoir des conséquences non négligeables sur les crues ; il semblerait qu'enfin de compte ceci est une question de taille du bassin versant. Plus celui-ci est grand et plus l'effet de la connaissance spatiale se fait ressentir. Nous reviendrons au chapitre IV sur l'importance que peut avoir l'extension et la variabilité spatiales de la pluie sur la prévision des crues éclair.

L'accès à la connaissance de la pluie peut se faire de différentes façons. Les techniques classiques d'observation, pluviomètres et pluviographes, restent les appareils de mesure les plus utilisés en Algérie. Les moyens de mesure modernes, telle que l'imagerie radar qui peut être un outil exploitable pour la prévision des crues éclair (Marchandise 2003 / 2007 ; Lequien, 2002...), sont très utilisés au niveau des pays qui disposent de tels moyens.

b. Fonction de production

Le bassin versant est le siège d'écoulements horizontaux et verticaux à la surface du sol et dans le sous-sol. Ces écoulements vont induire un écoulement à l'exutoire du bassin. Les écoulements de sub-surface horizontaux ne seront pas considérés dans cet exposé du fait de leur échelle de temps incompatible avec la problématique des crues éclair. En effet, les conductivités hydrauliques des sols, usuellement mesurées, sont de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-3} cm/s pour des sols non argileux. On en distingue deux types en fonction de l'origine de la saturation. Cette origine est conceptualisée de deux manières que l'on présente souvent comme contradictoires dans la littérature:

- Les écoulements par dépassement de la capacité d'infiltration ou écoulement hortonien ;
- Les écoulements sur surfaces saturées.

D'autres phénomènes peuvent venir se greffer à ces écoulements et modifier ainsi les conditions de production du ruissellement.

b.1 Théorie de Horton à propos du ruissellement

La théorie de Horton (1933) correspond à l'apparition d'un ruissellement de surface par refus d'infiltration dans un sol initialement non saturé, on parle de « saturation du sol par-dessus ».

Selon Musy (2005), cet écoulement est considéré comme pertinent pour expliquer la réponse hydrologique des bassins en climats semi-arides, ainsi que lors de conditions de fortes intensités pluviométriques. Marchandise (2007) poursuit et explique que sous les fortes intensités pluviométriques, les sols se déstructurent facilement et ceci est le résultat de l'obstruction des pores superficiels qui font que les vitesses d'infiltration diminuent sans pour autant que le sol ne soit saturé en dessous de la couche superficielle.

Il y a lieu de distinguer entre la théorie de Horton, d'une part, et l'équation empirique d'infiltration de Horton (utilisable dans les modèles numériques). La "théorie de Horton" peut très bien s'accommoder à d'autres modèles d'infiltration (1D verticale en sol homogène) tels que la théorie d'infiltration de Green et Ampt et celle de J.R. Philip. On reste quand même, avec ces différentes théories, dans le schéma Hortonien qui explique la genèse du ruissellement uniquement comme une limitation de la capacité d'infiltration. Ce schéma est illustré à différentes échelles spatiales dans ce qui suit.

... à l'échelle de la parcelle

Le schéma hortonien considère la parcelle comme une colonne de sol homogène caractérisée par des propriétés intrinsèques dont la surface contrôle l'infiltration. L'écoulement apparaît lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité maximale du sol à absorber l'eau. Cette capacité, caractérisée par l'infiltrabilité du sol, est supposée décroissante dans le temps jusqu'à une valeur constante représentée par la conductivité hydraulique à saturation. L'écoulement de surface se produit donc lorsque la capacité

d'infiltration devient inférieure à l'intensité des précipitations. Toute l'eau qui ne peut pas être infiltrée dans le sol participe au ruissellement (fig.11).

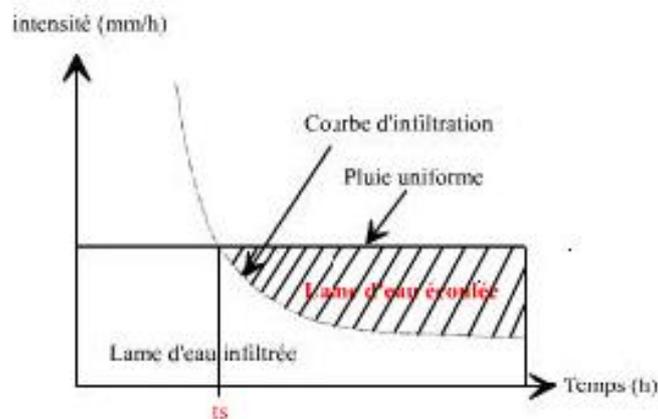


Figure 11 : Taux d'infiltration pour une pluie uniforme (source : Musy, 2005).

Cette infiltration est suivie par une percolation lente vers une nappe profonde. Les transferts latéraux par la nappe profonde sont suffisamment retardés pour ne pas intervenir dans les volumes des crues. Les seuls qui interviennent sont les transferts latéraux se produisant à la surface des sols.

... à l'échelle du bassin versant

Horton (1933) propose de calculer un taux d'infiltration moyen pour l'ensemble du bassin versant à l'aide d'une étude sommaire des chroniques pluie-débit. Il considère que les premières pluies s'infiltrent dans la couche superficielle du sol et la saturent rapidement. L'eau ne peut alors plus s'infiltrer qu'à une vitesse maximale correspondant à la conductivité hydraulique à saturation considérée constante dans le temps et dans l'espace. Horton considère que lorsque l'intensité des pluies est supérieure à la capacité d'infiltration du sol, alors le ruissellement a lieu. Obled (1999) poursuit qu'il y aurait formation d'un écoulement en lame d'épaisseur croissante, qui répond aux lois des écoulements à surface libre. C'est ce ruissellement qui est à l'origine de la crue. L'ensemble du bassin versant contribue donc à l'écoulement de crue, par contre, seule une partie des précipitations y participe. Ecoulement rapide de crue et ruissellement sont alors confondus et varient avec l'intensité de la pluie ainsi que la nature du sol.

... ruissellement hortonien et crues éclair

Le ruissellement de type hortonien est provoqué par un dépassement de la capacité d'infiltration de surface. L'eau qui ne s'infiltré pas ruisselle ensuite en surface. La

végétation, la rugosité du sol et les remous causés par les gouttes de pluie, sont les principaux facteurs qui influencent l'écoulement. Albergel *et al.* (2003) détaillent l'importance des processus hortonien dans la genèse des crues en milieu semi-aride. Pour donner naissance à un ruissellement de type hortonien, plusieurs conditions doivent être remplies, à savoir :

- Des intensités de pluies importantes et sur une certaine durée. Des études menées en laboratoire ont montré que tous les sols peuvent être soumis à du ruissellement hortonien pour des intensités de pluie supérieures à 30-40 mm/h (Le Bissonnais et Singer, 1993). Les auteurs constatent par ailleurs qu'il faut d'une demi-heure à une heure pour que les coefficients de ruissellement se stabilisent.
- Des sols limoneux présentant un manque d'argile et de calcium ce qui favorise la formation d'une couche de battance. La couche de battance est une croûte qui a pour origine un processus mécanique et chimique de déstructuration et de compactations de la couche de surface sous l'effet des fortes pluies.
- Une végétation absente. En effet, le rôle de la végétation a tendance à atténuer sérieusement l'énergie cinétique de la pluie (Ellison, 1945) et donc à réduire la battance.

Le modèle hortonien présente quelques avantages et quelques inconvénients de mise en œuvre. Ses paramètres sont physiques et peuvent être mesurés. Mais du fait des hétérogénéités spatiales des pluies et de l'infiltrabilité des sols, le passage de la parcelle hortonienne au versant ou au bassin versant nécessite la spatialisation de ce concept. De plus, la variabilité spatiale de l'infiltration ainsi que l'hétérogénéité des pluies autorisent l'eau, qui n'aurait pu dans un premier temps s'infiltrer, à ruisseler pour éventuellement s'infiltrer plus en aval. Le changement d'échelle à effectuer sur le modèle hortonien est donc loin d'être commun.

Nous pouvons donc être amené à penser que la théorie de Horton, loin d'être une théorie universelle, peut être représentative du phénomène de genèse de crues éclair à l'échelle de la parcelle sur des environnements perturbés (anthropisés, agriculture, élevage), pour lesquels la surface du sol a été compactée, et ceci même pour de faibles pluies dans des climats tempérés. Néanmoins, le passage depuis la parcelle vers le bassin

versant ne pourrait se faire sans considérer les éléments intermédiaires (fossés, talus, rigoles, constructions...) qui ne répondent pas à ce mode de fonctionnement.

b.2 Théorie des aires contributives saturées

Cappus (1960) a évoqué des phénomènes de genèse de crue bien différents de ceux de Horton. Il parle de processus de ruissellement sur surface saturée ou imperméable. Dans ce cas l'écoulement se produit lorsque la capacité du sol à stocker l'eau est épuisée et lorsque la capacité à transmettre latéralement le flux d'eau est dépassée. Par conséquent, l'eau ne pourra plus s'infiltrer et va s'écouler en surface. On parle de « saturation du sol par dessous ».

Le développement de conditions saturées à la surface du sol peut résulter de l'écoulement latéral d'une nappe profonde ou perchée c'est ce qu'on appelle « intumescence de la nappe ». La remontée de la nappe à partir d'un horizon peu perméable ou à partir d'une nappe préexistante peut être à l'origine de ce développement. Dans ces trois cas, il s'agit donc d'une saturation par-dessous. Les pentes faibles et les sols minces favorisent la saturation par-dessous.

... à l'échelle du versant

Cappus (1960) explique que l'intumescence de la nappe étant le fondement de cette théorie, elle doit être avant tout définie. Pour un versant incliné avec une rivière au pied de ce versant, la nappe affleure au niveau de la rivière, mise à la pression atmosphérique, elle suinte et se draine ; par de forts gradients gravitaires, la nappe prend la forme d'une intumescence qui penche vers la rivière. S'il pleut davantage, la nappe s'exfiltre sur la berge et sur le versant, il n'y a alors plus d'infiltration ; l'eau ruisselle, on parle de ruissellement par saturation. La partie amont du versant conserve plus longtemps son état initial (fig.12).

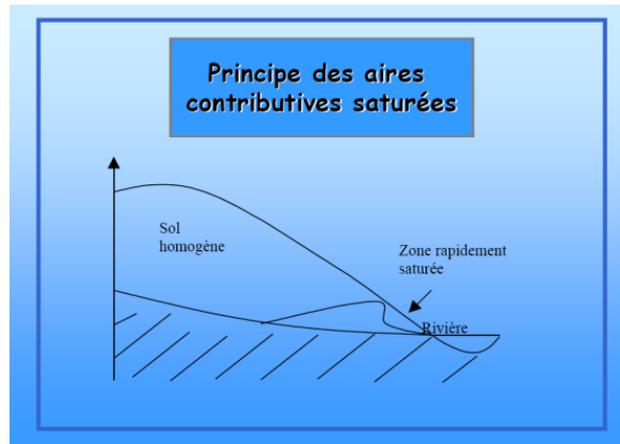


Figure 12: schéma d'une zone contributive saturée (source : Musy, 2005).

Musy (2005) explique que dans le cas d'un sol stratifié (macro pores de la couche de sol supérieure et existence d'interface), l'eau s'accumule à l'interface et sature la couche supérieure. Il y a alors écoulement latéral souterrain (nappe perchée temporaire). Si cette nappe gonfle et affleure, il y a exfiltration et refus d'infiltrer l'eau de surface.

D'après le concept des aires contributives saturées, le versant est défini par sa capacité à se saturer plus ou moins facilement. Il s'agit du rapport entre la capacité à drainer de l'eau à l'amont et la capacité à évacuer l'eau en souterrain vers l'aval (Beven & Kirkby, 1979). Les versants ainsi que le voisinage des rivières seront les premiers concernés. Le sol peut être très rapidement saturé et l'eau de surface se met à ruisseler totalement. Dans la couche supérieure du sol, un écoulement hypodermique apparaît avec une vitesse fonction de la conductivité hydraulique verticale.

Dans cette théorie, le volume d'eau ruisselée correspond au volume de l'écoulement rapide de crue ainsi qu'au volume de pluie tombant sur les aires contributives saturées. Mais il ne s'agit pas pour autant de la même eau : le ruissellement n'est pas le mécanisme dominant de la genèse de crue. L'occupation du sol n'influence en rien le phénomène.

... à l'échelle du bassin versant

Estupina (2004) décrit la théorie des zones contributives saturées à cette échelle comme suit : les aires contributives saturées sont connectées entre elles au cours de l'événement ; ces connexions brutales sont représentées par de fortes non linéarités à l'échelle du bassin versant. Le ruissellement se développe donc de l'aval vers l'amont ; l'augmentation de la lame d'eau ruisselée entraîne localement une augmentation des vitesses, mais pas globalement. De plus la transition entre versant et bassin se fait par

l'introduction du réseau hydrographique. Ceci suggère donc un comportement plus linéaire et régulier des bassins.

... aires contributives saturées et crues éclair

Ce fonctionnement par zones contributives saturées à l'échelle du bassin a déjà été observé dans le cas de crues éclair. En effet, Cosandey (1999) explique que ces crues, cévenoles sur le mont Lozère, soudaines et brutales, sont générées dans un premier temps par l'extension des zones contributives saturées par l'amont du bassin (là où les sols sont les plus minces). Sur ces zones saturées l'eau ruisselle puis s'infiltré plus en contrebas. Dans un second temps, s'il continue de pleuvoir, l'aval se transforme aussi en zones contributives saturées et là le ruissellement superficiel se généralise et touche tout le bassin. Il apparaît alors un seuil de fonctionnement de ces aires.

Ce schéma des zones contributives saturées est né de déductions et d'hypothèses, mêmes si à l'origine il a été inspiré par des observations. Il admet que le ruissellement et l'infiltration ne se produisent pas au même endroit : il peut y avoir pluie sans qu'il y ait ruissellement et inversement le ruissellement peut apparaître là où il ne pleut pas.

Il ne s'agit donc pas d'un fonctionnement universel contrairement au fonctionnement hortonien. Ce type de formation de crues pourrait être représentatif de la genèse d'une crue éclair, là aussi dans certaines conditions et sur certains bassins. Enfin, les vrais phénomènes sont parfois dus à l'existence au même endroit et au même moment d'un phénomène de limitation de la capacité d'infiltration et de remontée locale de la nappe (ou de la frange capillaire presque saturée).

La figure 13 résume les deux situations rencontrées jusqu'ici, à savoir l'écoulement sur surfaces saturées ainsi que l'écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration.

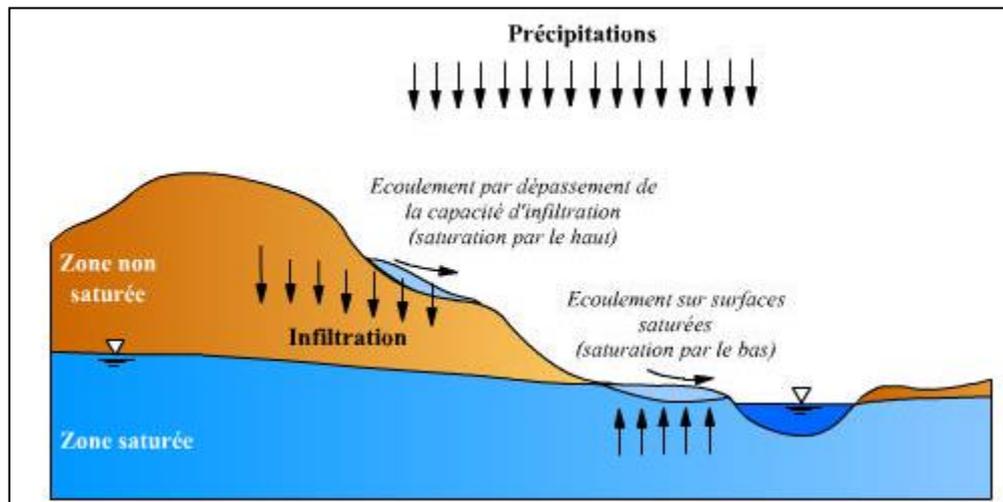


Figure 13: processus de génération d'écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration ainsi que sur surfaces saturées (source : Musy, 2005).

b.3 Processus modifiant la structure superficielle du sol

Lorsque les sols sont mal protégés de l'impact des gouttes de pluie, « l'effet splash » peut modifier l'état de surface du sol et ainsi ses conditions d'infiltration. Il se forme alors des organisations pelliculaires superficielles (OPS) ou croûte de battance. C'est une propriété souvent associée aux sols limoneux, mais selon Gaume (2003) elle peut concerner tous les types de sols. La surface du sol peut alors devenir très lisse, une croûte sédimentaire ayant apparu, et son infiltration maximale ne peut plus dépasser que quelques mm/h (généralement inférieur à 10 mm/h). Sur ces OPS, le ruissellement pourra donc avoir lieu quel que soit la valeur de la conductivité hydraulique à saturation du sol. Le ruissellement peut alors devenir un phénomène prépondérant en quelques dizaines de minutes (phénomène d'autant plus rapide que le sol est initialement sec).

b.4 Limitations de la production du ruissellement surfacique par les macropores

Les transferts de masse d'eau dans les sols sont réglés par les forces de succion matricielle et par la force de gravité. Les forces de succion matricielle induisent un remplissage des pores du sol, en les remplissant par ordre croissant de taille et donc de force de rétention décroissante. Ces forces sont actives lorsque le sol n'est pas encore totalement saturé. Elles peuvent donner lieu à des vitesses de répartition très rapides des eaux dans les sols, au niveau des zones de fort gradient hydraulique. Ces forts gradient hydrauliques ne peuvent être justifiés que par la présence de macropores inférant à ces derniers un rôle primordiale et celui notamment dans la percolation verticale de l'eau.

Toutefois leur modélisation est très mal connue à ce jour, elle passe par le couplage d'un modèle basé sur la loi de Darcy et d'un modèle traduisant l'écoulement de l'eau dans les macropores ainsi que d'observations de terrain poussées qui semblent difficile à l'échelle d'un bassin versant tout entier. Retenons cependant que leur présence peut suffire à expliquer des drainages bien plus rapides que la loi de Darcy ne les prévoit.

Ainsi, les processus modifiant la structure locale du sol, comme les organisations pelliculaires superficielles ou les macropores, influencent la genèse des crues. Cependant devant la difficulté à les quantifier et à les localiser à l'échelle d'un bassin versant, leur présence peut être traduite par une modification des valeurs des paramètres caractérisant l'infiltrabilité du sol.

b.5 Processus modifiant la fonction de production (l'interception et l'évaporation)

Bien que représentant dans la plupart des régions en Algérie plus du trois quart du bilan hydrique annuel au niveau de la surface du sol, les phénomènes d'évaporation et d'interception sont négligeables en termes de volumes lors d'une crue extrême. Par contre, la quantification de ces deux phénomènes est déterminante entre deux épisodes pluvieux pour fixer les conditions initiales d'humidité des sols. Ces conditions ont un effet prépondérant sur le déclenchement des crues éclair.

Nous pouvons dire enfin que l'adaptation d'une formule du type Penman à notre modélisation est complexe et nécessiterait l'introduction de nouveaux paramètres. Tout cela pour finalement aboutir à des quantités d'eau potentiellement évaporées de l'ordre de un pourcent.

c. Fonction de transfert

Le mode d'écoulement du ruissellement sur les versants est très complexe. Il est courant de considérer qu'à partir du moment où des flaques se forment sur le sol et présentent une épaisseur suffisante, elles vont s'écouler. En amont le ruissellement se fait en nappe d'épaisseur fine qui s'écoule le long d'une surface large. Ce mécanisme ne persiste que sur de courtes distances (quelques dizaines de mètres). Au-delà, les non uniformités de la surface concentrent les écoulements en rigoles tortueuses. Au cours de cette phase de l'écoulement non uniforme, on distingue les ravines éphémères et larges

des rigoles turbulentes, les zones d'érosion des zones de dépôts. Toutes ces rigoles se rejoignent, se concentrent, grossissent et créent ainsi le réseau hydrographique temporaire qui rejoint le réseau permanent (Chow *et al.*, 1988).

D'un autre côté, (Gascuel-Odoux *et al.*, 1999) pensent que ce ruissellement ne peut pas être assimilé à une nappe répartie de façon homogène, ils expliquent que la propagation du ruissellement se fait suivant trois (03) étapes. Tout d'abord, la rugosité du sol forme des dépressions (flaques), puis elles se remplissent et se connectent pour enfin former un réseau à l'échelle du versant. On progresse d'autant plus dans cette propagation que la pluie est importante, le ruissellement y est de plus en plus hortonien. On peut mettre en évidence l'apparition d'un seuil (entre le remplissage des dépressions et leurs connections) pour lequel on passe de 0% de ruissellement à 100%. L'échelle à laquelle on se place joue un rôle capital dans la définition du mode d'écoulement. (Gascuel-Odoux *et al.*, 1999) présentent le ruissellement superficiel comme contrôlé par la surface du sol à différentes échelles :

- A l'échelle du microrelief, les cailloux, fissures et plantes vont modifier localement l'écoulement ;
- A l'échelle du motif agricole, la présence de talus et de haies déconnecte une fraction du bassin génératrice de l'écoulement hortonien du réseau hydrographique, l'extension de la zone saturée connexe au ruisseau est contrainte par ce réseau anthropique ;
- A l'échelle du versant, la pente fixe les directions d'écoulements ;
- A l'échelle du bassin, la topographie rend compte de l'existence du réseau hydrographique.

Ainsi, l'écoulement sur les versants peut être laminaire ou turbulent (en nappes ou en rigoles) sur des surfaces imperméables ou à travers des sols en trois (03) dimensions. Cet écoulement dépend de l'échelle d'observation, de la surface du sol et des précipitations.

La modélisation de ces écoulements passe donc par des hypothèses simplificatrices fortes. Chow *et al.* (1988) proposent de décrire l'écoulement naissant en nappes par un régime permanent et uniforme répondant aux lois des écoulements à surface libre. Une fois l'écoulement concentré, Chow *et al.* (1988) supposent que celui-ci peut être décrit

par la vitesse de Manning classique pour laquelle la géométrie du lit de la rivière va influencer l'expression du débit (chapitre III).

Toutefois, il arrive que cet écoulement soit décrit par une seule et même conceptualisation de sa naissance à son exutoire. Datin (1998), par exemple, évoquant le ruissellement superficiel sur les zones contributives saturées, les représente par une nappe à surface libre tout le long de leur cheminement. USACE (1979) représente la globalité du ruissellement superficiel sur un bassin, hors cours d'eau, par deux plans inclinés traversés latéralement par deux rigoles se jetant dans une troisième rigole longitudinale joignant les deux plans. Les équations résolues sont celles de l'onde cinématique répartie.

c.1 Propagation des crues éclair dans les cours d'eau

L'écoulement de la crue dans les cours d'eau joue un rôle déterminant dans la propagation de la crue éclair. La morphologie du bassin et de ses talwegs provoquent une concentration des flux, un adoucissement des pentes et par la suite une augmentation des hauteurs d'eau. Les vitesses estimées sont de l'ordre du mètre par seconde pour les crues éclair avec des régimes d'écoulement globalement fluviaux (Degoutte, 2007). Pour des pentes faibles et des montées d'hydrogrammes rapides, ces écoulements répondent aux équations complètes de Saint Venant en régime non stationnaires

$$A \frac{\partial V}{\partial x} + VB \frac{\partial y}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad \text{équation de continuité}$$

$$j = i - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \quad \text{équation de quantité de mouvement (dynamique)}$$

Avec : j : pertes de charge linéaire, i : pente, V : vitesse, x : distance longitudinale, y : hauteur d'eau, g : accélération due à la gravité ; B : largeur au miroir, q : débit d'apport latéral par unité de longueur, A : surface mouillée.

La résolution analytique des équations de Saint Venant n'est pas possible manuellement, mais la résolution numérique est maintenant tout à fait courante sur micro-ordinateur. Elle se fait en adaptant des hypothèses simplificatrices suivant le cas étudié (les problèmes réels rencontrés sont discutés dans les paragraphes qui suivent).

Les équations de Saint Venant permettent de résoudre tous les problèmes d'hydraulique transitoire dès lors que la courbure des filets liquides n'est pas trop forte et que la pression reste hydrostatique. La propagation d'une crue éclair dans un cours d'eau fait partie de ces cas. Nous allons examiner plus en détail le cas des crues en rivière à pente forte (haute et moyenne Mekerra) puis faible (partie plaine de la Mekerra).

c.1.1 propagation de crue dans les chenaux à forte pente

Dans le cas des chenaux à forte pente, et lorsque le lit majeur n'est pas très large, les termes d'inertie ($\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial y}{\partial x}$) ainsi que la variation de profondeur ($\frac{\partial y}{\partial x}$) sont négligeables devant celle du fond (i). L'équation dynamique se réduit alors à $i = j$ (ce qui revient à considérer que l'évolution du débit est suffisamment lente pour que l'écoulement soit assimilé à une succession d'états où l'écoulement est uniforme). L'onde de crue est dite **cinématique**. Elle ne s'atténue pas (Degoutte, 2007).

D'où : $Q = K.S.R^{2/3}\sqrt{i}$, relation univoque entre Q et y .

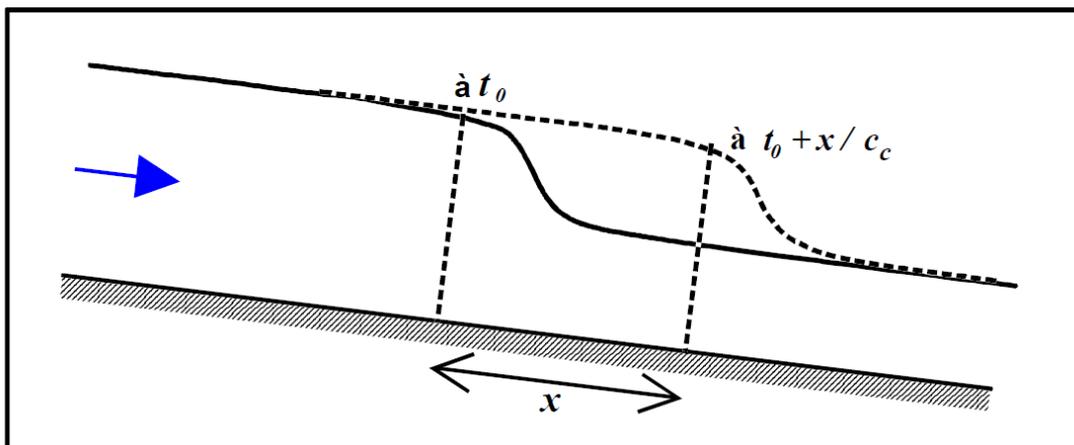


Figure 14: front de l'onde cinématique (source : Degoutte, 2007)

c.1.2 propagation de crue dans les chenaux à faible pente

Ce type de phénomène peut être résolu de manière approchée en négligeant les termes d'inertie (c'est-à-dire de quantité de mouvement) dans l'équation dynamique.

L'équation dynamique se résume alors à : $\frac{\partial y}{\partial x} = i - j$ (appelée équation de l'onde diffusive).

L'onde de cette crue (appelée onde diffusive) s'amortit au fur et à mesure de sa propagation vers l'aval (fig.15), contrairement à l'onde cinématique.

Avec les hypothèses ci-dessus, il peut être établi que le coefficient d'atténuation de l'onde de crue vaut : $\sigma = \frac{Q}{2Ly} \approx \frac{K^2.L.y^{10/3}}{2Q}$

Une crue s'atténue donc d'autant mieux que le lit est large et que le tirant d'eau est élevé.

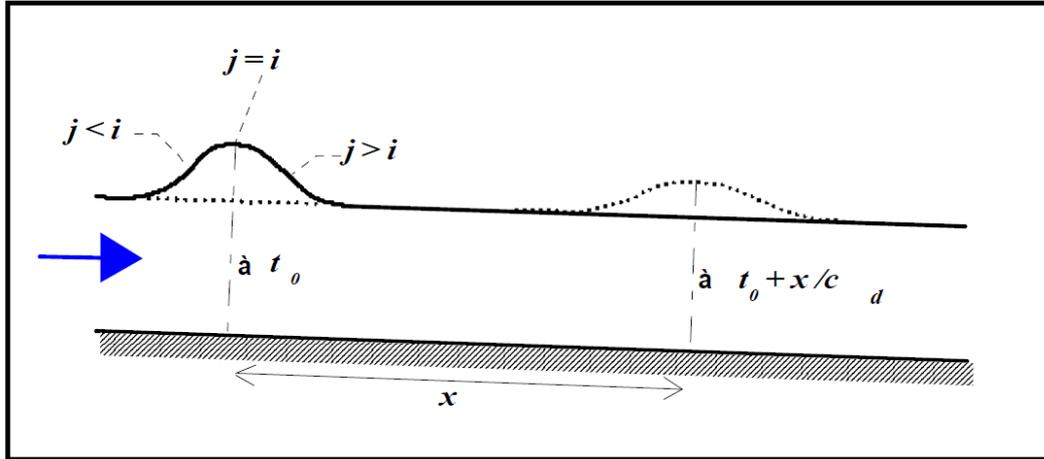


Figure 15 : amortissement (ou étalement) de l'onde diffusive (l'onde de crue en pointillé a parcouru la distance x) (source : Degoutte, 2007)

L'onde diffusive a pour équation $\frac{\partial y}{\partial x} - i + \frac{Q^2}{K^2.S^2.R^{4/3}} = 0$ en introduisant la formulation de Strickler.

Ce qui transforme l'équation ci-dessus en : $Q(x, t) = K.S.R^{2/3} \sqrt{i - \frac{\partial y}{\partial x}}$.

Contrairement au cas du régime permanent uniforme, ou à celui de l'onde cinématique,

($Q = K.S.R^{2/3}i^{1/3}$), le cas de l'onde diffusive (où i est remplacé par $i - \frac{\partial y}{\partial x}$) n'est pas univoque.

Dans un problème de type diffusif, à chaque valeurs de « Q » correspondent donc deux tirants d'eau « y » différents en crue ou en décrue (fig.16).

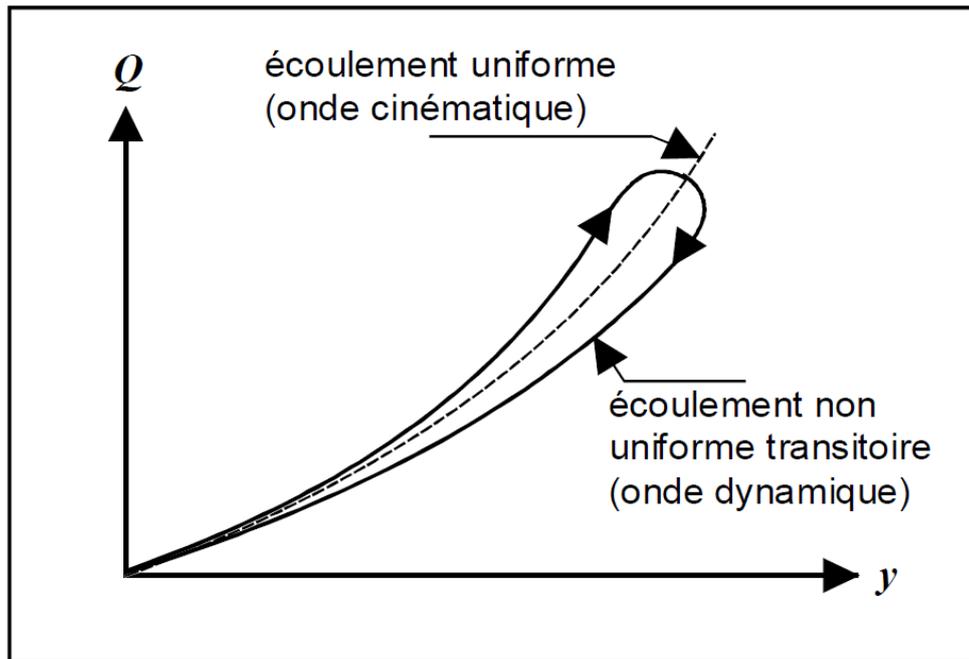


Figure 16: relation (Q - y) non univoque (source : Degoutte, 2007).

c.1.3 Conclusion sur la propagation des crues en rivière

- ❖ Lorsque la pente est forte et lorsque le champ d'inondation est réduit, la crue se propage sans s'amortir, et la relation (Q - y) reste univoque (onde cinématique).
- ❖ Lorsque la pente est faible, la crue s'amortit et la relation (Q - y) n'est pas univoque (onde diffusive).

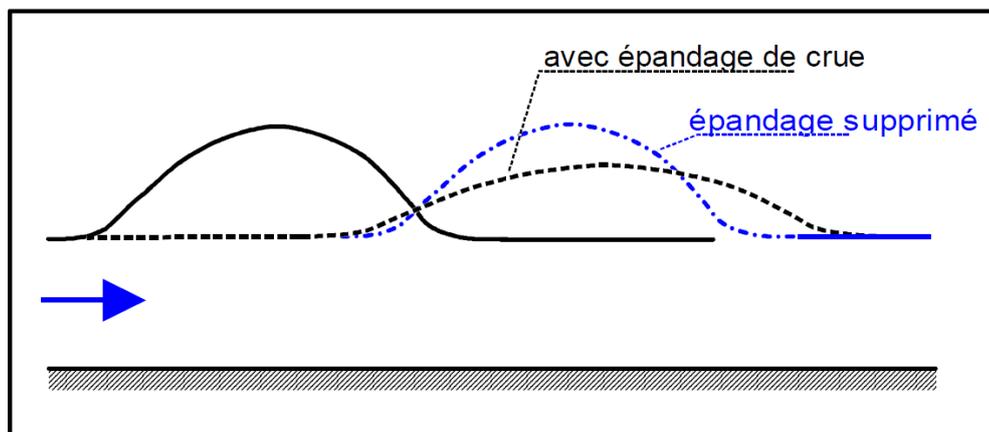


Figure 17: comparaison de la propagation d'une crue avec ou sans épandage amont dans le lit majeur (source : Degoutte, 2007).

c.2 Bilan de la genèse des crues éclair dans un bassin versant classique

Finalement, les différents modèles passés en revue consistent à scinder les phénomènes mis en jeu lors de la genèse d'une crue éclair afin de rendre gérable la représentation quantitative.

On est en droit de penser aujourd'hui, que la genèse des crues est un phénomène complexe. Il est généralement constitué par une superposition des processus précités. Ces processus se suivent ou se combinent dans le temps et dans l'espace selon un enchaînement extrêmement variable. Différents types de genèse de crue peuvent être observés sur différents bassins voire sur un même bassin en fonction des échelles spatiales et temporelles considérées. Sur un même bassin versant, on va pouvoir rencontrer différents processus responsables de la genèse des crues qui vont se succéder, se neutraliser, se combiner ou se relayer. Ces relais de processus dans l'espace du bassin peuvent avoir pour conséquences des effets de seuil. Ces effets peuvent expliquer la rapidité et la brusquerie de montée des crues éclair.

Au cours du temps, ces processus peuvent changer. Avec les saisons par exemple, les pluies abondantes de l'hiver sont responsables d'un fonctionnement par zones contributives saturées. L'été, les gros orages provoquent un ruissellement par organisations pelliculaires de surface visibles dans des rigoles qui se forment sur les versants. L'occupation du sol aussi joue un rôle dans la variabilité intersaisonnière du comportement des crues (différents stades phénologiques en fonction de la saison pour les cultures annuelles). Le type d'événements pluvieux peut aussi expliquer des genèses différentes.

Enfin, suivant l'échelle spatiale d'observation du bassin versant, les conséquences de ces processus peuvent être très différentes. Jones, (1997) cité par Musy (2005) a défini, de façon systématique, le type d'écoulement qui se produit en fonction de la superficie du bassin et du temps de montée des crues (fig.18):

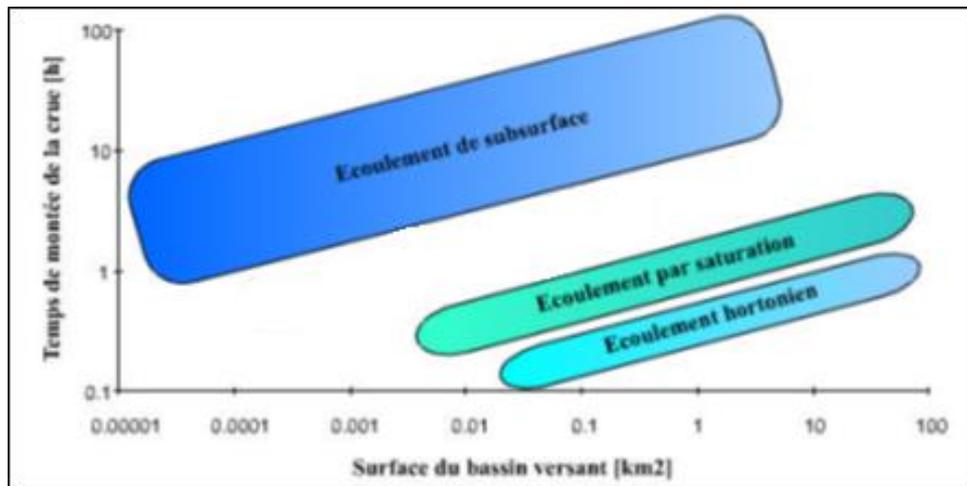


Figure 18: Courbes enveloppes du temps de montée en fonction de la surface du bassin versant classique (source : Jones, 1997).

Il ne semble donc pas possible, dans l'état actuel des connaissances, de définir des lois générales de fonctionnement de genèse de crues éclair. Le comportement de certains bassins lors d'une crue éclair sera la prolongation de son fonctionnement courant, alors que dans d'autres cas, le fonctionnement extrême sera un fonctionnement *inhabituel* qui ne correspondra pas à l'extrapolation des fonctionnements courants (Obled, 1999).

La modélisation déterministe en hydrologie souffre de problèmes qui mettent un frein à son développement. Même les modèles à base physique les plus élaborés ne peuvent représenter l'intégralité des processus du fait de limitations théoriques. Certains processus ne sont que très rarement, voire jamais incorporés dans les modèles hydrologiques car ils ne sont pas assez connus ou sont très difficiles à estimer: c'est le cas du phénomène de battance ou du phénomène d'écoulement préférentiel dans les macropores (Germann et DiPietro, 1996).

Au vue de la complexité des équations pour quantifier les processus hydrologiques, il est couramment procédé à des simplifications : emploi de relations empiriques, hypothèses fortes sur le comportement du milieu sol, simplifications des formulations temporelle et spatiale des lois. La résolution de ces équations nécessite souvent le recours à des schémas numériques qui ne permettent d'obtenir qu'une solution approchée.

Face à la volonté de modéliser ces crues de façon déterministe, dans ce travail, nous avons opté pour l'utilisation d'un modèle qui va s'attacher à modéliser les processus dominants quitte à négliger ou à simplifier les autres processus. Ce type de modèle est

défini comme un modèle perceptuel (Sivapalan, 2003). Le processus physique dominant retenu est la rétention en eau du sol et le ruissellement superficiel tant sur les versants que dans les cours d'eau.

II.3.2.2 Les écoulements dans la roche fissurée

Bien que les écoulements dans la roche fissurée font partie intégrante dans les processus hydrologiques, nous allons les décrire séparément et ce à cause de la complexité de leur étude et du rôle bouleversant qu'elles peuvent jouer dans l'influence de la réponse hydrologique. Elles nécessitent l'emploi de méthodes spécifiques (méthodes de traçage naturel, chimique ou isotopique).

Les principales études sur l'écoulement dans la roche fissurée s'intéressent aux écoulements en milieu karstique.

a. Qu'est-ce qu'un karst ?

Le karst est un paysage résultant de processus d'érosion (la karstification). Ces processus sont commandés par la dissolution des roches calcaires et dolomies en présence du dioxyde de carbone. Le CO₂ est produit dans les sols par les végétaux et les colonies bactériennes. Dans certains cas, il peut s'agir de CO₂ piégé dans des couches en profondeur. L'aquifère karstique a la particularité d'être le seul aquifère dans lequel l'eau définit ses chemins d'écoulement en façonnant les vides de l'aquifère (fig.19). Cette particularité définit une organisation et un mode de fonctionnement particuliers (Marchandise, 2007).

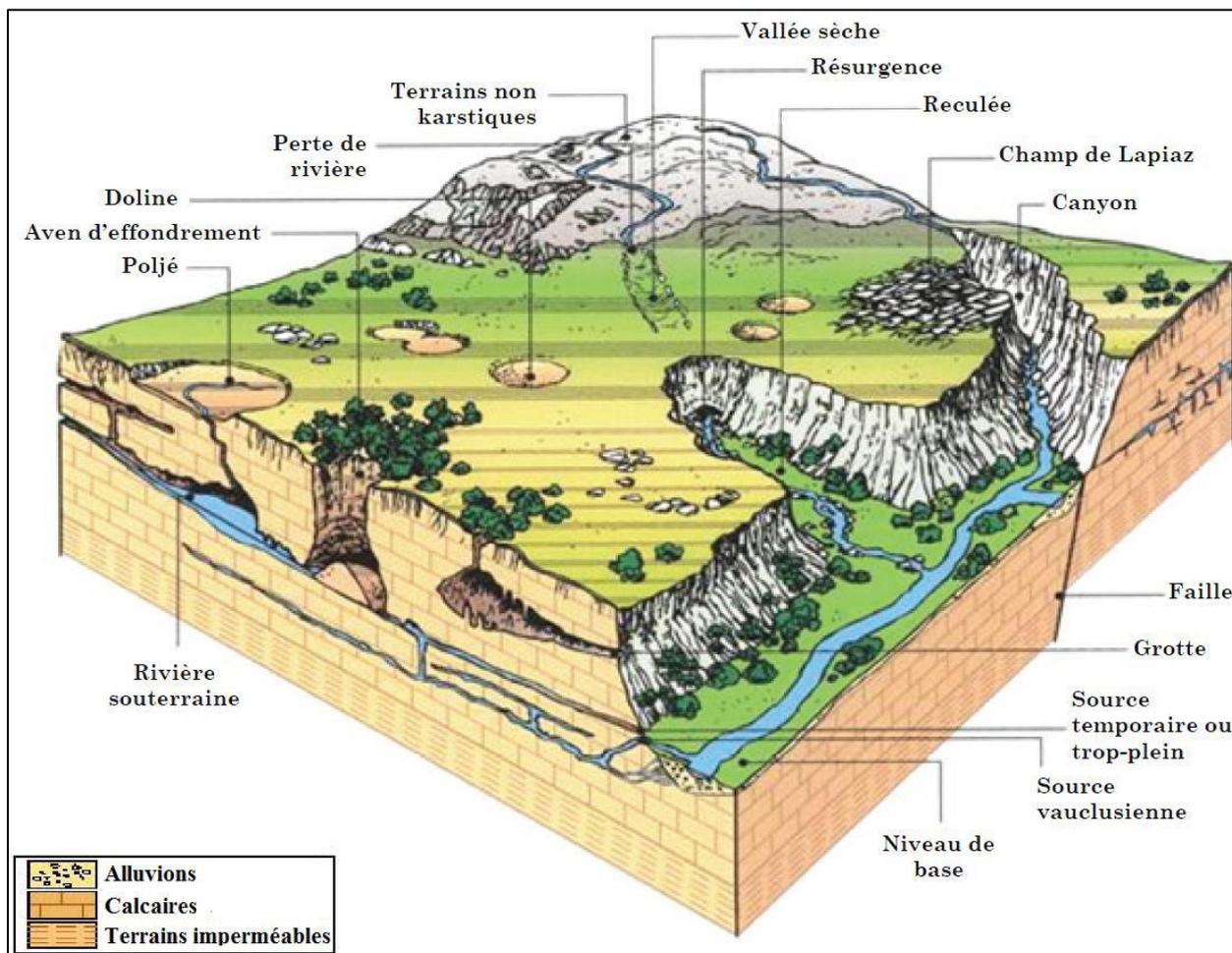


Figure 19: Bloc-diagramme d'un paysage karstique synthétique (source : Bakalowicz, 1999)

Les concepts utilisés pour la modélisation par les hydrogéologues sont relativement différents de ceux utilisés en hydrologie de surface :

- Le bassin versant d'un système karstique est un bassin hydrogéologique et non plus topographique. Sa délimitation est moins aisée que pour les bassins non karstiques.
- Elle nécessite la connaissance de l'organisation souterraine des conduits, qui est obtenue par des traçages géochimiques.

b. Description et fonctionnement d'un karst

L'organisation et le fonctionnement d'un système karstique dépendent de sa maturité. Les aquifères karstiques développés matures sont constitués d'un réseau de conduits qui assure le drainage des eaux souterraines. Ces conduits peuvent atteindre quelques mètres de largeur. Les vitesses mises en jeu peuvent être comparées à celles d'un écoulement à surface libre ou en conduit. A côté de ces réseaux de drainage, on trouve des zones

fissurées, qui constituent des zones de stockage des eaux et qui sont plus ou moins reliées au réseau de drainage.

Des auteurs tels que Genty et Deflandre (1998) ; Baker et Brunndon, (2003) ; Arbel *et al.*, (2010) cités par Valois *et al* (2011) ont montré un effet piston (transfert de pression entre la pluie nouvelle et les eaux plus profondes) et un mélange entre eaux d'infiltration rapide et eaux ayant un certain temps de séjour dans le système karstique.

b.1 Zone d'alimentation d'un karst (impluvium)

Les eaux qui alimentent le karst ont pour origine l'infiltration des eaux de pluie des terrains situés au-dessus de la zone karstique et/ou un bassin versant de surface situé en amont topographiquement, les eaux s'infiltrent dans le réseau karstique lorsque ses eaux le traversent (fig.19). La zone du karst qui s'étend sur les premiers mètres de la surface s'appelle l'épikarst. Plus perméable du fait de l'altération, elle rassemble l'eau de surface dans une nappe perchée. Les eaux sont ensuite drainées vers le bas par des vides de dimensions variables.

b.2 Écoulements dans les karsts

Dörfliger (2002) cité par Marchandise (2007) reprend en partie la classification de Marsaud (1996) pour quantifier l'impact potentiel d'un système karstique sur un signal (pluie ou cours d'eau) :

- la nature de l'impluvium : Dans les systèmes binaires, une partie de l'impluvium est constituée de terrains non karstifiables ou imperméables, alors que dans un système unaire la totalité de l'impluvium est constituée de terrains karstiques. Les systèmes binaires présentent en général un réseau de drainage interne qui se développe de l'amont vers l'aval.
- la position du réseau de drainage par rapport à l'exutoire : elle est déterminée par les conditions internes du système karstique (lithologie, texture, fracturation et porosité).
- on distingue les systèmes **vaclusiens** dans lesquels la karstification s'est développée en profondeur et les systèmes **jurassiens** qui présentent un réseau de drainage organisé à proximité de l'exutoire. Le premier système tend à freiner les écoulements gravitaires : les écoulements dominants sont

des écoulements en charge hydraulique. Dans le second, les écoulements majoritaires se font, au sein des réseaux de conduits, à surface libre.

- la structure et le potentiel hydraulique du karst : On parle de système **non fonctionnel** lorsque la karstification n'est pas assez développée (karst jeune pour lequel n'existe pas une structure de drainage qui ait un impact sur la dynamique des écoulements). Lorsqu'il existe une structure organisée des écoulements au sein du karst, on parle de **système fonctionnel**.

La description faite sur cette partie intéressera les hydrogéologues travaillant sur e territoire national pour la classification des systèmes karstiques existant en Algérie et ainsi déterminé le rôle qu'ils jouent sur les écoulements de surfaces.

c. Karst et crues éclair

Les cinétiques mises en jeu lors des crues de karst sont compatibles avec la réponse rapide des bassins versants soumis à des crues éclair. Elles sont de l'ordre du m/s pour les écoulements dans les karsts à surface libre (Labat et *al.*, 2002). Les systèmes karstiques mis en jeu sont dans la majorité des cas des systèmes binaires, avec des interactions importantes entre le karst et le cours d'eau. Bailly Comte (2008) montre l'importance de la contribution des eaux issues du karst sur les crues d'un cours d'eau côtier méditerranéen intermittent, le Lez. Quant à Muet (1985) montre que les crues issues de ce système sont réactives et bien drainées car le pic est rapide suivi d'une vidange plus lente.

Chapitre III

***DESCRIPTION DES CONCEPTS ET DES
OUTILS UTILISÉS POUR LA MODÉLISATION
DISTRIBUÉE DE LA HAUTE ET MOYENNE
MEKERRA***

CHAPITRE III : DESCRIPTION DES CONCEPTS ET DES OUTILS UTILISES POUR LA MODELISATION DISTRIBUEE DE LA HAUTE ET MOYENNE MEKERRA.

III.1 Introduction

Des modèles hydrologiques ont été développés pour simuler une variété de comportements liquides et d'une manière primordiale l'écoulement. La compréhension du processus pluie-débit dans un bassin versant est critique car elle a un impact direct sur la vie des personnes et la conception des structures. Les modèles déterministes pluie-débits peuvent fournir un outil prédictif critique pour la prévision des crues. Ces modèles fournissent aussi bien des évaluations du volume de l'eau écoulé, mais aussi et surtout comment l'onde de crue se propagera en bas du cours d'eau. Le résultat de cette modélisation est un hydrogramme de crue montrant la variation du débit en fonction du temps à un point particulier d'intérêt, habituellement l'exutoire.

Dans ce qui suit et en conclusion à ce qu'on a synthétisé au chapitre précédent, nous allons présenter les différents outils utilisés et les concepts adoptés pour l'étude de la possibilité de la construction d'un modèle hydrologique pour la prévision en temps réel des fortes crues de l'oued Mekerra.

III.2 Les données de précipitations

La disponibilité des données précises de précipitations à employer comme entrée est essentielle en modélant le rapport entre les précipitations et l'écoulement dans un bassin versant. Ces données sont la plupart des cas mesurées. En Algérie, elles concernent surtout des données pluviométriques journalières. Cependant, pour le type d'étude que nous menons et pour pouvoir comprendre les variations de l'écoulement d'un cours d'eau après une certaine pluie, une échelle temporelle plus réduite est exigée. Pour ce type de données, on utilise en Algérie les pluviographes à augets basculeurs (fig.20). Le modèle d'appareil employé en Algérie représente 0.5 mm pour chaque basculement. Les basculements sont enregistrés sur papier gradué -généralement un quart d'heure pour chaque graduation- qui est normalement dépouillé quotidiennement.



Figure 20: photo d'un pluviographe à augets basculeurs (source : <http://www.hellopro.fr>)

Ces mesures ont l'avantage d'être précises, mais sont limitées par leurs ponctualités. En effet, si les appareils de mesures sont mal positionnés, ils risquent de fournir des mesures non représentatives de l'espace qu'elles couvrent. Et donc leur positionnement et leur nombre sur une région donnée, doit se faire d'une manière rationnelle.

Les données calibrées de radar fournissent une alternative attrayante pour l'estimation de la profondeur des précipitations tombant au-dessus d'un bassin versant. Ces données fournissent aussi bien la variation spatiale de la précipitation avec une résolution plus élevée et expliquent la distribution temporelle. Ces radars fonctionnent avec le principe de réflectance des ondes électromagnétiques appelé encore « effet Doppler » (du nom de son découvreur C.Doppler, 1848). Comme tout appareil de mesure, des réserves sont à émettre quant à son utilisation ; en effet, n'importe quel objet -pas simplement une goutte de pluie- causera l'éparpillement du signal. Dans ce cas, un calibrage de données radar de l'intensité de précipitations en utilisant des mesures réelles (mesures au sol) est parfois nécessaire pour une meilleure estimation de la pluie tombée. A notre connaissance, l'office National de la Météorologie possède un de ces radars au niveau de l'algérois avec un rayon de couverture de 200 km à peu près pour une résolution de 1 km, cela sans compter les images radar fournies par les satellites.

III.3 Vue d'ensemble du SIG

Les SIG décrivent l'idée de présenter des données géographiques dans l'espace. Ces données, désignées sous le nom d'attributs, peuvent inclure des valeurs de l'altitude au sol, de l'occupation de la terre, de la densité de population et au sujet de n'importe quel type d'information qui change dans l'espace. Des attributs qui décrivent un type de

données simple s'appellent les couches. Une base de données de SIG contient habituellement beaucoup de telles couches ; chacune décrit la variation spatiale d'un attribut particulier. Le dispositif principal de n'importe quel programme de SIG est l'interface graphique. Elle permet à un utilisateur de voir réellement comment un certain type de données change à travers un secteur géographique en montrant des couches d'attributs. De la même manière, un utilisateur peut étudier le rapport entre les attributs multiples en montrant plusieurs couches à la fois. Puisque ces systèmes sont orientés vers la visualisation, la plupart des bases de données de SIG utilisent une carte ou tout autre dossier d'image en tant que couche de référence. Les programmes de SIG permettent également à des utilisateurs de modifier des couches existantes d'attributs ou de créer de nouvelles couches en effectuant des opérations mathématiques sur les données.

Tous les attributs issus de la même base de données sont liés par le système de coordonnées spatiales et de projection. Sans ce lien de la référence géographique commun, il serait impossible de considérer le rapport entre des attributs multiples. L'institut américain de recherche de systèmes environnementaux ESRI, créateurs du logiciel populaire ArcGIS, définis un système de coordonnées spatiales comme : *"système de référence employé pour mesurer des distances horizontales et verticales sur une carte planimétrique"* (ESRI, 2003). Les projections les plus communes en Algérie sont : l'UTM, les coordonnées géographiques et les coordonnées Lambert.

Les programmes SIG emploient deux principaux types de modèles caractérisant les données : des modèles raster et des modèles vecteurs. Un fichier raster est essentiellement une grande matrice de cellules ou de Pixels et chaque Pixel contient une valeur des données que le dossier raster représente. Les dossiers raster représentent normalement des images ou des données de grands espaces variables tels que les fichiers MNT. La taille de chaque Pixel dans le dossier de raster est une mesure de la résolution de dossier. Les dossiers avec la haute résolution ont un plus grand nombre de plus petits Pixels que des dossiers avec la basse résolution.

Les fichiers vecteurs se composent d'une série de lignes reliées par des points appelés les nœuds. Des secteurs définis par une clôture des lignes et des nœuds, s'appellent les polygones. Les programmes de SIG emploient des dossiers de vecteur pour représenter

les dispositifs ponctuels ou linéaires, tels que des fleuves, les routes, ou les lignes de partage d'un bassin versant.

Utilisation des SIG dans la modélisation hydrologique

Les programmes SIG sont un outil très utile dans la modélisation hydrologique. Ils fournissent aux modélisateurs un moyen rapide et facile pour s'approprier les données de l'hétérogénéité du terrain, comme le type de sol et son occupation dans un bassin versant. Actuellement, il y a des données raster et vecteur décrivant toutes les caractéristiques des sujets disponibles, parfois on les trouve chez les organismes gouvernementaux et ils sont parfois téléchargeables librement sur le net. Employer les fichiers raster dans les SIG permet un traitement des données spatialisées beaucoup plus rapide qu'avec les autres moyens traditionnels; de ce fait, ceci nous permet de nous éloigner de l'utilisation des modèles globaux en faveur des modèles distribués qui sont plus représentatifs des conditions normales.

III.4 Présentation du logiciel HEC HMS

Le HEC HMS (Hydrologic Modeling System) est un logiciel qui simule le comportement hydrologique d'un bassin versant suite à des événements pluvieux prédéterminés. Développé par Hydrologic Engineering Center (HEC) du corps de l'armée américaine des ingénieurs, ce logiciel permet de calculer des hydrogrammes de crues pour plusieurs objectifs à savoir : les études de drainage urbain, la prévision des crues et leur impact, la conception des réservoirs, la réduction des effets des inondations. Le programme présente une interface graphique, des composantes hydrologiques intégrées, un système spécifique de stockage de données (DSS) et des outils de gestion, etc.

Le logiciel HEC HMS permet de traiter ou de simuler à la fois les différentes données suivantes :

- ✚ **Les précipitations** : ces données peuvent correspondre à des relevés pluviométriques réels d'événements pluvieux ordinaires ou exceptionnels mais aussi à des événements pluvieux théoriques basés sur une étude statistique ;
- ✚ **Les pertes** (par infiltration, retenue ou évapotranspiration) qui permettent d'évaluer le ruissellement à partir des précipitations et des caractéristiques du bassin versant ;

- ✚ **Les ruissellements directs** qui prennent en compte les écoulements de surface, les stockages et les pertes de charge.
- ✚ **L'hydrologie fluviale**, concernée par l'écoulement de l'eau dans le lit de la rivière.

Dans ce qui suit, nous allons essayer de donner les différentes possibilités que nous offre le HEC HMS, cette présentation ne se veut pas exhaustive, pour plus de détails, il faut se référer à l'adresse : www.hec.usace.army.mil/software/hec.hms/ on y trouve de la documentation et le logiciel y est téléchargeable gratuitement.

Le HEC HMS est le produit de plusieurs années de recherche accomplis par une équipe d'investigateurs de différents profils notamment des hydrologues. Il est basé sur le SIG dans le sens qu'il utilise une combinaison du SIG et des méthodes informatiques pour accomplir la conversion des précipitations en écoulement. Dans l'ensemble, le modèle peut être classifié comme modèle distribué ou dans notre cas comme semi distribué. Le bassin versant est découpé en plusieurs sous-bassins délimités par les lignes de partage des eaux. Chacun est représenté par un élément appelé « sous bassin ». Ce dernier contient l'ensemble des paramètres physiques et hydrologiques nécessaires pour la simulation à savoir : la surface et le nom du sous bassin, les méthodes de calcul des pertes, l'écoulement de surface et l'écoulement souterrain. De même que les sous bassins, les cours d'eau sont aussi modélisés et représentés par des éléments hydrologiques appelés « extension ». Chaque extension est modélisée suivant une fonction de transfert et d'autres informations : Le type de la surface équivalente (sphérique ou prismatique), la longueur, le coefficient de Manning, etc. On peut aussi inclure les réservoirs dans la schématisation du bassin versant. Ces derniers sont représentés par l'élément «Réservoir». D'autres éléments tels que les jonctions, les bifurcations et les sources peuvent être inclus pour la formation d'un réseau aboutissant à l'exutoire du bassin.

Les Modèles développés sous HEC HMS se basent sur quatre types de modèles essentiels destinés : aux précipitations, au volume de ruissellement, au ruissellement direct et les modèles de calcul des écoulements souterrains.

III.4.1 La modélisation des précipitations

III.4.1.1 Méthode basée sur le coefficient de pondération

a. Précipitation moyenne

A partir des relevés pluviométriques mesurés sur le bassin versant (ou à proximité), on calcul la moyenne surfacique des précipitations (P_{moy}). Cette dernière est obtenue après pondération de l'influence surfacique de chaque station pluviométrique. La moyenne surfacique peut être déterminée en utilisant soit la moyenne arithmétique, soit les isohyètes, ou enfin les polygones de Thiessen.

b. Répartition temporelle

Une fois la moyenne totale des précipitations est calculée, il faut ensuite donner la répartition temporelle des précipitations à partir de la répartition typique de l'évènement pluvieux.

III.4.1.2 Inverse du carré de la distance

C'est une autre alternative à la méthode précédente qui comprend en fait deux étapes (calcul de P_{moy} puis la répartition temporelle). Cette méthode permet la réalisation directe de l'hétérographe en faisant intervenir la notion de nœuds entre pluviomètres. Les nœuds sont positionnés sur le bassin versant de sorte à avoir une répartition spatiale adéquate de la précipitation. Le HEC HMS définit alors la répartition temporelle des pluies en un nœud par pondération des données pluviométriques.

III.4.1.3 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.

III.4.2 Modélisation de l'EvapoTranspiration (ETP)

Comme l'ETP reste insignifiante pendant une inondation, le HEC HMS ne tient pas compte de tous les détails concernant cette entité. Cependant, avec les modèles qui simulent de longues périodes ce paramètre s'avère primordiale. Et ce du fait que pendant les périodes sans précipitations, l'état d'humidité du bassin versant continue à changer. L'évapotranspiration est la composante critique de ce mouvement.

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

III.4.3 Modélisation des pertes

HEC HMS calcul les volumes d'écoulements en soustrayant aux précipitations les quantités d'eau qui sont stockées, infiltrées ou évaporées sur le bassin versant. L'interception, l'infiltration, le stockage et l'évaporation sont représentés par le HEC comme étant des « pertes ».

Concept de base

Les surfaces d'un bassin versant sont classées en deux catégories :

- 1) Surfaces directement connectées et imperméables, où l'écoulement est direct et se fait sans pertes. Dans ce cas on utilise le modèle « sans pertes » ;
- 2) Surfaces perméables soumises à des pertes décrites par les 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 de précipitations de cet intervalle. La quantité d'eau restante désigne l'excès de précipitations. Cette quantité est considérée uniforme sur tout le bassin versant et représente le volume d'écoulement de surface.

III.4.4 Modélisation du ruissellement direct

Dans cette partie, on donne un récapitulatif des modèles qui simulent le processus du ruissellement direct des précipitations excédentaires sur un bassin versant. HEC HMS se

rapporte à ce processus comme transformation de l'excès de précipitations pour chacun des sous bassin en un écoulement à son exutoire. Avec le HEC HMS il existe deux options pour calculer le volume de ruissellement :

✚ *Un modèle empirique* : Le but de ce type de modèle est d'établir un lien causal entre le ruissellement et l'excès de précipitation sans considérations détaillées des processus internes. Les équations et les paramètres du modèle ont une signification physique très limitée. Parmi ces modèles, sont inclus les modèles liés à la méthode de l'hydrogramme unitaire et les modèles d'hydrogrammes unitaires synthétiques.

✚ *Un modèle conceptuel* : Le modèle conceptuel inclus dans HEC HMS est le modèle de l'onde cinématique de l'écoulement de surface. Il représente, le mieux possible, les mécanismes physiques qui régissent le mouvement de l'excès de précipitation sur la surface et dans les petits canaux du bassin versant.

III.4.5 Modélisation des écoulements fluviaux avec HEC HMS

Les différents modèles d'écoulements fluviaux ou encore appelés modèles hydrauliques inclus dans le HEC HMS permettent de calculer un hydrogramme en aval du bassin versant en fonction de l'hydrogramme amont. De tels modèles sont basés sur la solution des équations de Saint-Venant, équations qui décrivent le comportement de l'écoulement instable unidimensionnel dans un canal ouvert.

III.4.6 La modélisation des écoulements souterrains

Le logiciel HEC HMS permet aussi de modéliser, en plus des ruissellements et des précipitations, 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.

III.5 Description du fonctionnement du HEC HMS

III.5.1 Préparation des entrées du modèle HEC HMS

La modélisation de la réponse d'un bassin versant soumis à un phénomène pluvieux sous le logiciel HEC-HMS est découpée en trois parties :

- la modélisation du bassin versant ;
- la modélisation de la météorologie ;
- les spécifications particulières.

Ce logiciel autorise ainsi l'utilisation de différents types de méthodes pour la modélisation du bassin versant et de la pluviométrie. La composante « spécification » permet de spécifier chaque cas par la date de début et de fin de la simulation ainsi que le pas de temps. Nous décrirons sur ce qui suit la modélisation du bassin versant.

III.5.1.1 Préparation du modèle de bassin versant

Le prétraitement du MNT

Le dossier Raster d'altitude représente la couche basse du modèle. Il est créé à partir du dossier du Modèle Numérique de Terrain (MNT). Le MNT utilisé est un fichier des altitudes moyennes sur des pixels carrés de 90 m de côté. Le MNT a été téléchargé sur le site de l'INRA sur l'adresse : srtm.csi.cgiar.org, on y trouve le MNT de l'ensemble du globe terrestre présenté sous forme d'images découpées approximativement selon le quadrillage original (1 degré en latitude x 1 degré en longitude) et chaque image est projetée en UTM (WGS84). Les images disponibles sont en format GeoTIFF fichiers à 16 bits.

La deuxième étape du prétraitement consiste à charger le MNT de la région du bassin versant de Sidi Bel Abbès dans le SIG. Une fois fait, le MNT doit être corrigé. En effet, comme avec n'importe quel grand type de donnée recueilli par l'équipement de télédétection, ces rasters peuvent contenir des erreurs. Ces erreurs apparaissent habituellement en tant que points anormalement bas ou hauts.

Après cela un script Avenue nous permet de délimiter uniquement le MNT contenu à l'intérieur du bassin versant (fig.22). Cette démarche limite le prétraitement au bassin versant en question sans tenir compte des bassins versants adjacents.

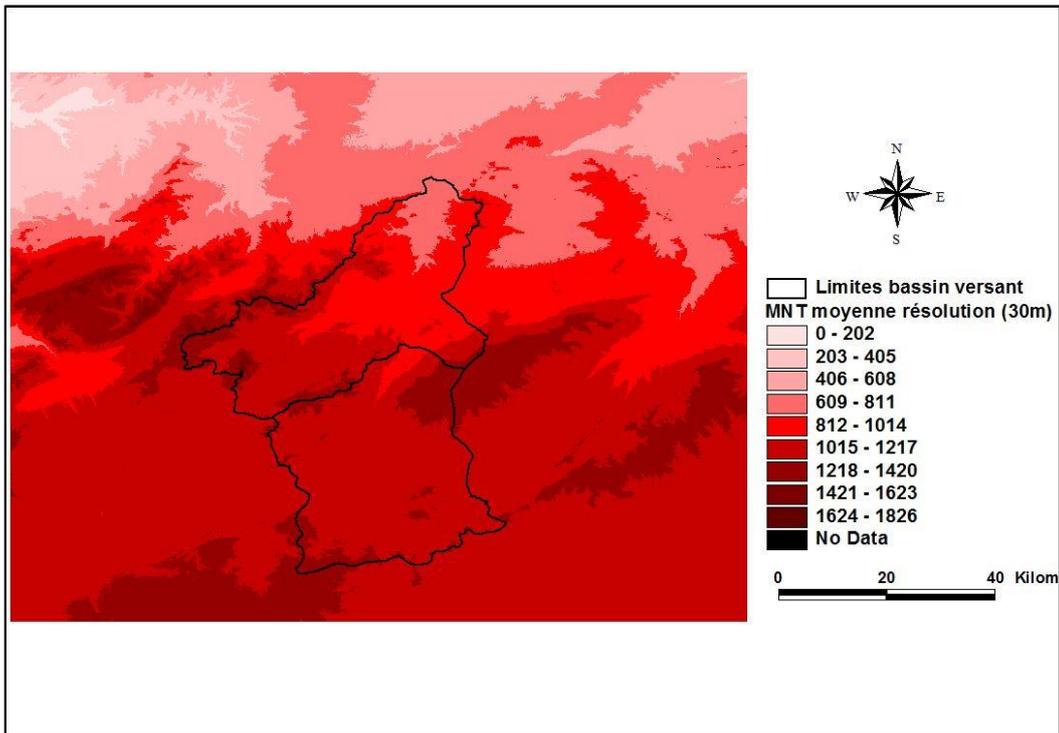


Figure 21: MNT brut de l'ouest Algérien.

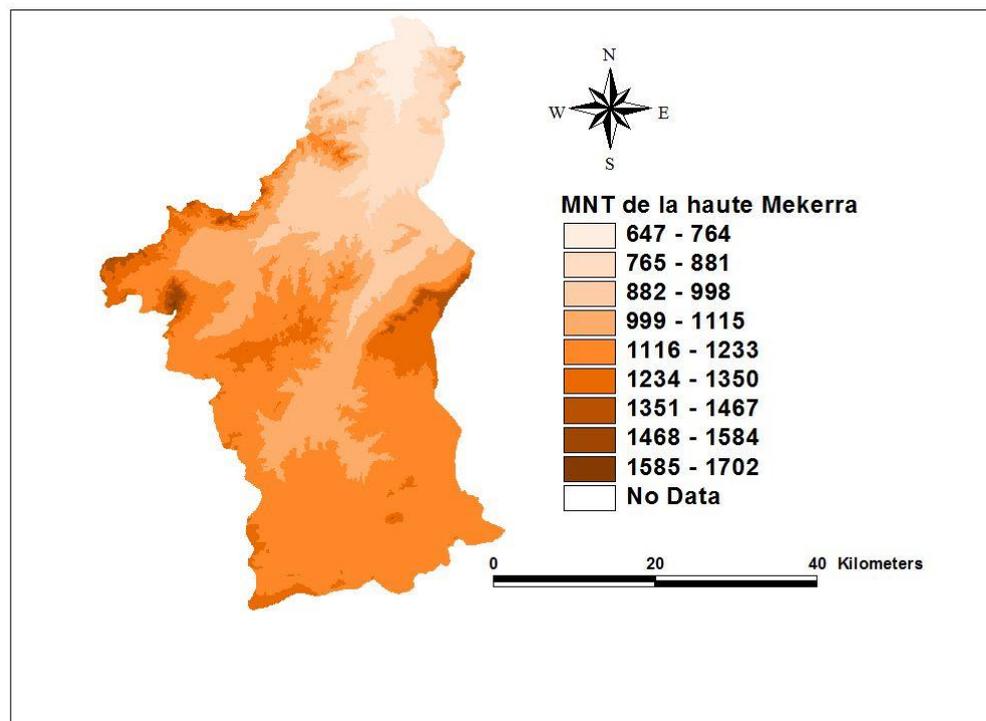


Figure 22: Délimitation du MNT du bassin versant de la Mekerra.

II.5.1.2 Modélisation du bassin versant

a. Traitement du MNT

La modélisation d'un bassin versant consiste, en premier lieu, en un découpage de celui-ci en plusieurs sous-bassins versants élémentaires. Ensuite, il faut spécifier les

méthodes utilisées pour le calcul des infiltrations, du ruissellement et des écoulements souterrains.

La schématisation d'un bassin versant en sous bassins est réalisée à l'aide du logiciel HEC-GeoHMS. C'est une extension du système d'information géographique Arcview et du Spatial Analyst et qui a été développé comme un outil hydrologique géospatial pour les ingénieurs et hydrologues (HEC-GeoHMS manuel d'utilisateur, 2003). Cette extension produit un certain nombre d'entrées hydrologiques 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 sous-bassins. Elle permet en outre aux utilisateurs de visualiser l'information spatiale, les caractéristiques du bassin versant, de délimiter les sous-bassins, les ruisseaux, etc.

Cette extension saisit comme données le MNT du bassin versant. En sortie de ce module on récupère l'ensemble des informations nécessaires à la modélisation du bassin versant stockées dans des fichiers ASCII sous le format HEC HMS.

La relation entre le SIG, le HEC GeoHMS et le HEC HMS est illustrée sur la figure 23.

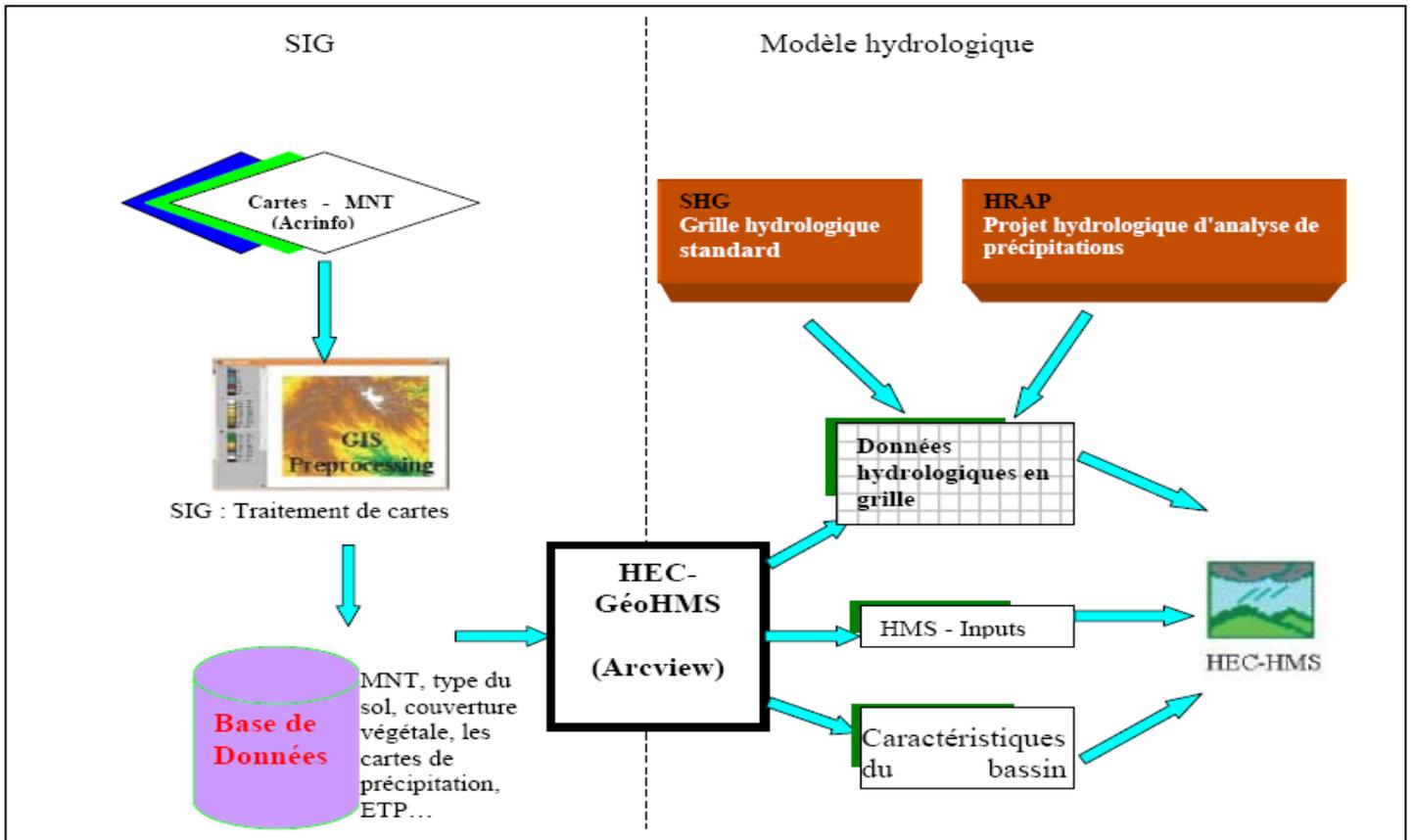


Figure 23: Vue d'ensemble du SIG et du modèle hydrologique (source : HEC GeoHMS manuel d'utilisateur, 2003).

b. Procédure de schématisation du bassin versant

Cette étape consiste en la réalisation d'un ensemble d'opérations permettant d'avoir vers la fin une schématisation de notre modèle de bassin, ces opérations sont décrites pour notre cas d'étude dans ce qui suit:

- 1) Définition du sens d'écoulement suivant les six directions possibles (nord-sud, est-ouest, nord-est, nord-ouest, sud-est et sud-ouest). Dans ce cas, le programme examine chaque cellule dans le dossier du MNT corrigé et détermine la direction de l'écoulement pour cette cellule particulière basée sur les altitudes des huit cellules voisines. La figure 24 fournit le raster du sens de l'écoulement pour notre cas d'étude.

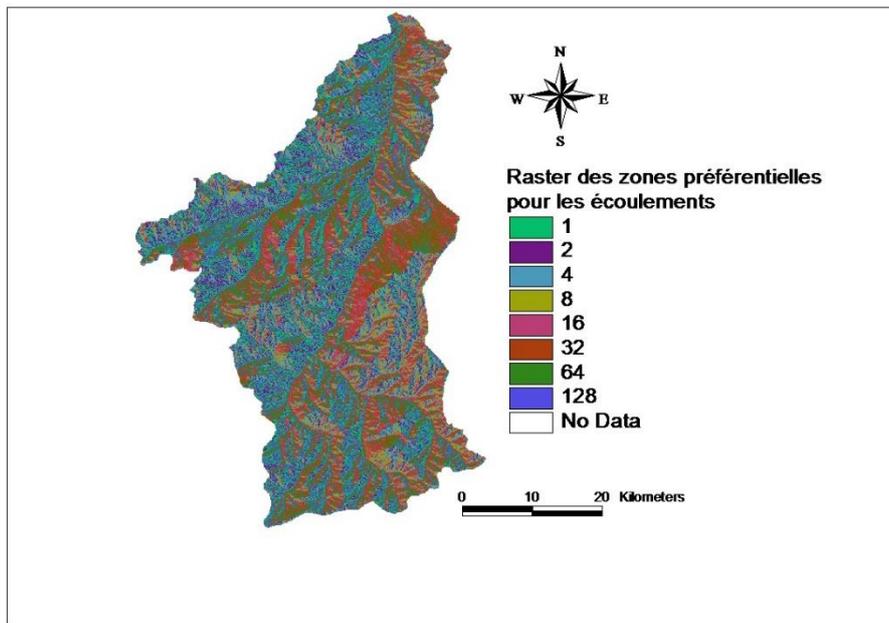


Figure 24: le sens de l'écoulement.

- 2) Une fois le sens d'écoulement de l'eau sur le bassin versant est établi, l'étape suivante consiste à faire sortir le chemin d'écoulement de l'eau. Le réseau hydrographique résultant est illustré sur la figure 25.

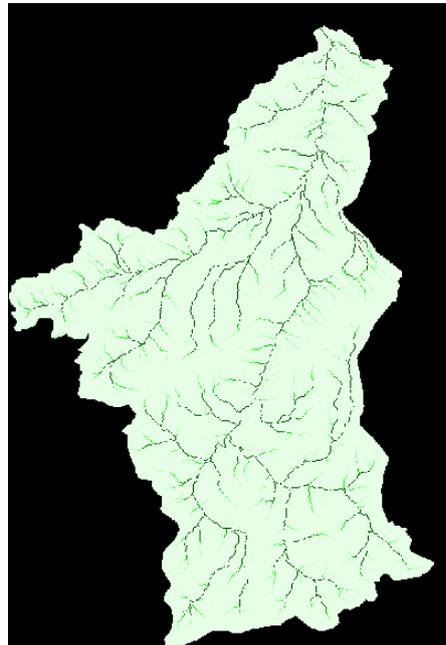


Figure 25: le chevelu hydrographique de la haute et moyenne Mekerra.

- 3) Définition des cours d'eau : cette étape classe toutes les cellules dont l'accumulation d'écoulement est plus grande qu'un seuil donné.
- 4) Dans notre étude nous disposons de mesures d'écoulement à deux niveaux : Le premier c'est l'exutoire et le second nous lui avons tracé un sous bassin

spécifique ; ceci pour des soucis de calibrage du modèle. En effet, il est salutaire de diviser le bassin versant en plusieurs sous bassins afin d'améliorer l'exactitude des calculs du modèle et de prendre en considération l'hétérogénéité spatiale des paramètres des modèles choisis. Sur la figure 26 on retrouve la division du bassin versant au niveau de deux points de mesure hydrométriques.

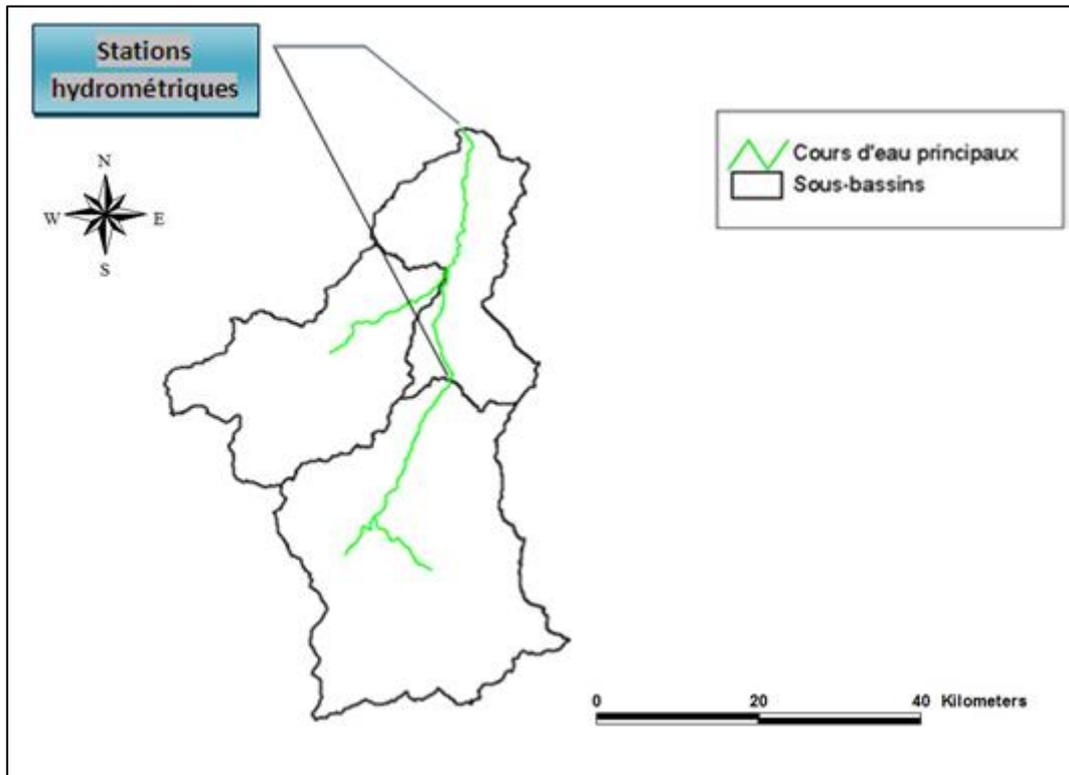


Figure 26 : les sous bassins versants et les cours d'eau principaux et localisations des stations hydrométriques sur la haute et moyenne Mekerra.

Une fois que le traitement du MNT est parachevé et les sous bassins sont bien déterminés, on passe à l'extraction des informations nécessaires à partir de la base de données préétablie (sous-bassins et cours d'eau).

c. Établissement des éléments hydrologiques du bassin

Les éléments hydrologiques du bassin sont :

- Les sous-bassins ;
- Les biefs ;
- Les jonctions.

Cette étape consiste à :

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.

Générer la vue de projet : Permet de générer une vue de projet (Project-view), après que l'utilisateur aurait défini la zone d'étude donnant l'exutoire du bassin (fig.27).

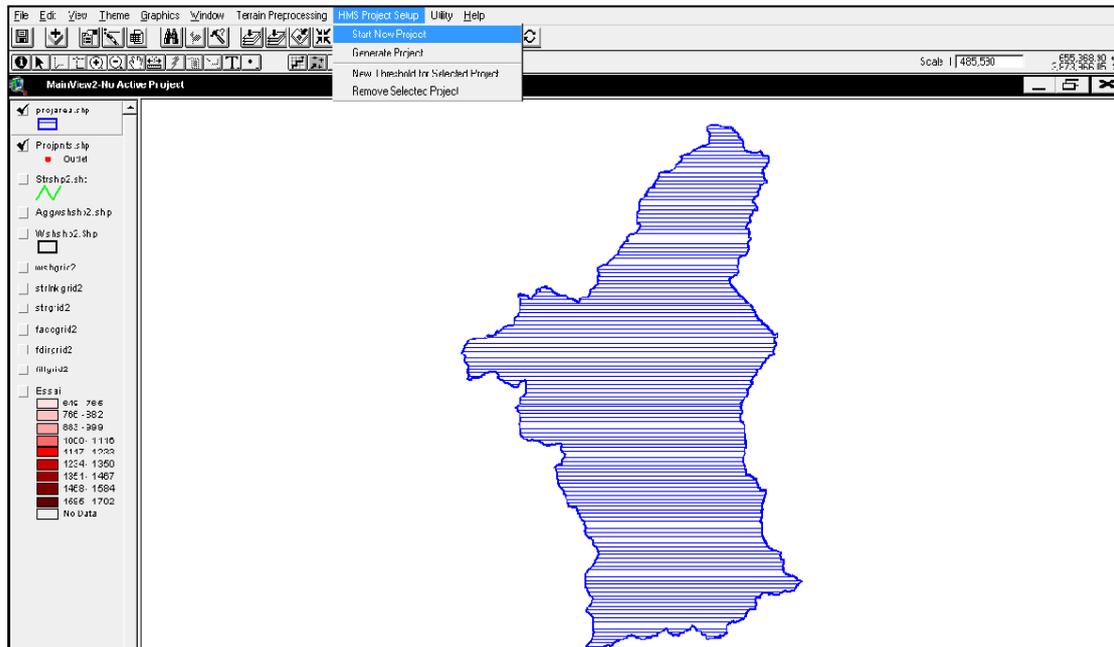


Figure 27: lancement d'un nouveau projet HMS.

d. Traitement des sous bassins

Après que le prétraitement du terrain ait été exécuté dans la vue principale, les données extraites pour le modèle HMS sont produites et placées dans la vue du projet. Ceci permettra à l'utilisateur de mettre à jour les délimitations des sous bassins. Cette étape offre les possibilités de fusion ou de subdivision de bassins, de fusion de cours d'eau et d'obtention de profils en long des cours d'eau.

Caractéristiques des sous-bassins et des cours d'eau : Le logiciel HEC GeoHMS donne la possibilité de calculer les caractéristiques topographiques des cours d'eau et des lignes de partage. Ces caractéristiques sont utiles pour comparer les bassins entre eux et pour estimer les paramètres des modèles hydrologiques. Les caractéristiques physiques des cours d'eau et des lignes de partage sont stockées dans des tables d'attributs. Ces caractéristiques sont : les longueurs des cours d'eau, les pentes, les centroïdes des bassins, la longueur de plus long chemin d'écoulement et les centres des cours d'eau (fig.28).

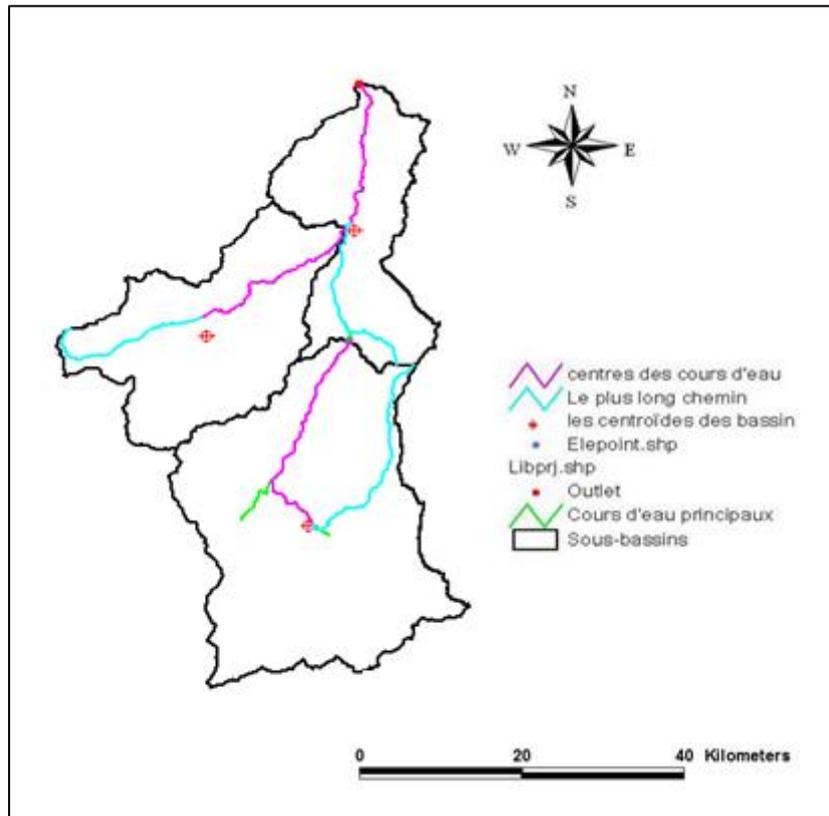


Figure 28 : Caractéristiques des sous-bassins et des cours d'eau de la haute et moyenne Mekerra.

La schématisation du modèle de bassin : Le schéma du modèle de bassin est la représentation du modèle hydrologique du bassin et de ses éléments (biefs, jonctions....). Leurs connectivités sont extraites lors de cette étape (fig.29).

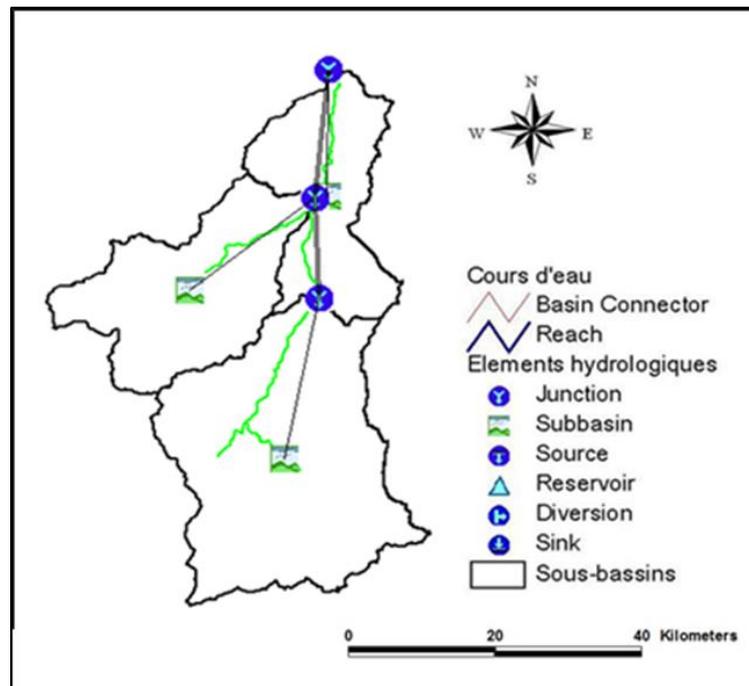


Figure 29: Schématisation du modèle du bassin.

Ajout des coordonnées : à cette étape, on assigne des coordonnées géographiques aux éléments hydrologiques dans les tables des attributs. 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.

Le Fichier carte de fond (fichier.map) : Ce fichier comprend l'information géographique des frontières des sous bassins et les alignements des cours d'eau dans un fichier texte de format ASCII qui peut être lu par HMS.

e. Importation du modèle de bassin dans HEC HMS

Les deux fichiers ainsi créés sont importés dans HEC HMS et servent pour la création du modèle du bassin, le résultat d'importation est illustré dans la figure 30.

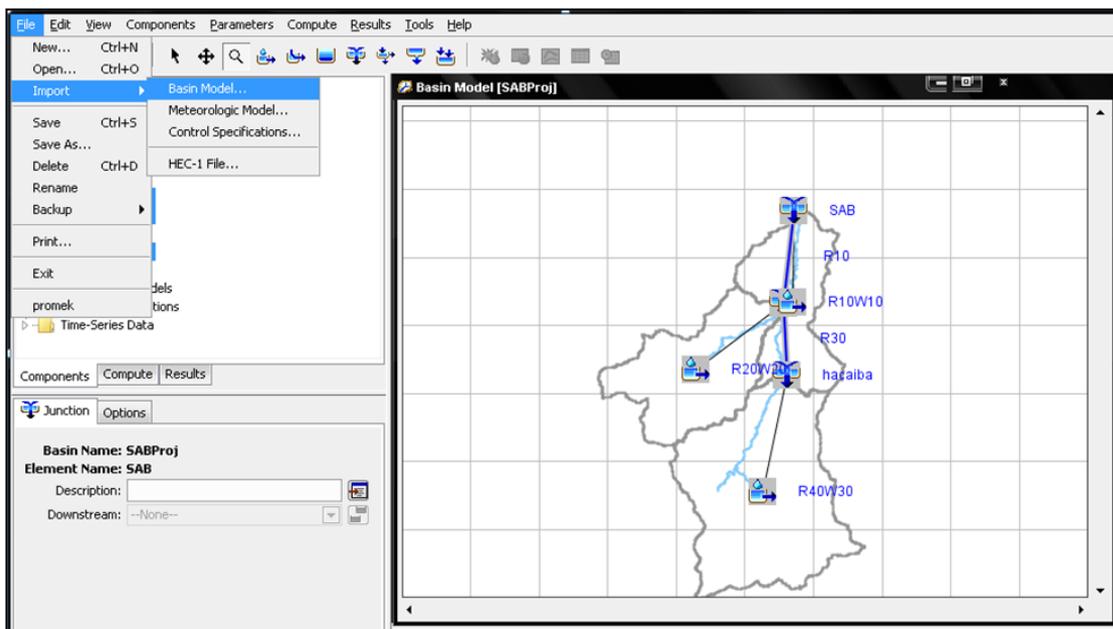


Figure 30: Résultat d'importation des fichiers map et bassin dans le modèle HEC HMS.

Cette étape est considérée comme une étape de transition. Nous allons dans le chapitre suivant passer à la modélisation hydrologique sous HEC HMS proprement dite. Les différents éléments conceptualisant notre modèle hydrologique semi spatialisé se présentent comme suit:

- **Sous bassins** : Le découpage en sous bassins versants s'appuie sur les limites entre les deux (02) principales régions (atlas, hauts plateaux) ;

- **Jonctions** : ils représentent l'addition de deux hydrogrammes et c'est là où s'opèrent les changements de caractéristiques du bief, notamment la pente et la forme. On en retrouve à chaque endroit pertinent pour l'étude ;
- **Biefs** : ils permettent de représenter le décalage des ondes de crues lors de leur propagation vers l'aval. C'est l'élément du modèle qui conceptualise la fonction de cheminement de l'onde cinématique.

III.6 Le cadre de la modélisation

Tout modèle pluie-débit pour la simulation de crues doit répondre à des critères. Le principal critère est la robustesse du modèle, c'est-à-dire sa capacité à représenter des crues qui n'ont pas servi au calage de leurs paramètres. La robustesse d'un modèle renvoie à sa capacité d'extrapolation dans des conditions climatiques non stationnaires, en particulier vers les événements extrêmes. Cette problématique est primordiale dans une optique d'utilisation des modèles pluie-débit en prévision opérationnelle des crues.

Le modèle que nous allons utiliser par la suite est un modèle distribué, parcimonieux et événementiels ; Marchandise (2007) donne un éclaircissement à chacun de ces trois dernier termes:

- **Modèles distribués** : le mode distribué permet de tirer profit de l'information disponible sur l'organisation spatiale des pluies et du relief notamment. L'information fournie par les pluviographes spatialisés et les MNT peuvent forcer le modèle, sans introduction de paramètres supplémentaires.
- **Modèles parcimonieux** : L'introduction de paramètres supplémentaires dans un modèle ne se justifie que dans la mesure où on a des données mesurées pour valider cet ajout. Or dans notre cas, seules les données de débit à l'exutoire de deux sous bassins sont disponibles. En outre, si l'introduction d'un nombre important de paramètres dans un modèle hydrologique permet souvent un meilleur ajustement du modèle, les performances du modèle en validation ne sont pas nécessairement améliorées. Enfin, un nombre de paramètres élevés accentue le risque d'un nombre important de combinaisons de paramètres optimaux.
- **Modèles événementiels** : Dans l'utilisation des modèles pluie-débit, on peut distinguer un mode continu, qui tourne tout au long de l'année, du mode événementiel où le modèle n'est lancé que lorsqu'il se produit un événement

pluvieux. La différence fondamentale entre ces deux catégories de modèles réside dans la représentation plus ou moins complète des différentes composantes du cycle de l'eau. Pour un modèle événementiel appliqué à la simulation des crues éclair, il suffira de représenter la dynamique rapide (génération du ruissellement de surface) et la décrue. Le modèle continu simulera en complément les processus qui s'étalent sur une temporalité plus longue : redistribution de l'eau dans les sols, évapotranspiration...

L'avantage des modèles continus est qu'ils décrivent les variables d'état du système à tout moment, notamment au début des épisodes pluvieux intenses. A l'inverse, le modèle événementiel doit être initialisé en fonction d'indicateurs d'humidité initiale du bassin, qui peuvent être : le débit de base, un indice des pluies antérieures, un indicateur saisonnier ou empirique.

III.7 Description du modèle utilisé

Le modèle utilisé est physico-conceptuel (dans le sens où il se base sur les équations de la physique et sur la notion de capacité d'absorption des sols dans sa fonction de production) et semi spatialisé car il permet le découpage du bassin en un certain nombre d'éléments (tronçons et sous-bassins). Ce modèle utilise la fonction de production du SCS et une fonction de transfert basée sur le modèle de l'onde cinématique.

Un bassin versant est représenté par un réseau ramifié de biefs de cours d'eau supposés uniformes et de sections rectangulaires, auxquels sont raccordés deux versants de forme rectangulaire.

Nous avons volontairement omis d'intégrer la plaine de Sidi Bel Abbès et nos investigations se sont portées seulement sur la partie amont du bassin versant de la Mekerra (les deux régions hauts plateaux et atlas). La station hydrométrique de Sidi Ali Benyoub a été considérée comme exutoire de ces deux faciès. Cette station est réputée être la mieux jaugée, rajouté à cela, son positionnement lui confère un emplacement très intéressant pour l'étude des crues qui déferlent sur la plaine.

III.7.1 Méthode de production du SCS

La méthode emploie le nombre de courbe de SCS pour déterminer la hauteur de la pluie qui s'infiltré dans le sol. La quantité restante demeure sur la surface du secteur définis. Le nombre de courbe de SCS décrit le potentiel d'une surface à produire du

ruissellement en fonction du type de sol et de son occupation. Le nombre de courbe CN (Curve Number) s'étend entre $0 < CN < 100$, avec 0 comme limite inférieure théorique décrivant une surface qui absorbe toute la précipitation, et 100 la limite supérieure décrivant une surface imperméable où toute la précipitation devient écoulement. La méthode calcule la précipitation excessive (Pe) produite pour une hauteur par accroissement de la pluie tombant sur un secteur en utilisant l'équation suivante:

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

Où, P : est la hauteur par accroissement de la pluie, et S représente la quantité maximum potentielle de l'eau maintenue par le sol ;

$0.2S$: représente les pertes initiales ou la pluie d'imbibition. Il est ressorti de l'étude expérimentale de nombreux bassins versants aux Etats-Unis que la hauteur de pluie d'imbibition peut être considérée comme une fonction linéaire de la capacité d'absorption du sol S .

La valeur S est liée au CN par la formule suivante :

$$S = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) * 25,4$$

L'équation est appliquée seulement pour la condition de $P \geq 0,2S$, autrement toute la précipitation est considérée perdue par infiltration.

En tant que produit final, la méthode de SCS fournit la profondeur de la précipitation excessive résultant d'une hauteur de pluie donnée tombant au-dessus d'un secteur pendant un intervalle de temps spécifique. Le volume de la précipitation ou de l'écoulement excessif est simplement le produit de la profondeur d'écoulement et du secteur.

Une fois correctement calculées, ces valeurs par accroissement d'écoulement peuvent être combinées à l'exutoire pour produire un hydrogramme direct d'écoulement pour le bassin versant tout entier.

Le modèle SCS est réputé être souple, susceptible de s'adapter à tout type de bassin hydrologique sans préjuger de la nature des processus de formation de crues (Gaume, 2003 ; Marchandise, 2003 et 2007; Lequien, 2003 ; Estupina, 2004).

III.7.2 Le 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 (de continuité et de quantité du mouvement) qui régissent les écoulements instationnaires en eau peu profonde pour tracer l'hydrogramme de ruissellement.

Le bassin versant est découpé en deux plans séparés par le cours d'eau dans lequel les écoulements se déversent. Le modèle de l'onde cinématique représente les écoulements de surface sur ces plans (fig.31).

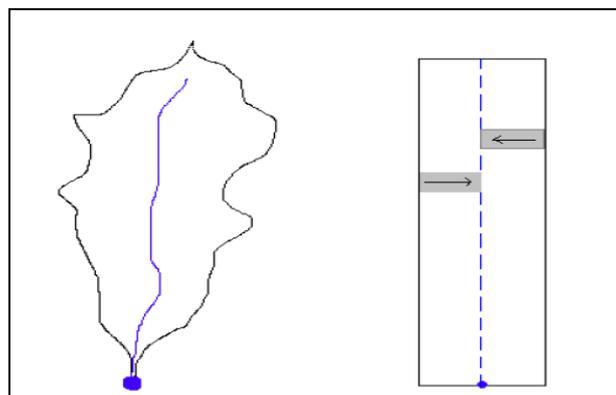


Figure 31: Schématisation d'un modèle de bassin pour la fonction de l'onde cinématique.

Dans un système avec une dimension, l'équation de quantité de mouvement dans le cas d'un écoulement peu profond (la pente inférieure et le gradient d'énergie sont approximativement égaux) et les effets d'accélération sont négligeables, l'équation de quantité de mouvement se simplifie :

$$j = i$$

Où j : gradient d'énergie; i : pente inférieure ;

Le gradient d'énergie peut être estimé avec l'équation de Manning qui peut être écrite comme :

$$Q = \frac{CR^{2/3}j^{1/2}}{N}A$$

Où, Q : écoulement, R : rayon hydraulique, A : section, et N : un facteur de résistance qui dépend de la couverture des plans.

La deuxième équation critique est la représentation unidimensionnelle de la continuité l'équation :

$$A \frac{\partial V}{\partial x} + VB \frac{\partial y}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} = q$$

Où B : largeur extérieure de l'eau ; q : apport latéral par unité de longueur de canal.

L'apport latéral représente l'excès de précipitation calculé comme différence entre les précipitations et l'eau infiltrée.

Avec la simplification appropriée pour l'écoulement peu profond au-dessus d'un plan, l'équation de continuité est réduite à :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

En combinant les équations, l'équation suivante est obtenue :

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \alpha^{m-1} \frac{\partial A_T}{\partial x} = q$$

$$\alpha = 1,486 \frac{S^{0.5}}{N} \quad m=5/3N$$

A : section transversale ; S : la pente ; N : coefficient de rugosité ; q : débit d'apport latérale par unité de longueur.

Où : α et m dépendent de la forme du canal, leurs valeurs sont calculées à partir d'équations données en fonction de la forme du canal (voir manuel de référence technique du HEC HMS, 2000).

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 divers 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 3:

Tableau 3 : divers éléments à connaître pour les sous bassins utilisant le modèle de l'onde cinématique sous HEC HMS.

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	Forme de la section	Forme de la section
Aire représentée par le plan	Dimensions représentatives de la section	Dimensions représentatives de la section
Paramètres de pertes	Coefficient de Manning	Coefficient de Manning

Pour le modèle de l'écoulement fluviale, le modèle de l'onde cinématique a été utilisé du fait de son adéquation avec les fortes pentes. Les mêmes simplifications sur les équations de quantité de mouvement et de continuité décrites auparavant sont faites dans le cas du modèle de l'onde cinématique conceptualisant l'écoulement dans un canal. 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'après les travaux de Daluz-Vieira (1983) ou de Bocquillon (1978) cité par Gaume (2003), l'approximation de l'onde cinématique est très souvent pertinente pour la simulation des écoulements en cours d'eau.

Chapitre IV

MODÉLISATION DISTRIBUÉE DE LA HAUTE ET MOYENNE MEKERRA SOUS HEC HMS

CHAPITRE IV : MODELISATION DISTRIBUEE DE LA HAUTE ET MOYENNE MEKERRA SOUS HEC HMS

IV.1 Introduction

La modélisation déterministe peut être un bon moyen de prévision en temps réel des crues. Cela a déjà fait l'objet de plusieurs études sur les bassins méditerranéens. Nous pouvons citer à titre d'exemple les travaux d'Estupina (2004) et de Marchandise (2007). Même que plusieurs modèles sont adoptés et actuellement opérationnels.

Nous savons que le bassin versant de la Mekerra pourrait être sous l'influence d'un système karstique lors d'évènements extrêmes. Si c'est le cas, il a été démontré par plusieurs auteurs tel que Bailly-Comte (2008) que ce genre de système présentait des comportements non linéaire et non stationnaire. Ceci est impliqué par le fait que les écoulements de karst ne résultent pas simplement de la convolution d'une fonction dépendante de transfert de temps et d'une série chronologique de précipitations, mais ces écoulements sont aussi sous l'influence des eaux souterraines. Dans ce chapitre, nous allons faire abstraction de l'existence du milieu karstique. On adoptera une modélisation classique pluie-débit de surface ; ceci dans un but d'étudier si vraiment la genèse des crues extrêmes sur le haute et moyenne Mekerra est d'origine pluviale ou, comme suspecter, d'origine karstique. Un argument de plus pourrait être avancé que les crues dévastatrices que connaît l'oued Mekerra sont une combinaison de phénomènes hydrologiques et hydrogéologiques.

Le modèle hydrologique choisi prend en charge les processus physiques de la rétention en eau du sol et du ruissellement superficiel tant sur les versants que dans les cours d'eau. La figure 32 donne le schéma adopté pour une modélisation conceptuel semi distribué du bassin de la Mekerra.

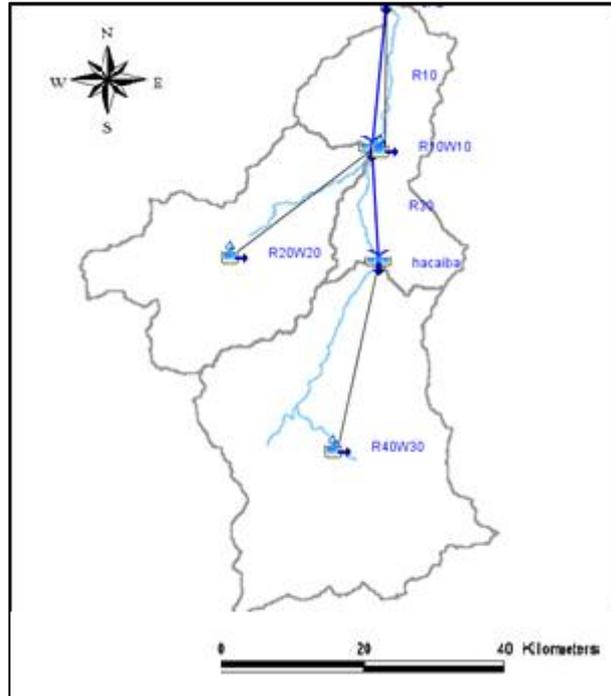


Figure 32 : Schéma général du modèle hydrologique (modélisation opérationnelle)

IV.2 Sélection des évènements extrêmes pour la modélisation pluie-débit

A partir des fichiers hydrométriques horaires de 1963 et jusqu'à 2007, nous n'avons sélectionné que les évènements qui présentaient un pic de crue important. Pour cela, nous avons choisi un seuil d'au moins $150 \text{ m}^3/\text{s}$ enregistré à la station de Sidi Ali Benyoub. La base de données comprend 40 évènements pluvieux survenant tout au long de l'année (fig.33). On trouve en majorité des évènements d'automne (18 évènements) qui donnent les crues les plus importantes ; sept (07) crues d'hiver et de printemps ; enfin, quinze (15) crues correspondent à des averses orageuses d'été.

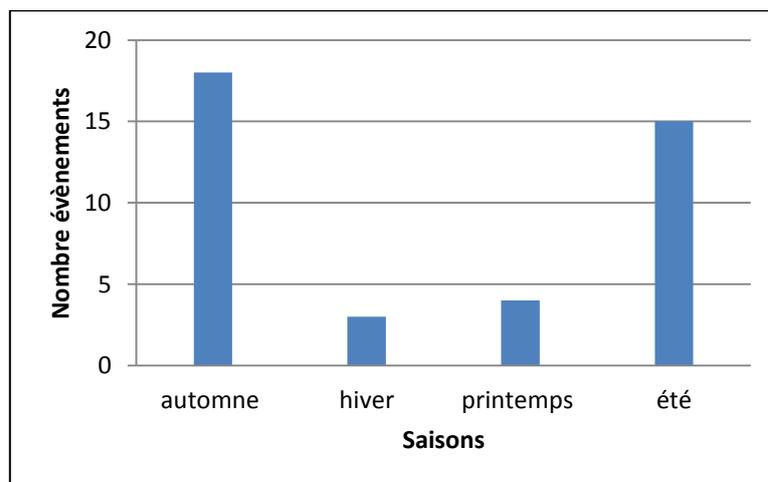


Figure 33 : saisonnalité de la base de données.

En terme de débit de pointe de crue, la majorité des événements (18 sur 40) se situe dans la gamme de débits $[150 \text{ m}^3/\text{s}, 250 \text{ m}^3/\text{s}]$, mais on dispose également d'un nombre important de crues de forte intensité dépassant les $600 \text{ m}^3/\text{s}$ en débit de pointe (fig.34).

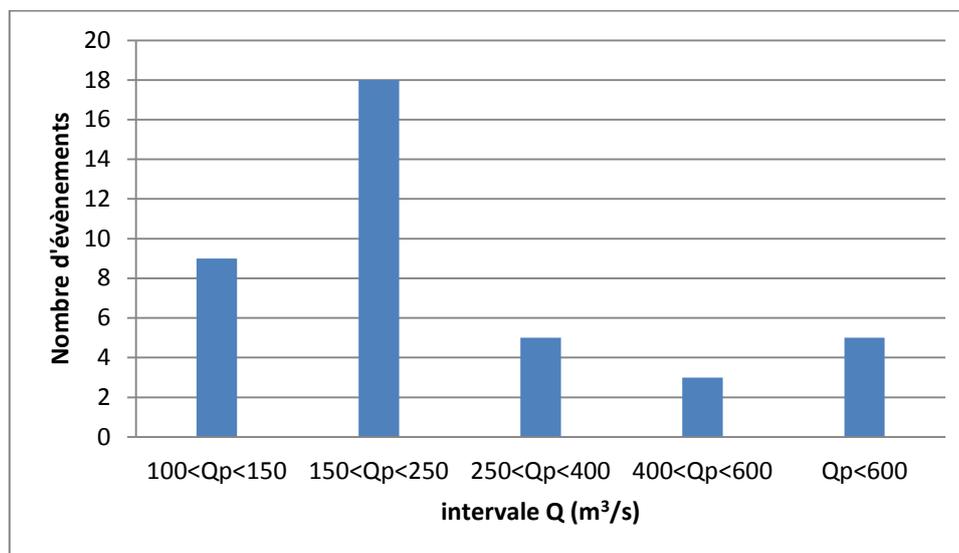


Figure 34 : évènements classés suivant l'intensité du débit de pointe.

Un des grands handicaps de cette étude est malheureusement l'insuffisance des données pluviographiques. En effet, ce type de données n'est pas aussi disponible que celui de l'hydrométrie. La confrontation entre ces deux types de données est essentielle pour la modélisation. Malheureusement, cette dernière n'a été faisable que pour un nombre réduit d'évènements extrêmes. Pour cette raison, les 40 événements enregistrés n'ont pas servi systématiquement à toutes les simulations. Les évènements utilisés sont détaillés dans ce qui suit.

IV.2.1 Sélection des évènements

Les mesures nécessaires à la compréhension des évènements extrêmes présentent dans la plupart des cas des lacunes dues à des dysfonctionnements dans l'enregistrement de la mesure. L'autre lacune constatée, concerne la pertinence du nombre et de l'emplacement des pluviographes. Ces appareils sont au nombre de quatre (04) (fig.35) ; ce qui empêche toute manœuvre dans le cas où nous voudrions négliger l'une des stations, tout en ayant une représentativité spatiale acceptable de la mesure.

La sélection s'est faite en choisissant des enregistrements pluviographiques sans lacunes pour les quatre stations durant tout l'évènement, où nous avons obtenu que trois (03) évènements sur les quarante (40) initiaux. Ce nombre est sans doute intéressant mais

reste, hélas, insuffisant pour la construction d'un modèle qu'on pourrait juger comme robuste.

L'influence spatiale de chaque pluviographe sur les sous bassins a été pondérée selon la méthode des polygones de Thiessen (influence du pluviographe selon des considérations surfaciques).

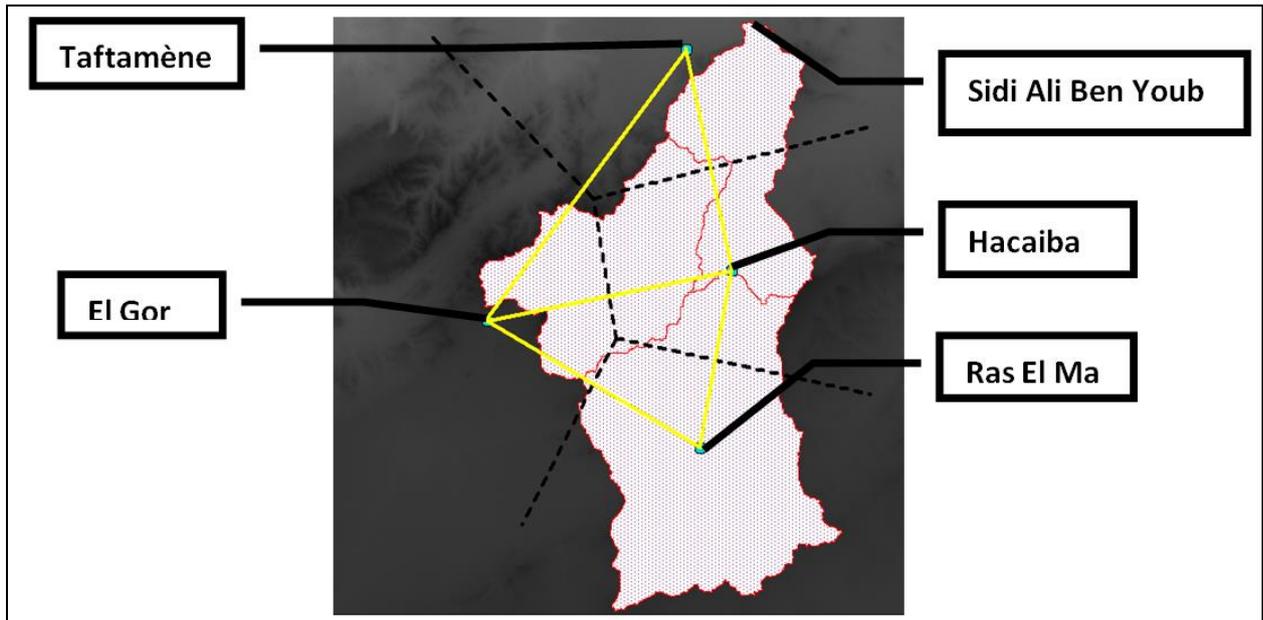


Figure 35 : Aires affectées à chaque pluviographe selon la méthode des polygones de Thiessen.

Les raisons de l'indisponibilité des mesures peuvent être résumées dans ce qui suit:

- On peut citer en premier lieu la défaillance des appareils de mesures pendant les évènements extrêmes où ils sont fortement sollicités ;
- Passivité des agents récolteurs des bandes d'enregistrement et ainsi le non remplacement de ces bandes pendant les journées critiques. Cette situation nous l'avons noté pour la station de Ras El Ma;
- Il faut surtout dire que le nombre insuffisant des pluviographes dans la région ne permet pas de faire beaucoup d'accommodement.

Les évènements sélectionnés sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4 : caractéristiques des évènements de crue.

N° évènement	Date de la crue	Temps de montée (heure)	pic de crue (m ³ /s)
1	24 aout 2002	5	641,2
2	26 mai 2006	2	396,5
3	19 avril 2007	6	920

IV.2.2 Classification selon l'état d'humidité initiale du sol

Comme nous l'avons expliqué au chapitre précédent, le paramètre CN du modèle SCS varie selon les états d'humidité du sol initiaux. Marchandise (2007) a démontré en utilisant quatorze (14) évènements [sept (07) pour le calage et sept (07) autres pour la validation] que le paramètre « S » conceptualisant le stock en eau du sol dans le modèle SCS (calculé en fonction de CN dans notre cas), changeait considérablement en fonction de la saison pour le bassin versant du Gardon d'Anduze (Sud de la France). Cette variation est fonction de la variation de l'humidité qui précède l'évènement étudié (ruissèlement rapidement produit pour un sol initialement saturé). Cependant, il est difficile de mesurer cette humidité à tout moment et en tout point du bassin versant. Ainsi, pour se rapprocher de cette valeur, nous avons choisi l'indice de précipitations antérieures « IPA ».

Indice de Précipitations antérieures (IPA)

Cet indice a été développé par Kohler et Linsey (1951). Il vise à suivre le comportement global de l'humidité du bassin versant, étant donné qu'il est impossible de suivre son évolution à chaque point et à chaque instant.

L'IPA journalier s'exprime dans sa version la plus simple, comme une combinaison linéaire des pluies tombées les jours précédents :

$$IPA = \sum_{i=1}^{\infty} a_i P_i$$

Avec a_i : une suite de coefficients décroissants inférieurs à 1 ; P_i : la pluie tombée i jour avant la date de calcul de l'indice.

Les suites a_i , couramment utilisées, sont des fonctions inverses ou exponentielles. Pour ces dernières, les plus utilisées, l'indice prend la forme suivante :

$$IPA = \sum_{i=1}^{\infty} k^i P_i$$

k étant un paramètre à déterminer. L'indice est généralement initialisé à 0 en fin de saison sèche.

Dans notre étude, nous avons gardé la formulation avec décroissance exponentielle quotidienne de la valeur de l'indice. Le coefficient de récession k a été choisi égal à 0.95.

Pour chaque épisode, il a été retenu une moyenne des stations disponibles influençant le bassin versant.

IV.3 Présentation des évènements

Evènement 1 : crue du 23 aout 2002

Pour cet évènement, nous disposons des relevés de quatre pluviographes : Ras El Ma au Sud, El Gor au Centre Ouest, Hacaiba au Centre Est et Taftamene au Nord (fig.36).

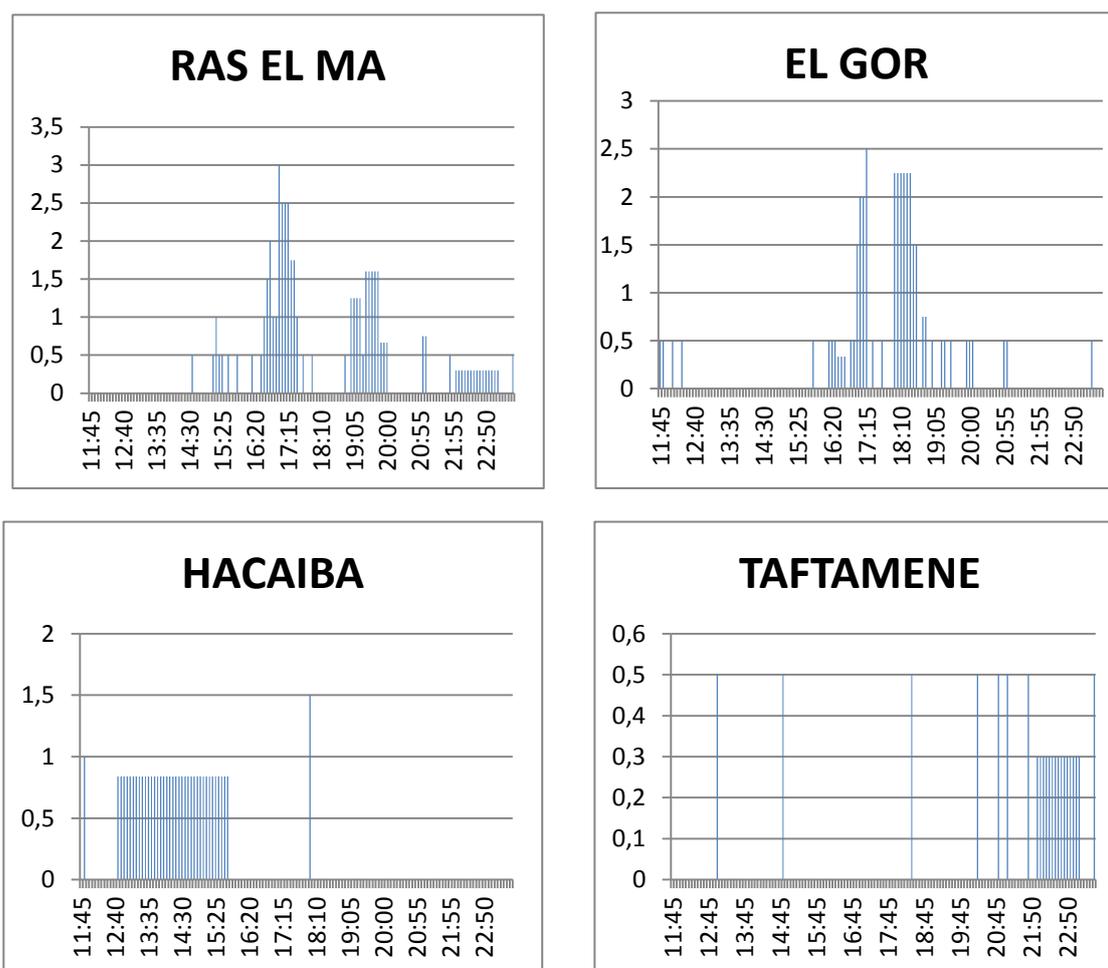


Figure 36 : les enregistrements des quatre pluviographes sur le bassin de la Mekerra lors du 23 aout 2002.

On a enregistré les plus fortes intensités pluvieuses du bassin à la station de Ras El Ma (49 mm) contre, seulement, 21,5 mm à celle de Hacaiba, 12,5 mm à Taftamene et 23 mm à El Gor.

Les hydrogrammes de crue réels pour les deux stations de mesures de Hacaiba et de Sidi Ali Benyoub sont disponibles. Le calage a été effectué sur les débits observés à Sidi Ali Benyoub. Pour optimiser le calage, nous avons utilisé la fonction objective qui

adapte le temps de monter et la crête de l'hydrogramme simulé à celui de l'hydrogramme observé. Les deux hydrogrammes sont illustrés sur la figure 37.

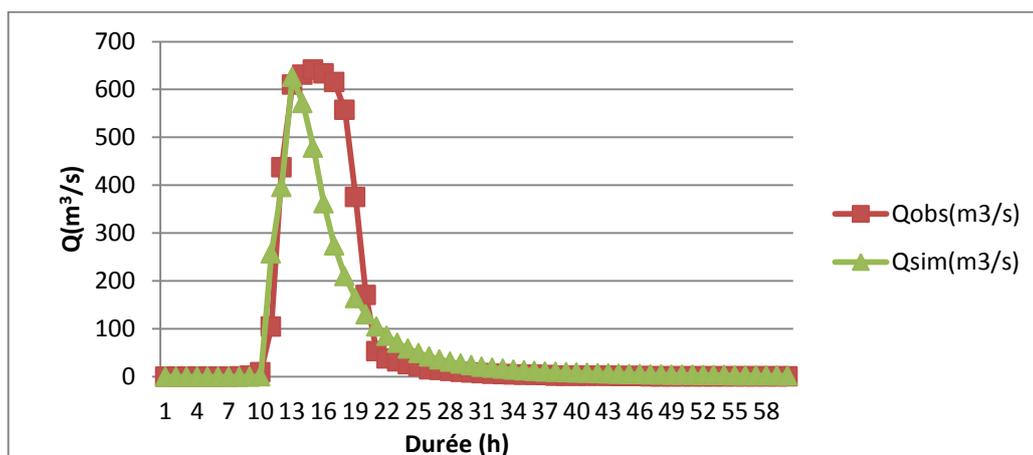


Figure 37 : hydrogrammes observé et simulé du 24 août 2002 à la station de Sidi Ali Benyoub.

Nous obtenons pour ce calage un bon ajustement du temps de montée et du pic de crue. Seulement, le volume d'eau produit et représenté par l'intégrale de la courbe de l'hydrogramme simulé, reste inférieur au volume produit réellement. Les paramètres de calage obtenus sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau 5: paramètres calés sur l'hydrogramme du 24 août 2002 à la station Sidi Ali Benyoub.

sous bassin	R40W30	R20W20	R10W10	IPA (mm)	extension	Coef Manning
CN	83,31	79,84	72,73	0	R30	0,04
Coef Manning	0,0889	0,0417	0,587		R10	0,02

A partir de ce tableau, nous pouvons faire les commentaires suivants:

- Des grandes valeurs de CN sont produites pour l'ensemble des sous bassins. C'est le sous bassin R40W30 qui prend la plus haute valeur (grande partie des précipitations qui ruisselle) ;
- L'hydrogramme simulé à Hacaiba est largement surestimé ;
- Malgré des CN élevés, il est à constater que le volume observé produit est plus de deux fois supérieure que celui simulé. Pour avoir des volumes similaires pour les hydrogrammes, il aurait fallu les CN suivant : R10W10 :95,6, R20W20 :98, R40W30 :89 (équivalent à une surface presque complètement imperméable). Ce qui est invraisemblable vu que ces valeurs auraient donné un pic de crue de presque 2000m³/s.

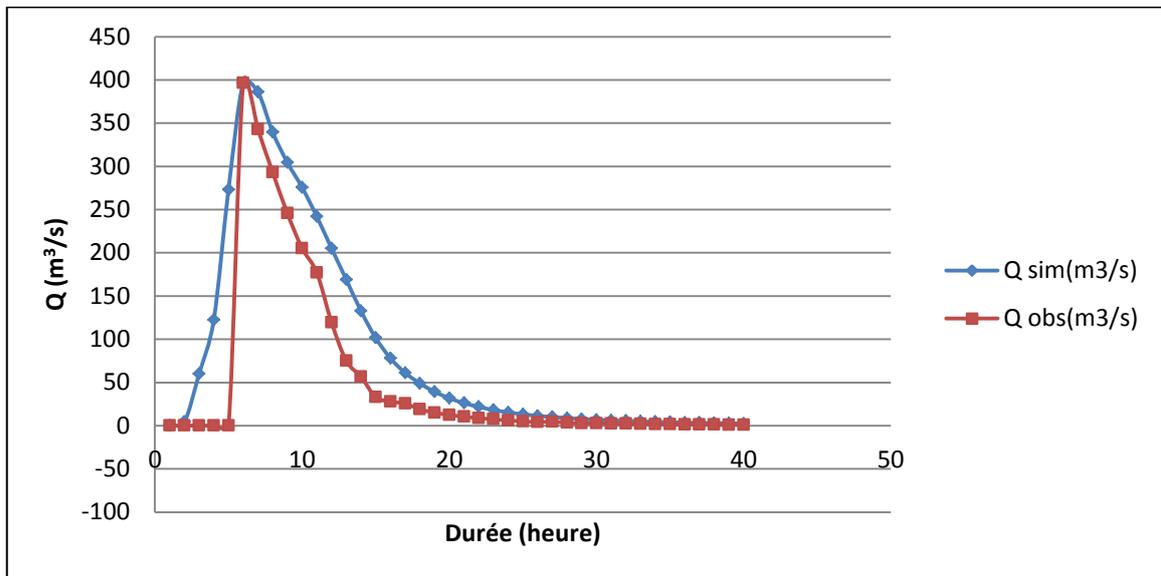


Figure 39: Hydrogrammes observé et simulé du 26 mai 2006 à la station Sidi Ali Benyoub.

Le tableau 6 représente les paramètres de modèle calés suivant l'hydrogramme observé au 26 mai 2006.

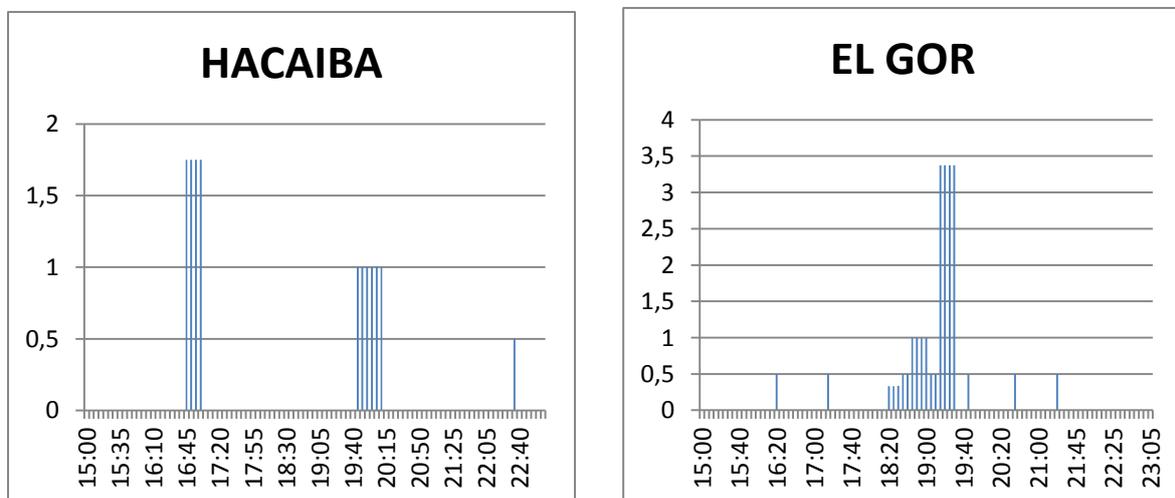
Tableau 6 : paramètres calés sur l'hydrogramme du 26 mai 2006 à la station Sidi Ali Benyoub.

sous bassin	R40W30	R20W20	R10W10	IPA (mm)	extension	Coef Manning
CN	-	85.551	92.398	15	R30	0,04
Coef Manning	-	0,0417	0,0889		R10	0,02

Le commentaire le plus important, qu'on pourrait émettre, est l'augmentation sensible des valeurs de CN dans les sous bassins R20W20 et R10W10 par rapport à l'évènement précédent.

Evènement 3 : crue du 19 avril 2007

Pour cet évènement nous disposons des quatre pluviographes réunis (fig.40) :



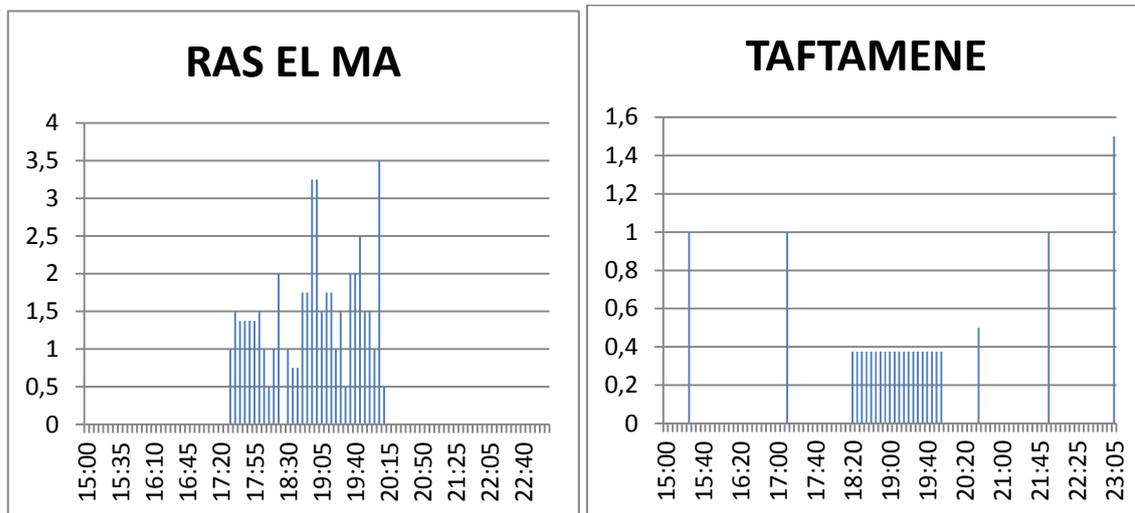


Figure 40: Les enregistrements des quatre pluviographes sur le bassin de la Mekerra au 18 avril 2007.

Pour cet évènement aussi, c'est au niveau du pluviographe de Ras El Ma que l'intensité pluviométrique est la plus importante.

L'hydrogramme simulé a été obtenu en calant les paramètres sur le pic et la phase de montée de l'hydrogramme observé. La figure 41 représente les résultats de calages sur l'hydrogramme observé.

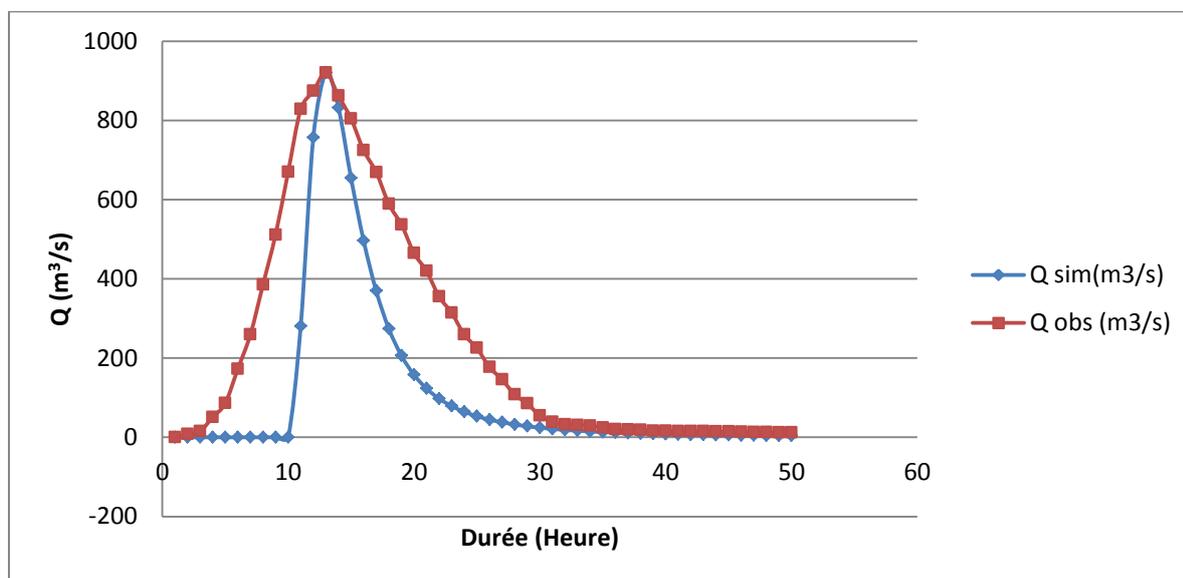


Figure 41: hydrogrammes observé et simulé du 19 avril 2007 à la station de Sidi Ali Benyoub.

Le tableau 7 représente les paramètres de modèle calés suivant l'hydrogramme observé le 19 avril 2007.

Tableau 7 : paramètres calés sur l'hydrogramme du 16 avril 2007 à la station Sidi Ali Benyoub.

sous bassin	R40W30	R20W20	R10W10	IPA (mm)	extension	Coef Manning
CN	72,569	80,751	86,8	30	R30	0,04
Coef Manning	0,0889	0,0417	0,587		R10	0,02

IV.4 Discussions des résultats

➤ Evènement 1

Le calage effectué sur les observations à la station Sidi Ali Benyoub donne des CN de l'ordre de 80 pour les trois sous bassins (calage suivant le temps de montée et le pic de crue). Cette valeur est déjà en soit importante vu l'état d'humidité initiale du sol avec un IPA nul ; cependant si ça ne tenait qu'à cela nous pouvons expliquer ce résultats par le phénomène OPS (voir II.3.2.1). Seulement il y a d'autres résultats qui nous interpellent, ces résultats sont :

- L'importance du volume simulé par rapport à celui observé au 23 aout 2003, en effet ce dernier représente plus du double. A titre d'exemple, pour avoir le même volume il aurait fallu des CN de l'ordre de 95 ce qui aurait engendré un pic de crue de plus de $2000\text{m}^3/\text{s}$ ce qui est complètement invraisemblable.
- Toujours au 23 aout 2003 le calage à la station Sidi Ali Benyoub donne pour le sous bassin R30W40 un CN de 83,31 ce qui engendre un débit surestimé par rapport à celui observé à la station Hacaiba à la même date.

➤ Evènement 3

De même que pour l'évènement du 23 aout 2002, nous obtenons pour celui-ci un bon calage sur le temps de montée et le pic de crue à la station Sidi Ali Benyoub, seulement le volume sur l'hydrogramme observé dépasse celui simulé du double. Un CN de l'ordre de 90 aurait permis l'écoulement d'un volume simulé semblable au volume observé, mais là aussi, le pic simulé aurait été de $1700\text{m}^3/\text{s}$, ce qui est de la même manière invraisemblable.

➤ Evènement 2

Pour l'évènement du 26 mai 2006, la comparaison entre les hydrogrammes observé et simulé révèle exactement le contraire des deux évènements précédents ; en effet, le calage à la station Sidi Ali Benyoub a donné des CN de l'ordre de 90, mais pour cette fois ci le volume est de moitié inférieur pour l'hydrogramme observé.

IV.5 Synthèse des résultats

La conception d'un modèle hydrologique de prévision en temps réel des crues extrêmes sur le bassin de l'oued Mekerra n'a pas abouti. Les raisons principales à cela sont d'ordre multiple :

1. La première est sans doute le manque de mesures, notamment, pluviographiques essentielles à ce genre de travaux. Les seuls évènements, plus ou moins assez documentés, ont donné des résultats complètement disproportionnés.
2. Les résultats disproportionnés de la modélisation des évènements étudiés peuvent aussi être dus à des levés hydrométriques erronés ; cela peut être une éventualité. En effet, à l'image des malversations constatées pour les relevés pluviographiques, il est possible que les mesures de débits, dans les stations de Hacaiba et de Sidi Ali Benyoub, présentent eux aussi des lacunes.
3. La présence du milieu fissuré sur les deux zones (Atlas-hauts plateaux) et les résultats obtenus laissent supposer une influence du milieu karstique sur les écoulements en surface et donc sur les crues éclair. Cette influence a été observé sur ce type de milieu par plusieurs auteurs (Bailly-Comte et *al.*, 2008; Bailly-Comte et *al.*, 2008b; Dreiss, 1983; Larocque et *al.*, 1998; Mangin, 1984; Massei et *al.*, 2006; Padilla and Pulido-Bosch, 1995; Rahnamaei et *al.*, 2005), tous cité par Bailly Comte (2008), ils mentionnent: *Ces milieux particuliers sont encore mal connus et peuvent avoir un grand rôle à jouer en terme de genèse, d'amortissement ou d'amplification de la crue.*

Bailly Comte (2008), en faisant un suivi expérimental sur le bassin versant du *Coulazou* (Sud de la France) et notamment en faisant des mesures de pression/conductivité/température dans les drains karstiques à proximité de la rivière a permis de bien décrire le comportement du karst vis à vis de la rivière. Il cite : *L'hétérogénéité spatiale des milieux karstiques permet lors d'une crue d'envisager une zone saturée perchée capable d'interagir fortement avec les écoulements de surface.* De plus, les observations réalisées sur le bassin versant du *Coulazou* montrent que l'hétérogénéité verticale de ces milieux se traduit lors d'une crue par l'activation d'un système de drainage superficiel qui modifie fortement l'organisation des écoulements (difffluence) à l'échelle locale et intermédiaire : il devient, alors, possible de définir

différents systèmes karst/rivière lors d'une crue selon l'échelle d'écoulement considérée. Ainsi, l'étude du fonctionnement hydrodynamique d'un exutoire karstique alimenté par des pertes de rivière a permis de mettre en évidence le rôle des volumes peu perméables et des drains karstiques ainsi que leurs interactions sur la période de récession de l'hydrogramme à l'exutoire. En d'autres termes et d'une façon plus simplifiée, ces systèmes auraient le même rôle à jouer qu'un amplificateur électrique : il emmagasine de l'énergie et il la libère suivant différentes conditions d'entrées et de sorties du système.

A l'exemple des régions françaises et beaucoup d'autres régions en Europe (Vaison-la-Romaine, Nîmes, Gardons, Montpellier...) où l'influence du milieu karstique sur les crues éclair est avérée (A Siou, 2011), il est plus que probable que les crues issues de la haute et moyenne Mekerra soient sous l'influence de ce genre de milieu. La figure 42 représente les affleurements karstiques sur le bassin méditerranéen. Les écoulements de surface sur beaucoup de régions du nord algérien peuvent être influencés par ce genre de milieu.

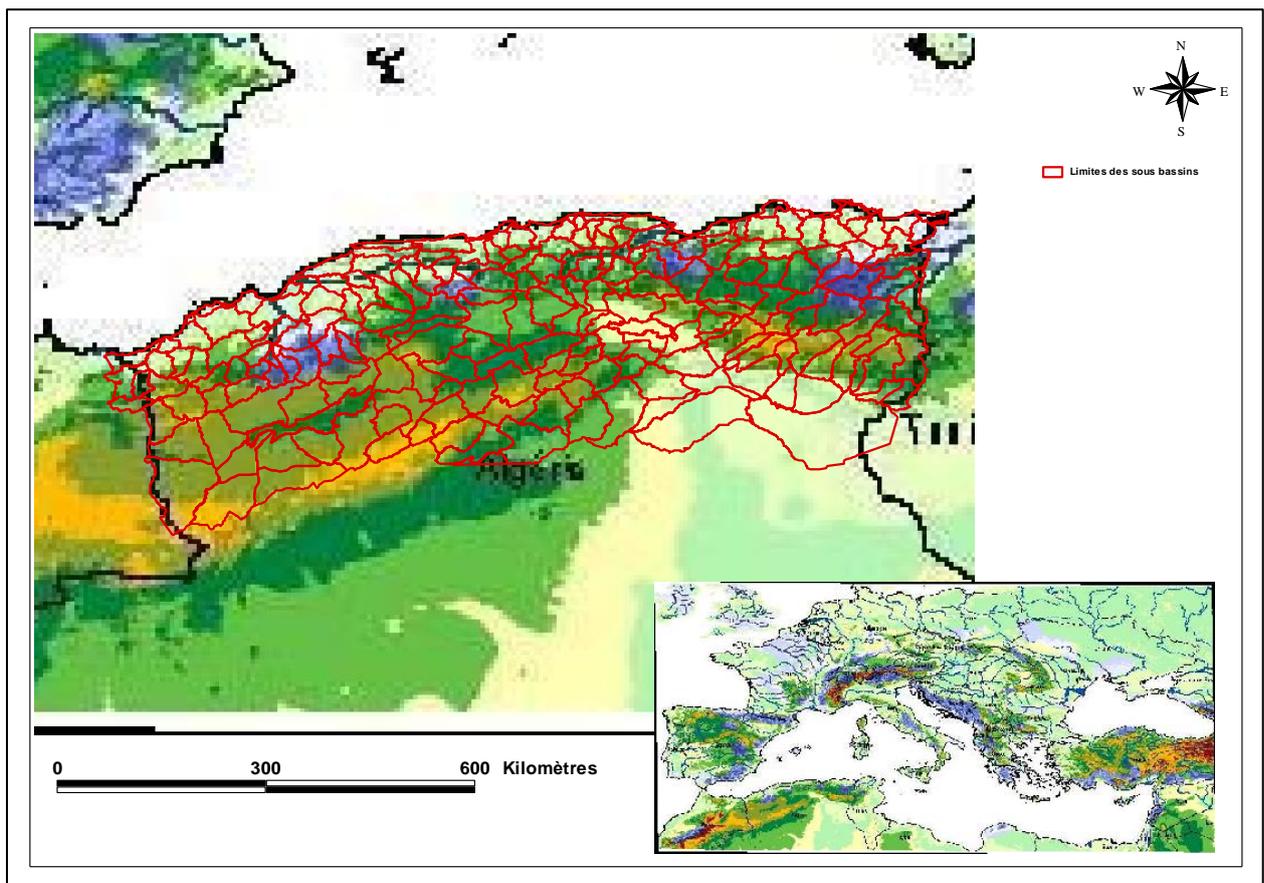


Figure 42: Carte des affleurements des ensembles karstiques (en bleu) autour de la Méditerranée (source : Bakalowicz et Dörfliger, 2005).

Il est cependant trop tôt dans notre cas de parler de crues éclair issues de karst. Ainsi, le seul moyen d'en être sûr est de s'en assurer sur le terrain pour voir qu'elle serait la relation « oued/ milieu souterrain » en premier lieu et définir, par la suite, leur rôle respectif sur la genèse des crues extrêmes sur le bassin de la Mekerra.

Partie 2

**Modélisation déterministe pour l'étude
de l'impact des aménagements
hydrotechniques de protection et la
cartographie de la zone inondable**

Chapitre V

FORMULATION POUR LA CONCEPTION DU HYÉTOGRAMME ET DE L'HYDROGRAMME DE PROJET

CHAPITRE V : FORMULATION POUR LA CONCEPTION DU HYETOGRAMME ET DE L'HYDROGRAMME DE PROJET

V.1 Introduction

Cette deuxième partie du travail présenté dans ce document traite le point de vue «prévention - aménagement du territoire». Sur cette partie, nous présentons une méthodologie de travail appliquée à l'oued Mekerra qui pourrait dans certain cas être appliquée à d'autres oueds en Algérie. Le but essentiel recherché, est bien entendu, l'identification des zones inondables. Alors que les approches utilisées classiquement font appel à une modélisation hydraulique simple, dans notre cas, et pour le cas d'un ensemble des bassins versants Algériens, les mesures de terrain nécessaires se trouvent parfois insuffisantes, de mauvaises qualité ou tout simplement inexistantes. La méthode que nous proposons est une combinaison entre une modélisation hydrologique et une autre hydraulique. La première modélisation fait appel dans certains cas à des méthodes empiriques pour l'élaboration d'un hydrogramme de crue de projet qui sera la base pour l'étude de l'efficacité des aménagements de protection de la ville de Sidi Bel Abbès. Aussi cette crue représente l'une des entrées du modèle hydraulique pour l'identification des zones à risque d'inondation.

Les conclusions faites sur la première partie de ce travail, nous ont mené à restreindre nos investigations à la partie plaine de notre bassin. Il est d'abord à signaler que le milieu géologique de la plaine de la Mekerra n'est pas celui de la haute et la moyenne Mekerra. En effet, la plaine renferme une nappe libre contenue dans un remblai alluviales et donc pas de risque d'effet piston comme pour les karsts. Autrement dit, la modélisation des crues sur la plaine est une modélisation hydrologique et non pas hydrogéologique.

La modélisation hydrologique nous l'avons réalisé entre les deux stations de Sidi Ali Benyoub (Station située à l'embouchure de la plaine) et la station de Sidi Bel Abbès. La modélisation hydraulique, quant à elle, s'est faite entre la localité de Sidi Khaled et la sortie de la ville de Sidi Bel Abbès. La combinaison des deux types de modélisation hydrologique et hydraulique a été pour nous une solution d'inclure les débits engendrés par l'oued Mouezen, l'un des affluent de l'oued Mekerra et dont l'exutoire se situe justement au même endroit où nous avons entamé la modélisation hydraulique. Le sous

bassin de l'oued Mouezen engendre des volumes d'eau considérables mais dont les mesures hydrométriques restent peu documentées. Les résultats obtenus ont été validés à posteriori sur la base d'une étude préexistante et à travers des investigations sur le terrain.

La prévention en matière de lutte contre les inondations requiert la connaissance précise de deux éléments : la vulnérabilité qui exprime la sensibilité de la parcelle en bordure du cours d'eau aux inondations, et l'aléa hydrologique qui décrit en termes de probabilité l'occurrence moyenne du phénomène naturel du débordement du cours d'eau (Gilard et Gendreau, 1998). Le croisement de ces deux composantes définit la méthode bien connue sous le nom de « la méthode inondabilité ».

Nous n'allons-nous intéresser qu'à l'aspect aléa qui est du ressort de l'analyse hydraulique, la vulnérabilité étant du ressort socio-économique (nous allons considérer que toutes les parcelles se trouvant dans la zone inondable sont vulnérables). Les méthodes actuelles de cartographie des zones inondables sont conçues pour fixer des objectifs de protection contre des aléas de probabilités données (10,20,...100).

V.2 Définition de l'aléa

Gilard et Gendreau (1998) définissent l'aléa comme lié uniquement au phénomène physique considéré, la crue, et fait l'objet de l'essentiel des travaux en hydrologie et hydraulique appliqués à la gestion des risques d'inondation. Il dépend du comportement hydrologique du bassin versant et du fonctionnement hydraulique du réseau hydrographique. Il peut être quantifié sur une parcelle (avec une précision plus ou moins bonne) grâce aux variables hydrologiques qui sont la profondeur d'eau et la durée d'inondation associées à une période de retour. Cette dimension probabiliste de l'aléa traduit la notion de fréquence ou de période de retour.

V.3 Analyse critique des pratiques techniques conventionnelles

Dans le milieu opérationnel, l'étude de l'aléa s'appuie classiquement sur une analyse fréquentielle des crues observées. On prend ainsi du recul par rapport aux événements passés pour dégager une synthèse statistique du fonctionnement du cours d'eau accessible et exploitable directement par les acteurs de l'eau.

Cette étude est bien souvent réduite à l'ajustement d'une distribution statistique d'un échantillon de débit de pointe, et de ce fait, la connaissance apportée reste partielle. Les crues se définissant en effet par leurs pointes mais aussi par leurs volumes.

Deux cours d'eau par exemple peuvent avoir les mêmes ajustements des débits de pointes et pourtant les volumes qui y sont écoulés peuvent être très différents. Sauquet (2003) présente une comparaison de deux bassins qui sont un exemple type de ce qu'on vient d'avancer : Le Volp un sous bassin de la Garonne ($S = 91 \text{ km}^2$) et la Seille un affluent de la Moselle ($S = 925 \text{ km}^2$). La figure 43 représente une comparaison de l'ajustement des débits de pointes et la figure 44 représente une comparaison à l'échelle de l'épisode pour les deux sous bassins ; on y voit que la dynamique y est très différente, même pour des évènements équivalents en pointe.

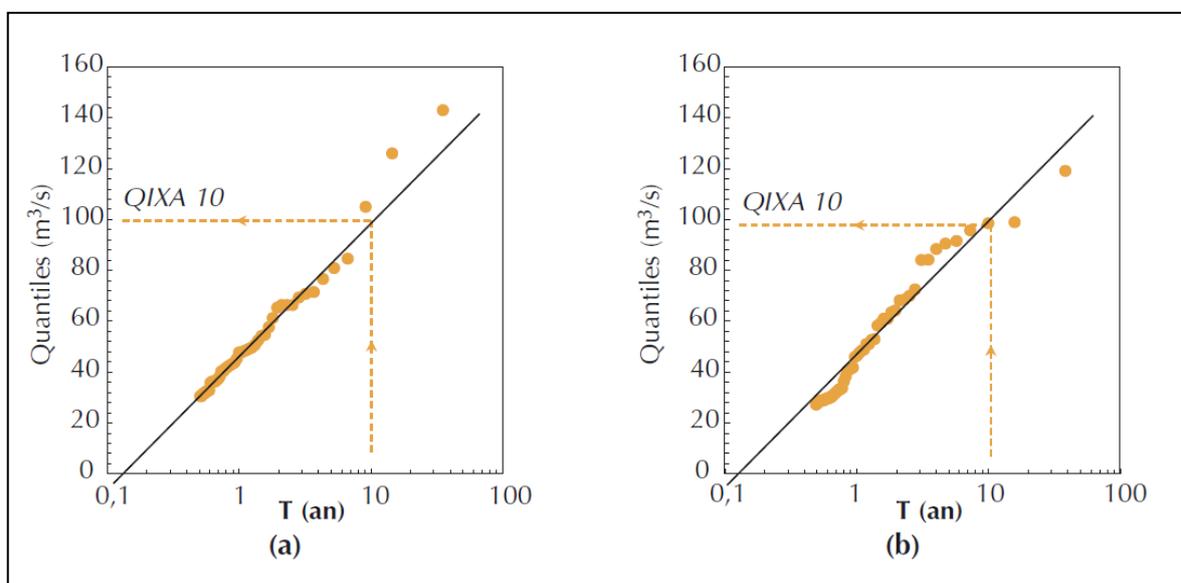


Figure 43: Distributions théorique et empirique des débits de pointe pour le Volp (a) et pour la Seille (b). (source : Sauquet, 2003)

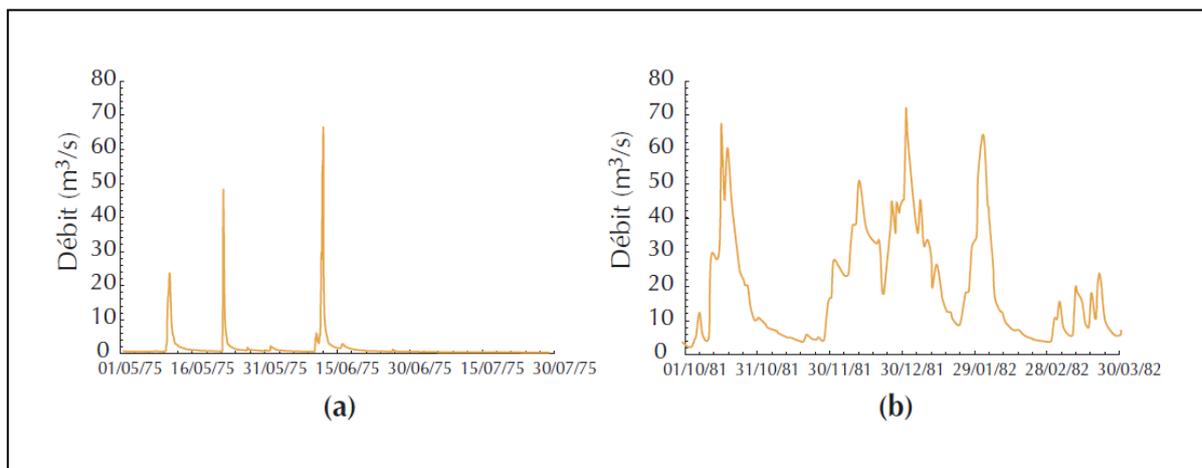


Figure 44: Hydrogrammes de crue observés sur le Volp (a) et sur la Seille (b) (source : Sauquet, 2003).

L'étude restreinte aux seuls débits de pointes ne permet pas de différencier les deux rivières, alors que manifestement la persistance des phénomènes et des volumes de crue à gérer pendant la crise ne sont pas du même ordre de grandeur. Cette approche classique est renforcée par la définition d'une « crue de référence » ou « crue de projet » permet de dimensionner les ouvrages de protection et de délimiter la zone inondable.

Les deux approches se différencient par le fait que la deuxième est complétée par une analyse statistique en introduisant une dimension temporelle pour décrire plus précisément le caractère plus ou moins soutenu des crues. C'est ce que réalise l'analyse en QdF (débit-durée-fréquence).

Même avec la prise en compte des deux critères (pic et volume), Gilard et Gendreau (1998) estiment que l'illusion de sécurité apportée par un ouvrage qui permet de se protéger contre la crue de projet est trompeuse, car s'il se produit un événement d'intensité supérieure, le risque encouru n'est pas explicitement identifié ; il peut même être occulté dans certains cas. Cette illusion est d'autant plus grande que l'on a épuisé les gisements de solutions techniques facilement accessibles : recalibrages légers, endiguements localisés... La généralisation de tels travaux le long d'un cours d'eau peut être à l'origine de l'échec de telles solutions, puisque, en même temps que l'on cherche à se protéger plus, on augmente l'intensité des événements hydrométriques en supprimant l'efficacité des régulations naturelles liées au phénomène bien connu du laminage. Nous reviendrons sur ce point plus loin (voir –VII.7-).

V.4 Rappels sur l'approche QdF

Inspirée par le CEMAGREF (Sauquet, 2003), l'approche QdF fournit une représentation fréquentielle théorique multi-durées des quantiles de crue. Deux variables à partir de la donnée brute sont généralement examinées (fig.45) :

- Les débits seuils Q_d continument dépassés pendant une durée d :

$$Q_d(t) = \min \{Q(t'), t' \in [t, t+d]\}$$

- Les débits moyens V_d , moyennes mobiles calculées sur une durée continue d :

$$V_d(t) = \frac{1}{d} \int_{t-d/2}^{t+d/2} Q(t') dt'$$

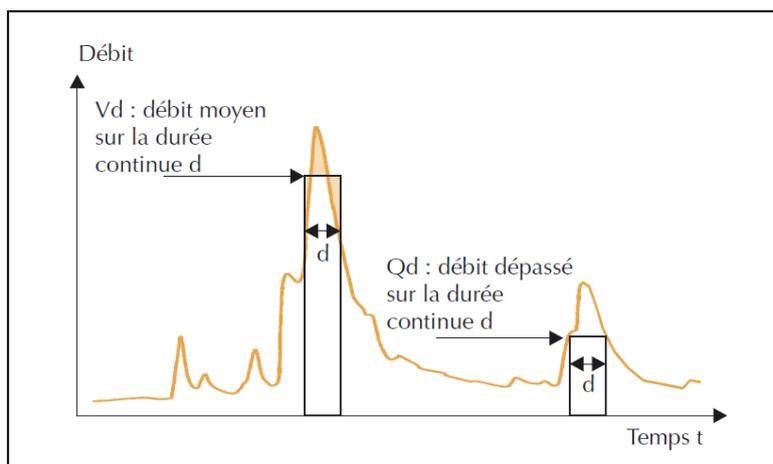


Figure 45: Définition des variables examinées pour l'analyse QdF. (source : Sauquet, 2003)

Les deux variables V_d et Q_d , exprimées en m^3/s ou l/s , se rejoignent pour $d = 0$ (correspondant au débit instantané). L'analyse QdF décrit les variations des quantiles de V_d et Q_d en fonction de la durée d et de la période de retour T . Cette approche est analogue à la synthèse en intensité-durée-fréquence réalisée pour les pluies. Les résultats se présentent sous la forme d'un faisceau de courbes, paramétrées par la durée d dans le plan (débit, T) (fig.46).

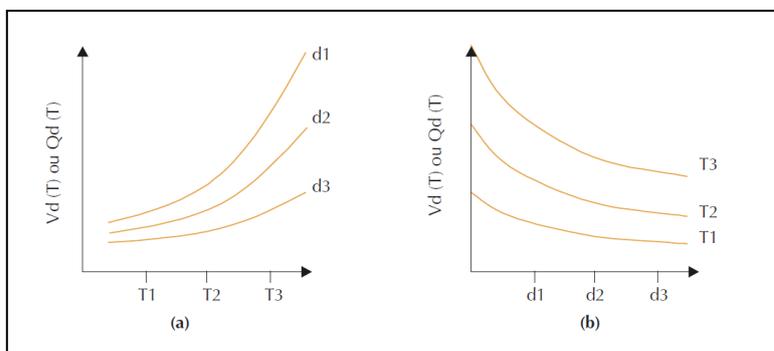


Figure 46: Représentation des courbes QdF. (source : Sauquet, 2003)

La conception d'un modèle QdF se décline en trois grandes étapes :

- a) Le choix de la variable et de la gamme de durées étudiées : on doit choisir d'analyser les débits-seuils ou moyens (on privilégiera les débits moyens pour des questions relatives aux volumes, les débits-seuils sont plus adaptés aux problèmes de débordement) sur N durées d_i , $i = 1, \dots, N$ en veillant à ne pas intégrer des durées bien au-delà de la durée moyenne des épisodes de crue observés ;
- b) L'échantillonnage multi-durée : les valeurs sélectionnées V_{di} extraites de la chronique $Q_d(t)$ ou $V_d(t)$ sont :
 - soit les valeurs maximales supérieures à un seuil définissant des événements indépendants ;
 - soit les maxima annuels.

Les valeurs V_{di} sont ensuite triées par ordre décroissant et identifiées par leur rang. Ces opérations sont renouvelées pour chaque durée d_i , $i = 1, \dots, N$.

- c) La modélisation QdF : les courbes débit-durée- fréquence sont obtenues :
 - Par ajustement d'une loi de probabilité sur chaque échantillon : les paramètres de la distribution statistique $V_{di}(T)$ ou $Q_{di}(T)$ sont calculés par examen de la seule durée d_i . Cette approche ne fournit des quantiles que pour les durées retenues dans la phase de sélection. D'autre part, les courbes ajustées peuvent se croiser, donnant lieu à des incohérences, du type quantile de débit instantané inférieur au quantile de débit moyen journalier pour une même période de retour ;
 - A l'aide d'un modèle QdF supposé représentatif du régime des crues du bassin examiné. Le choix du modèle parmi trois référencés en France repose sur la pluviométrie locale et le débit instantané de période de retour 10 ans (Q_{IXA10}) (Galéa et Prudhomme, 1997). Une expression analytique permet de reconstituer les quantiles connaissant Q_{IXA10} et la durée de SOCOSE (D_{SOCOSE}), valeur médiane des durées de dépassement de la moitié du débit de pointe, pour les événements proches de Q_{IXA10} . Cette méthode présente des difficultés d'usage liées à l'hypothèse d'universalité des trois modèles et au choix du modèle de référence [Vandenesse, Florac, Soyans; (Gilard et Gendreau, 1998), cités par Sauquet (2003)] et il serait donc intéressant d'étudier l'adaptabilité de ces modèles de références aux bassins versants algériens, ou de faire des modèles analogues locaux afin de pouvoir caractériser l'hydrométrie des bassins non jaugés.

Il existe d'autres méthodes pour l'obtention des modèles QdF, nous n'en citons que celles qui nous intéressent. Ces méthodes sont utilisées dans beaucoup de contextes, de même nous ne citons que celles qui intéressent notre étude, à savoir la construction de l'hydrogramme de projet. La méthode utilisée est décrite dans ce qui suit.

V.5 L'analyse QdF pour la construction d'hydrogrammes de projet

Dans une démarche d'aménagement pour lutter contre les inondations, les bureaux d'étude sont amenés à reproduire par simulation numérique des scénarios passés pour mesurer l'impact de ces événements (extension et persistance du champ d'inondation). Ils doivent procéder de même avec des scénarios de référence respectant certaines propriétés fréquentielles (« la crue centennale » par exemple). Ces scénarios se déclinent en hydrogrammes de projet. Les méthodes de construction de ces hydrogrammes sont multiples, Sauquet (2003) commente les différentes méthodes appliquées et la synthèse de plusieurs années de recherche au niveau du CEMAGREF :

1. La première approche consiste à appliquer des expressions analytiques trouvées dans la littérature technique. Elle est simple ; cependant, il faut prendre du recul par rapport à ce type de formulations mathématiques : elles n'ont pas de vocation universelle et leur choix relève de l'arbitraire.
2. La seconde approche, plus naturelle, cherche à exploiter les chroniques de débits. De ces séries, on souhaite dégager un événement synthétique qui rend compte de la variabilité des situations réelles rencontrées (notamment des plus grandes crues) sans être trop particulier. Gilard (1998) propose un Hydrogramme Synthétique MonoFréquence (HSMF) déduit des courbes QdF. L'avantage de l'HSMF est de garantir que toutes les caractéristiques de l'hydrogramme (en volume et en débit seuil) sont rattachées à une même fréquence d'occurrence. La phase de montée de l'HSMF est supposée linéaire avec le temps. Le maximum est atteint à l'instant $t = D_{SOCOSE}$. La pointe de crue est définie par Q_{IXAT} débit instantané maximal de période de retour T choisie et la décroissance est conditionnée par les valeurs de débit-seuil $Q(d, T)$ des courbes QdF.

Dans cette dernière approche, la priorité est la cohérence des volumes. Les chercheurs au niveau du CEMAGREF (2002) ont décidé de faire évoluer l'HSMF pour répondre à des contraintes spécifiques liées au gradient de montée. Ces mêmes chercheurs ont

proposé de constituer un échantillon d'hydrogrammes de crue observés rendus adimensionnels en divisant par le débit de pointe. Un hydrogramme moyen sans dimension est calculé et on en retient l'allure en phase de montée. Multipliée par $QIXAT$, elle décrit la première partie de la crue de projet. La phase de descente est construite de telle sorte que, sur l'épisode, le débit dépasse en continu la valeur du quantile de débit-seuil $Q(T, d)$ pendant la durée d . Toutes ces étapes sont décrites sur la figure 48.

N.B : Cette approche diffère de celle proposée par Gilard (1998) sur la phase de montée de l'hydrogramme. Des travaux aux CEMAGREF, effectués sur plusieurs bassins versants, mettent en évidence une difficulté quant à l'appréciation de la durée SOCOSE et en déduisent que l'allure moyenne pour la phase de montée calculée sur plusieurs hydrogrammes est plus apte et plus représentative. Au besoin elle peut intégrer des formes extrêmes pour la montée et envisager ainsi des situations plus pénalisantes vis-à-vis du gradient de montée, tout en respectant la cohérence des volumes, ce qui ouvre de nouveaux champs d'application. C'est cette approche améliorée de l'HSMF que nous essayerons d'adapter à notre cas d'étude.

La procédure de construction d'un HSMF selon les chercheurs du CEMAGREF (2002) est représentée sur la figure 47.

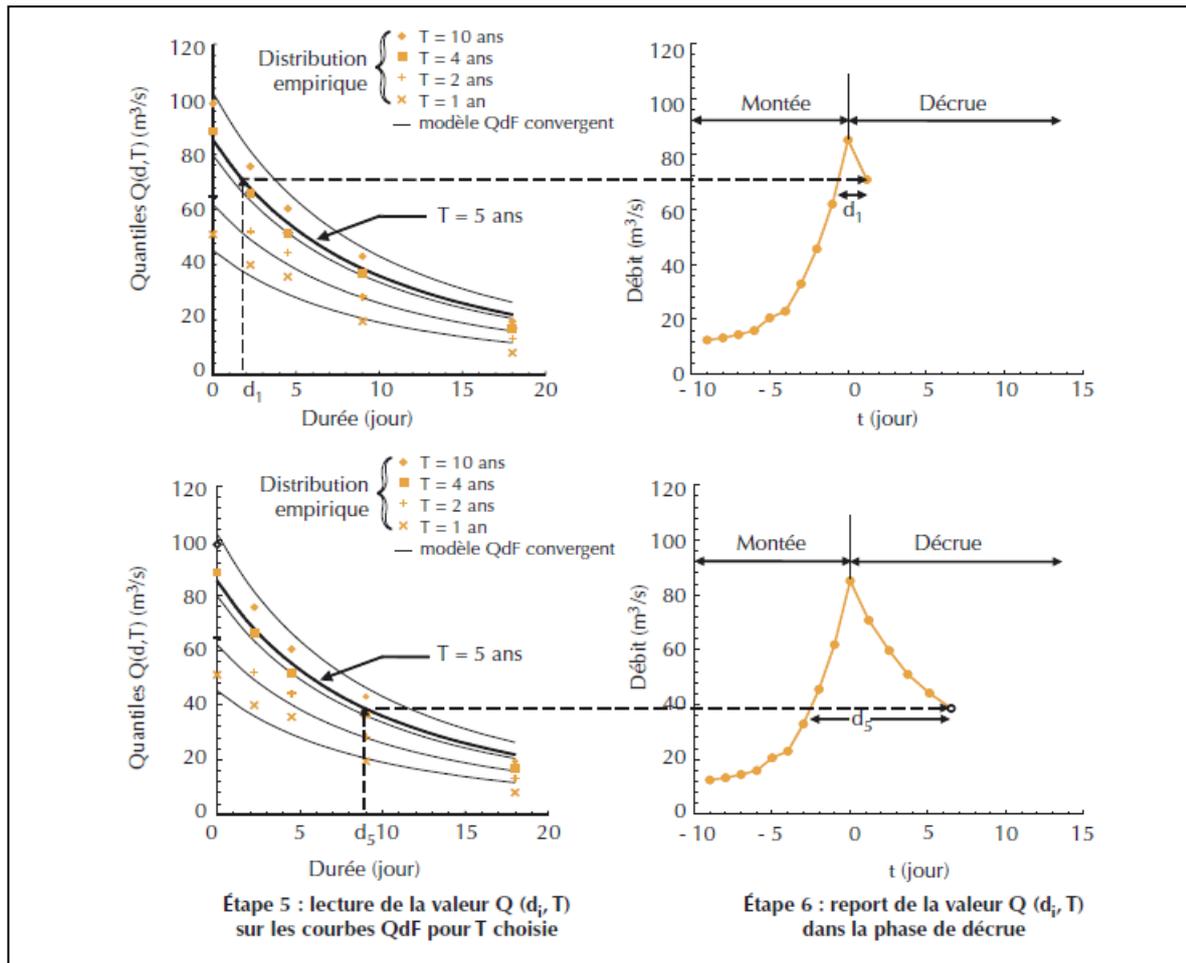
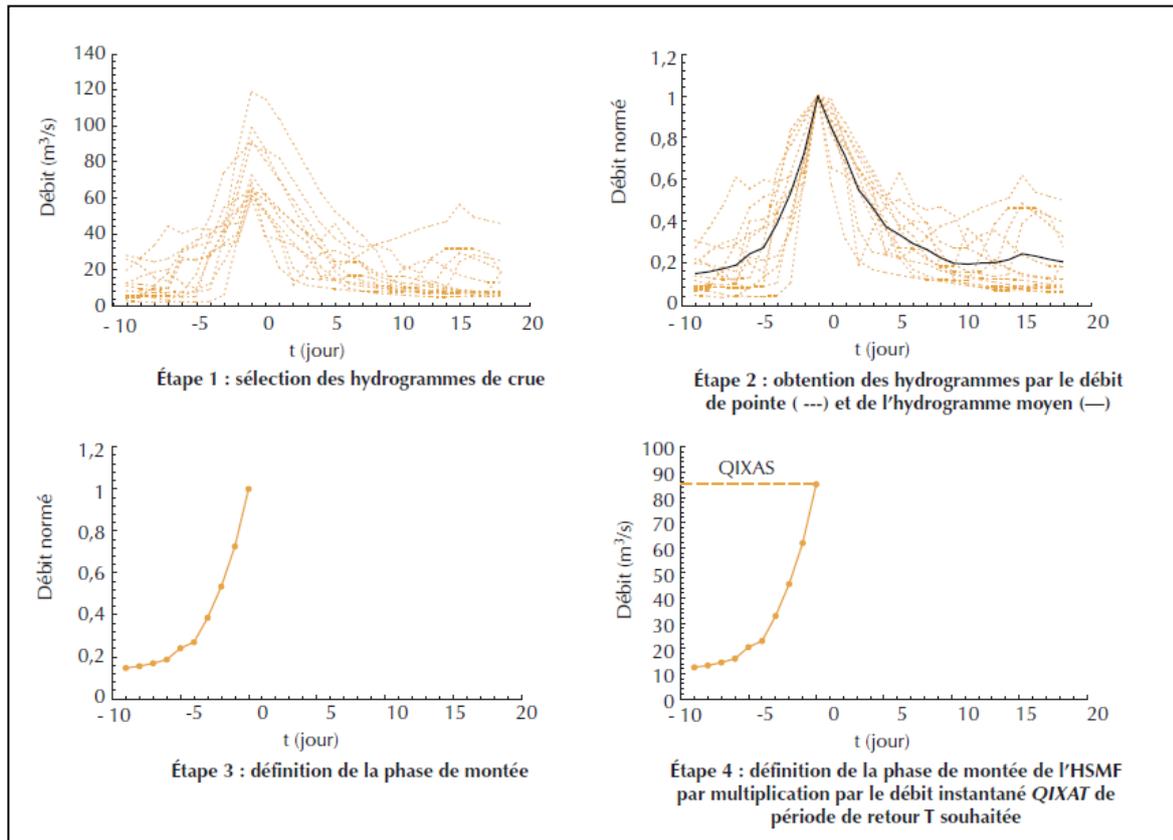


Figure 47 : Etapes de la construction de l'Hydrogramme Synthétique Mono-Fréquence (source : Sauquet, 2003).

V.6 Conception du hyétogramme de projet

Les épisodes pluvieux sont des phénomènes aléatoires, à la structure très complexe et difficilement reproductible. Le dimensionnement des ouvrages pour se prémunir contre des dégâts qu'occasionnerait un événement de fréquence donnée devrait donc se faire en termes de risque de défaillance. Ceci nécessite la possibilité d'associer une probabilité à un événement donné (Sighomnou, 1989). Chaque épisode pluvieux est unique dans son genre, et on ne saurait lui affecter une probabilité d'occurrence précise.

Malgré cette difficulté certains hydrologues ont tenté de mettre au point, à l'usage des projeteurs, des hyétogrammes synthétiques appelés «pluies de projet», dont la transformation conduit à des paramètres de ruissellement pour lesquels on peut chiffrer la probabilité d'occurrence en tout point du bassin versant. L'élaboration de telles pluies repose sur l'analyse statistique de divers éléments (hauteur, durée, fréquence) des épisodes pluvieux.

Nous nous proposons de construire donc ces courbes IDF pour en extraire la pluie de durée déterminée et de fréquence de retour de projet. Ces courbes peuvent être tirées des enregistrements réels échelonnés sur quelques années ou à partir de méthodes empiriques.

La recherche de la loi Intensité - Durée - Fréquence s'effectue sur la base des enregistrements pluviographiques. En effet, à partir des dépouillements des pluies on calcule les quantités de pluies correspondantes à différents pas de temps (6mn, 15mn, 30mn, 1h, 2h,...). Pour chaque durée fixée on sélectionne la valeur maximale par averse. On obtient ainsi une série de données pour chaque pas de temps sur toute la période dépouillée.

Dans le cas où les données pluviographiques venaient à manquer et on ne dispose que de données pluviométrique, l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH) utilise la relation Intensité - Durée - Fréquence empirique donnée par K.BODY (1985). Cette relation est sous la forme :

$$P_{t,F} = P_{jmax,F} \left(\frac{t}{24}\right)^b$$

$P_{t,F}$: Hauteur de pluie de fréquence et de durée choisies ;

$P_{jmax,F}$: Pluie journalière maximale de fréquence voulue ;

b : Exposant climatique, fonction de la pluie moyenne annuelle.

V.7 La modélisation déterministe pour l'étude du laminage de l'hydrogramme de crue de projet

La modélisation pluie-débit sur le faciès plaine de l'oued Mekerra a été le moyen pour nous d'étudier l'évolution de l'hydrogramme de crue de projet en différents endroits stratégiques du cours d'eau qui ne sont pas jaugés. Aussi, cette modélisation nous a permis de faire une estimation de l'hydrogramme de crue d'un affluent de l'oued Mekerra où la mesure des débits est approximative.

Comme pour la modélisation de la relation pluie-débits sur les deux faciès « atlas-hauts plateaux », trois fonctions ont été sélectionnées sur le HEC HMS pour modéliser le comportement hydrologique du faciès « plaine ». Le choix de ces fonctions se justifie par le caractère évènementiel du phénomène étudié et de la caractéristique morphométrique de la plaine alluviale:

- A. Fonction de production SCS ;
- B. Fonction de transfert l'onde cinématique ;
- C. Fonction de cheminement de Muskingum Cunge.

Les deux premières sont décrites dans la partie -III.8- de ce document ; le modèle de Muskingum Cunge est présenté dans ce qui suit.

V.7.1 Le modèle Muskingum Cunge, un modèle adapté aux faibles pentes

Le modèle dit de Muskingum-Cunge est basé sur l'équation de continuité incluant un débit latéral et sur la forme diffusive de l'équation de quantité de mouvement et il est donc de ce fait adapté aux faibles pentes (voir paragraphe III.5.3) :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad \text{Equation de continuité incluant un débit latéral;}$$

$$i - j = \frac{\partial x}{\partial y} \quad \text{forme diffusive de l'équation de quantité de mouvement.}$$

L'équation de diffusion-convection de Miller et Cunge, 1975, est obtenue en combinant ces deux équations :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + cq$$

Avec c : (célérité) et μ : la diffusivité hydraulique définies par :

$$c = \frac{dQ}{dA} \quad \text{et} \quad \mu = \frac{Q}{2Bi}$$

Là où B = largeur supérieure de la surface de l'eau.

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

$$O_t = C_1 I_{t-1} + C_2 I_t + C_3 O_{t-1} + C_4 (q \Delta x)$$

Avec : O_t : écoulement moyen sortant de l'extension à l'instant t ;

I_t : écoulement moyen entrant au même instant de la même extension.

$$C_1 = \frac{\frac{\Delta t}{K} + 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} ; C_2 = \frac{\frac{\Delta t}{K} - 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} ; C_3 = \frac{-\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} ; C_4 = \frac{2\frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} ;$$

$$K = \frac{\Delta x}{c} ; X = 0.5 \left(1 - \frac{Q}{Bic\Delta x} \right).$$

V.7.2 Utilisation du modèle de Muskingum-Cunge dans le HEC HMS

Le HEC HMS peut employer le modèle Muskingum-Cunge avec l'une des deux configurations :

Configuration standard : Dans cette configuration, une description simple d'une coupe de canal représentatif est fournie où une des formes géométriques simples est choisie. Les dimensions de la section sont indiquées, avec la rugosité de canal, la pente d'énergie, et la longueur.

Configuration du profil en travers à huit (08) points dans le cas où une des formes en coupe standard ne sont pas représentatives de la géométrie de canal. L'alternative est d'employer la configuration du profil en travers à huit points. Une coupe représentative est décrite pour l'extension de cheminement, en utilisant huit (08) paires de valeurs (x,y) (distance, altitude). Ces valeurs sont définies spécifiquement comme illustré sur la figure 48.

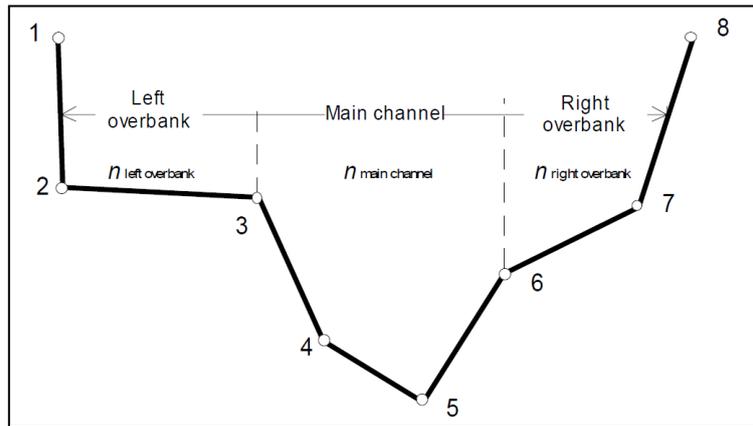


Figure 48: Format descriptif du profil en travers à huit (08) points (source : HEC HMS manuel de référence technique, 2000).

Les points 3 et 6 représentent les limites gauches et droites du lit mineur de la coupe représentative. Les points 4 et 5 sont dans le lit mineur. Les points 1 et 2 représentent la rive gauche, et les points 7 et 8 représentent la rive droite du canal (rives du lit majeur). La longueur d'extension, le coefficient(s) de rugosité, et la catégorie d'énergie doivent également être indiqués.

V.8 Concepts de base du fonctionnement des grands ouvrages de protection contre les inondations

Les ouvrages de protection contre les inondations peuvent être de plusieurs types. Les principales actions qui peuvent être menées concernent: le calibrage du lit de l'oued ou la surélévation d'une partie du lit majeur. Ce type d'action a pour conséquence de diminuer l'effet de stockage transitoire du lit majeur ; les débits de pointe sont alors plus forts à l'aval. Le contraire du calibrage consiste à favoriser les débordements dans une zone où cela est peu gênant, les débits de pointes à l'aval sont alors diminués ; ce type d'aménagement est représenté par les zones d'épandages et les barrages écrêteurs de crues. Le troisième type de mesure consiste à faire des déviations, cette mesure est adoptée lorsqu'on veut faire dévier une partie de l'écoulement d'un canal principal vers un canal secondaire, lorsque le premier à une capacité de transit limitée.

V.8.1 Zones d'épandages et barrage écrêteur

Leurs rôles est d'atténuer des impacts défavorables d'excès d'eau, en stockant l'eau et en la libérant avec un débit qui ne crée pas de dégâts en aval. Le volume de l'hydrogramme d'apport et volume de l'hydrogramme de sortie sont de ce fait les mêmes, mais la distribution de l'écoulement dans le temps est changée par la fonction de

stockage. La figure 49 est un croquis d'une structure simple de détention. La structure stocke l'eau temporairement et la libère par le pertuis de fond ou l'évacuateur de crue.

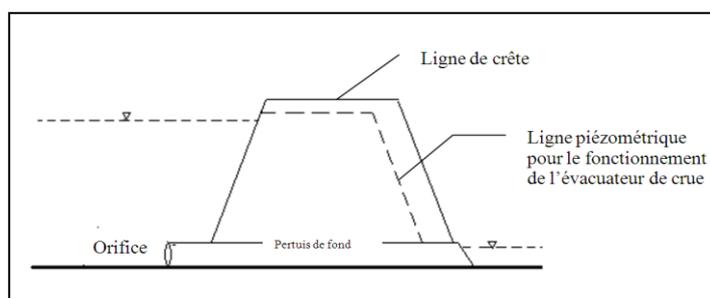


Figure 49: Schéma simplifié de la structure d'un ouvrage écrêteur de crue (source : HEC HMS manuel de référence technique, 2000)..

Equation de base

Dans le HEC HMS le dispositif de calcul est régit par un modèle qui discrétise le temps, cassant toute la durée de l'analyse en intervalles égaux de durée Δt . Il résout alors périodiquement l'approximation unidimensionnelle de l'équation de continuité :

$$I_{moy} - O_{moy} = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

Avec : I_{moy} apport moyen pendant l'intervalle de temps Δt ;

O_{moy} sortie moyenne pendant l'intervalle de temps Δt ;

ΔS : variation de stock.

Les calculs sont effectués en adoptant l'approximation par différence finit ceci donne l'équation suivante:

$$\frac{I_t + I_{t+1}}{2} - \frac{O_t + O_{t+1}}{2} = \frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t}$$

Où : t : indice de l'intervalle de temps ;

V.8.2 Canal de dérivation

La figure 50 est un schéma d'une dérivation. Cette dérivation inclut un canal de dérivation et une structure de commande (un déversoir large-élevé à la crête du côté-canal). Quand l'altitude de la surface de l'eau dans le canal principal excède l'altitude de la crête du déversoir, l'eau circule sur le déversoir du canal principal et dans le canal de dérivation. Le taux de décharge dans le canal de dérivation est commandé par les propriétés de la structure de commande. Le taux de décharge dans le canal principal en aval de la commande est réduit par le volume qui coule dans le canal de dérivation.

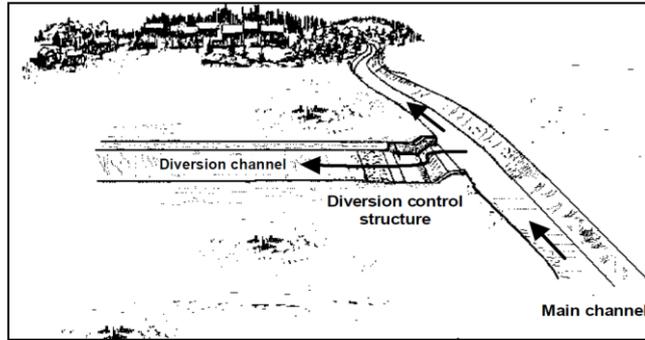


Figure 50: illustration d'une structure de déviation de canal (source : HEC HMS manuel de référence technique, 2000).

Dans le HEC HMS, une dérivation de canal est modélisée de la même manière qu'une bifurcation en employant une approximation unidimensionnelle simple de l'équation de continuité.

$$O_t^{prin} = I_t - O_t^{deriv}$$

O_t^{prin} : écoulement moyen passant en aval du canal principal pendant l'intervalle t ;

I_t : écoulement principal moyen du canal juste à l'amont de la structure de commande de dérivation pendant l'intervalle t ;

O_t^{deriv} : écoulement moyen dans le canal de dérivation pendant l'intervalle t .

Chapitre VI

ETUDE HYDROLOGIQUE POUR LA CONCEPTION DE L'HYDROGRAMME DE PROJET DE LA BASSE MEKERRA

CHAPITRE VI : ETUDE HYDROLOGIQUE POUR LA CONCEPTION DE L'HYDROGRAMME DE PROJET DE LA BASSE MEKERRA

VI.1 Introduction

Parmi les caractéristiques des inondations, on peut citer leurs grandes variabilités spatiales, leurs magnitudes et la difficulté d'en prévoir les conséquences moyennes à long terme. Toutefois, avoir une idée précise de ces conséquences sur les bâtiments et infrastructures actuelles et potentielles situées dans la plaine inondable est souhaitable, cela tout en limitant le coût et la durée des études pour y parvenir.

L'étude hydrologique est celle où nous déterminerons les caractéristiques hydrologiques de la zone d'étude, la crue de projet sera la caractéristique principale à déterminer. Cette crue sera la principale composante à fournir au modèle pour le dimensionnement des ouvrages de protection. Aussi, son évolution en différents points du cours d'eau est indispensable pour prévoir différents scénarios de protection (loin des points jaugés dans la plupart des cas). Ces points dans notre cas sont :

- les sections identifiées comme étant intéressantes aux différents aménagements adoptés (dérivations de l'oued, création de zones d'épandages et barrage écrêteur) et les zones de rencontre des différents affluents de l'oued Mekerra pour l'étude de leurs influences sur l'écoulement durant les évènements extrêmes.

VI.2 L'étude hydrologique

Dans ce qui suit, nous détaillerons l'étude hydrologique dont le but essentiel est de parvenir à la crue de projet, ainsi voir son comportement dans les différents scénarios d'aménagement qu'a connu la plaine, mais aussi pour l'identification des zones inondables.

VI.2.1 Recensement des données pluviométriques et hydrométriques

Pour réaliser cette étude nous disposons de données pluviométriques, pluviographiques et de levés limnimétriques. La disposition géographique des stations de mesures est décrite sur la figure 51.

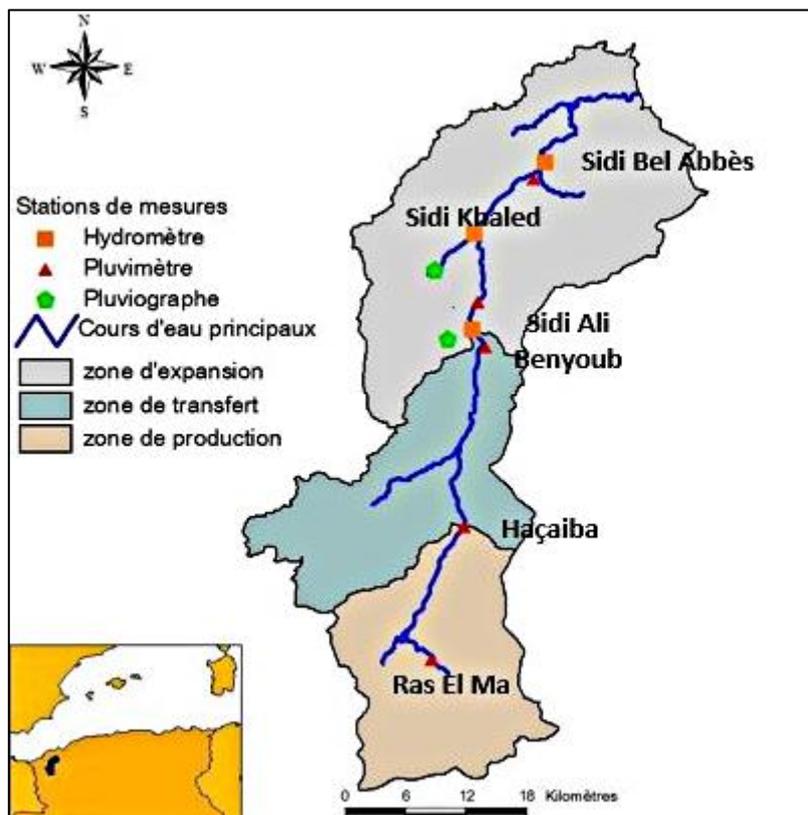


Figure 51: répartition des stations de mesure à notre disposition pour l'étude du bassin versant de la Mekerra.

Un récapitulatif des stations limnimétriques dont nous disposons et de leurs périodes de fonctionnement est présenté au tableau suivant :

Tableau 8 : stations de mesures limnimétriques sur la Mekerra

Code station	Nom de la station	coordonnées UTM WGS 84		Altitude (m)	Période (ans)
		X(m)	Y(m)		
11 01 01	Hacaïba	703492	3841938	974	1963-2007
11 02 01	Sidi Ali Benyoub	706843	3872679	635	1950-2007
11 03 01	Sidi bel Abbès	715648	3904136	437	1947-1996
11 03 31	Lamtar aval	706381	3885276	552	1973-2000

Sur ces stations nous pouvons émettre les critiques suivantes:

- La station de Hacaïba, au vu des résultats obtenus dans la première partie de ce travail, cette station ne représente pas un intérêt pour l'utilisation dans une éventuelle modélisation hydrologique.
- La station Sidi Ali Benyoub a une grande importance puisqu'elle définit les hydrogrammes entrant dans la plaine,
- Sur un rapport officiel de la DHW de Sidi Bel Abbès, il est cité : la station de Sidi Bel Abbès présente une piètre qualité de la section de mesure (peu adaptée aux forts

débits).

- La station de Lamtar, peut représenter un intérêt particulier dans notre étude puisqu'elle se situe sur la plaine. En plus, elle n'est pas sous l'influence des hydrogrammes engendrés à l'amont de Sidi Ali Benyoub ; elle peut de ce fait permettre une modélisation hydrologique de la seule partie plaine du bassin versant de la Mekerra. Ceci est particulièrement intéressant si on veut connaître à quelle proportion participe cette partie dans la formation des crues qui arrivent jusqu'à la ville de Sidi Bel Abbès.

De même que pour les limnimètres, le tableau 9 présente les stations de mesures de la pluie :

Tableau 9 : Stations pluviométriques et pluviographiques sur le bassin versant de la Mekerra

Code station	Nom de la station	coordonnées UTM WGS 84		Altitude (m)	Période des mesures	Type de mesure
		X (m)	Y (m)			
11 02 01	Sidi Ali Benyoub	706843	3872679	643	<i>Depuis 1913</i>	Pluie journalière
11 02 03	El Hacaïba	703492	3 841 938	974	<i>Depuis 1990</i>	Pluie pas de temps fin
11 03 05	Sidi Bel Abbès	715648	3 904 136	470	<i>Depuis 1913</i>	Pluie journalière
11 03 10	Lamtar aval	706381	3885276	552	<i>Depuis 1987</i>	Pluie pas de temps fin
11 03 22	Tabia	707601	3877430	632	<i>Depuis 1942</i>	Pluie journalière
11 03 34	Taftamane	699100	3 869 905	705	<i>Depuis 1987</i>	Pluie pas de temps fin

Après avoir consulté attentivement les séries historiques relatives à chaque station, nous pouvons conférer les remarques suivantes :

- Le jeu de pluies journalières obtenu dans le cadre de cette étude ne couvre principalement que la partie Nord du bassin versant.
- Les séries disponibles sont relativement discontinues avec seulement quelques stations susceptibles de couvrir l'entière période à analyser. On peut cependant remarquer que lorsque les données sont disponibles, elles sont raisonnablement complètes. On peut distinguer la période avant l'indépendance où le réseau pluviométrique est relativement lâche, avec des séries assez fortement lacunaires, et la période 1970-1998 où la quasi totalité des stations est disponible (avec néanmoins quelques lacunes au milieu des années 80).

- Les données relatives à la structure fine des averses sont disponibles pour quatre stations, sur une période relativement courte et correspondant à un échantillonnage relativement distendu des averses. Ce qui ne permet pas de traiter le sous échantillonnage des averses dans l'analyse.

VI.2.2 Analyse des données disponibles

La modélisation pluie-débit nécessite d'avoir à disposition un certain nombre de données pluviométriques et hydrométriques. Dans ce qui suit, il est présenté l'ensemble des stations ainsi qu'un traitement statistique pour ces dernières. Cette étape est nécessaire dans un but de faire une sélection de ces stations et de faire ressortir les données qui pourraient être exploitables pour notre étude.

a. Pluies journalières extrêmes

Les plus grandes valeurs des pluies journalières mesurées ont été extraites des séries temporelles pour modéliser leur distribution statistique. L'objectif étant de les ajuster à une loi des extrêmes afin d'en permettre l'extrapolation aux fréquences rares. Après une première analyse, la loi de Gumbel s'est avérée appropriée pour la quasi-totalité des stations (annexe 3).

$$F(x) = e^{-e^{-u}}$$

μ : variable réduite ;

F : fonction de répartition.

Après les ajustements, les valeurs retenues pour chaque station sont représentées sur le tableau 10:

Tableau 10 : ajustement des pluies extrêmes sur les quatre stations à une loi de Gumbel.

Pluies journalières locales [mm]							
Nom station	Code	Nbre année	Période de retour [an]				
			10	20	50	100	1000
Sidi Bel Abbès	11 03 05	57	50,77	57,23	65,59	71,86	92,56
Lamtar aval	11 03 10	52	66,49	77,54	91,84	102,55	137,96
Tabia	11 03 22	39	53,81	60,08	68,19	74,26	94,35
Sidi Ali Benyoub	11 03 34	82	59,33	68,40	80,14	88,94	118,01

On peut dire qu'il y a une variabilité entre les deux stations les plus à l'aval à savoir (11 03 10) et (11 03 34) et les deux autres, avec des valeurs plus élevées pour les deux premières.

b. Pluie à pas de temps fin

Il y a quatre stations disponibles, mais après consultation, le jeu à pas de temps fin ne paraît pas aussi exhaustif que les séries journalières dont nous disposons. Nous essayerons tout de même de voir si la station la plus riche en données (Taftamene) nous permettra une quelconque exploitation.

c. Débit moyen journalier

Pour les stations hydrométriques sélectionnées, nous avons effectué une analyse statistique sur les débits moyens journaliers extrêmes, ces résultats sont présentés sur le tableau 11. La station de Hacaiba n'est pas admise dans la sélection.

En annexe 4 sont fournis les graphiques des ajustements pour chaque station où sont résumées les caractéristiques principales des stations ainsi que la comparaison des données avec l'ajustement à une loi de log-normale.

Tableau 11 : ajustements statistiques des débits moyens journaliers extrêmes pour les stations hydrométriques sélectionnées.

Stations		Surface km ²	Q moyens journaliers [m ³ /s]					Commentaires
Code	Lieu		10	20	50	100	1000	
11 02 01	Sidi Ali Benyoub	2120.5	66,69	92,97	135,11	173,34	348,39	Bon ajustement
11 03 01	Sidi Bel Abbès	3235.1	25,64	33,69	45,80	56,21	99,76	Laminage dans la plaine
11 03 31	Lamtar aval	322.2	-	-	-	-	-	Ajustement délicat

Les valeurs retenues résultent d'un ajustement par la loi log-normale. Les ajustements sont présentés sous forme de graphique en annexe 4.

N.B : Les faibles débits de crues observés à la station de Sidi Bel Abbès s'expliquent d'une part par le laminage dans la plaine et d'autre part par la piètre qualité de la section de mesure.

Ainsi, cette première analyse permet déjà de trier les stations et de faire apparaître des tendances de comportement.

d. Débit de pointe

Les débits maximums instantanés sont ajustés à la loi log-normal (annexe 5). Les principaux résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau ci-après.

Tableau 12 : ajustements statistiques des débits de pointes pour les stations hydrométriques sélectionnées.

Stations		Surface km ²	Q moyens journaliers [m ³ /s]					Gradex 10-100	Commentaires
Code	Lieu		10	20	50	100	1000		
11 02 01	Sidi Ali Benyoub	2120.5	461,95	570,83	724,32	848,90	1324,29	1.23	Bon ajustement
11 03 01	Sidi Bel Abbès	3235.1	72,45	96,03	131,83	162,85	294,33	0.44	Laminage dans la plaine
11 03 31	Lamtar aval	322.2	-	-	-	-	-	-	-

L'examen de ces ajustements appelle quelques commentaires :

Station de Sidi Bel Abbès : l'ajustement est étonnamment bon compte tenu des phénomènes amont de laminage dans la plaine et de la capacité de la Mekerra dans l'agglomération. Cependant, compte tenu de l'implantation médiocre de la station de jaugeage, les valeurs obtenues restent sujettes à caution.

VI.2.3 Synthèse des données analysées

L'analyse faite sur les débits moyens journaliers et les débits de pointe sur les trois stations fait ressortir les points suivants :

- La station de Hacaiba dont la surface drainée, est probablement sous l'influence d'un milieu karstique, est exclue de l'étude ;
- La station de Sidi Bel Abbès présente un bon ajustement pour les débits de pointe, mais du fait de la mauvaise qualité de sa section de mesure, nous ne l'exploiterons que pour certains paramètres relatifs au temps par exemple;
- La station de Lamtar qui draine un sous bassin situé exclusivement sur la plaine et n'a aucune relation avec les eaux issues du drainage des hauts plateaux, présente elle aussi des suspicions quant à la qualité de mesure des forts débits à cause du laminage ;
- Enfin, la station de Sidi Ali Benyoub présente un grand intérêt pour notre étude et ce pour deux raisons : la première est qu'elle définit les hydrogrammes entrant dans la plaine, la seconde est que les mesures qui y sont faites sont réputées de bonnes qualités puisque peu influencées par les phénomènes d'écrêtage ou de laminage susceptibles d'en biaiser l'interprétation.

Cette synthèse faite sur les stations hydrométriques associés aux résultats obtenues sur les pluies, va nous permettre d'orienter notre réflexion pour mettre en place un outil simple d'évaluation des crues générées par le bassin versant de la Mekerra, mais respectant au mieux ses variabilités fondamentales. La démarche suivie est décrite dans les paragraphes suivants.

VI.2.4 Modélisation hydrologique pour l'étude de l'aléa sur la plaine de Sidi Bel Abbès

VI.2.4.1 Approche adoptée pour la détermination de l'hydrogramme de crue de projet

L'approche suivie est pleinement déterministe, les différents éléments entrant dans le calcul des hydrogrammes de projet seront introduits dans le logiciel HEC HMS. Par la suite, un calage sera effectué sur les différents paramètres des fonctions : de production, de transfert et de cheminement. De la même manière que pour la première partie, ces paramètres doivent être calés suivant des événements observés et ainsi les reprendre pour l'élaboration de l'hydrogramme de crue de projet. Travaillant sur la plaine qui présente de faibles pentes, il a fallu changer la fonction de cheminement pour les biefs conceptualisant les oueds principaux entre la station de Sidi Ali Benyoub et la station de Sidi Bel Abbès.

Le modèle hydrologique doit nous permettre d'étudier l'évolution l'hydrogramme de crue de projet sur les différents points d'intérêts de l'oued Mekerra à savoir : Tabia, Oued Mouezen et la confluence entre l'oued Mouezen et l'oued Mekerra.

Une telle approche nous aidera à avoir une estimation plus ou moins précise de l'hydrogramme en différents endroits de la zone d'intérêt. Cependant, on peut reprocher à cette démarche d'être estimative. En effet, nous allons voir par la suite que le phénomène du laminage qui est prépondérant dans l'étude de la propagation d'une crue débordante, n'est dans ce cas que mimer. Il aurait été plus judicieux d'utiliser un modèle hydraulique depuis Sidi Ali Benyoub, car ces modèles prennent en charge la topographie des lits de l'oued. Dans le cas de la plaine de Mekerra, les données hydrométriques de l'oued Mouezen posent problème, en effet, le seul moyen trouvé pour estimer l'hydrogramme de crue engendré sur ce sous bassin est la modélisation hydrologique.

Aussi, les modèles hydrauliques ne permettent pas d'étudier l'impact des aménagements mis en place pour la protection de la ville de Sidi Bel Abbès.

La figure 52 décrit le dispositif hydrologique adopté pour arriver à estimer l'hydrogramme de crue aux endroits déterminants pour l'étude. Les éléments de HEC HMS conceptualisant le modèle hydrologique sont les mêmes présentés sur la première partie de ce document avec certaines différences ainsi que de nouveaux éléments :

- **Sous bassins** : Le découpage en sous bassins versants s'appuie sur les limites entre les trois (03) principales régions (plaine, atlas, hauts plateaux). Par la suite, le faciès « plaine » est découpé à son tour aux points où la mesure est intéressante.
- **Source** : les deux zones atlas et hauts plateaux sont conceptualisées en tant que source ayant comme débit les hydrogrammes de crues mesurés à la station de Sidi Ali Benyoub ; cela du fait que cette dernière représente l'exutoire des deux faciès. Cette démarche est intéressante du fait qu'elle nous évite de prendre en charge la complexité de la modélisation hydrologique des sous bassins amont de la Mekerra.
- **Jonctions** : ils représentent l'addition de deux hydrogrammes et c'est là où s'opèrent les changements de caractéristiques du bief, notamment la pente et la forme. On en trouve à chaque endroit pertinent pour l'étude ;
- **Biefs** : ils permettent de représenter le décalage et l'atténuation des ondes de crues lors de leur propagation vers l'aval. Dans le cas présent, la propagation le long de l'oued Mekerra, sur le faciès plaine, utilise une approche du type Muskingum-Cunge (chapitre V), plus adaptée aux faibles pentes.

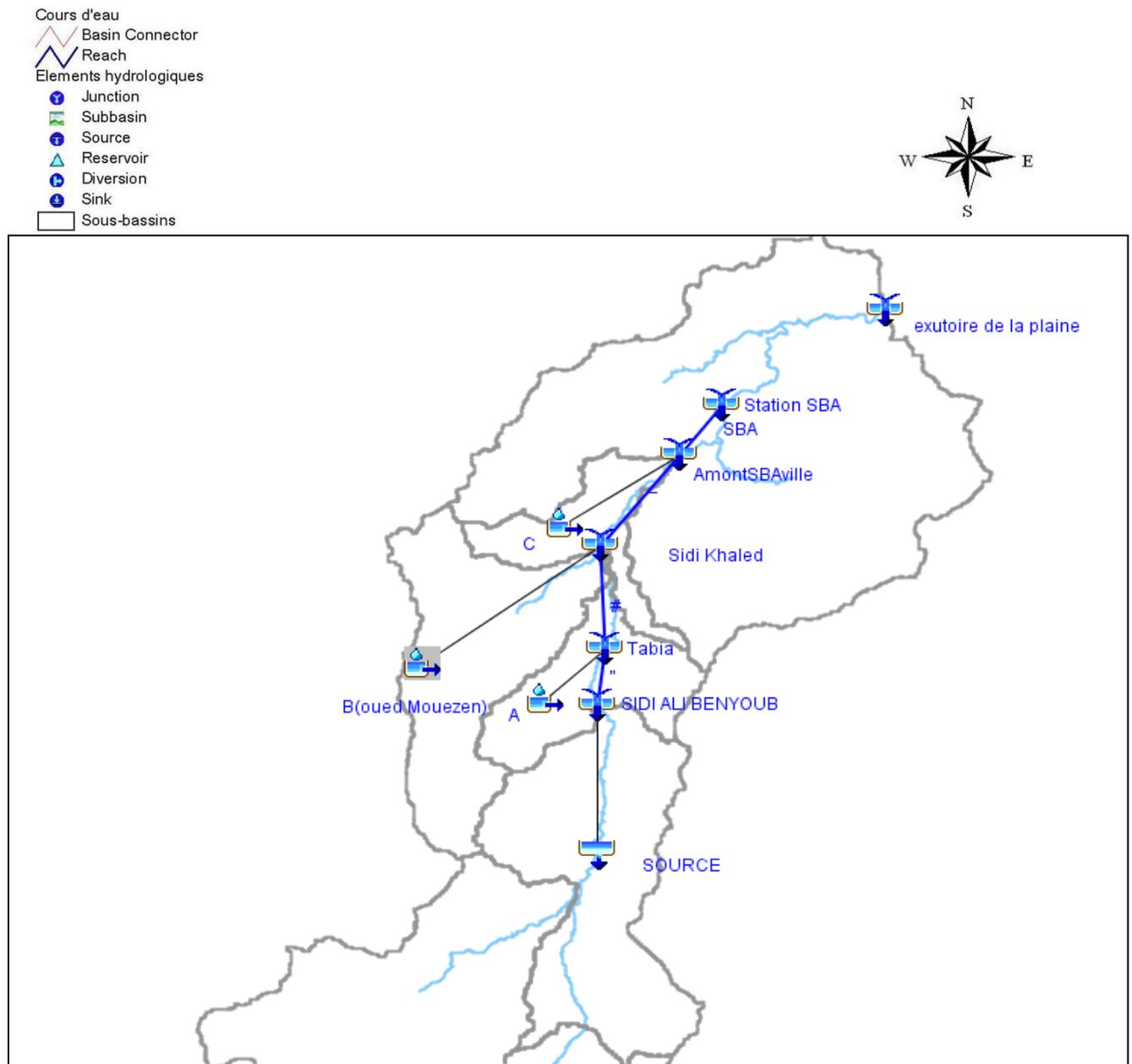


Figure 52: Schéma général du modèle hydrologique.

VI.2.4.2 Préparation des entrées du modèle

a. Hydrogramme synthétique à Sidi Ali Benyoub

Compte tenu des observations faites tout à l'heure sur la qualité des données à la station de Sidi Ali Benyoub et son importance dans l'étude, nous allons y construire des hydrogrammes de projet suivant la procédure de l'HSMF décrite au chapitre V.

a.1 Structure de la crue (crue moyenne)

Après avoir normé les débits de crue observés sur trente-trois (33) événements tous ayant un débit de pointe supérieur à $100 \text{ m}^3/\text{s}$, il nous a semblé que les hydrogrammes sont assez réguliers et également assez "pointus". Les crues se développent sur une durée d'environ 12 heures, avec une montée brutale de l'ordre de 2 heures, la décrue est

également brutale et suit assez bien une exponentielle. Il s'agit quasiment d'hydrogrammes unitaires (ce qui paraît de bonne augure pour la phase de modélisation) voir figure 53.

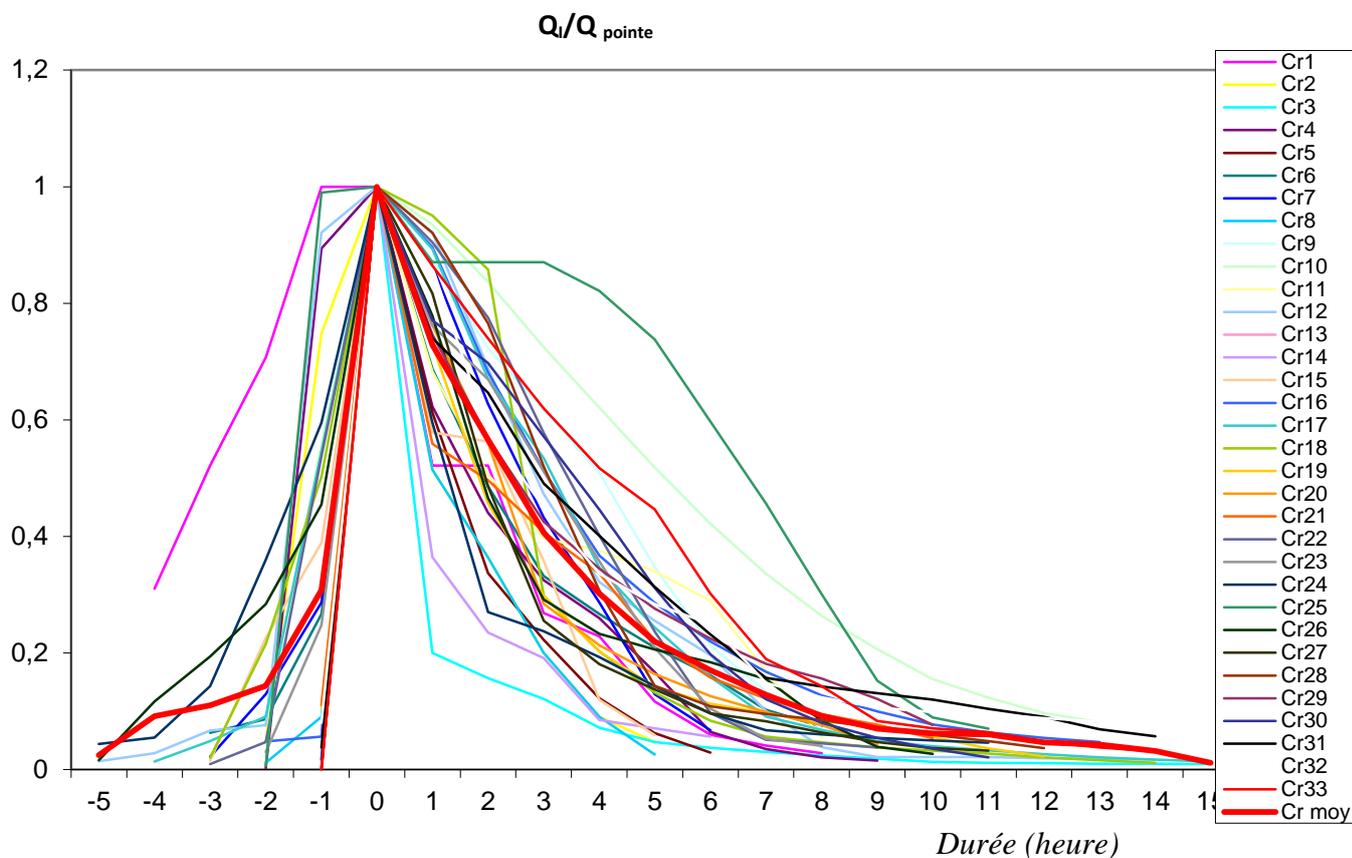


Figure 53: Structure de la crue à la station Sidi Ali Benyoub.

a.2 Construction des courbes QdF et de l'HSMF à la station Sidi Ali Benyoub

Les courbes QdF ont été construites suivant la méthodologie décrite au chapitre V. Le dépouillement des crues a été fait selon la procédure: Calcul, pour chaque durée (1,2,3,4,5,6....16heures) un débit seuil Qd, par la suite, ces séries de débits seuils ont été ajustés à la loi statistique de Gumbel pour chaque durée (annexe 6). Les courbes QdF obtenues et leurs formules globales sont représentées sur la figure 54:

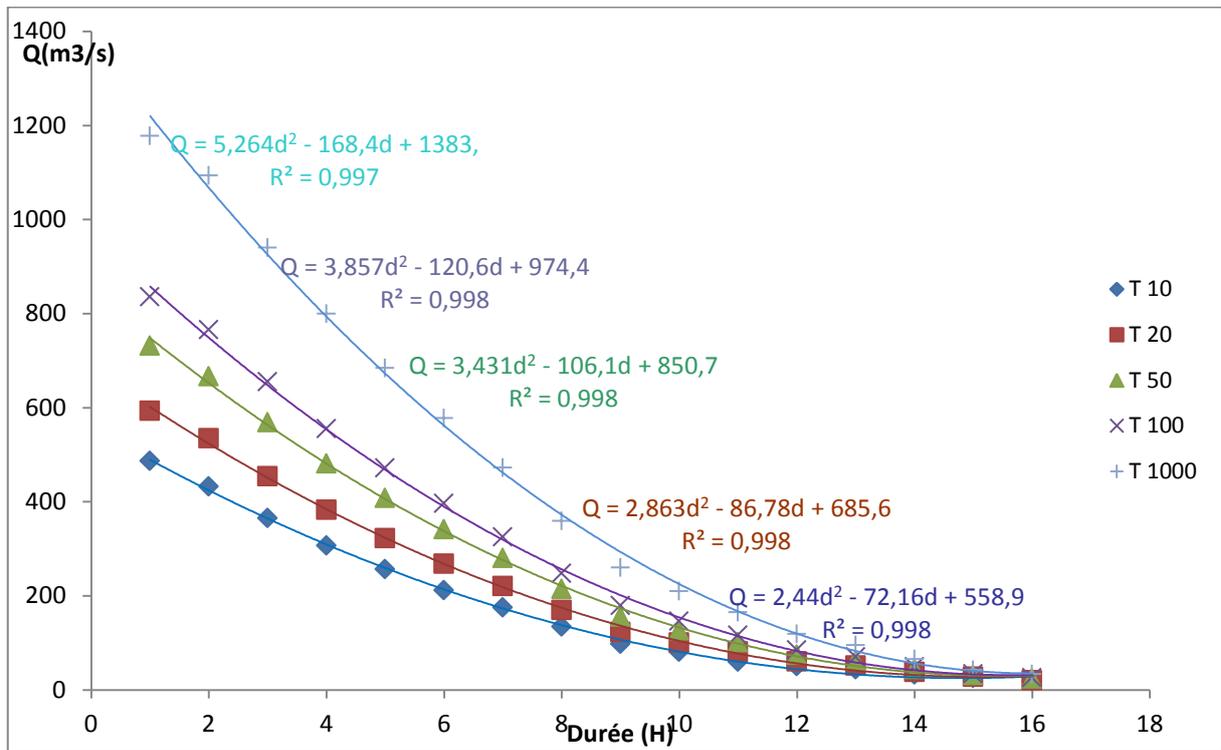


Figure 54 : Courbes QdF de la station Sidi Ali Benyoub.

Les courbes QdF construites, toutes les données sont réunies pour la construction des HSMF. La figure 55 accompagnée du tableau 13, représentent ces hydrogrammes pour les périodes de retour respectives de 10, 20, 50, 100 et 1000.

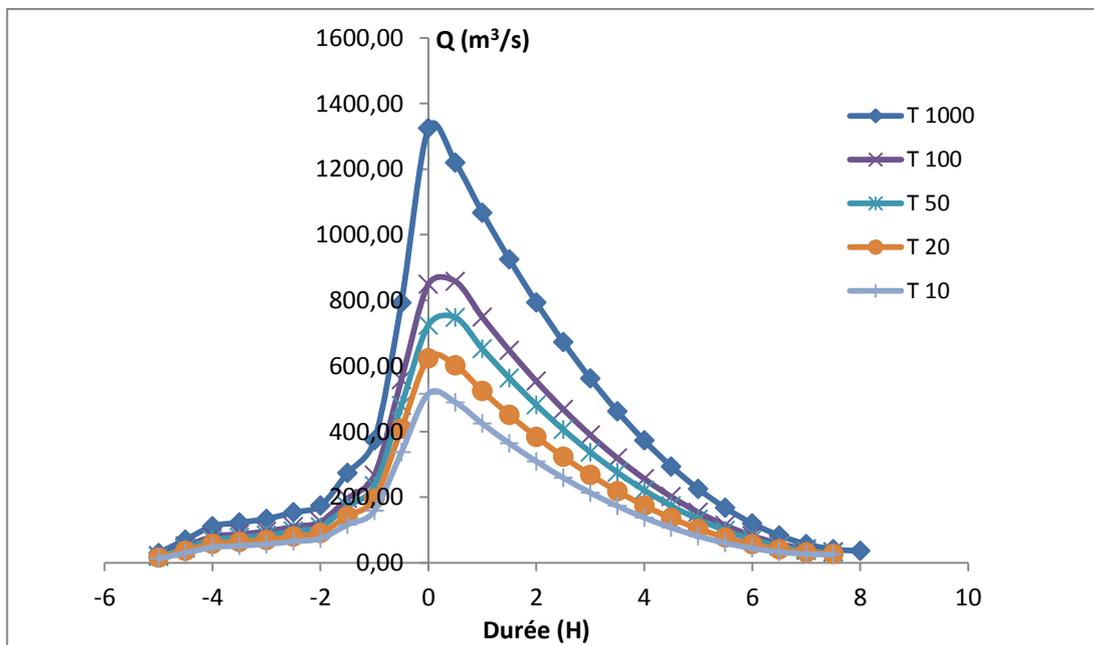


Figure 55: Hydrogrammes synthétiques Mono-Fréquence de la station Sidi Ali Benyoub

Tableau 13 : ajustements statistiques des débits de pointes pour les station de Sidi Ali Benyoub.

temps (h)	1000 ans	100 ans	50 ans	20 ans	10 ans
-5	30,12	21,54	18,94	15,70	30,09
-4,5	70,79	50,63	44,52	36,90	47,38
-4	111,48	79,72	70,11	58,11	52,16
-3,5	122,73	87,77	77,19	63,98	56,95
-3	134,00	95,82	84,27	69,85	65,52
-2,5	154,17	110,25	96,96	80,37	74,10
-2	174,35	124,68	109,65	90,89	116,38
-1,5	273,83	195,82	172,21	142,75	158,66
-1	373,31	266,97	234,78	194,61	336,98
-0,5	792,90	557,94	479,55	408,84	515,31
0	1324,29	848,90	724,32	623,07	489,18
0,5	1219,86	857,657	748,031	601,68	424,34
1	1067,256	748,628	652,224	523,49	364,38
1,5	925,176	647,313	563,279	451,03	309,3
2	793,624	553,712	481,196	384,29	259,1
2,5	672,6	467,825	405,975	323,28	213,78
3	562,104	389,652	337,616	267,99	173,34
3,5	462,136	319,193	276,119	218,43	137,78
4	372,696	256,448	221,484	174,59	107,1
4,5	293,784	201,417	173,711	136,48	81,3
5	225,4	154,1	132,8	104,1	60,38
5,5	167,544	114,497	98,751	77,443	44,34
6	120,216	82,608	71,564	56,512	33,18
6,5	83,416	58,433	51,239	41,307	26,9
7	57,144	41,972	37,776	31,828	25,5
7,5	41,4	33,225	31,175	28,075	-
8	36,184	-	-	-	-

b. Pluie de projet sur le faciès plaine

Parmi les stations pluviographiques dont nous disposons, nous avons sélectionné celle qui paraissait la plus riche en événements c'est-à-dire la station de Taftamène. Cette station a servi à l'extraction des intensités de pluies maximales pour tenter la construction de courbes IDF. L'analyse IDF de cette station a été abandonnée à cause des résultats obtenus qui ne s'ajustent pas à la distribution exponentielle bien connue des courbes IDF. Ces résultats sont expliqués par le manque de mesures pluviographiques sur les événements extrêmes.

Suite à cela, nous étions obligés de nous rabattre sur une solution empirique, celle-ci est très appliquée en Algérie dans ce cas de figure. Il s'agit de l'équation de K.BODY (chapitre V). Elle sera appliquée aux stations pluviométriques :

- Tabia
- Lamtar
- Sidi Bel Abbès
- Sidi Ali Benyoub

Les résultats sont représentés dans le tableau 14

Tableau 14 : caractéristiques pluviométriques pour les quatre stations d'étude.

station	Tabia	Lamtar	Sidi Bel Abbès	Sidi Ali Benyoub
Code	110322	110310	110305	110201
Moyenne	39.4	40.8	35.7	38.2
Coef variation	0.29	0.29	0.32	0.42
B	0.34	0.37	0.33	0.35

B : exposant climatique.

Les moyennes journalières interannuelles calculées sur plusieurs années donnent des valeurs semblables pour les quatre stations de mesure.

Courbes IDF pour la station de Tabia

Tableau 15 : Valeurs des intensités maximales en fonction de la durée et du temps de retour

Durée (min)	Période de retour						
	2ans	5ans	10ans	20ans	50ans	100ans	1000ans
6	163	207.1	234.75	260.25	292.33	315.91	392.4
15	89	113.12	128.22	142.15	159.67	172.55	214.33
30	56.3	71.59	81.15	89.96	101.05	109.21	135.65
60	35.1	45.31	51.35	56.94	63.95	69.11	85.85
120	22.5	28.67	32.5	36.03	40.47	43.74	54.33

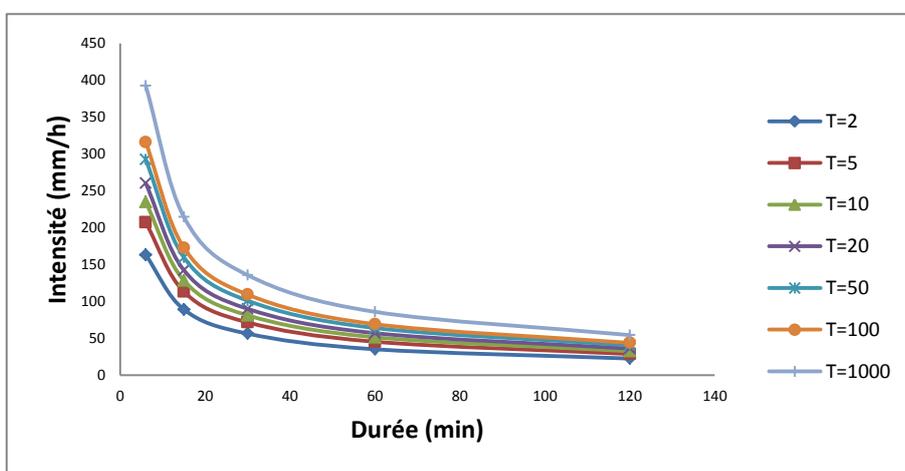


Figure 56: courbes intensité durée fréquence pour la station Tabia selon la méthode K.BODY.

Courbes IDF pour la station de Lamtar

Tableau 16 : valeurs des intensités maximales en fonction de la durée et du temps de retour

Durée (min)	Période de retour						
	2ans	5ans	10ans	20ans	50ans	100ans	1000ans
6	143.27	181.94	206.23	228.64	256.82	277.54	344.73
15	80.43	102.15	115.78	128.37	144.19	155.82	193.54
30	51.97	66	74.82	82.95	93.17	100.68	125.06
60	33.58	42.65	48.35	53.6	60.2	65.06	80.81
120	21.7	27.56	31.24	34.63	38.9	42.04	52.22

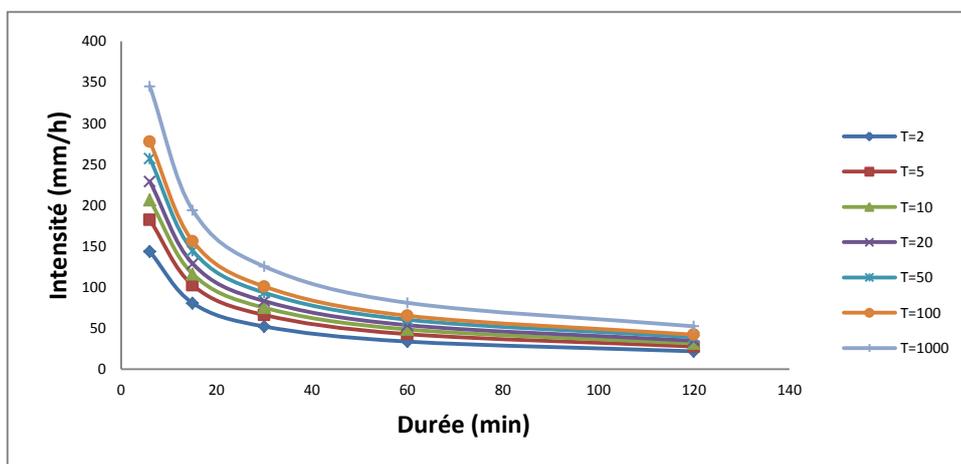


Figure 57: Courbes intensité durée fréquence pour la station Lamtar selon la méthode K.BODY.

Courbes IDF pour la station de Sidi Bel Abbès

Tableau 17 : valeurs des intensités maximales en fonction de la durée et du temps de retour

Durée (min)	Période de retour						
	2ans	5ans	10ans	20ans	50ans	100ans	1000ans
6	154.78	201.26	230.97	258.69	293.93	320.01	406.19
15	83.77	108.93	125.01	140.01	159.08	173.24	219.84
30	52.65	68.46	78.57	88	99.99	108.88	138.17
60	33.09	43.03	49.38	55.31	62.84	68.43	86.84
120	20.8	27.04	31.04	34.76	39.5	43.01	54.58

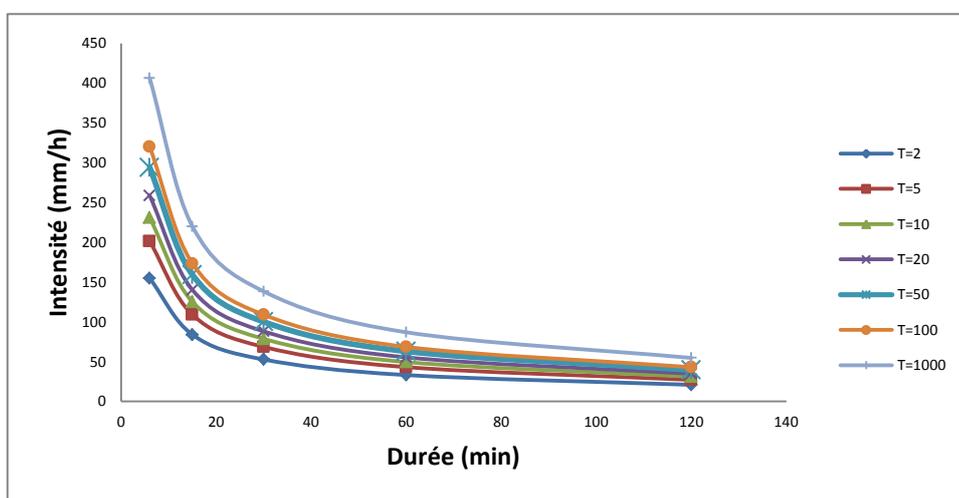


Figure 58: Courbes intensité durée fréquence pour la station Sidi Bel Abbès selon la méthode K.BODY.

Courbes IDF pour la station de Sidi Ali Benyoub

Tableau 18 : valeurs des intensités maximales en fonction de la durée et du temps de retour

Durée (min)	Période de retour						
	2ans	5ans	10ans	20ans	50ans	100ans	1000ans
6	143.68	201.66	240.89	278.84	328.82	367.07	499.23
15	79.2	111.16	132.79	153.71	181.26	202.34	275.2
30	50.47	70.84	84.62	97.96	115.51	128.95	175.38
60	32.17	45.15	53.93	62.43	73.61	82.17	111.76
120	20.5	28.77	34.37	39.78	46.91	52.37	71.22

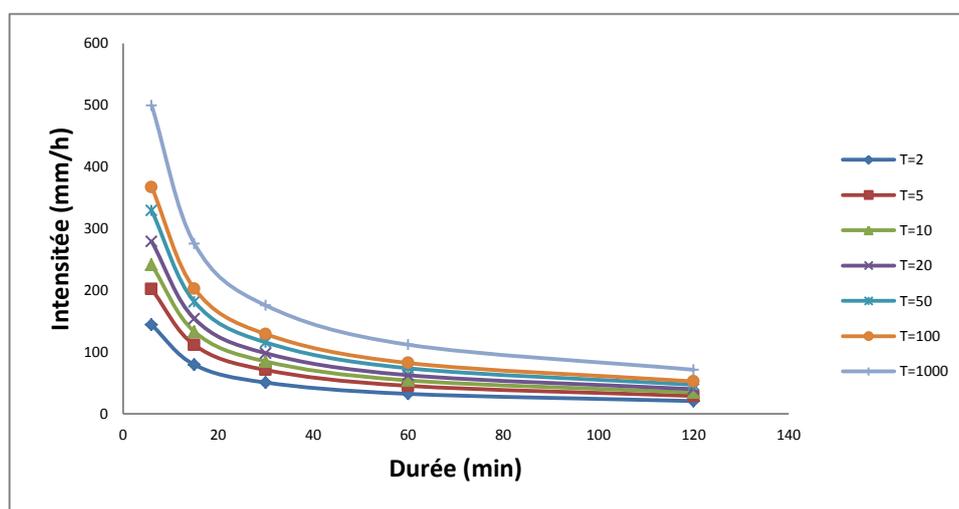


Figure 59: Courbes intensité durée fréquence pour la station Sidi Ali Benyoub selon la méthode K.BODY.

A partir de ces courbes IDF nous tirons le hyétogramme de projet pour chaque sous bassin situé sur la plaine. Comme pour l'étude de la prévision opérationnelle des crues, nous allons pondérer l'influence de chaque station sur les sous bassins suivant la méthode des polygones de Thiessen (fig.60).

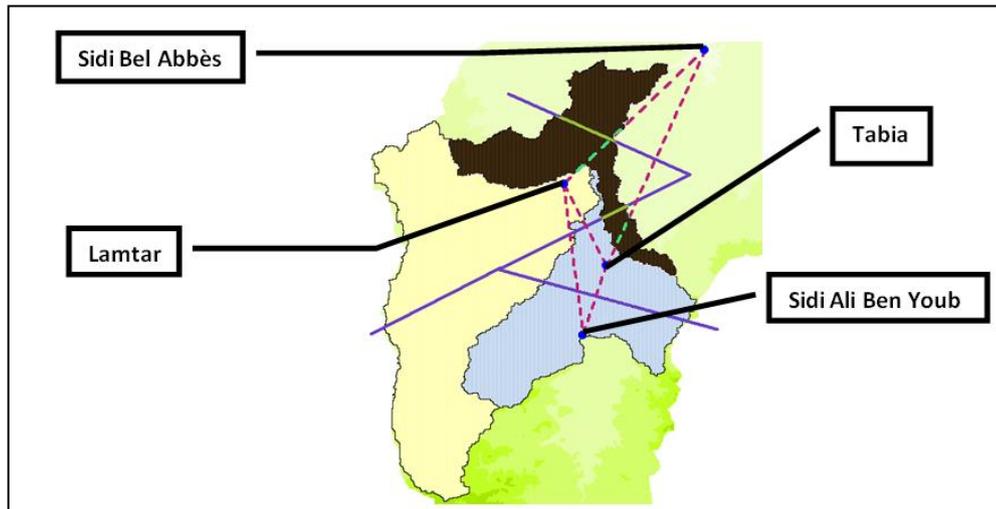


Figure 60 : Aires affectées à chaque pluviomètre selon la méthode des polygones de Thiessen.

VI.2.4.3 Calage du modèle sur le faciès « plaine »

Nous essayerons de façon classique, de caler les différentes fonctions de production, de transfert et de cheminement sur des valeurs mesurées. Il y a deux composantes participantes à l'évolution de l'hydrogramme de la crue de projet:

- L'hydrogramme produit sur les deux zones amont définis par l'HSMF à Sidi Ali Benyoub. Nous voulons estimer son cheminement jusqu'à l'effluence entre les deux oueds Mekerra et Mouezen.
- L'hydrogramme produit à la zone « plaine », nous calerons un modèle pluie-débit dont l'évolution de l'hydrogramme sera étudié jusqu'à la station hydrométrique la plus en aval du faciès plaine à savoir la station de Sidi Bel Abbès (fig.53).

En faisant la somme de ces deux hydrogrammes, nous arriverons à l'hydrogramme de projet sur lequel se baseront les simulations pour étudier le comportement de l'oued Mekerra.

a. Calage de la fonction de cheminement entre les stations de Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbès

Parmi les fonctions de cheminement adaptées au transfert en plaine et présentées sur le HEC HMS, nous avons présenté celle de Muskingum-Cunge (chapitre V). Elle représente l'atténuation de l'onde de crue et peut être employée dans les extensions avec une petite pente.

La forme de l'extension peut être représentée de différentes manières ; nous avons choisi celle qui représente le mieux les caractéristiques de forme (moyenne) pour chaque extension à savoir : la coupe en travers à huit (08) points (voir -V.8.2-), celle-ci prend en charge la combinaison lit mineur-lit majeur d'un cours d'eau. Les caractéristiques de formes pour chaque extension ont été tirées à partir de photographies aériennes, via le server Google Earth comme cela est montré à la figure 61.

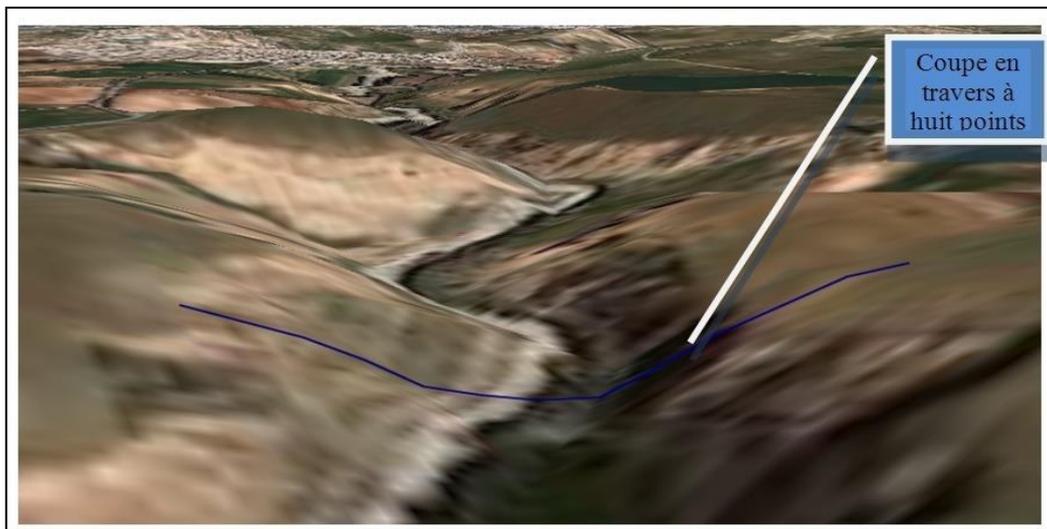


Figure 61: Choix d'une section moyenne pour la forme de la coupe en travers d'un tronçon de l'Oued Mekerra (Google Earth pro, 2018).

Nous avons calé la fonction de cheminement sur des événements extrêmes mesurés sur les deux stations de Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbès. Vu que la station de Sidi Bel Abbès présente une mauvaise qualité de mesures des forts débits; nous n'avons exploité comme caractéristique de l'hydrogramme de crue que le temps de base. En effet, la fonction de cheminement est relative à la vitesse de transfert de l'hydrogramme et à son atténuation par le laminage sur la plaine, ce qui rend le temps de base une caractéristique suffisante pour le calage des paramètres de la fonction de cheminement. Le calage a été effectué sur cinq (05) événements extrêmes qui présentaient un débit de pointe supérieur à $100\text{m}^3/\text{s}$ sur la station de Sidi Ali Benyoub.

Les résultats du calage sont ceux représentés sur le tableau 19, celui-ci a été effectué sur la simple visualisation des temps de base des hydrogrammes observés et simulés à la station de Sidi Bel Abbès :

Tableau 19 : récapitulatif des caractéristiques des extensions de cheminement entre les stations de Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbès.

Extension	Longueur (m)	pente moyenne	coefficient de Manning (estimé)
Sidi Ali Benyoub-Tabia	6400	0.0065	0.15
Tabia-Sidi Khaled	13660	0.0065	0.15
Sidi Khaled-AmontSBAville	13930	0.0034	0.16
AmontSBAville-Station SBA	9150	0.0036	0.18

Les résultats élevé du coefficient de Manning peuvent essentiellement s’expliquer par l’effet du laminage qui ralentie considérablement les vitesses d’écoulement. L’augmentation de ce même coefficient en se dirigeant vers l’aval a été introduite volontairement pour intégrer l’effet de l’urbanisation croissante au fil du cours d’eau suivant la même direction, elle est la cause elle aussi du ralentissement de la vitesse d’écoulement et donc on l’intègre dans le calage de ce paramètre.

Les résultats graphiques de calage pour les différents évènements sont représentés en annexe7.

b. Calage de la fonction de production sur la plaine alluviale

Pour le calage de cette fonction ainsi que la fonction de transfert, il nous faudrait une station hydrométrique à l’aval de la zone « plaine » comme la station de Sidi Bel Abbès ; seulement cette dernière ne peut être utilisée pour ce genre d’exercice. Pour y remédier nous avons décidé d’utiliser le caractère : homogénéité géologique et pédologique de la plaine, en calant le modèle sur le sous bassin « B (oued Mouezen) » (fig.53) et ainsi pouvoir extrapoler les paramètres calés à l’ensemble de la zone « plaine ».

A l’exutoire du sous bassin « B (oued Mouezen) », nous trouvons la station limnimétrique de Lamtar pour laquelle nous disposons de données moyennes journalières qui nous permettrons de caler notre modèle pluie-débit. À côté, nous disposons de deux pluviographes [Taftamène et Lamtar] situés à l’intérieur du sous bassin et dont les enregistrements seront l’entrée de notre modèle. L’analyse sur le sous bassin « B (Oued Mouezen) » porte sur une sélection de crues suffisamment bien documentées pour obtenir une évaluation correcte du calage des paramètres du modèle.

Comme pour l'étude du modèle de prévision opérationnelle, nous nous sommes intéressés aux conditions d'humidité antécédentes en calculant l'indice IPA. Pour le calcul de l'IPA, nous admettons un coefficient de récession k égal à 0.95. Pour chaque épisode, il a été retenu une moyenne des deux stations disponibles influençant le sous bassin. Le tableau 20 est un résumé des résultats obtenus :

Tableau 20 : les principaux résultats obtenus lors de l'analyse pluie-débit.

Date	Précipitations				Débit (m ³ /s) Moyen jour	Approche SCS CN
	Source pluie	Durée (heures)	Pluie (mm)	IPA (mm)		
03.10.1987	Pg:Poly.Thies	7	16.585	5.83	0.006	47.446
15.03.1991	Pg:Poly.Thies	6	11.62	39.43	2.69	78.52
30.09.1994	Pg:Poly.Thies	5	12.75	38.75	12.7	60.62
05.02.1996	Pg:Poly.Thies	12	2.1225	26.56	0.026	79.716

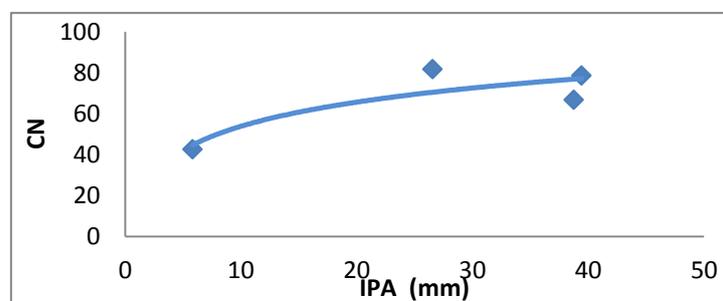


Figure 62: Evolution de CN en fonction de l'IPA.

La comparaison de ces CN avec les conditions de pluviométrie antécédentes (IPA) fait clairement apparaître la différence de comportement suivant le degré de saturation du sol. On admet, comme scénario représentatif des crues rares avec un CN de l'ordre de 60.

La simulation effectuée avec le HEC HMS (combinaison des hydrogrammes des trois faciès) pour une période de retour de cent (100) ans a donné les hydrogrammes représentés sur la figure 63.

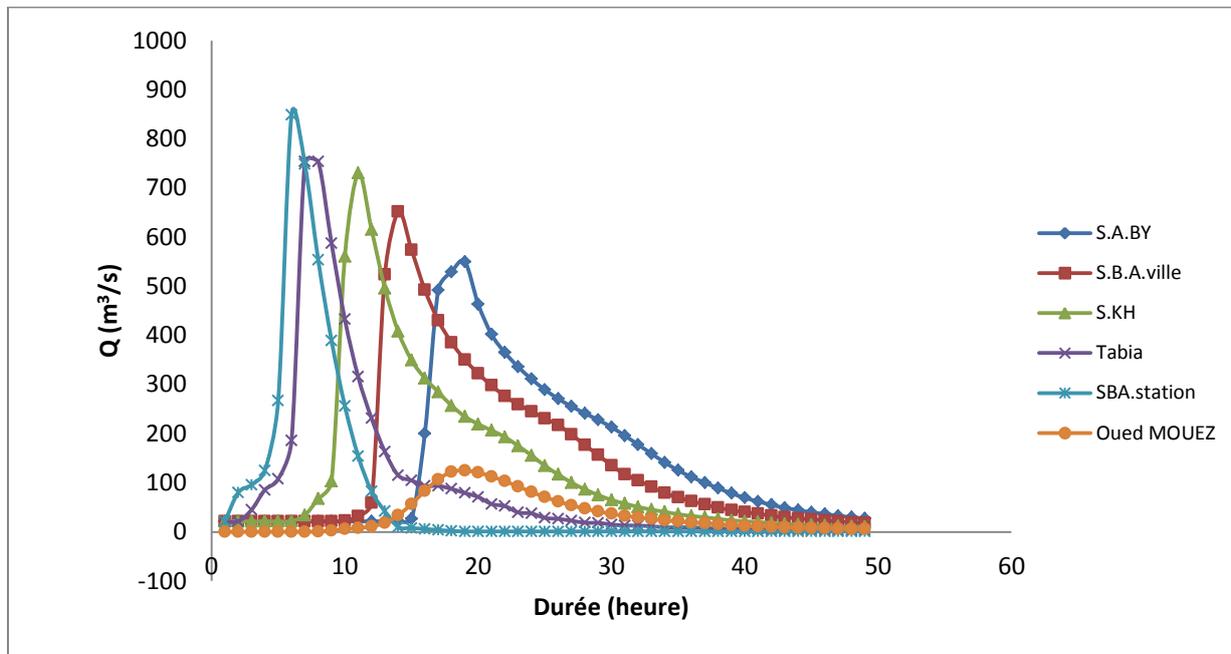


Figure 63: Crue de projet selon modélisation ($T=100$ ans).

De ces hydrogrammes on constate l'atténuation continue de la crue centennale depuis Sidi Ali Benyoub jusqu'à la ville de Sidi Bel Abbès. Aussi l'affluence de l'oued Mouezen augmente du volume de la crue au niveau de Sidi Khaled (S.KH) (fig.64). L'hydrogramme au niveau de Sidi Khaled sera par la suite, avec la géomorphologie de l'oued Mekerra, l'une des entrées du modèle hydraulique pour la cartographie de la zone inondable au niveau de la ville de Sidi Bel Abbès (chapitre VII).

VI.2.5 Impact des aménagements sur l'hydrogramme de projet centennal

Plusieurs aménagements ont été mis en place pour la protection de la ville de Sidi Bel Abbès et des localités avoisinantes. La crue centennale dont nous avons estimé l'hydrogramme au titre précédent a été prise comme référence pour étudier l'impact des aménagements hydrotechniques mis en place pour la protection des agglomérations avales. Sur le HEC HMS, c'est le même schéma que celui adopté pour l'élaboration de la crue de projet auquel ont été intégrés les éléments suivants (fig.64):

- **Bifurcation** : sur la base d'une loi débit amont-débit dérivé, la bifurcation est utilisée pour représenter la sous capacité chronique du lit de la Mekerra dans la plaine de Sidi Bel Abbès ; elle conceptualise l'ouvrage de dérivation des eaux par le sud depuis l'amont de Sidi Bel Abbès
- **Retenues** : leurs capacités de laminage permettent de représenter les phénomènes d'atténuation et la lente propagation des crues dans les zones inondables. Ces

éléments sont associés au modèle pour étudier l'impact du barrage écrêteur de Tabia et la zone d'épandage sur l'oued Mouezen.

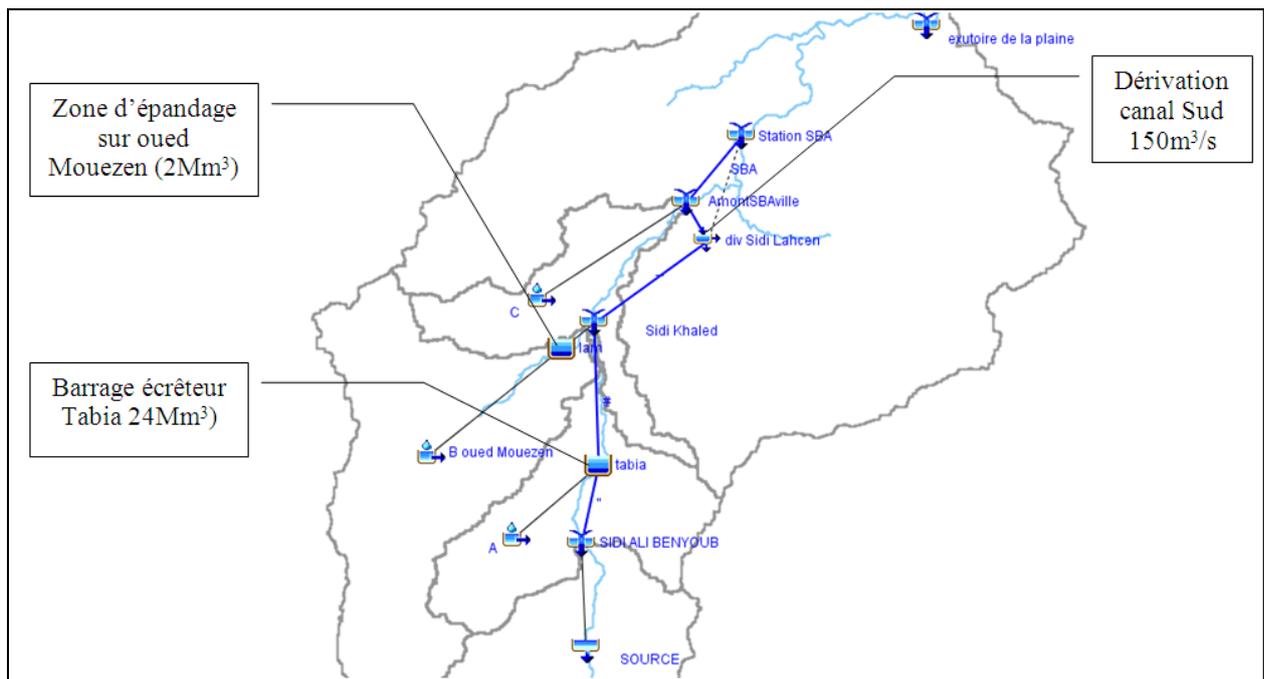


Figure 64: Schéma général du modèle hydrologique intégrant les aménagements de protection

a. Barrage retenu à Tabia (barrage écrêteur)

C'est l'ouvrage de protection le plus important, il s'agit d'un barrage écrêteur de crue permettant de ramener le débit rejeté en aval à $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce barrage a les caractéristiques suivantes :

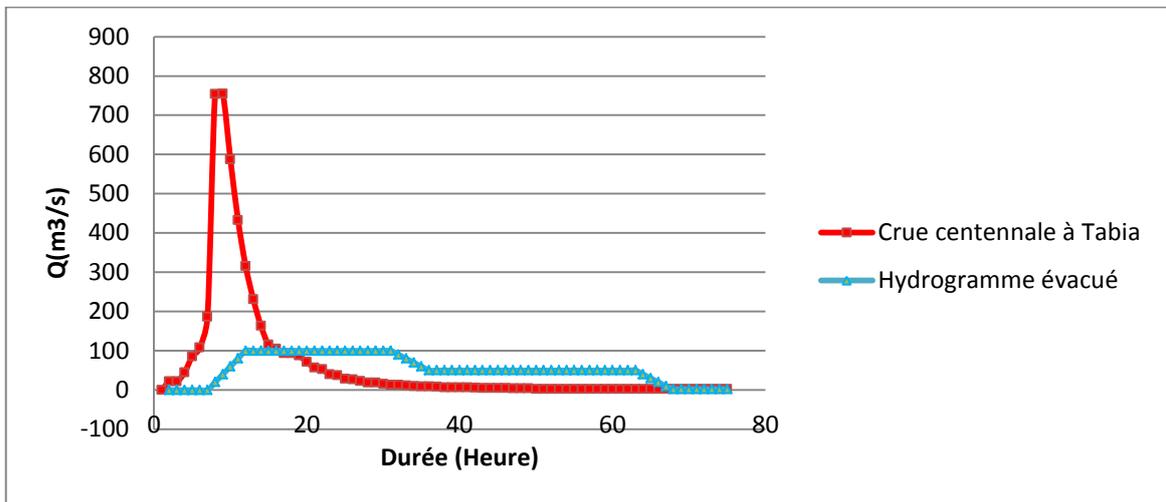
- Crête de digue à la côte 613m
- Digue zonée en terre avec noyau étanche et protection amont en enrochements
- Largeur en crête = 5 m
- Fruit total (amont et aval) = 4.4/1
- Evacuateur de crue en rive gauche, largeur 50 m, longueur 220 m
- Vidange de fond de 2 x 3 m, longueur 120 m.



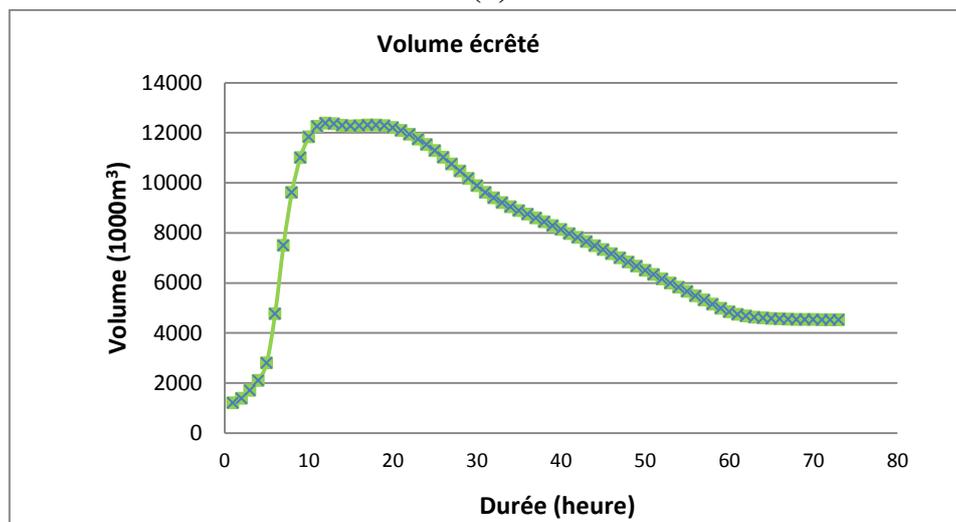
Figure 65: Image du barrage écrêteur de Tabia (source : <http://www.dknews-dz.com>).

La capacité de ce barrage est d'environ 25 millions de m^3 , avec un volume mort de 1,2 millions de m^3 . La vidange de fond qui présente le principal organe d'évacuation à une capacité de 100 m^3/s et enfin l'évacuateur de crue quant à lui peut débiter jusqu'à 350 m^3/s .

La simulation sur le comportement de la crue centennale en présence de ce barrage est montrée sur la figure 66.



(a)



(b)

Figure 66: Impact du barrage Tabia sur l'hydrogramme de crue centennale.

L'effet de cet ouvrage est clairement démontré si on compare les deux hydrogrammes bleu et rouge. On remarque que le volume écrêté atteint seulement la moitié de la capacité totale du barrage (graphique vert) ce qui laisse une sérieuse marge de sécurité pour des crues de fréquences plus rares (principe sécuritaire).

b. Zone d'épandage de l'oued Mouezen

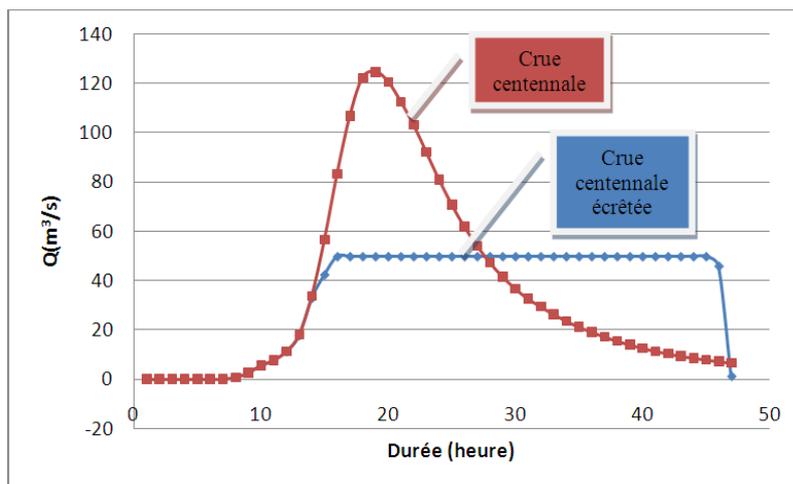
Cet aménagement est particulièrement intéressant car il permettrait d'écrêter la pointe de l'hydrogramme de crue de l'oued Mouezen. Le débit de pointe centennal de l'oued Mouezen est estimé à $120 m^3/s$ et pourraient être réduit à $50 m^3/s$ par l'effet de cette retenue. Cet ouvrage à son importance du fait que les crues importantes de l'oued Mouezen ne sont pas écrêtées par le barrage à Tabia. Les caractéristiques de stockage et

d'évacuation sont : Une capacité de 2 millions de m^3 pour un débit d'évacuation de 50 m^3/s

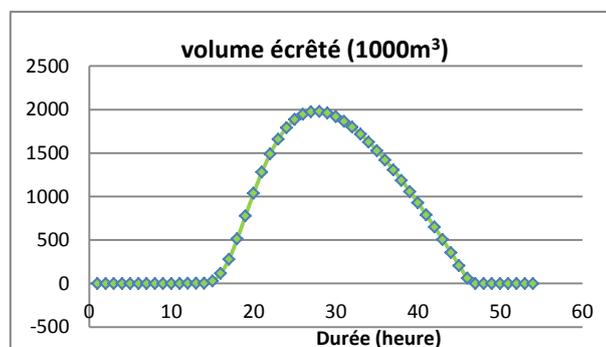


Figure 67: Zone d'épandage sur l'oued Mouezen et ouvrage d'écrêtement.

Les résultats de simulation sur l'oued Mouezen pour une crue centennale donnent les résultats montrés à la figure 68.



(a)



(b)

Figure 68: impacte de la zone d'épandage sur la crue centennale de l'oued Mouezen.

Cet ouvrage a le même effet que le barrage Tabia. Il est à remarquer, cependant, que pour une crue centennale la capacité maximale de la retenue est atteinte, et peut représenter un danger en cas de crue plus importante, cela créera exactement l'effet inverse de celui pour lequel il a été mis en place.

c. Ouvrage de dérivation des eaux par le sud depuis l'amont de Sidi Bel Abbès

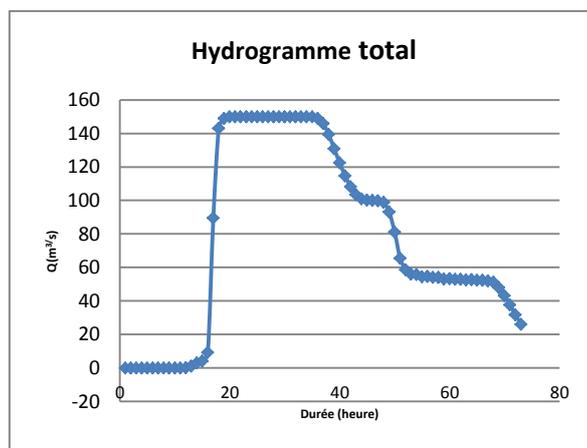
Il s'agit du dernier ouvrage avant d'arriver à la ville de Sidi Bel Abbès. La capacité des ouvrages de traversée de la ville (estimées à 50 m³/s) reste inférieure aux débits de l'hydrogramme centennal même écrêté à l'amont. Aussi, les possibilités d'accroissement de la capacité de l'oued dans la traversée de Sidi Bel Abbès sont rapidement limitées du fait que le lit moyen de l'oued est fortement urbanisé.

Dans ces conditions, la création d'un ouvrage de dérivation permettant de faire transiter les eaux excédentaires depuis l'amont de la zone urbaine jusqu'à son aval a été une des solutions intéressantes et nécessaires pour assurer la protection contre les crues. Un canal périphérique a été creusé dans la partie Sud de Sidi Bel Abbès suite aux inondations de 1994 qui ont affecté la ville et a connu un recalibrage en 2004 atteignant ainsi une capacité de 150m³/s sur un linéaire de 6700 m. Il a pour fonction de collecter une partie des débordements amont de l'oued Mekerra et les apports des différents petits bassins versants sud, puis de les évacuer vers l'oued Mellah qui conflue avec l'oued Mekerra à l'aval de l'agglomération de Sidi bel Abbès.

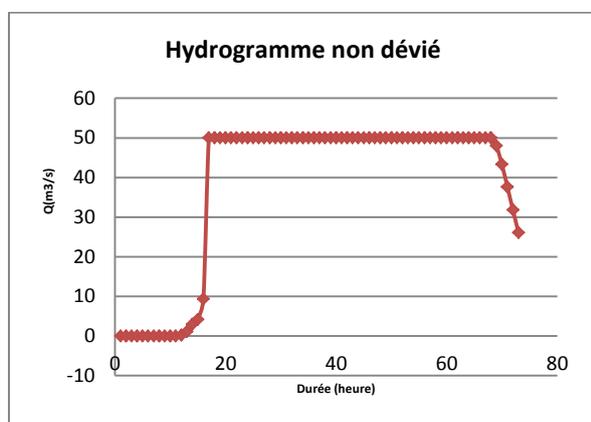


Figure 69: Dérivation de l'oued Mekerra (canal sud).

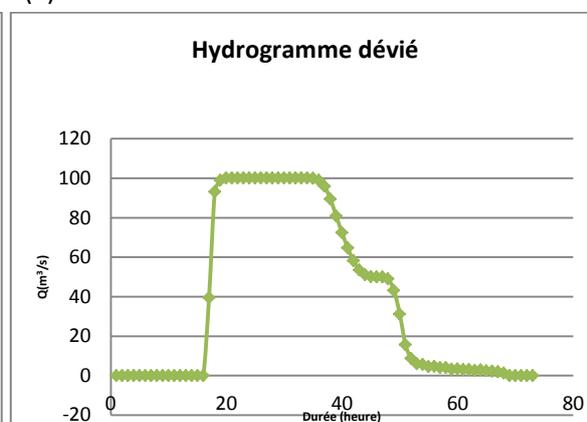
Le résultat de simulation de la crue centennale écrêtée sur cet ouvrage donne les résultats présentés à la figure 70.



(a)



(b)



(c)

Figure 70: Résultats de simulation de la crue centennale écrêtée sur les ouvrages amonts et arrivant à la dérivation sud.

Les résultats obtenus à partir de la simulation démontrent que cet ouvrage est indispensable même en cas d'écrêtage à l'amont de la ville de Sidi Bel Abbès et que sa capacité de transit est surdimensionnée.

Chapitre VII

MODÉLISATION HYDRAULIQUE DE L'OUED MEKERRA ET CARTOGRAPHIE DE LA ZONE INONDABLE DE LA VILLE DE SIDI BEL ABBÈS

CHAPITRE VII: MODELISATION HYDRAULIQUE DE L'OUED MEKERRA ET CARTOGRAPHIE DE LA ZONE INONDABLE DE LA VILLE DE SIDI BEL ABBES.

VII.1 Introduction

Parmi les nombreuses caractéristiques des inondations, leur grande variabilité spatiale, leur magnitude et la difficulté d'en prévoir les conséquences moyennes à long terme qui compliquent la tâche des aménagistes. Une forme cartographique de ces risques aiderait les planificateurs dans leur travail en leur donnant une idée sur les conséquences des inondations futures sur les bâtiments et infrastructures actuelles et potentielles situées dans la plaine inondable. Les méthodes de cartographie qu'on retrouve sont conçues pour représenter la probabilité de certains événements. Pour le cas de Sidi Bel Abbès des aménagements ont été possibles à l'amont. Mais il existe des cas où les solutions technico-économiques de luttés sont très limitées (coût élevé, contrainte techniques...), il est nécessaire dans ces cas d'identifier les zones à risques pour faire de la planification. Dans ce qui suit, nous présentons un moyen déjà adopté par plusieurs pays pour se prémunir contre les dégâts causés par les inondations. Pour y parvenir ces pays ont recours à la modélisation hydraulique pour connaître les champs d'extensions de ces inondations.

Nous présenterons ce qu'est la modélisation hydraulique, quelles sont les différents types de modèles hydrauliques et dans quelles conditions ces modèles peuvent donner de bon résultats. Dans le chapitre VI nous avons déjà définis la crue de projet qui l'une des données nécessaire au modèle hydraulique. Par la suite, la géomorphologie de la zone doit être décrite. Dans le cas de la plaine de Sidi Bel Abbès, les données sur la géomorphologie ne sont que partiellement présentes, pour cette raison, nous avons dû trouver une alternative qui a été testée et validée.

VII.2 Etat de l'art

Cet état de l'art a pour objectif de faire le point sur l'importance des données topographiques pour les modèles d'hydraulique des cours d'eau, puis de passer en revue ces différents modèles et leurs incertitudes pour enfin voir comment sont étudiés actuellement les principaux paramètres de fonctionnement des cours d'eau.

VII.2.1 Modèle hydraulique et données topographiques

Les données topographiques constituent le socle sur lequel se construisent toutes les modélisations hydrauliques des cours d'eau. Il est donc primordial d'être particulièrement vigilant à la façon de les acquérir. Plusieurs travaux mettent en évidence l'importance de la précision des données topographiques : Un modèle de terrain numérique haute résolution est nécessaire pour extraire les détails de la topographie des canaux pour une simulation hydraulique fiable (Sarhadi *et al.*, 2012). De nombreuses études ont examiné la performance HEC-RAS avec un MNT haute résolution extrait à partir de données LiDAR et SAR (Schumman, 2007 ; Aggett et Wilson, 2009 ; Chen et al., 2009). Casas et al. (2006) cité par Geoffroy (2007) met en avant la précision topographique comme le « facteur le plus critique » lors des études de modélisation hydraulique. Ces derniers auteurs ont testé différentes topographies sur un tronçon de cours d'eau de 2 km en faisant varier différents paramètres (coefficient de Manning-Strickler et débit). Ils comparent les résultats (extension spatiale de la crue et hauteur moyenne de la surface libre) à partir d'une topographie de référence définie grâce à un levé terrestre au GPS et un levé bathymétrique.

L'analyse de sensibilité qu'a effectué Casas et al. (2006) cité par Geoffroy (2007) sur les coefficients de Manning met en avant l'idée selon laquelle plus le débit est important moins le modèle est sensible aux variations de ces coefficients.

Bien que les MNT hautes résolutions facilitent la paramétrisation topographique des modèles hydrauliques et améliorent la fiabilité du modèle, elles ne sont actuellement disponibles que pour un nombre limité de rivières, c'est le cas pour l'oued Mekerra. L'alternative proposée assimile le lit mineur de l'oued à un canal trapézoïdal. Le lit majeur, quant à lui, est repris par un MNT moyenne résolution. La méthode de construction du MNT haute résolution est détaillée dans la partie VII-4 de ce chapitre.

VII.2.2 Les différents modèles hydrauliques de rivières

Cet aspect est intimement lié au précédent puisque les données topographiques forment l'ossature du modèle géométrique utilisé pour les modélisations. Une recherche des caractéristiques des principaux modèles existants en hydraulique fluviale avec leurs atouts et leurs limites est donc nécessaire.

Dans le cas d'un écoulement en cours d'eau naturel, on parle d'écoulements en lits composés (lits mineur et majeur) où les caractéristiques vitesses, hauteur d'eau, rugosité varient suivant les lits (Debiane, 2008). L'interface entre les lits est primordiale, elle est la source de la majorité des incertitudes pour la simulation des écoulements débordants. On identifie de fortes pertes de charges dans cette zone et dans la couche limite (interface entre le fond de la rivière et le fluide) :

- a) Pertes par frottement et microturbulences au fond du cours d'eau,
- b) Pertes dues aux macroturbulences issues de la différence de vitesse entre les lits,
- c) Pertes par transfert de quantité de mouvement entre les lits.

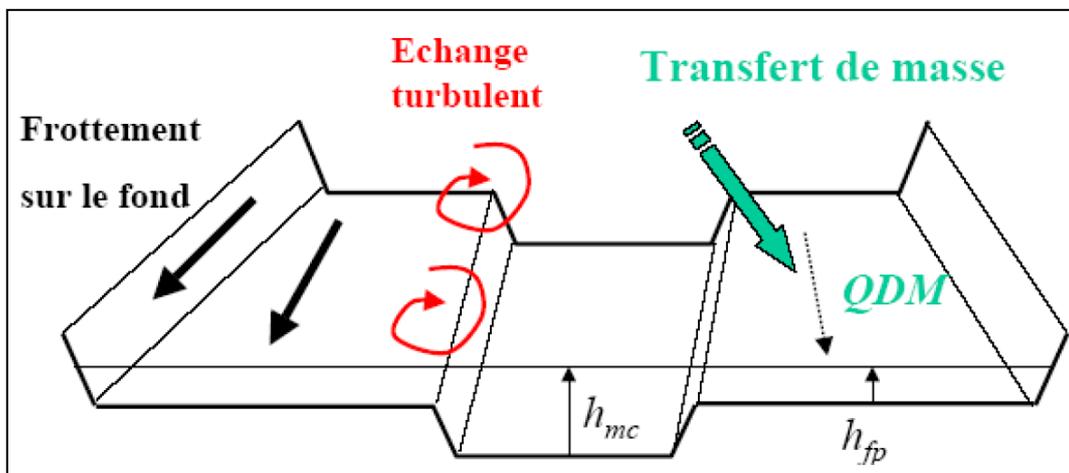


Figure 71: Différentes pertes de charge dans un écoulement en lit composé (source : Proust, 2005). QDM.

La plupart des modèles unidimensionnels (1D) à lits composés prennent en charge les pertes (a) comme HEC RAS -1D), d'autres tentent de prendre en charge (a) et (b) comme Mage5 (Ghavasieha et al., 2006) et les plus évolués cherchent à simuler les trois pertes comme Axeriv.

La caractéristique principale des codes 1D est qu'ils moyennent la hauteur d'eau (et pour certains la vitesse) sur chaque profil en travers perpendiculaire aux lits majeur et mineur. Ceci provient de leurs structures et des équations qui les régissent : ils sont constitués d'un ensemble de profils en travers perpendiculaires aux écoulements.

Dans un modèle 1D, pour les calculs transitoires, il est possible de considérer qu'une partie du lit majeur (non active) joue le rôle de champ d'expansion et communique avec le lit actif par des lois de type seuil (noyé ou dénoyé). Ces modèles simulent alors bien

les propagations de crue sur de longues distances. Les impacts locaux ne peuvent pas être étudiés (Degoutte, 2008).

Les modèles bidimensionnels horizontaux (ou 2DH) sont libérés de cette hypothèse d'écoulement axial. Ils permettent de simuler en plan les écoulements et de tenir compte finement des obstacles dans le lit majeur (sans avoir à faire une distinction entre un lit majeur actif et un lit majeur stockant). Les équations qui régissent ces modèles sont moyennées sur la hauteur (d'où 2D-H pour 2D-hauteur) et donnent des champs de vitesse pouvant varier dans le plan mais pas sur la hauteur. Ces modèles sont intéressants mais on leur reproche d'être gourmands en temps de calcul et en données de calage-validation. Ils ne permettent pas, malgré tout, de modéliser correctement la turbulence (Proust, 2005).

Actuellement, les modèles 3D ne sont guère opérationnels, ils restent du domaine de la recherche.

L'ensemble des utilisateurs des modèles hydrauliques s'accordent à dire que les modèles bidimensionnelles qui reposent sur les mêmes hypothèses de modélisation que les modèles unidimensionnelles (sauf celle de l'axe privilégié d'écoulement), sont plus aptes lorsqu'il y a débordement du cours d'eau ou lorsque l'écoulement se fait sur des chenaux multiples. Le logiciel HEC RAS 5.0.3, libre d'accès, permet les deux types de modélisations, il est connu pour ces performances et est utilisé par nombre de firmes d'ingénieries et organismes gouvernementaux, ces deux critères nous ont motivé à l'utiliser.

VII.3 Présentation du HEC RAS

HEC RAS est un logiciel intégré pour l'analyse hydraulique qui permet de simuler les écoulements à surface libre. Il a été conçu par le *Hydrologic Engineering Center* du *U.S Army Corps of Engineers*.

HEC RAS c'est une abréviation de « Hydrologic Engineering Center's River Analysis System ». C'est un outil d'analyse de flux en canal à ciel ouvert. Il a été développé par le Centre d'ingénierie hydrologique (HEC), une organisation au sein du « US Army Corps of Engineers ». Il permet aux utilisateurs d'effectuer des simulations d'écoulement en régime permanent et en régime non permanent, il calcule aussi le transport des

sédiments. Il effectue aussi des analyses sur la qualité de l'eau, le tout associé à une représentation géométrique de la zone étudiée. L'utilisation de HEC-RAS était limitée au domaine 1D, la version 5.0 de HEC RAS, introduisant pour la première fois les fonctionnalités de modélisation de flux instationnaire en 2D (ces fonctionnalités sont appelées «HEC-RAS 2D», n'a été publié qu'en 2016. Dans ce travail nous avons utilisé la dernière version disponible qui se nomme : HEC-RAS 5.0.3.

Sur ce logiciel, chaque zone d'écoulement est configurée avec un maillage de calcul 2D et liée à d'autres éléments de modèle 1D ou 2D ainsi qu'à des conditions aux limites externes. Un modèle 2D simple peut également être configuré en utilisant une seule zone de flux 2D si cela est souhaité. Ces nouvelles capacités 2D permettent désormais au logiciel d'être utilisé pour la modélisation détaillée des canaux et des plaines inondables en 2D. Un outil SIG interne simple appelé « RAS Mapper » a également été ajouté, permettant un prétraitement de base du terrain ainsi que la visualisation et la manipulation des résultats combinés des modèles 1D et 2D.

Equations de base pour le calcul dans HEC-RAS

Sur HEC RAS les codes de calcul sont basés sur les deux équations suivantes :

1) Equation de la conservation de la masse :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + \mathbf{q} = \mathbf{0}$$

Où : t : temps ; u et v sont les composantes de vitesse dans les directions x et y respectivement et q est un terme du débit source.

2) Et l'équation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] - c_f \frac{u}{R} + fv$$

Où : u et v sont les vitesses dans les directions cartésiennes, g est l'accélération gravitationnelle, v_t est le coefficient de viscosité tourbillonnaire horizontal, c_f est le coefficient de frottement inférieur, R est le rayon hydraulique et f est le paramètre de Coriolis.

Sur ces deux équations un ensemble de simplifications est opéré du fait que dans le contexte de modélisation des canaux et des crues, on est en présence d'un écoulement en

eau peu profonde. Ces simplifications sont faites sur la base des hypothèses de l'écoulement incompressible, la densité uniforme et la pression hydrostatique négligeable. Il est supposé également que l'échelle de longueur verticale est beaucoup plus petite que l'échelle de longueur horizontale. En conséquence, la pression hydrostatique et la vitesse verticale sont faibles, ce qui conduit à la forme différentielle des équations en eau peu profonde dérivées.

VII.4. Préparation des données topographiques pour la modélisation hydraulique

Comme cité dans le titre VII.2.1, la qualité du résultat de la simulation hydraulique est fortement conditionnée par la qualité de la précision topographique. En effet, les quelques études relatives à la cartographie de la zone inondable qui ont été consultées sur ce travail, utilisent des données LiDAR ou SAR comme données topographiques haute résolution (1m). Seulement, ces données ne sont pas disponibles pour un grand nombre de cours d'eau dans le monde et la Mekerra en fait partie. Nous avons dans ce travail testé une alternative qui pourrait même être utilisée dans d'autres cours d'eau en Algérie :

- Nous avons travaillé avec un MNT de moyenne résolution (30m) issu du satellite Aster de la NASA, celui-ci est téléchargeable gratuitement sur le site <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>. Ce dernier, a été jugé suffisant pour la représentation plus ou moins précise de la topographie de la plaine de la Mekerra vu qu'elle ne représente pas en générale de changement brusque des altitudes (plaine), ce qui de notre avis, procure à la valeur de l'altitude sur le pixel une assez bonne représentativité (une altitude tous les 900m²). En revanche, ce MNT moyenne résolution n'est nullement représentative de la forme du lit mineur de l'oued étudié, la solution proposée a été de panacher d'autres sources de données topographiques telles que les levées. Ce genre de donnée n'est disponible que sur le tronçon de l'oued traversant la ville de Sidi Bel Abbès. La troisième source des données topographiques, utilisée est schématique, puisqu'elle modélise la partie de l'oued Mekerra qui va de Sidi Khaled à l'entrée de la ville de Sidi Bel Abbès en un canal trapézoïdale de dimensions moyennes mesurées in situ.

VII.4.1 Modélisation de l'oued sous forme d'un canal trapézoïdale

La création de ce canal s'est faite sur le tronçon où le levé topographique est manquant, à savoir entre Sidi Khaled (confluence entre oued Mouezen et oued Mekerra)

et l'amont de la ville de Sidi Bel Abbès. Cette création a été réalisée à l'aide de l'outil SIG et le programme Google Earth, elle a été réalisée en suivant plusieurs étapes :

Digitalisation des méandres de l'oued sur Google Earth

Les images du programme Google Earth étant géo-référencées, les méandres de l'oued ont été digitalisés et transféré par la suite au format « shape » pour être traitées sur le logiciel Arcview 3.2 (fig.72). Dans un souci de précision, la digitalisation s'est faite à une échelle de 1/4000.



Figure 72: digitalisation de l'oued Mekerra entre Sidi Khaled et Sidi Bel Abbès.
Duplication de la ligne d'écoulement

Suite au changement de format du vecteur Google Earth (kml) au format shape, il a fallu changer la projection de géographique à UTM (système métrique). Par la suite, deux lignes à intervalles égales ont été créées de part et d'autre de la ligne d'écoulement (fig.73) grâce à la fonction « Buffer » sur Arcview 3.2. Les mesures de terrain ont permis d'apparenter la forme du lit mineur de l'oued à un canal trapézoïdale plus ou moins régulier (profondeur de 4 m, petite et grande base respectivement de 10 et 20 m).

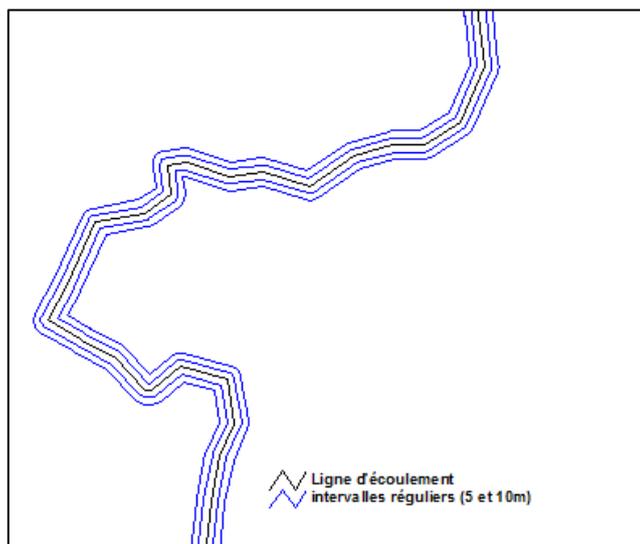


Figure 73: Dédoublage de la ligne d'écoulement.

Conversion des lignes en points altimétriques

Une fois les lignes de dédoublement créées, elles ont été converties en points à intervalle régulier de 5m (fig.74) (distance équivalente à celle du dédoublement de la ligne d'écoulement). Par la suite, des altitudes leur ont été attribuées en fonction de la pente ; cette dernière a été tirée à partir du MNT aster. Plusieurs pentes ont été calculées sur le trajet de l'oued en considérant les changements de ton (couleur) sur le MNT. Vu le nombre important des points, l'attribution des altitudes a été faite sur Excel. Les points issus des deux lignes intérieures (fond du lit) ont une altitude inférieure de 4m par rapport aux points adjacents issus des lignes extérieures.

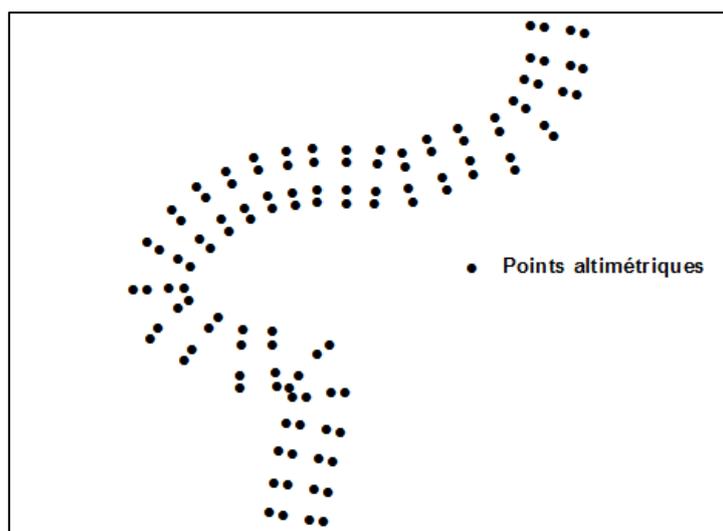


Figure 74: Points altimétriques créés pour la modélisation du canal trapézoïdale.

VII.4.2 Panachage des données altimétriques

La dernière étape a été de joindre tous les points altimétriques sur une seule couche (fig.75), l'ensemble de ces points ont servi à l'extrapolation d'un MNT haute résolution de 1m. Cette dernière opération a été réalisée avec l'extension Spatial Analyst sous le logiciel Arcview.

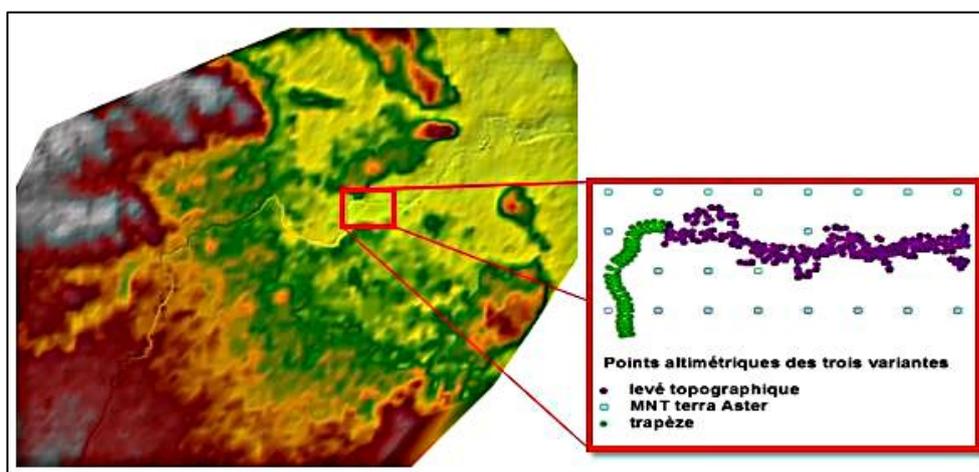


Figure 75: Schéma du MNT haute résolution interpolé à partir des trois variantes.

VII.5 Test et validation de la tache inondable

Suite à la préparation des données pour la modélisation hydraulique, des simulations sur le logiciel HEC RAS ont été réalisées pour l'hydrogramme de crue centennale (régime d'écoulement non stationnaire) issue de la modélisation hydrologique (chapitre VI). Cette simulation a été réalisée entre Sidi Khaled et l'aval de la ville de Sidi Bel Abbès. Le coefficient de Manning, nécessaire au calage du modèle, est celui même obtenu à travers le calage de la fonction de cheminement du modèle hydrologique. Le principal résultat de la modélisation hydraulique est une première cartographie de la tache inondable qu'il a fallu valider (fig.76 (a)). Cette validation ne s'est faite qu'au niveau de la ville de Sidi Bel Abbès et cela pour cause de la disponibilité du retour d'expérience. A cet effet, une première comparaison de la tache obtenue a été faite avec celle issue de la seule étude disponible menée en 2006 par le bureau d'étude SPI Infra (fig.76 (b)). Ce bureau a travaillé suivant l'approche hydrogéomorphologique pour l'identification des zones inondables de l'évènement du 3 octobre 1986. Cet évènement est semblable à notre crue de projet en termes de débit de pointe et de volume d'eau généré (hydrogramme présentant une montée brutale de l'ordre de 2 heures, un débit de pointe de l'ordre de $808\text{m}^3/\text{s}$ et une décrue de l'ordre de 9 heures).

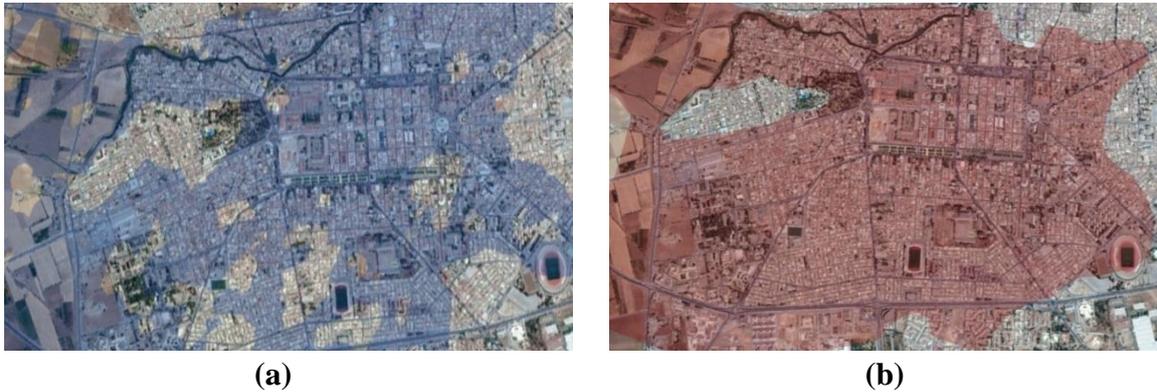


Figure 76: Comparaison entre la tache inondable issue de la méthode utilisée et celle issue de la méthode hydrogéomorphologique.

La superposition de l'extension géographique des deux taches a fait ressortir des similitudes de plus de 70%. La seconde étape de validation s'est faite via des enquêtes auprès de deux structures d'intervention à savoir : la protection civile et les services communaux. Ces deux structures détiennent des archives sur les adresses touchées par les inondations, notamment celles d'octobre 1986. Aussi des compléments d'informations ont été obtenus sur le terrain en enquêtant auprès de la population locale. Cette deuxième étape de validation a permis de confirmer ou de démentir certaines zones d'anomalies (zones de différences). Au final, 15% des zones d'anomalie ont été levées (fig.77). Ces dernières seraient dues au fait que SPI infra a procédé à un lissage de la tache inondable en ne délimitant celle-ci que sur ces limites extérieurs. Rajouter à cela et pour des raisons d'échelle cartographique, nous avons lissé à notre tour toutes celles ayant une surface inférieure à deux hectares.

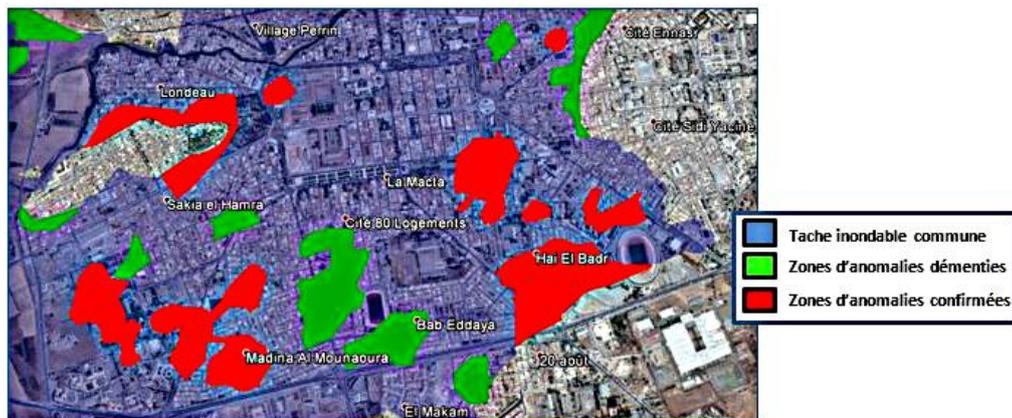


Figure 77: Vérification des zones d'anomalies.

La carte des zones inondable au niveau de la ville de Sidi Bel Abbès finale est représentée sur la (fig.78). Les cités marquées avec les repères rouges, sont nouvellement réalisées (après l'an 2000). Ces nouvelles constructions sont l'illustration que les zones inondables ne sont pas intégrées dans les plans d'aménagement urbain.

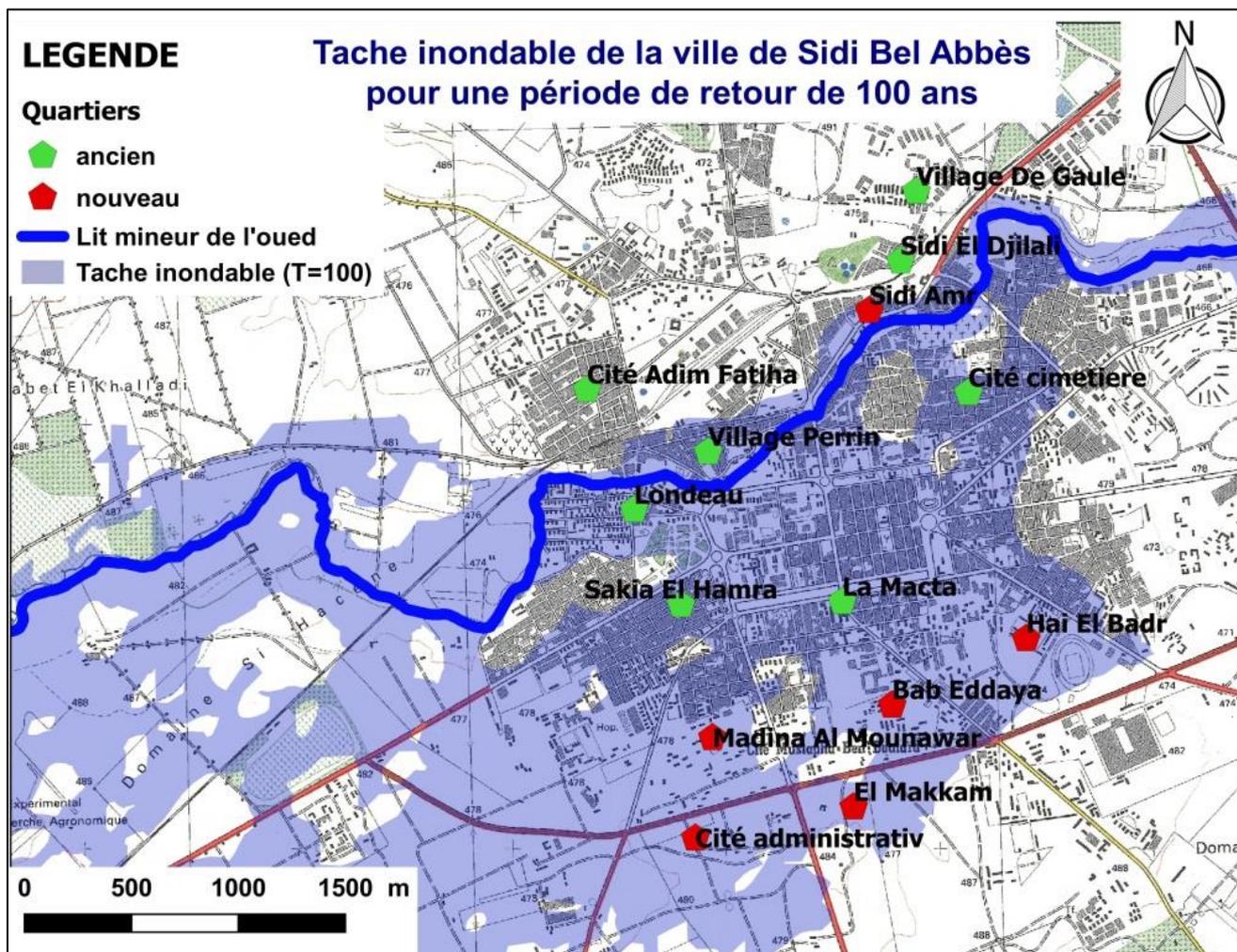


Figure 78: Tache inondable de la ville de Sidi Bel Abbès pour la période de retour de 100 ans.

VII.6 Un cadre juridique qui doit être complété

Comme cité sur le paragraphe précédent, malgré le risque avéré d'inondation sur certaines zones, plusieurs d'entre elles ont connu de grands projets d'urbanisme ; parmi elles, il y en a qui sont des quartiers populaires certes, mais il y a aussi des programmes de construction de l'état comme c'est le cas de la cité El Makkam. Plus encore, sur la cité administrative, on peut même trouver le nouvel hôpital anti-cancéreux. Ce dernier, a vu sa réalisation commencée vers 2007, chose qui dénote que les planificateurs partent du principe que la ville grâce aux aménagements, étudiés précédemment, est protégée. Une question évidente se pose : qu'advient-il si une crue plus importante que la crue de dimensionnement des ouvrages se présente ? Rajouté à cela, la diminution de la capacité du barrage de Tabia à cause de l'envasement diminuant ainsi sa fonction écrêteuse.

Le cadre législatif algérien relatif à la lutte contre les inondations est repris sur la loi n° 05-12 du 28 *Jumada Ethania* 1426 correspondant au 4 août 2005 relative à l'eau, et

sur le *décret exécutif n° 09-399 du 12 Dhou El Hidja 1430 correspondant au 29 novembre 2009 définissant les instruments de prévision des crues* (Annexe 1). Ces textes comprennent plusieurs articles destinés à atténuer l'effet des inondations, ils peuvent être synthétisés et discutés comme suit :

- *Les actions de régulation des écoulements* : elles sont surtout relatives en des actions d'aménagements hydrotechniques (zones d'épandages, barrages écrêteurs, recalibrage des cours d'oued...); elles sont souvent coûteuses financièrement et parfois non réalisable d'un point de vue technique ;
- *La délimitation des oueds, lacs, étangs, sebkhas et chotts est déterminée par le plus haut niveau d'un système de prévision des crues* : cette loi peut être relative à la phase dite de prévention des inondations, décrite dans l'introduction générale. Seulement, ce texte reste insuffisant en premier lieu du fait que dans plusieurs cas les écoulements des cours d'eau, lors des événements d'inondations, se font suivant des chenaux multiples. Deuxièmement, « le plus haut niveau » cité dans ce texte de loi ne décrit pas la façon de le limiter et reste donc à l'appréciation du limiteur ;
- *Le système de prévision des crues comprend notamment* :
 - *des équipements de mesures pluviométriques (pluviomètres, pluviographes);*
 - *des équipements de mesures hydrométriques (limnimètres, limnigraphes) ;*
 - *des équipements de télétransmission sans fil (mode radio ou GSM) ;*
 - *des outils de traitement et de gestion des données hydrologiques (équipement informatique et logiciel) ;*
 - *un modèle de prévision.*

Cette action peut être classée parmi la phase de gestion de la crise. Comme nous avons constaté dans la première partie, dans le cas de la Mekerra, il n'est pas possible actuellement de concevoir un modèle de prévision, notamment à cause de l'insuffisance des mesures de terrain telles que les mesures pluviographiques indispensables à ce genre d'exercice.

- *L'évolution de la situation atmosphérique (bulletin météo spécial)*
- *les niveaux des cours d'eau dans les zones concernées par le risque d'inondation ;*

- *la situation des réseaux d'assainissement.*

La synthèse faite sur ces textes de lois rend compte en premier du manque de clarté de ces dernières qui peuvent être soumise à des interprétations non exhaustives de la part des planificateurs. Rajouter à cela, il n'est nullement mentionné que les PDAU (Plan D'Aménagement Urbain) doivent nécessairement prendre en considération les zones à risques d'inondation dans leur élaborations. Cette incomplétude des textes est sans doute à l'origine de la multiplicité des catastrophes dues aux inondations que connaît ces dernières années l'Algérie.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

L'Algérie a connu dans son histoire plusieurs épisodes catastrophiques liés aux inondations, ces inondations malheureusement touchent les populations en causant dans la plupart des cas, des pertes humaines et matérielles considérables.

Face à cela, nous avons décidé de nous intéresser à la question sous les aspects relatifs à la gestion du risque inondation et les différents moyens de lutte contre le phénomène. Parmi ces moyens, nous avons cité le retour d'expérience qui représente une étape car elle a permis à l'homme de comprendre que les phénomènes tels que les inondations ne peuvent être apprivoisées à tous les coûts. De ce fait, l'homme doit comprendre les fonctionnements hydrologiques pour mieux prévenir un tel phénomène. Cette compréhension doit, d'abord, passer par l'identification des sites exposés pour en étudier les caractéristiques.

Parmi les régions touchées en Algérie, nous avons choisi le bassin versant de la Mekerra. Il est souvent le sujet d'évènements pluviométriques qui causent des crues catastrophiques qui touchent la ville de Sidi Bel Abbès et les localités avoisinantes. Ce bassin versant avait fait le sujet de plusieurs études qui ont été à l'origine d'une multitude d'aménagements qui n'ont dans la plupart des cas pas suffi à dulcifier les crues très importantes qu'a connu l'oued Mekerra comme celle de 1994. Suite à cette crue, les autorités ont décidé de mettre en place des aménagements hydrotechniques de grandes ampleurs sensés protéger la ville au moins à moyen terme. En effet, ce bassin représente un site pilote des mesures de prévention des inondations en Algérie. C'est pour cette raison que nous l'avons choisi pour ce travail dont le but, rappelons-le, est d'étudier les moyens de lutte contre les inondations au niveau nationale.

Dans notre travail nous nous sommes intéressés à deux aspects indispensables pour se prémunir contre les inondations : l'aspect gestion de la crise et l'aspect prévention. Ces deux aspects ont été testés sur le cas de la Mekerra.

Le premier moyen de lutte pour lequel nous avons consacré toute une partie de notre travail est : l'utilisation des modèles hydrologiques déterministes pour anticiper la crue exceptionnelle de quelques instants (prévision opérationnelle des crues), cela afin

d'amortir les dégâts au moins humain. Pour ce faire nous avons fait une étude bibliographique sur laquelle nous avons fait apparaître la complexité des phénomènes mis en jeu dans la formation de la crue éclair, pour choisir par la suite les modèles appelés perceptuels. Ces modèles simplifient les phénomènes mis en jeu pour ne prendre que ceux dont l'influence est significative dans la genèse de la crue éclair. Il s'agit notamment d'une fonction de production associée à une autre de transfert puis de cheminement. Une recherche bibliographique a mis en évidence la fonction du SCS et l'onde cinématique qui, selon plusieurs auteurs, s'adapteraient à plusieurs situations sans préjugé de la nature des processus de formation de crues.

Néanmoins, en essayant de tester ces deux fonctions au bassin de la Mekerra, on a été *surpris* par les résultats de calage qui allaient à l'encontre de ce à quoi on s'attendait, même que c'est exactement le contraire des résultats escomptés qu'on a obtenu. Après cela, notre réflexion a été de chercher un phénomène non pris en compte et dont l'influence est primordiale dans la formation de la crue éclair, il s'agit de l'influence probable du milieu hydrogéologique. L'hypothèse émise sur l'influence du milieu souterrain est complètement justifiée par la présence d'un milieu fissuré. Les travaux très récents menés sur ce genre de milieu prouvent que ce dernier peut avoir un grand rôle à jouer dans l'amplification et l'amortissement des crues suivant les conditions du milieu. Pour être confirmée, cette hypothèse doit faire l'objet d'études hydrogéologiques plus poussées et l'oued Mekerra n'est pas le seul cas où ce genre de milieu existe en Algérie. Ces études doivent notamment suivre le cheminement des fissures pour ensuite déterminer leur rôle exact dans les écoulements de surface.

Aussi, l'autre constat, que nous avons fait, concerne l'insuffisance des mesures de terrain indispensables à ce genre d'exercice. En effet, le manque de documentations sur les événements historiques représente un véritable frein au développement d'un modèle hydrologique de prévision qu'on pourrait juger comme robuste. Dans le cas de la Mekerra, c'est surtout les pluviographes qui doivent être densifiés et placés stratégiquement vu la rapidité des événements observés et la forte variabilité spatiale des pluies dans cette région. Aussi, la principale conclusion faite sur cette première partie est qu'à l'instar du bassin versant de la Mekerra, plusieurs autres bassins versants en Algérie

sont concernés par la présence d'une géologie karstique, cela pose l'impératif d'étudier leurs rôles potentiels dans le développement des crues importantes.

La deuxième partie de notre travail s'est intéressée à l'identification des zones potentiellement exposées au risque. Cette identification s'est faite grâce au développement d'une méthode de cartographie proposant plusieurs solutions techniques qui ont répondu au manque de données avéré dans le bassin étudié. Les méthodes utilisées conventionnellement utilisent une modélisation hydraulique simple, cela dans le cas où les données de débit et de morphométrie sont plus ou moins exhaustives.

La méthode proposée dans ce travail, utilise un modèle hydrologique grâce auquel nous estimons la crue de projet là où la mesure de débit n'existe pas. Par la suite, on passe à la modélisation hydraulique. Cette dernière, dont le but est d'identifier l'étendue géographique des zones à risque, nécessite de disposer des données sur la morphométrie du cours de l'oued qui doit être représentée avec une résolution spatiale la plus fine. Dans le cas de la plaine de Sidi Bel Abbès ainsi que la plupart des zones inondables en Algérie, cette donnée est encore, une fois de plus, manquante. Nous avons testé une alternative, où nous avons panaché plusieurs types de données topographiques à savoir : des données à moyenne résolution et des données topographiques assimilant le lit mineur de l'oued à un canal trapézoïdal.

L'estimation de la crue de projet sur la plaine de Sidi Bel Abbès a été divisée en deux ensembles à savoir :

- L'estimation de la crue de projet à l'embouchure de la plaine, celle-ci s'est faite en construisant un HSMF sur des hydrogrammes mesurés pour éviter de prendre en charge la complexité d'une modélisation hydrologique aux deux faciès étudiés en première partie. Cet HSMF après calage du modèle de cheminement sur le faciès plaine, nous l'avons estimé à plusieurs niveau le long de l'oued, tout en essayant de prendre en charge le phénomène prépondérant du laminage ;
- Modélisation déterministe pluie-débit du faciès plaine, pour l'estimation de la crue de l'oued Mouezen.

La combinaison des hydrogrammes des différents faciès a abouti à un hydrogramme unique estimé à différents endroits de la plaine. Cet hydrogramme est le paramètre de

base pour cartographier la zone inondable et pour juger de l'efficacité des aménagements hydrotechniques mis en place en cas de crues exceptionnelles.

Pour l'obtention de la crue de projet, nous avons proposé des alternatives au manque de données pluviographiques en se basant sur une solution empirique issue d'une analyse fréquentielle des pluies. En plaine, les fortes crues restent difficilement jaugeables. Dans ce cas, le temps de base de l'hydrogramme de crue enregistrée à la station aval reste un paramètre suffisant pour le calage de la fonction de cheminement.

Après avoir fait des simulations sur modèle hydrologique, l'efficacité théorique des aménagements mis en place a été prouvée. Le barrage de Tabia, qui est le plus important ouvrage de protection avec sa grande capacité d'écrêtement, est capable de laminer des crues supérieures à la crue de projet. Par contre la zone d'épandage sur l'oued Mouezen est limitée du fait que sa capacité est facilement atteinte en cas de crue centennale et pourrait représenter un risque pour les agglomérations en aval lors d'évènements plus extrêmes. L'ouvrage de dérivation à lui aussi prouvé son utilité ; en effet, les débits évacués par les ouvrages écrêteurs lors des crues importantes dépassent largement la capacité du tronçon de l'oued traversant la ville de Sidi Bel Abbès.

Nous avons voulu connaître, par la suite, le degré d'exposition au risque de la ville de Sidi Bel Abbès si les aménagements hydrotechniques n'étaient pas mis en place. Le résultat est une carte où est représentée la tache inondable mettant en évidence l'exposition au risque d'une grande partie du côté Sud de la ville et une autre en aval au Nord. La proximité de l'agglomération des secteurs vulnérables augmente le risque inondation. Ce résultat a fait l'objet d'une validation sur le terrain, ce qui a permis de tester le degré de fiabilité des solutions techniques proposées dans ce travail. La tache inondable obtenue est validée géographiquement à plus de 85%. Néanmoins, nous recommandons de tester ces solutions techniques dans d'autres sites pour plus de robustesse de la méthode proposée.

A propos de ce dernier résultat nous pouvons faire la recommandation suivante : **c'est que d'un point de vue législatif, il vaudrait mieux mettre en place de nouvelles directives dans le code de l'environnement, afin de mieux gérer le développement urbain, routier et industriel par la mise en place de mesures compensatoires qui**

doivent assurer la transparence hydraulique des nouvelles installations. Néanmoins, pour que ces mesures soient efficaces, la caractérisation de l'aléa inondation doit être précise et adaptée au contexte hydro(géo)logique de la zone étudiée. En effet, en consultant les lois Algériennes relatives à la prévention du risque inondation, telle que la loi N°05/12 du 04 aout 2005, aucun texte ne prévoit d'intégrer ce risque dans les PDAU. Ce qui constitue un vide juridique qui doit impérativement être comblé.

Ce travail se veut une contribution pour le développement d'une méthodologie à suivre, il décrit le cheminement des étapes à suivre et les différents paramètres à étudier pour caractériser les zones inondables ; ceci appliqué à l'oued Mekerra.

Références bibliographiques

Aggett G.R., Wilson J.P. (2009). Creating and coupling a high-resolution DTM with a 1-D hydraulic model in GIS for scenario-based assessment of avulsion hazard in gravel-bed river. *Geomorphology*; 113: pp 21–34.

Albergel J., 2003. Le modèle hortonien. Genèse des crues et des inondations. Ed. SHF, Paris, ENGREF.

Arlen D., Feldman D., 2000. Hydrologic modeling system HEC-HMS. Technical reference manual. 157p.

Bailly-Comte, V., 2008. Interactions hydrodynamiques entre les eaux de surface et les eaux souterraines en milieu karstique. Thèse de Doctorat, Université Montpellier 2. 289p.

Bates P.D., Marks K.J., Horritt M.S., 2003. Optimal use of high-resolution topographic data in flood inundation models. *Hydrological Processes*, 17. p. 537-557.

Bentekhici N., Benkesmia Y., Berrichi F., Bellal S., 2018. Évaluation des risques de la pollution des eaux et vulnérabilité de la nappe alluviale à l'aide des données spatiales. Cas de la plaine de Sidi Bel Abbès (nord-ouest algérien). *Revue des sciences de l'eau* Volume 31, Number 1, 2018, pp. 1-86 .

Beven K., 1979. The future of distributed modelling. *Hydrol. Processes*. 6, 253- 254.

Blin. P & Leclerc. M & Secretan. Y & Morse. B., (2004). Cartographie du risque unitaire d'endommagement (crue) par inondations pour les résidences unifamiliales du Québec. *Revue des sciences de l'eau* 18/4 (2005). pp 427-451.

Body K., 1985. Analyse fréquentielle des pluies de l'Algérie, Synthèse Régionale : détermination des paramètres principaux par station et leur répartition spatiale. Constantine : Institut National des Ressources Hydrauliques i.n.r.h ; 2eme impression, 46p.

Debiane K. 2008. Cours sur le logiciel HEC-RAS, Cabinet Telesystems Rabat, Maroc, 43p.

Cameron T.Akerman., 2002. HEC-GeoRAS An extension for support of HEC-RAS using ArcView User's Manual. 154p.

Cappus P., 1960. Etudes des lois de l'écoulement. Application au calcul et à la prévision des débits. *La Houille Blanche*. A, 493-520.

Casas A., G. Benito G., Thorndycraft V.R., Rico M., 2006. The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, Volume 31, Issue 4, Pages: 444-456

Cerdan O., Le Bissonnais Y., Couturier A., Bourennane H. & Souchere V., 2002. Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France. *Soil and Tillage Research*. 67 (1), 99-108.

Chen J., Hill A.A., Urbano L.D., 2009. A GIS-based model for urban flood inundation. *Journal of Hydrology*; 373: pp 184–192

Chow V.T., Maidment D.R. & Mays L.W. 1988. Applied hydrology. Mc Graw- Hill International Editions.

Chow V.T., Maidment D.R. & Mays L.W., 1988. Applied hydrology. Mc Graw- Hill International Editions.

Cosandey C., 1999. Genèses de crues cévenoles dans les bassins élémentaires. L'exemple du bassin de la Latte. crues de la normale à l'extrême, SHF, Lyon - France, 35-44.

Datin R., 1998. Outils opérationnels pour la prévision des crues rapides : traitement des incertitudes et intégration des prévisions météorologiques. Développements de TOPMODEL pour la prise en compte de la variabilité spatiale de la pluie. Application au bassin versant de l'Ardèche. INPG, Grenoble.

Degoutte. G., 2007. Traité d'hydraulique à surface libre.

Description de la carte hydrogéologique de la plaine de Sidi Bel Abbès (1978)

Direction de la protection civile., 2015 le risque inondations en Algérie –session de formation relative aux catastrophes naturelles, Alger, 11-15 novembre 2015.

E .Tate., 1999. Floodplain mapping using HEC RAS and ArcView GIS. University of Texas Austin. 223p.

Gaume E., 2000. Un parcours dans l'étude des phénomènes extrêmes en hydrologie. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, 269p.

Gaume E., 2003. Éléments d'analyse sur les crues éclair. Mémoire présenté pour l'obtention Philosophiae doctor (Ph. D) en Sciences de l'eau. 320 p.

Ellison W., 1945. Some Effects of Raindrops and Surface-Flow on Soil Erosion and Infiltration. *Trans. Am. Geoph. Un.* pp 26. pp 415-429.

Estupina V .B., 2004. Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair. Application à de petits bassins versants du sud de la France. Thèse Doctorat de L'Institut National Polytechnique de Toulouse. 254p.

Fenet B. 1975. Recherches sur l'alpinisation de la bordure septentrionale du bouclier africain à partir de l'étude d'un élément de l'Orogène nord-maghrébin : Les Monts du

Djebel Tessala et les Massifs du littoral oranais. Thèse Doct. esSciences, Univ. Nice, 301.p

Finaud-Guyot P., 2010. Modélisation macroscopique des inondations fluviales et urbaines- Prise en compte des écoulements directionnels et des échanges de lit majeur-lit mineur. Thèse de doctorat Montpellier II. 217 p

Galéa. G & Prudhomme. C ., 1994. Modèle débit-durée-fréquence et conceptualisation d'un hydrogramme de crue synthétique : validation sur le BVRE de Draix. Hydrol. continent. vol. 9, no 2, (1994). pp 139-151.

Galéa. G & Prudhomme. C ., 1997. Notions de bases et concepts utiles pour la compréhension de la modélisation synthétique des régimes de crue des bassins versants au sens des modèles QDF. Revue des sciences de l'eau 1 (1997). pp 83-101.

Gary W. Brunner., 2016. HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual. 528p.

Gary W. Brunner., 2016. HEC-RAS River Analysis System, User's Manual. (1-281p) (467-483p)

Gascuel-Odoux C., Merot P. & Durand P., 1999. Genèse des crues normales dans les petits bassins versants ruraux crues de la normale à l'extrême, SHF, Lyon - france, 25-34.

Geoffroy. J., 2007. Modélisation des paramètres morphogènes du cours inférieur de la Bruche (Bas-Rhin) et analyse de la sensibilité du modèle HEC-RAS à la qualité des données topographiques. Université de Louis Pasteur, 86p.

Germann, P., et L. Di Pietro. 1996. When is porous media flow preferential? A hydromechanical perspective. Geoderma 74:1–21.

Ghavasieha A.-R., Christine Poulard C., Paquier A., 2006. Effect of roughened strips on flood propagation: Assessment on representative virtual cases and validation. Journal of Hydrology, 318, p. 121–137.

Gilard O., 1998. Les bases techniques de la méthode Inondabilité. Édition Cemagref, 207 p.

Gilard. O & Gendreau. N., 1998. Inondabilité une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants. Revue des sciences de l'eau 3 (1998). pp 429-444.

Hallouche B., 2007. Cartographie des zones inondables de la plaine de Sidi Bel Abbès par l'approche hydrogeomorphologique. Mémoire Magister de l'université Djillali Liabes Sidi Bel Abbès. 153p.

- Hallouche B., 2017.** Bassin versant de la haute Mekerra (NW Algérien) : hydrologie, géochimie et pollution. Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen. 326p.
- Hennine H., 2004.** Interfaçage entre un modèle hydrologique /modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluent les SIG. Mémoire magister à l'ENP. 114p.
- Horton R.E., 1933.** The role of infiltration in the hydrological cycle. Transaction – American Geophysical Union. 14, 446-460.
- HEC Geo-HMS. 2013.** Manuel d'utilisation. 193p.
- HEC HMS. 2000.** Manuel de référence technique. 148p.
- Hydrologic Engineering Center,** Geospatial Hydrologic Modelling Extension, User's Manual, 2003.
- John C. Warner, and al., 2008.** HEC-RAS River Analysis System Applications Guide. 351p.
- Jones J., 1997.** The role of natural pipeflow in hillslope drainage and erosion : extrapolating from the Maesnant data. Phys. Chem. Earth. 22 (3-4), 303-308
- Kohler M.A., Linsey R.K., 1951.** Predicting the runoff from storm rainfall. Weather Bureau, U.S. Dep. Of Commerce, Washington, Research Pap., 34: 9 p.
- Labat, D., Mangin, A., Ababou, R., 2000a.** Rainfall–runoff relations for karstic springs. Part I: 417 convolution and spectral analysis. Journal of Hydrology 238, 123–148. 418
- Labat, D., Mangin, A., Ababou, R., 2000b.** Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part II: 419 continuous wavelet and discrete orthogonal multiresolution analyses. Journal of Hydrology 238, 149– 420 178.
- Laborde J.P., 2003.** Eléments d'hydrologie de surface. ANRH Editions, 200 p.
- Lahlah ., 2001.** Recensement des zones inondées en Algérie entre 1975 et 2000, document ANRH 200, Alger. 40p.
- Lang M., Chastan B., Grelot F., 2010.** La méthode Inondabilité : appropriation par les hydrologues de la vulnérabilité dans le diagnostic sur le risque d'inondation HAL Id: hal-00493184. 13p.
- Le Bissonnais Y., Singer M.J., 1993.** Seal formation, runoff and interrill erosion from 17 California soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 57,pp 224-229.
- Lequien. A ., 2003.** Analyse et évaluation des crues extrêmes par modélisation hydrologique spatialisé (cas du bassin versant du Vidourle). Mémoire DEA à l'université Montpellier 2. 67p.

Line Kong A S., 2011. Modélisation des crues de bassins karstiques par réseaux de neurones. Cas du bassin du Lez (France). Thèse de Doctorat, Univ. de Montpellier II, 230 p.

Liu Z. & Todini E., 2002. Towards a comprehensive physically-based rainfall runoff model. *Hydrology & Earth System Sciences*. 6(5), 859-881.

Marchandise. A., 2003. Analyse et modélisation hydrologique de l'événement exceptionnel des 8 et 9 septembre 2002 sur le bassin versant de Gardon d'Anduze. Mémoire de DEA Université Joseph Fourier Grenoble. 71p.

Marchandise. A., 2007. Modélisation hydrologique distribuée sur le Gardon d'Anduze; étude comparative de différents modèles pluie-débit, Thèse de doctorat de l'Université Montpellier II. 214p.

Marsaud B. 1996. Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. -Thèse Univ. de Paris XI Orsay, 305 pp.

Menad W., Douvinet J., Beltrondo G., Arnaud-Fassetta G., 2012. Evaluer l'influence de l'urbanisation face à un aléa météorologique remarquable : les inondations des 9-10 novembre 2001 à Bab-el-Oued (Alger, Algérie). » *Géomorphologie*; 18-n°3, pp : 337-350.

Miller W.A., et Cunge J. A., 1975. Simplified Equations of Unsteady Flow. "Unsteady Flow in Open Channels. K. Mahmood and V. Yevjevich, eds., Water Resour. Pub., Ft. Collins, CO.

Muet P., 1985. Structure, fonctionnement et évolution de deux systèmes aquifères karstiques du nord du Causse de Martel (Corrèze). Thèse de Doctorat, Univ. d'Orléans, 386 p.

Musy. A., 2005. Cours d'hydrologie générale – Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse. 162p.

Obled C., Wendling J. & Beven K.1994. The sensitivity of hydrological models to spatial rainfall patterns : an evaluation using observed data. *journal of hydrology*. 159, 305-333.

Obled C.,1999. le versant et le bassin versant : quelques aperçus sur la formation des crues et la production du ruissellement. Crues de la normale à l'extrême, SHF, Lyon - France, 5-23.

Petit Larousse., 2008.

Ponce V.M., Yevjevich V., 1978. Muskingum-Cunge Methode with Variable parameters. *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*; 104, pp: 1663-1667.

- Proust S., 2005.** Ecoulements non-uniformes en lits composés: effets de variations de largeur du lit majeur. Thèse de doctorat spécialité "Mécanique des fluides". Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique de Lyon / Cemagref de Lyon, France. 383 p.
- Rivrain J.C., Météo France & l'Environnement M.d., 1997.** Les épisodes orageux à précipitations extrêmes sur les régions méditerranéennes de la France, vol. 4.
- Sarhadi A., Soltani S., Modarres R., 2012.** Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: Linking GIS techniques and frequency analysis. *Journal of Hydrology*; 458–459, pp: 68–86.
- Sauquet. E & Javelle. P & Le Clerc. S., 2003.** Description des régimes hydrologiques des hautes-eaux : nouvelle formulation pour l'analyse en débit-durée-fréquence et applications en ingénierie. Ingénieries N° 34. pp (3-15).
- Schumann G., 2007.** High-Resolution 3-D flood information from radar imagery for flood hazard management. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 45 (6), pp: 1715– 1725.
- Seibert B., 2004.** Détermination des mailles élémentaires d'un modèle hydrologique spatialisé. Mémoire d'école supérieure de géomètres et topographes, Lyon. 55p.
- Sighomnou D., 1986.** Assainissement pluvial en zone urbaine en Afrique tropicale : cas de Yopougon (Côte d'Ivoire).Thèse Université de Montpellier 2. 245 p.
- Sivapalan M., 2003.** Process complexity at hillslope scale, process simplicity at watershed scale : is there a connection ? *Geophysical Research.* 5, 07973.
- SPI infra, Groupe EGIS, Bonnard & Gardel. 2001.** Etude d'avant-projet détaillé de la protection de la ville de Sidi Bel Abbés contre les inondations, 320 p.
- USACE .,1979** Chief's annual report; U.S. Army Corps of Engineers annual report on Civil Works activities of the Chief of Engineers for FY 1979, volume I,
- Valois R., Camerlynck C., Dhemaied A., Guerin R., Hovhannissian G., Plagnes V., Rejiba F., Robain H. 2011** Assessment of doline geometry using geophysics on the Quercy plateau karst (South France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 36 (9),
- William A., et al. 2006.** Hydrologic Engineering Center, Hydrologic Modelling System HEC-HMS, Technical Reference Manual, March 2000.

Biblionet

Bakalowicz 1999, Hydrogeophysical study of karst unsaturated zone structure and functioning.https://www.researchgate.net/publication/278826913_Hydrogeophysical_study_of_karst_unsaturated_zone_structure_and_functioning/figures?lo=1&utm_source=google&utm_medium=organic le 05/07/2018 à 22h00

Annexe

Annexe 1 : Recueil des lois algériennes relatives à la lutte contre les inondations.

Annexe 2: Valeurs du coefficient de rugosité N pour les plans de l'équation de transfert de l'onde cinématique.

Annexe 3: Résultats des ajustements des pluies journalières maximales des stations d'étude.

Annexe 4: Ajustement des débits moyens journaliers.

Annexe 5: Ajustement des débits maximaux instantanés.

Annexe 6: Ajustement des débits continument dépassés sur une durée d pour la station Sidi Ali Benyoub (11 02 01).

Annexe 7: Résultats de calage du modèle de Muskingum-Cunge sur les biefs entre les stations de Sidi Ali Benyoub (11 02 01) et Sidi Bel Abbès (11 03 01).

Annexe 1 : recueil des lois algériennes relatives à la lutte contre les inondations

Loi n° 05-12 du 28 Joumada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005 relative à l'eau.

TITRE I DES DISPOSITIONS PRELIMINAIRES

Art. 2. — la maîtrise des crues par des actions de régulation des écoulements d'eaux superficielles pour atténuer les effets nuisibles des inondations et protéger les personnes et les biens dans les zones urbaines et autres zones inondables.

TITRE II DU REGIME JURIDIQUE DES RESSOURCES EN EAU ET DES INFRASTRUCTURES HYDRAULIQUES

Chapitre 1 Du domaine public hydraulique naturel

Section 2 De la délimitation du domaine public hydraulique naturel

Art. 7. — La délimitation des oueds, lacs, étangs, sebkhas et chotts est déterminée par **le plus haut niveau** atteint par les eaux et notamment, pour les oueds, par celui des crues coulant à plein bord avant de déborder. Les modalités de délimitation du domaine public hydraulique naturel sont fixées par voie réglementaire.

Section 3 Des servitudes relatives au domaine public hydraulique naturel

Art. 10. — Il est institué, le long des rives des oueds, des lacs, des étangs, des sebkhas et des chotts, une zone dite zone de franc-bord, sur une largeur de trois (3) mètres à cinq (5) mètres selon le cas, à l'intérieur du domaine public hydraulique naturel, destinée à permettre le libre passage du personnel et du matériel de l'administration chargée des ressources en eau ou des entrepreneurs chargés des travaux d'entretien, de curage et de protection des berges.

Art. 12. — A l'intérieur des zones de franc-bord ou des zones soumises à une servitude de franc-bord : — sont interdits toute nouvelle construction, toute plantation, toute élévation de clôture fixe et tout acte de nature à nuire à l'entretien des oueds, lacs, étangs, sebkhas et chotts ;

Chapitre II Du domaine public hydraulique artificiel **Section I De la consistance du domaine public hydraulique artificiel**

Art. 16. — les ouvrages d'écrêtement des crues, d'endiguement et d'aménagement des lits et des berges d'oueds réalisés dans le but d'assurer la protection contre les inondations des zones urbaines ou des zones inondables.

TITRE III DE LA PROTECTION ET DE LA PRESERVATION DES RESSOURCES EN EAU

Art. 30. — des mesures de prévention des risques d'inondations.

Chapitre 5 De la prévention des risques d'inondations

Art. 53. — Pour assurer la protection des personnes et des biens implantés en aval des retenues d'eau superficielle et à proximité des oueds, et en conformité avec les dispositions législatives en

vigueur en la matière, des dispositifs fixés par voie réglementaire, peuvent, le cas échéant, prévoir des instruments de prévision des crues et des mesures d'alerte et d'intervention.

Art. 54. — Sur les digues de protection contre les inondations, il est interdit de labourer, de planter des arbres, de faire circuler des animaux ou de déployer toute activité pouvant détériorer la structure des ouvrages.

**Décret exécutif n° 09-399 du 12 Dhou El Hidja 1430 correspondant au 29 novembre 2009
définissant les instruments de prévision des crues.**

Décète :

Article 1er.- En application des dispositions de l'article 53 de la loi n° 05-12 du 28 Joumada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005, modifiée et complétée, susvisée, le présent décret a pour objet de définir les instruments de prévision des crues pour assurer la protection des personnes et des biens implantés en aval des retenues d'eau superficielle et à proximité des oueds.

Art. 2. - Les instruments cités à l'article 1er ci-dessus sont établis en conformité avec la législation en vigueur et notamment la loi n° 04-20 du 13 Dhou El Kaada 1425 correspondant au 25 décembre 2004, susvisée.

**DES INSTRUMENTS DE PREVISION DES CRUES POUR LA PREVENTION DES
RISQUES D'INONDATION**

Art. 7. - Sur la base des réalités hydrologiques et géologiques ainsi que sur la base des vulnérabilités prévisibles, les oueds et les tronçons d'oueds devant faire l'objet d'un système de prévision des crues sont identifiés et délimités par arrêté conjoint des ministres chargés des ressources en eau et des collectivités locales.

Art. 8. - Le système de prévision des crues comprend notamment :

- des équipements de mesures pluviométriques (pluviomètres, pluviographes) ;
- des équipements de mesures hydrométriques (limnimètres, limnigraphes) ;
- des équipements de télétransmission sans fil (mode radio ou GSM) ;
- des outils de traitement et de gestion des données hydrologiques (équipement informatique et logiciel) ;
- un modèle de prévision.

Art. 9. - Le système de prévision des crues doit permettre de définir, sur la base des réalités hydrologiques et géologiques, les valeurs des hauteurs de référence correspondant au risque d'inondation.

Art. 10. - La mise en place du système de prévision des crues est assurée par l'administration chargée des ressources en eau.

Art. 11. - Sont fixées, par arrêté conjoint des ministres chargés des collectivités locales, des transports et des ressources en eau, la liste et la fréquence des informations devant être communiquées aux walis concernés et notamment celles portant sur :

- l'évolution de la situation atmosphérique (bulletin météo spécial) ;

- les niveaux des cours d'eau dans les zones concernées par le risque d'inondation ;
- la situation des réseaux d'assainissement.

Annexe 2:

Valeurs du coefficient de rugosité N pour les plans de l'équation de transfert de l'onde cinématique

description de la surface	N
Surfaces lisses (béton, gravier, ou sol nu)	0.011
Jachère (aucun résidu)	0.05
sol cultivé	
Couverture de résidu	0.06
Couverture de résidu	0.17
Herbe	
prairie à herbe courte	0.15
prairie dense	0.24
prairie dense à herbe longue	0.41
forêt éclairée	0.4
forêt dense	0.8

Annexe 3:

Résultats des ajustements des pluies journalières maximales des stations d'étude

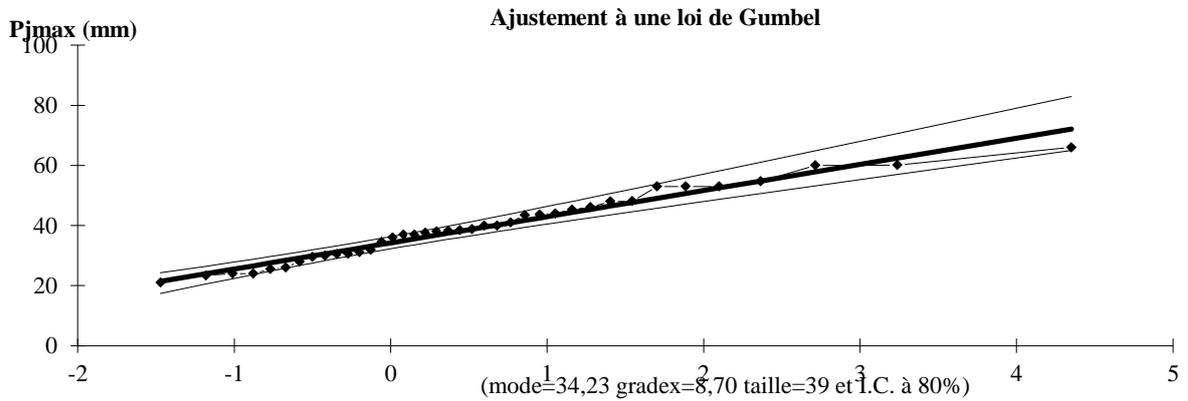


Figure : ajustement des pluies journalières maximales de la station Tabia à une loi de Gumbel.

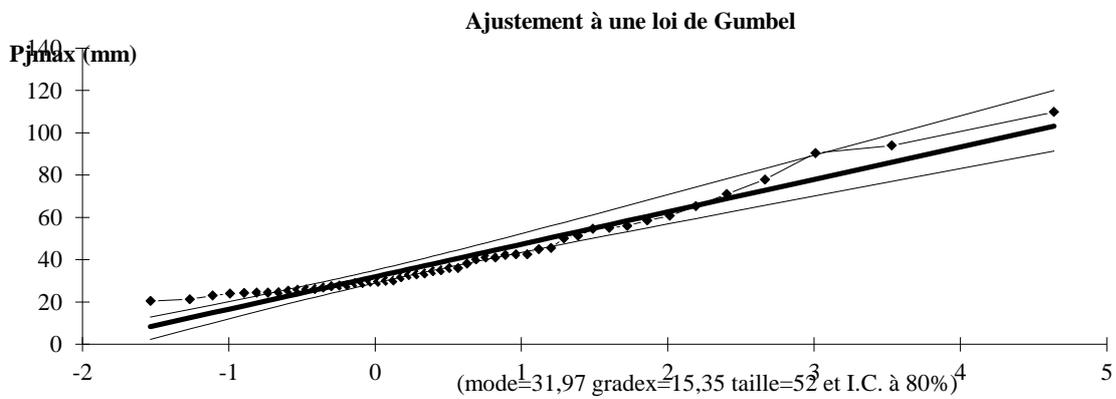


Figure : ajustement des pluies journalières maximales de la station Lamtar à une loi de Gumbel.

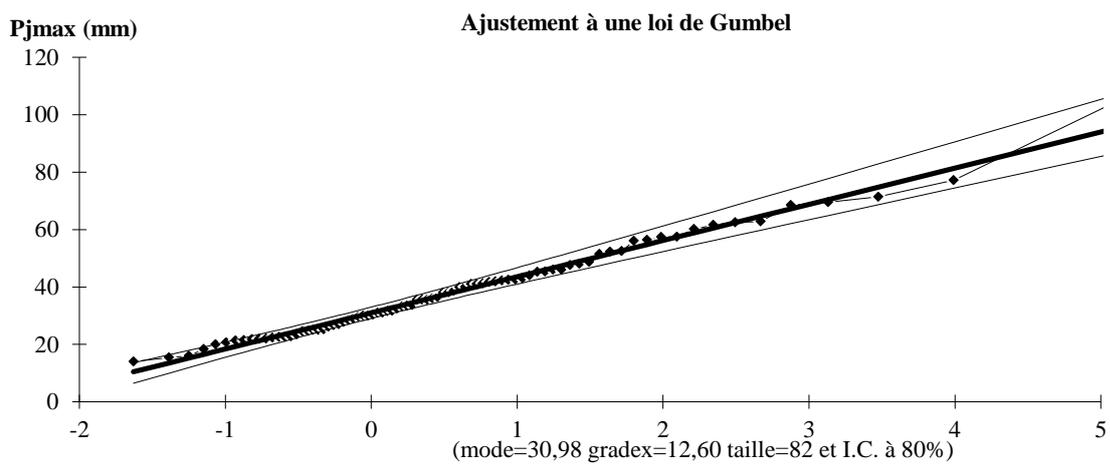


Figure : ajustement des pluies journalières maximales de la station de Sidi Ali Benyoub à une loi de Gumbel.

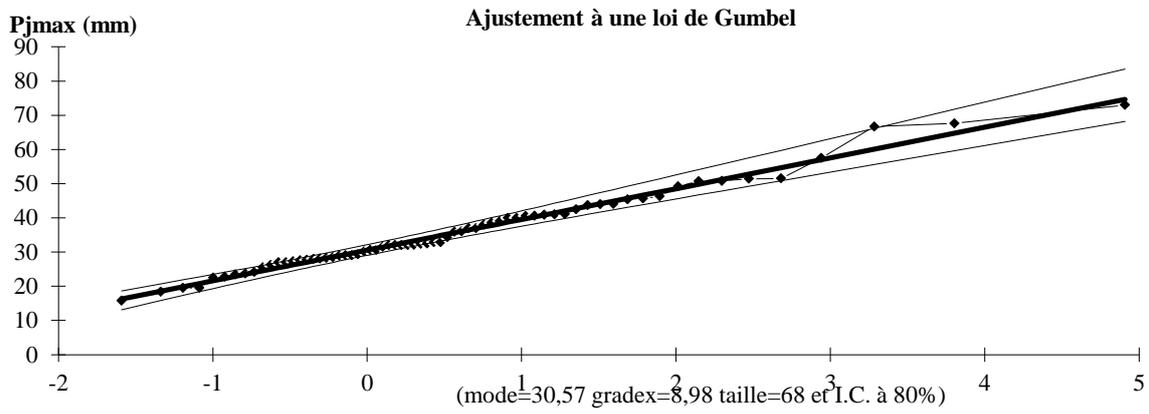


Figure : ajustement des pluies journalières maximales de la station de Sidi Bel Abbès à une loi de Gumbel.

Annexe 4:

Ajustement des débits moyens journaliers

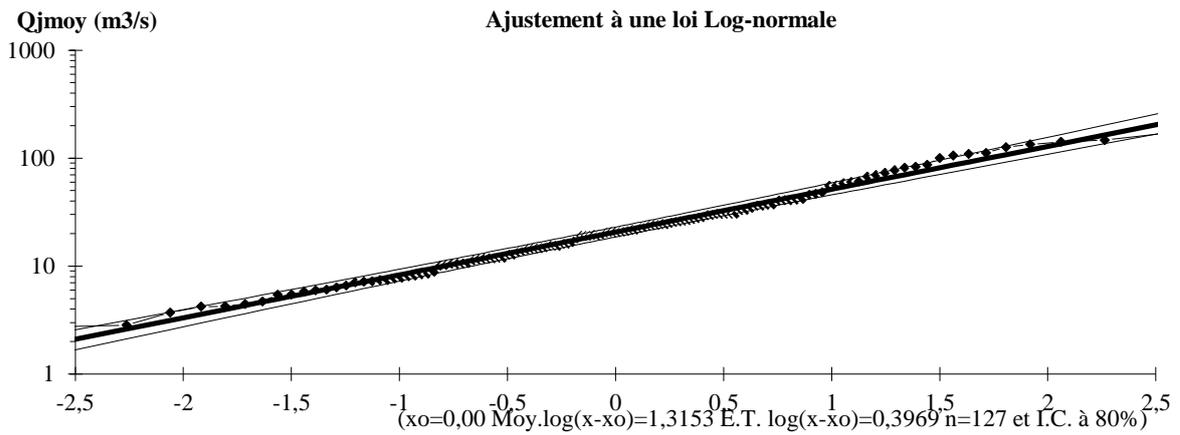


Figure : ajustement des débits moyens journaliers de la station de Sidi Ali Benyoub à une loi Lognormale.

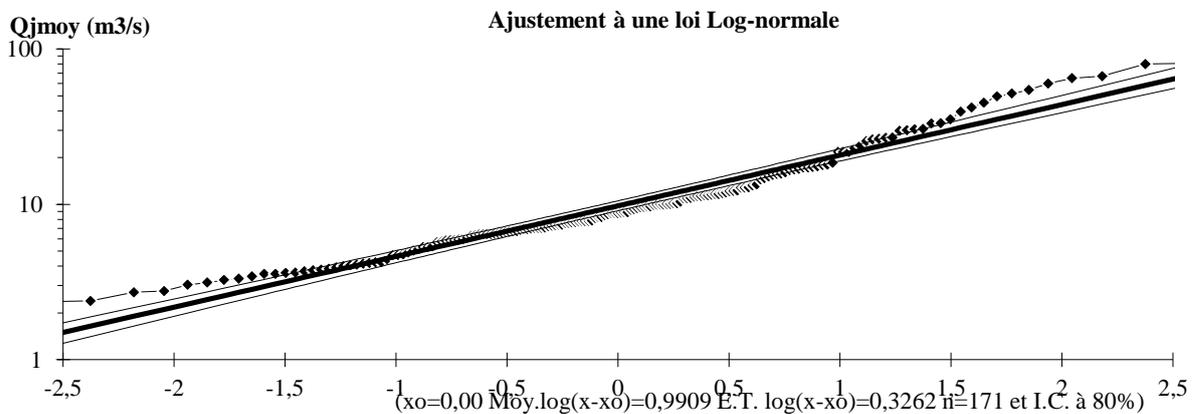


Figure : ajustement des débits moyens journaliers de la station de Sidi Bel Abbès à une loi Lognormale.

Annexe 5:

Ajustement des débits maximaux instantanés.

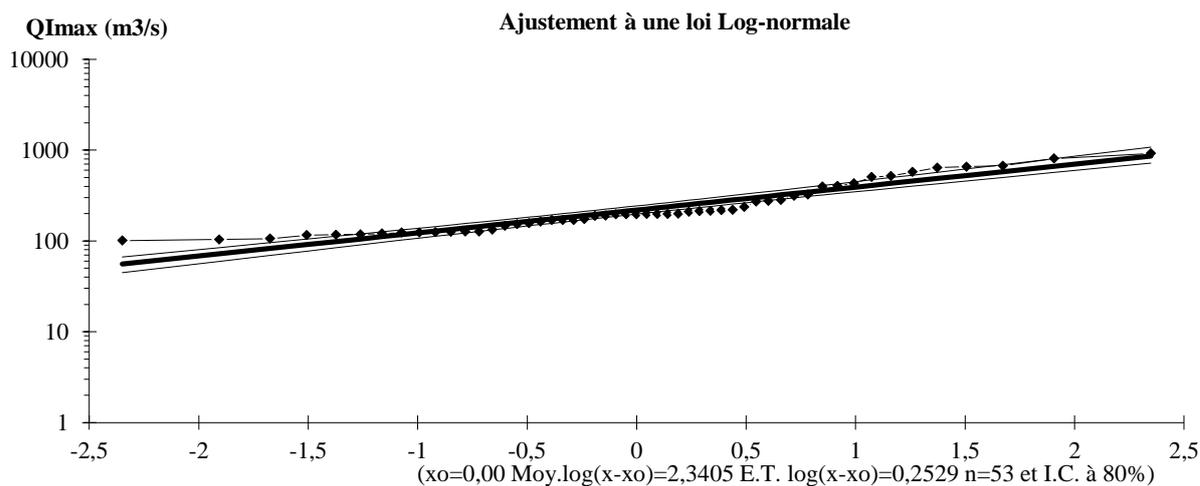


Figure : ajustement des débits maximaux instantanés journaliers de la station de Sidi Ali Benyoub à une loi Lognormale.

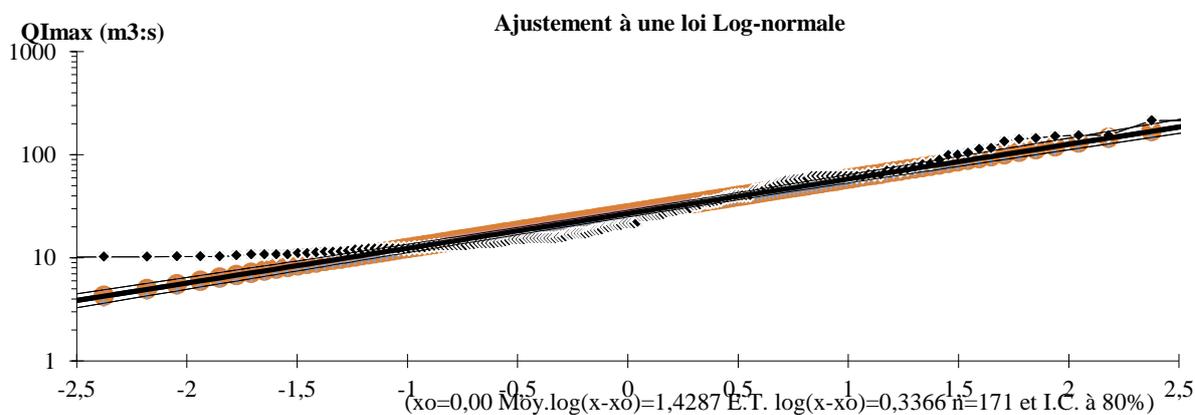


Figure : ajustement des débits maximaux instantanés journaliers de la station de Sidi Bel Abbès à une loi Lognormale.

Annexe 6:

Ajustement des débits continument dépassés sur une durée d pour la station Sidi Ali Ben Youb (11 02 01)

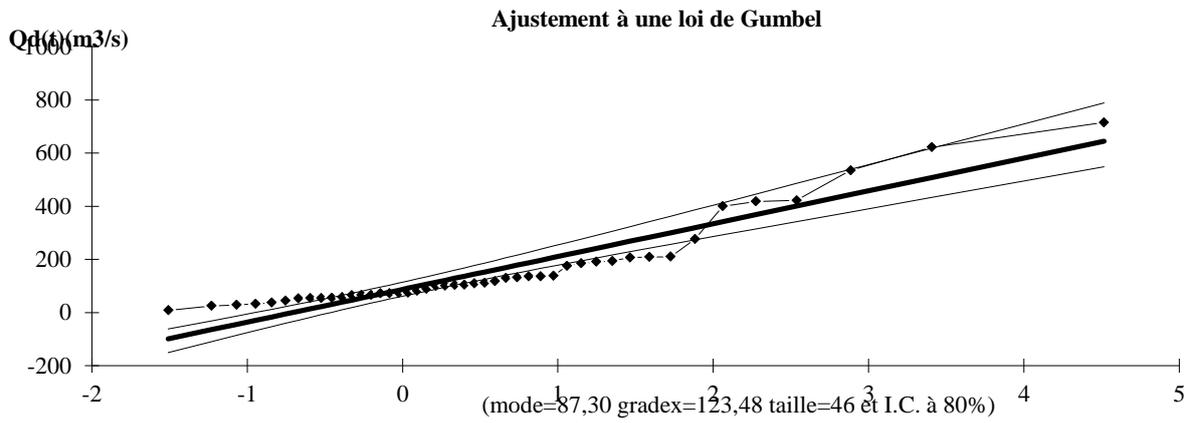


Figure : Ajustement des débits continument dépassés durant trois heures.

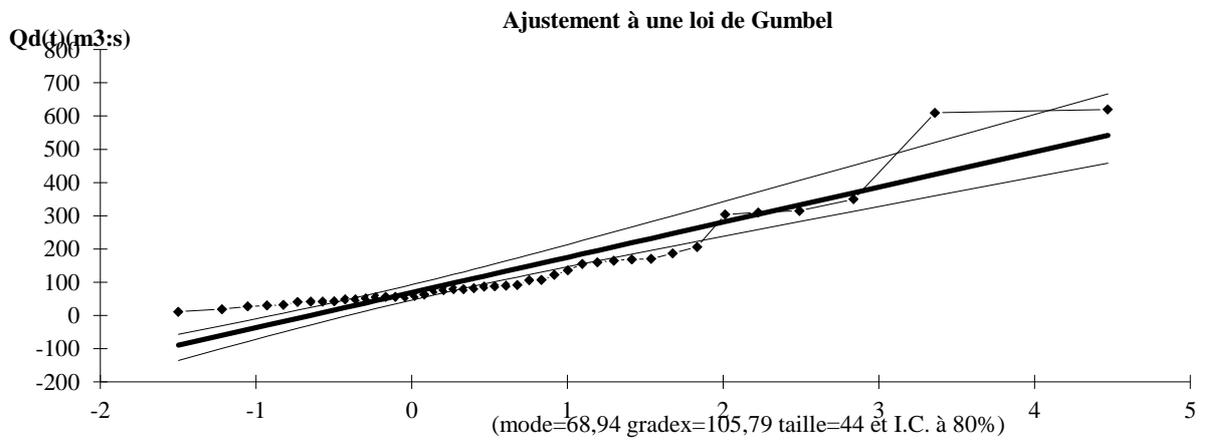


Figure : Ajustement des débits continument dépassés durant quatre heures.

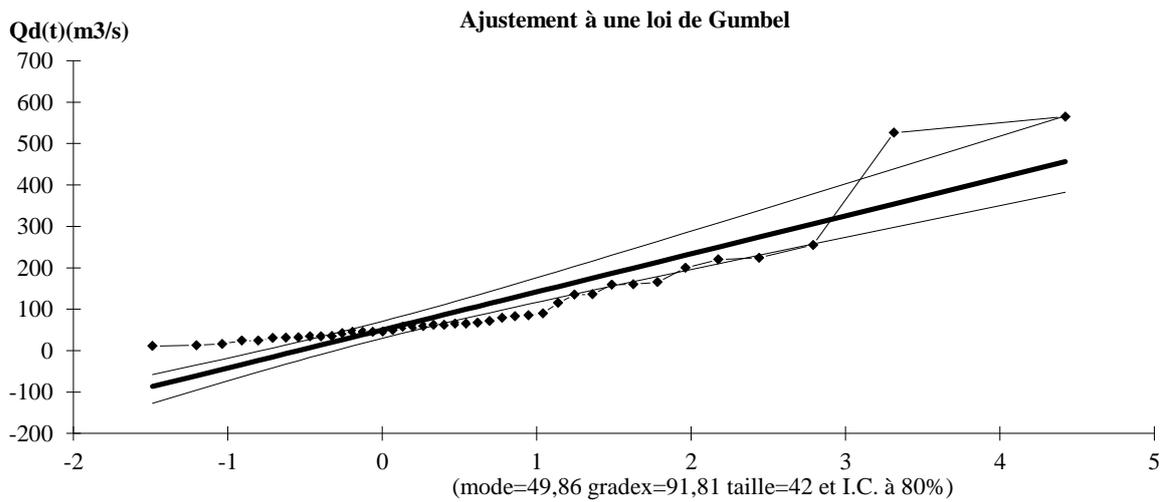


Figure : Ajustement des débits continument dépassés durant cinq heures.

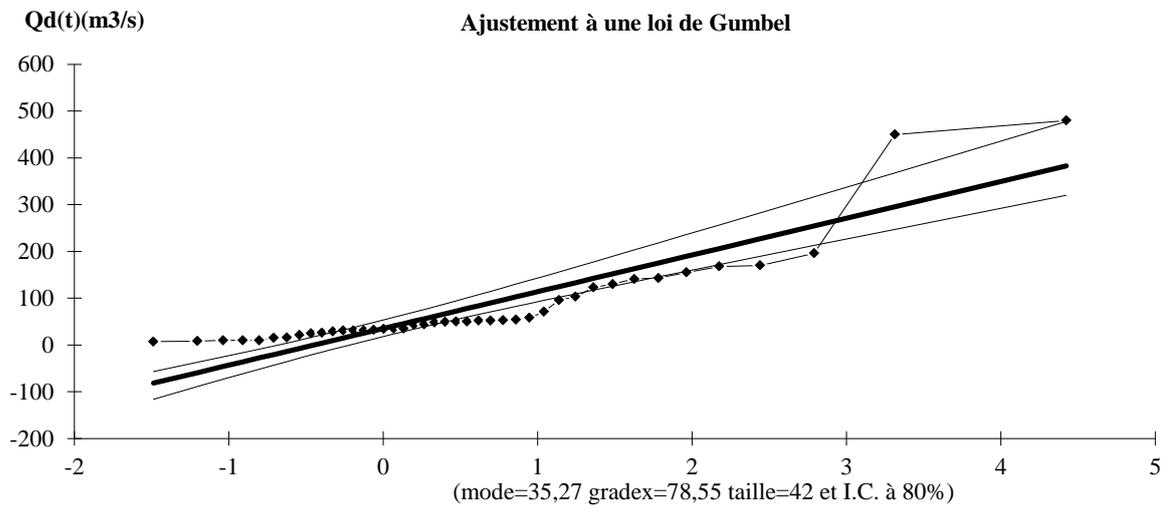


Figure : Ajustement des débits continument dépassés durant six heures

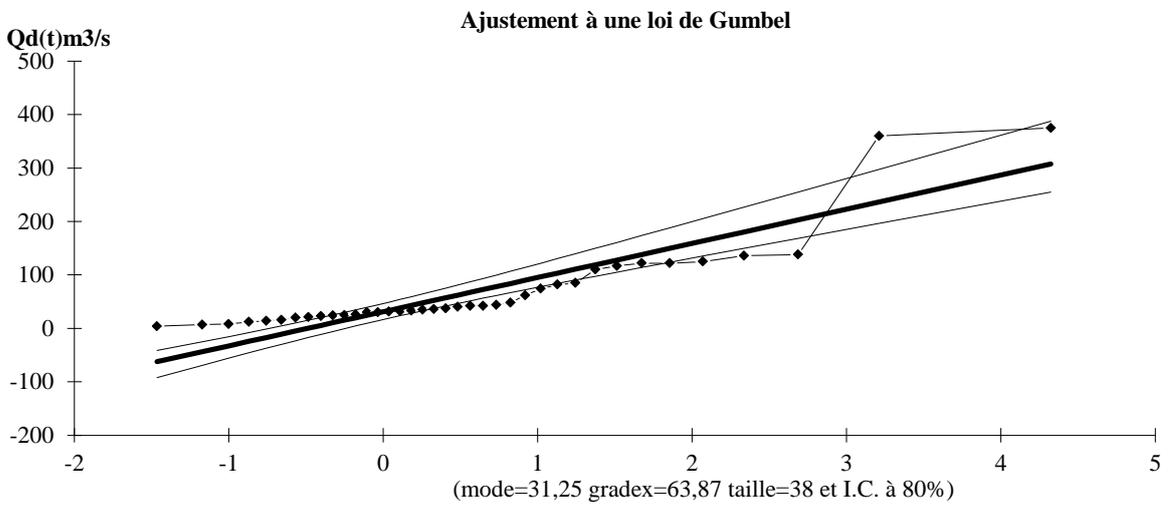


Figure : Ajustement des débits continument dépassés durant sept heures.

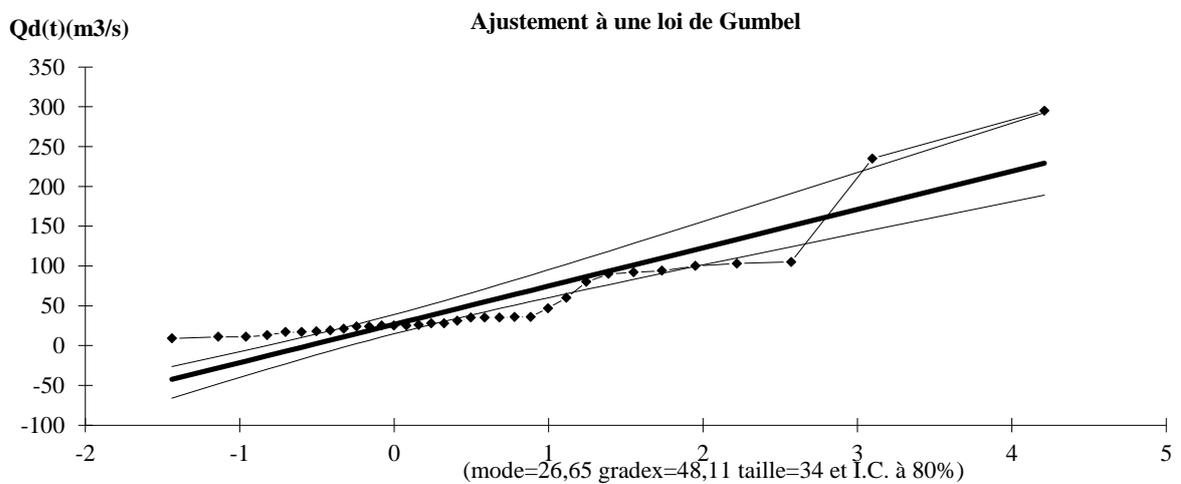


Figure : Ajustement des débits continument dépassés durant huit heures.

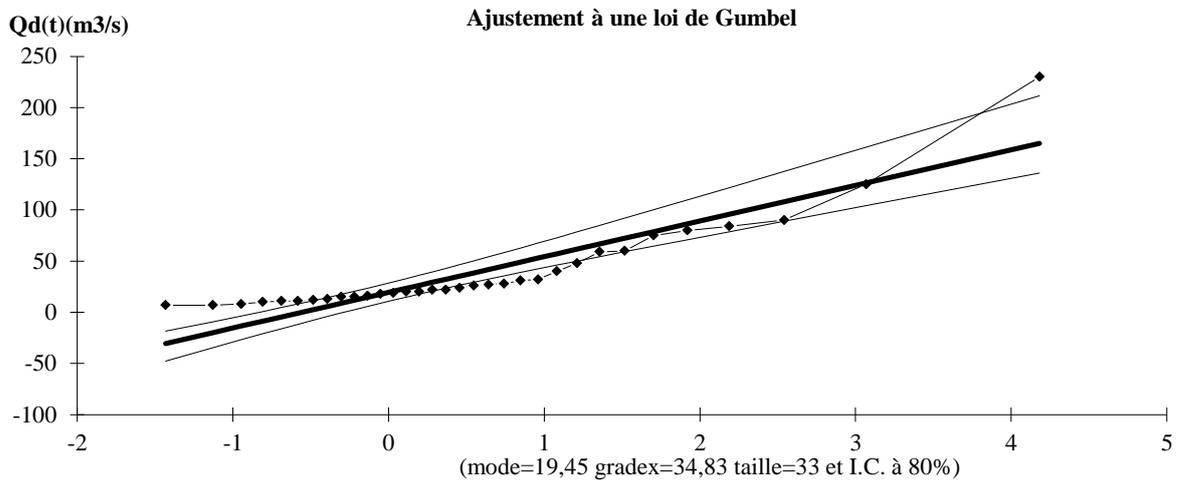


Figure : Ajustement des débits continument dépassés durant neuf heures.

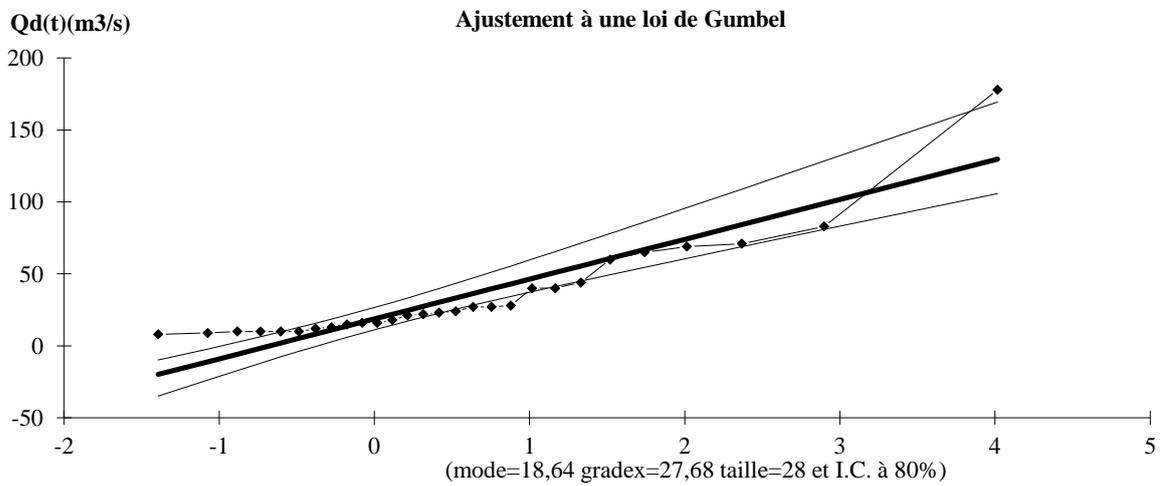


Figure : Ajustement des débits continument dépassés durant dix heures.

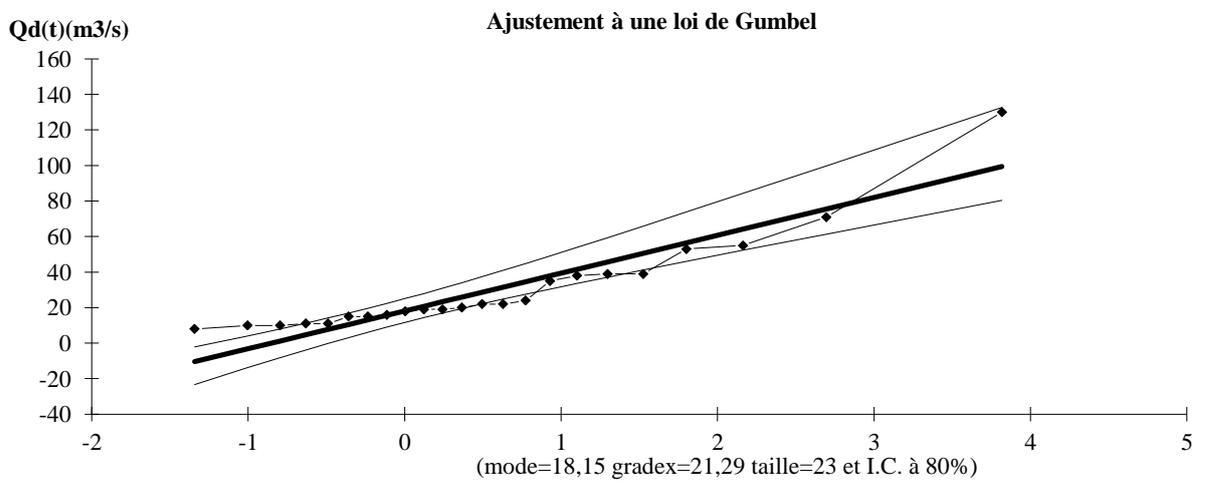


Figure : Ajustement des débits continument dépassés durant onze heures.

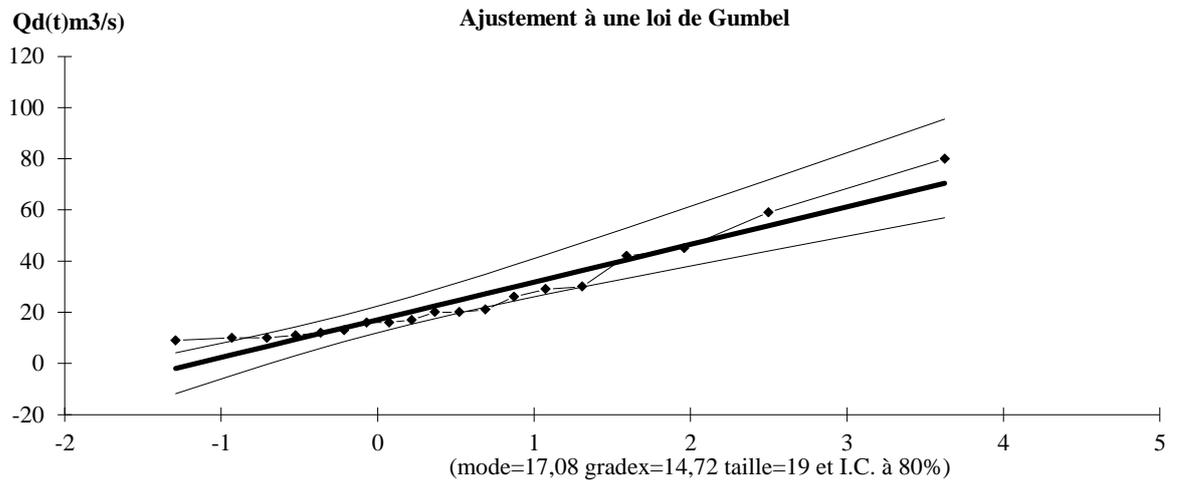


Figure : Ajustement des débits continument dépassés durant douze heures.

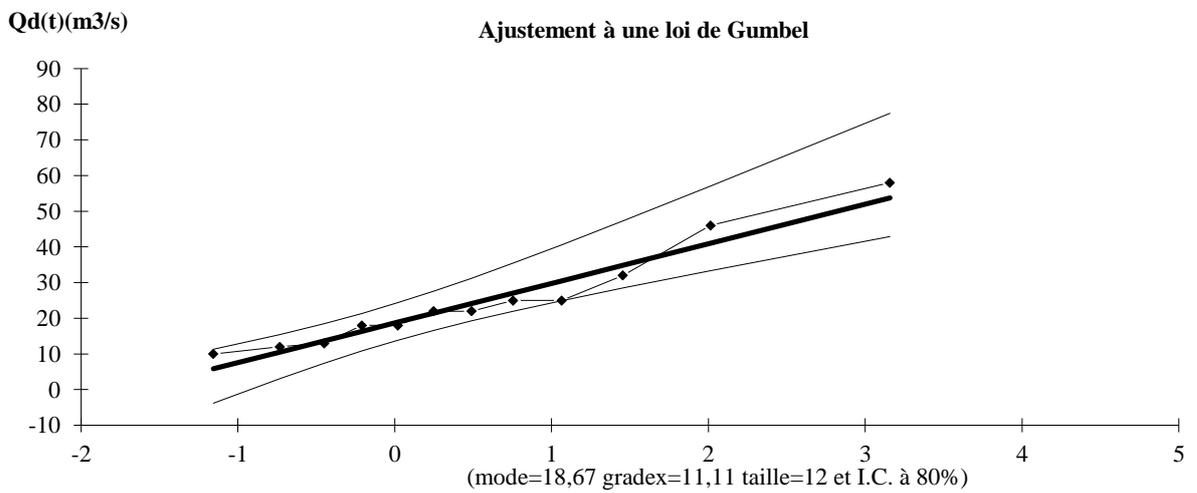


Figure : Ajustement des débits continument dépassés durant treize heures.

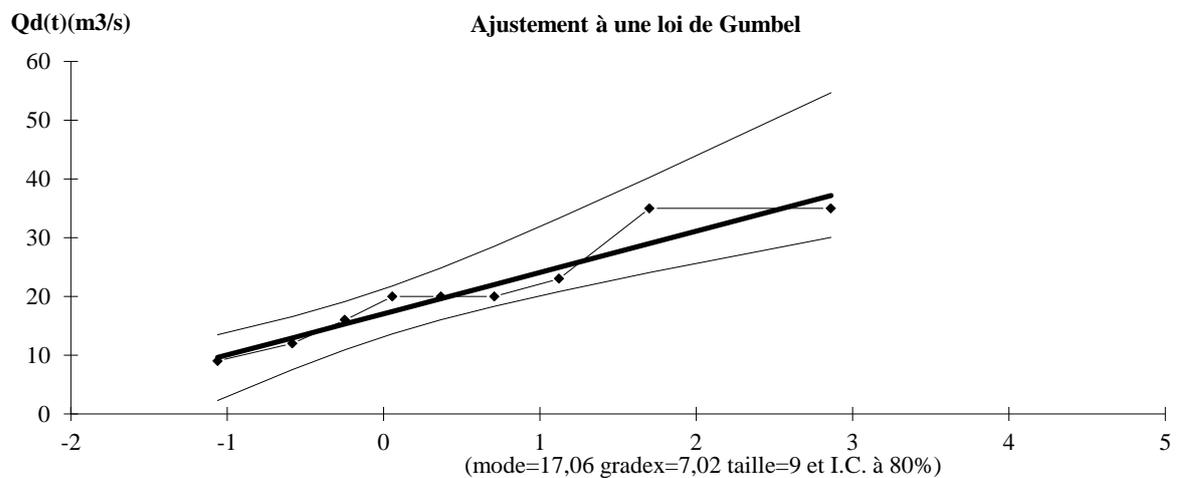


Figure : Ajustement des débits continument dépassés durant quatorze heures.

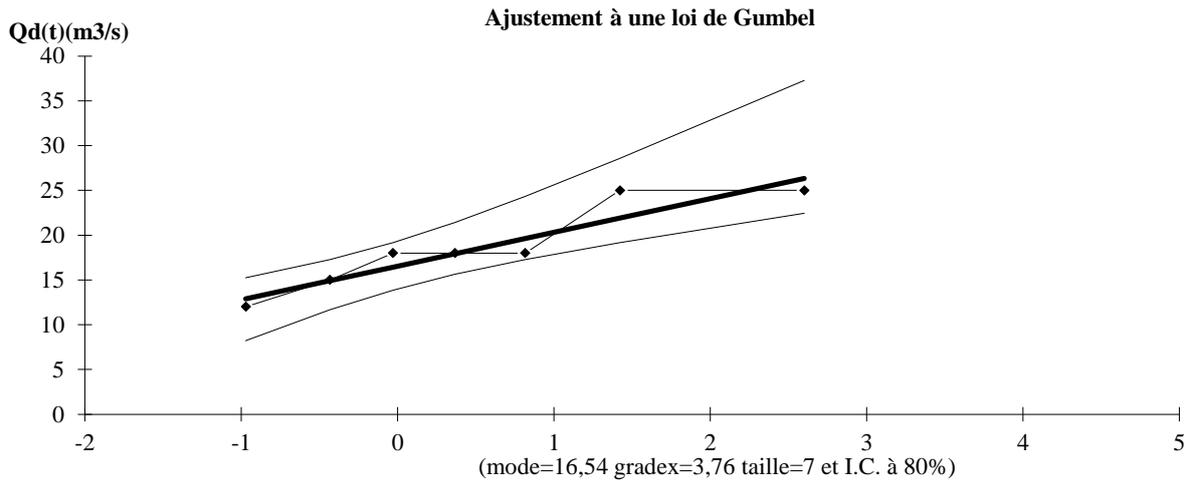


Figure : Ajustement des débits continuent dépassés durant quinze heures.

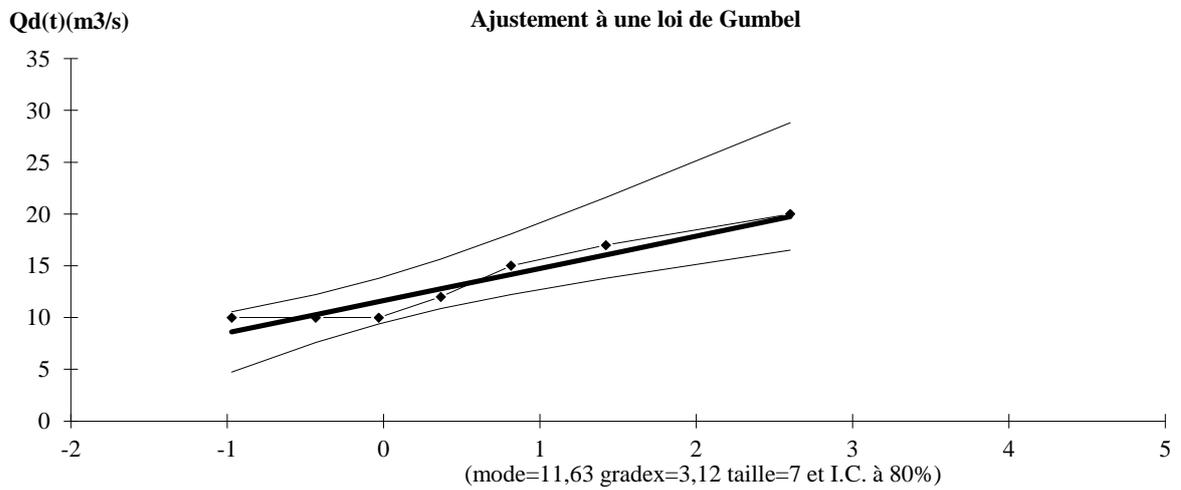


Figure : Ajustement des débits continuent dépassés durant seize heures.

Annexe 7:

Résultats de calage du modèle de Muskingum-Cunge sur les biefs entre les stations de Sidi Ali Benyoub (11 02 01) et Sidi Bel Abbès (11 03 01).

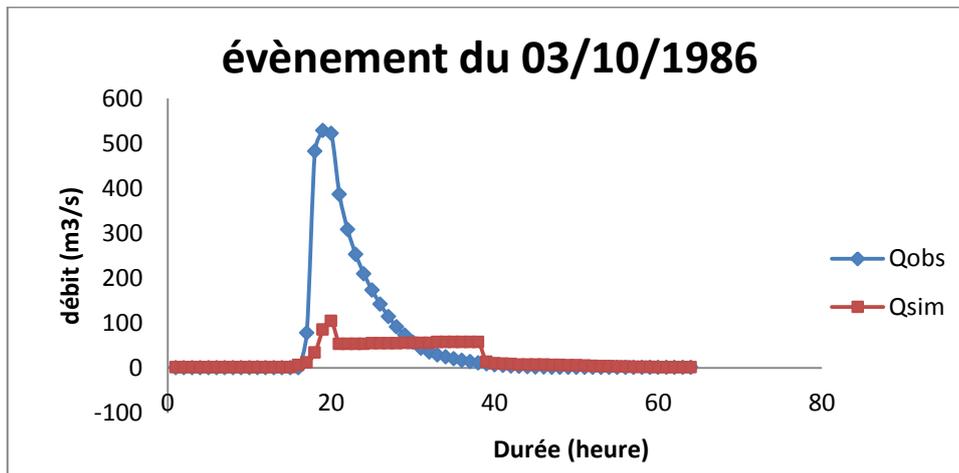


Figure : calage du temps de base du 03/10/1986 à la station de Sidi Bel Abbès (11 03 01).

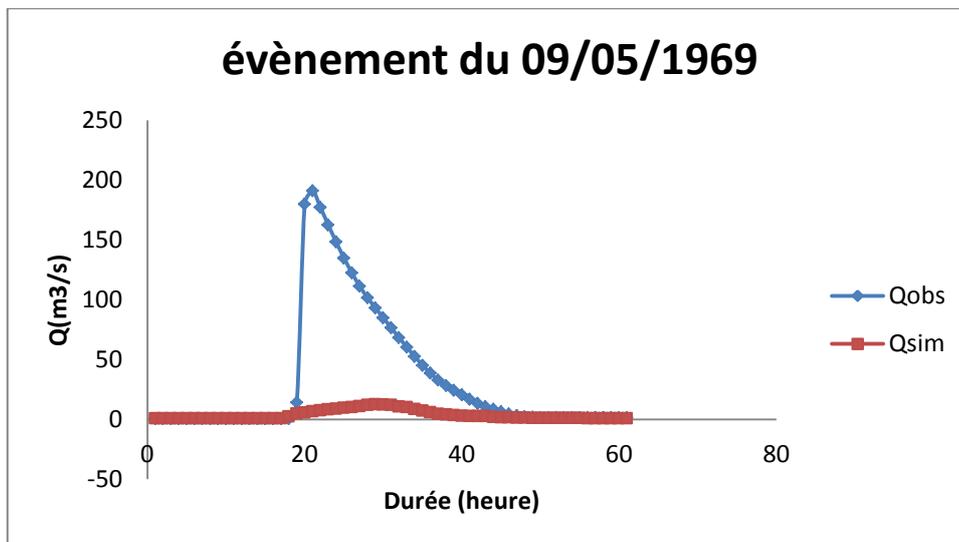


Figure : calage du temps de base du 09/05/1969 à la station de Sidi Bel Abbès (11 03 01).

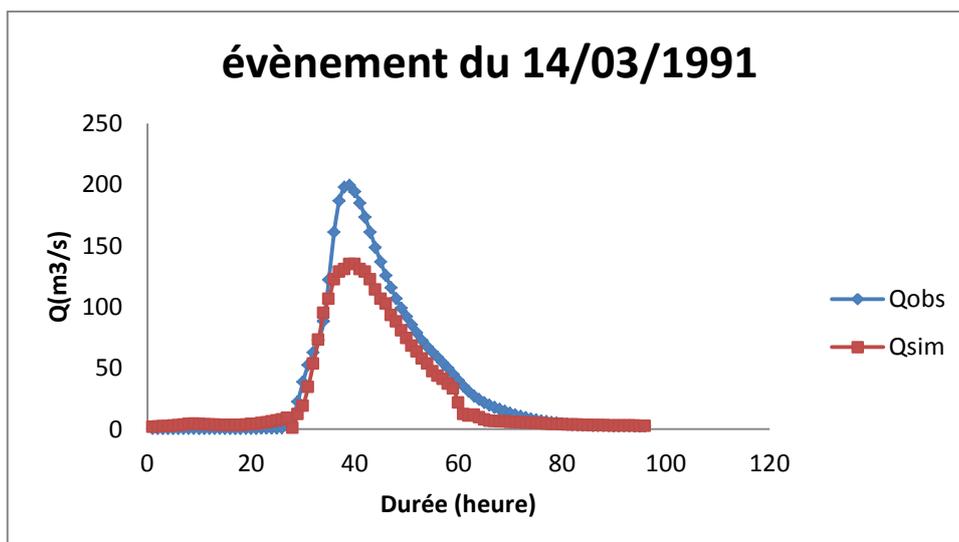


Figure : calage du temps de base du 14/03/1991 à la station de Sidi Bel Abbès (11 03 01).

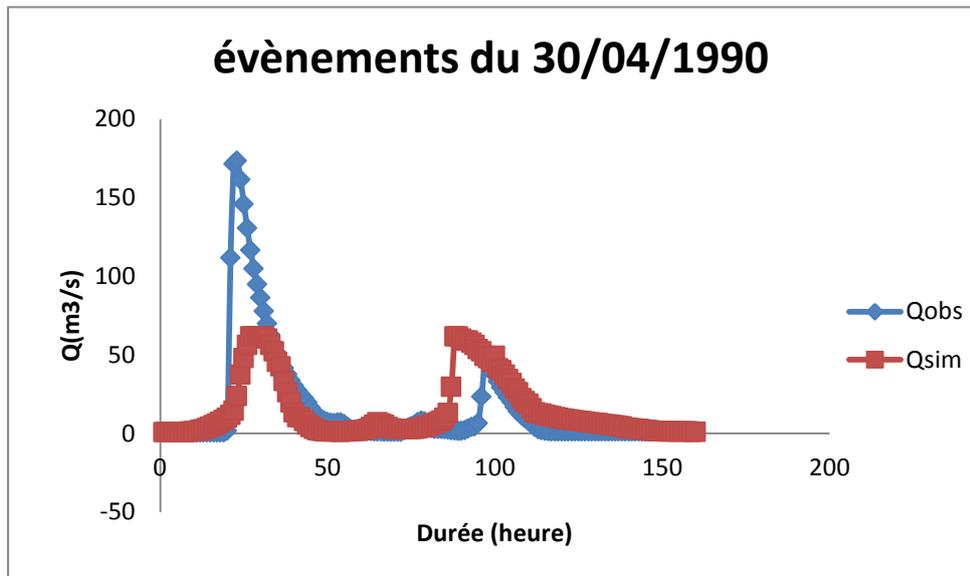


Figure : calage du temps de base du 30/04/1990 à la station de Sidi Bel Abbès (11 03 01).