



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMEN

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT D'HYDRAULIQUE



THÈSE

Pour l'obtention du diplôme de

Doctorat en Hydraulique

Présentée par

MAREF Nouredine

**Démarche méthodologique d'adaptation d'un système de
prévision aux risques d'inondation en Algérie, cas du
bassin versant de l'Oued Mekerra (N.W Algérien)**

Directeur de thèse : **Pr. SEDDINI Abdelali**

Soutenue le 07/02/2019

Devant les membres du jury

JURY

Mme. ABDELBAKI Chérifa	Maître de Conférences (A), Univ. Tlemcen	Présidente
M. SEDDINI Abdelali	Professeur, Univ. Tlemcen	Directeur
M. MEDJBER Abdellah	Professeur, Univ. Saïda	Examineur
M. DRIS Mohammed El-Amine	Maître de Conférences (A), Univ. SBA	Examineur

Tout travail réussi dans la vie, nécessite en premier lieu la faveur de Dieu, et ensuite l'aide et le support de la famille et les amis.

Et en signe de respect et de reconnaissance, je dédie ce travail

A :

Ma mère et mon père ;

Ma chère épouse Amina pour son soutien quotidien, sa compréhension et sa patience à l'égard de mes travaux comme de la vie en général ;

Mes deux enfants Yasser Othmane et Mohamed Houssame ;

Toute ma famille et ma belle famille.

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de cette thèse. Qu'elles trouvent dans ces quelques lignes l'expression de toute ma reconnaissance.

Je tiens à adresser de vifs remerciements à mon encadreur de thèse, Monsieur le Professeur **SEDDINI Abdelali** pour m'avoir encouragée à me lancer dans ce projet ainsi que pour son soutien et ses conseils.

Je remercie tous les membres de Laboratoire Eau et Ouvrages dans Leur Environnement (EOLE), Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, parmi lesquels je tiens à remercier plus spécialement aux membres de l'équipe Ressources en Eau et Mobilisation.

J'adresse également ma profonde reconnaissance à Mr., Dr., **MEDJBER Abdellah**, Maître de Conférences à l'Université de Dr., Moulay Tahar (Saïda) et Mr., Dr., **DRIS Mohammed El-Amine**, Maître de Conférences à l'Université de Dr., Djillali Liabés (Sidi Bel Abbès), pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse en tant qu'examineurs.

Je tiens à remercier grandement Mme., Dr., **ABDELBAKI Chérifa**, Maître de Conférences à l'Université de Abou Bekr Belkaid (Tlemcen), d'avoir accepté de tenir le rôle de Président de ce jury.

Je remercie également **Mr., Boudalia Mohamed** et **Mlle., YAGOUBI Fatiha** chefs services des données hydro-météorologiques au niveau de l'ANRH d'Oran (Agence Nationale Ressource Hydrauliques) pour les données utilisées dans cette thèse.

Mes remerciements d'adressent à tous les membres de l'équipe de l'Unité d'Appui au Programme " Appui au Secteur des Ressources en Eau en Algérie ", en particulier : **Mr., Claudio Zifferero** pour ses informations sur la modélisation hydrologique, à **Mr., Alessandro Dondolini** pour son expertise pour le traitement des données hydrologique, à **Mr., Cesare Piersigilli** pour ses explications sur logiciel HEC-RAS, à **Mr., Karim Lefki** pour ses conseils et ses aides sur le *SIG*.

Je n'oublie pas **Mme., Mendes Amal** chef du projet " UPI " au niveau du Ministère des Ressources en Eaux.

Je tiens à remercier **Mr., Sebastien Jeannelle**, expert informatique et télécommunications de bureau d'étude SAFEGE (France) de m'avoir accueillie dans sa structure durant mon stage.

Je remercie l'**IRD** (Institut de Recherche pour le Développement) pour m'avoir fourni le logiciel ATHYS.

Enfin, je tiens à exprimer mes remerciements à **Mr., Dr., Korichi khaled** " Université de (*SBA*) " pour ses conseils lors de rédaction de cette thèse.

Table des matières

Table des figures	xiii
Liste des tableaux	xviii
Introduction générale	1
1 Cadre de l'étude	1
2 Contexte	2
3 Objectifs de l'étude	6
4 Structure de la thèse	7
I Introduction à la prévision des crues	9
1 Introduction	9
2 Définition des notions abordées	9

2.1	Crue	10
2.2	Inondation	11
2.2.1	<i>Effets des inondations</i>	11
2.2.2	<i>Impacts des inondations</i>	12
2.2.3	<i>Type d'inondation</i>	13
2.3	Aléa	14
2.4	Vulnérabilité	14
2.5	Risque	16
3	Les inondations dans le monde et en Algérie	18
4	Gestion des inondations	20
5	Prévision des crues	21
5.1	Définitions de la prévision des crues	21
5.2	Différents types de prévision des crues	22
5.2.1	<i>La prévision météorologique</i>	22
5.2.2	<i>La prévision pluie-débit</i>	23
5.2.3	<i>La prévision débit-débit /débit-hauteur</i>	23
5.3	Le système de prévision de crues	24
5.3.1	<i>La collecte de données</i>	26
5.3.2	<i>Les modèles de prévision</i>	28
5.3.3	<i>Les prévisionnistes</i>	28

5.4	Les objectifs de la prévision des crues	28
6	Prévision des crues et d’alerte en Algérie	29
6.1	Présentation de l’UPI (Unité de Prévision et d’alerte contre les Inondations)	29
6.2	Principe du choix de la Wilaya de SBA (zone pilote)	30
6.3	Principales missions de l’UPI	32
6.4	Fonctionnement de l’UPI	32
6.4.1	<i>Réseaux de collecte des données en temps réel</i>	32
6.4.2	<i>Les modèles utilisés</i>	35
6.4.3	<i>Cartographie informative</i>	35
7	Conclusion	35
II La zone d’étude		37
1	Introduction	37
2	Bassin de l’Oued Mekerra	38
2.1	Localisation et topographie	38
2.2	Description physique	38
2.3	Description géologique	39
2.4	Occupation du sol	40
3	Hydrographie	41
3.1	Présentation	41

3.2	Les ouvrages hydrauliques	42
4	Caractéristiques hydrométéorologiques	43
4.1	Climat	43
4.2	Pluviométrie	44
4.2.1	<i>Pluies annuelles</i>	44
4.2.2	<i>Pluies mensuelles</i>	45
4.3	Température	47
4.4	Hydrométrie	47
4.4.1	<i>Débits moyens annuels et interannuels</i>	48
4.4.2	<i>Débits moyens mensuels et saisonniers</i>	50
4.4.3	Saisonnalité des crues sur l'Oued Mekerra	51
4.4.4	Caractéristiques des crues de l'Oued Mekerra	52
5	Conclusion	53

III Modélisation hydrologique **54**

1	Introduction	54
2	Processus de la genèse de crue	55
2.1	Processus de ruissellement	55
2.2	Facteurs d'influence de la réponse hydrologique	57
2.3	Transformation de la pluie en hydrogramme de crue	58

2.3.1	<i>Fonction de production</i>	59
2.3.2	<i>Fonction de transfert</i>	59
2.4	Décomposition de l'hydrogramme de crue	59
3	Modélisation hydrologique	60
3.1	Définitions	61
3.2	Modélisation pluie-débit	63
3.3	Typologie des modèles pluie-débit	64
3.4	Modèles de prévision de crues	69
3.5	Procédures de la modélisation pluie-débit	69
3.5.1	<i>Sélection de la structure du modèle</i>	70
3.5.2	<i>Analyse de sensibilité</i>	71
3.5.3	<i>Calibration</i>	71
3.5.4	<i>Validation</i>	72
3.5.5	<i>Prévision (Vérification)</i>	73
4	Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra	74
4.1	Choix du modèle de prévision de crues sur le bassin d'étude	74
4.2	Présentation de la plate-forme de modélisation ATHYS	75
4.3	Structure du modèle MERCEDES	76
4.3.1	<i>Processus de génération de ruissellement</i>	78
4.3.2	<i>Remplissage du réservoir sol</i>	79

4.3.3	<i>Vidange du réservoir sol</i>	79
4.3.4	<i>Routage de ruissellement</i>	80
4.4	Données utilisées	81
4.4.1	<i>Cartes numérisées</i>	82
4.4.2	<i>Données hydro-pluviométriques</i>	84
4.5	Etapas de simulation	84
4.5.1	<i>Etape 1 : Discrétisation du bassin en mailles carrés</i>	85
4.5.2	<i>Etape 2 : Estimation de pluie brute</i>	86
4.5.3	<i>Etape 3 : Calcul de la pluie efficace par la fonction de production</i>	86
4.5.4	<i>Etape 4 : Calcul de la contribution de chaque maille par la fonction de transfert</i>	87
4.5.5	<i>Etape 5 : Calcul de l'hydrogramme de crue à l'exutoire du bassin</i>	87
4.6	Etalonnage et optimisation du modèle	87
4.7	Résultats de simulation de la génération de crue dans l'Oued Mekerra	88
4.7.1	<i>Analyse de performance</i>	88
4.7.2	Analyse de sensibilité	92
4.8	Résultats de reproduction de crues dans l'Oued Mekerra	95
5	Conclusion	96

IV Modélisation hydraulique **98**

1	Introduction	98
---	------------------------	----

2	Modélisation hydraulique	99
2.1	Généralité	99
2.2	Modélisation hydraulique avec HEC-RAS et HEC-GeoRAS	100
2.2.1	<i>Modèle HEC-RAS</i>	100
2.2.2	<i>Modèle HEC-GeoRAS</i>	101
2.3	Principe de simulation par HEC-RAS	102
2.3.1	<i>Régime stationnaire et instationnaire</i>	103
2.3.2	<i>Ecoulement uniforme et non uniforme</i>	103
2.3.3	<i>Ecoulement fluviale et torrentiel</i>	103
2.3.4	<i>Les paramètres géométriques</i>	104
2.3.5	<i>L'équation de continuité (ou de conservation de la masse)</i>	104
2.3.6	<i>Loi de conservation de l'énergie</i>	105
2.3.7	<i>Coefficient de rugosité (Manning)</i>	106
3	Méthodologie de simulation par HEC-RAS et HEC-GeoRAS	107
3.1	Préparation des données spatiales pour l'analyse hydraulique	108
3.2	Application du modèle HEC-RAS	110
3.2.1	<i>Données géométrique sur HEC-RAS</i>	110
3.2.2	<i>Choix du régime d'écoulement</i>	112
3.2.3	<i>Coefficient de Manning (n)</i>	113
3.2.4	<i>Choix des débits de crues</i>	113

3.3	Cartes de crues	115
4	Conclusion	118
V	Communication des prévisions et d’alerte	119
1	Introduction	119
2	Gouvernance des risques d’inondation	119
3	Communication sur les risques d’inondation	120
4	Droit de public à la communication sur les risques d’inondation	121
4.1	Stratégie de communication sur le risque d’inondation	122
5	Caractéristiques du message de risque d’inondation	123
5.1	Echec de communication sur le risque	124
6	Confiance en message de risque	124
7	Evolution de la communication sur les risques	125
7.1	Le rôle des médias	126
7.2	Le rôle des images	126
7.3	Le rôle de SIG	126
8	Cartographie Web	127
8.1	Cartographie des inondations	128
8.2	Types de cartes d’inondation	128
9	Présentation du service de la cartographie Web de l’UPI	129

9.1	Cartes informatives	131
9.1.1	<i>Carte d'expansion d'inondation</i>	131
9.1.2	Cartes de vulnérabilité	133
10	Conclusion	134
	Conclusion générale et recommandations	135
	Bibliographie	151

Table des figures

I.1	L'aléa (<i>Source : www.prim.net</i>)	14
I.2	Vulnérabilité (<i>Source : www.prim.net</i>)	15
I.3	Définition de risque (Samuels, 2005)	16
I.4	Le risque (<i>Source : www.prim.net</i>)	17
I.5	Nombre d'inondations par pays durant la période 1974-2003 (<i>Source: http://www.emdat.be</i>)	18
I.6	Représentation schématique d'un système de prévision des crues	24
I.7	Etapes de fonctionnement d'un système de prévision et d'alerte de crues (Weeink, 2010)	25
I.8	Situation géographique de la wilaya de SBA	31
I.9	Station hydro-pluviométrique automatique sur l'Oued Tadjemout (affluent de l'Oued Mekerra) : (A) : l'abri de station (B) : Unité de mesure (a : appareil de mesure de débit, b : appareil de mesure de pluie, c : modem de transmission GSM et d : batterie d'alimentation)	33

I.10	Réseau de collecte des données hydro-pluviométriques en temps réel dans le bassin de l'Oued Mekerra	34
II.1	Variation interannuelle des pluies du bassin de l'Oued Mekerra entre 1975 et 2013	45
II.2	Variation des précipitations mensuelles observées dans différents pluviomètres dans le bassin de l'Oued Mekerra	46
II.3	Variation mensuelle des températures dans le bassin de l'Oued Mekerra	47
II.4	Variation des débits annuels de l'Oued Mekerra	49
II.5	Variation des débits moyens journaliers de l'Oued Mekerra	51
II.6	Oued Mekerra en écoulement(<i>Région de Ras El Ma le 10/11/2008</i>)	52
II.7	Oued Mekerra à sec (<i>Région de Ras El Ma le 20/11/2008</i>)	52
III.1	Vue schématique de la réponse hydrologique dans un bassin versant (<i>source : http://echo2.epfl.ch/e-drologie</i>)	55
III.2	Processus physiques impliqués dans la génération de ruissellement	56
III.3	Transformation de la pluie brute en hydrogramme de crue (<i>Source: http://echo2.epfl.ch/e-drologie</i>)	58
III.4	Hytogramme et hydrogramme résultant d'un événement pluie-débit (<i>Source : http://echo2.epfl.ch/e-drologie</i>)	60
III.5	Structure d'un modèle hydrologique d'après Singh (1988) (<i>Source : (Gnouma, 2006)</i>)	62
III.6	Classification générale des modèles hydrologiques d'après Chow et al. (1988) (<i>Source : (Abushandi, 2011)</i>)	65

III.7	Procédure (standard) simplifiée pour la modélisation pluie-débit d'après Wagner et al. (2004) (<i>Source : Bessière (2008)</i>)	70
III.8	Menu principal d'ATHYS et de ses 4 modules (<i>sources, http://www.athys-soft.org</i>)	76
III.9	Schéma simplifié de structure du modèle MERCEDES (<i>Source : http://www.athys-soft.org</i>)	77
III.10	Schéma représentatif du mode de transfert en mailles indépendantes(<i>Source : http://www.athys-soft.org</i>)	81
III.11	Discrétisation de l'MNT du bassin de l'Oued Mekerra	82
III.12	Répartition spatiale des différentes classes d'occupation du sol dans le bassin de l'Oued Mekerra	83
III.13	Schéma du principe de simulation pluie-débit avec le modèle MERCEDES (<i>Source : http://www.athys-soft.org</i>)	84
III.14	Schéma de l'algorithme D8	85
III.15	Extraction des directions de drainage sur le bassin versant de l'Oued Mekerra	86
III.16	Valeurs de NSE pour chaque événement étudié	89
III.17	Comparaison entre les hydrogrammes de crues observés et calculés dans la station de jaugeage SABY du bassin versant de l'Oued Mekerra	90
III.18	Valeurs de l'erreur relative (ER) pour les événements étudiés	91
III.19	Valeurs du paramètre de rétention maximale (S) pour chaque type d'occupation du sol (la figure montre seulement les événements dont les valeurs de critère NSE supérieures ou égales à 0.80)	92
III.20	Comparaisons entre l'hydrogramme de crue observé et calculé à la station SABY dans le bassin de l'Oued Mekerra	96

IV.1	Fenêtre de menu principale de HEC-RAS	101
IV.2	Module HEC-GeoRAS intégré dans le logiciel Arc-GIS	102
IV.3	Paramètres géométriques d'un cours d'eau (a) : section transversale (b) : profil en long	104
IV.4	Schéma du principe de la loi de conservation de l'énergie	105
IV.5	Organigramme de la méthodologie de simulation hydraulique avec HEC-RAS et HEC-GeoRAS	108
IV.6	Elaboration des données spatiales de l'Oued Mekerra dans HEC-GeoRAS . . .	109
IV.7	Modélisation de la géométrie de l'Oueds Mekerra et Tadjemout dans HEC-RAS	110
IV.8	Modèle de section transversal dans HEC-RAS	111
IV.9	Modèle du pont dans HEC-RAS (<i>pont routier sur Oued Mekerra</i>)	112
IV.10	Modèle du barrage dans HEC-RAS (<i>barrage d'écrêtement sur Oued Mekerra</i>) .	112
IV.11	Introduire les débits de crues et les conditions aux limites	114
IV.12	Exportation des résultats de simulation vers HEC-GeoRAS	114
IV.13	Extraction des extensions des eaux de l'inondation par HEC-GeoRAS	115
IV.14	Cartes d'épandage des eaux de crue cinquantennale (Q_{50})	116
IV.15	Cartes d'épandage des eaux de crue centennale (Q_{100})	117
V.1	Site d'information sur le risque de crues en Algérie (WWW.UPI.dz)	130
V.2	Visualisation d'une image d'expansion d'inondation sur l'Oued Mekerra et illustration des lieux à risque (<i>Image Google Earth de la ville Ras El Ma</i>) . . .	132

V.3	Carte de vulnérabilité montrant des zones de risques différents sur l'Oued Mekerra (<i>Image Google Earth de la ville SABY</i>)	133
A.1	Situation géographique du bassin de l'Oued Mekerra	141
A.2	Carte des altitudes du bassin de l'Oued Mekerra (<i>Issue d'une image SRTM</i>) .	142
A.3	Répartition spatiale des entités géologique du bassin de l'Oued Mekerra. (<i>Digitalisée par ArcGIS 9.3. Source : Agence Nationale de l'Aménagement du Territoire, 2000</i>)	143
A.4	Répartition spatiale des différents usages des sols du bassin de l'Oued Mekerra. (<i>Digitalisée par ArcGIS 9.3. Source : Agence Nationale de l'Aménagement du Territoire, 2000</i>)	144
A.5	Principaux affluents de l'Oued Mekerra	145
A.6	Localisations des principaux ouvrages hydrauliques de lutte contre les inondations dans le bassin versant de l'Oued Mekerra	146
A.7	Localisations des stations hydro-pluviométriques du bassin versant de l'Oued Mekerra	147
A.8	Activité hydrologique mensuelle le long de l'Oued Mekerra	148
A.9	Ajustement par la loi de Gumbel des Q_{max} des trois stations jaugeages.	150

Liste des tableaux

I.1	Inventaire des inondations tragiques en Algérie	19
I.2	Quatre niveaux de vigilances crues	26
II.1	Récapitulation des paramètres morphologiques du bassin de l'Oued Mekerra .	38
II.2	Répartition de la population le long de l'Oued Mekerra	41
II.3	Caractéristiques des stations pluviométriques du bassin de l'Oued Mekerra . .	44
III.1	Résultats de simulation de crues par MERCEDES	95
IV.1	Grandeurs de α (Debo and Reese, 2002)	106
IV.2	Inventaire des profils en travers et ouvrages hydrauliques exploités dans la simulation HEC-RAS	111
IV.3	Coefficients de Manning (n) affectés aux différentes natures des sections du canal sud, Oueds Mekerra et Tadjemout	113

IV.4	Débits fréquents simulés (débit de pointe en m^3/s)	113
A.1	Caractéristiques des pluies et des débits sélectionnés pour la simulation avec MERCEDES	149

Liste des symboles

A : Surface (m^2)

ad : Adimensionnel

$C(t)$: Coefficient de ruissellement

ds : Coefficient de la vidange (j^{-1})

$Exf(t)$: Exfiltration

F : Nombre de Froude (ad)

$f(t)$: Infiltration (mm)

g : Accélération due à la gravité (m/s^2)

ha : Hectare

HF : Haute fréquence

h_e : Pertes de charge (m).

I_a : Perte initiale (mm)

$i(t)$: Intensité de pluie (mm/min)

K : Coefficients de pondération des vitesses (m^3/s)

K_0 : Constante de proportionnalité ($K_0= 0.7$)

L : Longueur (m)

L_m : Longueur du chemin d'écoulement(m)

l : Largeur du miroir

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

P : Périmètre

$P(t)$: Pluie cumulée (mm)

$P_{j.max}$: Pluie maximal journalière

P_{Tota} : Pluie mensuelle totale

Q : Débit d'eau m^3/s

$Q_{j.max}$: Débit maximum journalier

$Q_{cal,i}$: Débits simulés

$Q_{obs,i}$: Débits observés

\bar{Q}_{obs} : Moyenne des débits observés

Q_p : Débit de pointe

q : Débit spécifique ($m^3.s^{-1}$)

R : Rayon hydraulique (m)

$R(t)$: Ruissellement

S_m : Section mouillée

$S(t)$: Capacité de rétention en eau du sol (l'infiltration cumulée)(mm)

T_m : Temps de propagation

t : Temps

V_0 : Vitesse de transfert ($m.s^{-1}$)

$vid(t)$: Drainage du réservoir sol

ω : Fraction de l'eau de drainage

y : Tirant d'eau

θ : angle ($^\circ$)

1D : Unidimensionnel

2D : Bidimensionnel

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

ATHYS : ATelier HYdrologique Spatialisé

BMS : Bulletin Météo Spécial

CMD : Coefficient mensuel du débit

DEM : Digital Elevation Model
DREW : Direction des Ressources en Eau de Wilaya
EAM : Ecart Arithmétique Moyen
EQM : Ecart Quadratique Moyen
ER : Erreur Relative
GSM : Global System for Mobile Communications
MAE : Mean absolute error
MERCEDES : Maillage Élémentaire Régulier Carré pour l'Etude des Ecoulements Superficiels
MMS : Multimedia Messaging Service
MNT : Modèle Numérique de Terrain
NGA : Nivellement Général d'Algérie
NSE : Critère d'efficacité de Nash-Sutcliffe
ONM : Office National de Météorologique
ONU : Organisation des Nations Unies
ORSEC : Organisation de la Réponse de Sécurité Civile
PAPC : Président de l'Assemblée Populaire Communale
RMSE : Root Mean Square Error
SABY : Sidi Ali Ben Youb
SBA : Sidi Bel Abbès
SCS : Soil Conservation Service
SIG : Système d'Information Géographique
SMS : Short Message Service
TIN : Triangulated Irregular Network
UPI : Unité de Prévision des Inondations
VE : Vector Error

Introduction générale

1 Cadre de l'étude

Ce projet de thèse de doctorat se déroule dans le cadre d'un programme d'appui au secteur des ressources en eau en Algérie dont le thème est «*Méthodologie et procédure de mise en place et de gestion d'un système de prévisions et d'alerte aux risques inondations*».

Ce programme a débuté en 2007 et s'est achevé en Novembre 2011 et entre dans de la cadre d'une collaboration scientifique, entre l'état Algérien représenté par le Ministère des Ressources en Eau et l'Union Européenne. Ce projet s'axe sur la mise en place et développement d'un organisme public pour la prévision et d'alerte contre les inondations dénommé UPI (**U**nité de **P**révision des **I**nondations).

Dans ce contexte, le bassin de l'Oued Mekerra, qui occupe une grande partie de territoire de la wilaya de Sidi Bel Abbès, a été choisi comme un cas d'étude d'où l'UPI va intervenir comme première étape dans cette wilaya. Enfin, ce projet de recherche aboutira à la généralisation de cet organisme dans tout le territoire Algérien.

2 Contexte

Le risque d'inondation représente le principal risque naturel dans le monde en termes d'impact humain et de pertes économiques (Messner et al., 2007). Les inondations peuvent également endommager l'environnement (Yang, 1993; Tangara, 2005).

Les dégâts causés par les inondations sont devenu plus important au cours des dernières années en raison de l'expansion urbaine forte dans les zones vulnérables à l'inondation. De 1900 à 1980, les inondations ont causé plus de 339 millions de victimes (Ballais et al., 2011). Dans le monde, les inondations causent plus de (50%) de la perte de vies humaines en moyenne de 20 000 morts/an (Randrianasolo, 2009). Au cours des dernières décennies, plus de deux tiers des personnes touchées par des catastrophes naturelles ont été victimes d'inondations, qui représentent également environ un tiers des pertes économiques de ces catastrophes à travers le monde (ONU, 2004). Ces dégâts ont été estimés à 50 milliards de dollars US par an durant la décennie 1990-1999 et une augmentation des coûts de 4% par an (Ketrouci, 2014).

En Algérie, les inondations catastrophiques constituent ainsi une contrainte majeure pour le développement économique et social. Selon la base de données national sur les catastrophes (DGPC, 2010), une commune sur trois (485 communes) est susceptible d'être inondée en partie ou en totalité et les dégâts peuvent être amplifiés plus particulièrement pour la population habitante aux voisinages des oueds (Borsali et al., 2005; Cheikhounis et al., 2011), comme c'est le cas des inondations du 10 novembre 2001 qui furent les plus meurtrières de l'histoire des inondations en Algérie. Au cours de la dernière décennie, les inondations ont touché plusieurs régions dans ce pays dont la wilaya de SBA (la partie Nord-Ouest de l'Algérie). Régulièrement, nombreuses régions dans cette wilaya sont affectées par les inondations de l'Oued Mekerra et ses affluents.

L'atténuation des risques d'inondations comprend des mesures structurelles et non structurelles. La plupart des mesures pratiques, pour lutter contre les dangers associés aux inondations, se sont principalement concentrées sur un certain nombre d'activités et d'actions structurelles qui impliquent des travaux de génie civil comme la réalisation des barrages, des digues, des canaux de dérivation, l'approfondissement ou l'élargissement des cours d'eau, etc.

Cependant, il n'est pas possible aujourd'hui de gérer complètement les dommages causés par les inondations par des aménagements structurels à cause des contraintes économiques,

environnementales et sociales.

Les mesures non structurelles comprennent, la prévision des crues, les alertes aux inondations, la planification d'urgence, sensibilisation, etc. En effet, les mesures non structurelles telles que la prévision en temps réel, le déclenchement des alertes et l'annonce de crues constituent souvent la seule possibilité de protection contre les inondations. Cette stratégie s'inscrit dans une optique de prévention fiable pour aider les autorités à s'adapter aux inondations et à réduire leurs impacts négatifs de manière à permettre l'évacuation rapide des personnes hors des zones menacées. Les procédures d'alerte aux inondations sont vitales pour sauver des vies et réduire les dommages économiques ([Drobot and Parker, 2007](#); [Keys and Cawood, 2007](#)).

L'établissement d'un système de prévision et d'alerte précoce nécessite la combinaison de données, d'outils de prévision, de prévisionnistes qualifiés et de moyens de communications.

Les données hydrométéorologiques, en particulier, les données de précipitations et de débits sont essentielle au succès d'un programme de prévision de crues. Ces données doivent être observées et collectées au moyen de réseaux d'observation opérationnels en temps réel, afin que le système de prévision hydrologique puisse produire des prévisions fiables et à temps. Généralement, la conception et le fonctionnement des réseaux de données hydro-météorologiques ont une grande influence sur la précision du système de prévision et sur le potentiel de système d'alerte à réduire les impacts négatifs des inondations.

La technologie de télémessure est actuellement la forme la plus courante pour transmettre les données, en temps réel, depuis des stations d'observation (stations hydro-météorologiques) vers le centre de prévision.

Ces données sont transmises via un moyen de communication aux prévisionnistes de centre de prévision qui trient ces données et mettent en œuvre les modèles de prévision, afin de prévoir les inondations et déclencher les avertissements en temps opportun.

Classiquement, la prévision opérationnelle des crues repose sur des modèles hydrologiques et hydrauliques.

La modélisation hydrologique est une partie importante dans une méthodologie de prévision des crues. Le modèle hydrologique est fondé sur la modélisation de la relation pluie-débit ([Dechemi and Chambaz, 1994](#); [Fourmigue and Lavabre, 2005](#)). La modélisation pluie-débit consiste

à transformer les pluies incidentes sur un bassin versant en terme de débits à l'exutoire ([Benkaci and Dechemi, 2004](#); [Fourmigue and Lavabre, 2005](#)).

Dans une optique de prévision des crues le modèle pluie- débit doit être adapté avec le mode événementiel. Un modèle basé sur les événements a tendance à simuler la réponse du bassin aux pluies torrentielles occasionnelles sans tenir compte des conditions précédentes ([Le, 2008](#)). Les modèles pluie-débit basés sur les événements sont efficaces dans la prévision hydrologique opérationnelle ([Muhammad et al., 2015](#)).

Cependant, la transformation de la pluie en ruissellement représente le processus le plus complexe à modéliser ([Duband, 1999](#); [Estupina, 2004](#)). La cause de cette complexité est liée à l'hétérogénéité des caractéristiques de surface et la physique des processus ([Bouvier, 2004](#); [Jain et al., 2004](#)). En effet, la relation pluie-débit dépend fortement du sol, de la végétation et des caractéristiques topographiques du bassin versant ([Jain et al., 2004](#)).

La variabilité spatiale des facteurs qui déterminent les écoulements, en particulier dans le milieu aride et semi-aride, a conduit à développer des modèles spatialement distribués pour une meilleure compréhension des systèmes hydrologiques. Les modèles distribués sont couramment utilisés comme outils pour décrire les processus hydrologiques qui varient à l'échelle spatiale dans le bassin versant ([Abushandi, 2011](#)). La nature distribuée de ces modèles permet de fournir une meilleure représentation des caractéristiques physiques du bassin versant telles que l'hétérogénéité des propriétés du sol, la végétation et les caractéristiques topographiques.

La disponibilité de données de télédétection telles que l'MNT (Modèle Numérique de Terrain) et les images satellites et les avancées récentes en matière de matériel informatique et de technologie de SIG (Système d'Information Géographique) rendent l'utilisation des modèles spatialement distribués beaucoup plus facile et pratique.

Ces dernières années, certains modèles distribués ont obtenu une reconnaissance mondiale, comme exemple : modèle l'USDA SWAT ([Arnold et al., 1998](#)), TOPMODEL ([Beven and Kirkby, 1979](#)), MERCEDES ([Bouvier, 2004](#)), etc. Toutefois, la plupart de ces modèles sont séparés aux outils de traitement de l'information spatiale, ce qui rend leur utilisation implique un défi important pour les hydrologues.

Afin de faciliter l'utilisation de ces modèles, les plateformes, regroupant des modèles et des modules de traitement de données spatiales, offrent un environnement homogène et convivial,

susceptible de faciliter la mise en œuvre des modèles spatialisés. Parmi ces plateformes, nous présentons le logiciel ATHYS (ATelier HYdrologique Spatialisé) qui représente un environnement hydrologique dédié à la modélisation spatialisée par le modèle MERCEDES (Maillage Élémentaire Régulier Carré pour l'Etude des Ecoulements Superficiels). MERCEDES est un modèle spatial et conceptuel basé sur la discrétisation spatiale du bassin en mailles carrées régulières (Beven, 2001). Chaque cellule contient des informations sur les caractéristiques du sol, l'occupation du sol, la pente et la direction de drainages (Jain et al., 2004). MERCEDES permet également de la fusion des données hydrologiques (pluie, débit, ...), des données géographiques (MNT, cartographie de l'occupation du sol, ...) et des modèles (méthodes de production et de transfert) pour simuler la réponse hydrologique du bassin.

MERCEDES a été appliqué avec succès sur différents types du bassin versant incluant quelques bassins semi-arides. À titre d'exemple, MERCEDES a été appliqué : dans deux bassins ruraux en France tels que Rognon (618 km^2) (Boulay, 2011) et Gardon (545 km^2) (Marchandise, 2007); dans le bassin urbain de Ouagadougou (610 ha) situé au Burkina Faso (Bouvier and Delclaux, 1996); dans deux bassins ruraux situés à l'Est de l'Algérie, tels que Kissir (92 km^2) et Bouhamdene (1105 km^2) (Abdi and Meddi, 2015) .

Le processus de prévision des crues nécessite également la modélisation hydraulique (débit-débit/ débit-hauteur). L'hydraulique intervient essentiellement pour examiner les conséquences des débits, prévus par l'hydrologie, en termes d'élévations de la surface de l'eau, vitesses et durées des submersions. Les modèles de propagation hydraulique permettent de prévoir l'expansion des crues au sein du cours d'eau et notamment de déterminer les zones les plus touchées par l'inondation.

En utilisant le SIG, le profile de la surface de l'eau de crue peut d'être visualisé sous forme des cartes interactives qui illustrent clairement et rapidement l'étendue de l'inondation à des endroits spécifiques. Ces cartes peuvent ensuite être utilisées pour caractériser réellement l'exposition au risque d'inondation.

À cette fin, un certain nombre de modèles et utilitaires de SIG sont actuellement disponibles pour la simulation hydraulique et délimitation automatique des zones inondables. Parmi les modèles les plus connus, nous présentons HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*), développé par les Corps des ingénieurs de l'armée américaine (*US Army Corps of Engineers*). HEC-RAS est un système intégré de logiciels conçu pour effectuer des calculs

hydrauliques, unidimensionnel (1D), pour les cours d'eau naturels ou artificiels. Les résultats de simulation par HEC-RAS peuvent être exportés vers le module HEC-GeoRAS pour l'analyse de SIG. Cette extension, de logiciel ArcGIS, est utilisée soit pour la préparation des données spatiales à exporter vers HEC-RAS ou pour exploiter les résultats de la simulation dans un environnement SIG.

A partir des résultats de prévisions (hydrologique et hydraulique), les prévisionnistes pourraient communiquer ces informations au public et les intervenants d'urgence par l'intermédiaire de différents types de médias. La communication des risques et la sensibilisation de la communauté constituent des moyens cruciaux en matière d'efficacité de système de prévision des crues.

3 Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette thèse de doctorat est de mettre au point une stratégie adéquate de prévision de crues et d'alerte contre les inondations dans le bassin de l'Oued Mekerra en vue de développer un organisme national de la prévision et de l'alerte des crues dans l'ensemble des bassins Algériens. Les objectifs partiels de cette recherche sont les suivants :

1. Présenter le processus de prévision des crues et d'alerte précoce contre les inondations. L'accent est mis sur la structure organisationnelle à travers laquelle le système de prévision opérationnel peut être construit ;
2. Le deuxième objectif se concentre sur le choix des modèles (hydrologique et hydraulique) suffisamment simples et robustes, qui peuvent simuler des processus hydrologiques et hydrauliques à l'échelle du bassin versant d'étude ;
3. Développer une méthode de communication efficace pour diffuser des prévisions et des messages d'alerte aux inondations, avec l'aide de la technologie d'Internet.

4 Structure de la thèse

Afin de concrétiser les objectifs de recherche énumérés ci-dessus, la thèse est organisée en cinq chapitres qui correspondent aux objectifs principaux.

Chapitre 1 : Introduction à la prévision des crues

Ce chapitre définit le contexte général de la prévision de crues et décrit le processus de prévisions et de gestion des inondations. Le chapitre décrit également la méthodologie adoptée pour la mise en œuvre d'un système de prévision et d'alerte aux risques d'inondation dans la zone d'étude.

Chapitre 2 : La zone d'étude

Dans ce chapitre la description du bassin versant de l'Oued Mekerra est présentée, y compris ses caractéristiques physiques et hydrologiques, en mettant l'accent sur la particularité du climat semi-aride de la zone d'étude.

Chapitre 3 : Modélisation hydrologique

Ce chapitre porte sur une modélisation hydrologique (pluie-débit) distribué à base spatiale qui peut simuler des processus hydrologiques à l'échelle du bassin versant. Cette étude est fondée sur le test du modèle MERCEDES (Maillage Élémentaire Régulier Carré pour l'Etude Des Ecoulements Superficiels) afin de l'utiliser comme un outil efficace pour prévoir les débits dans le bassin d'étude. Ce chapitre inclut également une analyse de sensibilité des paramètres qui affectent significativement les sorties du modèle.

Chapitre 4 : Modélisation hydraulique

Ce chapitre explique en détail la méthodologie appliquée à la modélisation hydraulique avec le modèle HEC-RAS pour simuler la dynamique d'inondation sur la vallée de l'Oued Mekerra et son affluent Oued Tadjmout en vue d'identifier les endroits de débordement pour les crues d'occurrence cinquantennale et centennale. Ce chapitre décrit aussi, les étapes de production des cartes des zones inondables pour les différentes périodes de retour à l'aide de l'extension HEC-GeoRAS.

Chapitre 5 : Communication des prévisions et d’alerte

Ce chapitre présente les méthodes utilisées pour communiquer les messages d’alerte et sensibiliser la communauté sur le risque d’inondation. Ce chapitre montre également notre stratégie de l’utilisation de cartes informatives fournies sur le Web pour présenter des différents niveaux de vigilance.

Chapitre I

Introduction à la prévision des crues

1 Introduction

Dans ce premier chapitre nous allons présenter quelques notions hydrologiques essentielles dans le concept de risque d'inondation. Il est nécessaire donc d'aborder la définition de : crue, inondation, aléa, etc.

C'est aussi dans ce chapitre nous allons définir le contexte général de notre recherche et les objectifs de la prévision des crues. L'accent est mis sur le contexte spécifique de ce projet : la méthodologie de prévision des crues et d'alerte en Algérie.

2 Définition des notions abordées

Il est utile, au préalable de retenir une définition pour chacun de ces termes : crue, inondation, aléa, vulnérabilité et risque

2.1 Crue

Il existe de nombreuses définitions provenant de diverses sources. À titre d'exemple (GPC, 1986) a défini la crue comme «*une augmentation notable et temporaire du débit d'eau générant une élévation du niveau d'eau dans le cours d'eau*». Le glossaire international de l'hydrologie OMM-N° 385 (UNESCO, 1992) définit la crue comme suit : «*un phénomène naturel qui se caractérise par une montée, loin de la normale, du débit et par conséquent de niveau de l'eau dans un cours d'eau jusqu'à un pic à partir duquel le niveau de l'eau diminue à un rythme plus lent*». Les crues sont une conséquence naturelle des précipitations excessives et de la fonte des neiges (Garnier and Rode, 2006). En fonction de l'importance des débits, une crue peut couler dans le lit mineur du cours d'eau (chenal) ou sortir de son lit et inonder les zones adjacentes. La crue est décrite à partir de trois paramètres : le débit, la hauteur d'eau et la vitesse du courant (Moulin, 2007).

En générale, on distingue trois types de crues (crues lentes, rapides et torrentielles) qui sont différenciées par la brutalité, la durée et le volume :

- **Crues lentes** : dites aussi crues de plaine, elles sont observées sur les fleuves et grands cours d'eau. Elles restent habituellement une période relativement plus longue qui peut durer une ou plusieurs semaines, voire des mois. En dépit de leur évolution lente, les crues de plaine peuvent entraîner des dommages aux produits agricoles, des routes et des liaisons ferroviaires. Les crues lentes résultent de situations météorologiques, à grande échelle, caractérisées par des précipitations importantes en termes de quantité et de durée qui peut atteindre 10 à 15 jours. Ces crues sont massives, lentes et à évolution facilement prévisible.
- **Crues rapides** : se produisent sur des petits bassins versants et sont principalement dues à des précipitations courtes et intensives (ex : des orages). Ce type de crues se produisent principalement dans les régions montagneuses caractérisant par des terrains accidentés et rocheux et les pentes sont raides d'où l'eau de pluie s'écoule plus rapidement et de manière approfondie. Elles se caractérisent par un temps de montée des eaux inférieur à 12 heures et des débits de pointe très importants (GPC, 1986). En général ce type de crues est souvent associé à de graves dommages en raison de la soudaineté et de la rapidité (Audrey, 2013).
- **Crues torrentielles ou crue éclair** : sont souvent associées à des orages localisés, de courte

durée et de forte intensité induisant la réponse rapide des bassins versants de quelques dizaines à quelques centaines de km^2 , là où la pente et l'imperméabilisation favorisent le ruissellement. Elles se caractérisent pas un temps de montée très court de l'ordre de quelques heures voire quelques minutes (Moulin, 2007). Dans ce cas, les alertes efficaces sont beaucoup plus difficiles à atteindre (Audrey, 2013). En effet, même l'événement est prévu, le temps de réaction n'est pas suffisant pour mettre en œuvre des mesures préventives (ex : l'évacuation, l'érection de barrières anti-inondation, etc.). Les crues éclair peuvent également se produire dans des zones localisées lorsque le sol trop sec à cause de la longue période de sécheresse (Abushandi, 2011).

2.2 Inondation

Les définitions des inondations sont utiles pour évaluer les effets sur la vie humaine, les dommages à l'infrastructure et le coût financier qu'elles peuvent causer. Cependant, il n'y a pas de définition universelle de terme inondation. Parmi les exemples de définitions d'inondation actuellement utilisées, on cite :

- L'inondation est la présence d'eau dans les zones généralement sèches. Ce phénomène entraîne la présence de beaucoup d'eau dans les zones qui ne sont pas habituellement sous l'eau (Ludlum, 1995; Jonkman and Kelman, 2005).
- L'inondation est une élévation du niveau d'eau, dans le lit ordinaire dénommé le lit mineur (le lieu des écoulements ordinaires), aboutit à un débordement dans le lit majeur (l'espace d'inondation) (Izambart, 2011).
- L'inondation est une augmentation significative du niveau d'eau dans un cours d'eau, un lac, un réservoir ou une région côtière (Vos et al., 2010).

2.2.1 Effets des inondations

Les inondations ont des effets négatifs ou nocifs pour la vie, la santé et les biens ainsi que pour les infrastructures publiques, le patrimoine culturel, les systèmes écologiques, la production industrielle et agricole et les entreprises. L'ampleur des dommages peut être mineure à sévère en fonction de la hauteur et la vitesse de l'eau, la durée de submersion, la localisation du phénomène, etc.

D'après, [Molinari and Handmer \(2011\)](#), il existe plusieurs approches distinguent les effets des inondations ou les dommages causés par les inondations comme : "directs et indirects", "tangibles et intangibles" ainsi que les dommages "potentiels et réels". Ils ont été définis comme suit :

- **Pertes directes** : sont des dommages résultant d'un contact direct avec le danger (ex : dommages causés par les inondations aux bâtiments, aux biens, aux infrastructures, aux réseaux (électricité, eau, assainissement,...) et aux cultures agricoles ;
- **Pertes indirectes** : sont des pertes dues aux inondations, mais non à son impact direct (ex : pertes commerciales dues à la perturbation des activités) ;
- **Pertes corporelles** : sont des éléments et activités ayant une valeur monétaire (ex : bâtiments, Élevage, etc.) ;
- **Pertes intangibles** : sont des choses qui ne sont généralement pas achetées et vendues (ex : la vie, etc.) ;
- **Pertes potentielles** : sont des dommages en absence de mesures d'atténuation (c'est-à-dire la perte maximale) ;
- **Les pertes réelles** : qui concernent l'existence de certains types de mesures d'atténuation et une réduction des pertes évitables.

2.2.2 *Impacts des inondations*

En effet, les facteurs qui contribuent à la souffrance des personnes touchées par les inondations sont les suivants :

- La perte d'effets personnels, en particulier ceux de valeur sentimentale qui ne peut pas être remplacée ;
- Les pressions financières liées à la réparation des dommages dus aux inondations ;
- Le nettoyage des villes suite aux inondations et l'ampleur des mauvaises odeurs ;
- La perte d'emploi ou défaillance d'entreprise ;
- Le coûts supplémentaires et stress liés à l'obligation de vivre dans des zones inondables ;
- La perte des moyens de substance (les animaux domestiques, cultures,...) ;
- La réduction potentielle de la valeur des biens ;
- La crainte d'une nouvelle inondation.

2.2.3 Type d'inondation

Il existe plusieurs types d'inondations présentent des formes et des degrés de danger pour les personnes, les biens et l'environnement. Il existe essentiellement deux grandes causes des inondations :

- Les inondations côtières sont causées par des niveaux de la mer plus élevés que la normale, en grande partie à la suite de tempête, ce qui entraîne des vagues dans la mer débordant la terre ;
- Les inondations intérieures sont causée par la pluie prolongée et / ou intense. On distingue dans ce type des inondations : (a) les inondations par ruissellement qui se produit lorsque la quantité de pluie dépasse la capacité d'infiltration du sol pour absorber l'excès de l'eau. L'inondation de la ville de Oued R'hiau (le 20 octobre 1993) est l'exemple parfait de ce type d'inondation où 20 minutes de pluies ont fait : 23 morts, 20 blessés et plusieurs disparus (Lahlah, 2004) ; (b) les inondations des rivières (le débordement d'une rivière) qui se produit lorsque la capacité d'un cours d'eau est insuffisante pour transporter l'excès de l'eau. Dans cette situation, les eaux surplus se déversent à partir du lit mineur sur les zones adjacentes (la plaine d'inondation). Cette situation peut se produire rapidement dans des cours d'eau courts et abrupts ou après un certain temps et une certaine distance dans les cours d'eau long et doux.

Cependant, l'inondation survient fréquemment à la suite d'activités anthropiques dont la croissance et le développement non planifié dans les zones inondables. Elle survient aussi à degrés moindre après la construction des barrages et des digues (Fehri, 2014), ou due à des défaillances du barrage, qu'elles soient faites par l'homme ou naturellement (ex : en raison de rupture).

Les inondations dans les régions arides résultent des événements de précipitations extrêmes et irrégulières. Ces événements se produisent lorsque les conditions suivantes sont remplies : l'humidité du sol, les conditions d'infiltration, pentes abruptes et une forte intensité des précipitations (Rodier and Roche, 1978). L'irrégularité extrême de ces facteurs réduit l'efficacité des méthodes de prévision des crues (Gheith and Sultan, 2002).

2.3 Aléa

En générale, l'aléa est décrit par la probabilité d'occurrence et l'intensité du phénomène en un lieu et à un instant donné (Dauphiné, 2001; Lindley et al., 2011). L'aléa traduit donc la notion de fréquence ou de période de retour (Fouchier, 2010).

L'aléa d'inondation (cf. figure (I.1)) résulte de la combinaison de différents facteurs : débit du cours d'eau, la vitesse d'écoulement, surface inondable, hauteur et la durée de submersion et période de retour (INERIS, 2003).



Figure I.1 – L'aléa (Source : www.prim.net)

2.4 Vulnérabilité

La vulnérabilité est définie par Larousse (2012) comme «*le fait qu'une personne ou un bien soit exposé à des atteintes des blessures*». Selon D'Ercole (1994), la vulnérabilité est «*la propension d'une société donnée à subir des dommages en cas de manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique*». Aste et al. (1996) ont défini la vulnérabilité comme, «*le niveau d'endommagement potentiel (compris entre 1 et 0) d'un élément exposé donné, soumis à l'action d'un phénomène pressenti ou déclaré, d'intensité donnée*». La vulnérabilité désigne le niveau de perte ou de dommage prévisible, résultant d'un phénomène naturel de magnitude donnée, sur les enjeux (PPR, 1997; UNDRO, 1980). Les enjeux cités ici sont les personnes, les biens, activités, moyen et patrimoine (Veyret, 2004).

I.2 Définition des notions abordées

En général, il ya deux termes décrivant la vulnérabilité. Il s'agit vulnérabilité directe et indirecte. La vulnérabilité directe représente les choses physiques (matérielles, biens). Elle est utilisée pour définir la probabilité que les biens subissent des conséquences liées au contact immédiat avec le phénomène dangereux. La vulnérabilité indirecte est utilisée pour déterminer la probabilité que les actifs soient indirectement affectés par un risque ou induisent d'autres impacts (Eleutério, 2012).

La vulnérabilité représente alors l'interaction entre des biens et matériels exposés et un aléa d'intensité variable (Izambart, 2011). Ainsi, la vulnérabilité pourra évoluer dans le temps et dans l'espace (Roche, 2009). Le premier aspect de la vulnérabilité des biens aux inondations est leur potentiel d'être atteint par l'eau de crue, c'est-à-dire l'exposition (cf. figure (I.2)). Les zones vulnérables aux inondations sont susceptibles à subir des conséquences en raison de cette exposition (Green et al., 1994; Messner et al., 2007). Les inondations s'accroissent également dans les zones urbaines, ce qui provoque de graves problèmes pour les personnes et les biens. Une partie de cet accroissement est due au développement urbain dans des endroits vulnérables aux inondations (Eleutério, 2012).

Cependant, les inondations sont un processus naturel qui procure également des avantages, notamment l'enrichissement des sols, approvisionnement de l'eau et les moyens de subsistance (Carter et al., 2009).



Figure I.2 – Vulnérabilité (Source : www.prim.net)

2.5 Risque

Les risques sont des événements physiques potentiellement dommageables, des phénomènes ou des activités humaines qui causent des pertes en vies humaines, des blessures, des dommages matériels, des perturbations sociales et économiques ou la dégradation de l'environnement (Makoka and Kaplan, 2005).

Le risque est un dommage résultant d'une exposition à un danger (Izambart, 2011). Lorsqu'il se matérialise on parle alors d'accident, si l'ampleur des dommages causés dépasse un certain seuil de tolérance, il s'agit alors d'une catastrophe (Roche, 2009).

Bourrelier (1997) a défini le risque inondation comme la « *co-occurrence d'un aléa hydrographique et d'une vulnérabilité en un point géographique donné* » .

Comme le montre la figure (I.3), le risque d'inondation est une combinaison de la probabilité d'une inondation (l'aléa) et les conséquences potentielles découlant (la vulnérabilité) (Faugères and Noyelle, 1992).

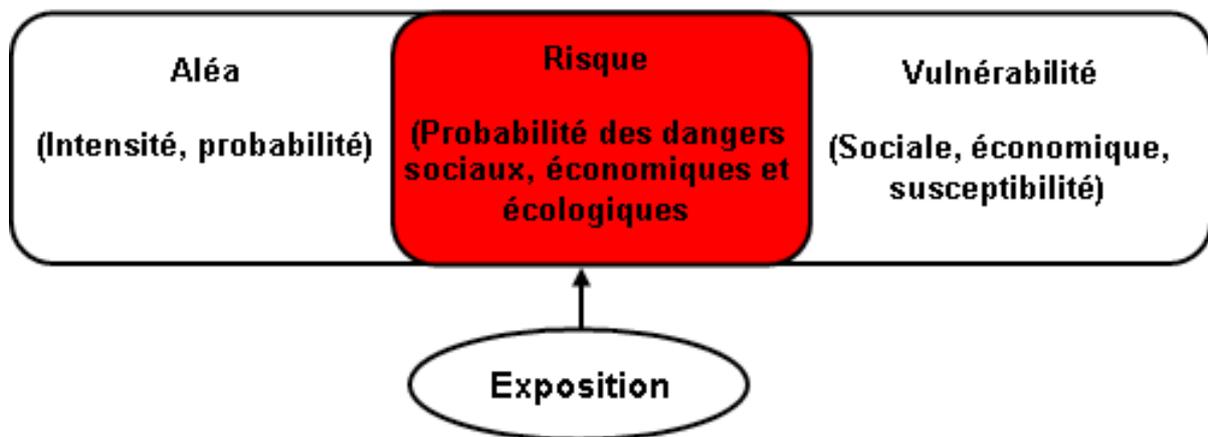


Figure I.3 – Définition de risque (Samuels, 2005)

Le risque d'inondation (cf. figure (I.4)) est une interaction complexe de l'hydrologie et de l'hydraulique du cours d'eau avec un potentiel de dommages dans les zones inondables (Manandhar, 2010).



Figure I.4 – Le risque (Source : *www.prim.net*)

L'inondation est un risque naturel majeur dans plusieurs pays et représentent un risque récurrent (Eleutério, 2012).

Le risque d'inondation augmente au fil du temps, en raison de la croissance démographique extrêmement rapide dans les zones sujettes aux inondations. Autres facteurs, aggravant le risque des inondations, comprennent le changement climatique (Katz and Brown, 1992; Beniston et al., 2007) qui entraînera une augmentation des fréquences et de l'intensité des tempêtes extrêmes (IPCC, 2007).

Le risque d'inondation est étroitement lié à la localisation et l'intensité des événements météorologiques spécifiques (Gayl, 1983). L'auteur prévoit que les événements de fortes précipitations, qui sont très susceptibles d'augmenter en fréquence, augmenteront les risques d'inondation.

L'évaluation des risques d'inondation consiste à comprendre et à quantifier ce phénomène complexe. Le but principal de l'analyse des risques est de comprendre et de mesurer les conséquences possibles liées à la survenue d'inondations dans les zones occupées par les enjeux vulnérables (biens, personnes,...).

Le risque est estimé en fonction de la probabilité, de l'exposition et de la vulnérabilité, et comporte deux composantes : l'aléa (le phénomène générateur du risque) et la vulnérabilité (les inconvénients potentiels) (Moulin, 2007; Coustau, 2011; Estupina, 2004).

Boyle et al. (1998) ont développé une approche pour évaluer des dommages prévus dus à l'inondation. Elle comporte de l'analyse de la fréquence hydrologique, de l'exposition aux dangers et de l'évaluation des dangers et des dommages (cf. figure (I.3)).

3 Les inondations dans le monde et en Algérie

Dans le monde entier, les dommages annuels d'inondation liés aux crues ont été estimés à 50 milliards de dollars par an durant la décennie 1990-1999, avec une augmentation des coûts de 4% par an (Ketrouci, 2014).

Selon la base de données internationale sur les catastrophes EM-DAT , 2 470 crues ont été recensées lors des vingt dernières années (1999 et 2009). Ces catastrophes ont provoqués environ 147 457 de victimes et les dommages ont été estimés à 372.5 milliards de \$US (Oujbbour, 2015).

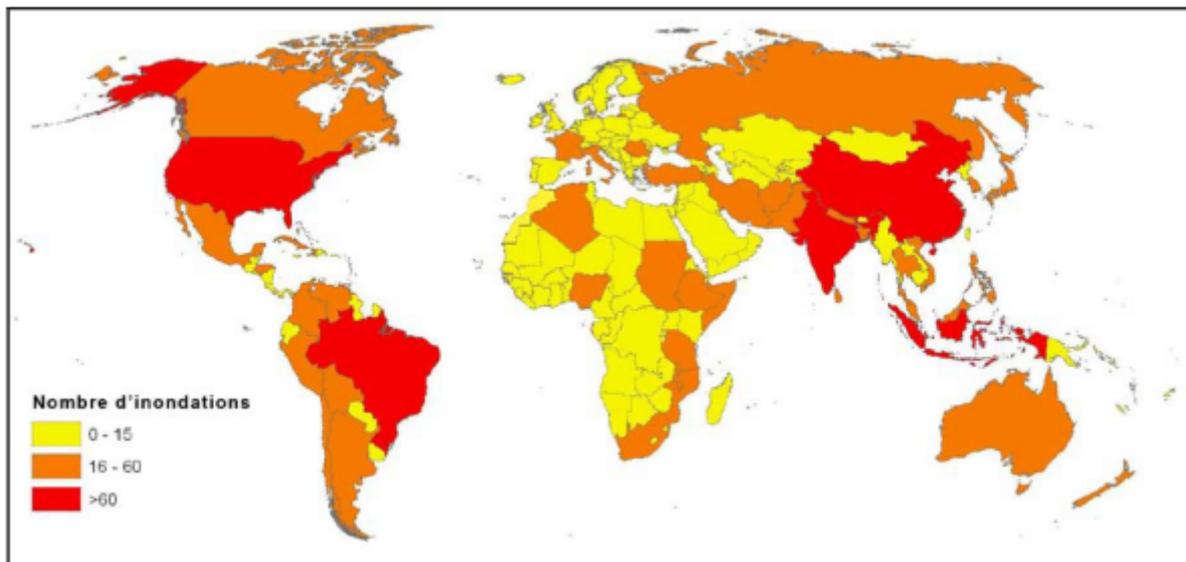


Figure I.5 – Nombre d'inondations par pays durant la période 1974-2003 (Source : <http://www.emdat.be>)

Selon l'ONU (2004) les inondations n'affectent, en général, à l'échelle mondiale, que les classes sociales les plus défavorables, il provoque chaque année la mort de plus de 5000 personnes.

I.3 Les inondations dans le monde et en Algérie

En Algérie, les inventaires des inondations qui ont été faites par Hamadache et al. (2002), Lahlah (2004) et Bouasria et al. (2010), pour la période allant de 1971 à 2008, révèle que nombreuses régions dans ce pays étaient des victimes des crues catastrophiques atteignant parfois l'ampleur d'une catastrophe nationale comme illustré dans le tableau (I.1). En totalité, ces événements ont provoqué plus de 1131 personnes sont mortes ou portées disparues (cf. tableau (I.1)).

Tableau I.1 – Inventaire des inondations tragiques en Algérie

Date de l'événement	Zones touchées	Nombre de victimes
12 Octobre 1971	Azzazga (W Tizi Ouzou)	40 morts
28 au 31 Mars 1974	Alger et Tizi Ouzou	52 morts
01 Septembre 1980	EL Eulma (W.Sétif)	44 morts
22 Août 1983	Birrine (W.Djelfa)	10 morts
03 Février 1984	Jijel, Constantine, Skikda, Guelma, Khenchla et Oum El Bouaghi	23 morts
05 Juillet 1987	Batna	02 morts
01 Septembre 1989	Biskra	02 morts
21 Septembre 1989	M' Sila	01 mort
15 Octobre 1989	Ain Defla	01 mort
03 Juin 1991	Ghardaia	09 morts
26 - 27 Janvier 1992	Alger, Blida, Tipaza, Chlef, Ain Defla, Medea...	10 morts
20 Octobre 1993	Oued R'hiou (W. Relizane)	22 morts
23 Septembre 1994	Bordj Bou Arréridj, Msila, Djelfa, Medea, Bouira, Ain Defla et Tiaret	27 morts
29 Septembre au 02 Octobre 1994	Ghardaia, Laghouat, Biskra, Mascara, Tissemsilt et Sidi Bel Abbés	21 morts
04 Avril 1996	Annaba et El Tarf	5 morts
14 Janvier 1999	Adrar	12 morts
28 Septembre 2000	Bou Saâda (W. M'Sila)	01 mort
14 Octobre 2000	Ain Temochent	04 morts
23 Octobre 2000	Naama	05 morts
24 Octobre 2000	Sidi Bel Abbes , Tissemsilt, Chlef et Ain Defla	01 mort
10 et 11 Novembre 2001	Bab El Oued (Alger)	800 morts
18 et 19 Avril 2007	Ghardaïa	29 morts

4 Gestion des inondations

La gestion des inondations signifie un plan efficace vis à vis de l'occurrence d'une inondation afin de réduire les dégâts extrêmes le long du cours d'eau.

Les solutions existant pour atténuer le risque d'inondation sont divisées en solutions structurelles et non structurelles. Les mesures structurelles concernent les travaux physiques qui sont principalement préventives et se concentrent sur la réduction de l'ampleur des inondations en utilisant des différents aménagements hydrauliques telles que les barrages, les digues, l'élargissement des lits des rivières, etc. Ces solutions pourraient cependant avoir des effets environnementaux, hydrologiques et économiques. Les solutions non structurelles visent principalement à réduire la vulnérabilité d'une zone pour réduire les risques de dommages causés par les inondations. Elles comprennent la planification, l'analyse des inondations, la réglementation sur l'occupation des sols (interdiction la construction dans les zones inondables, etc.) et des systèmes de prévision de crues et d'alerte aux inondations.

La prévision des crues est bien orientée aujourd'hui vers la prévention des crues catastrophiques pour réduire les dommages humains et matériels causés par les inondations (Yang, 1993).

Les prévisions de crues jouent un rôle important en matière de protection de la population contre les inondations provoquées par les crues. La prévision des crues doit fournir des informations aux autorités locales afin qu'ils puissent préparer les stratégies d'intervention d'urgence et minimiser les conséquences possibles de la crue.

Par ailleurs, la prévision des crues peuvent contribuer à la gestion des barrages réservoirs et les lacs artificiels par l'efficacité des arbitrages en temps réel entre la vidange d'un réservoir pour contrôler la crue ou le maintien de la réserve au niveau le plus haut pour stocker davantage d'eau (Yang, 1993; Weeink, 2010).

En pratique, la bonne gestion des inondations nécessite de déterminer les caractéristiques de gravité de l'événement, dont certaines peuvent être plus importantes que d'autres (CORFU, 2014) :

- Zone (étendue) d'inondation ;

- Profondeur de l'inondation ;
- Durée de l'inondation ;
- Vitesse de l'eau de l'inondation ;
- L'heure de l'événement.

5 Prédiction des crues

5.1 Définitions de la prédiction des crues

Le terme de prédiction englobe trois aspects : les valeurs prévues, les objectifs de la prédiction et les délais de prédiction ([WMO, 1983](#); [Tangara, 2005](#)).

Selon leur délai, les prévisions sont classées en prédiction à court terme (moins de 48 heures), prédiction à moyen terme (entre 2 et 10 jours) et prédiction à long terme (plus de 10 jours). En outre, il existe aussi une prédiction saisonnière ([Tangara, 2005](#)). Les horizons de prédiction qui concernent classiquement la prédiction des crues sont le court terme et le très court terme, c'est-à-dire de quelques minutes à quelques jours ([Moulin, 2007](#)).

Depuis longtemps, les prévisions de crues ont pour objectif de fournir des estimations précises et en temps opportun avant l'apparition de crues dans les bassins versants.

Le glossaire international d'hydrologie N°385 ([WMO, 2012](#)), définit la prédiction des crues de la façon suivante : «*Prédiction du niveau, du débit, du temps d'apparition et de la durée d'une crue, et plus spécialement du débit de pointe en un point donné d'un cours d'eau, résultant des précipitations et de la fonte de la neige sur le bassin*».

La prédiction des crues consiste à estimer en temps réel, le débit, le niveau d'eau, le temps d'apparition et la durée d'une crue, en un point donné du cours d'eau pour une échéance de temps donnée dans le futur proche ([Fouchier, 2010](#)).

5.2 Différents types de prévision des crues

Classiquement, la prévision de crues rassemble différentes formes de prévision, à savoir la prévision méthodologique, hydrologique (pluie-débit) et hydraulique (débit-débit).

5.2.1 *La prévision météorologique*

La prévision météorologique quotidienne est un domaine de la météorologie. Elle concerne notamment des prévisions pluviométriques. La prédiction de pluies est une étape importante dans la prévision des crues et la gestion des dommages dus aux inondations. Les prévisions pluviométriques sont émises au moment où les pluies engendrant les crues approchent au bassin versant considéré.

Il s'agit, de prévoir de pluie et quelle aura son intensité. Ces prévisions sont donc extrêmement importantes en fournissant une information raisonnablement avancée pour augmenter l'horizon de prévision de crues à fin d'activer les mesures de lutte contre les inondations à tous les niveaux (GPC, 1986).

Les prévisions de pluies sont actuellement fournies par des techniques de télédétection comme les images de nuages par satellite et les données quantitatives de radar météorologique (*Radio Detection And Ranging*).

Ces techniques peuvent devenir un outil exploitable pour améliorer la précision de la prévision météorologique par donner des mesures plus fines, des champs de pluie, en temps et en espace (Borga, 2002; Pellarin et al., 2002). Elles fournissent des prévisions de précipitations spécifiques (à la fois les quantités et les temps) en utilisant des modèles numériques de prévision météorologique.

En Algérie, les prévisions météorologiques sont fournies par l'ONM (Office National de Météorologie). Cet organisme possède à l'heure actuelle seulement les imageries satellites sans technique de radar.

5.2.2 *La prédiction pluie-débit*

La prédiction des crues est fondamentalement un problème hydrologique (Tangara, 2005). Les études hydrologiques visent souvent à établir une relation entre les eaux de pluie et le ruissellement sur le bassin versant (Shah et al., 1996).

L'approche hydrologique de transformation de pluie en débit nous permet d'intégrer la connaissance de la pluie observée ou prévue, les processus hydrologiques les plus importants (ex : infiltration) et de prendre en compte les conditions initiales (ex : humidité du sol) afin de déterminer la quantité d'eau qui participe à l'écoulement et le délai dans lequel celle-ci va rejoindre le cours d'eau et l'exutoire du bassin versant (Coustaou, 2011). Alors que, le modèle pluie-débit est une composante fondamentale d'un système de prédiction des crues à court terme, car le résultat de ce modèle, sera généralement sous forme de débit prévisible dans le cours d'eau.

La prédiction pluie-débit permet d'anticiper la crue par conversion immédiate des précipitations observées en débits prévus (Fouchier, 2010). En fonction des valeurs de débit prévues seront engagées soit des procédures d'urgence, soit des opérations préventives des ouvrages hydrauliques, ou encore des évacuations de population (Jordan, 2007). Cet outil permet aussi de comprendre et simuler le comportement d'un bassin versant en réponse à des pluies (Garambois, 2012).

Les prévisions pluie-débit sont alors à privilégier car elles permettent en théorie d'augmenter l'horizon de prédiction (Moulin, 2007). La modélisation pluie-débit sont des outils très utilisés, parce que les données débitométriques sont moins accessibles que les données pluviométriques (Bouvier et al., 1996).

5.2.3 *La prédiction débit-débit /débit-hauteur*

Pour convertir les débits prévus en niveaux d'eau, le modèle hydraulique de propagation d'eau (modèle de routage) devrait être utilisé. Ce type de modélisation est porté sur la relation débit-débit /débit-hauteur où les flux prévisionnels sont utilisés comme entrée d'un modèle de simulation de dynamique des eaux pour prévoir un débit ou niveau d'eau à un exutoire donné (Moulin, 2007; Coustaou, 2011).

La prédiction débit-débit /débit-hauteur permet au prévisionniste de prévoir le débit et le niveau d'eau à un point d'intérêt sur le site inondable et aussi de connaître le temps de propagation de l'onde de crue de l'amont jusqu'à l'aval.

5.3 Le système de prédiction de crues

La mise en œuvre d'un système de prédiction et d'alerte des inondations nécessite une combinaison de données, des outils de prédiction et des prévisionnistes formés (Pingel et al., 2005). Tout système de prédiction des crues en temps réel doit se composer :

1. d'un réseau de collecte et de transmission de données ;
2. des modèles de prévisions des crues ;
3. d'un système de diffusion d'alerte.

Ces éléments doivent être interconnectés afin de guider la détection précoce des situations d'inondation potentielle (cf. figure (I.6)).

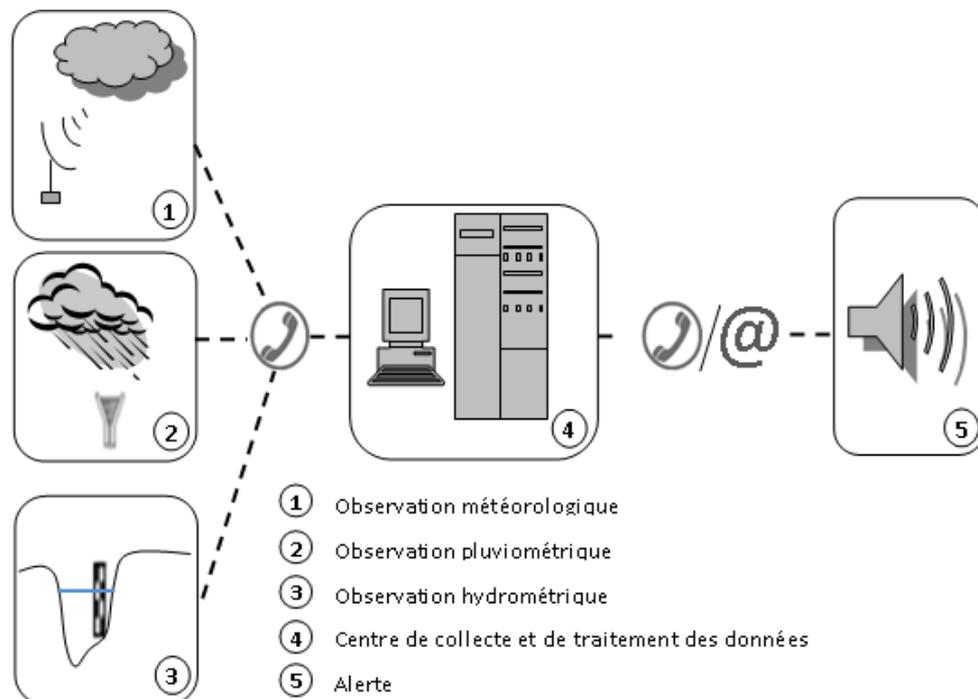


Figure I.6 – Représentation schématique d'un système de prédiction des crues

En général, un système de prédiction et d'alerte des inondations regroupe les principales étapes illustrées sur la figure (I.7).

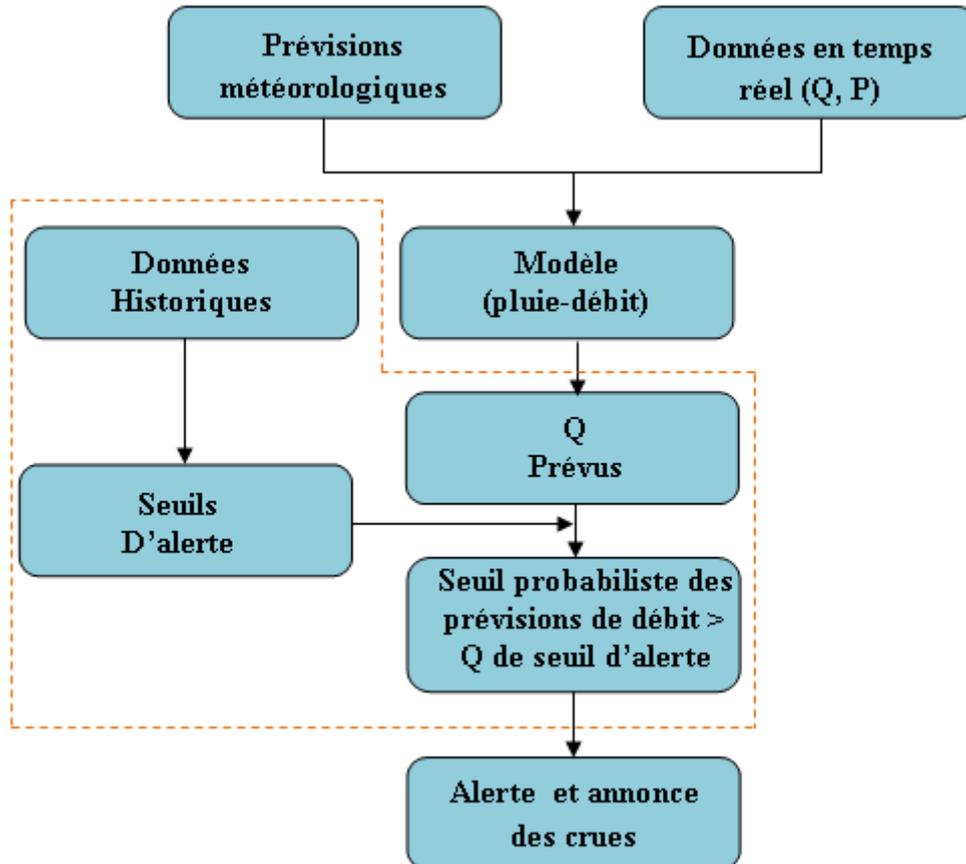


Figure I.7 – Etapes de fonctionnement d'un système de prédiction et d'alerte de crues (Weeink, 2010)

Dans cette vue schématique, les prévisions météorologique ainsi que des données en temps réel (précipitations, température, stockage de la neige, le débit et / ou niveau d'eau), représentent des données d'entrée d'un modèle pluie-débit. Les résultats de ce modèle (hydrogrammes de crues, des pointes de crues) sont ensuite comparés aux seuils prédéfinis (le niveau d'eau en certains points du cours d'eau et/ ou seuils de débits) qui sont souvent basés sur des observations historiques ou simulés par le modèle débit-débit et /ou débit-hauteur.

Les seuils d'alerte (niveaux d'alerte) sont des éléments de prise de décision intégrés dans un système de prédiction et d'alerte contre les inondations. Ils sont émis quand un événement est imminente ou déjà en cours.

L'annonce de crue est généralement basée sur un certain nombre de niveaux d'alerte (code couleur) à savoir niveaux vert, jaune, orange et rouge (cf. tableau (I.2)). Ces couleurs correspondent à quatre niveaux de risques (ex : négligeable, faible, modéré et élevé).

En général, le public se préoccupe le plus souvent des niveaux d'eau à des points spécifiques, tels que les agglomérations, les routes, etc. Mais dans certains cas, on doit prendre également en compte les vitesses d'écoulement et les durées de submersion. Les niveaux d'alerte sont essentiellement déterminés en fonction des hauteurs d'eau, les vitesses d'écoulement et les durées de submersion (GPC, 1986).

L'alerte est alors destinée à l'identification la plus rapide possible des zones d'intervention des secours, à titre d'exemple aux points de submersion du réseau routier (Versini et al., 2009). Les alertes d'inondation devraient être émises chaque fois que la hauteur d'eau atteint à un certain niveau critique (cf. tableau (I.2)).

Tableau I.2 – Quatre niveaux de vigilances crues

Vert	Pas de vigilance particulière requise.
Jaune	Risque de crue ou de montée rapide des eaux qui ne comporte pas de dommages significatifs, mais nécessite une vigilance particulière.
Orange	Risque de crue génératrice de débordements important qui peut avoir un impact significatif sur la vie collective et sur la sécurité des biens et des personnes.
Rouge	Risque de crue majeure. Menace directe à la sécurité générale des personnes et des biens.

5.3.1 La collecte de données

Les données hydro-météorologiques (précipitations, température, humidité, le débit et / ou le niveau d'eau) sont nécessaires en temps réel pour fournir les prévisions de crues et évaluer les seuils d'alerte. Elles sont utilisées d'une part, comme données d'entrée des modèles hydrologiques (pluie-débit) ou hydrauliques débit-débit et d'autre part pour comparer leurs résultats aux observations disponibles quelques heures plus tard (Bessière, 2008).

Il est possible de surveiller et d'utiliser des données en temps réel en utilisant la télémétrie (téléométrie). Ce système permet de collecter de données hydro-météorologiques situées sur des sites distants. Le système téléométrique est une source importante de données hydrologiques pour la prédiction des crues (GPC, 1986).

En pratique, la collecte de données pour la prédiction des crues est assurée par un réseau de stations hydro- pluviométriques automatiques (cf. figure (I.9)) liés à un centre d'accumulation et contrôle de données par une certaine forme de télémétrie (cf. figure (I.6)). Son objectif est l'amélioration du développement des réseaux de surveillance pour la prédiction des crues. De cette manière, les données de tous les sites du réseau sont disponibles en temps réels. Le système de télémétrie a pour but donc :

- de faciliter la collecte de données ;
- de permettre aux prévisionnistes de suivre la situation en temps réel ;
- de fournir des données d'entrées aux prévisions des modèles, en particulier pour les modèles pluie-débit.

Les systèmes modernes sont désormais capables de mesurer de nombreuses autres variables météorologiques, y compris les températures de l'air et de l'eau, la vitesse et la direction du vent, l'humidité et la pression atmosphérique.

Plusieurs types de systèmes de télémétrie sont utilisés pour la transmission de données hydro-météorologiques acquises dans des sites éloignés vers une station de base éloignée. Trois facteurs déterminent les meilleurs systèmes de télémétrie à utiliser : la distance à la station de base, les conditions locales et le coût du système. Il existe de nombreuses options de télémétrie à choisir, telles que le système global pour les communications mobiles (GSM), la ligne terrestre, la radio HF, les modems à courte distance, les modems téléphoniques, le satellite, etc.

La télémétrie de données par radio est généralement le premier système de choix en raison du coût et de la commodité. La lacune de la télémétrie radio est que la distance de couverture est théoriquement limitée à seulement environ 15 km, et en raison de l'interférence du terrain, il est souvent nécessaire d'utiliser plusieurs d'antennes sur les sommets entre la plate-forme de collecte de données et la station de base.

Le développement récent des techniques des télécommunications, des ordinateurs et de la modélisation hydrologique a bien enrichi la prédiction hydrologique (Yang, 1993).

5.3.2 *Les modèles de prévision*

Les prévisions de crues s'appuient généralement sur des modèles capables de traiter les mesures provenant des stations (hydro-météorologiques) pour la formulation des avertissements prévus. Ces modèles forment ainsi le noyau de l'information d'un système de prévision et d'alerte de crues.

Les crues peuvent être prévues avec des modèles pluie-débit et des modèles de diffusion des ondes de crue (modèles de routage). Ces outils doivent être utilisés de manière adéquate à des fins d'alerte aux inondations.

Toutefois, les modèles de prévision doivent être mis à jour habituellement basées sur les conditions nouvelles dans le bassin versant et sur les variations des conditions météorologiques. Il existe diverses formes de mise à jour des prévisions, selon les variables modifiées. D'une manière générale, la mise à jour peut être effectuée sur la sortie du modèle (ex : correction de l'erreur du modèle autorégressif) ou les états internes du modèle peuvent être modifiés.

5.3.3 *Les prévisionnistes*

Le prévisionniste se sert des données transmises par les stations et les modèles pour prévoir le risque des inondations et transmettre cette information dans un délai très court aux décideurs, aux organismes chargés de la sécurité civile et au public.

L'expertise du prévisionniste, est primordiale pour choisir le modèle approprié pour réussir la phase de prévision, ainsi que pour interpréter les résultats et leur apporter une éventuelle correction. De cette façon, l'effet des incertitudes quant à l'application des modèles et l'estimation des conditions initiales est pris en compte. Le prévisionniste contribue souvent pour près de 50% au succès de l'opération ([Tangara, 2005](#)).

5.4 Les objectifs de la prévision des crues

La prévision et l'alerte devant une crue imminente peuvent contribuer à la gestion intégrée des crues. En général, un système de prévision et d'alerte contre les inondations répond aux

objectifs suivants :

- (a) Fournir la prévision des crues. Les prévisions doivent être suffisamment précises pour promouvoir la confiance des collectivités afin qu'elles puissent réagir quand prévenues. Si les prévisions sont inexactes, la crédibilité du programme sera interrogée et il n'y aura pas de réponse. La prévision doit fournir un délai suffisant pour que les collectivités réagissent (Fouchier, 2010). L'augmentation de ce délai augmente le potentiel pour limiter les dommages et les pertes de vie.
- (b) Avertir les services d'urgence et les équipes opérationnelles (les autorités locales, protection civil, gendarmerie, etc.). Les annonces de crues sont réputées efficaces que si elles aident les services d'urgence à jouer efficacement leurs rôles pendant les inondations et si elles persuadent les collectivités à agir pour atténuer les effets indésirables des inondations.
- (c) Aviser la population par donner des informations sur la date et le lieu de l'événement. Les vigilances d'inondation doivent être annoncées à un éventail d'utilisateurs et à des fins diverses.

6 Prévision des crues et d'alerte en Algérie

6.1 Présentation de l'UPI (Unité de Prévision et d'alerte contre les Inondations)

Face à l'accroissement du risque des inondations et à la suite des crues catastrophiques notamment celles survenues à Alger (Bâb El Oued) qui furent les plus meurtrières de l'histoire des inondations en Algérie, le gouvernement Algérien a lancé un projet de la réforme et modernisation du dispositif d'annonce des crues fondée sur la création d'un organisme de prévision et d'alerte contre les inondations dénommé UPI, acronyme **U**nité de **P**révision et d'alerte contre les **I**nondations.

Le cadre législatif, de cette démarche, apparait dans l'article 53 de la loi 05-12 du 04/08/05 relative à l'eau «*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».

Cette démarche est formalisée dans le cadre d'un projet de coopération entre l'état Algérien et l'Union Européenne. Ce projet entre dans le cadre de la «*méthodologie et procédure de mise en place et de gestion d'un système de prévisions et d'alerte aux risques inondations*».

Cette coopération a pour mission de mettre en place une unité pilote dédiée à la prévision des crues, comme une première étape. Dans ce contexte, la wilaya de SBA a été retenue comme une wilaya pilote pour implanter la première unité de prévision et d'alerte contre les inondations. Initialement l'UPI est rattachée à la DREW de cette wilaya. Elle est actuellement quasi-opérationnelle pour prévoir les crues de l'Oued Mekerra.

La seconde étape sera la généralisation progressive de l'UPI sur les autres wilayas afin d'arriver à la mise en place, d'un organisme national, d'appui à la prévision et d'alerte contre les crues et les inondations dans toutes les wilayas Algériennes.

La mise en œuvre de ce système s'est faite en 2009 et les opérations engagées dans le cadre de ce projet comportent les actions suivantes :

- Collecte de données hydro-météorologiques (précipitations et débits) en temps réel ;
- Évaluation des conditions météorologiques affectant ou prévoyant l'effet du bassin versant ;
- Prévision des crues et simulation de flux des inondations ;
- Préparation et publication des bulletins d'inondation ;
- Diffusion des bulletins de l'écoulement et d'inondation en temps opportun aux organismes municipaux, aux services de protection civile et aux publics, ainsi qu'à l'impression et à la diffusion de médias.

6.2 Principe du choix de la Wilaya de SBA (zone pilote)

La wilaya de Sidi Bel Abbes se situe dans la partie Nord-Ouest de l'Algérie (zone grise sur la figure (I.8)). Elle est limitée au Nord par la wilaya d'Oran, au Nord - Est par la wilaya de Mascara, au Nord - Ouest par la wilaya de Ain-Temouchent, au Sud par la wilaya de Naama, et au Sud - Est par la wilaya de Saïda. Elle couvre une surface de 9410 km^2 et se constitue de 53 communes avec une population principalement agricole estimée à 603369 d'habitants d'après le

dernier recensement général de la population en 2008.



Figure I.8 – Situation géographique de la wilaya de SBA

Le choix de la wilaya de SBA est basé, sur le fait que celle-ci est sujette à des inondations qui peuvent être catastrophiques. Ce fut le cas lors de la catastrophe du 4 Octobre 1986, le 30 Avril 1990, le 19 Avril 2007, etc.

Dans la wilaya de SBA, il ya plusieurs communes (Ras El Ma, El Hacaïba, Sidi Ali Ben Youb (SABY), Tabia, et Sidi Bel Abbès (SBA) sont souvent exposées au risque des inondations provenant des crues de l'Oued Mekerra. Le système de prévision et d'alerte couvre actuellement le bassin versant de l'Oued Mekerra couvrant environ 3627 km^2 . Par ailleurs, le bassin de l'Oued Mekerra a été bien étudié. On compte sur les dernières années un nombre important d'études et de projets d'aménagements contre les inondations sur l'Oued Mekerra. On cite à titre d'exemple : étude d'avant-projet détaillé du barrage d'écrêtement de Tabia en 2005, étude de protection de la ville de Sidi Bel Abbes contre les inondations en 2002, étude d'un plan directeur des localités exposées aux risques d'inondations en 2007 et étude d'avant-projet détaillé de la protection des localités se situant dans la Haute Mekerra en 2010.

6.3 Principales missions de l'UPI

L'UPI est unité scientifique et ses principales missions consistent à :

- a) fournir les informations de base sur la prédiction des crues et d'alerte précoce, en se concentrant particulièrement sur crues engendrant des inondations ;
- b) identifier la prédiction des crues et des composants d'alerte précoce nécessaires pour faire face aux risques d'inondation ;
- c) fournir les prévisions de crues et d'alerte, aux organismes assurant la sécurité civile (le Wali, les PAPC, la protection civile, etc.) et au public, en vue de réduire les conséquences dommageables des inondations sur la santé humaine, l'environnement, les biens et l'activité économique ;
- d) fournir les orientations pour la participation des communautés locales et des individus dans la prédiction des crues et d'alerte précoce ;
- e) intervenir après alerte, sur la base du plan ORSEC, en coopération avec les services de secours et d'urgences nationales et locales ;
- f) aider à l'établissement des cartes des zones inondables utilisant dans le cadre de l'occupation des sols.

6.4 Fonctionnement de l'UPI

La fonction de l'UPI est articulé autour d'une base de données intégrant les données hydro-météorologiques observées et prévues, les modèles hydrologiques et hydrauliques et un SIG.

6.4.1 *Réseaux de collecte des données en temps réel*

Les observations et mesures hydrologiques sont point de départ de la connaissance de la crue. C'est pourquoi l'UPI en partenariat avec l'ANRH ont lancé un projet de l'automatisation des stations hydro-pluviométriques existantes (stations classiques) par d'autres automatiques (cf. figure (I.9)). Le réseau de collecte des données se compose de plusieurs stations automatisées (cf. figure (I.10)) pour mesurer la pluie et le débit en temps réel.

I.6 Prévision des crues et d'alerte en Algérie

Ces stations offrent les mesures de quantité d'eau précipitée exprimée en (mm) et est mesurée ponctuellement à partir d'un pluviographe à augets basculeurs ($0.5 mm$ pour chaque auget). La mesure de débit d'eau s'effectue via d'un capteur de pression " bulle à bulle ". Le fonctionnement de ce dernier est basé sur la mesure de la pression d'eau au-dessus du capteur et à partir de la courbe de tarage, on peut extrapoler le débit qui correspond à une hauteur d'eau dans l'oued. Le système de télémétrie transmet ces mesures, au siège de l'UPI, par voie téléphonique de type GSM. L'acquisition et l'enregistrement des mesures se font à un pas de temps fixe variant de $5 min$ à $30 min$.



Figure I.9 – Station hydro-pluviométrique automatique sur l'Oued Tadjemout (affluent de l'Oued Mekerra) : **(A)** : l'abri de station **(B)** : Unité de mesure (**a** : appareil de mesure de débit, **b** : appareil de mesure de pluie, **c** : modem de transmission GSM et **d** : batterie d'alimentation)

À l'heure actuelle, il y a deux stations pluviométriques à Ras El Ma et El Gor situées respectivement en amont et à l'Ouest du bassin de l'Oued Mekerra et quatre stations hydro-pluviométriques dont trois situées uniquement sur l'Oued Mekerra (Sidi Bel Abbès, Sidi Ali Ben Youb et El Haçaiba) et une station sur Oued Tadjemout (Moulay Slissen), comme illustrée à la figure (I.10).

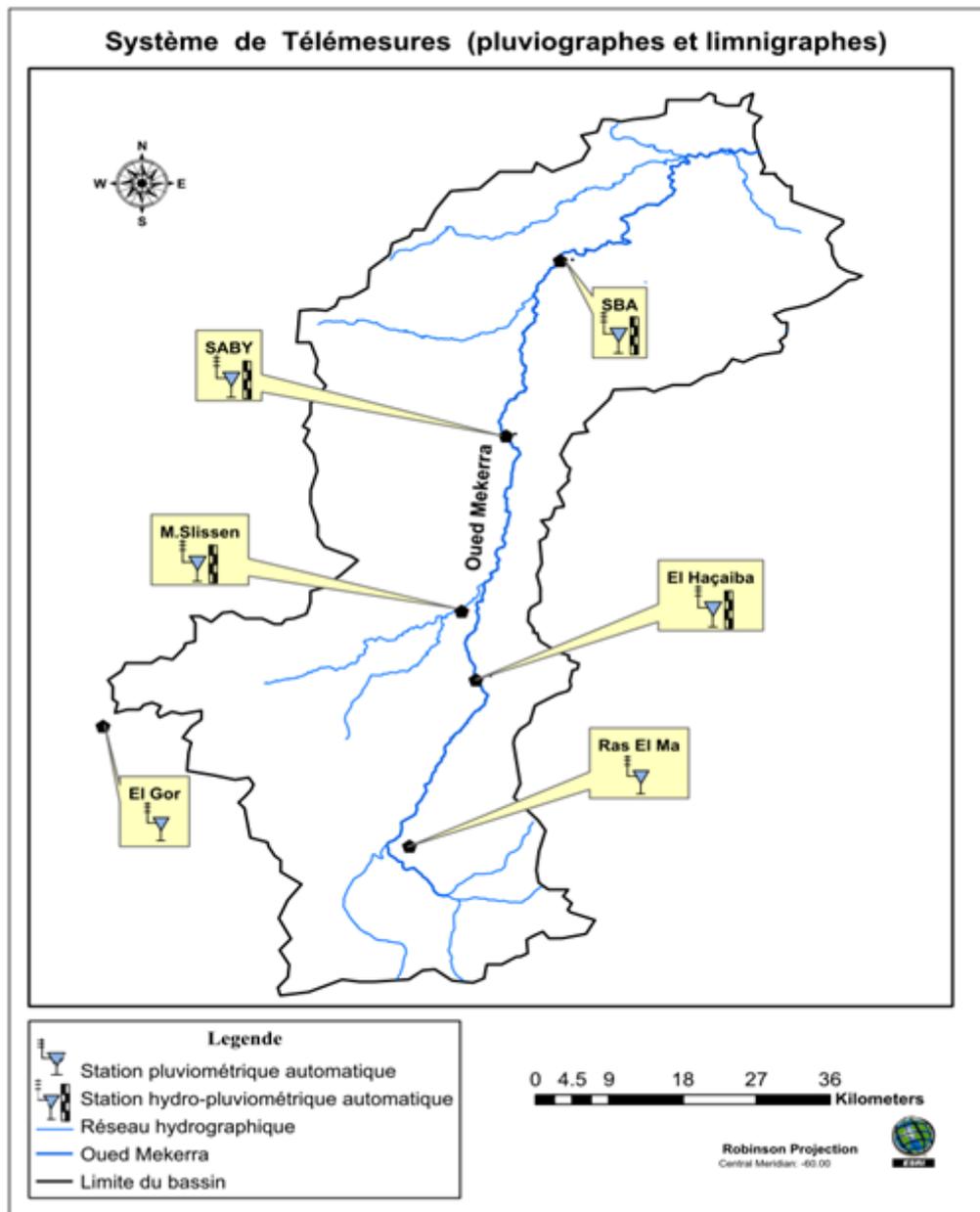


Figure I.10 – Réseau de collecte des données hydro-pluviométriques en temps réel dans le bassin de l’Oued Mekerra

Les stations figurées dans la figure ci-dessus permettent de mesurer à la fois la pluie et le débit. L’ensemble de ces stations sont gérées par l’ANRH qui est responsable des interventions de réparation sur les stations.

Par ailleurs, l’UPI reçoit des informations fournies par l’ONM. Cette dernière met à notre

disposition des BMS, traduites en terme de lame d'eau représentant les cumules probables des quantités de pluies sur un intervalle de temps, en général 24 heures. Les données de l'ONM sont utilisées pour déclencher la mis en veille de l'équipe de l'UPI. Les techniques de télémessure ont amélioré la précision des modèles utilisés (Foufoula-Georgio and Krajewski, 1995).

6.4.2 *Les modèles utilisés*

L'UPI établit ses prévisions en utilisant divers modèles. Ces modèles peuvent être utilisés pour améliorer et évaluer la qualité des prévisions de crues :

- Modèle hydrologique de transformation de la pluie en débit. Il estime l'écoulement dans l'oued par la transformation des pluies connues en temps réel en débits (voire chapitre III) ;
- Modèle hydraulique de propagation des débits dans les cours d'eau. Il prévoit les côtes d'eau en tout point sur le long de l'Oued (voire chapitre IV).

6.4.3 *Cartographie informative*

Les résultats obtenus sont présentés via des outils de SIG sous forme cartographique du risque (carte informative du risque d'inondation). Cette étape est essentielle pour une compréhension globale du fonctionnement des cours d'eau et de diffusion des messages d'alertes (voire chapitre V).

7 Conclusion

En Algérie plusieurs régions, sont fortement affectées par les inondations dévastatrices, dont la wilaya de SBA qui connait souvent de grandes inondations causant des dommages considérables aux personnes et à l'infrastructure.

Une Unité de Prévision et d'alerte contre les Inondations (UPI) a été créée pour la gestion des processus de prévision des inondations dans les bassins hydrographiques. Cette unité est implantée actuellement dans la wilaya de SBA pour prévoir les crues de l'Oued Mekerra (bassin

de l'Oued Mekerra), comme une première étape, puis sera généralisée progressivement dans tout le territoire Algérien.

Les systèmes de prévision et d'alerte des inondations intègre des moyens de gestion et de collecte en temps réel de données (stations hydro-pluviométriques automatiques) et des interfaces pour appliquer et intégrer des modèles hydrologiques et hydrauliques, afin de fournir des prévisions des débits et des niveaux d'eau dans les principaux sites de l'Oued Mekerra.

Mise en œuvre de prévision de crues en temps réel dans plusieurs pays montre que le système peut effectivement prévoir les crues et les résultats mettent en évidence que ce système peut être utilisé en prévision opérationnelles des inondations avec confiance.

Chapitre II

La zone d'étude

1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter le bassin versant de l'Oued Mekerra (Nord- Ouest Algérien) dans son contexte géographique et hydrologique.

Tout d'abord sont exposés les principaux éléments morphologiques du bassin d'étude. Ils jouent en même temps un rôle déterminant dans développement des crues. Parmi les paramètres morphologiques principaux, on distingue : la surface, la forme, la topographie, la géologie et pédologie, l'occupation du sol et le réseau hydrographie.

En suite sont présentées les particularités climatiques auquel est soumis le bassin versant, ainsi les facteurs hydro-climatiques les plus importants pour l'étude de crue. Il s'agit en particulier la pluie et le débit.

2 Bassin de l'Oued Mekerra

2.1 Localisation et topographie

Le bassin de l'Oued Mekerra s'intègre dans le grand bassin versant de la Macta (cf. annexe (A.1)), qui s'étend en Nord-Ouest de l'Algérie. Notre bassin est situé entre $0^{\circ}20'34.8''$ et $1^{\circ}10'15.6''$ de longitude Ouest et entre $34^{\circ}18'10.8''$ et $35^{\circ}22'48''$ de latitude Nord (cf. annexe (A.1)). La majeure partie du bassin versant de l'Oued Mekerra est située dans la wilaya de Sidi Bel Abbès. Le cours d'eau principal dans ce bassin est l'Oued Mekerra qui coule sur une longueur de 142.4 km environ et draine une superficie d'environ 3627 km^2 . Le principal affluent de l'Oued Mekerra est appelé Oued Tadjemout, de longueur de plus de 46 km et d'un bassin d'une superficie d'environ 559.4 km^2 .

2.2 Description physique

Les paramètres morphologiques cités dans le tableau (II.1) montrent bien que la forme de notre bassin est allongée et son relief est très accidenté et qualifié très fort selon la classification d'ORSTOM.

Tableau II.1 – Récapitulation des paramètres morphologiques du bassin de l'Oued Mekerra

Caractéristiques	Paramètres	Unité	Symbole	Valeurs
Morphologie du bassin-versant	Surface du bassin-versant	Km^2	A	3627
	Périmètre du bassin-versant	Km	P	406.5
	Coordonnées du centre	$^{\circ}$	X/Y	-0.757/+34.842
	Indice de compacité	-	K_c	1.89
	Longueur du rectangle équivalent	km	L	181.98
	Largeur du rectangle équivalent	km	l	19.93
Relief	Altitude maximale	m	H_{max}	1415
	Altitude minimale	m	H_{min}	350
	Altitude moyenne	m	H_{moy}	1297
	Pente moyenne	$\%$	I_{moy}	7.5
	Indice de pente globale	m/km	I_g	4.5

Le MNT du bassin d'étude (cf. annexe (A.2)) montre que le bassin de l'Oued Mekerra est délimité au Sud-Est par les Monts d'El Marhoum (wilaya de Saïda) dont le point culminant est

le Djebel Bou Lehaf (1410 *m*), au Sud par les hauts-plateaux de Ras El Ma, au Sud-Ouest par les monts de Tlemcen (1668 *m*) en limite avec le bassin de Tafna, au Nord Djebel Bourdjia. Les altitudes sont comprises entre 769 *m* et 493 *m* à l'exutoire. Le point culminant dans le bassin est le pic de Djebel Sidi Youssef (1493 *m*). Cependant, le relief est composé en grande partie de la plaine de SBA d'une altitude d'environ 750 *m* (40% de la surface est située au dessus de 1 000 *m* d'altitude).

La pente moyenne de l'Oued Mekerra jusqu'à Sidi Ali Ben Youb est d'environ 1 à 1.5%, puis s'abaisse jusqu'à 8‰ entre Boukhanifis et Sidi Bel Abbés, dans la partie aval du bassin versant (Benyahia et al., 2011).

2.3 Description géologique

La géologie d'un bassin est l'un des facteurs principaux qui régissent le régime d'écoulement d'un cours d'eau. En effet, les précipitations sur un bassin imperméable provoquent un ruissellement soudain et les crues sont fréquentes. Par contre dans un bassin avec des conditions climatiques similaires, mais repose sur des matériaux perméables et épais où l'infiltration contribue au réservoir d'eau souterraine et l'écoulement de surface est moins concentré (Pushpalatha, 2013).

La géologie du bassin de l'Oued Mekerra (cf. annexe (A.3)) est constituée principalement des ensembles naturels suivants :

- 1) **Crétacé supérieur (paléocène à céno manien)** : cette formation allochtone affleure au Sud-Est du bassin versant sous forme de marnes salifères comprenant quelques bancs de calcaires ;
- 2) **Crétacé inférieur (néocomien à albien)** : cette formation a été définie plus à l'Est au djebel Tenfeld, elle affleure au Sud-Est au Djebel Cheif El Adame. La succession lithologique comprend :
 - 50 *m* de Marnes vertes ou jaunes, gréseuses, lumachelles à nombreuses coquilles d'Huîtres, des bancs de calcaires marneux ou de dolomie grise en intercalation ;
 - 120 *m* de dolomies grises massives, avec quelque passées argileuses, une corniche de 6 *m* à la base et un ressaut de 40 *m* au somme ;

- 100 m d'un ensemble marneux à débris de coquilles avec intercalation de calcaires marneux, lumachelliques, graveleux, parfois fétides.
- 3) Trias :** des affleurements très localisés du Trias ont été observés aux environs de la localité de Zerouala (Est de la ville de SBA) et à SBA (ville) à proximité de la gare ferroviaire de celle-ci. Le Trias est représenté par des argiles et des marnes bariolées multicolores, associées à du gypse, des dolomies bréchiqes, des cargneules et ophites ;
- 4) Formation poste-pliocène :** cet ensemble est constitué par des argiles bleues et des calcaires organogènes. Les formations de cet étage reposent directement en contact anormal sur le crétacé supérieur. Vers l'Est, le domaine des nappes disparaît et laisse la place à une série continentale du pliocène ;
- 5) Failles :** coupent le bassin sur un axe Sud-Ouest - Nord-Est.

En général, le sol dans le bassin de l'Oued Mekerra sont constitués de blocs de calcaire durs à fracturés sous forme de gravier emballés dans une matrice argileuse limoneuse, à l'exception des zones de Sidi Ali Benyoub et Ras El Ma. Ces deux zones contiennent une forte teneur en fines, et des proportions variables de gravier et de sable (STUCKY, 2005).

2.4 Occupation du sol

L'écologie du bassin, les caractéristiques du sol et la densité anthropique, affectent les caractéristiques d'infiltration et le comportement des eaux de ruissellement (Marchandise, 2007). Les activités anthropiques peuvent causer des changements sévères dans l'hydrologie et de la morphologie du cours d'eau (Pushpalatha, 2013).

Dans la wilaya de SBA, l'Oued Mekerra traverse plusieurs communes (cf. tableau (II.2)). Notre bassin est relativement peuplé en aval qu'en amont. La population est concentrée essentiellement dans la commune de Ras El Ma, Tabia, Sidi Lahcene, SBA, Sidi Brahim et Sidi Hamadouche (cf. tableau (II.2)).

L'occupation du sol dans le bassin de l'Oued Mekerra (cf. annexe (A.4)) comprend l'agriculture intensive, constituée principalement du blé (44.7%). Le paysage végétal est principalement composé des parcours (35.8%), forêts (18.7%) dont la superficie a été dégradée, de manière notable au cours de la dernière décennie, par les incendies. L'espace restant (0.85%) est partagé entre les agglomérations et les terres improductives.

Le sol des terres cultivées est principalement constitué de limon qui peut être considéré comme un sol peu perméable. Le parcours est caractérisé par une végétation clairsemée et un sol perméable.

Tableau II.2 – Répartition de la population le long de l’Oued Mekerra

Communes	*Habitants(2008)	Surface Km^2	Hab/ Km^2
Ras El Ma	18864	146.8	128.5
El Hacaiba	2813	79	35.6
Moulay Slissen	5659	237.5	23.8
Sidi Ali Ben Youb	11825	133	88.9
Boukhanefis	11476	97.4	117.8
Tabia	5152	59.6	86.4
Sidi Lahcene	20956	90.8	230.8
Sidi Bel Abbès	204423	70.5	2899.6
Sidi Brahim	9850	38.5	255.54
Sidi Hamadouche	9940	127.2	78.14
Sidi khaled	7246	60.8	119.2

* : chiffres donnés par DREW de SBA

3 Hydrographie

3.1 Présentation

L’Oued Mekerra prend naissance, auprès de la ville de Ras El Ma située à 93 *km* au Sud de Sidi Bel Abbès (cf. annexe (A.5)) à une altitude de (1415 *m* NGA). Dans cette zone la conjonction de trois oueds (Oued Ras el Ouidane, O. Frat ez Ziet et O. Smar) constitue la source de l’Oued Mekerra. A partir de cet endroit l’Oued coule selon un axe Sud-Nord entre deux massifs (Djebel el Mekimene et Djebel Marhoum) jusqu’à Moulay Slissen (43 *km* au Sud de la ville de SBA) à une côte d’environ 800 *m*. Sur ce premier tronçon, l’Oued Mekerra reçoit Oued Tadjemout sur la rive gauche. Ce dernier prend sa source dans Djebel Sidi Youssef dans le territoire de la wilaya de Tlemcen (Nord-Ouest Algérien). Ensuite l’Oued Mekerra coule dans une vallée plus ou moins large et profonde jusqu’à Tabia (22 *km* au Sud de SBA). Il se poursuit ensuite en s’engageant dans la plaine de SBA. Dans cette zone l’oued reçoit sur la rive gauche Oued Mouzen et se multiplie à plusieurs chenaux encaissés à partir de Sidi Lahssen (11 *km* à l’Ouest de SBA) jusqu’à la ville de SBA, où l’oued la traverse par un chenal aménagé sous

forme trapézoïdale avec une pente quasiment nulle (environ 0.17 m/km). Enfin l'Oued Mekerra reçoit Oued Sarno sur la rive gauche et devient Oued Mebtouh qui se jette dans le barrage Cheurffas II dans la wilaya de Mascara.

3.2 Les ouvrages hydrauliques

Le cheminement de l'Oued Mekerra a soumis de nombreux aménagements entrant dans le cadre des dispositions de lutte contre les inondations dans la wilaya de SBA. Certain nombre d'ouvrages ont été réalisés à pour objet de diminuer les dégâts prévus pendant la crue de cet Oued. Ces aménagements sont concentrés en particulier dans la partie aval de l'Oued Mekerra entre Tabia et SBA (ville) (cf. annexe (A.6)). Cette zone représente aussi la zone d'épandage lors de la crue de l'Oued Mekerra (Maref, 2010). Les ouvrages les plus importants sont décrits ci-après :

- **Canal Sud** : un canal trapézoïdal aménagé pour dériver un débit de $130 \text{ m}^3/\text{s}$ au sud de la ville de Sidi Bel Abbés. Cet aménagement a été réalisé pour éviter le débordement de l'Oued Mekerra dans la ville de SBA ;
- **Digues de Tilmouni** : trois retenues sur une zone d'épandage à l'Est de la ville de Sidi Bel Abbés. Leur rôle est la rétention environ 4 millions de m^3 lors de débordement de l'Oued Mekerra et ses affluents ;
- **Digues de Sidi Khaled** : sont deux retenues collinaires situées à Sidi Khaled (13 km au Sud-Ouest de la ville SBA) sur l'Oued Tissaf affluent sur la rive gauche de l'Oued Mekerra). Elles sont conçues pour la rétention de 2 millions de m^3 ;
- **Barrage Sarno** : barrage de stockage d'eaux implanté sur l'Oued Sarno. Il reçoit aussi une partie ($2 \text{ m}^3/\text{s}$) des eaux de crues de l'Oued Mekerra par un ouvrage de transfert d'eau ;
- **Barrage d'écrêtement à Tabia** : Il est situé sur l'Oued Mekerra, environ 20 km au sud de la ville de SBA. Ce barrage est destiné à écrêter la crue de l'Oued Mekerra pour un débit atteint à $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ et stoker environ 25 millions de m^3 d'eaux. Cet ouvrage est équipé par un pertuis du fond qui permet à évacuer un débit de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ et sa première année de mis en service en 2010.

4 Caractéristiques hydrométéorologiques

Il existe plusieurs stations pluviométriques ou hydro-pluviométriques situées sur le bassin versant de l'Oued Mekerra. La carte figurée dans l'annexe (A.7) indique leurs positions. Les données pluviométriques et hydrométriques exploitées sont relatives aux stations : Sidi Bel Abbès, Sidi Ali Ben Youb, El Haçaiba et Ras El Ma sur lesquelles les séries de données sont suffisantes en qualité (moins de lacunes) et quantité (nombre d'années). Nous disposons également les mesures de températures issues de la station météorologique du barrage Sarno. L'ensemble de ces données ont été fournies par l'ANRH d'Oran. Pour une bonne étude et analyse de ces données, il a été choisi de travailler à différents échelles de temps à savoir annuelle, mensuelle et saisonnière.

4.1 Climat

Le bassin de l'Oued Mekerra s'inscrit dans un type de climat méditerranéen à tendance semi-aride vis-à-vis des pluies peu fréquentes, irrégulières et violentes (Maref, 2010). Ce climat couvre la partie Nord de l'Afrique y compris l'Algérie. Il se caractérise par un Été chaud et sec où les précipitations sont quasiment absentes et un Hiver doux et pluvieux (Seltzer, 1976; Djellouli, 1990).

Le climat méditerranéen s'inscrit dans un contexte particulièrement cyclogénétique, connu pour ses épisodes pluvieux de forte intensité et de courte durée (Menad, 2012). Le climat méditerranéen est un climat de transition entre la zone tempérée et la zone tropicale. Il semble être tempéré seulement en bordure de la mer. Le climat méditerranéen est caractérisé par une concentration hivernale des précipitations, l'Été étant sec (Daget, 1980).

Les climats semi-arides sont souvent appelés climats steppiques. Les régions qui reçoivent entre 380 et 760 mm de précipitation, sont considérées comme zones semi-arides (Köppen, 1884). Généralement, dans la région aride et semi-aride la pluie ne dure qu'un jour ou deux au maximum (Wheater et al., 2008).

L'Afrique du Nord est également une région semi-aride qui a souffert longtemps de la rareté des pluies et des longues périodes de sécheresse notamment des années 1970 et 1980 (Hulme et al., 2001; Dai, 2013).

4.2 Pluviométrie

Etude de la variabilité pluviométrique annuelle et saisonnière a été menée à partir des séries des précipitations mensuelles et pluies maximales journalières des stations : Ras El Ma, El Haçaiba, Sidi Ali Ben Youb et Sidi Bel Abbès (cf. tableau (II.3)). Les données de ces stations couvrent une période de 32 années d'observations (1975-2007) à l'exception les données de la station de SBA qui dispose une série pluviométrique de 38 années (1975-2013). Les 4 stations avec leurs principales caractéristiques sont présentées au tableau (II.3).

Tableau II.3 – Caractéristiques des stations pluviométriques du bassin de l'Oued Mekerra

Stations	Code station	Coordonnées (Lamber Nord Algérie)		$P_{moy.an}(mm)$	Période
		X (km)	Y (km)		
SBA	110305	199.1	219.7	311	1975-2013
SABY	110201	186.5	192.2	320	1975-2007
El Haçaiba	110203	183.3	161.6	273	1975-2007
Ras El Ma	110102	177.7	138.8	198	1975-2007

110305 :Représente le code de station dans le grand bassin de Macta ;

11 :Numéro du bassin Macta au niveau national ;

03 :Type de station (Pluviométrique, hydrométrique ou hydro-pluviométrique) ;

05 :Numéro de station dans le bassin Macta.

4.2.1 Pluies annuelles

La pluviométrie moyenne annuelle sur le bassin versant de l'Oued Mekerra est comprise entre 198 mm à 311 mm. Elle répartit en fonction de l'éloignement de la mer où la partie Nord du bassin apparaît la plus arrosée (311 mm) que celle de Sud (198 mm)(cf. tableau (II.3)). Elle se caractérise également par une forte irrégularité interannuelle (cf. figure (II.1)), avec une alternance des années humides et des années sèches. Les apports pluviométriques annuelles des années sèches peuvent atteindre des niveaux très faibles qui peuvent diminuer à moins de 50 à 80% de la moyenne annuelle. Ceci souligne le caractère extrêmement variable du régime pluviométrique en région semi-aride (Kadi, 1992). Les zones méditerranéennes et semi-arides sont caractérisées par des régimes pluviométriques irréguliers dans le temps et dans l'espace (Achite and Meddi, 2005). Dans cette région, les précipitations, sont très variables à la fois spatialement et temporellement et la variabilité peut augmenter avec l'aridité (Bell, 1979).

Le réchauffement de la planète peut entraîner un assèchement marqué dans les régions semi-

II.4 Caractéristiques hydrométéorologiques

arides et arides entraînant une intensification du cycle hydrologique (Chou et al., 2009; Seager et al., 2010).

Dai (2013) a révélé que dans un climat plus chaud, les sécheresses peuvent durer plus longtemps et être plus graves dans les régions actuellement sujettes à la sécheresse en raison de l'évaporation accrue et de la réduction des précipitations.

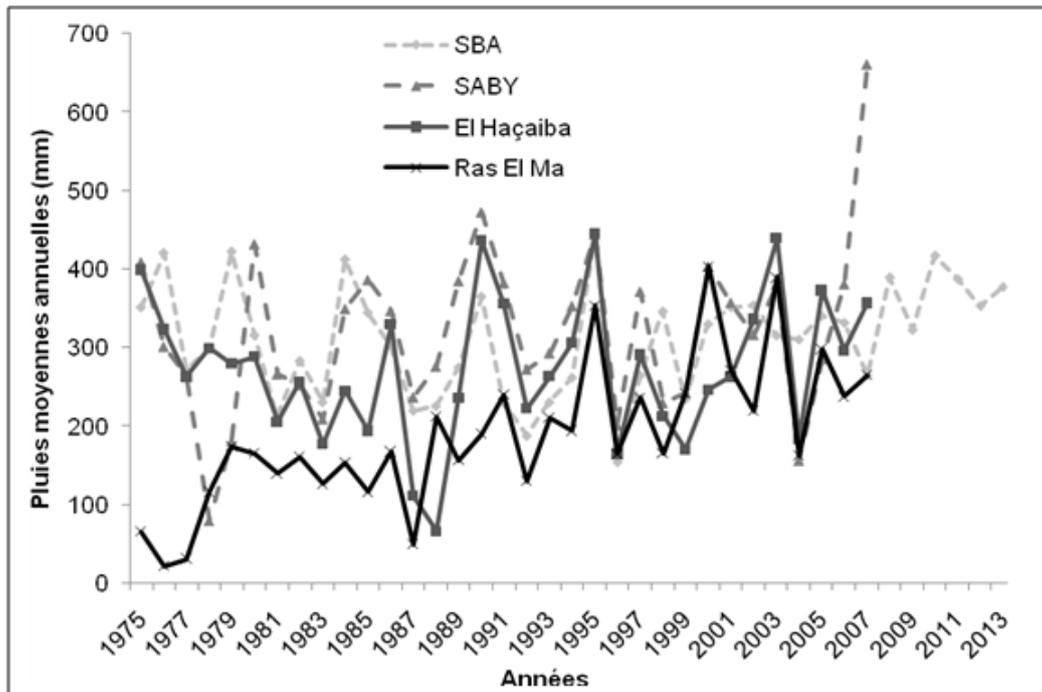


Figure II.1 – Variation interannuelle des pluies du bassin de l'Oued Mekerra entre 1975 et 2013

4.2.2 Pluies mensuelles

La répartition mensuelle des précipitations (cf. figure (II.2)) montre que la période des pluies se prolonge d'Octobre à Avril. Environ 85% de la pluviométrie annuelle totale (moyenne 235 mm) se produit au cours de cette période.

En effet, les pluies sont prédominantes en Hiver (Décembre à Février) en totalisant plus de 38 % de la lame d'eau annuelle. Des pluies sont également observées à la fin de l'Automne (Octobre à Novembre) et au début du Printemps (Mars à Avril), ce qui représente respectivement 26 % et 21% de l'eau qui tombe annuellement. L'abondance pluviométrique dans ces deux saisons

II.4 Caractéristiques hydrométéorologiques

est liée principalement aux orages qui surviennent souvent en Automne et au Printemps. Ces pluies sont de type convectif.

Les précipitations résultantes de ce processus sont en général orageuses, de courte durée (moins d'une heure), de forte intensité et de faible extension spatiale (Musy, 2005).

En Algérie, les crues sont essentiellement d'origine pluviale et de type convectif. Les précipitations en milieu aride sont souvent de type convectif : courte durée, forte intensité et hétérogénéité spatiale les caractérisent (Chapponniere, 2005). Les orages convectifs sont souvent moins de 10 à 14 km de diamètre (Renard and Keppel, 1966; Diskin and Lane, 1972) et donnent lieu à forte concentration des précipitations locales (Thornes, 1994).

Quant à la période sèche, elle se prolonge de la fin du Printemps (Mai) jusqu'au début de l'Automne (Septembre) et qui sont relayés par un Été nettement sèche (Juin à Août). Dans cette période le bassin ne reçoit que 15% des précipitations annuelles.

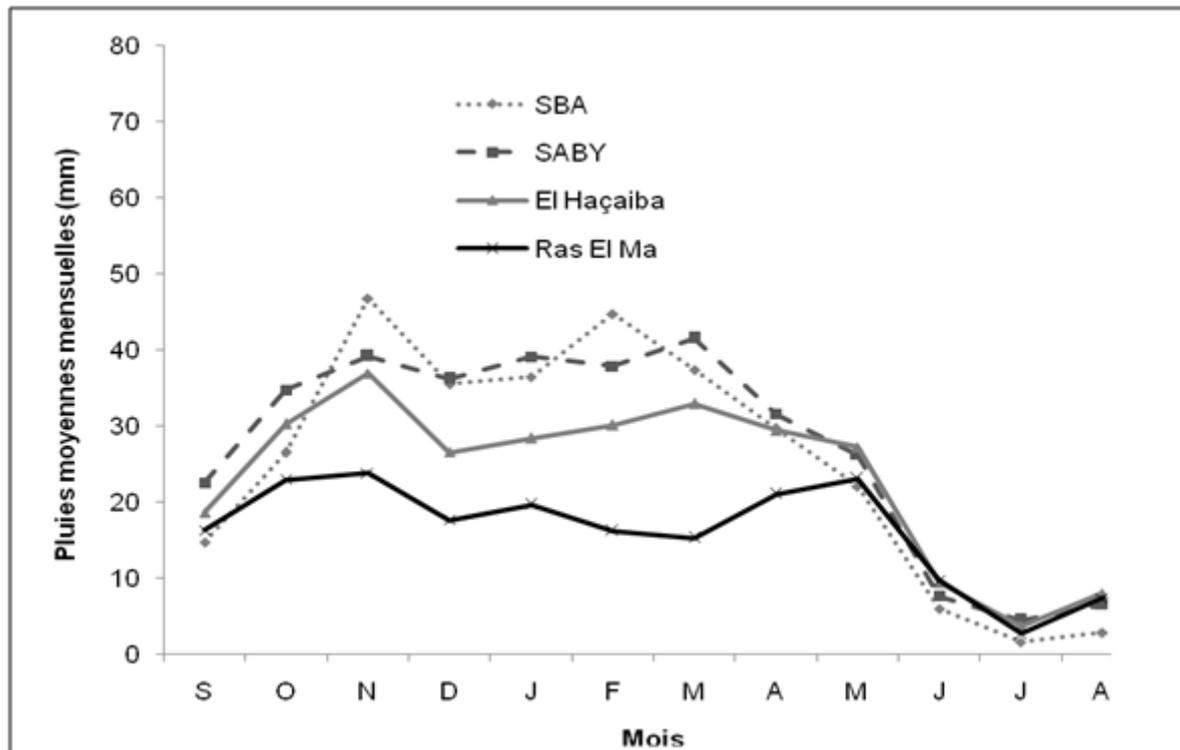


Figure II.2 – Variation des précipitations mensuelles observées dans différents pluviomètres dans le bassin de l'Oued Mekerra

4.3 Température

L'analyse de la série des températures moyennes mensuelles sur la période qui s'étale de 1993 à 2005 (cf. figure (II.3)) montre que les températures mensuelles du bassin varient entre 10 et 26°C. Les températures maximales se produisent dans la période de Mai à Octobre (période chaude) avec des températures moyennes mensuelles qui dépassent les 22°C. Alors que les minimales s'étend du mois Novembre à Avril (période froide), avec des températures inférieures à 12°C. Par ailleurs, une forte amplitude thermique est observée entre le minimum et le maximum de température, elle peut descendre jusqu'à -1°C en Hiver, puis elle augmente progressivement pour atteindre environ 41°C en Eté.

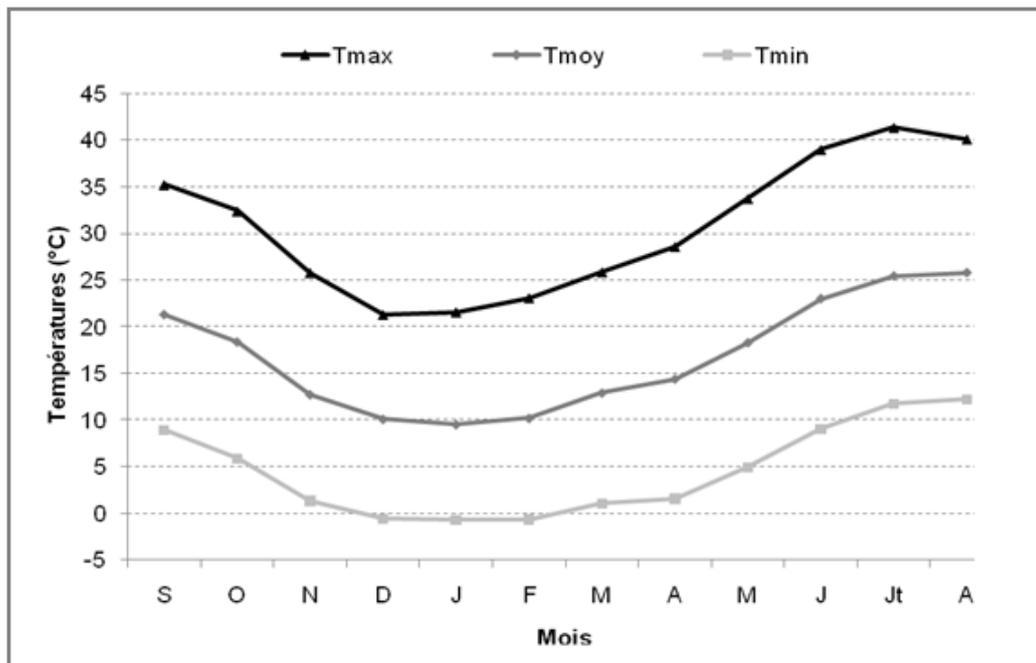


Figure II.3 – Variation mensuelle des températures dans le bassin de l'Oued Mekerra

4.4 Hydrométrie

Plusieurs études ont été menées pour déterminer l'effet de la variabilité des précipitations sur la production d'eaux de ruissellement (Sepulveda, 1997; Milly and Eagleson, 1988). Elles indiquent toutes que la variabilité temporelle et spatiale du ruissellement est due à la variabilité temporelle et spatiale de la pluie qui affecte sensiblement le régime d'écoulement dans les cours

d'eau.

La base des données hydrométriques utilisées ici, représente les débits enregistrés par les stations de jaugeages (El Haçaiba, Sidi Ali Ben Youb et Sidi Bel Abbès). Elles sont implantées uniquement sur l'Oued Mekerra (cf. annexe (A.7)). Les données relatives à ces stations comprennent les débits moyens annuels, les débits moyens mensuels, les débits moyens journaliers et les débits maximaux journaliers sur des longues périodes d'observations (1978 à 2007).

4.4.1 *Débits moyens annuels et interannuels*

L'analyse de l'évolution des modules annuels à l'échelle temporelle (cf. figure (II.4)) montre une irrégularité très marquée dans l'ensemble des stations étudiées avec une alternance d'années humides et d'années sèches. En effet, cette irrégularité semble atténuée de 1978/79 à 1986/87 puis elle est devenue très accentuée à partir de l'année hydrologique 1987/88. Après cette année l'Algérie a connu une sécheresse généralisée sur tout le pays. D'après Kettab (2001) la période qui s'étale de 1954 à 1986 était humide (abondance pluviométrique), alors que la période sèche correspond à la dernière décennie (1987-2001). Pendant cette période, l'Ouest était plus affecté par l'indigence pluviométrique que les régions du centre et de l'Est du pays. La comparaison spatiale des débits moyens annuels des trois stations (cf. figure (II.4a) et (II.4b)) indique que les apports liquides de l'Oued Mekerra augmentent le long de l'Oued. Lorsqu'on passe de l'amont vers la partie moyenne du bassin les débits augmentent considérablement et la moyenne observée passe de $0.156 \text{ m}^3/\text{s}$ (observé à la station El Haçaiba) à $0.508 \text{ m}^3/\text{s}$ (observé à la station de SABY), soit 3 fois des apports qui viennent de l'amont (cf. figure (II.4a)). Entre le centre du bassin et l'exutoire les débits annuels augmentent légèrement de $0.508 \text{ m}^3/\text{s}$ (observé à la station de SABY) à $0.709 \text{ m}^3/\text{s}$ (observé à la station de SBA), soit 1/2 fois des apports qui viennent du centre du bassin (cf. figure (II.4b)). On remarque aussi que les débits diminuent entre ces deux stations en particulier en 1986/87, 1990/91 et 2006/2007. On rend ça au débordement de l'Oued d'où des quantités d'eaux importantes n'atteignent pas la station de SBA. Ceci a été survenu lors de la crue de 04 Octobre 1986 et 19 Avril 2007 (Maref, 2010).

II.4 Caractéristiques hydrométéorologiques

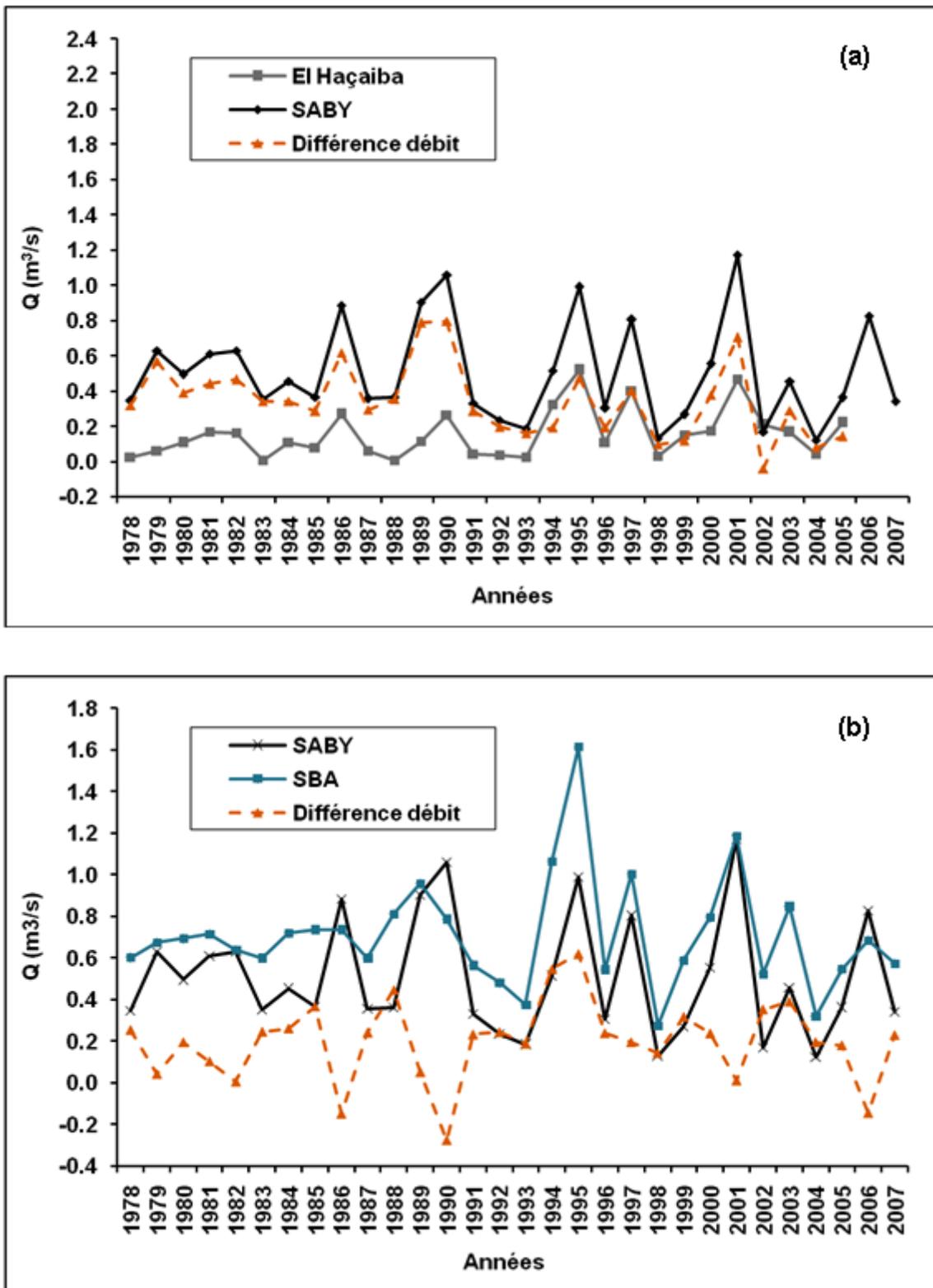


Figure II.4 – Variation des débits annuels de l'Oued Mekerra

4.4.2 Débits moyens mensuels et saisonniers

La variation des écoulements mensuels de l'Oued Mekerra est représentée par la distribution des modules mensuels (cf. annexe (A.8)) et peut être expliquée aussi par le coefficient mensuel du débit (CMD).

Ce dernier est défini comme le rapport du débit mensuel moyen au module interannuel (Musy, 2005). Les CMD inférieurs à l'unité correspondent aux mois de basses eaux et les CMD supérieures à l'unité représentent les mois de hautes eaux (Bouanani, 2004). Les hautes eaux ont lieu du mois Septembre à Octobre et aussi du mois Mars à Mai. En témoignent les valeurs du coefficient mensuel du débit (CMD) qui dépassent largement l'unité ($CMD > 1.5$). Tandis que les basses eaux sont observées aux mois Décembre, Janvier, Février et aussi au mois Juillet et Août ($CMD < 1$).

Ceci peut être expliqué par l'effet des épisodes pluviométriques orageux qui génère d'importantes quantités d'eau. Ces événements peuvent être violents en Septembre et surtout en Octobre (Oufella and Touaïbia, 2004; Borsali et al., 2005).

A l'échelle saisonnière, l'Automne (avec 42% des apports liquides) est plus productif, suivi du Printemps (avec 27% des apports liquides) et de l'Été (avec 18% des apports liquides). Malgré un total pluviométrique plus important que celui de l'Automne, Printemps et l'Été, l'Hiver est la saison la moins productive d'écoulement avec une proportion de 13%.

L'intervention des averses orageuses survenues en Automne donnant naissance à des crues torrentielles dévastatrices (Benyahia et al., 2011). Les crues de la saison chaude liées généralement à des averses orageuses, brèves et localisées se caractérisent par une durée et une extension spatiale plus faibles que celle des crues de saison froide (Belagoune, 2012).

La variation des écoulements saisonniers de l'Oued Mekerra révèle que ce dernier se caractérise par un régime hydrologique tout à fait différent à celui des cours de climat tempéré où la période de haute eau survient habituellement aux saisons humides (Hiver).

4.4.3 Saisonnalité des crues sur l'Oued Mekerra

La variation des débits moyens journaliers sur la période 2000-2007 (cf. figure (II.5)) montre que les crues majeures surviennent généralement en Automne et plus précisément en fin Août jusqu'à fin Novembre. Cette période se caractérise par une fréquence importante des crues qui sont alors souvent violentes et concentrées sur un jour ou deux seulement. La deuxième période de crues survient à la fin du Printemps (début Avril jusqu'à début Juin) et ses crues sont souvent un peu moins fortes et étalées sur plusieurs jours.

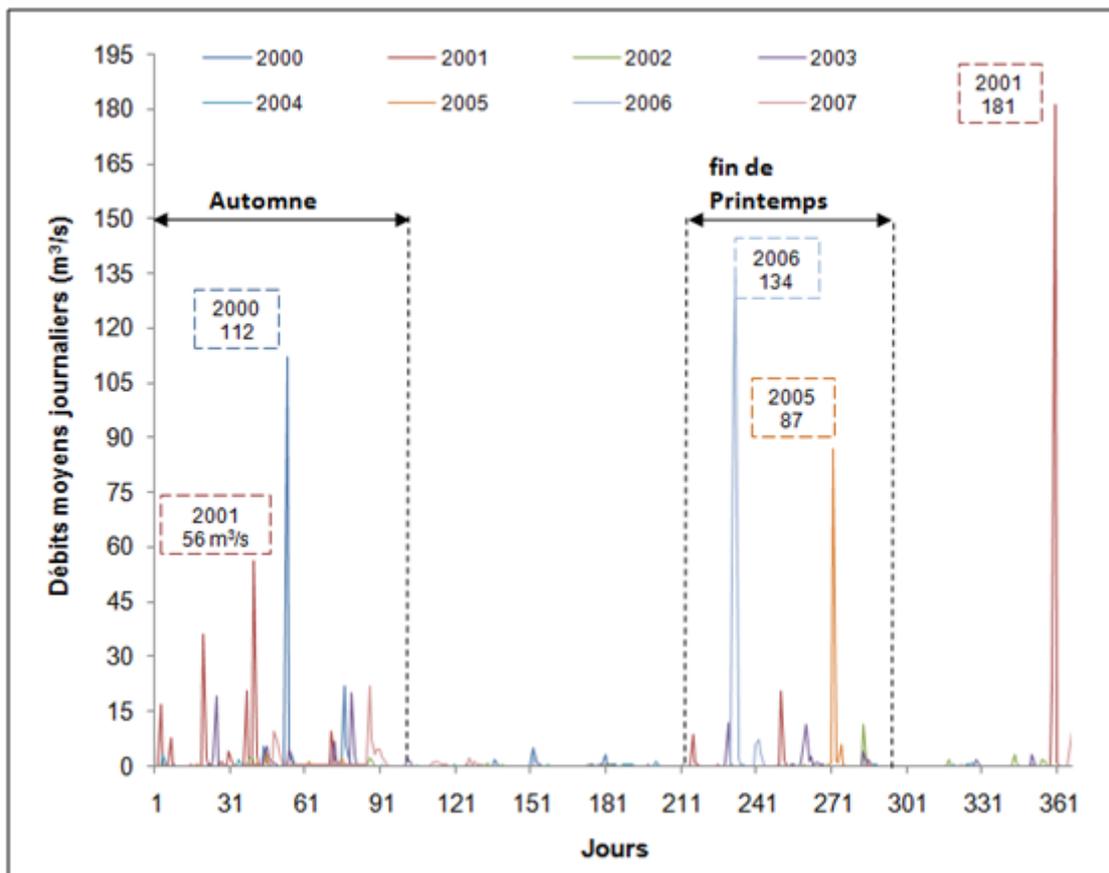


Figure II.5 – Variation des débits moyens journaliers de l'Oued Mekerra

Les crues majeures de l'Oued Mekerra se déclenchent majoritairement en Automne. Elles suivent pour la plupart du temps des pluies orageuses et intenses (Oufella and Touaïbia, 2004; Borsali et al., 2005; Maref, 2010). En automne, des pluies très intenses touchent l'arc méditerranéen, parfois sur des grandes surfaces (Le, 2008).

4.4.4 Caractéristiques des crues de l'Oued Mekerra

L'Oued Mekerra est un cours d'eau éphémère (Maref, 2010). Il se caractérise par un assèchement total dans la plupart des jours de l'année et une reprise des écoulements pendant une courte période de temps, habituellement pendant et après de fortes pluies (cf. figure (II.6)et(II.7)). Un cours d'eau éphémère se caractérise par des périodes d'écoulement courtes, générée par des pluies intenses qui tombent brusquement sur le bassin versant (Day, 1990).



Figure II.6 – Oued Mekerra en écoulement(*Région de Ras El Ma le 10/11/2008*)



Figure II.7 – Oued Mekerra à sec (*Région de Ras El Ma le 20/11/2008*)

Les principales caractéristiques d'un tel régime sont les suivantes : une crue violente et brève, généralement constatés de Septembre à Octobre. Ces crues accompagnées de pluies torrentielles dont l'intensité atteint jusqu'à (120 à 190 mm/h) (Borsali et al., 2005) et peut donner des cumuls de pluie importants, ce qui peut rendre ces cours d'eau très dangereux.

En milieu semi-aride, le ruissellement de surface est rapide et a lieu pendant et juste après un événement de fortes pluies (Abushandi, 2011; Chaponniere, 2005).

Cette réponse, dépend de la nature du sol en surface et de sa couverture végétale. Elle dépend aussi d'autres facteurs tels que l'état initial de saturation du sol et sa capacité d'infiltration (Castillo et al., 2003). Par ailleurs, un sol très sec devient imperméable aux fortes pluies et peut provoquer de graves inondations en cas d'orage ou de pluies intenses (Abushandi, 2011).

5 Conclusion

Le bassin de l'Oued Mekerra est caractérisé par des terrains peu perméables et qualifiés très accidentés et une masse forestière moins dense. Ces caractéristiques confèrent, aux écoulements, un caractère torrentiel et dévastateur. Les régimes de précipitation dans le bassin d'étude restent dominés par une forte irrégularité dans l'espace et dans le temps.

La distribution mensuelle de pluie montre que les mois de l'Hiver (Décembre à Février) sont les plus arrosés, tandis que Juin, Juillet et Août sont les mois les plus pauvres en pluies. En termes de débit, l'Automne (Septembre à Novembre) et Printemps (Avril à Mai), sont les plus riches en écoulement en raison des averses orageuses survenues dans ces deux saisons. Malgré un total pluviométrique plus important que celui de l'Automne et Printemps, l'Hiver est la saison la moins productive d'écoulement avec une proportion de 13% de l'écoulement annuel.

On a constaté que les pluies orageuses de l'Automne produisent des crues violentes et courtes par rapport celles survenues au Printemps.

Cette particularité hydrologique de l'Oued Mekerra semble donc celle d'un cours d'eau éphémère qui se caractérise par des crues violentes et brèves.

Chapitre III

Modélisation hydrologique

1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la modélisation hydrologique de type pluie-débit en vue d'une application opérationnelle en terme de prévision de crues dans le bassin de l'Oued Mekerra.

La première partie de ce chapitre est une description succincte des principaux processus intervenant dans la génération des écoulements sur un bassin versant.

La seconde partie de ce chapitre est consacrée à la modélisation hydrologique à travers le modèle pluie-débit spatialement distribué dénommé MERCEDES (Maillage Élémentaire Régulier Carré pour l'Etude Des Ecoulements Superficiels). Ce modèle a été choisi pour être utilisé dans notre système de prévision des crues. L'application de ce modèle est pour poursuivre deux objectifs : d'une part, simuler le ruissellement dans le bassin versant, semi-aride, de l'Oued Mekerra et d'autre part étudier l'influence de changement d'occupation du sol sur la génération des crues dans cet oued.

2 Processus de la genèse de crue

La question importante en hydrologie, est combien de débit d'eau se produit dans un cours d'eau en réponse à une quantité donnée de précipitations (Tarboton, 2003). L'étude de processus de ruissellement à l'échelle du bassin versant est donc importante pour la modélisation hydrologique de type pluie-débit.

2.1 Processus de ruissellement

Le ruissellement de surface est celui qui apparaît sur la surface du terrain sous la forme d'une fine couche d'eau qui coule sur le paysage. Les eaux de ruissellement qui s'écoulent sur le terrain s'accumulent rapidement dans le cours d'eau le plus proche en aval de la source. Ce processus est appelé généralement la réponse hydrologique du bassin versant. Elle représente la manière dont le bassin versant se réagit lorsqu'il est soumis à une sollicitation (précipitation) (Musy, 2005). Cette réponse, comme schématisée à la figure (III.1), est déterminée par l'observation de débit d'eau (Q) qui atteint à l'exutoire du bassin versant (cf. figure (III.1)).

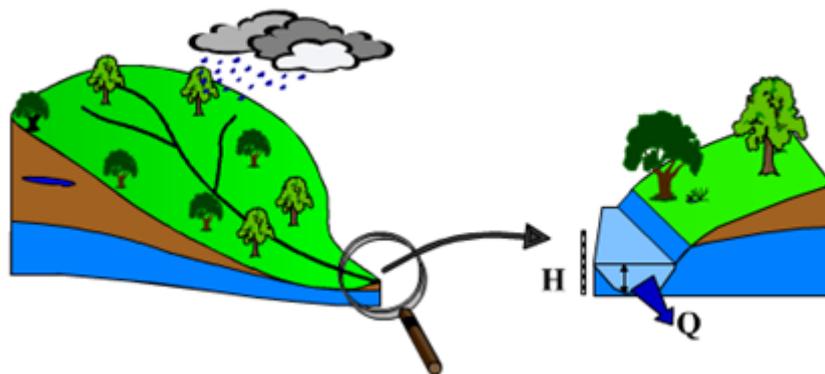


Figure III.1 – Vue schématique de la réponse hydrologique dans un bassin versant (*source* : <http://echo2.epfl.ch/e-drologie>)

Le mode de ruissellement sur les versants est très complexe (Benkaci and Dechemi, 2004; Estupina, 2004). L'eau précipitée à l'échelle du bassin versant peut s'évaporer dans l'air, s'infiltrer dans le sol ou s'écouler sur la surface (cf. figure (III.2)). L'eau qui coule le long de la

surface peut devenir piégée dans les dépressions (interception).

En effet, le ruissellement superficiel se produit lorsque l'intensité des précipitations dépasse la capacité d'infiltration du sol qui appelée également l'infiltrabilité (Horton, 1933). Il se produit également lorsque la pluie tombe sur des surfaces imperméables. .

Lorsque l'apport d'eau de surface dépasse la capacité d'infiltration, l'excès d'eau s'accumule à la surface du sol et remplit les petites dépressions. L'eau stockée dans la dépression ne contribue pas directement au ruissellement des eaux de surface ; il s'évapore ou s'infiltrate plus tard.

La concentration rapide de l'eau à partir d'une grande surface rend les cours d'eau incapables de transporter la grande quantité d'eau, ce qui provoque des problèmes d'inondation localisés.

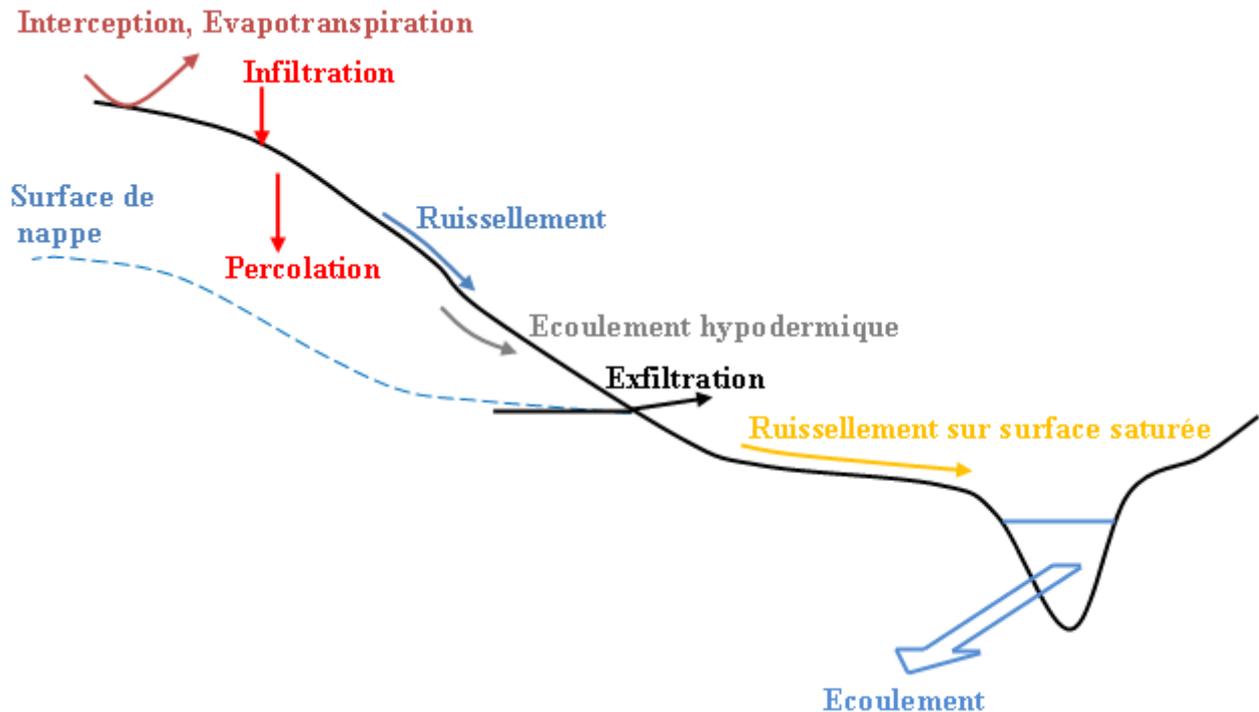


Figure III.2 – Processus physiques impliqués dans la génération de ruissellement

Dans les zones où la capacité d'infiltration est élevée, l'écoulement hypodermique ou souterrain est généralement le facteur qui contribue le plus au débit, en particulier sur les terrains plus abrupts ou sur les pentes plus raides où l'excès de saturation risque moins de se produire.

Les eaux d'exfiltration sont des eaux souterraines qui retournent à la surface pour s'ajouter à l'écoulement terrestre (cf. figure (III.2)). Le flux de retour se produit également aux endroits où le sol s'amincit (ex : des affleurements rocheux) et peut se manifester sous la forme de ressorts d'eau.

L'étude de processus de ruissellement dans un bassin versant a fait l'objet de nombreuses études dont (Horton, 1933; Linsley and Crawford, 1965; Hudson, 1981). La théorie d'Horton est considérée comme pertinente pour expliquer la réponse hydrologique des bassins aux régions sahéliens et semi-arides (Sen, 2008).

Le ruissellement Hortonien constitue le principal processus de génération de ruissellement dans les zones semi-arides (Sandstrom, 1997). Selon le principe établi par Horton (1933) : le ruissellement de surface a lieu pendant et juste après un événement pluvieux, ce qui contribue au débit de façon majoritaire. Ce type de ruissellement est appelé ruissellement Hortonien ou ruissellement par dépassement de l'infiltrabilité (*infiltration excess surface runoff*).

Les crues dans les régions arides résultent des événements pluviométriques extrêmes et irréguliers. Ces événements se produisent lorsque les intensités pluviométriques sont très fortes et les sols peu couverts de végétation (Weill, 2007; Audrey, 2013).

La production d'eaux de ruissellement dans les zones semi-arides présente à la fois des similitudes et des différences par rapport aux zones tempérées humides (Sandstrom, 1997). En milieu semi-aride les fortes intensités des événements pluvieux, conjuguées à la faible capacité d'infiltration des sols (due à des sols souvent compactés et recouvert d'une croûte et une végétation peu abondante), expliquent la prépondérance du ruissellement Hortonien dans cette zone (Esteves et al., 2000; Albergel, 2003).

2.2 Facteurs d'influence de la réponse hydrologique

L'élément fondamental dans la génération de ruissellement dans le bassin est évidemment l'averse. Ce pendant, le comportement hydrologique des différents bassins varie en fonction des différents facteurs impliqués dans les mécanismes de production de ruissellement à savoir facteurs " externes " et facteurs " internes ".

Facteurs " externes " : les conditions climatiques du milieu, la pluviosité (l'intensité et

la durée de l'averse et variations spatiales), etc.

Facteurs " internes " : la morphologie du bassin versant (relief et géométrie), les propriétés physiques du bassin (perméabilité du sol, végétation et couverture du sol), la structuration du réseau hydrographique (densité de drainage) et l'état antécédent d'humidité. A titre d'exemple, les bassins ayant le relief accidenté sont caractérisés par une réponse rapide aux pluies intenses qui seraient exacerbées si l'infiltration était réduite à cause de l'humidité du bassin versant.

2.3 Transformation de la pluie en hydrogramme de crue

La transformation de la pluie en hydrogramme de crue se traduit par l'application successive de deux fonctions, nommées respectivement : fonction de production (ou fonction d'infiltration) et fonction de transfert (fonction de routage)(Estupina, 2004) (cf. figure (III.3)).

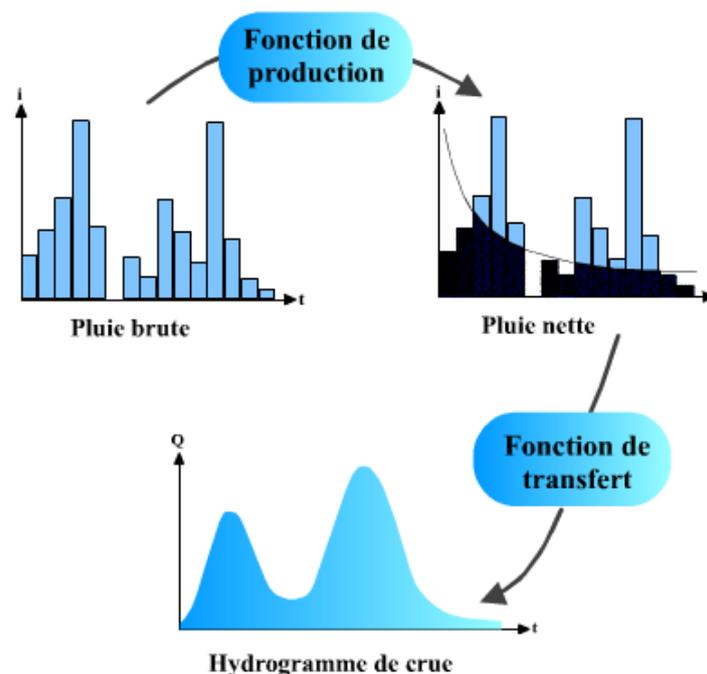


Figure III.3 – Transformation de la pluie brute en hydrogramme de crue
<http://echo2.epfl.ch/e-drologie>

(Source :

2.3.1 *Fonction de production*

Fonction de production est définie comme le processus de genèse des écoulements. Elle permet de déterminer le volume de ruissellement est souvent appelé la méthode de perte, car elle prend en compte les pertes (l'infiltration et l'évapotranspiration) qui surviennent lors d'une chute de pluie. Pour chaque intervalle de temps dans le processus de modélisation, la méthode de perte calcule la quantité d'eau qui contribue au ruissellement sur la surface du bassin versant, appelée aussi pluie efficace/nette. La pluie nette est la fraction de pluie brute participant effectivement à l'écoulement ([Fouchier, 2010](#)).

2.3.2 *Fonction de transfert*

Fonction de transfert est appelée aussi la fonction de modulation ou encore fonction d'étalement ([Musy, 2005](#)). Elle décrit le ruissellement direct puisqu'elle convertit les précipitations efficaces en un hydrogramme à la sortie du bassin versant. Cette fonction tient compte de la rugosité de surface et de la géométrie du bassin versant.

2.4 Décomposition de l'hydrogramme de crue

L'hydrogramme est le graphique de la variation temporelle des débits d'un cours d'eau dans d'un épisode pluvieux (cf. figure ([III.4](#))). La forme de l'hydrogramme varie en fonction d'un certain nombre de facteurs déterminants dans le bassin hydrographique, mais il comprend généralement les trois principales parties : Le ruissellement de surface (écoulement rapide de crue), l'écoulement hypodermique et l'écoulement de base (écoulement de la nappe souterraine) ([Réménieras, 1965](#)).

L'importance de chacune de ces grandeurs dépend du milieu étudié, des conditions initiales de l'écoulement et des caractéristiques de l'événement pluvieux (distribution spatio-temporelle, intensité et volume) ([Kingumbi, 2006](#)).

Les temps caractéristiques de l'hydrogramme de crue sont : Le temps de réponse du bassin, le temps de concentration, le temps de montée et le temps de base.

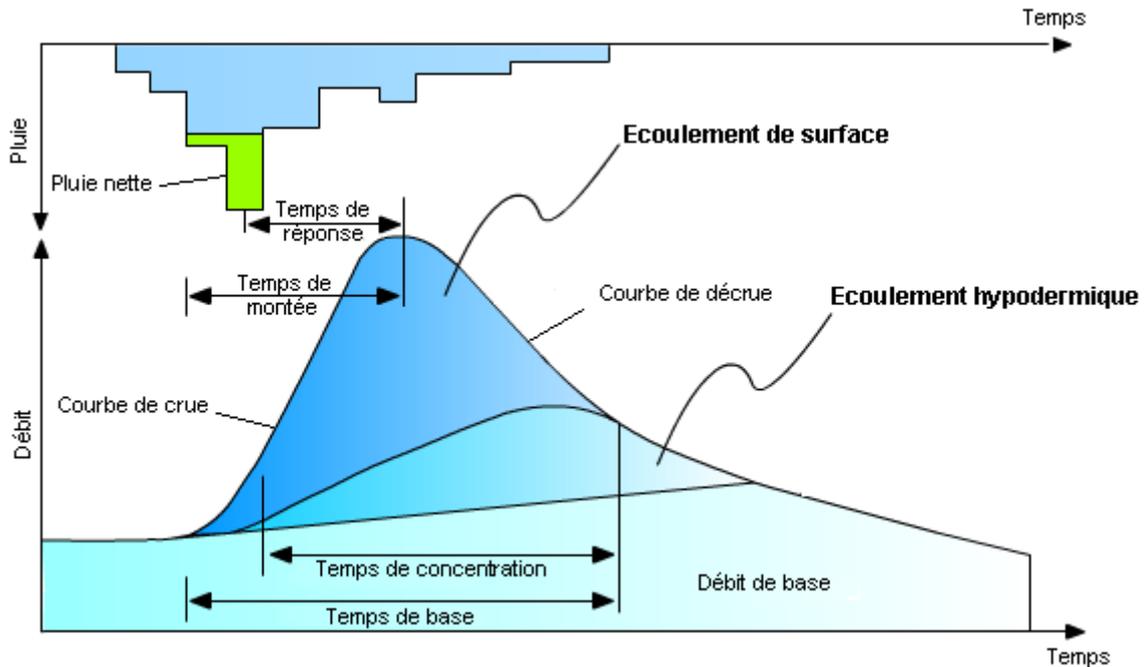


Figure III.4 – Hytogramme et hydrogramme résultant d'un événement pluie-débit (Source : <http://echo2.epfl.ch/e-drologie>)

D'après Moulin (2007), les parties de l'hydrogramme les plus particulièrement intéressantes pour la prévision des crues sont les suivantes :

- La montée de crue (la durée de concentration) ;
- La valeur du pic de crue (débit maximum Q_{max}) ;
- Le timing du pic de crue (temps de montée) ;
- Le volume de la crue (quantité d'eau transportée lors de crue) ;
- Le gradient de la montée de crue (le taux de variation des débits par rapport au temps).

3 Modélisation hydrologique

Les modèles hydrologiques ont été utilisés longtemps dans la gestion des risques hydrologiques liés aux phénomènes de crues et la gestion des ressources en eau.

La modélisation hydrologique est un thème largement discuté en communauté hydrologique

scientifique. L'objectif de cette modélisation est de simplifier et d'expliquer la complexité du processus hydrologique dans le système (bassin versant).

3.1 Définitions

D'après [Musy and Higy \(1998\)](#) : «*Le modèle est la représentation schématique d'un phénomène physique, réalisé dans le but de mieux l'étudier ou d'analyser l'influence qu'il exerce*».

Le modèle peut être défini aussi comme une image simplifiée d'un système dans le monde réel et il regroupe un ensemble d'équations ou un ensemble d'opérations logiques contenues dans un algorithme d'un programme ([Bessière, 2008](#); [Ramos et al., 2009](#)). Les modèles ont des paramètres, qui sont des mesures numériques d'une propriété ou des caractéristiques qui sont constantes dans des conditions spécifiées ([Beven, 2001](#)).

Généralement les applications des modèles sont nombreuses, dont notamment : la simulation, la prédétermination (évaluation de données d'un projet), la reconstitution ou l'extrapolation de données et la prévision ([Bessière, 2008](#); [Ramos et al., 2009](#)).

La modélisation du comportement hydrologique est conçue pour modéliser le cycle de l'eau sur un bassin versant ([Chaponniere, 2005](#)). Le modèle hydrologique fournit donc une représentation mathématique simplifiée du système hydrologique à travers des divers éléments du cycle de l'eau (infiltration, ruissellement, évaporation, évapotranspiration, fonte de la neige, etc.) ([Fouchier, 2010](#)). En outre, le modèle hydrologique peut améliorer notre compréhension des débits fréquentiels ([Reed et al., 2007](#)). Les modèles hydrologiques sont souvent employés en raison des limites des techniques de mesure hydrologiques ([Bouvier et al., 1996](#)). Ils peuvent être utilisés pour mieux comprendre et expliquer les processus hydrologiques et pour la prévision hydrologique ([Haan et al., 1982](#)).

Les modèles hydrologiques sont de plus en plus utilisés dans la gestion des ressources en eau et leurs applications vont de la simple planification des ressources en eau à des problèmes plus complexes, comme les effets des changements climatiques sur les ressources en eau et les problèmes environnementales. Ils sont utiles aussi pour étudier les impacts potentiels des changements dans l'occupation du sol. Les modèles sont également utilisés dans l'étude de l'interaction entre l'eau de surface et les eaux souterraines. Les modèles hydrologiques est

appliqués également en prévision des crues et d'alerte précoce.

La plupart des modèles hydrologiques sont constitués de 5 éléments constitutifs (cf. figure (III.5)) : la géométrie du système (bassin versant), les entrées dans le système, les lois de formalisation des processus, l'état initial et les conditions aux limites du système et enfin les sorties (Gnouma, 2006).

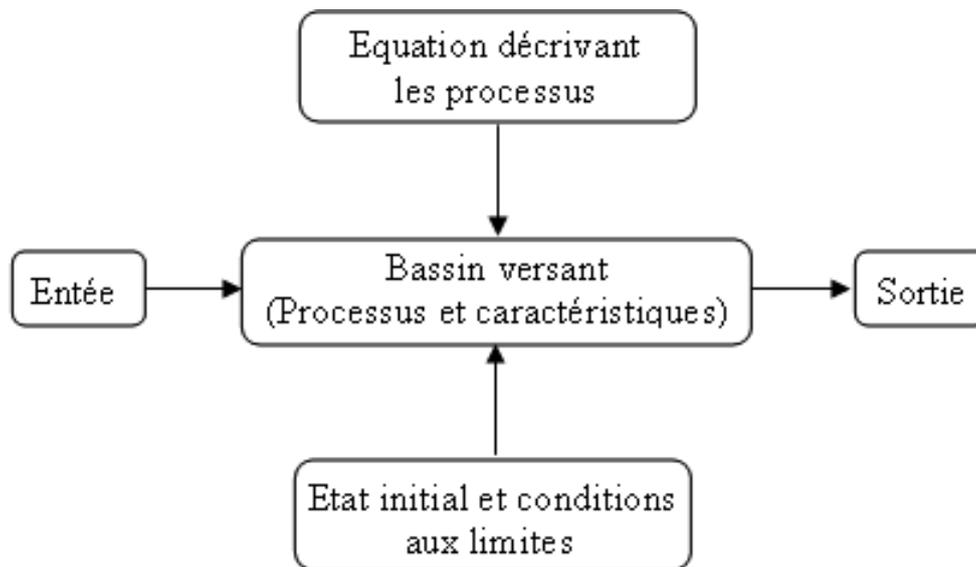


Figure III.5 – Structure d'un modèle hydrologique d'après Singh (1988) (Source : (Gnouma, 2006))

En termes généraux, les modèles hydrologiques sont composés des variables d'état qui définissent la dynamique d'un système, ainsi que des paramètres en tant que quantités caractérisant le système.

Les paramètres peuvent être classés en paramètres physiques et de processus (Sorooshian and Gupta, 1995). Les paramètres physiques sont ceux qui décrivent l'état de surface du bassin versant et peuvent être mesurés directement, tels que, mesure la perméabilité du sol par des échantillons de carottage, les surfaces végétales, etc.

Par contre, les paramètres de processus sont ceux qui ne peuvent pas être mesurés directement et doivent être déduits indirectement (Gupta et al., 1998), tels que, la profondeur effective du stockage de l'humidité du sol, l'écoulement latéral, la conductivité hydraulique moyenne et le coefficient d'écoulement de surface.

3.2 Modélisation pluie-débit

Les études hydrologiques visent souvent à établir des relations pluie-débit (Shah et al., 1996). La modélisation pluie-débit est le processus de transformation d'un hyétogramme de pluie en un hydrogramme de ruissellement. Cette transformation peut être réalisée grâce à l'utilisation de techniques mathématiques ou statistiques, en développant des descriptions physiques du processus pluie-débit ou à travers diverses combinaisons de ces approches (Smith, 2003).

Les modèles pluie-débit couvrent une large gamme des objectifs et des applications dont : la gestion des ressources en eau, l'aménagement du territoire, la prévision des crues, etc. (Bessière, 2008). Kitanidis and Bras (1980) ont montré l'applicabilité des modèles pluie-débit dans le domaine de prévision des crues et O'Connell and Clarke (1981) ont traité le problème de la prévision des crues en utilisant un modèle hydrologique pluie-débit.

Un modèle pluie-débit est généralement constitué d'une fonction de production qui estime la quantité de pluie efficace disponible au ruissellement sur le bassin versant et d'une fonction de transfert (routage) qui achemine la pluie efficace à l'exutoire et reconstitue l'hydrogramme de crue (cf. figure (III.3)). Les modèles pluie-débit peuvent être utilisés donc :

- Pour prévoir des débits rares et extrêmes à différents horizons ;
- Pour calculer des débits sur un bassin non jaugé ;
- Pour combler les lacunes dans les séries des débits ;
- Pour contrôler la qualité des données observées.

Toutefois, la modélisation pluie-débit représente un défi scientifique pour les hydrologues travaillant dans les régions arides et semi-arides (Abushandi, 2011). Ces zones ont reçu moins d'attention auprès des chercheurs, en raison des conditions climatiques et physiques difficiles (Wheater et al., 2008).

En effet, un nombre limité de modèles pluie-débit ont été développés et modifiés pour les environnements arides et semi-arides. La première tentative sur la caractérisation de la relation pluie-débit dans une zone semi-aride a été faite par Osborn and Hickok (1968). Ils ont analysé l'effet de la variabilité des précipitations sur la réponse du cours d'eau d'Alamogordo Creek au Nouveau-Mexique. La deuxième étude a été faite par Lane and Renard (1971) qui ont évalué la modélisation stochastique pour l'écoulement éphémère dans un bassin versant expérimental

semi-aride de Walnut Gulch en Arizona.

3.3 Typologie des modèles pluie-débit

La transformation des pluies incidentes en débits à l'exutoire d'un bassin, représente le processus le plus complexe à modéliser (Duband, 1999; Estupina, 2004). Les modèles hydrologiques varient en complexité, la quantité de données d'observation requises en tant que paramètres d'entrée et la performance pour les différents types de bassins versants (Abushandi, 2011). La complexité du modèle augmente aussi avec l'augmentation du nombre de paramètres dont le modèle utilise pour simuler des processus réels (Perrin et al., 2003).

A cet effet, nombreux modèles hydrologiques ont été développés pour simuler la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant à une large gamme d'échelles climatiques et temporelles. Ces modèles peuvent être classés dans plusieurs catégories. En effet, plusieurs auteurs ont proposé des classifications des modèles hydrologiques (Singh, 1995; Refsgaard and Storm, 1996; Ambroise, 1999); etc.

À l'heure actuelle, il y a beaucoup de modèles hydrologiques, qui peuvent être classés en deux types différents en fonction de l'approche du modèle, à savoir déterministe ou stochastique.

Les modèles déterministes sont basés sur des processus physiques (Chow et al., 1988). Le modèle déterministe vise à représenter d'un système réel par un autre système qui a des propriétés similaires mais il est beaucoup plus facile à employer, ou à utiliser un ensemble d'équations portant sur des variables certaines (Audrey, 2013).

Les modèles stochastiques se réfèrent à des méthodes qui traitent de variables aléatoires à l'aide de distributions statistiques. L'approche probabiliste est utilisée soit parce que le phénomène étudié est aléatoire soit parce que nous cherchons à représenter des permanences difficilement explicables physiquement (Chocat, 1997).

Toutefois, Bessière (2008) a fait un classement des modèles hydrologiques fondé sur les critères suivantes (cf. figure (III.6)) :

- La description des processus hydrologiques
- La représentation de l'espace

– La discrétisation temporelle

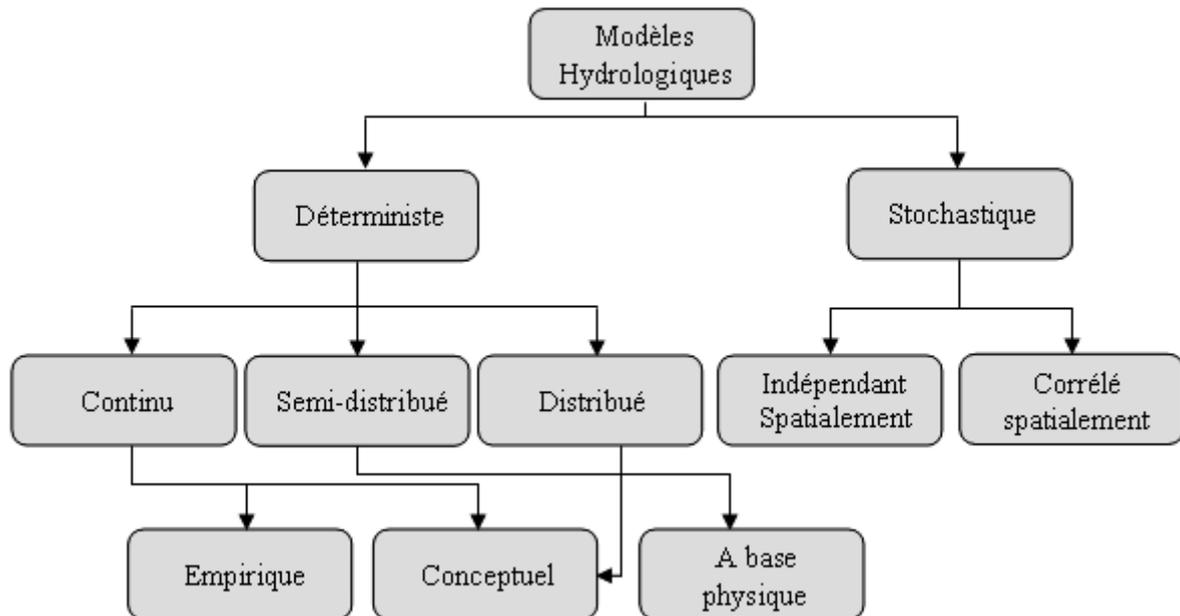


Figure III.6 – Classification générale des modèles hydrologiques d’après [Chow et al. \(1988\)](#) (Source : [Abushandi, 2011](#))

Les modèles basés sur la description de processus qui déterminent la transformation de la pluie en débit au niveau du bassin versant, peuvent être empirique, conceptuel et base physique.

Les modèles empiriques (parfois appelés modèles de boîte noire/black box ou modèles de sortie d’entrée) ne facilitent pas la compréhension physique du système. Ils contiennent des paramètres qui peuvent avoir peu de signification physique directe et ne peuvent être estimés qu’en utilisant des mesures simultanées d’entrée et de sortie.

Les modèles hydrologiques de type empirique ne prennent pas en compte la structure interne et la réponse du bassin versant. Ainsi, ils ne simulent pas les processus hydrologiques qui sont impliqués dans la relation d’entrée-sortie ([Bessière, 2008](#)).

Les modèles empiriques s’appuient sur les séries de données chronologiques stochastiques ([Ambroise, 1999](#)). Dans de nombreuses situations, les modèles empiriques peuvent fournir des réponses précises et peuvent donc servir d’outil utile dans la prise de décision. Le modèle des réseaux de neurones artificiels (Artificial Neural Networks) ([Hsu et al., 1995](#)), les modèles GR (Génie Rural) ([Loumagne, 1988](#); [Edijatno and Michel, 1989](#)), le modèle RMA ([Box and Jenkins,](#)

1970) et d'autres modèles de séries chronologiques sont des exemples de cette classe.

En général, les modèles empirique nécessitent un nombre réduit de paramètres et de données et sont plus faciles à utiliser et à calibrer ([Abushandi, 2011](#))

Un modèle à base physique (appelés aussi modèles théoriques ou modèles de boîte blanche/white box) a une structure logique similaire au système du monde réel et peut être utile dans des circonstances modifiées ([Xu, 2002](#)). Les modèles à base physique peuvent être classés comme des modèles réduits à l'échelle et des modèles analogiques.

Un modèle réduit représente le système à échelle réduite et présente une ressemblance physique avec le système réel. Les exemples de cette classe peuvent inclure le modèle réduits d'un bassin versant, le modèle hydraulique d'un déversoir de barrage, etc.

Les modèles analogiques utilisent un autre système physique ayant des propriétés similaires à celles du réel, tel que le courant électrique qui représente le flux d'eau.

Les modèles physiques sont utiles dans les cas suivants :

- Ils peuvent aider le chercheur à comprendre un phénomène dans un domaine complexe ;
- Un modèle physique peut permettre de réaliser des expériences sous des conditions favorables que celles, qui ne seraient disponibles avec le système réel.

Les modèles basés sur la physique peuvent inclure des modèles de ruissellement dans les bassins hydrographiques comme tels que la loi de Barré Saint-Venant pour le ruissellement de surface ([Bessière, 2008](#)), des modèles d'infiltration basés sur la théorie des écoulements d'eau dans les sols, comme exemple la loi de Richards en milieu non saturé et loi de Darcy en milieu saturé ([Morel-Seytoux, 1978](#)), des modèles d'évaporation basés sur les théories de turbulence et de diffusion et des modèles d'eaux souterraines basés sur des équations de transport fondamentales ([Freezb, 1971](#)). Un exemple de modèles à base physique est le modèle SHE ([Abbott et al., 1986](#)).

Les modèles conceptuels (parfois appelés modèles de boîte grise/grey box) sont intermédiaires entre les modèles à base physique et empiriques. Les modèles conceptuels conceptualisent le cycle de l'eau dans le bassin versant, comme une structure en cascade de réservoirs interconnectés ([Furusho, 2008](#); [Moussu, 2011](#)). Ces réservoirs se remplissent, les uns les autres,

par des flux (précipitation, infiltration ou percolation) et se vident par évapotranspiration, ruissellement, drainage, etc.

Les modèles hydrologiques conceptuels s'approchent de la réalité des fonctionnements hydrologiques tout en étant moins complexes que les modèles à base physique qui nécessitent en général un grand nombre de paramètres à calibrer (Clarke, 1973; Lavabre et al., 2003). Parmi les modèles appartenant à cette famille : TOPMODEL (*TOPography based hydrological MODEL*) (Obled et al., 2009).

En termes de discrétisation spatiale le modèle peut être global, semi- distribué ou distribué. Les modèles globaux traitent le bassin comme un ensemble homogène sur lequel les processus élémentaires de transformation de la pluie en débit peuvent être décrits à l'échelle macroscopique, par des valeurs moyennes des précipitations et un seul jeu de paramètres qui intègrent les caractéristiques du bassin versant.

Les modèles globaux exigent des quantités limitées de données d'entrées qui sont exprimées par des valeurs moyennes sur le bassin : pluie moyenne, pente moyenne, etc.

Dans de nombreux modèles globaux, les processus sont décrits sous forme d'équations simplifiées ou d'équations issues de l'expérience (Singh, 1995). Parmi les modèles globaux connus, on peut citer : le modèle HEC-1 (HEC, 1998), IHACRES (Jakeman and Hornberger, 1993), AWBM (Boughton and Chiew, 2007), etc.

Un modèle semi-distribué peut adopter une représentation localisée pour des sous-groupes individuels. Les modèles semi-distribués divisent le bassin versant en plusieurs sous-bassins ou zones géographiques qui sont traitées comme homogène en eux-mêmes. Sur chaque sous-bassin, on peut donc appliquer des données d'entrées distinctes (pluies, type de végétation, imperméabilité du sol, pente, etc.). Parmi les modèles semi-distribués les plus répandus est le modèle HEC-HMS (Scharffenberg and Flemin, 2010).

Tandis que, dans les modèles entièrement distribués l'ensemble du bassin est divisé en zones unitaires élémentaires (mailles). Chaque maille est considérée comme homogène et elle contient des informations concernant les caractéristiques et occupations du sol de surface, la pente et la direction des eaux de ruissellement (Jain and Singh, 2005).

Un modèle distribué est un modèle dans lequel les paramètres, les entrées et les sorties

varient dans l'espace, ce qui permet d'aborder de mieux la variabilité spatiale des facteurs géographiques et météorologiques qui déterminent la réponse hydrologique (Indarto, 2002) et par conséquent une grande quantité de données hydrologiques et physiques liées à l'espace doivent être préparées en vue d'exécuter ce modèle.

Les modèles distribués sont fréquemment utilisés comme outils pour la description détaillée des processus hydrologiques qui peuvent fluctuer dans le temps et dans l'espace (Abushandi, 2011). En outre, dans la modélisation hydrologique distribuée les processus hydrologiques sont simplifiés ou paramétrés. Toutefois, les modèles hydrologiques distribués nécessitent beaucoup plus de données que les modèles groupés (Batelaan et al., 1996).

Un inconvénient de modèles hydrologiques répartis dans l'espace est leur exigence de données spatiales détaillées du bassin et de climat. Le nombre de paramètres possibles est en effet croissant avec l'augmentation du nombre de mailles ou d'unités de modèle (Beven, 1989).

Toutefois, les modèles distribués ont beaucoup évolué ces dernières années en raison de la disponibilité d'une puissance de calcul accrue et de la possibilité d'effectuer de nombreux calculs sur le modèle numérique à l'aide du SIG. Les données géographiques obtenues par télédétection constituent également une étape très importante dans la modélisation hydrologique distribuée, car elles éliminent le besoin d'effectuer des mesures sur le terrain pour chaque application du modèle (Matei, 2012). Comme exemple des modèles opèrent sur la discrétisation spatiale du bassin : MERCEDES (Bouvier et al., 1994), TOPMODEL (Beven and Kirkby, 1979), etc.

Selon la discrétisation temporelle, nous distinguons ainsi les modèles événementiels et les modèles continus.

La modélisation événementielle simule la réponse du bassin uniquement pour des événements pluvieux ponctuels résultant de tempêtes (typiquement des épisodes de crues) sans tenir compte des conditions antérieures (humidité du sol antécédente, niveaux de réservoir, etc.) (Le, 2008; Gerard, 2010).

Les modèles d'événement estiment généralement le ruissellement provenant d'un événement pluvieux individuel, c'est-à-dire décrivant une période relativement courte dans l'enregistrement hydrologique. Les modèles d'événements évaluent habituellement un ensemble partiel des processus hydrologiques qui affectent le bassin hydrographique : l'infiltration, l'écoulement de surface et éventuellement l'interception et le stockage par rétention. La plupart des modèles

d'événements utilisent un intervalle de temps constant, dont la valeur peut généralement aller de quelques minutes à plusieurs heures (Vernon et al., 1991).

Par contre, les modèles continus fonctionnent pendant une période prolongée (pas seulement pour les tempêtes individuelles) qui comprend à la fois la totalité de la chronique de pluies et l'évolution des variables d'état et/ou de sortie à plus long terme (Payraudeau, 2002). Ces modèles tiennent compte en permanence des propriétés hydrologiques supplémentaires telles que l'évapotranspiration et l'écoulement des eaux souterraines pour évaluer légitimement le débit des cours d'eau. Un autre aspect crucial de ces modèles est la comptabilisation de l'humidité du sol et de son rapport avec les changements d'infiltration. L'intervalle de temps dans le modèle contenu peut être horaire, quotidien, mensuelle, etc.

3.4 Modèles de prévision de crues

Le principal facteur affectant le choix d'un modèle pour la prévision de crues est la compréhension et la définition correcte des fins pour lesquelles la méthode ou le modèle sera utilisé.

En effet, il n'existe pas de modèle spécifique qui puisse être choisi comme le plus approprié pour la prévision des crues. En règle générale, la prévision doit être utilisée pour évaluer les futurs débits de crues en vue d'anticiper le plus que possible ces événements. La sélection du modèle dépend des besoins prévus, des caractéristiques du bassin hydrographique et des données disponibles.

Haan et al. (1982) ont proposé quatre facteurs qui peuvent être utilisés dans la sélection appropriée du modèle : précision de la prédiction, la simplicité du modèle, la cohérence des estimations des paramètres et la sensibilité des résultats aux variations des valeurs des paramètres.

3.5 Procédures de la modélisation pluie-débit

Les procédures de modélisation hydrologique de type-pluie-débit peuvent être décrites en 5 étapes illustrées dans la figure (III.7).

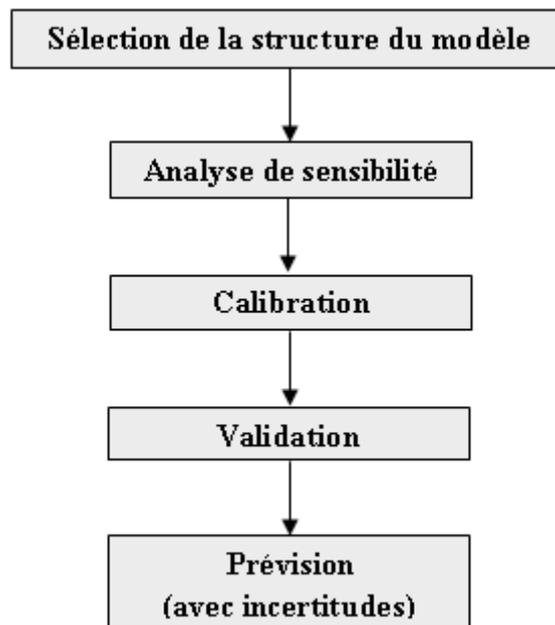


Figure III.7 – Procédure (standard) simplifiée pour la modélisation pluie-débit d’après [Wagener et al. \(2004\)](#) (Source : [Bessière \(2008\)](#))

[Dendrou \(1982\)](#) identifie le calibrage, la validation et la vérification comme les trois étapes essentielles pour l’application correcte d’un modèle.

3.5.1 *Sélection de la structure du modèle*

Le choix du modèle approprié à l’objectif de modélisation est une étape essentielle pour le succès du processus de prévision. En effet, tous les types de modèles ont leur propre domaine d’efficacité dans la modélisation pluie-débit et que leur utilisation dépend de l’objectif de l’étude et de la précision souhaitée ([Dooge, 1977](#)).

Dans la pratique, il ya plusieurs considérations qui doivent être prises en compte lors de la sélection d’un modèle pluie-débit ([Abushandi, 2011](#)) :

1. La disponibilité et la qualité des données hydrologiques, notamment les données de pluie et de débit ;
2. La capacité du modèle à s’adapter avec la fluctuation climatique ou physiographique d’une région à l’autre.

Touefois, l'expérience du modélisateur (tant dans l'utilisation du modèle que dans la connaissance du bassin hydrographique) est d'une valeur primordiale tant pour la facilité d'application du modèle que pour la fiabilité des résultats du modèle (WMO, 1975).

3.5.2 *Analyse de sensibilité*

L'analyse de sensibilité d'un modèle est un procédé nécessaire pour connaître comment les perturbations sur les entrées du modèle engendrent des perturbations sur la réponse. Les entrées du modèle sont les paramètres, les conditions initiales et aux limites.

L'analyse de sensibilité peut avoir lieu à deux différentes étapes du processus de modélisation. La première étape porte sur placer l'analyse de sensibilité avant l'étape d'étalonnage pour identifier les paramètres les plus importants. Les paramètres les moins sensibles sont eux généralement fixés à des valeurs adaptées pour réduire la dimensionnalité du processus de calage (Bastidas et al., 1999). La seconde option consiste à effectuer une analyse de sensibilité après l'étape d'étalonnage pour estimer si les paramètres sont bien ou mal identifiés (Clarke, 1973).

3.5.3 *Calibration*

Le calibrage (étalonnage) est le processus de modification des paramètres du modèle pour réduire l'erreur entre les valeurs simulées et observées (Refsgaard and Storm, 1996; Bessière, 2008).

Le modèle hydrologique adopté devra être calé afin d'identifier et de reconnaître certaines propriétés hydrologiques du bassin versant (Gerard, 2010). Le calibrage se fait le plus souvent en comparant les résultats du modèle avec les observations afin d'évaluer la capacité du modèle à représenter la réalité (Lu, 2006; Bessière, 2008). Tous les modèles doivent être correctement calibrés avant à l'utiliser.

Sorooshian (1983) a identifié deux objectifs majeurs de l'étalonnage :

1. Obtenir un ensemble de paramètres conceptuellement réaliste et unique qui reflète notre compréhension du système physique ;

2. Obtenir un ensemble de paramètres qui donne le meilleur ajustement possible entre les hydrogrammes simulés et observés.

Un bon ajustement entre le débit prévu et observé pour la période d'étalonnage est un test nécessaire de l'applicabilité d'un modèle sur un bassin versant. Toutefois, ce procédé est insuffisant, car il ne garantit pas que le modèle simulera correctement le ruissellement pour les périodes non étalonnées (Beven, 1989; Wallis et al., 1977).

Généralement, le procédé de l'étalonnage d'un modèle s'effectue par le calibrage automatique ou manuel. L'étalonnage automatique tente de minimiser une fonction objective qui représente une erreur de modèle par ajustement itératif d'un ensemble de paramètres spécifié. En étalonnage manuel, l'utilisateur ajuste manuellement un paramètre et examine la sortie du modèle à chaque réglage. L'étalonnage manuel peut impliquer une évaluation subjective des résultats du modèle ou l'utilisation d'une fonction objective. Néanmoins, l'utilisation de procédures automatiques est souhaitable car elle réduit considérablement le temps consacré à l'étalonnage et fournit une évaluation objective du meilleur ajustement (Troutman, 1985). Toutefois, une certaine quantité de l'étalonnage manuel est toujours nécessaire (Franchini and Pacciani, 1991).

Le succès de tout procédé d'étalonnage du modèle dépend des données observées, de la structure du modèle, des conditions d'étalonnage et de la procédure d'optimisation (Abouabdillah, 2009).

3.5.4 *Validation*

La validation ou la vérification est une étape souvent incluse dans les procédures de modélisation. Le processus de validation devrait être utilisé pour tester la divergence d'un modèle sur un large éventail de conditions hydrologiques. La divergence se produit lorsque l'erreur du modèle pour les débits prévus est significativement supérieure à l'erreur du modèle pour les conditions calibrées (Todini and Wallis, 1977).

La validation d'un modèle signifie généralement le test de ce modèle avec des données indépendantes. Celles-ci ne doivent pas être utilisées dans la phase de calage. La validation du modèle teste la capacité du modèle à donner des résultats pour des données d'entrée autres que celles utilisées pour calibrer le modèle (Refsgaard and Storm, 1996).

3.5.5 *Prévision (Vérification)*

L'incertitude fait malheureusement partie intégrante de toute modélisation hydrologique entreprise, car aucune prévision des processus hydrologiques ne peut être parfaite. Il est alors important de donner beaucoup d'attention à l'augmentation de l'exactitude des prévisions de modèles. La vérification du modèle étudie donc la gamme des conditions dans lesquelles le modèle produira des résultats acceptables.

[Cloke and Pappenberger \(2009\)](#) ont précisé de nombreuses sources d'incertitude du modèle dans le processus de prévision des crues, telles que : les erreurs dans la collecte de données de précipitations, c'est-à-dire les erreurs induites par la mesure elle-même ou par la discrétisation temporelle et spatiale ces données, les erreurs dans la définition des conditions hydrologiques antécédentes, les erreurs dans la représentation de la géométrie du système et les limites des modèles pour représenter entièrement les processus physiques du système. En effet, l'incapacité du modèle à la simplification et/ou la description des processus du système hydrologique entraîne souvent le problème que différents ensembles de paramètres.

Les résultats de la performance du modèle sont comparés en utilisant plusieurs paramètres statistiques qui incluent les débits observés et simulés, écart-type (RMSE), l'erreur moyenne absolue (MAE), l'erreur de volume en pourcentage (VE) et le coefficient de corrélation (R^2). En effet, MAE et RMSE sont utilisés pour mesurer l'écart entre le débit observé et simulé. Par contre VE est défini comme étant le rapport de l'erreur de volume entre le volume de crue observé et simulé exprimée en pourcentage.

D'autres méthodes basées sur la comparaison entre l'hydrogramme observé et calculé grâce à des critères d'efficacité disponibles : EQM (Ecart Quadratique Moyen), EAM (Ecart Arithmétique Moyen) et Nash ([Nash and Sutcliffe, 1970](#)).

4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra

4.1 Choix du modèle de prévision de crues sur le bassin d'étude

L'hydrologie des bassins des climats arides et semi-arides est très différente de celle des régions humides (Sen, 2008). La différence majeure apparaît dans la fluctuation spatiale des précipitations et l'hétérogénéité des terres dans le bassin versant.

Contrairement au climat humide, les processus hydrologiques dans les régions semi-arides et arides varient d'une zone à l'autre dans le bassin versant. En particulier dans les grands bassins versants, la zone qui contribue majoritairement au ruissellement pourrait être localisée à la partie supérieure du bassin versant (Moreda, 1999). De plus, la couverture végétale clairsemée et sa forte réponse aux premières pluies ont un impact sur le processus d'évaporation qui prévaut dans ces régions.

Les caractéristiques de surface sont des facteurs essentiels pour les processus hydrologiques à l'échelle du bassin versant. Ces facteurs ont été identifiés comme source d'erreur possible dans la modélisation hydrologique (Abushandi, 2011). Par conséquent, une représentation adéquate du paysage d'un bassin versant dans les modèles hydrologiques est vitale (Tobias et al., 2017).

En effet, la plupart des modèles pluie-débit ont été principalement développés pour être appliqués en zones humides (Benkaci and Dechemi, 2004). De ce fait, des tentatives ont été faites pour étudier les limites et les défis et améliorer la modélisation pluie-débit dans des zones arides et semi-arides. Ces études comprennent les travaux de : Benkaci and Dechemi (2004), Boudhraa (2007), Abushandi (2011), Abdi and Meddi (2015), etc.

Dans notre étude, on a choisi le modèle MERCEDES (Maillage Élémentaire Régulier Carré pour l'Etude Des Ecoulements Superficiels) développé par Bouvier (1994) et Bouvier et al. (1994). MERCEDES est un modèle spatial et conceptuel basé sur la discrétisation du bassin en mailles carrées. Le modèle MERCEDES est disponible dans la plate-forme ATHYS (Atelier Hydrologique Spatialisé), développée à l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement).

Les principaux avantages de MERCEDES sont qu'il est simple et facile à utiliser et peut être

III.4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra

appliqué à une large gamme de bassins hydrographiques : bassins urbains de quelques hectares à des dizaines de kilomètres carrés, petits bassins montagneux de 30 à 100 km^2 et de grands bassins avec des milliers de kilomètres carrés.

Dans cette étude de cas, la méthode de perte SCS (*Soil Conservation Service*) et la méthode de routage Lag & Route incluses dans MERCEDES ont été utilisées pour appliquer ce modèle.

La méthode SCS a été utilisée pour estimer les précipitations effectives (la fraction de pluie qui contribue au ruissellement) pour chaque cellule du bassin versant et le ruissellement produit par chaque cellule est ensuite acheminé jusqu'à la sortie du bassin en utilisant la méthode Lag & Route.

De plus, le modèle proposé a été appliqué selon le principe de la modélisation événementielle. Un modèle basé sur les événements a tendance à simuler la réponse du bassin aux pluies torrentielles occasionnelles sans tenir compte des conditions précédentes (Le, 2008).

Les modèles pluie-débit basés sur les événements sont efficaces dans la prévision hydrologique opérationnelle et l'étude des événements extrêmes (Muhammad et al., 2015).

4.2 Présentation de la plate-forme de modélisation ATHYS

Le logiciel ATHYS a été présenté pour la première fois par Bouvier et al. (1996) et maintenu par le laboratoire Hydro-sciences (IRD/CNRS, Montpellier). ATHYS est un outil informatique opérationnel offre un environnement conçu plus spécifiquement pour utiliser et développer de modèles hydrologiques spatialement distribués. Cet environnement regroupe dans un cadre homogène un ensemble de modèles hydrologiques spatialisés qui peuvent être utilisés et comparés selon le choix de l'utilisateur, ainsi que des modules de traitements de données hydro-climatiques et géographiques, en vue de mieux tenir compte de la variabilité spatiale des principaux facteurs qui déterminent l'écoulement dans le bassin versant.

ATHYS se prête à étudier diverses applications dont la gestion de la ressource en eau, la prévision des événements extrêmes et études d'impact liées à des modifications anthropiques ou climatiques (<http://www.athys-soft.org>).

L'ATHYS contient dans une plate-forme homogène trois modules principaux (cf. figure (III.8)).

III.4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra

- (i) **VICAIR** (Visualisation des Cartes et Images Raster) est un outil de traitement des données géographiques intervenant dans les modèles pluie-débit (sols, relief, etc.). Ce module permet d'extraire les propriétés du système hydrologique du bassin hydrographique (convexité, pente, zones de drainage, etc.) à partir de l'MNT ;
- (ii) **VISHYR** (Visualisation des Données Hydrologiques) est un module pour le stockage et la gestion des données hydro-climatiques. Il lit, affiche, sélectionne et stocke les données et les séries chronologiques telles que les précipitations et les débits ;
- (iii) **MERCEDES** (Maillage Élémentaire Régulier Carré pour l'Etude Des Ecoulements Superficiels) est un outil de modélisation spatialisée pour l'étude de la transformation pluie-débit. Il combine une gamme assez large des modèles de la fonction de production telles que (SCS, Green & Ampt, Smith & Parlange, TOPMODEL et Girard) et de la fonction de transfert (Lag & Route, Onde cinématique, etc.) qui sont applicables dans un environnement homogène et convivial. MERCEDES utilise en entrée les données de pluies observées et fournit en sortie des débits à l'exutoire du bassin versant.

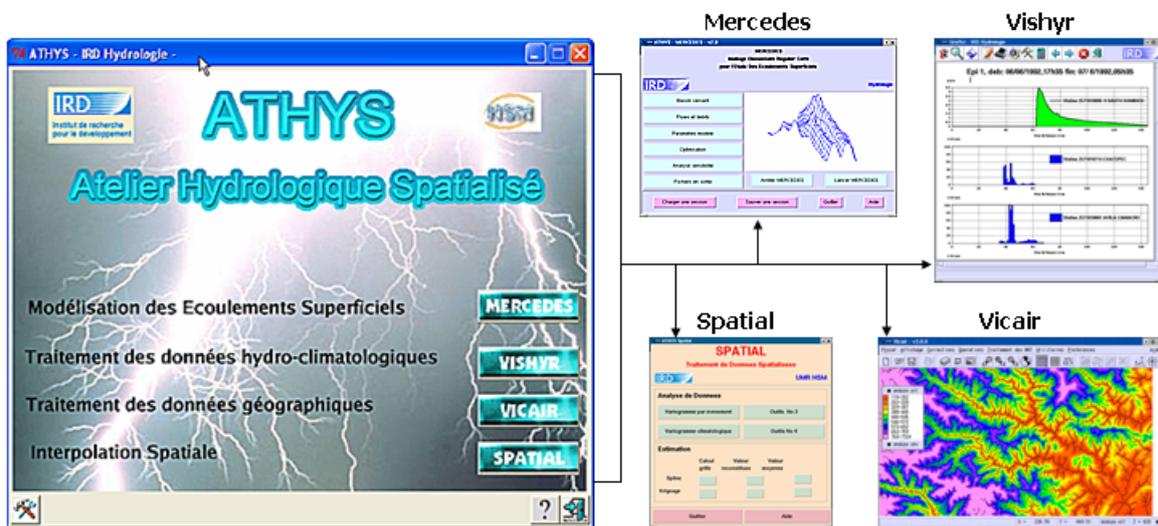


Figure III.8 – Menu principal d'ATHYS et de ses 4 modules (sources, <http://www.athys-soft.org>)

4.3 Structure du modèle MERCEDES

La structure du modèle MERCEDES est basée sur le concept du réservoir sol représenté schématiquement sur la figure (III.9). Suivant ce concept, le bassin versant semble un réservoir

III.4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra

sol où les précipitations le remplissent et son niveau $S(t)$ est calculé en utilisant un équilibre entre l'infiltration $f(t)$ et le ruissellement $R(t) = i(t) - f(t)$.

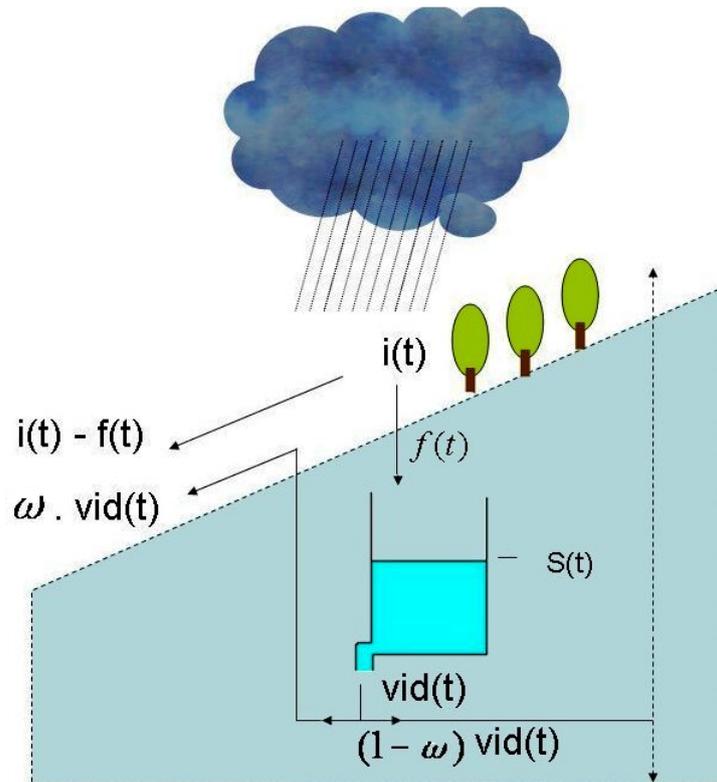


Figure III.9 – Schéma simplifié de structure du modèle MERCEDES (Source : <http://www.athys-soft.org>)

Le processus d'infiltration, pour chacune des cellules discrétisées, peut être modélisé à l'aide de différentes fonctions de productions possibles : SCS, Green & Ampt, Smith & Parlange, TOPMODEL et Girard ainsi que différentes combinaisons de réservoirs (Reservoir 1 et 2).

Le ruissellement produit par chaque maille est ensuite acheminé à l'exutoire du bassin (cf. figure (III.13)). Pour cela, MERCEDES offre le choix entre deux modes de transfert : mode mailles indépendantes (Lag & Route) et mode mailles interactives (onde cinématique). La description détaillée de la structure complète du modèle y compris ses équations peut être consultée sur le site (<http://www.athys-soft.org>) et dans ce qui suit on ne détaille que les modèles de fonction de production et de transfert adoptés dans notre étude à savoir : fonction de production SCS et fonction de transfert Lag & Route.

III.4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra

4.3.1 Processus de génération de ruissellement

MERCEDES relie le coefficient de ruissellement $C(t)$ à l'intensité de pluie $i(t)$ au temps t par (Eq. (III.1)) :

$$R(t) = C(t).i(t) \quad (\text{III.1})$$

La contribution de chaque cellule du bassin versant en termes de ruissellement est calculée par le modèle SCS (fonction de production) qui permet de transformer la pluie brute en pluie effective. Le modèle SCS est basé sur les lois d'Horton pour décrire le processus d'infiltration de l'eau dans le sol. Le modèle de production SCS développé en 1972 par le SCS (*Soil Conservation Service*) de l'USDA (Steenhuis et al., 1995; Mishra and Singh, 2003). Ce modèle est très souple et capable de s'adapter à différents types de processus de formations de crues (Steenhuis et al., 1995). Ce modèle est couramment utilisé pour la modélisation des inondations, en partie parce qu'il est simple et nécessite un nombre réduit de paramètres (Tramblay et al., 2011; Halwatura and Najim, 2013).

Le modèle SCS estime l'excès de pluies en fonction des pluies cumulatives, de type de sol, de l'occupation du sol et de l'état d'humidité antécédent (Ayenew, 2008). Dans le modèle SCS, $C(t)$ est calculé par (Eq. (III.2)) :

$$C(t) = \left(\frac{P(t) - 0.2S}{P(t) + 0.8S} \right) \cdot \left(2 - \frac{P(t) - 0.2S}{P(t) + 0.8S} \right) \quad (\text{III.2})$$

Où, $P(t)$ est la pluie cumulée calculée dès le début de l'événement et $S(t)$ est la capacité de rétention en eau du sol (l'infiltration cumulée). $S(mm)$ peut être obtenu à partir du SCS CN (*Curve Number*) par la relation (Eq. (III.3)) :

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

Le CN est un paramètre hydrologique qui repose implicitement sur les hypothèses des événements de ruissellement extrêmes et donne une représentation pratique de la capacité de rétention

III.4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra

en eau du sol S (Ponce and Hawkins, 1996). La valeur de CN est utilisée pour déterminer de S et elle dépend aux différents types d'occupation du sol et de conditions d'humidité du sol.

On accepte généralement que les I_a et S sont liés par la relation (Eq. (III.4)) :

$$I_a = 0.2 \times S \quad (\text{III.4})$$

Avec, $I_a(mm)$ est la perte initiale au début de l'événement.

4.3.2 Remplissage du réservoir sol

Le réservoir sol est rempli par l'infiltration qui s'exprime par l'équation (Eq. (III.5)) :

$$f(t) = (1 - C(t)) . i(t) \quad (\text{III.5})$$

Où, $f(t)$ est la capacité d'infiltration au moment t . $f(t)$ dépend de la variabilité spatiale des propriétés du sol telles que : profondeur, hétérogénéité, porosité, conductivité hydraulique, etc.

4.3.3 Vidange du réservoir sol

Le drainage du réservoir sol est calculé selon la formule suivante (Eq. (III.6)) :

$$vid(t) = ds.S(t) \quad (\text{III.6})$$

Où, $vid(t)$ est le drainage du réservoir sol au moment t et $ds(j^{-1})$ le coefficient de la vidange exponentielle de la lame infiltrée. Il simule les processus de la vidange de réservoir due à l'évaporation, la percolation et le ruissellement hypodermique. Les valeurs de ds varient de 0 (pas de drainage) à ∞ (drainage complet du réservoir sol).

Une fraction d'eau infiltrée peut retourner à la surface pour participer au ruissellement sous la forme de l'exfiltration (écoulement hypodermique). L'exfiltration est exprimée dans

III.4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra

l'équation (Eq. (III.7)) :

$$Exf(t) = \omega \cdot vid(t) \quad (\text{III.7})$$

Où, $\omega(ad)$ est la fraction de l'eau de drainage qui participe au ruissellement, sous forme d'exfiltration. Le facteur de reprise de vidange varie entre 0 et 1 ($0 < \omega < 1$)

4.3.4 Routage de ruissellement

MERCEDES fournit deux fonctions de transfert : Lag & Route (mailles indépendantes) et onde cinématique (mailles interactives). Dans la présente étude, le processus d'acheminement des précipitations effectives d'une maille à l'autre a été effectué au moyen du modèle Lag & Route (mailles indépendantes). Le modèle de routage Lag & Route est couramment utilisé (Bentura and Michel, 1997; Trambly et al., 2011). Ce modèle nécessite moins de paramètres et un temps de calcul court. En revanche, le modèle d'onde cinématique impose un temps de calcul assez long et peut être sensible à la résolution spatiale choisie pour la discrétisation en mailles carrées (<http://www.athys-soft.org>). En mode de maillage indépendant (Lag & Route), chaque maille produit à chaque intervalle de temps un hydrogramme élémentaire à la sortie du bassin versant, sans tenir compte des contributions des cellules voisines (cf. figure (III.10)). Pour chaque cellule (m), le modèle calcule le temps de propagation à l'exutoire par l'équation suivante (Eq. (III.8)) :

$$T_m = \frac{L_m}{V_0} \quad (\text{III.8})$$

Où, T_m est le temps de propagation à l'exutoire, $L_m(m)$ est la longueur du chemin d'écoulement de la contribution produite par la maille (m) vers l'exutoire et $V_0(m.s^{-1})$ est la vitesse de transfert. L'équation de l'hydrogramme élémentaire associée à la contribution de la cellule m entre les instants t_0 et $t_0 + \Delta t$ est donc écrite en fonction de l'équation de débit spécifique (Eq. (III.9) et (III.10)) :

$$q(t) = 0 \quad \text{si} \quad t < t_0 + T_m \quad (\text{III.9})$$

III.4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra

$$q(t) = \frac{R(\Delta t)}{K_m} \cdot \exp\left(-\frac{t - (t_0 + T_m)}{K_m}\right) \cdot A \quad t > t_0 + T_m \quad (\text{III.10})$$

Avec,

$$K_m = K_0 \times T_m \quad (\text{III.11})$$

Où, $q(m^3.s^{-1})$ est le débit spécifique, A est la surface d'une maille et $K_0(ad)$ est une constante de proportionnalité pouvant être fixée empiriquement à $K_0 = 0.7$.

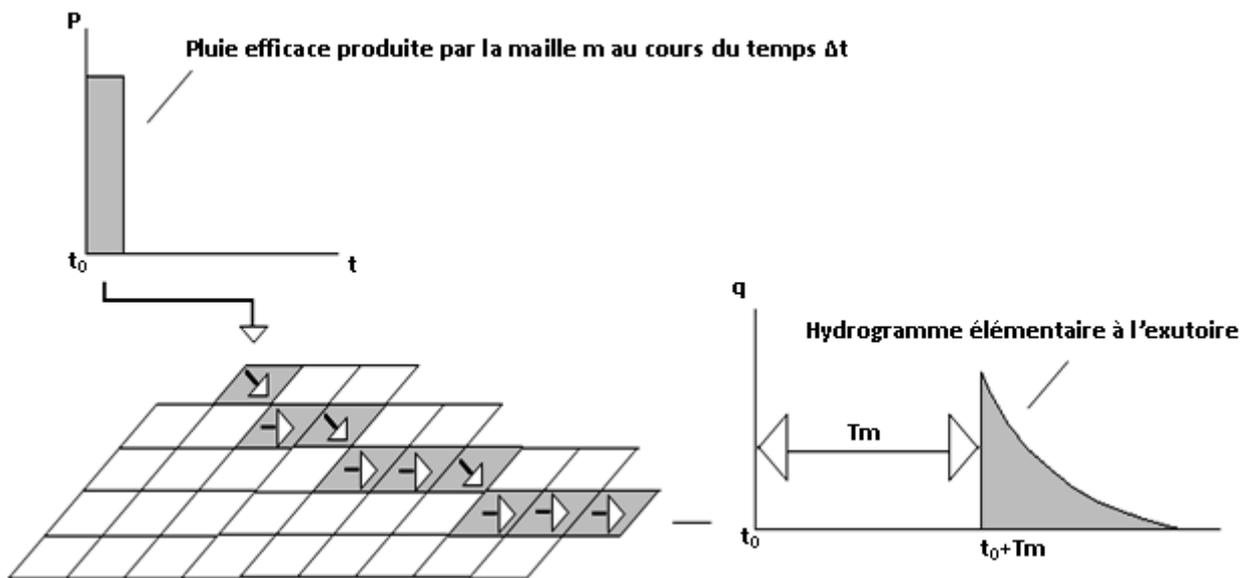


Figure III.10 – Schéma représentatif du mode de transfert en mailles indépendantes (Source : <http://www.athys-soft.org>)

4.4 Données utilisées

Les données utilisées dans le cadre de cette étude comportent : l'MNT du bassin versant de l'Oued Mekerra, les données hydrologiques (pluies et débits) et la carte d'occupation du sol du bassin.

III.4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra

4.4.1 Cartes numérisées

Le MNT est une représentation de la surface topographique en termes de coordonnées x, y, z régulièrement espacées. Ces points sont reliés par leurs bords pour former un réseau de triangles superposés (surfaces finies) qui représentent la surface du terrain (Lo and Yeung, 2005).

Le MNT, pour le bassin versant d'étude est obtenu à partir des données SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). SRTM met à la disposition du public un MNT(DEM) au pas d'espace $90m \times 90m$ environ (cf. figure (III.11)).

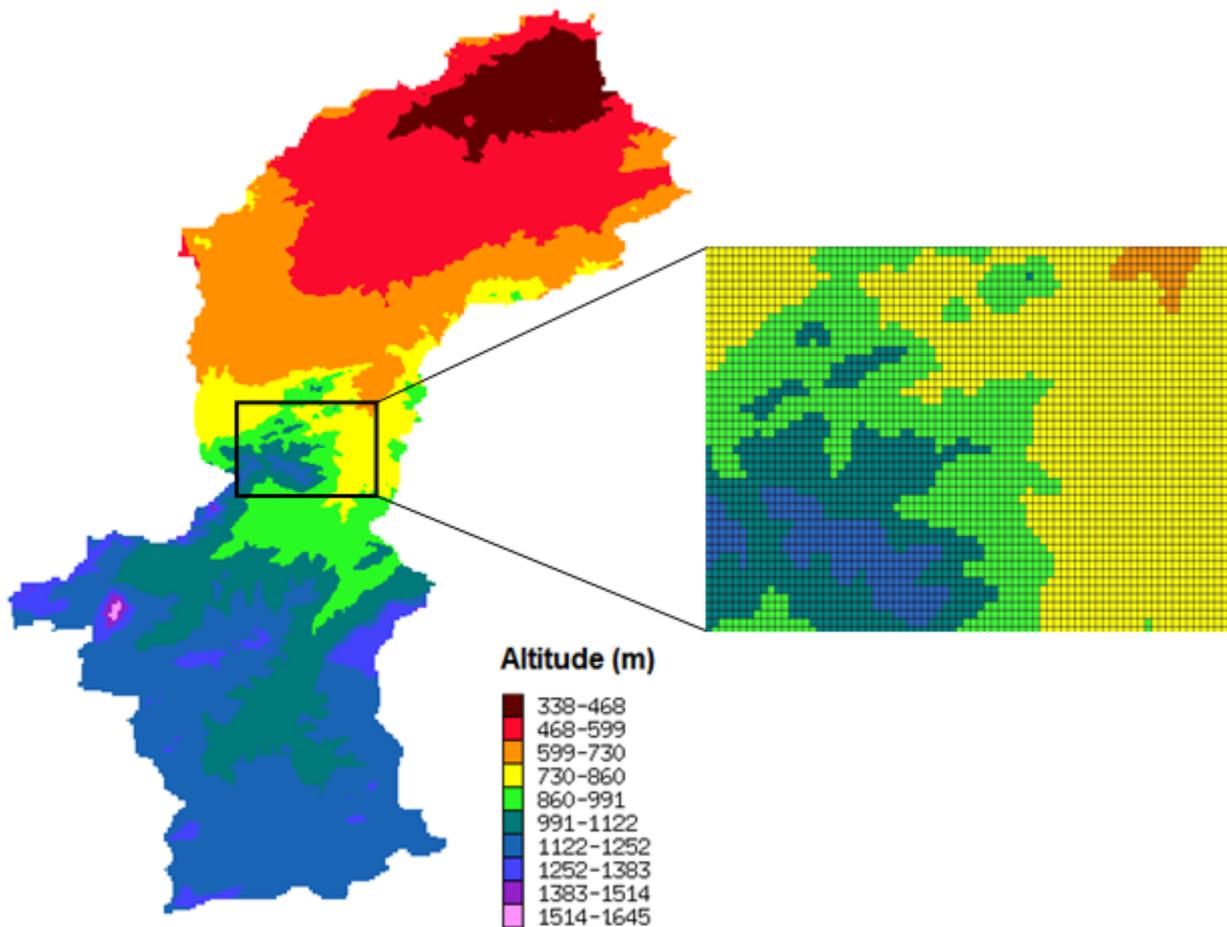


Figure III.11 – Discretisation de l'MNT du bassin de l'Oued Mekerra

Nous disposons aussi une carte numérique pour classer les sols dans le bassin d'étude. Cette carte a été numérisées à partir des cartes d'occupation du sol disponibles (échelle : 1/200 000),

III.4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra

à l'aide du logiciel Global-Mapper v 10.01. Cette carte est divisée en quatre classes, comme le montre la figure (III.12) : terres cultivées, parcours, forêts et agglomérations.

Cette classification est utilisée pour obtenir une estimation spatialisée de paramètres d'entrée dans le modèle MERCEDES, tels que la conductivité hydraulique et la capacité de rétention en eau du sol.

L'occupation du sol est une information capitale pour l'hydrologie, plus spécialement pour les processus d'interception, de transpiration et les écoulements de surface. Flügel (1995) a montré, dans son travail, l'importance de la représentation de l'occupation du sol dans la modélisation hydrologique distribuée d'un bassin versant.

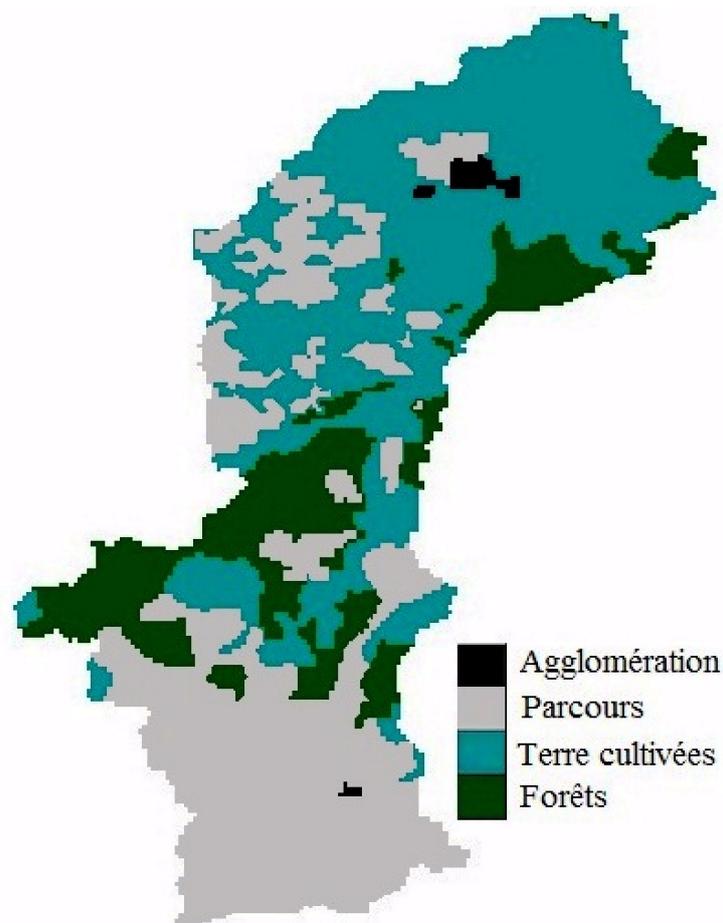


Figure III.12 – Répartition spatiale des différentes classes d'occupation du sol dans le bassin de l'Oued Mekerra

III.4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra

4.4.2 Données hydro-pluviométriques

Les données hydrologiques utilisées dans cette étude consistent les pluies journalières (2003-2012) et les débits moyenne journalière pour les mêmes années. Le choix de cette période est basé sur la disponibilité d'un grand nombre de données journalière sur les pluies et les débits. Les données sur les précipitations ont été recueillies dans cinq stations de pluviométrie (El Gor, Ras El Ma, El Haçaiba, SABY et SBA) et les débits à la station de jaugeage de SABY. Un total de 21 événements pluie-débit (cf. annexe (A.1)), ce qui équivaut à 639 jours, ont été sélectionnés pour tester le modèle MERCEDES. Les données ont été obtenues auprès de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, d'Oran).

4.5 Etapes de simulation

MERCEDES, applique la transformation pluie-débit spatialisée en cinq étapes (cf. figure (III.13)) :

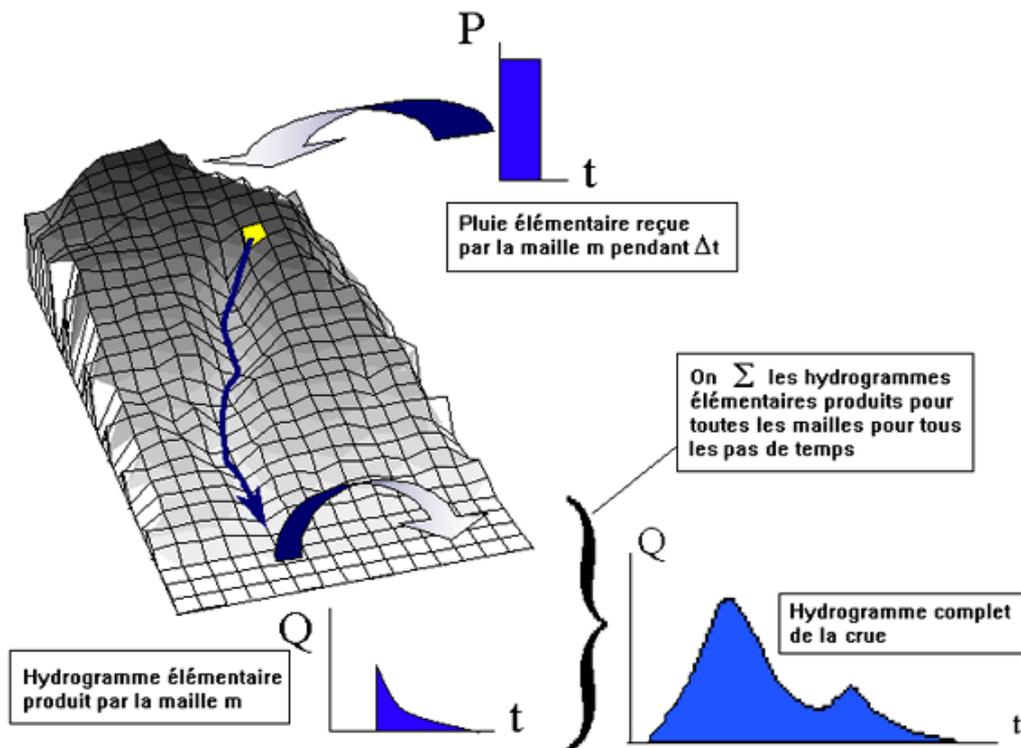


Figure III.13 – Schéma du principe de simulation pluie-débit avec le modèle MERCEDES (Source : <http://www.athys-soft.org>)

III.4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra

4.5.1 Etape 1 : Discrétisation du bassin en mailles carrés

Afin de diriger le ruissellement, résultant d'un événement de précipitation, vers l'embouchure du bassin hydrographique, il est nécessaire de discrétiser le MNT en mailles carrées régulières (cf. figure (III.11)) et relier ces mailles à l'aide d'une modèle de drainage. La fonction de la carte des directions de drainage est de transfert de l'écoulement résultant de chaque cellule de l'amont vers l'aval du bassin versant (cf. figure (III.13)).

Les mailles sont caractérisées géographiquement par : altitude, direction de drainage, type du sol et occupation du sol et toutes autres informations géographiques additionnelles. Le MNT de la zone d'étude a subi à un traitement par le module VICAIR (VISualisation des CARTes et Images Raster) pour déterminer de manière automatique les directions de drainage sur le bassin versant suivant d'un algorithme D8 (Jenson and Domingue, 1988).

Le principe de cet algorithme est que la direction du flux d'une cellule peut être orientée vers huit autres cellules voisines suivant d'un codage de 1 à 8 (Nord=1, Nord-Est=2,...), comme le montre les figures (III.14) et (III.15). Le chemin d'écoulement est déterminé suivant la descente la plus abrupte parmi les huit choix autorisés de l'amont vers l'aval du bassin versant. Il s'agit donc un drainage monodirectionnel. Les flux sont passés d'un nœud d'une maille à l'autre comme des drains d'eau dans le bassin (Singh, 1988). L'ensemble des directions de drainage constitue les trajectoires d'écoulement jusqu'à l'exutoire du bassin (Marchandise, 2007).

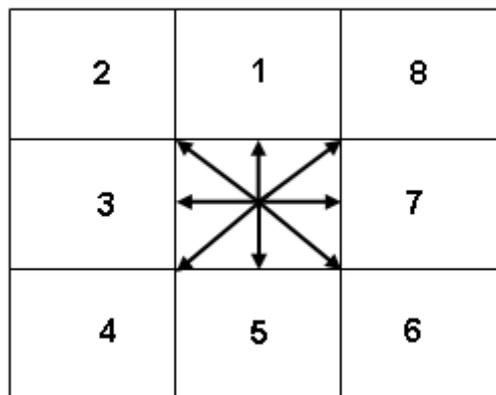


Figure III.14 – Schéma de l'algorithme D8

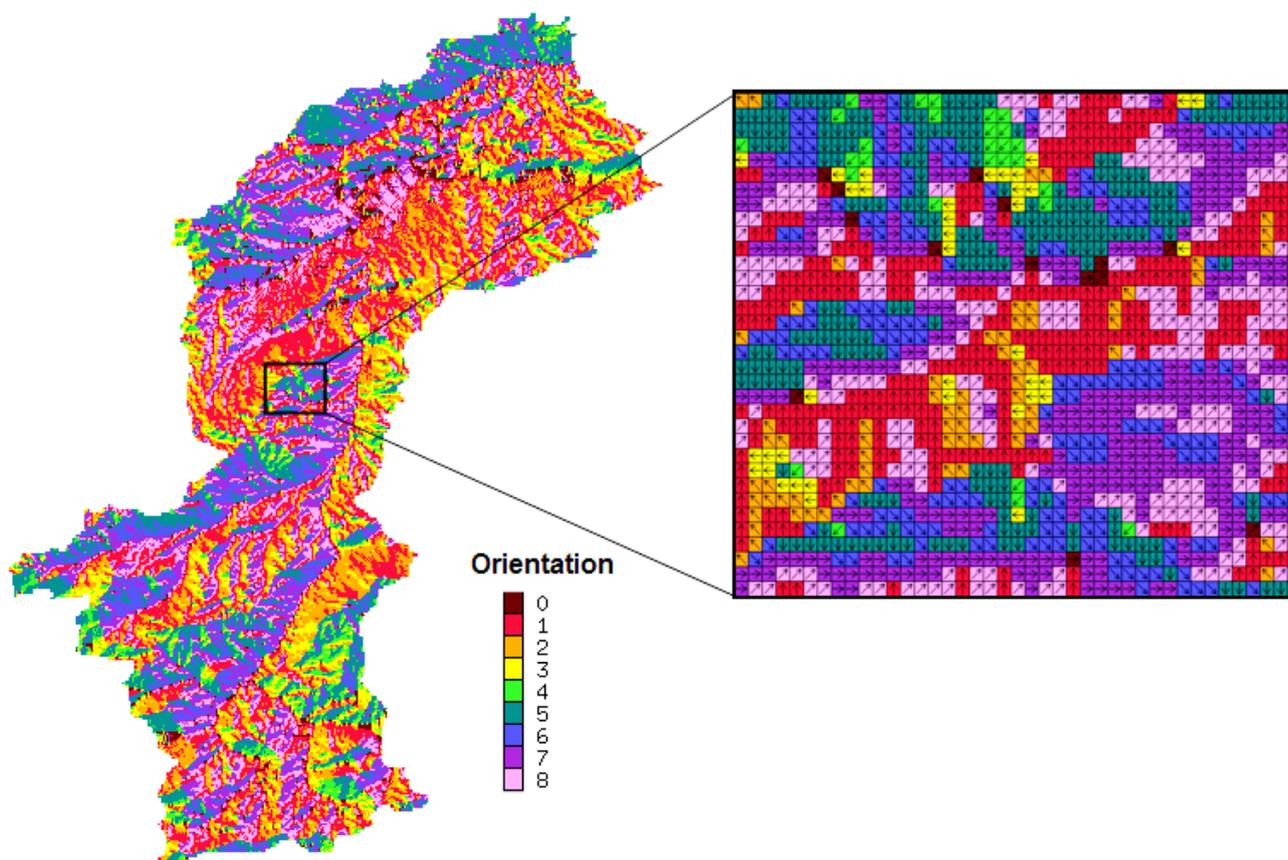


Figure III.15 – Extraction des directions de drainage sur le bassin versant de l'Oued Mekerra

4.5.2 Etape 2 : Estimation de pluie brute

On passe ensuite à l'estimation de la pluie brute tombée sur chaque maille et chaque pas de temps. La pluie reçue par la maille est calculée donc par l'interpolation des pluies observées en utilisant la méthode de polygones de Thiessen. L'ensemble des mailles dans chaque polygone reçoivent donc la même quantité d'eau de pluie.

4.5.3 Etape 3 : Calcul de la pluie efficace par la fonction de production

La troisième phase consiste à transformer la pluie brute (la pluie reçue par la maille) en pluie nette. Cette dernière constitue le reste de la pluie brute après déduction de toutes les

III.4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra

perdes par infiltration, évaporation et rétention superficielle. Pour chaque maille à chaque pas de temps, la pluie nette est calculée par la méthode SCS dont nous avons déjà expliquée. Les paramètres intervenant dans ce modèle se rapportent à des conditions hydrologiques (humidité du sol, conductivité hydraulique, etc.), l'occupation du sol (forêts, urbanisation, champs, etc.) et la texture du sol dont dépend de la capacité d'infiltration.

4.5.4 *Etape 4 : Calcul de la contribution de chaque maille par la fonction de transfert*

La quatrième phase est la transformation de la pluie nette en débit à l'exutoire de la maille considérée. La transformation est calculée par la fonction de transfert type Lag & Route. Cette fonction permet de produire de l'hydrogramme élémentaire pour chaque maille d'une part et d'autre part d'acheminer les contributions élémentaires de toutes les mailles à l'exutoire du bassin versant. A cette étape, chaque maille produit un hydrogramme élémentaire caractérisé par une forme et un décalage dans le temps en fonction de la position de la maille sur le bassin versant (cf. figure (III.13)).

4.5.5 *Etape 5 : Calcul de l'hydrogramme de crue à l'exutoire du bassin*

Finalement, l'hydrogramme complet est obtenu après l'addition de tous les hydrogrammes élémentaires de toutes les mailles à tous les pas de temps. Le transfert est réalisé de maille à maille, de l'amont vers l'aval suivant les trajectoires d'écoulement (cf. figure (III.13)).

4.6 Etalonnage et optimisation du modèle

MERCEDES fournit une analyse d'optimisation et de sensibilité qui peut étalonner automatiquement certains paramètres du modèle afin de réduire leur incertitude. La procédure d'étalonnage automatique est basée sur la comparaison entre les débits observés et calculés en utilisant des critères d'efficacité disponibles tels que : EAM (Ecart Arithmétique Moyen), EQM (Ecart Quadratique Moyen) et Nash-Sutcliffe (Nash and Sutcliffe, 1970). La procédure d'optimisation consiste à déterminer les paramètres associés aux valeurs optimales (0 pour les autres critères, 1 pour Nash) en utilisant la méthode itérative de Simplex (Rao, 1978).

III.4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra

Dans cette étude, le critère d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE) a été utilisé pour étalonner les paramètres du modèle MERCEDES. Le critère NSE est basé sur la somme des erreurs quadratiques et donnée par la formule suivante (Eq. (III.12)) :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (III.12)$$

Où, $Q_{obs,i}$ débits observés au pas de temps i ; $Q_{cal,i}$ débits simulés au pas de temps i ; \bar{Q}_{obs} moyenne des n débits observés.

Le critère de Nash and Sutcliffe (1970) est couramment appliqué en hydrologie comme fonction objectif (Ardoin, 2004; Gerard, 2010).

Le critère de Nash varie entre $-\infty$ et 1. Il vaut 1 quand la sortie calculée est égale à la sortie mesurée, ce qui indique donc que le modèle est parfait. Les résultats hydrologiques basés sur les procédures d'optimisation sont considérés comme bien corrélés si le critère NSE est compris entre 0.8 et 1 (Varado, 2004; Fourmigue and Lavabre, 2005).

En outre, l'erreur relative (ER) a été utilisée dans la présente étude afin d'estimer la précision du modèle en termes de débit de pointe. Il est défini dans l'équation suivante Eq. (III.13)) :

$$ER(\%) = \frac{Q_{p.cal} - Q_{p.obs}}{Q_{p.obs}} \times 100 \quad (III.13)$$

Avec, Q_p : débit de pointe m^3/s

4.7 Résultats de simulation de la génération de crue dans l'Oued Mekerra

4.7.1 Analyse de performance

Les résultats des simulations de la relation pluie-débit avec MERCEDES pour tous les événements utilisés sont représentés dans les figures (III.16),(III.17) et (III.18). Ces figures montrent

III.4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra

respectivement le critère d'évaluation (NSE), la comparaison graphique des hydrogrammes (calculés et observés) et l'erreur relative (ER).

En termes d'efficacité du modèle, les valeurs NSE varient de 0.46 à 0.99, dont 14 valeurs sur 21 (environ 66% des événements étudiés) ont des valeurs de critère NSE supérieures ou égales à 0.80 (cf. figure (III.16)).

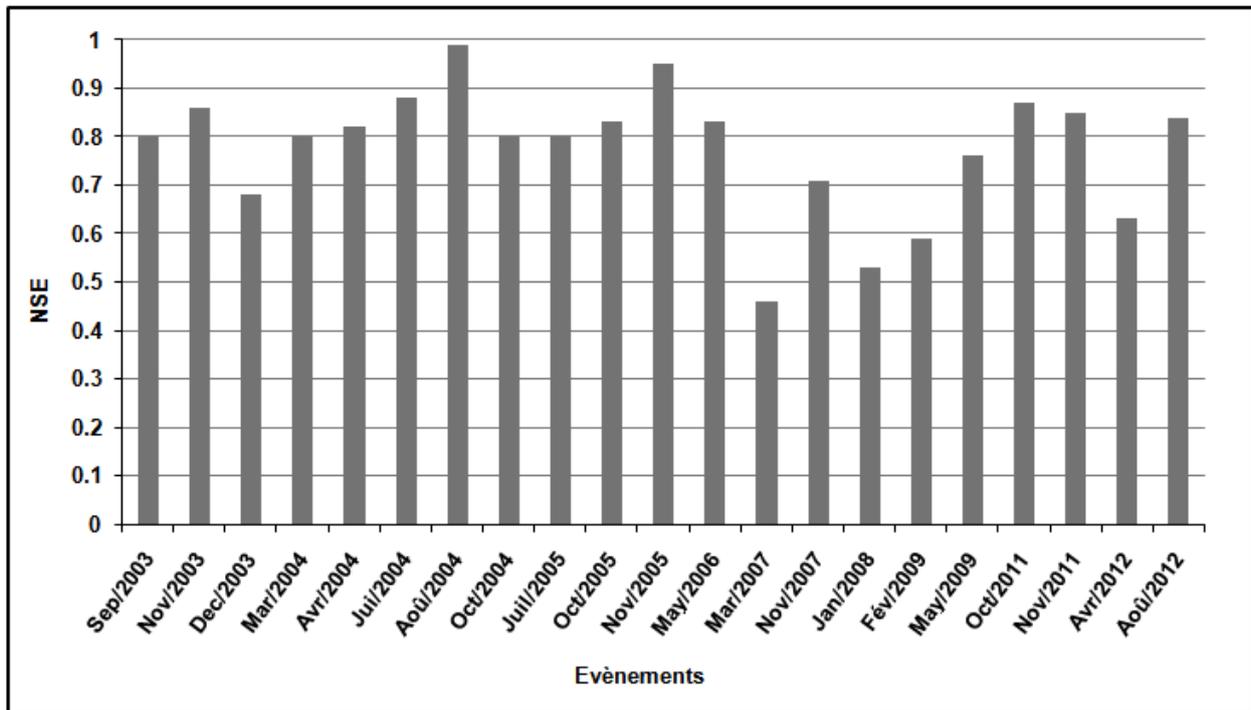


Figure III.16 – Valeurs de NSE pour chaque événement étudié

En outre, la comparaison graphique des hydrogrammes montre un bon accord entre les débits calculés et observés, comme le montre la figure (III.17).

En ce qui concerne l'erreur relative (ER), les pics de débits calculés sont sous-estimés pour la majorité des événements, comme le montre la figure (III.18), où les valeurs d'erreur relative varient de -60% à 0% avec une moyenne de -17.7%. La source de cette sous-estimation peut être liée à la sous-estimation des précipitations qui se caractérise par une hétérogénéité spatiale élevée, ce qui représente donc les principales difficultés de quantification des précipitations.

III.4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra

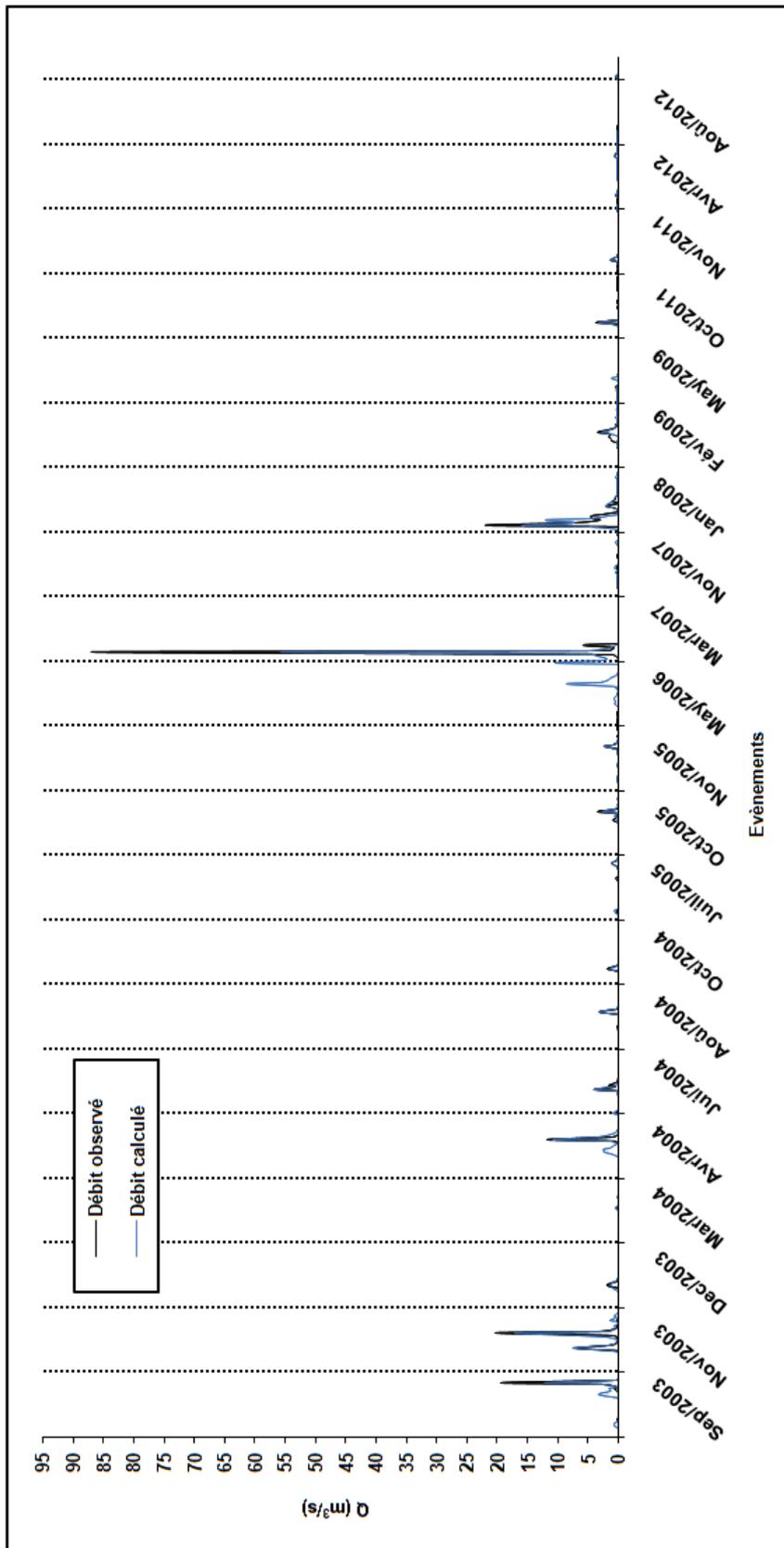


Figure III.17 – Comparaison entre les hydrogrammes de crues observés et calculés dans la station de jaugeage Saby du bassin versant de l'Oued Mekerra

III.4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra

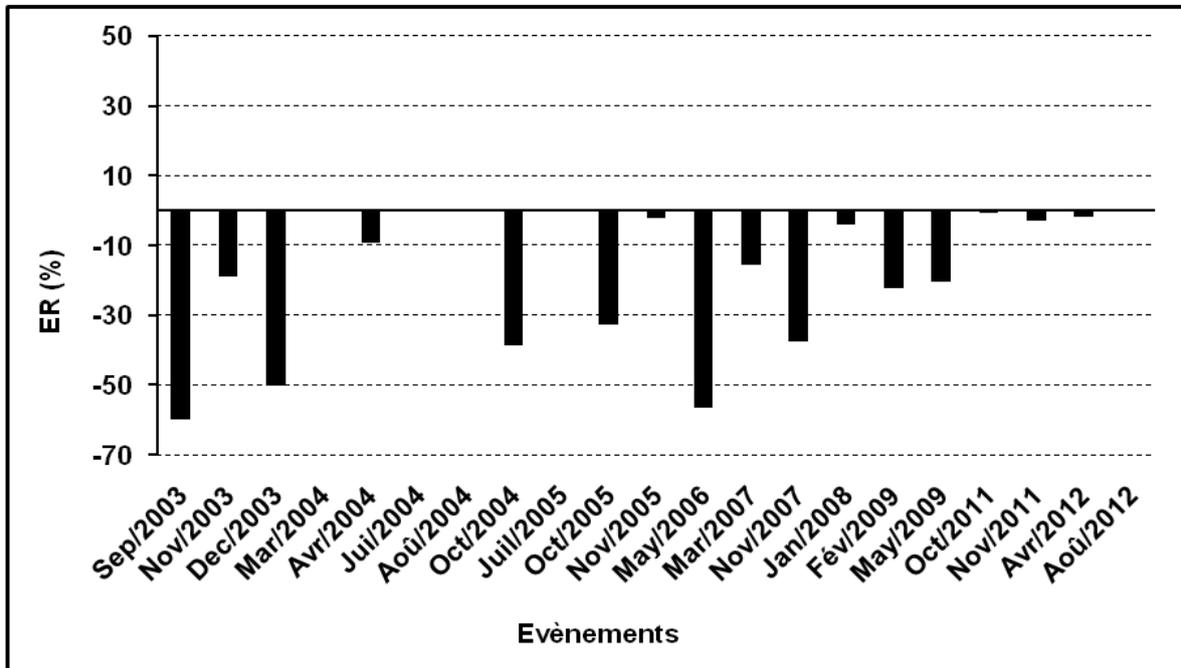


Figure III.18 – Valeurs de l'erreur relative (ER) pour les événements étudiés

L'hétérogénéité des précipitations a été prouvée à partir des observations de [Kedem et al. \(1990\)](#), qui a constaté que plus l'intensité de pluie est élevée, plus la zone touchée sera plus petite sur les grandes régions. [Zhao et al. \(2013\)](#) ont confirmé que la production de ruissellement et le processus hydrologique dans un bassin hydrographique sont fortement influencés par la variabilité spatiale des précipitations.

Les orages convectifs sont fréquemment des orages locaux avec un diamètre inférieur à (10-14 km) ([Renard and Keppel, 1966](#); [Diskin and Lane, 1972](#)) et accompagnés d'événements pluviométriques locaux très concentrés ([Thornes, 1994](#)).

Dans les zones arides et semi-arides, il est difficile de mesurer les précipitations en utilisant des densités classiques du réseau de station pluviométrique ([Şen, 2008](#)). [Lange et al. \(2000\)](#) ont révélé que les événements pluviométriques intenses provoquent des problèmes de mesure généraux qui réduisent la qualité et l'intégralité des données.

[Andréassian et al. \(2007\)](#), [Cloke and Pappengerger \(2009\)](#) et [Collier \(2007\)](#) ont noté que les erreurs de modélisation sont souvent associées à l'incertitude sur les précipitations comme des entrées des modèles.

III.4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra

Aussi, Bahat et al. (2009) ont confirmé que l'effet des incertitudes dans les précipitations est dominant par rapport aux autres paramètres du modèle qui ont un effet limité.

En outre, l'incertitude dans les données de débits est un obstacle supplémentaire aux applications des modèles hydrologiques dans les bassins, en particulier lors de la procédure d'étalonnage Bessière (2008).

Il est important de noter que le manque de mesures de haute qualité est actuellement le principal défi pour les hydrologues travaillant dans les régions semi-arides (Abushandi, 2011).

Au moyen des résultats ci-dessus, nous pouvons juger que la performance du modèle MERCEDES est généralement encourageante et peut être considérée comme satisfaisante.

4.7.2 Analyse de sensibilité

Les résultats de la sensibilité des paramètres sont présentés dans la figure (III.19) qui montre la sensibilité du modèle aux changements du paramètre S (la capacité de rétention en eau du sol) pour chaque type d'occupation du sol. Ces résultats concernent uniquement les événements simulés avec leurs valeurs de critère NSE supérieures ou égales à 0.80 (valeur recommandée par Varado (2004) et Fourmigue and Lavabre (2005)).

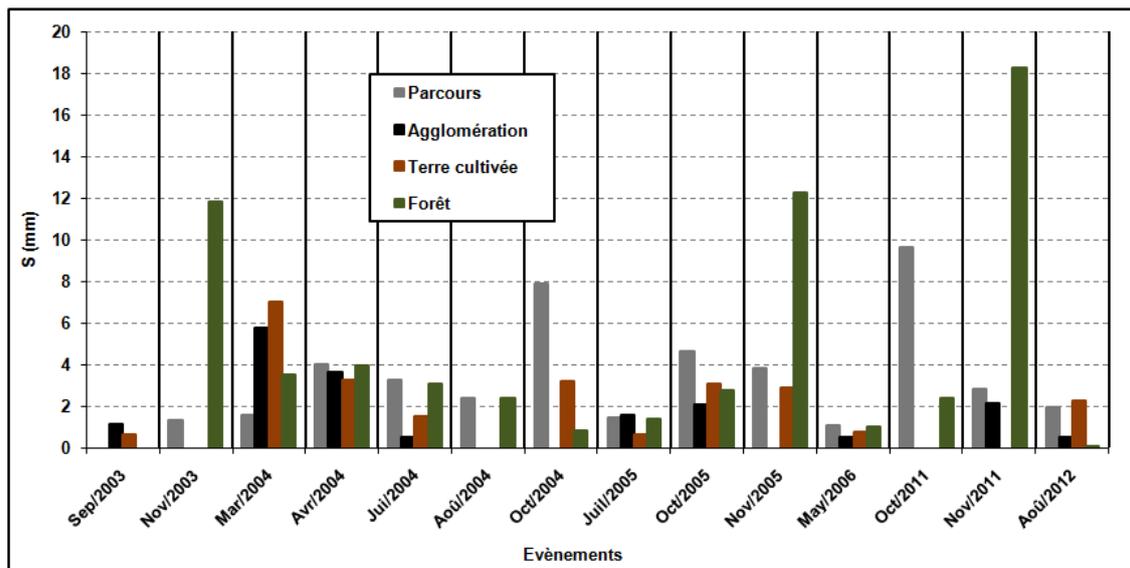


Figure III.19 – Valeurs du paramètre de rétention maximale (S) pour chaque type d'occupation du sol (la figure montre seulement les événements dont les valeurs de critère NSE supérieures ou égales à 0.80)

III.4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra

L'analyse de sensibilité a révélé que la performance du MERCEDES pour la modélisation du ruissellement est plus sensible aux changements de la valeur du paramètre S et relativement moins sensible aux changements de la valeur d'autres paramètres. Comme mentionné précédemment, la valeur du paramètre S dépend de l'occupation du sol / couverture du sol et des caractéristiques du sol dans le bassin versant. Ceci est illustré par la figure (III.19) qui montre une variation significative du paramètre S avec des valeurs de S varie de 0 à 18.28 mm dans les forêts, de 0 à 9.6 mm dans les parcours, de 0 à 7.01 mm dans les terres cultivées et de 0 à 5.73 mm dans les agglomérations.

En outre, pour chaque type d'occupation du sol, le paramètre S est fortement variable d'un événements à l'autre comme indiqué par son coefficient de variation plus élevé et qui varie entre 0.82 et 1.32.

En général, la capacité de rétention du sol en eau de chaque type d'occupation du sol dans le bassin de l'Oued Mekerra varie considérablement d'une saison à l'autre. Comme le montre la figure (III.19), les valeurs S élevées dépendent grandement de la présence du couvert végétal (forêts, parcours et zones agricoles) alors que dans les zones dépourvues de végétation, la capacité de rétention en eau diminue de manière significative. Ceci a été observé dans les zones urbaines dans notre bassin où la capacité de rétention d'eau a diminué d'une année à l'autre en raison de l'expansion de la couverture d'asphalte ou de béton dans ces zones.

On peut confirmer que la capacité de rétention en eau dans les zones cultivées augmente pendant la culture saisonnière, comme la culture du blé de Novembre à Mai, alors qu'elle est réduite après la saison de récolte (Juin, Juillet et Août), car les zones cultivées sont principalement constituées de limon qui est considéré comme un sol peu perméable. En fait, la culture saisonnière joue un rôle important en ce qui concerne la diminution du ruissellement et par conséquent, la réduction des inondations. C'est parce qu'une plus grande fraction de précipitation n'atteint pas le sol mais elle reste comme un stockage d'interception sur les feuilles (Halwatura and Najim, 2013).

Dans les zones arides et semi-arides, l'absence de couverture végétale est l'une des principales causes de la dégradation des sols en raison de l'absence de protection du sol contre la chute des gouttes de pluie (Morin and Benyamini, 1977).

La couverture végétale joue un rôle très important dans l'infiltration. La végétation protège le sol contre l'effet cinétique des gouttes de pluie et fournissent de la matière organique pour

III.4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l'Oued Mekerra

lier les particules du sol. En outre, la faune du sol, qui vit sur la matière organique, aide ce processus par liaison entre les particules minérales et la matière organique (Tarboton, 2003).

Par ailleurs, la densité et le type des végétaux couvrant le sol entraînent de grandes différences dans la capacité d'infiltration. En particulier, le décapage des forêts et leur remplacement par des cultures qui ne couvrent pas le sol de manière efficace et ne maintiennent pas une teneur élevée en matière organique dans le sol abaissent souvent la capacité d'infiltration du sol (Sharma et al., 1980).

Certaines études effectuées dans des bassins méditerranéens indiquent que la couverture forestière induit une réduction le volume et le pic de débits lors de crues (Cognard-Plancq et al., 2001).

Il convient de noter que la déforestation contribue de manière significative à une augmentation de la probabilité d'inondations instantanées et d'événements de flux fortement concentrés, ce qui entraîne une augmentation des débits de pointe (Beschta et al., 2000; Göttele, 2012).

Néanmoins, la capacité de rétention diminue de manière significative lors d'une tempête de pluie intense, comme l'événement de Mai 2006, où en une journée, 52.2 mm de pluie ont eu lieu et le débit maximal était de 396.5 m³/s.

L'intensité et la durée des précipitations ont une grande influence sur la capacité d'infiltration du sol. Ceci peut être observé avec des pluies de haute intensité et de courte durée qui sont beaucoup plus susceptibles de dépasser la capacité du sol à infiltrer l'eau et à entraîner un ruissellement que les précipitations plus longues et moins intenses (Tarboton, 2003).

Nous pouvons également voir que la température élevée pendant les mois chauds (Juin, Juillet et Août) entraîne une diminution de la capacité de rétention dans les forêts et les parcours. Ceci s'explique par la sécheresse prolongée qui rend la croûte du sol dure et compacte, ce qui diminue la capacité d'infiltration de la surface.

À l'échelle spatiale, la capacité de rétention d'eau dans les parcours peut dépasser celle des forêts, comme celle observée au mois d'Octobre (cf. figure (III.19)). La principale raison en est que les orages de mois d'Octobre se produisent généralement en amont du bassin versant de l'Oued Mekerra (grandes zones de parcours), alors que, au Novembre, les orages se trouvent au centre du bassin qui est principalement couvert par les forêts et les zones cultivées.

III.4 Application de la modélisation pluie-débit sur le bassin de l’Oued Mekerra

Il est évident que le potentiel de ruissellement dans un bassin hydrographique dépend fortement des caractéristiques hydrologiques des sols (Feldman, 2000; Cunderlik and Simonovic, 2010; Fleming and Scharffenberg, 2012).

Les variations dans les paramètres hydrologiques d’un bassin versant sont principalement associées au changement d’occupation du sol (Ayenew, 2008).

La génération de flux dépend fortement de plusieurs facteurs tels que la quantité de pluie, l’intensité et la durée, la perméabilité du sol et le relief, la géométrie, la végétation et la couverture du sol (Dubrueil, 1986).

Ainsi, l’urbanisation et l’activité agricole ont un impact important sur la qualité et la quantité de flux (Abushandi, 2011).

4.8 Résultats de reproduction de crues dans l’Oued Mekerra

La phase de simulation de crues avec MERCEDES a été effectuée sur la base d’observations pluie-débit ponctuelles (pas de temps 30 minutes) pour les deux crues survenues dans l’Oued Mekerra (26-28/09/1999 et 27-29/05/2006). La limite de cet échantillon d’événements est due à l’indisponibilité des données en particulier le dépouillement de pluie. Ce dernier est difficile à trouver dans la base de données de l’ANRH.

En terme de la performance, les valeurs de NSE montrent que le modèle MERCEDES a reproduit, assez bien, les crues testées comme en témoignent les valeurs de NSE (cf. tableau (III.1)). Par ailleurs la comparaison graphique des hydrogrammes de crues montre une assez bonne concordance entre les hydrogrammes simulés et observés (cf. figure (III.20)).

Tableau III.1 – Résultats de simulation de crues par MERCEDES

Station	Date	$Q_{p.obs}$	$Q_{p.cal}$	$Nash$	ER (%)
SABY	26-28/09/1999	20.96	23.3	0.57	+11%
	27-29/05/2006	118.53	86.8	0.84	-27%

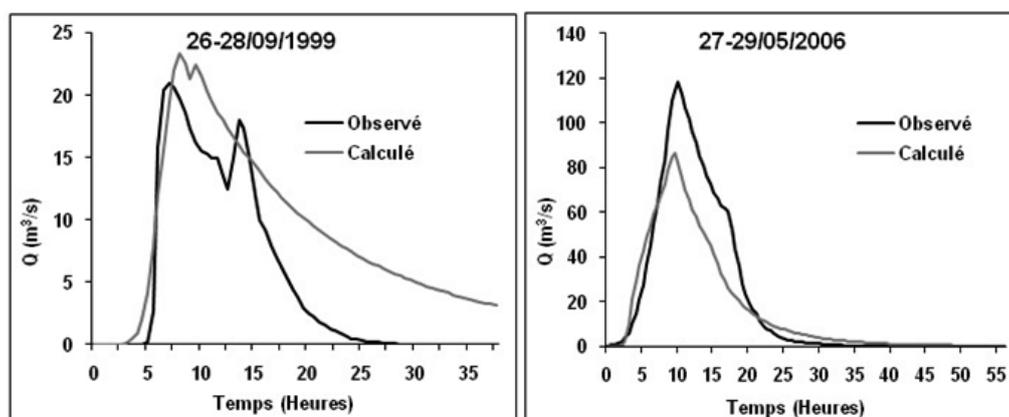


Figure III.20 – Comparaisons entre l'hydrogramme de crue observé et calculé à la station SABY dans le bassin de l'Oued Mekerra

En terme de pic des débits, on peut remarquer une légère surestimation (+11%) lors de la crue 26-28/09/1999 (cf. tableau (III.1)), contrairement lors de la crue de 27-29/05/2006 le modèle sous-estime le débit de point de l'ordre de -27%.

Tous les chercheurs y compris les modélisateurs sont convaincus que quelque soit le degré de sophistication d'un modèle de simulation, ses résultats restent tributaires de la qualité des données entrées notamment les données pluviométriques (Yacoubi and Hanchane, 1997). La vérification de la qualité de prévision doit être faite avec des valeurs réellement observés (Pappenberger et al., 2008; Randrianasolo, 2009).

5 Conclusion

L'étude hydrologique de la relation pluie-débit montre que le modèle MERCEDES peut simuler de manière adéquate le ruissellement dans le bassin versant de l'Oued Mekerra, ce qui indique que les deux méthodes (SCS et Lag & Route) sont bien applicables pour simuler les mécanismes de génération de ruissellement dans le bassin d'étude.

On a constaté que pour environ 66% des événements étudiés, les valeurs des critères d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE) sont supérieures ou égales à 0.80. Toutefois la performance optimale dépend profondément de la précision des mesures des précipitations, surtout pendant les orages.

Cette étude indique également que les mécanismes de génération d'inondation dans le bassin de l'Oued Mekerra dépendent de la capacité de rétention d'eau (la capacité de rétention en eau du sol) de chaque type d'occupation du sol.

Généralement, dans le bassin versant semi-aride, la capacité de rétention en eau est principalement associée à la dynamique de la couverture végétale (ex : les changements saisonniers dans l'agriculture), l'intensité des précipitations et la sécheresse.

En effet, le couvert végétal contribue à la réduction de la production de ruissellement en augmentant la capacité de rétention en eau et par conséquent, la génération de crue sera limitée. Cependant, les pluies intenses et la sécheresse augmentent la production d'eau de ruissellement en raison de la faible capacité de rétention en eau. Les précipitations caractérisées par une forte intensité peuvent dépasser la capacité d'absorption du sol, ce qui génère des quantités importantes de ruissellements entraînant de graves inondations et la sécheresse peut rendre le sol dur et compact, ce qui réduit la capacité d'infiltration de la surface terrestre.

Il est donc nécessaire de reboiser de vastes surfaces de terres dans le bassin versant de l'Oued Mekerra pour augmenter la capacité de rétention en eau du sol et donc diminuer la probabilité d'inondations. Cette solution est devenue une approche durable de la gestion des inondations.

Enfin, cette étude a conclu que le modèle MERCEDES peut être considéré comme un outil important pour le développement de la prévision de crues dans le bassin versant de l'Oued Mekerra. Cependant, il est intéressant de noter que l'efficacité de ce modèle nécessite, d'une part, l'utilisation de données de haute qualité et d'autre part, il faut tenir compte des différents facteurs contribuant à la production de ruissellement comme le couvert végétal, l'intensité des précipitations et la sécheresse.

Chapitre IV

Modélisation hydraulique

1 Introduction

L'étude hydraulique est une partie importante dans ce projet. L'hydraulique intervient essentiellement pour examiner les conséquences des débits prévus par l'hydrologie sur l'ampleur des inondations dans le lit majeur des cours d'eaux.

L'objectif de ce chapitre est d'intégrer le modèle hydraulique HEC-RAS et le SIG pour simuler et prévoir les inondations dans le lit majeur de l'Oued Mekerra et ses affluents. Le modèle HEC-RAS est utilisé pour la simulation hydraulique et le SIG représente la plate forme de cartographie des zones inondables.

Notre étude est basée essentiellement sur l'utilisation de la modélisation hydraulique pour l'écoulement à surface libre sous le modèle 1D de Saint-Venant connu sous le nom de HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*) en vue de simuler les crues cinquantennale et centennale (50 ans et 100 ans).

Un autre outil principal utilisé est le SIG à travers le logiciel Arc-GIS de l'institut ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) avec l'extension HEC-GeoRAS pour délimiter les zones inondables.

2 Modélisation hydraulique

2.1 Généralité

Modélisation hydraulique et la cartographie de vulnérabilité aux risques des inondations sont effectuées afin de prévoir des informations importantes à partir d'une inondation (débits, vitesses, risques engendrés, etc.), y compris l'étendue des inondations et les élévations des eaux à des endroits spécifiques. La modélisation hydraulique repose cependant sur des modèles de propagation des débits qui permettent de simuler la dynamique des écoulements dans les cours d'eau et de calculer le niveau d'eau correspondant au débit donné.

Les modèles hydrauliques utilisés pour la simulation de crues peuvent être classés : des modèles hydrodynamiques unidimensionnels (1D) ou bidimensionnels (2D).

Les modèles hydrodynamiques 1D sont largement utilisés. Ils sont basés sur les équations de Saint-Venant (conservation des lois de masse et de l'énergie pour les eaux peu profondes) pour simuler l'écoulement à surface libre dans les canaux ouverts. Les modèles hydrodynamiques 1D nécessitent un minimum de données comme : La géométrie de la section transversale du canal, les facteurs de résistance de lit du cours d'eau et les débits ou les niveaux d'eau aux conditions des limites.

En revanche, dans les modèles hydrodynamiques 2D, les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement sont exprimées en deux dimensions et l'eau est autorisée à se déplacer à la fois dans la direction longitudinale et les directions latérales, tandis que la vitesse est supposée être négligeable dans la direction verticale.

Les modèles 2D peuvent être résolus à l'aide d'une approche par éléments finis comme dans les modèles : MIKE 21, TELEMAC-2D, TRIM2RD ou par des modèles à grille raster comme LISFLOOD-FP (Bates and De Roo, 2000). Les données d'entrée pour les modèles 2D sont la topographie précise de la morphologie du cours d'eau (la section du cours d'eau y compris le lit majeur), la résistance du lit, les facteurs de friction du vent et les données hydrométriques (débits et / ou niveaux d'eau) aux conditions des limites.

Bien que l'approche 2D donne des résultats satisfaisants, certains inconvénients rendent cette approche moins applicable, à titre d'exemple, l'application d'un modèle bidimensionnel

requiert des données complètes et cohérentes du cours d'eau à étudier. Ces données ne sont pas facilement disponibles et aussi qu'en raison des calculs prolongés, ce qui rend la simulation de l'étendue de la surface d'eau est souvent limitée. Une autre solution consiste à faire la simulation hydraulique à l'aide d'un modèle 1D, puis à interpoler l'étendue de la surface d'eau pour créer une carte d'inondation en utilisant des techniques fondées sur le SIG.

Récemment, une interface de système d'information géographique (SIG) appelée HEC-GeoRAS a été développée à l'Université d'Austin au Texas. Cette extension de modélisation permet de faire face aux aspects quasi-2D de l'étendue de la surface d'eau, en reliant la géométrie du cours d'eau à un modèle numérique de terrain sous la forme d'un réseau irrégulier triangulé (TIN).

Dans notre cas d'étude, un couplage entre le modèle 1D et l'outil de SIG (HEC-GeoRAS) a été effectué pour la simulation d'inondation dans la vallée de l'Oued Mekerra et son affluent Oued Tadjemout.

Parmi les différents modèles hydrodynamiques unidimensionnels (1D) disponibles aujourd'hui, il ya un modèle couramment utilisé dit HEC-RAS développé par le corps des ingénieurs de l'armée américaine (*l'US Army Corps of Engineers*).

2.2 Modélisation hydraulique avec HEC-RAS et HEC-GeoRAS

2.2.1 *Modèle HEC-RAS*

HEC-RAS est un système, intégré de logiciels, conçu pour une utilisation interactive dans un environnement multitâche, comprenant une interface graphique permettant d'éditer, modifier, visualiser les données d'entrée et observer les résultats obtenus, des modes d'analyse hydraulique distincts (écoulement stationnaire, non stationnaires et transport des sédiments) et des fonctionnalités de représentation numérique et graphique des résultats de calcul hydraulique (cf. figure (IV.1)).

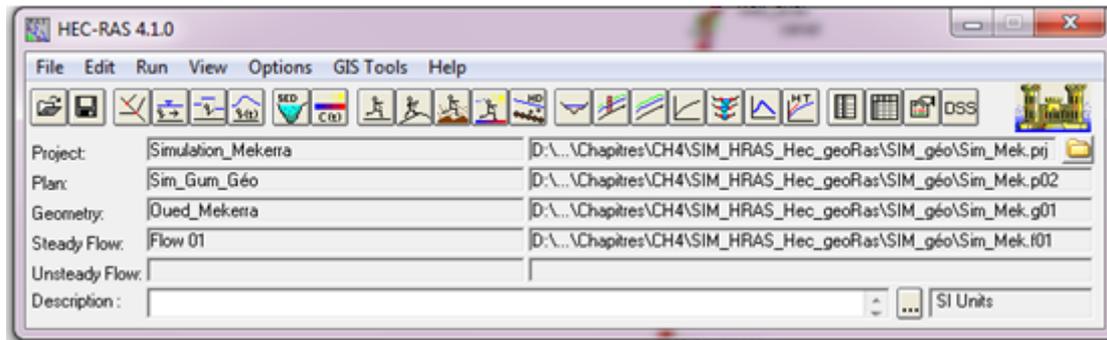


Figure IV.1 – Fenêtre de menu principale de HEC-RAS

Outre, HEC-RAS capable de prendre en compte dans le calcul hydraulique les effets des ouvrages franchissant du cours d'eau : tels que les ponts, ponceaux, déversoirs et d'autres structures traversant la section du cours d'eau. Il simule aussi les défaillances des digues, les barrages et ouvrages de stockage.

En raison de sa capacité à décrire une vaste gamme de processus physiques, HEC-RAS s'est révélée très utile pour soutenir toutes les phases de la planification de la gestion des rivières et la cartographie des risques hydrauliques (Dragan and Slobodan, 2009).

Le modèle 1D de HEC-RAS est gratuit et entièrement disponible dans le site ([http : //www.hec.usace.army.mil/software/hec – ras/](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/)). Une description complète du modèle et de ses principes de calcul est donnée dans ce site.

2.2.2 Modèle HEC-GeoRAS

HEC-GeoRAS est une extension d'Arc-GIS (cf. figure (IV.2)), utilisée pour la préparation de données spatiales pour les introduire dans le modèle hydraulique HEC-RAS et la génération des cartes des zones inondables qui sont utilisées dans les évaluations de la vulnérabilité aux risque d'inondation.

HEC-GeoRAS utilise l'MNT pour extraire des informations importantes sur la zone d'application. HEC-GeoRAS offre une interface facile à utiliser pour créer tous les jeux de données en entrée et offre des fonctions utiles qui aident l'utilisateur à obtenir ces données (ex : créer des sections transversales équidistantes le long d'une cours d'eau).

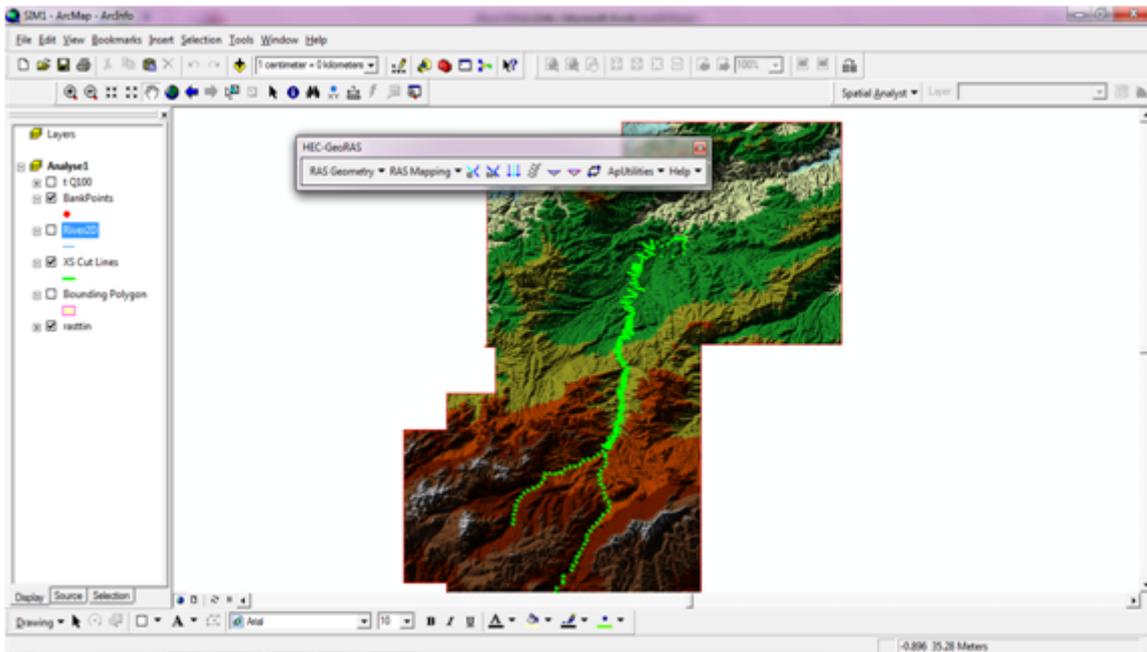


Figure IV.2 – Module HEC-GeoRAS intégré dans le logiciel Arc-GIS

Outre les opérations de base utilisées pour la création de coupes transversales, de lignes de courant et de zones inondables, HEC-GeoRAS dispose d'autres outils pour créer des ponts, des immeubles et de l'extraction automatique de coefficient de Manning (n) à partir des cartes de l'occupation du sol.

2.3 Principe de simulation par HEC-RAS

HEC-RAS est actuellement capable d'effectuer des calculs unidimensionnels 1D du profil de surface de l'eau pour différents régimes d'écoulement à savoir régime d'écoulement sous-critique, supercritique ou mixte.

Le calcul hydraulique par HEC-RAS est basé sur la solution de l'équation d'énergie unidimensionnelle (Saint-Venant 1D, Manning-Strickler, etc.). Les pertes d'énergie sont évaluées par frottement (formule de Manning), contraction et expansion. Dans les cas où le profil de la surface de l'eau varie rapidement, comme c'est le cas de l'écoulement à travers des ponts, des ponceaux et des barrages, l'utilisation de l'équation de moment est nécessaire.

2.3.1 Régime stationnaire et instationnaire

Le régime d'écoulement dans un canal ouvert soit stable (stationnaire/permanent) si le débit, le tirant et la vitesse moyenne à un endroit donné ne changent pas avec le temps, ou si l'on peut supposer qu'il est constant pendant la période de temps considérée. Cependant, en régime instationnaire (instable) le débit, la profondeur et la vitesse de l'écoulement changent avec le temps.

2.3.2 Écoulement uniforme et non uniforme

L'écoulement dans un canal est uniforme lorsque la géométrie ou la rugosité sont constantes. Ceci implique que la ligne de niveau d'énergie, l'élévation de la surface de l'eau et le fond du canal sont tous parallèles pour un écoulement uniforme. Ce type de flux se produit rarement dans la réalité (Hyung-II and Slobodan, 2009). Un écoulement non-uniforme est parfois désigné comme un écoulement varié et peut être en outre classé comme rapidement varié et graduellement varié. L'écoulement est rapidement varié si les changements d'écoulement se produisent rapidement et la distribution de pression n'est pas hydrostatique, sinon il est progressivement varié.

2.3.3 Écoulement fluviale et torrentiel

L'effet de la gravité sur l'état d'écoulement est défini par un rapport de l'énergie cinétique du liquide en mouvement à l'énergie potentielle de la pesanteur. Ce rapport est connu sous le nom nombre Froude (Eq. (IV.1)) :

$$F = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y_m}} \quad (\text{IV.1})$$

Avec,

F : nombre de Froude (ad) ;

V : vitesse d'écoulement moyenne du canal (m/s) ;

g : accélération due à la gravité (m/s^2) ;

y_m : tirant d'eau moyen dans la section (m); ($y_m = S/l$)

2.3.4 Les paramètres géométriques

Les paramètres géométriques essentiels d'une section transversale d'un chenal hydraulique sont : Le tirant d'eau (y), la section mouillée (S_m), la largeur du miroir (l) ou la largeur de la section mouillée et le périmètre mouillé (P). Ils sont illustrés sur le schéma de la figure (IV.3).

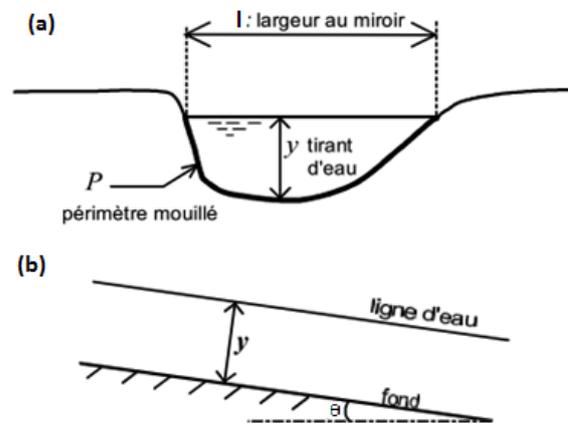


Figure IV.3 – Paramètres géométriques d'un cours d'eau (a) : section transversale (b) : profil en long

2.3.5 L'équation de continuité (ou de conservation de la masse)

L'équation de continuité (Eq. (IV.2)) indique que le débit reste constant entre les sections transversales adjacentes. Cette équation permet de décrire les changements dans une section transversale et la vitesse d'un endroit à l'autre.

$$Q = A_1.V_1 = A_2.V_2 \quad (\text{IV.2})$$

Avec,

Q : débit (m^3/s);

V_1, V_2 : vitesse de l'écoulement entre deux sections adjacentes (m/s);

A_1, A_2 : sections transversales (m^2).

2.3.6 Loi de conservation de l'énergie

Les profils de surface de l'eau progressivement modifiés sont basés sur le principe de la conservation de l'énergie qui stipule que la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle à une section donnée est égale à la somme du potentiel et de l'énergie cinétique à toute autre section transversale plus ou moins de perte ou de gain d'énergie entre les sections (cf. figure (IV.4)).

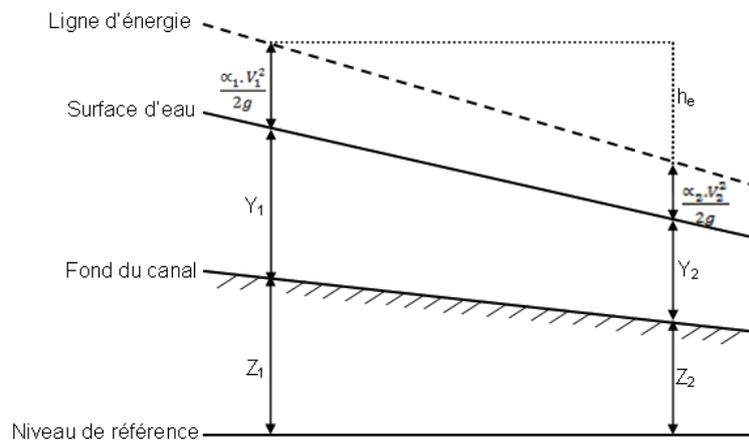


Figure IV.4 – Schéma du principe de la loi de conservation de l'énergie

La ligne d'eau est calculée d'une section à l'autre en résolvant l'équation d'énergie (Eq. (IV.3)) sous la forme suivante :

$$Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2g} = Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2g} + h_e \quad (\text{IV.3})$$

Avec,

Y : hauteurs d'eau (m);

Z : côtes du fond de chenal (m);

V : vitesse moyenne sur une section (m/s);

g : gravité (m/s^2);

α : coefficient de pondération (ad);

h_e : pertes de charge (m).

Sur la base de l'équation d'énergie, la perte de charge sur la ligne d'énergie est la somme des pertes par frottement et l'expansion ou de la contraction (Eq. (IV.4)) :

$$h_e = L\overline{S_f} + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (\text{IV.4})$$

Avec,

L : longueur du tronçon de canal entre les sections transversales adjacentes ;

S_f : coefficient de frottement entre deux sections ;

C : coefficient de perte d'expansion ou de contraction (ad).

La grandeur de α dépend des caractéristiques du canal. Les valeurs typiques de α sont indiquées en tableau (IV.1).

Tableau IV.1 – Grandeurs de α (Debo and Reese, 2002)

Canal	Valeur de α		
	Min	Moyenne	Max
Canal régulier	1.1	1.15	1.2
Canal naturel	1.15	1.3	1.5
Canal naturel- inondé sur les rives	1.5	1.75	2

2.3.7 Coefficient de rugosité (Manning)

Les pertes d'énergie dues à la rugosité du lit sont généralement évaluées en fonction de l'équation de Manning (Eq. (IV.5) et (IV.6)) :

$$Q = K S_f^{1/2} \quad (\text{IV.5})$$

$$K = \frac{1}{n} A R^{2/3} \quad (\text{IV.6})$$

Avec,

K : coefficients de pondération des vitesses (m^3/s);

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

R : rayon hydraulique (m).

Le choix de la valeur n de Manning appropriée est très important pour le calcul précis des profils de surface de l'eau. La valeur du n de Manning est très variable et dépend d'un certain nombre de facteurs, dont la rugosité de surface, l'irrégularité de section du canal, l'alignement de chenal de l'écoulement, la taille et la forme du canal, la végétation, les obstructions, matériaux du fond et lits du canal (USACE, 2002). La valeur n diminue avec l'augmentation de niveau et de débit d'eau. Lorsque la hauteur d'eau est peu profonde, l'irrégularité du fond du canal sera bien apparue et son effet peut devenir prononcé. Cependant, la valeur n peut être importante aux niveaux élevés si les rives sont rugueuses et herbacées (Chow et al., 1988).

3 Méthodologie de simulation par HEC-RAS et HEC-GeoRAS

L'approche utilisée pour l'analyse des zones inondables et l'évaluation des risques à l'aide d'un modèle unidimensionnel utilisant HEC-RAS, SIG et HEC-GeoRAS est présentée à la figure (IV.5).

La méthode générale adoptée pour l'analyse des zones inondables et l'évaluation des risques d'inondation dans cette étude se compose essentiellement de cinq étapes :

1. Préparation du TIN (*Triangulated Irregular Network*) dans logiciel de SIG (Arc-GIS v9.3);
2. Prétraitement de données géométriques (données bathymétriques du cours d'eau et ouvrages de franchissement) pour HEC-RAS, en utilisant HEC-GeoRAS;
3. Exécution de HEC-RAS pour calculer les profils de surface de l'eau;
4. Post-traitement des résultats HEC-RAS et cartographie des zones d'inondation. La principale tâche de post-traitement est la délimitation automatique des zones inondables;
5. Évaluation des risques d'inondation .

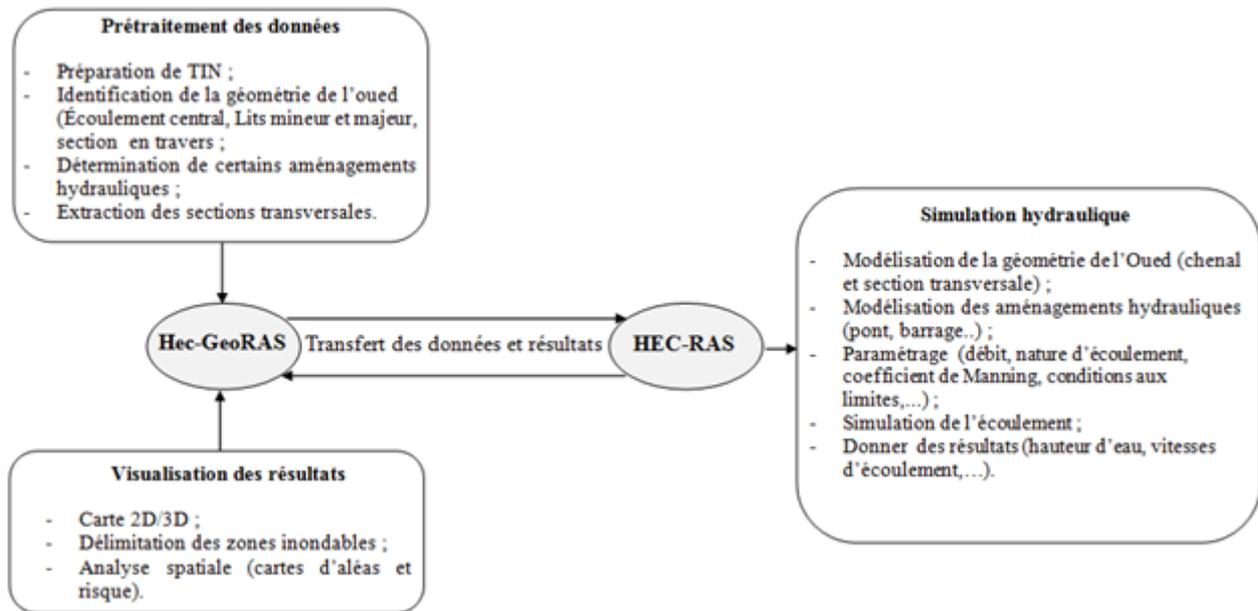


Figure IV.5 – Organigramme de la méthodologie de simulation hydraulique avec HEC-RAS et HEC-GeoRAS

3.1 Préparation des données spatiales pour l'analyse hydraulique

Les données spatiales utilisées pour les modélisations hydrauliques se présentent sous la forme de profils en travers de la vallée de l'Oued Mekerra et données bathymétriques représentant la géométrie des ouvrages (pont, barrage,...).

Les données spatiales pour les analyses hydrauliques sont préparées à l'aide de l'extension HEC-GeoRAS. Cette tâche représente la phase de prétraitement des données d'entrée du modèle HEC-RAS (cf. figure (IV.6)).

Le prétraitement commence par l'élaboration d'un modèle numérique de terrain (MNT) en format TIN. Les données d'élévation pour chaque section transversale sont extraites du TIN. Le TIN sert aussi à déterminer les limites de la zone d'inondation et à calculer les élévations des niveaux d'eau.

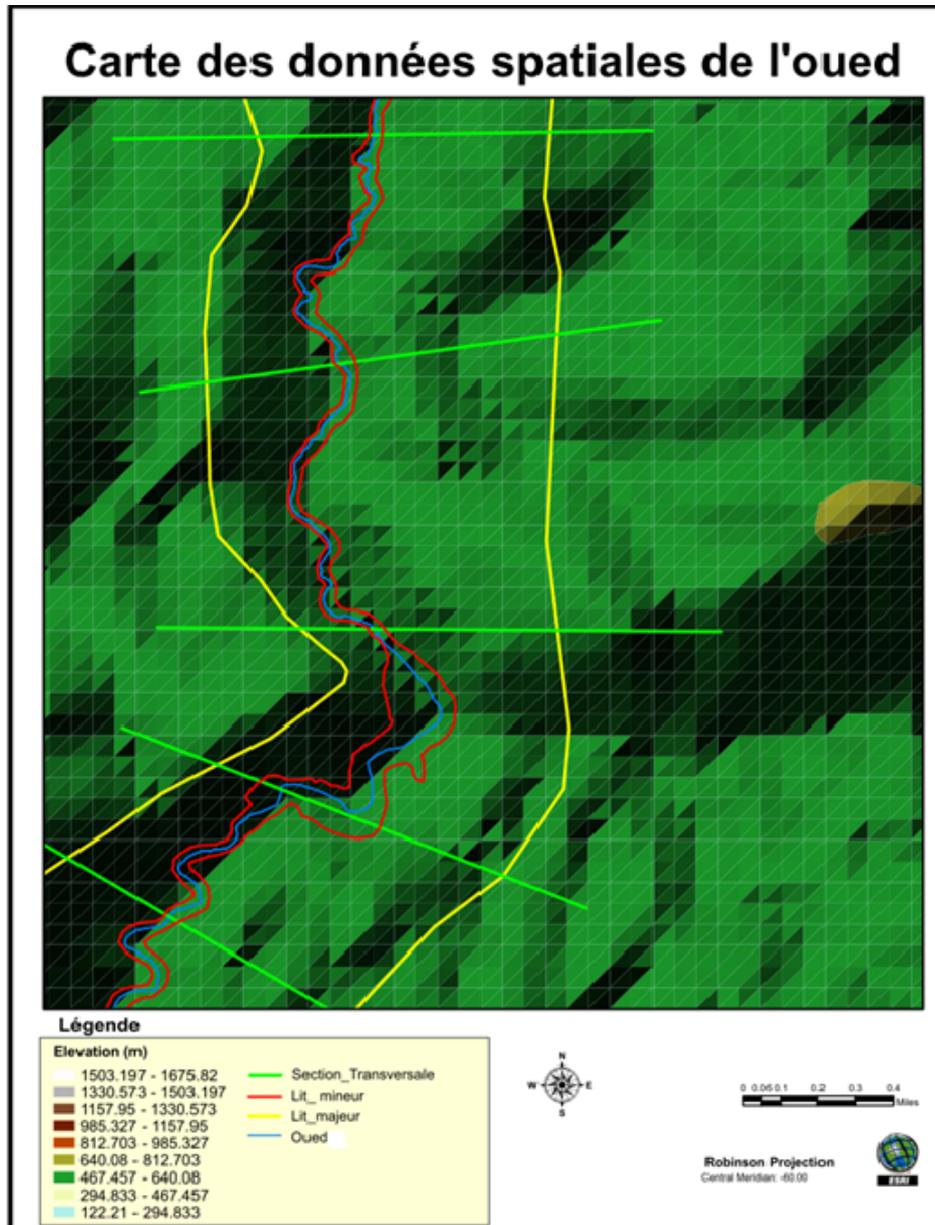


Figure IV.6 – Elaboration des données spatiales de l’Oued Mekerra dans HEC-GeoRAS

Dans le modèle TIN, chaque point est défini par les coordonnées x , y et z . Le z représente l’élévation. Ces points sont reliés par leurs bords pour former un réseau de triangles superposés (surfaces finies) qui représentent la surface du terrain (Lo and Yeung, 2005). Les bords horizontaux communs, peuvent être reliée entre elles et utilisée pour interpoler la coordonnée x , y et z de n’importe quel point, même si des mesures réelles n’ont pas été obtenues à ce point.

3.2 Application du modèle HEC-RAS

3.2.1 Données géométrique sur HEC-RAS

Le fichier de données géométriques contient des informations importantes sur les sections transversales, les structures hydrauliques, les points de rive et d'autres attributs physiques des chemins hydrauliques. Le prétraitement des données est effectué à l'aide de HEC-GeoRAS pour créer des attributs physiques dans un SIG. Dans HEC-GeoRAS, chaque attribut est stocké dans une classe d'entités distincte appelée couche RAS. Ces entités sont exportées dans l'interface de l'éditeur de données géométriques (Geometric Data) dans HEC-RAS (cf. figure (IV.7)). Toutes les modifications nécessaires ont été effectuées à ce stade.

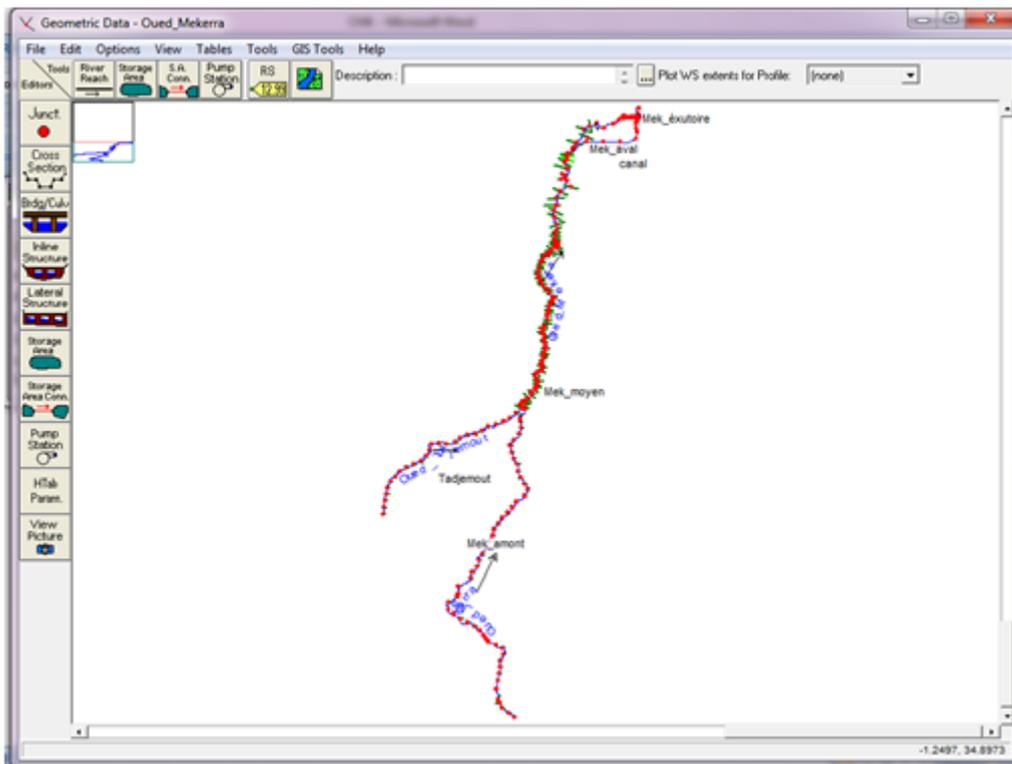


Figure IV.7 – Modélisation de la géométrie de l'Oueds Mekerra et Tadjemout dans HEC-RAS

La section transversale de l'Oued montre les limites de l'écoulement central, le lit mineur et le lit majeur qui sont représentés au moyen de points représentant des coordonnées X-Y, où X est la distance par rapport à un point de référence arbitraire placé sur la rive (généralement la rive gauche) et Y est l'élévation à partir du fond de l'oued (cf. figure (IV.8)).

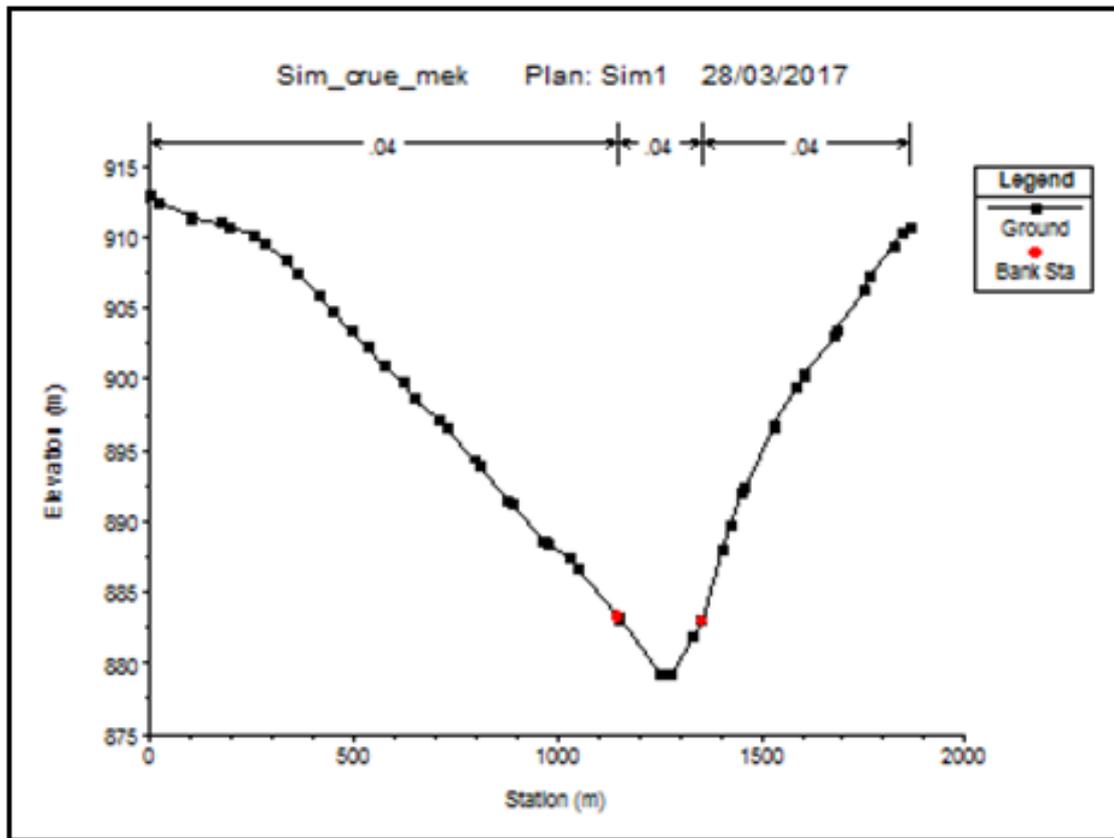


Figure IV.8 – Modèle de section transversal dans HEC-RAS

Ainsi, les ouvrages hydrauliques tels que les ponts et le barrage d'écrêtement à Tabia (cf. figures (IV.9) et (IV.10)) sont également intégrés directement dans la bathymétrie du modèle. Les infrastructures routières (ex : ponts) peuvent entraîner un ralentissement dynamique de la crue lors de sa propagation. Le tableau (IV.2) montre l'ensemble des sections transversales et ouvrages intégrés dans la simulation HEC-RAS.

Tableau IV.2 – Inventaire des profils en travers et ouvrages hydrauliques exploités dans la simulation HEC-RAS

Chemins hydraulique	Nombre de section transversale	Nombre de l'ouvrage
Oued Mekerra	218	21+ Barrage Tabia
Oued Tadjemout	38	3
Canal sud	20	7

IV.3 Méthodologie de simulation par HEC-RAS et HEC-GeoRAS

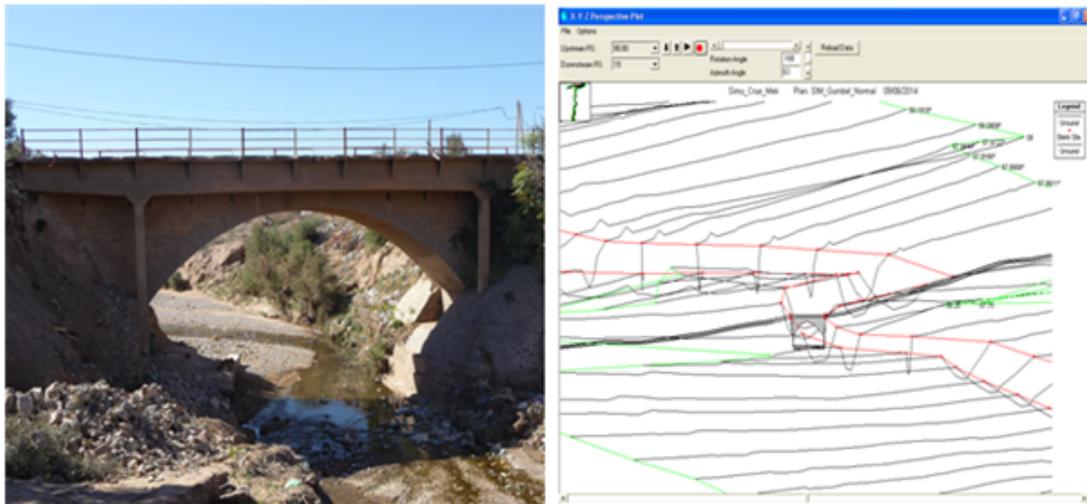


Figure IV.9 – Modèle du pont dans HEC-RAS (*pont routier sur Oued Mekerra*)

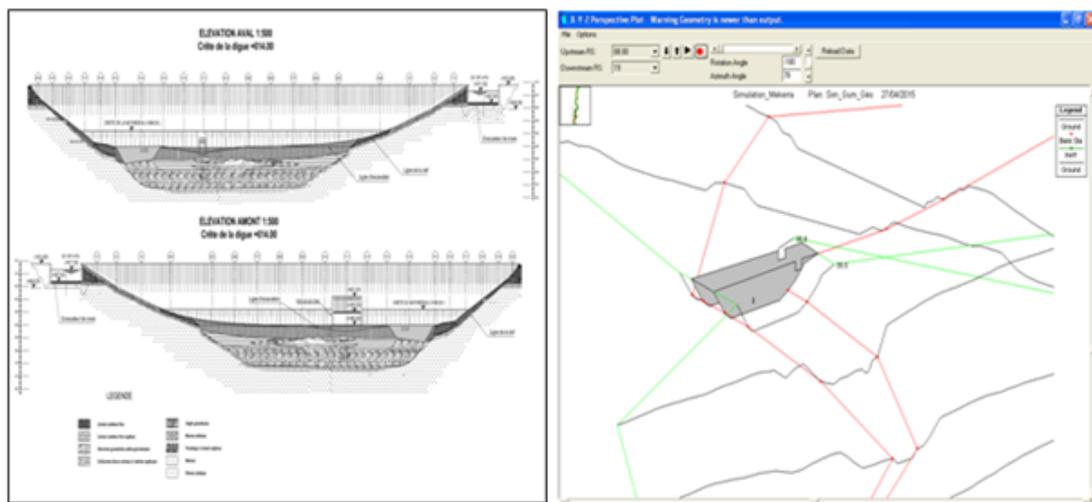


Figure IV.10 – Modèle du barrage dans HEC-RAS (*barrage d'écrêtement sur Oued Mekerra*)

3.2.2 Choix du régime d'écoulement

La simulation est réalisée en régime stationnaire. Il s'agit de passer le débit de pointe d'une crue dans toutes les sections du tronçon considéré. L'étude stationnaire nous permet d'identifier les éventuels débordements pour des débits de pointe, pour différents temps de retour.

3.2.3 Coefficient de Manning (n)

Le coefficient de Manning représente un élément fondamental dans l'écoulement à surface libre. Il est déduit à partir de la carte d'occupation du sol qui détermine la nature du sol (terrain nu, végétation, etc.). Les valeurs de coefficient de Manning pour différentes composantes de la section de l'oued (lit, rives droite et gauche) sont reportées dans le tableau (IV.3)).

Tableau IV.3 – Coefficients de Manning (n) affectés aux différentes natures des sections du canal sud, Oueds Mekerra et Tadjemout

Nature des sections de l'Oued	Coefficient de Manning
Canaux revêtus de béton.	0.014
Pièrres sèches.	0.030
Cours d'eau à fond en terre, côtés avec pièrre.	0.030
Cours d'eau naturel avec méandres ,quelques étangs et endroits peu profonds, propres.	0.040
Cours d'eau naturel avec méandres, l'eau à l' étiage, pente et sections plus faible.	0.045
Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	0.060

3.2.4 Choix des débits de crues

Enfin, nous avons intégré les données de débits pour le fonctionnement du modèle de la simulation des crues. Les simulations ont été faites pour des fréquences cinquantennale et centennale (50 ans et 100 ans). Ces grandeurs ont été extraites à partir d'une analyse fréquentielle qui a été menée sur la base des débits maximaux instantanés pour la période (1978-2007) selon la loi de Gumbel (cf. annexe (A.9)). Les grandeurs des débits fréquents pour la station d'El Haçaiba, SABY et SBA sont renseignées dans le tableau (IV.4)).

Tableau IV.4 – Débits fréquents simulés (débit de pointe en m^3/s)

Stations/Périodes de retour	Q_{50}	Q_{100}
El Haçaiba	244	279
SABY	788	913
SBA	214	245

IV.3 Méthodologie de simulation par HEC-RAS et HEC-GeoRAS

Les débits de pointe pour différentes périodes de retour (Q_{50} et Q_{100}) ont été saisis dans la fenêtre (*Steady flow data*). Le débit dans le canal sud a été fixé à $130 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette valeur correspond à sa capacité de transit. Les conditions aux limites de simulation (pentes de l'amont et l'aval de l'Oued) ont également été saisies dans cette fenêtre (cf. figure (IV.11)).

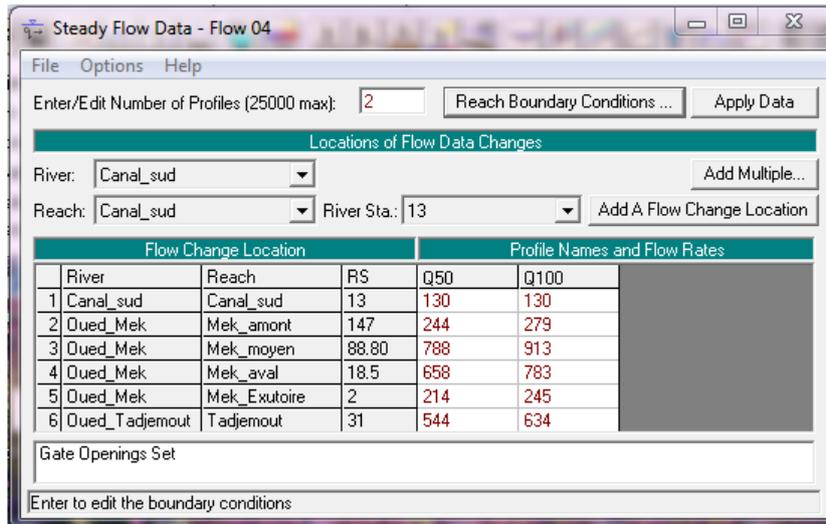


Figure IV.11 – Introduire les débits de crues et les conditions aux limites

Ensuite, on lance la simulation pour calculer les profils de surface de l'eau correspondant aux différentes valeurs de débits de crues. Une fois la simulation terminée, le fichier d'exportation RAS-GIS est créé et ensuite sera exporté vers HEC-GeoRAS (cf. figure (IV.12)).

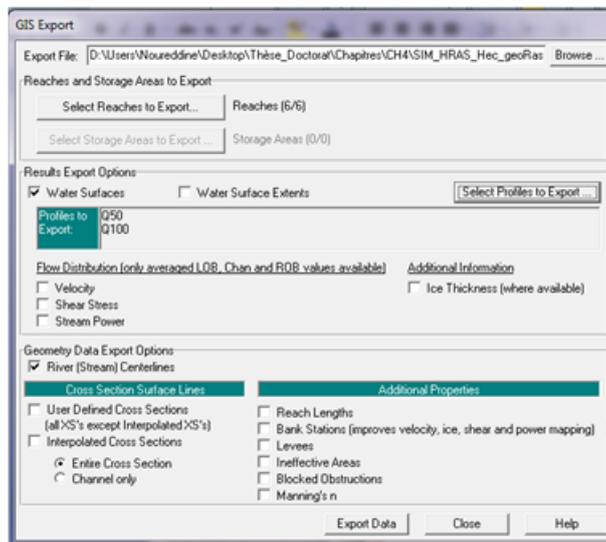


Figure IV.12 – Exportation des résultats de simulation vers HEC-GeoRAS

IV.3 Méthodologie de simulation par HEC-RAS et HEC-GeoRAS

La visualisation des extensions des eaux de l'inondation est importante pour présenter les résultats de modèle aux prévisionnistes et les planificateurs. Les niveaux de la surface d'eau dans chaque section transversale sont exportés vers HEC-GeoRAS. Ces niveaux sont convertis en grilles en format TIN, représentant l'élévation de l'eau, auquel nous allons soustraire le TIN du terrain pour localiser les zones inondées (cf. figure (IV.13)).

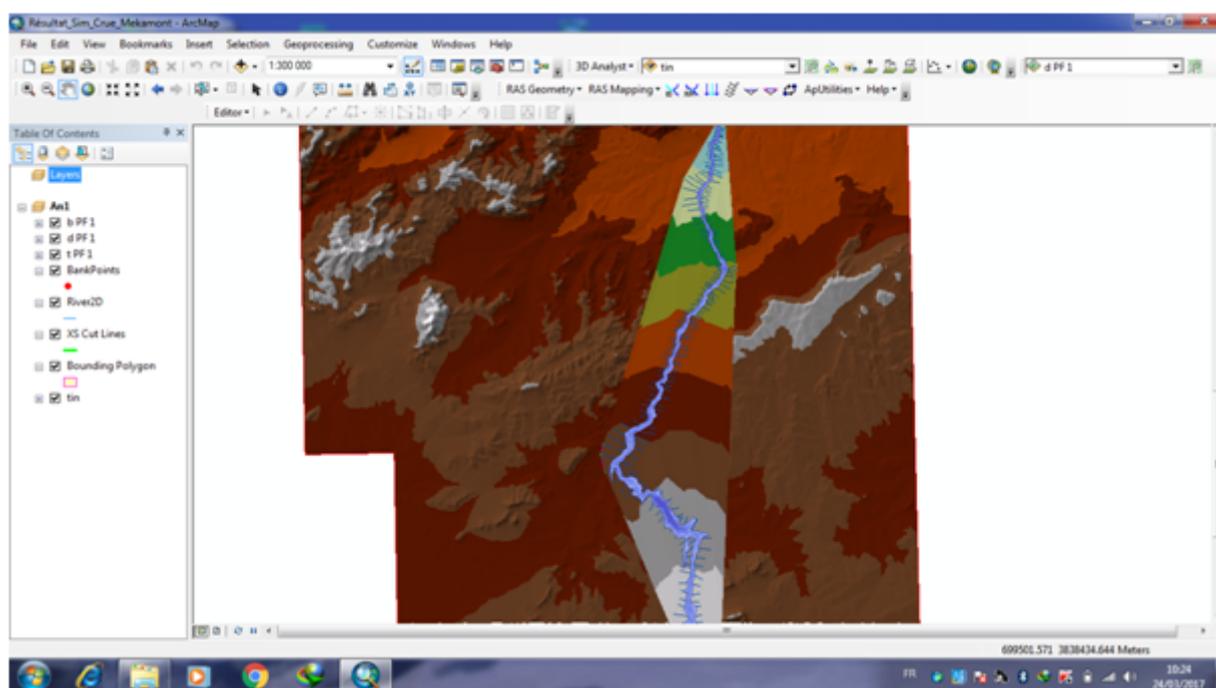


Figure IV.13 – Extraction des extensions des eaux de l'inondation par HEC-GeoRAS

3.3 Cartes de crues

Les cartographies de l'épandage des eaux de crues, pour les événements de référence, concernent uniquement les secteurs ayant fait l'objet d'une modélisation hydraulique (Oued Mekerra, Tadjmout et canal sud). La simulation d'une crue cinquantennale (cf. figure (IV.14)), montre que les valeurs maximales des hauteurs d'eau peuvent atteindre 4.25 m. La surface inondable est estimée à une surface de 97.67 km² soit 9766.75 ha. La vitesse d'eau varie entre 0.76 m/s et 4.11 m/s.

IV.3 Méthodologie de simulation par HEC-RAS et HEC-GeoRAS

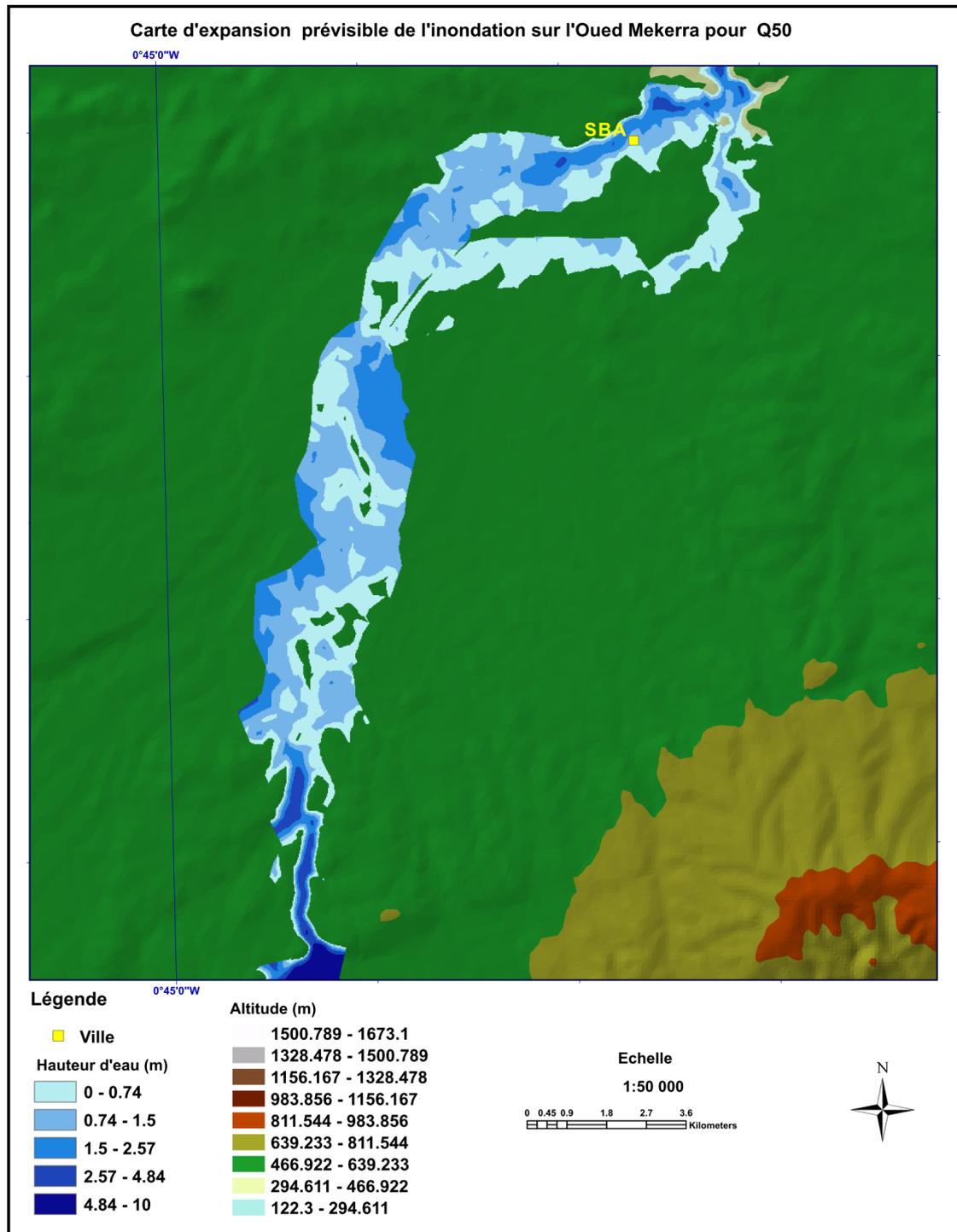


Figure IV.14 – Cartes d'épandage des eaux de crue cinquantennale (Q_{50})

Pour une crue centennale (cf. figure (IV.15)) les zones inondables d'une surface de 102.37

IV.3 Méthodologie de simulation par HEC-RAS et HEC-GeoRAS

km^2 (10236.75 ha) avec des hauteurs d'eau qui peuvent atteindre 4.47 m. La vitesse d'eau varie entre 0.8 m/s et 4.37 m/s.

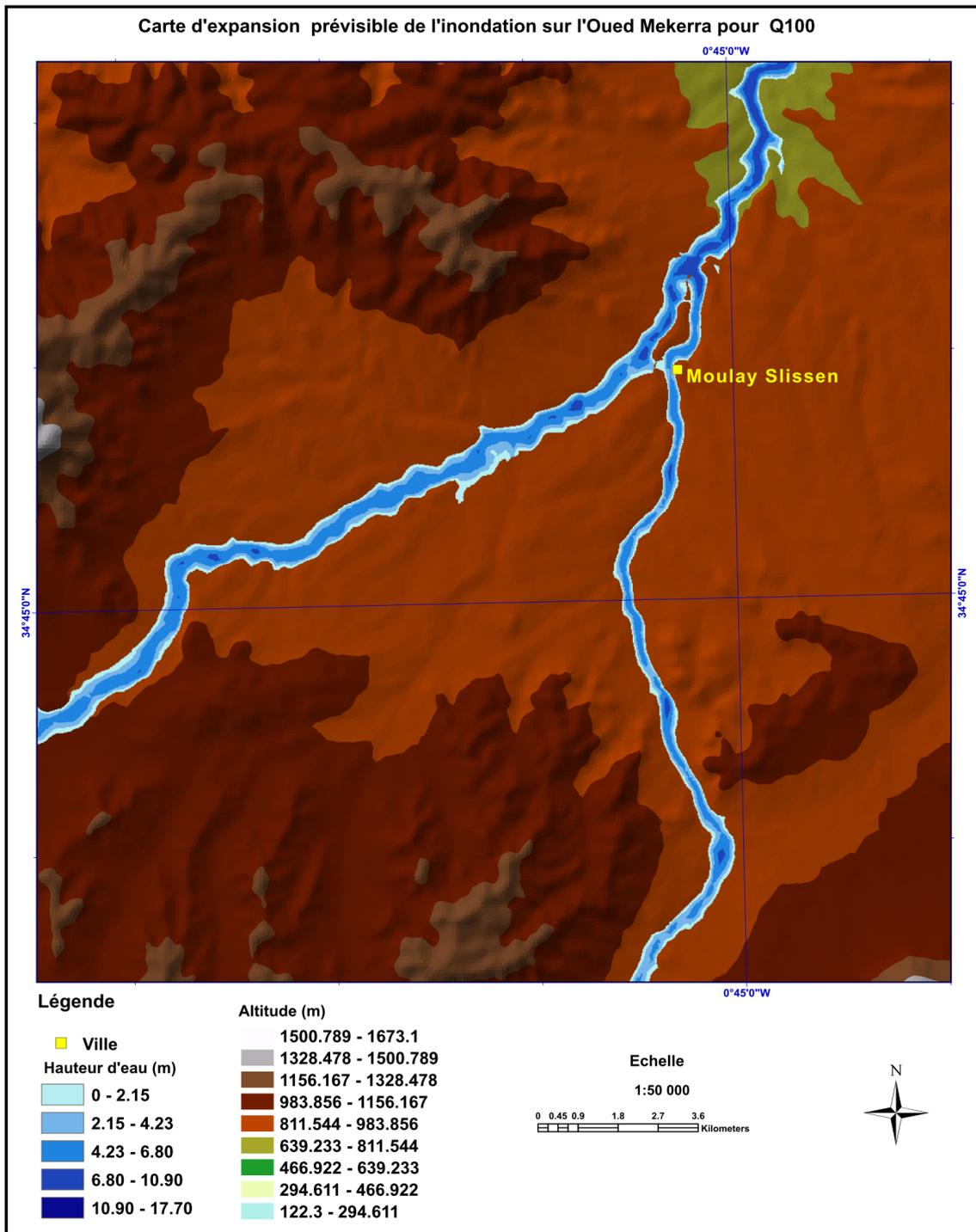


Figure IV.15 – Cartes d'épandage des eaux de crue centennale (Q_{100})

4 Conclusion

La modélisation hydraulique constitue un outil important pour la prévision et la simulation en temps réel des inondations dans le bassin de l'Oued Mekerra.

L'utilisation du modèle HEC-RAS et l'utilitaire de SIG (HEC-GeoRAS) nous a permis de prévoir des différents niveaux d'eau de crues et de délimiter des contours des zones inondables dans lesquelles les zones plus sombres représentent des hauteurs d'eau plus profondes (peuvent atteindre jusqu'à 4.47 m pour la crue centennale) tandis que les zones plus claires montrent moins de profondeur d'eau.

Le calcul du profil de la surface de l'eau est très utile pour déterminer le niveau d'eau en cas d'inondation et son calcul à l'aide du modèle HEC-RAS conduit à de meilleurs résultats dans un temps plus court avec moins d'effort en cas d'inondation.

Toutefois, Les résultats obtenus par la modélisation hydraulique ne peuvent être vérifiés à cause de manque des informations sur l'étendue des inondations réelles dans la zone d'étude.

Chapitre V

Communication des prévisions et d'alerte

1 Introduction

La communication efficace des prévisions et d'alerte devient de plus en plus importante pour la gestion des risques liés aux inondations, en particulier à titre préventif. Tout système d'alerte aux inondations vise à construire un message et le diffuser au public. Le système de prévision et d'alerte contre les inondations doit donc mettre au point des outils d'information adaptés qui répondent aux exigences des différents groupes d'utilisateurs.

Ce chapitre porte principalement sur la communication entre l'unité de prévision et d'alerte contre les inondations (UPI) et le grand public sur les inondations, en particulier par l'intermédiaire d'un site de cartographie Web. Cette méthodologie a pour but de fournir un aperçu pratique des résultats de la modélisation hydrologique et hydraulique.

2 Gouvernance des risques d'inondation

La connaissance des risques liés aux inondations est une base nécessaire et une condition préalable à des mesures préliminaires telles que des mesures de précaution et de planification. Il a été souligné que les communautés exposées au risque d'inondation doivent adopter une

approche durable et holistique de la gestion des risques d'inondation (Fleming, 2002). D'une part, ceci implique un transfert des responsabilités de l'état vers les individus, et d'autre part, il représente une forme de gouvernance de haut en bas ou prescriptive (Höppner et al., 2010).

Samuels (2005) a défini la gouvernance comme suit :

1. **Prévention** : prévenir les dommages causés par les inondations, sur les personnes et les biens, dans les zones actuelles et futures sujettes aux inondations ;
2. **Protection** : prendre des mesures structurelles et non structurelles pour réduire la probabilité d'inondations et / ou l'impact des inondations dans un lieu précis ;
3. **Préparation** : informer la population sur les risques d'inondation et les mesures à prendre en cas d'inondation ;
4. **Réponse d'urgence** : élaboration de plans d'intervention d'urgence en cas d'inondation ;
5. **Recouvrement et leçons tirées** : retour à la normale dès que possible et d'atténuer à la fois les impacts sociaux et économiques sur la population touchée.

La gouvernance actuelle des risques liés aux inondations vise à renforcer l'auto-responsabilité de la population à risque pour sa propre sécurité. L'auto-responsabilité de la population à risque pour ses propres mesures de sécurité est un objectif à venir de la gestion des risques liés aux inondations. Cette vision basée sur la bonne communication entre les institutions responsables de prévision et de gestion des risques d'inondation et les communautés à risque.

Renner et al. (2009) a révélé que la communication sur les risques occupe une position centrale dans la gouvernance des risques en reliant et en facilitant les flux d'information et de dialogue entre les éléments énumérés ci-dessus.

3 Communication sur les risques d'inondation

La communication est le transfert d'informations d'un corps à l'autre. Une bonne communication se produit lorsque le processus d'interaction est multidirectionnel et que l'information partagée motive les récepteurs d'information à réagir positivement à l'information contenue dans le message. Il existe une abondante littérature sur le thème de la communication des risques couvrant des domaines tels que l'éducation et la sensibilisation, la conception de messages, la

V.4 Droit de public à la communication sur les risques d'inondation

psychologie, les systèmes d'alerte technique et la politique. La communication des risques est définie comme un échange d'informations interactif entre individus, groupes ou institutions, sur la nature des risques, les avis liés au risque et les stratégies d'adaptation (Wiedemann and Mertens, 2005). Elle sert à informer la population sur les risques d'inondation, la protection contre les inondations et les mesures de sécurité personnelle. La communication des risques est étroitement liée à la perception du risque, car elle joue un rôle important dans la gestion des risques. L'objectif de la communication des risques est de renforcer la prise de conscience des risques et de motiver les populations à risque à prendre des mesures préventives et à se préparer à un cas d'urgence. (Covello et al., 1987) ont cité un ensemble d'objectifs de communication des risques :

1. Sensibilisation, pour améliorer la compréhension des risques parmi les groupes cibles ;
2. Divulgence des informations sur les victimes ;
3. Amélioration la protection du public par mesures individuelles de réduction des risques ;
4. Préparation aux situations d'urgence par fournir des conseils en cas d'urgence.

Un autre objectif de la communication des risques est de minimiser les conflits à venir (Ruhmann, 2003). Il s'agit de la réglementation des zones inondables qui a des conséquences juridiques et financières pour les habitants et les propriétaires fonciers.

La communication influe également sur la perception des risques. De plus, la communication des risques joue un rôle important dans la gestion des risques.

La communication des risques doit se concentrer non seulement sur les activités d'information, mais aussi sur la sensibilisation accrue aux risques. Au fil du temps, la mémoire de la dernière catastrophe s'estompe et la population à risque perd sa conscience du risque.

4 Droit de public à la communication sur les risques d'inondation

La communication sur les risques d'inondation fait également partie du droit des populations à être informées des risques pour leurs vies et leurs propriétés. En Algérie le droit de

V.4 Droit de public à la communication sur les risques d'inondation

communication des risques est fixé par les articles 11, 12 et 13 de la loi N°04-20 du 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.

Article. 11 «L'état assure aux citoyens un accès égal et permanent à toute information relative aux risques majeurs. Ce droit d'accès à l'information couvre :

- la connaissance des aléas et des vulnérabilités de son lieu de résidence et d'activité ;*
- l'information sur les dispositifs de prévention des risques majeurs applicables à son lieu de résidence ou d'activité ;*
- l'information sur les dispositifs de prise en charge des catastrophes. Les modalités d'élaboration, de diffusion et d'accès à ces informations sont fixées par voie réglementaire.»*

Article. 12 «Les modalités d'organisation, de promotion et de soutien de toute campagne ou action d'information sur les risques majeurs, leur prévention, et la gestion des catastrophes qui peuvent en découler, tant pour améliorer l'information générale des citoyens, que pour permettre une information particulière dans des zones présentant des risques particuliers, ou dans les lieux de travail ou les lieux publics de façon générale, sont fixées par voie réglementaire.»

Article. 13 «Il est institué en vertu de la présente loi un enseignement des risques majeurs dans tous les cycles d'enseignement. Les programmes d'enseignement des risques majeurs ont pour objectifs de :

- fournir une information générale sur les risques majeurs ;*
- inculquer une formation sur la connaissance des aléas, des vulnérabilités, et des moyens de prévention modernes ;*
- informer et préparer l'ensemble des dispositifs devant être mis en œuvre lors de la survenance de catastrophes.*

Les modalités d'application du présent article sont précisées par voie réglementaire.»

4.1 Stratégie de communication sur le risque d'inondation

Selon [Dennis et al. \(2008\)](#), la stratégie de communication sur les risques d'inondation comprend la compréhension du processus, des facteurs et des barrières de communication des risques.

La communication commence par la source (l'expéditeur du message) qui crée un message pour la transmission. La source utilise un émetteur (logiciel et / ou matériel) pour coder ou traduire le message en un signal (ex : texte, voix et vidéo) envoyé sur un canal de communication (support).

5 Caractéristiques du message de risque d'inondation

Le message de risque d'inondation doit spécifier la classe de référence à laquelle se réfère une probabilité d'événement et donner des exemples des événements similaires ont été survenus (historiques des inondations).

Les probabilités quantitatives, contrairement aux déclarations de risque qualitatives, ont été considérées comme confondant le public tant que la classe de référence n'est pas clairement définie (Gigerenzer et al., 2005).

A cet effet, pour communiquer clairement le risque, la probabilité de risque et l'impact probable doivent être clairement communiquées et comprises par le public cible (Richardson et al., 2003). Le public en général préfère des messages qui incluent l'ampleur possible et des degrés de risque de l'événement (Gough, 2000).

Outre, la communication ne devrait pas se limiter à la communication de crise, mais devrait aussi inclure la sensibilisation et la préparation (Schelfaut et al., 2011).

Le message initial concernant la communication des risques liés aux inondations est très important pour attirer l'attention et l'intérêt des personnes à risque. Un bon premier message pourrait être des informations sur les événements pluvieux prévus (ex : BMS) qui peuvent conduire à un niveau d'attention élevé et à la recherche d'informations supplémentaires par les utilisateurs. La deuxième étape comprend une évaluation préliminaire des risques liés aux inondations afin de déterminer le niveau de risque dans toutes les régions et de définir les régions dans lesquelles il faut établir des cartes des inondations. La conception et la convivialité des cartes d'eau pour répondre aux besoins des utilisateurs est essentielle pour une communication efficace des risques. Un bon premier message pourrait être une carte d'écoulement bien conçue qui peut conduire à un niveau d'attention élevé et à la recherche d'informations supplémentaires par les utilisateurs.

5.1 Echec de communication sur le risque

Il existe de nombreux problèmes de l'échec de la communication sur les risques. (Scanlon, 1990) propose quatre raisons générales pour lesquelles la communication des risques échoue :

- Le danger n'est pas identifié ;
- L'avertissement arrive trop tard ;
- Le système d'avertissement échoue pour des raisons techniques ;
- On ne sait pas ce qu'il faut faire.

Toutefois, les erreurs humaines provenant des individus et des organismes sont la raison la plus fréquente de l'échec de l'avertissement sur le risque. L'échec humain est caractérisé par un effort insuffisant pour atteindre un objectif tel que des messages qui ne sont pas émis, des avertissements ignorés et des messages qui ne sont pas reçus et de manque de confiance vis à vis de la source de l'information.

6 Confiance en message de risque

Pour que l'intervenant réponde à un message d'avertissement, il doit y avoir confiance entre le communicateur et le récepteur et vice-versa. Construire cette confiance peut prendre du temps, en particulier si la communication des risques a échoué dans le passé.

La confiance est un facteur clé dans le domaine de communication des risques d'inondation. L'importance de la confiance dans la communication des risques a été soulignée par la théorie de la modernité réflexive de Giddens (1994). Ce dernier, a défini la réflexivité comme « *une propriété de la connaissance, dans laquelle la connaissance elle-même est une propriété sociétale ou un atout existant dans l'esprit des individus* ».

Beck (1991) a souligné que la confiance du public envers la communication des risques est étroitement liée à crédibilité des experts et donc la confiance en prévisionniste et en systèmes de prévision réduit sensiblement l'impact des inondations. Ainsi, des politiques de communication bien conçues peuvent aider le public à s'adapter rapidement aux impacts de risque, alors que les politiques infructueuses peuvent de promouvoir l'indignation dans la communauté et d'empêcher l'atténuation des menaces contre les inondations (Maxwell, 2003).

En outre, la communication des risques est utilisée pour renforcer la confiance dans le public en général auprès des autorités responsables. Plus l'acceptation des risques et des mesures de protection correspondantes augmente, plus les gens font confiance aux institutions concernées (Zwick and Renn, 2008).

Frewer (2004) soutient que lorsque le public veut des informations sur un risque, il préfère un message clair concernant les risques et les incertitudes qui y sont associés.

Lalo (2000) a révélé que l'objectif d'informer les communautés doit avant tout être de garantir leur sécurité en leur rappelant les mesures essentielles de sécurité et deuxièmement, d'éviter la panique, la dramatisation ou les rumeurs, ce qui peut à long terme être plus nocif que le réel danger.

Pour gagner la confiance du public, il faut faire sentir au public qu'il a le contrôle de ses décisions et qu'il ne se fait pas simplement dire quoi faire (O'Riordan, 1990). Fischhoff (1995) a suggéré une série de considérations à prendre pour gagner la confiance. Ces considérations doivent de montrer au public que :

- il a accepté des risques similaires dans le passé ;
- c'est une bonne affaire pour eux ;
- il a en train de devenir des partenaires.

7 Evolution de la communication sur les risques

Dans le passé, la communication s'est faite par le biais des dispositifs ou outils technologiques traditionnels tels que la communication des médias d'impression comme des journaux, des magazines et des médias électroniques comme la radio et la télévision.

Toutefois, avec l'arrivée de la révolution de la communication et l'émergence de nouveaux médias comme l'Internet et les téléphones portables qui ont donné naissance à de nouveaux types de médias tels que les pages Web statiques et interactives, les sites de médias sociaux (ex : SMS, MMS, Twitter et Facebook). En effet, le site Web est considéré comme un outil puissant pour le public et les gestionnaires d'urgence. Des études montrent également que des programmes et du matériel éducatifs sont nécessaires tant pour les décideurs que pour le public

pour assurer une interprétation correcte.

7.1 Le rôle des médias

Les médias font partie intégrante de l'action communicative et sont des «vecteurs de messages» ou «canaux d'information» ou «outils». Les médias facilitent le dialogue entre les acteurs sociaux lorsqu'ils s'engagent dans une action communicative. Les médias comme outil de communication peuvent être catégorisés comme des médias imprimés (comme les journaux et les dépliants), les nouveaux médias / médias électroniques (comme la radio, TV et Internet) et les communications en face à face (comme une réunion).

7.2 Le rôle des images

Les images sont particulièrement pertinentes en tant qu'outil de communication des risques. Les individus ont à la fois des réponses rationnelles et émotionnelles aux stimuli visuels ([Nicholson-Cole, 2005](#)). Les images ont également la capacité de condenser des informations complexes, d'améliorer la vitesse et l'impact de la communication et d'améliorer le rappel mémoire en cas un risque exceptionnel ([Nicholson-Cole, 2005](#)).

En outre, les images et autres représentations visuelles sont des activités sensibles et des constructions sociales, qui peuvent être utiles pour engager le public de manière substantielle ([Crampton, 2001](#)).

Par ailleurs, la représentation graphique de l'information sur les risques s'est révélée être une technique potentiellement utile pour réduire le comportement à risque dans les cas critiques ([Stone et al., 1997](#)).

7.3 Le rôle de SIG

Les SIG sont définis comme des systèmes informatiques capables d'assembler, de stocker, de manipuler et d'afficher des informations géographiquement référencées ([USGS, 1998](#)). Le pouvoir du SIG réside dans sa grande clarté de présentation et d'analyse. Dans le contexte de

la gestion des risques d'inondation, les SIG peuvent être utilisés pour créer des superpositions de cartes interactives qui illustrent clairement et rapidement quelles zones d'une communauté risquent d'être inondées. Ces cartes peuvent ensuite être utilisées pour coordonner les efforts d'atténuation avant un événement et une reprise après ([Awal, 2003](#)).

En outre, le SIG contribue d'une manière efficace dans l'aménagement du territoire et la gestion des zones inondables. Il est nécessaire donc de cartographier les différentes zones de danger afin d'établir des directives de développement et d'établir des procédures d'intervention d'urgence.

La cartographie des étendues d'inondation a des applications évidentes pour montrer les zones affectée par une inondation historique particulière ou une inondation modélisée d'une probabilité donnée d'occurrence. Une fois que les niveaux de crue possibles ont été déterminés, des cartes pour chaque niveau de crue peuvent être produites sans effort avec le SIG.

Les outils de SIG peuvent facilement effectuer différentes analyses de superposition basée sur l'occupation du sol dans un contexte de planification. En cas de superposition sur une propriété ou une base de données d'infrastructure, il est possible d'analyser quelle propriété ou infrastructure est immédiatement menacée.

8 Cartographie Web

Les progrès de la technologie et de l'informatique ont largement contribué à la progression des méthodes et des techniques de visualisation géographique, ainsi qu'à l'élargissement leur domaines d'application. En outre, la visualisation géographique s'est révélée être un processus précieux pour analyser et représenter la grande quantité de données générées.

Ces dernières années, la communication via l'Internet a créé des opportunités pour améliorer l'efficacité de la communication collaborative et de la visualisation collaborative ([Fuhrmann and Pike, 2005](#)).

L'Internet est devenu un média populaire et utile pour la diffusion des avertissements d'inondation et les informations sur les risques d'inondation au moyen de graphiques (ou plus précisément des cartes géographiques). Il a l'avantage d'une diffusion d'informations relativement

rapide et peu coûteuse accessible à toute personne disposant d'une connexion Internet. En outre, les avantages d'Internet sont l'indépendance du temps et de l'emplacement, la mise à jour, la participation et les possibilités d'interaction, ainsi que diverses options de visualisation (Barth, 2004).

La cartographie Web donne des informations générales sur les inondations comme les étendues des différents scénarios et les profondeurs d'eau correspondantes. Les résultats sont visualisés dans un service de cartographie Web afin de garantir une information complète, exhaustive, compréhensible et ciblée sur les zones exposées aux risques d'inondation. En effet, ces cartes sont essentielles pour la sensibilisation et la communication sur l'extension des eaux de crues, la situation locale des dangers en particulier au niveau des routes, des ponts, etc.

8.1 Cartographie des inondations

La cartographie peut être définie comme une forme de communication, car elle peut être utilisée comme une forme de langage spatial pour décrire des lieux, discuter de lieux et interpréter des arrangements de caractéristiques bidimensionnels (Monmonier, 1993). En raison des caractéristiques spatiales des risques d'inondation, les cartes sont un moyen idéal d'informer le public sur le danger. Il existe plusieurs caractéristiques fondamentales qui rendent les cartes comme un outil efficace pour la communication des risques d'inondation :

- Les cartes sont considérées comme un langage presque universel pour présenter le message. Les gens sont généralement capables d'extraire le sens des images plus rapidement que des mots (Tversky, 2001) ;
- Elles ont la capacité de transcender les barrières de communication linguistiques car elles sont universellement comprises (Bertin, 1983) ;
- Elles sont un format auquel l'esprit humain réagit rapidement car dans notre système cérébral le sens visuel est le plus dominant que tout autre sens (Reisberg, 2001).

8.2 Types de cartes d'inondation

Les cartes des inondations existent sous de nombreuses formes différentes, mais en général, il est possible de faire la distinction entre les cartes des risques d'inondation. Alors que les cartes

des risques d'inondation contiennent des informations sur la probabilité et / ou l'ampleur d'une inondation. Elles peuvent présenter des informations supplémentaires sur leurs conséquences (nombre de victimes, dommages économiques, etc.).

Divers paramètres peuvent être utilisés pour indiquer le risque d'inondation, tels que l'étendue de l'inondation, la profondeur de l'eau, la vitesse d'écoulement, la durée et la vitesse à laquelle l'eau monte. Parmi ces paramètres, la profondeur de l'eau est l'un des principaux facteurs d'importance en ce qui concerne les dommages causés par les inondations et par conséquent les risques d'inondation.

Moel et al. (2009) ont montré que les cartes d'étendue des inondations sont les types les plus courants de cartes d'inondation, suivies des cartes d'inondation historiques et des cartes de profondeur des eaux.

9 Présentation du service de la cartographie Web de l'UPI

L'objectif de n'importe quel système de prévision de crues est l'avertissement le grand public des risques d'inondation auxquels ils peuvent être confrontés.

A cette fin, il est proposé que l'Internet soit utilisé pour diffuser des messages d'avertissement. L'Internet est un moyen pratique d'organiser de grandes quantités d'informations sans surcharger l'utilisateur. Ces informations peuvent être organisées sur des cartes et diffusées au public à l'aide d'un site de cartographie Web. Un avantage majeur de ceci est que les mises à jour des inondations peuvent être diffusées rapidement à un grand nombre de personnes connectées à Internet afin de recevoir des informations telles que des voies de sortie ouvertes et des profondeurs d'eau.

Toutefois, les informations communiquées au grand public par les autorités liées aux inondations doivent être adaptées aux besoins des utilisateurs de manière à être aussi efficaces que possible. En outre, ces informations doivent viser à accroître les connaissances des inondations et la sensibilisation aux risques. Les services de cartographie Web doivent donc se caractériser par leur facilité d'utilisation et leur lisibilité du contenu.

V.9 Présentation du service de la cartographie Web de l'UPI

Dans le cadre de cette recherche, un site Web a été élaboré pour présenter des informations détaillées sur la prévision d'inondation sur la base de résultats de l'étude hydraulique. Ce site constitue donc la base de la lance d'un service, de cartographie Web, orienté vers la communication des prévisions et d'alerte des inondations en Algérie.

La figure (V.1) montre l'interface du site de la cartographie Web de l'UPI. Ce site représente un prototype et actuellement n'est pas opérationnel sur Internet. Il offre la possibilité de visualisé les étendues des inondations le long de l'Oued Mekerra (de Ras El Ma jusqu'à la ville de SBA) et son affluent Oued Tadjemout. Il contient une quantité importante d'informations stockées dans des couches (cartes informatives) et des outils de recherche peuvent être utilisés pour diriger et transférer les utilisateurs vers les informations qu'ils souhaitent connaître y compris des informations provenant d'autres sources (ex : BMS).



Figure V.1 – Site d'information sur le risque de crues en Algérie (WWW.UPI.dz)

Le site peut offrir ainsi des informations en temps réel sur les niveaux de jaugeage réels qui sont rendues possibles en reliant directement les stations de télémessure au centre de prévision des inondations, comme décrit à la section 4.3, chapitre I.

Le meilleur outil pour la communication de risque avec le public est l'utilisation de niveaux de jauge pour informer sur les risques d'inondation, car la population à risque peut comparer ces niveaux d'eau à des situations d'inondation dans le passé ou aux niveaux réels d'eau (GPC, 1986).

9.1 Cartes informatives

Les cartes informatives utilisées pour informer le grand public sur les risques liés aux inondations. En ce qui concerne le contenu des cartes, on distingue des cartes montrant les caractéristiques hydrauliques d'inondation (d'expansion d'inondation) et les cartes montrant différentes zones de risque (carte de vulnérabilité). Les cartes des risques d'inondation servent de base à l'aménagement du territoire, à l'évaluation des risques locaux, à la planification d'urgence et à la planification des mesures techniques de protection (Excimap, 2007).

La symbolisation et la couleur de la carte constituent les principales composantes de la perceptibilité d'une carte. Elles ont non seulement un impact visuel fort sur le lecteur de carte, mais elles représentent également la plupart des informations thématiques sur une carte. En particulier, les couleurs peuvent avoir une valeur importante dans la cartographie des inondations, à condition qu'elles répondent aux attentes des gens. A titre d'exemple, les couleurs bleues sont associées à l'eau. Cependant, pour les cartes de risque d'inondation, l'utilisation d'autres couleurs que le bleu (ex : rouge ou jaune) pourrait être un bon choix.

Toutefois, ces cartes ne devraient pas contenir trop d'informations car cela entraînerait une surcharge d'informations, rendant la carte illisible. De plus, trop de cours peuvent rendre difficile pour le lecteur de carte de faire une distinction entre les entités (Moel et al., 2009).

9.1.1 Carte d'expansion d'inondation

En ce qui concerne la communication des risques avec le grand public, il est recommandé d'utiliser des cartes d'expansion d'inondations montrant l'épandage de l'inondation. Les cartes d'expansions d'inondation (cf. figure (V.2)) peuvent être employées pour estimer l'étendue, la profondeur, la vitesse et la durée d'inondations pour diverses probabilités (Q_{10} , Q_{50} , Q_{100} ...). Ces cartes visent seulement à informer les autorités de gestion des risques (protection civil,

V.9 Présentation du service de la cartographie Web de l'UPI

PAPC,..) et le public sur les risques liés aux inondations.

Les cartes d'expansion d'inondations diffusées par le site Web de l'UPI sont affichées sur l'image Google Earth et montrent les endroits susceptibles d'être inondés le long de l'Oued Mekerra. Ces cartes visent à montrer les lieux (ponts, routes,...) en danger ou pas par des étiquettes codées en couleur (rouge, orange et verte) signifiant le degré de risque (comme illustré au tableau (I.2), chapitre I). L'illustration de l'étendue de l'inondation est faite en couleurs bleues pour améliorer l'association avec l'eau (cf. figure (V.2)). Les hauteurs d'eau sont associées à l'intensité de couleur bleu (ex : trop foncée désigne une hauteur d'eau importante et vis versa).

En ce qui concerne les aspects visuels, les cartes d'expansion d'inondations doivent répondre aux attentes du receveur et donc être élaborées en couleurs bleues qui peuvent être associées de l'eau (Excimap, 2007).

La vitesse d'écoulement de l'eau ne sera pas intégrée dans la vision publique parce que ces informations ne sont généralement pas nécessaires par les utilisateurs privés.

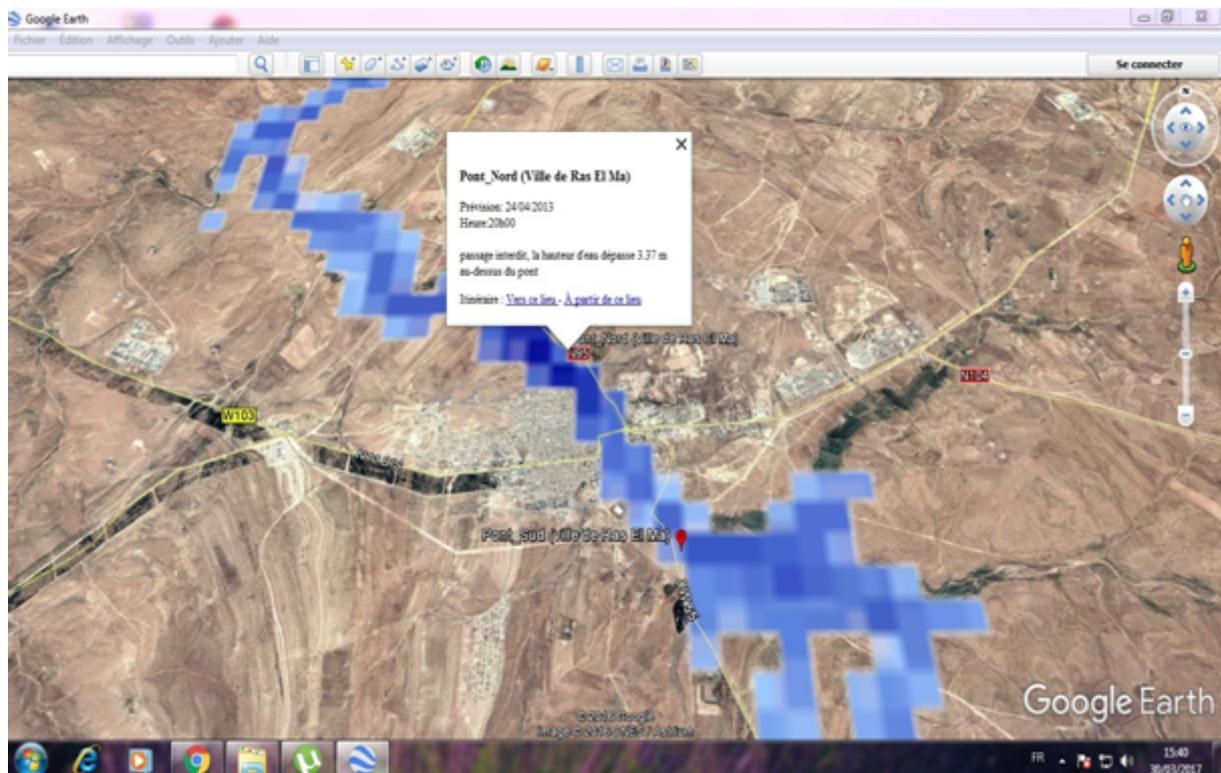


Figure V.2 – Visualisation d'une image d'expansion d'inondation sur l'Oued Mekerra et illustration les lieux à risque (*Image Google Earth de la ville Ras El Ma*)

9.1.2 Cartes de vulnérabilité

Les cartes de vulnérabilité montrent les zones de risques différents. Ces informations sont intégrées dans l'Atlas des Zones Inondables (AZI) qui représente d'un système d'information géographique des fonctions diverses pour l'usage d'experts. Cet outil nous permet de prendre des décisions juridiques directes telles qu'une interdiction de construction et des restrictions d'utilisation. Comme illustrée à la figure (V.3), où la zone rouge porte un degré de danger élevé d'où une interdiction stricte de construction et dans la zone jaune la construction de nouveaux bâtiments est interdite et nécessite de prendre des mesures de protection appropriées.

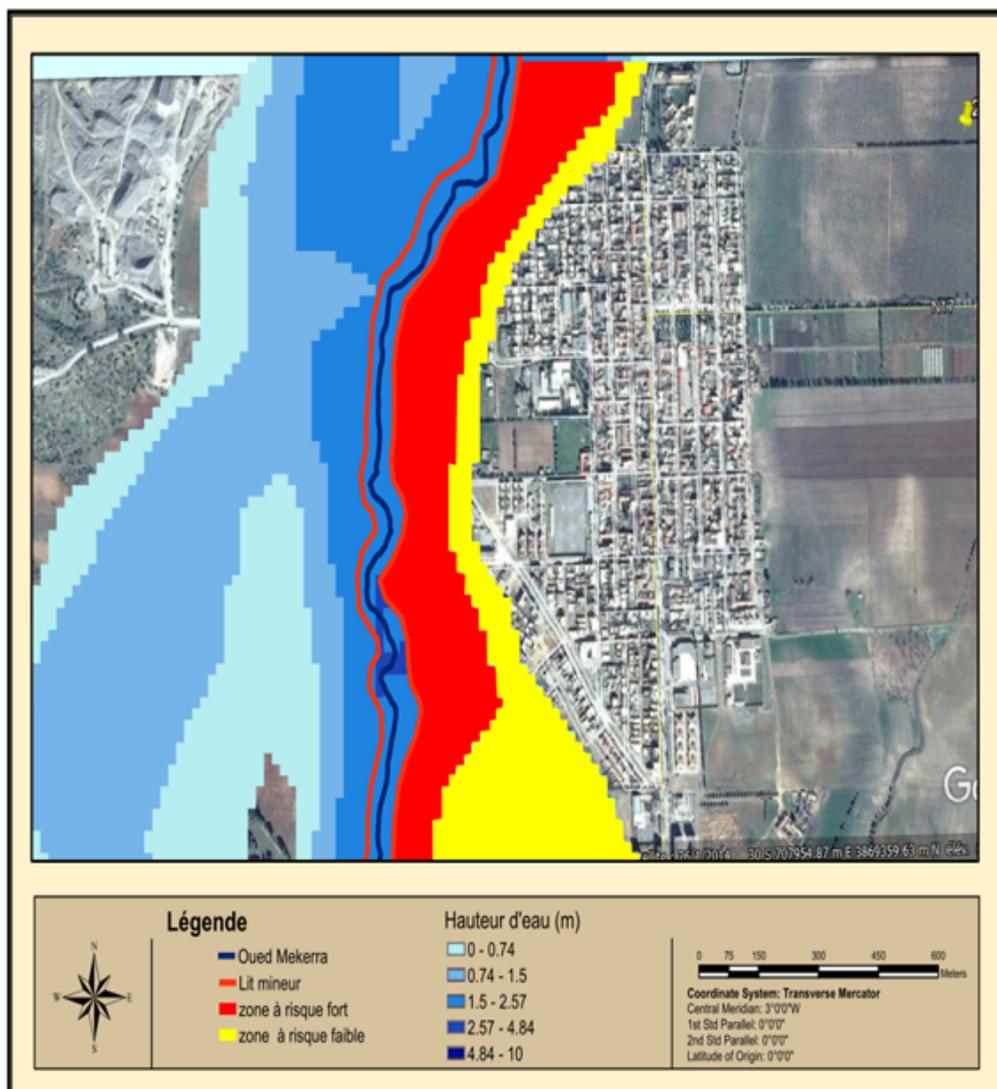


Figure V.3 – Carte de vulnérabilité montrant des zones de risques différents sur l'Oued Mekerra (*Image Google Earth de la ville SABA*)

10 Conclusion

La communication de risque d'inondations vise à informer le public en général et en particulier les personnes à risque sur les inondations.

Pour cela, le site de la cartographie web, en tant qu'outil d'information dans la communication des risques, représente une meilleure façon de diffuser les messages d'alerte contre les risques d'inondations. Elle permet de renforcer la sensibilisation aux risques des personnes et de motiver la population à risque à prendre des mesures préventives et à se préparer à un cas d'urgence.

Conclusion générale et recommandations

A l'instar des pays de climat semi-aride, l'Algérie est subit souvent de grandes inondations causant des dommages considérables aux personnes et aux infrastructures. Les graves conséquences des inondations soutiennent la nécessité de la mise en place d'un système efficace pour la prévision des crues en temps réel et l'alerte précoce.

Dans le cadre de l'amélioration des procédés de la prévision des inondations en Algérie, une Unité de Prévision et d'alerte contre les Inondations (UPI) a été créée afin de fournir des informations précises et détaillées au grand public et en particulier aux personnes à risque en vue d'éviter d'éventuels dommages. Cet organisme est mis en place actuellement au niveau de la Wilaya de Sidi Bel Abbès et offre des prévisions de crues dans le bassin hydrographique de l'Oued Mekerra qui a été choisi comme un cas d'étude. La mise en œuvre d'un système de prévision et d'alerte aux inondations de bout en bout inclue des outils, des données et des modèles qui guident la détection précoce des situations d'inondation potentielles.

Le bassin de l'Oued Mekerra, comme d'autres bassins de la région semi-aride, se caractérise par de forts contrastes climatiques et des pluies occasionnelles et torrentielles conduisant à des inondations ravageuses.

La démarche adoptée dans ce travail a consisté à développer l'aspect prévisionnel des crues dans cette zone, afin de généraliser ce système dans l'ensemble des bassins Algériens. En effet, la plupart des stratégies de prévision des crues ont été principalement développés pour les applications en zones humides. C'est pourquoi notre recherche s'est focalisé sur l'adaptation les modèles choisis avec la particularité climatique de la zone étudiée.

L'UPI est relié directement au système, de collecte des données, télémétrique fournissant des mesures quantitatives des précipitations, des niveaux d'eau et des débits aux principaux emplacements de l'Oued Mekerra. Le processus de transfert de données est fait automatiquement et rapidement par voie de télécommunication GSM. Néanmoins, les performances opérationnelles du réseau de données constituent le maillon le plus faible du système de prévision. Dans la plupart des cas, la communication téléphonique échoue souvent lors des tempêtes intenses. Un tel problème provoque une rupture de transmission des données en temps réel.

La modélisation hydrologique dans cette étude se concentre sur l'application d'un modèle hydrologique qui serait un outil efficace pour prévoir les crues dans le bassin de l'Oued Mekerra qui se caractérise par une forte variabilité spatiale à la fois de pluie et des propriétés de surface.

A cet effet, la réponse hydrologique de l'Oued Mekerra a été simulée à l'aide d'un modèle hydrologique basé sur l'approche spatialement distribuée.

En général, la performance du modèle testé (MERCEDES) pour prévoir les crues de l'Oued Mekerra est plutôt satisfaisante et peut être considérée encourageante. Cependant, l'efficacité du modèle est l'une des priorités pour renforcer la crédibilité du système de prévision.

En effet, la source majeure d'incertitude pour la modélisation hydrologique est le manque de données spatiales sur les précipitations. Les données de haute qualité sur les précipitations sont en particulier nécessaires pour répondre aux incertitudes de la mise en œuvre du modèle hydrologique.

Malheureusement, dans cette région, les stations pluviométriques sont insuffisamment denses pour représenter avec précision la réalité de la répartition spatiale des précipitations, en particulier les pluies convectives, dans le bassin versant. Ceci pourrait entraîner une prévision inexacte pour des scénarios futurs de crues.

Outre, l'inexactitude et l'incomplétude des données de débits observés ont rendu l'étalonnage et la validation du modèle est difficile. Le modèle hydrologique doit être calibré et validé avec plus longue série de débits observés afin d'optimiser bien les paramètres du modèle, ainsi que de mieux comprendre le processus hydrologique dans le bassin d'étude.

La modélisation hydraulique menée dans cette étude combinant les outils de SIG et la modélisation hydraulique unidimensionnelle (1D). Dans cette modélisation, la dynamique de

l'écoulement de l'Oued Mekerra et son affluent Oued Tadjmout a été simulée en utilisant le modèle HEC-RAS et l'outil de SIG (HEC-GeoRAS) qui permet de l'extraction de données géométriques (sections transversales) des cours d'eau à l'aide d'un MNT, ainsi l'identification des zones inondables et la détermination des différentes hauteurs d'eau dans la zone inondée.

Le modèle HEC-RAS a été choisi vu de sa simplicité et sa souplesse de mise en œuvre. Les résultats de la modélisation hydraulique ont été incorporés dans des cartes représentatives des risques d'inondations. Ce genre de cartes offre la possibilité d'effectuer une comparaison des résultats du modèle hydraulique avec la topographie du site et les différents niveaux d'eau, elles facilitent aussi la délimitation des contours des zones inondables et une meilleure compréhension du comportement de l'oued et par conséquent, les responsables peuvent intervenir pour la protection.

Les cartes des zones inondables peuvent également être utilisées pour planifier l'expansion urbaine et développer des procédures d'évacuation des populations vivant dans les zones sujettes aux inondations.

Toutefois, les données transversales sont l'une des entrées clés pour la simulation hydraulique par HEC-RAS et par conséquent la qualité des sections transversales a un impact direct sur les résultats de l'élévation de la surface de l'eau et donc sur les résultats de l'ampleur de l'inondation. En effet, l'extraction des sections transversales à l'aide d'un MNT de 90 m de résolution spatiale est insuffisante pour représenter réellement de la géométrie de l'oued. Le modèle hydraulique a besoin aussi d'autres données d'entrée, telles que les géométries des structures (ponts, barrages,..) et les rugosités (coefficient de Manning) des sections d'écoulement. Comme le modèle hydrologique, l'étalonnage et validation du modèle hydraulique joue un rôle important dans la précision du modèle. La vérification et l'étalonnage du modèle doivent être effectués en utilisant les informations sur terrain ou des imageries aériennes de l'ampleur des inondations historiques. Ces informations ne sont pas disponibles à l'heure actuelle et les résultats présentés dans ce travail restent relatives.

La communication sur les risques liés aux inondations est vitale pour que le système de prévision des crues soit efficace. La communication de risque d'inondations vise à informer le public en général et en particulier les personnes à risque sur les inondations. Elle permet également aux gestionnaires et aux décideurs d'étudier les options d'atténuation des inondations et leurs impacts environnementaux.

En raison des caractéristiques spatiales des risques d'inondation, les cartes sont un moyen idéal d'informer le public sur les dangers. Dans ce travail, on a proposé une stratégie de diffusion des messages d'alerte des crues de l'Oued Mekerra basé sur la cartographie Web. Dans ce contexte, la communication par Internet puisse être entièrement efficace pour diffuser des informations d'alerte aux inondations.

Notre site Web offre des cartes interactives décrivant les emplacements menacés par l'inondation tels que les agglomérations, les routes et les ponts, etc. Les endroits de risque sont marqués par des icônes utilisées pour localiser les emplacements et fournir des informations sur le degré de risque et les niveaux d'eau prévus.

La principale limite rencontrée dans cette étude était le manque de données suffisantes pour la mise en œuvre des modèles. Le manque de données de bonne qualité et détaillées constituent des obstacles majeurs à la réalisation de l'étude hydrologique et hydraulique significatives dans notre bassin versant et les résultats présentés ont souffert de telles contraintes.

Dans ce contexte, nous recommandons donc l'établissement d'un réseau de stations hydro-météorologiques et les stations devraient être bien parsemées dans les bassins versants de cette région. L'utilisation de radar météorologique peut également être efficace pour estimer plus précisément la répartition spatiale des précipitations notamment pour les cellules orageuses. Cette technique offre une couverture plus étendue de la distribution des précipitations dans le bassin versant.

De plus l'amélioration de la mesure de débits par un nouveau système de jaugeage (ex : capteur radar) pourrait être une solution adéquate pour éviter à la fois la détérioration de capteur de mesure (capteur de pression bulle à bulle) et les erreurs lors de la mesure des débits.

Il est nécessaire aussi de collecter davantage de données sur la température, l'humidité et l'occupation/types de sols qui sont également nécessaires pour optimiser bien les paramètres de modèle hydrologique et hydraulique.

Nous conseillons également à adopter un système de transmission de données par satellite qu'il est actuellement un système le plus fiable et le plus durable pour transmission des données en temps réel et sans interruption. Le système proposé sera capable de transmettre les données dans les pires conditions climatiques puisqu'il ne dépendra pas du réseau de télécommunication local.

En outre, le réseau de collecte de données devrait être systématiquement suivi. Il est indispensable donc d'organiser des visites sur le terrain pour vérifier l'état de l'équipement tous les quelques mois.

Une procédure de mise à jour de la performance de modèle hydrologique devrait être mise en œuvre pour minimiser les incertitudes entre les observations et la simulation au moment de la prévision. L'accent devrait être mis sur un calibrage et validation correcte du modèle au fur et à mesure que des données de bonne qualité sur les débits deviennent disponibles.

Pour la modélisation hydraulique nous suggérons d'utiliser une meilleure qualité de l'MNT (ex : 5 m de résolution) pour se rapprocher à la géométrie réelle des oueds. En effet, la géomorphologie des sections des oueds et de leurs environs est considérablement modifiée à plusieurs endroits en raison de la sédimentation et de l'érosion ainsi que des travaux anthropiques. Il est toujours nécessaire de faire des relevés topographiques dans la vallée des oueds de manière conventionnelle afin de mettre à jours leurs sections transversales. Aussi, les techniques de SIG et de télédétection pourraient fournir des informations instantanées et utiles pour les paramètres physiques des bassins versants ainsi que les changements de la rugosité du lit et des berges des oueds. En pratique, les images satellites se sont avérées utiles pour la description de la variété de couvert végétale et des types de sol.

Les cartes d'inondation devraient être superposées sur des images satellites à haute résolution pour recueillir plusieurs informations utiles à la gestion du risque de l'inondation à savoir la délimitation exacte des zones touchées par l'inondation, le nombre des maisons avec même le nombre potentiel des personnes en danger et par conséquent, pouvoir mieux choisir les moyens adéquats d'intervention et avoir une idée sur les types de dégâts ainsi que l'ampleur du risque.

La sensibilisation et l'éducation du public sont essentielles. L'éducation garantit que les personnes à risque et celles qui les assistent sauront à l'avance ce qu'il faut faire en cas d'inondation. L'éducation des communautés à risque, sur la signification et les actions requises lorsqu'un avertissement d'inondation est émis, est un élément important du succès du système de prévision. À cette fin, les communautés dans les zones sujettes aux inondations devraient être éduquées pour comprendre l'incertitude impliquée dans la prévision des crues. L'incertitude des prévisions devrait être représentée autant que possible dans un langage non technique et compris par les personnes ordinaires.

Les messages d'alertes d'inondation devraient inclure la date et l'heure auxquelles l'oued

débordera ses rives, ainsi que la date et l'heure auxquelles l'écoulement dans l'oued reviendra à l'intérieur de son chenal.

L'information sur le niveau de l'eau devrait être traduite dans son impact sur la zone. Ceci devrait être décrit en référence à des niveaux de seuil pour les inondations historiques. Les points de repère marqués de ces niveaux de seuil devraient être affichés dans les endroits publics importants et dans les principaux établissements sujets aux inondations.

À l'avenir, devrait être poursuivie la possibilité de réaliser un atlas avec des cartes d'inondation pour trois niveaux d'avertissement (faible, modéré et élevé) pour toutes les principales agglomérations.

Les communautés devraient être sensibilisées au besoin d'être prêt à agir rapidement lorsqu'un avertissement d'inondation est émis. Par ailleurs, un plan de la gestion des urgences en cas d'inondation devrait être mis en place pour les évacuations d'urgences. Ce plan devrait décrire les zones qui doivent être évacuées en cas d'inondation, ainsi que les abris dans les zones proches qui ne sont pas exposées aux risques d'inondation. Il est nécessaire de combiner différents types d'outils de communication et d'information tels que la télévision, la radio, etc.

En fin, la prévention des risques inondation devrait être considérée comme une affaire commune des personnes, de l'état et de tous les acteurs locaux concernés (Walis, directeurs exécutifs, PAPC, associations,...).

Annexe

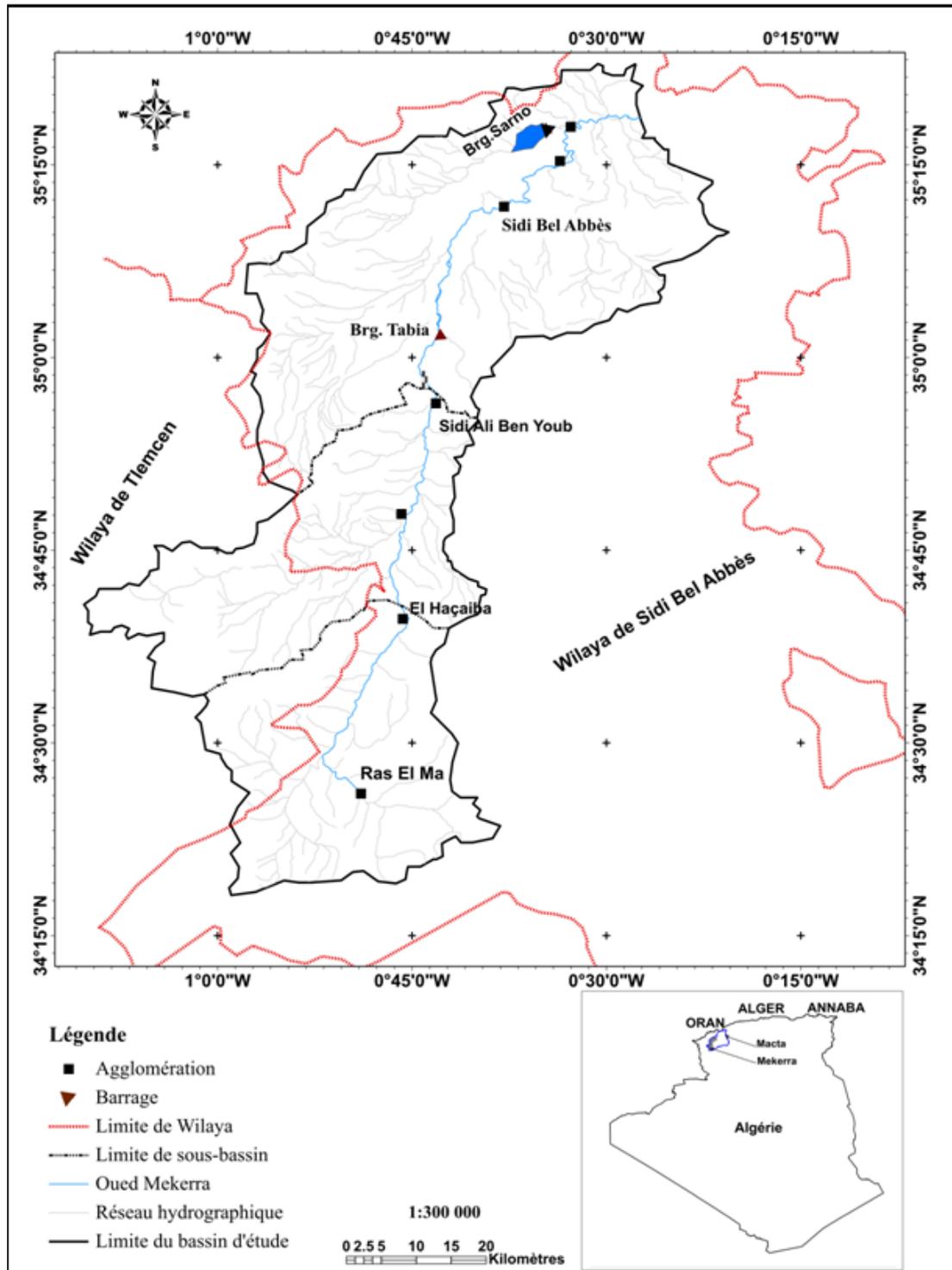


Figure A.1 – Situation géographique du bassin de l'Oued Mekerra

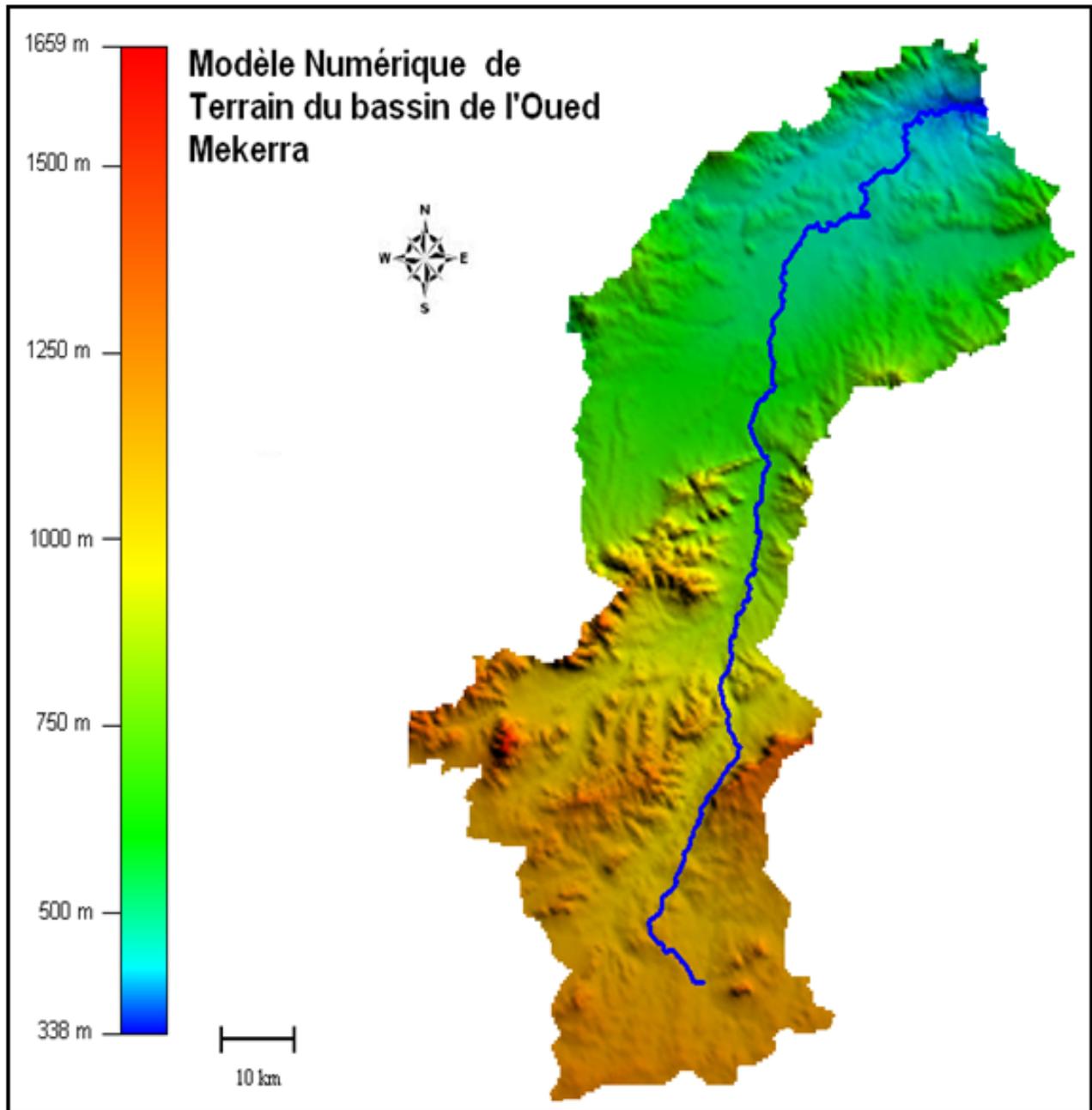


Figure A.2 – Carte des altitudes du bassin de l'Oued Mekerra (*Issue d'une image SRTM*)

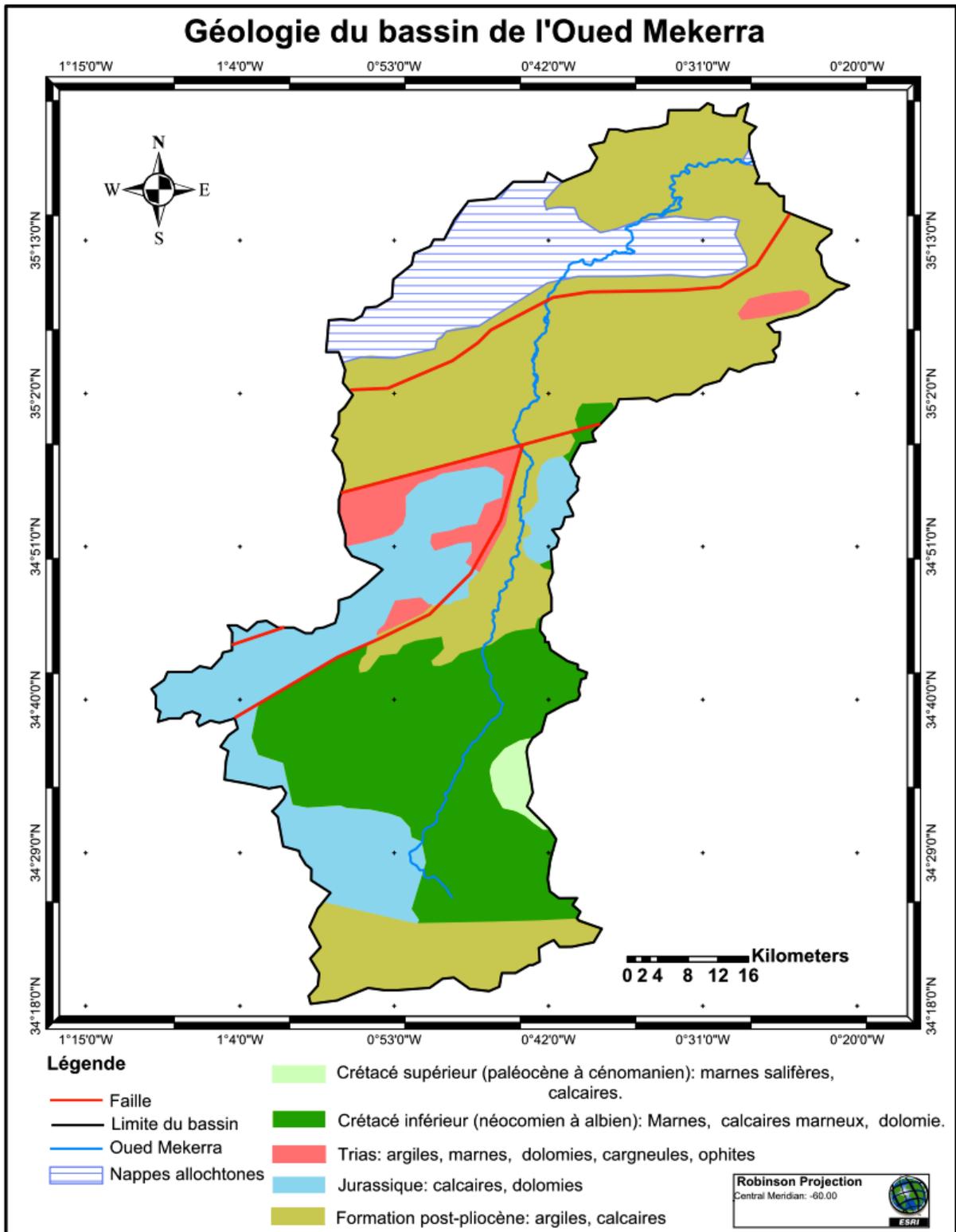


Figure A.3 – Répartition spatiale des entités géologique du bassin de l'Oued Mekerra. (Digitalisée par ArcGIS 9.3. Source : Agence Nationale de l'Aménagement du Territoire, 2000)

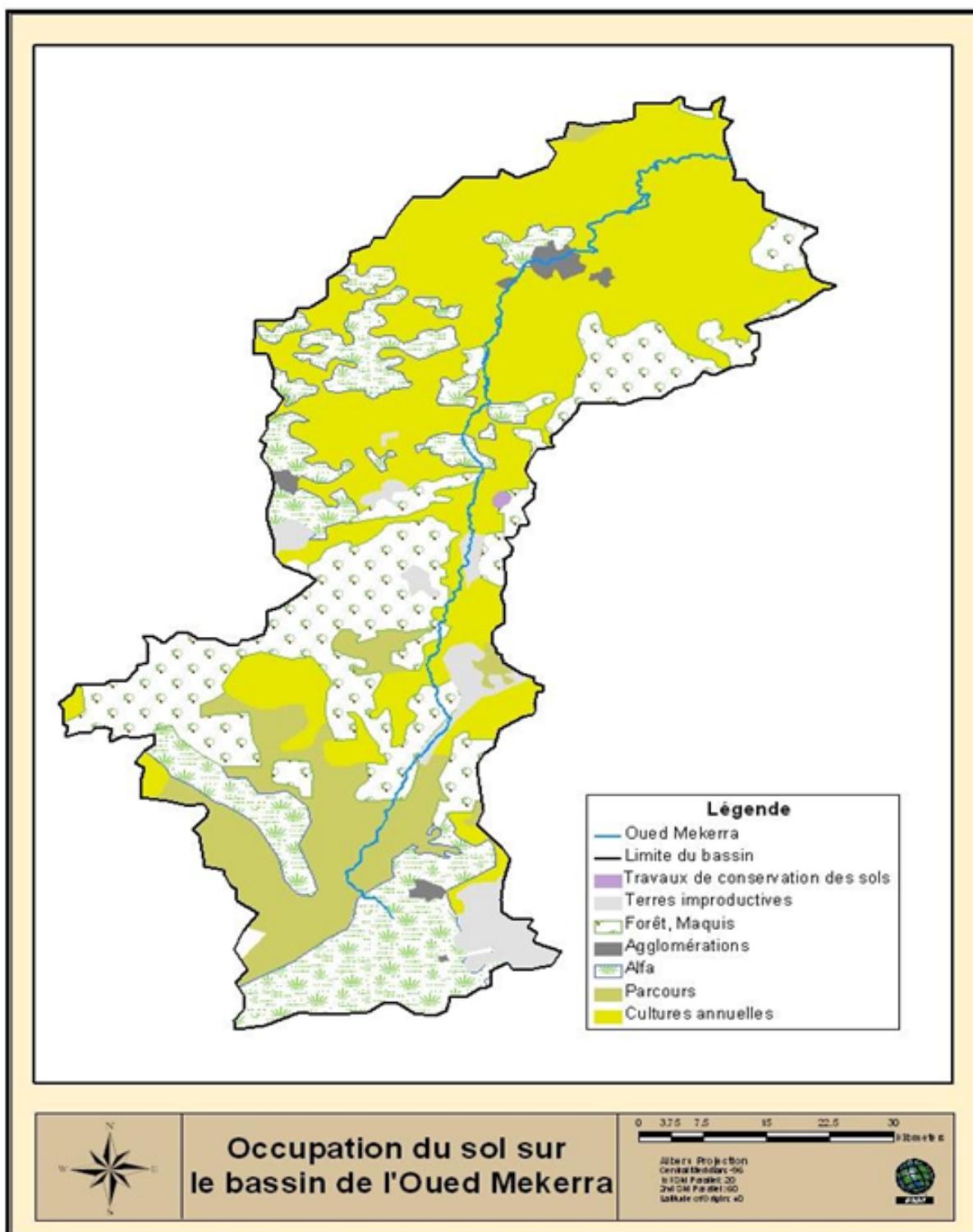


Figure A.4 – Répartition spatiale des différents usages des sols du bassin de l'Oued Mekerra. (*Digitalisée par ArcGIS 9.3. Source : Agence Nationale de l'Aménagement du Territoire, 2000*)

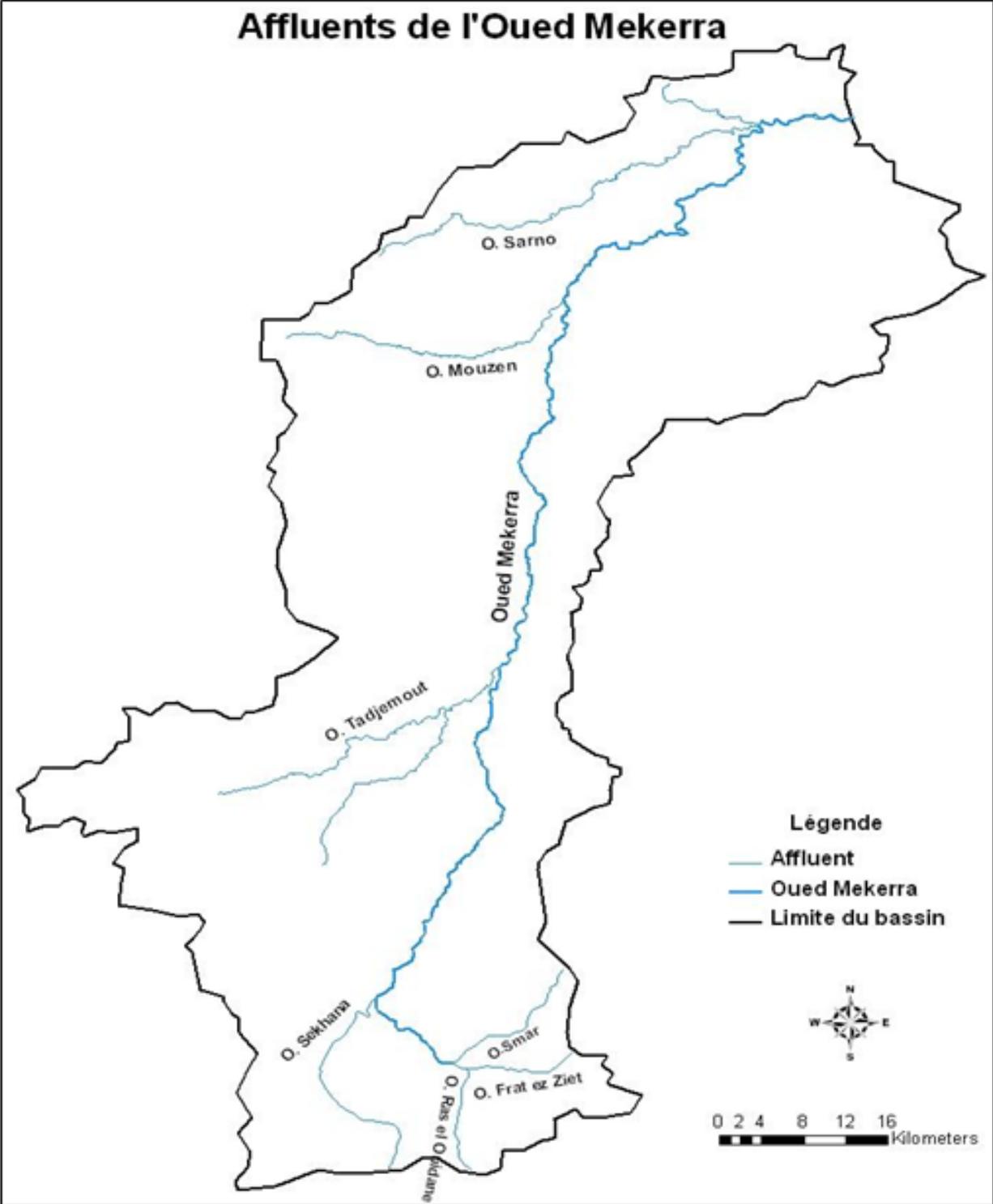


Figure A.5 – Principaux affluents de l'Oued Mekerra

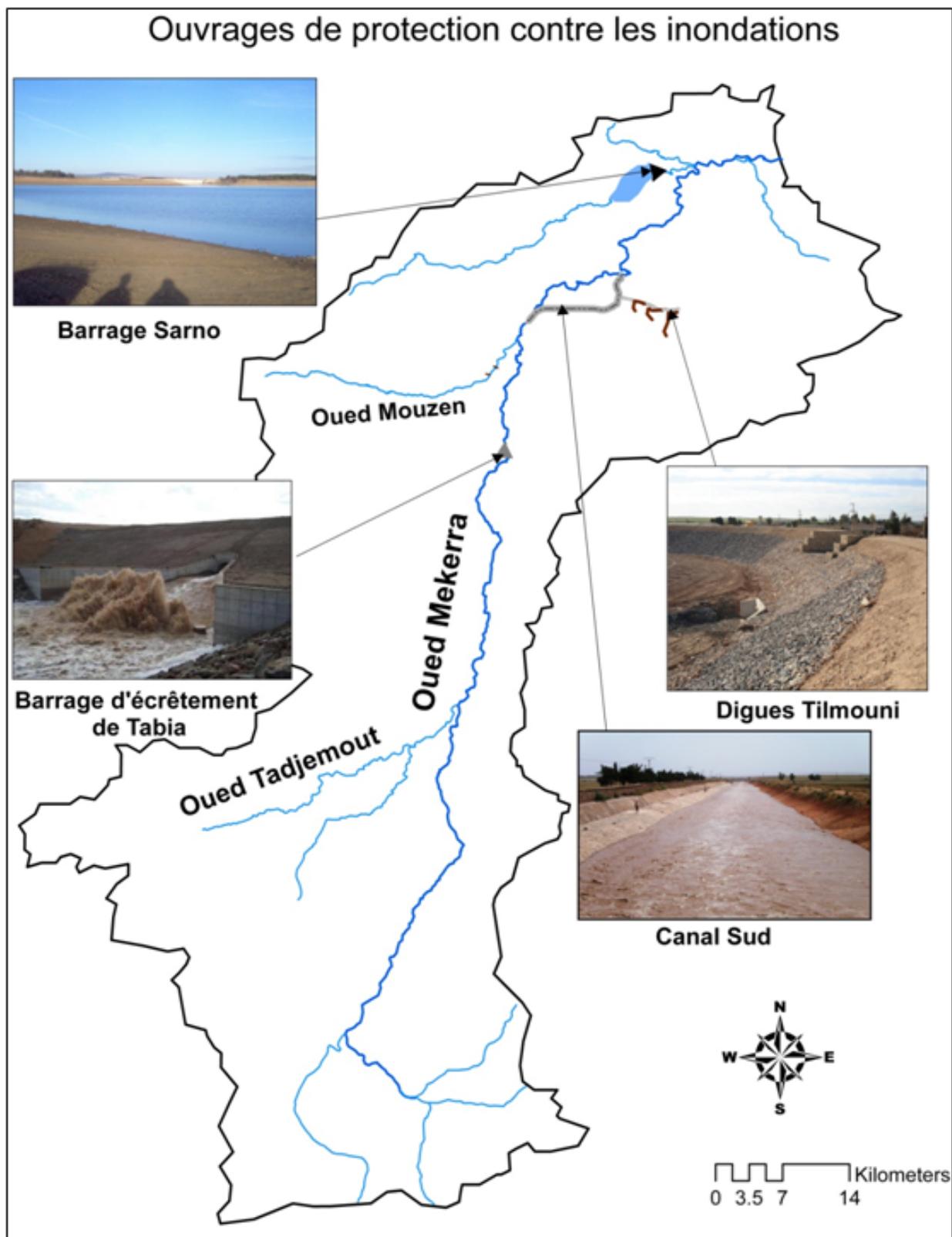


Figure A.6 – Localisations des principaux ouvrages hydrauliques de lutte contre les inondations dans le bassin versant de l'Oued Mekerra

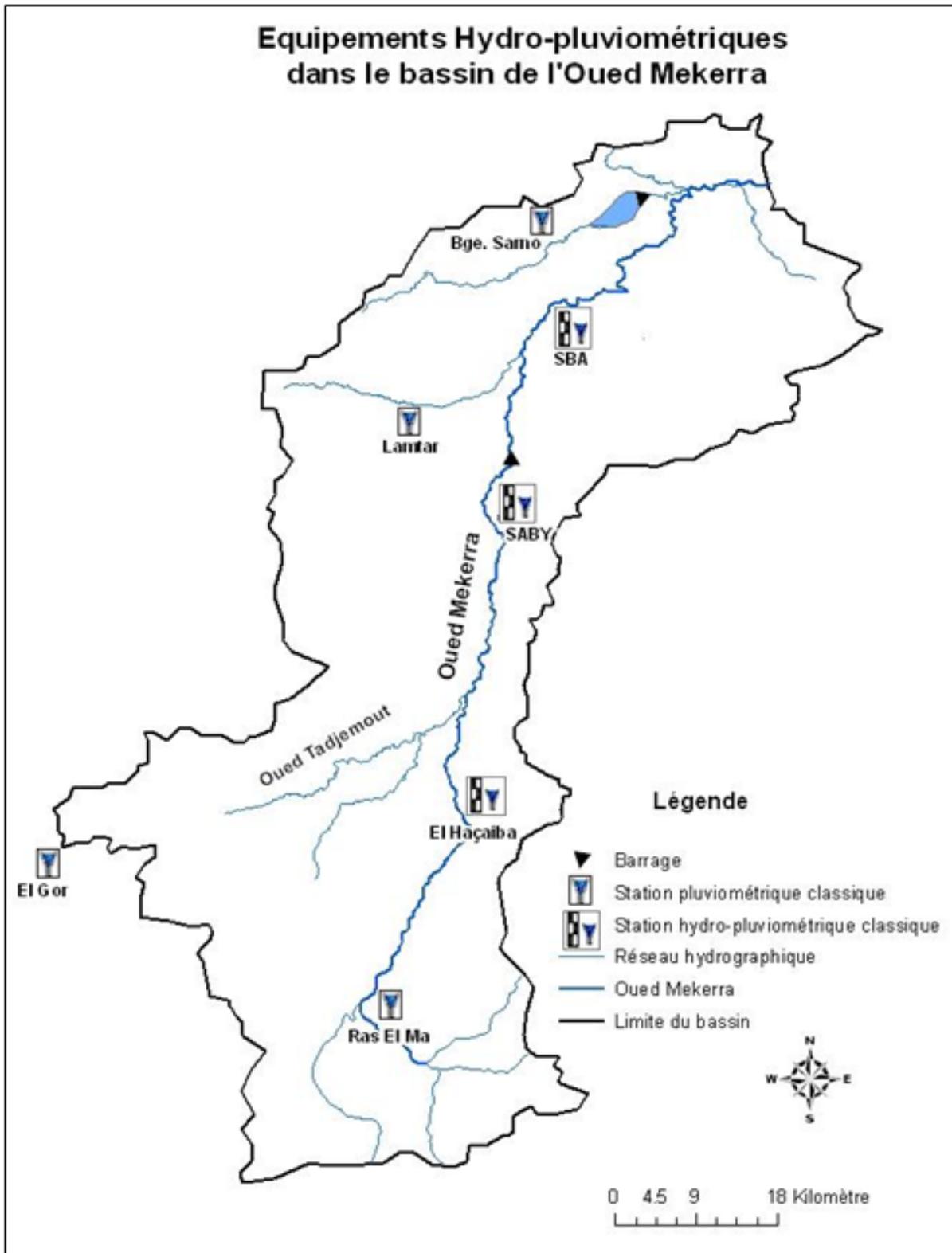


Figure A.7 – Localisations des stations hydro-pluviométriques du bassin versant de l'Oued Mekerra

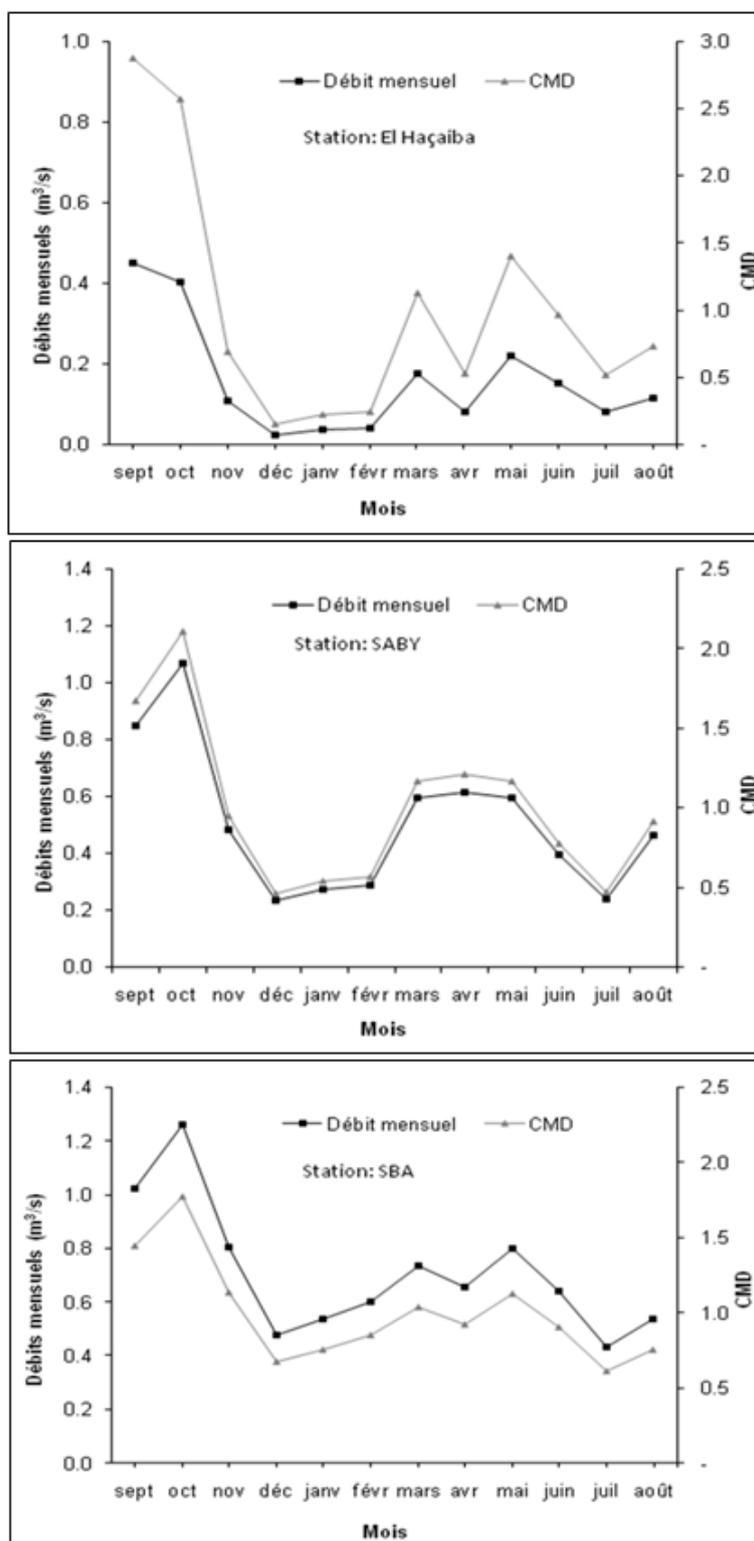


Figure A.8 – Activité hydrologique mensuelle le long de l'Oued Mekerra

Tableau A.1 – Caractéristiques des pluies et des débits sélectionnés pour la simulation avec MERCEDES

Evènements	SABY			Ras El Ma		El Haçaiba		El Gor		SBA	
	$Q_{j.max}$	$P_{j.max}$	P_{Tota}								
Sep/2003	19.5	16.5	16.5	5	11.6	8.8	21.8	23.3	26.1	0	0
Nov/2003	20.2	23.1	59.1	27.6	42.7	22.5	53.2	22.5	63.4	6.9	34.3
Dec/2003	1.80	24.1	53	13.6	22.7	14.8	49.2	0	0	23.6	51.9
Mar/2004	0.4	6.4	19.7	0	0	10.2	15.7	3.3	9.7	8	15.2
Avr/2004	11.8	25.5	38.6	27	56.6	18.6	39.2	8.2	21.8	27.5	33.9
Jui/2004	4	1	1.5	20	20	0.9	1.3	5.5	10.1	8.5	9.9
Aoû/2004	3.2	11	13	14	39	18.6	28.2	6.6	20	11.6	11.7
Oct/2004	1.8	16	37.8	9.5	11.4	8.5	27.2	5.7	23	14.5	45.5
Juil/2005	1.1	0	0	9.8	10.3	0	0	0.7	0.7	4	4
Oct/2005	3.4	14.9	41.3	16.4	42.9	32.6	64.3	15.4	48.7	7.6	29.2
Nov/2005	2.3	21.3	49.8	23	42.7	20.1	63.1	25.5	67	16.1	78.2
May/2006	87	8.3	26.9	20.5	29	25.6	34.3	11.5	24	9.7	22.9
Mar/2007	0.2	25.9	98	15	24.4	22.6	51	22.5	57.3	42.8	98.7
Nov/2007	21.9	16.2	47.9	0	0	12.8	32.4	15	31.2	22.7	55.7
Jan/2008	2.2	14.2	30.8	0	0	10.8	13.3	9.1	23.7	8	21.7
Fév/2009	3.5	17	34.3	0.2	9.7	18.6	21.6	38	64.9	7.5	27.5
May/2009	3.7	0	0	0	0	4.6	5.9	3.6	4	0.2	0.3
Oct/2011	1.3	23.3	38.3	0	7.3	22.8	49.1	15.8	37.7	16.1	26.7
Nov/2011	0.3	27.5	72.2	5.3	15	31.2	65.5	7.8	40.6	33.1	108
Avr/2012	0.6	10.3	41.8	17.8	49.1	18.5	72.6	17.6	37.6	19.2	41.4
Aoû/2012	0.4	0	0	0	0	2	3.5	8.7	18.4	0.7	0.7

$Q_{j.max}$: débit maximum journalier ; $P_{j.max}$: pluie maximale journalière ; P_{Tota} : pluie mensuelle totale

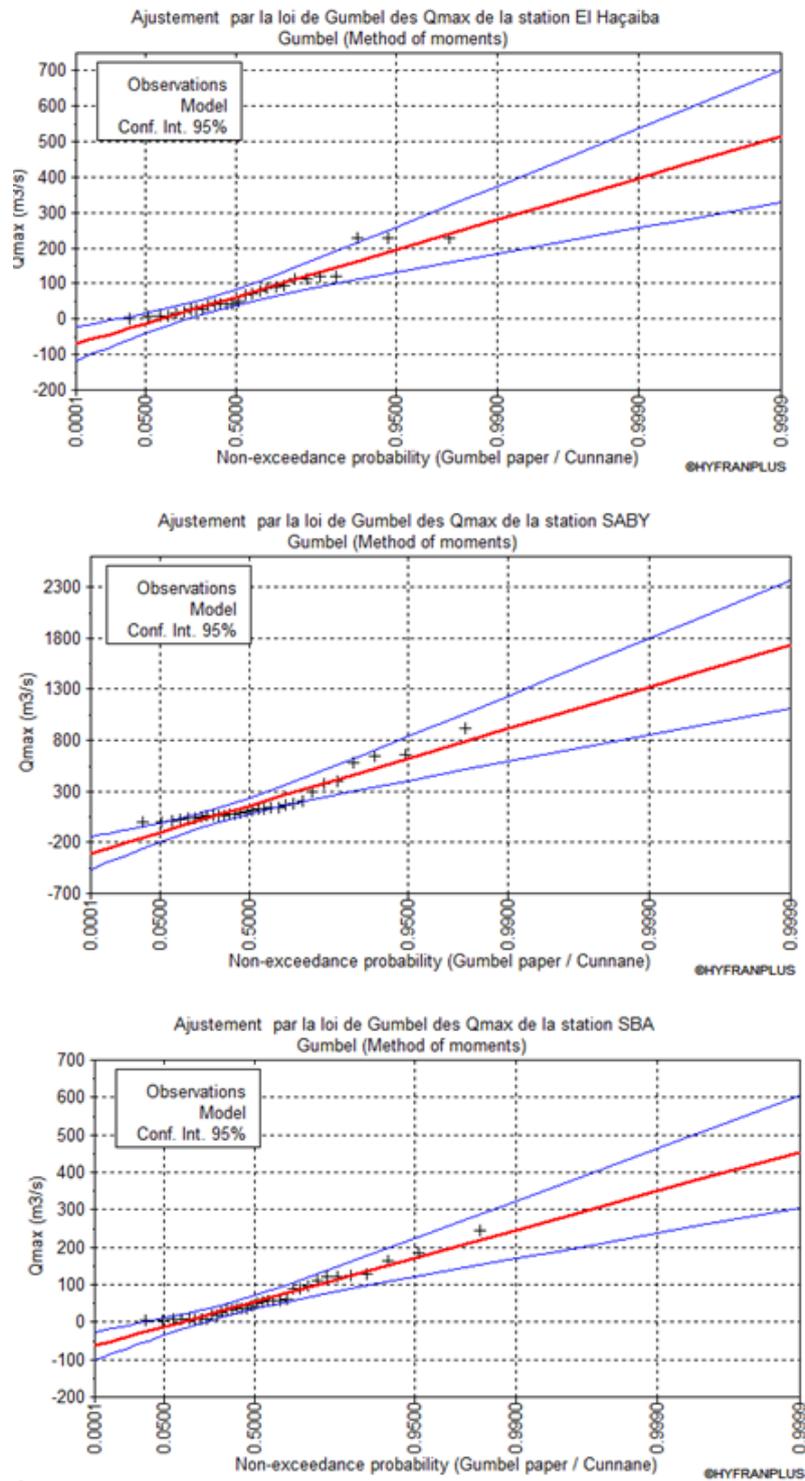


Figure A.9 – Ajustement par la loi de Gumbel des Q_{max} des trois stations jaugeages.

Bibliographie

- Abbott, M., J. Bathurst, J. Cunge, P. O'Connell, and J. Rasmussen (1986). An introduction to the european hydrological system - systeme hydrologique europeen, "she", 1 : History and philosophy of a physically-based distributed modelling system, and 2 : Structure of a physically-based distributed modelling system. *Journal of Hydrology* 87, 45–59. [66](#)
- Abdi, I. and M. Meddi (2015). Modélisation pluie-débit distribuée dans deux bassins versants de l'est de l'algerie. *Larhyss Journal* 23, 7–22. [5](#), [74](#)
- Abouabdillah, A. (2009). *Hydrological modeling in a data-poor Mediterranean catchment (Merquellil, Tunisia). Assessing scenarios of land management and climate change*. These de doctorat, Université de la Tuscia, Italie. [72](#)
- Abushandi, E. (2011). *Rainfall-Runoff Modeling in Arid Areas*. Thèse de doctorat, École des mines de Freiberg, Allemagne. [xiv](#), [4](#), [11](#), [53](#), [63](#), [64](#), [65](#), [66](#), [68](#), [70](#), [74](#), [92](#), [95](#)
- Achite, M. and M. Meddi (2005). Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride. cas du bassin versant de l'oued mina (nord- ouest algérien). *Revue des Sciences de l'eau*, 18, 37–56. [44](#)
- Albergel, J. (2003). *Le modèle hortonien. Genèse des crues et des inondations*. Paris, France : ENGREF. [57](#)
- Ambroise, B. (1999). *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Processus, facteurs, modèles*. Bucarest. [64](#), [65](#)

- Andréassian, V., J. Lerat, C. Loumagne, T. Mathevet, C. Michel, L. Oudin, and C. Perrin (2007). What is really undermining hydrologic science today? *Hydrological Processes* 21, 2819–2822. [91](#)
- Ardoin, B. (2004). *Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, France. [88](#)
- Arnold, J., R. Srinivasan, R. Muttiah, and J. Williams (1998). Large area hydrologic modeling and assessment - part 1 : Model development. *JAWRA* 34, 73–89. [4](#)
- Aste, J., F. Leone, and E. Leroi (1996). The evaluation of vulnerability to mass movements : towards a better quantification of landslide risks. *Revue de Géographie Alpine* 84(1), 35–46. [14](#)
- Audrey, B. (2013). *Conception de modèles de prévision des crues éclair par apprentissage artificiel*. Thèse de doctorat, l'Université Pierre et Marie Curie, Paris, France. [10](#), [11](#), [57](#), [64](#)
- Awal, R. (2003). Application of steady and unsteady flow model and gis for floodplain analysis and risk mapping : A case study of lakhandei river, nepal. Thèse de master, Water Resources Engineering, IOE, Université Tribhuvan, Kathmandu, Népal. [127](#)
- Ayenew, Y. (2008). *Rainfall-Runoff Modelling for Sustainable Water Resources Management : The Case of Gumara Watershed*. Thèse de doctorat, École universitaire des études supérieures, Addis Ababa, Éthiopie. [78](#), [95](#)
- Bahat, Y., T. Grodek, J. Lekach, and E. Morin (2009). Rainfall-runoff modeling in a small hyper-arid catchment. *Journal of Hydrology* 373, 204–217. [92](#)
- Ballais, J., S. Chave, N. Dupont, E. Masson, and M. Penven (2011). La méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables. *Géographie Physique et Environnement* 5, 1–168. [2](#)
- Barth, M. (2004). Neue medien in der umweltkommunikation. Rapport, INFU-Diskussionsbeiträge. [128](#)
- Bastidas, L., H. Gupta, S. Sorooshian, W. Shuttleworth, and Z. Yang (1999). Sensitivity analysis of a land surface scheme using multicriteria methods. *Journal of Geophysical Research* 104(D16), 19481–19490. [71](#)

- Batelaan, O., Z. Wang, and F. De Smedt (1996). Hydrogis 96. In I. Publ (Ed.), *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*, Volume 235, Vienna. [68](#)
- Bates, P. and A. De Roo (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology* 236, 54–77. [99](#)
- Beck, M. (1991). Forecasting environmental change. *Journal of Forecas* 10(1-2), 3–19. [124](#)
- Belagoune, F. (2012). Etude et modélisation des crues des cours d'eau en milieu semi-aride : cas des grands bassins versants 05, 06 et 07. Mémoire de magistère, Université D'Ouargla, Algérie. [50](#)
- Bell, F. (1979). *Precipitation*. In *Arid Land Ecosystem*, pp. 92–372. London : Cambridge University Press. [44](#)
- Beniston, M., D. Stephenson, O. Christensen, C. Ferro, C. Frei, S. Goyette, K. Halsnaes, T. Holt, K. Jylhä, B. Koffi, T. Semmler, and K. Woth (2007). Future extreme events in european climate : an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change* 81(1), 71–95. [17](#)
- Benkaci, A. and N. Dechemi (2004). Modélisation pluie-débit journalière par des modèles conceptuels et "boîte noire" ; test d'un modèle neuroflou. *Hydrological Sciences Journal* 49, 919–930. [4](#), [55](#), [74](#)
- Bentura, P. and C. Michel (1997). Propagation de crue dans un canal large par une méthode combinant délai et stockage dans un réservoir quadratique. *Hydrological Sciences Journal* 42(2), 169–189. [80](#)
- Benyahia, M., M. Bouzidi, K. Moueddene, B. Hallouche, H. Meliani, and F. Dernouni (2011). Compréhension de l'inondabilité de la plaine de sidi bel abbes par l'oued mekerra (ouest algerien). *Revue scientifique et Technique LJEE N°18*, 27–46. [39](#), [50](#)
- Bertin, J. (1983). Les fondements de la graphique. Rapport. [128](#)
- Beschta, R., M. Pyles, A. Skaugset, and C. Surfleet (2000). Peak flow responses to forest practices in the western cascades of oregon, usa. *Journal of Hydrology* 233, 102–120. [94](#)
- Bessière, H. (2008). *Assimilation de données variationnelle pour la modélisation hydrologique distribuée des crues à cinétique rapide*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France. [xv](#), [26](#), [61](#), [63](#), [64](#), [65](#), [66](#), [70](#), [71](#), [92](#)

- Beven, K. (1989). Changing ideas in hydrology : the case of physically based models. *Journal of Hydrology* 105, 157–172. [68](#), [72](#)
- Beven, K. (2001). *Rainfall runoff modeling*. Number 2 in ISBN 978-0-470-71459-1. London, Angleterre : John Wiley & Sons. [5](#), [61](#)
- Beven, K. and M. Kirkby (1979). A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* 24, 43–69. [4](#), [68](#)
- Borga, M. (2002). Accuracy of radar rainfall estimates for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 267, 26–39. [22](#)
- Borsali, A., A. Bekki, and O. Hasnaoui (2005). Aspect hydrologique des catastrophes naturelles " inondation, glissement de terrain " étude d'un cas : Oued mekerra (sidi bel abbès). *Risque & Environnement*, 1–8. [2](#), [50](#), [51](#), [53](#)
- Bouanani, A. (2004). *Hydrologie, transport solide et modélisation, Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW - Algérie)*. Thèse doctorat d'état, Université de Tlemcen, Algérie. [50](#)
- Bouasria, S., M. Khalladi, and A. Khaldi (2010). Ralentissement dynamique des inondations au niveau d'un bassin versant de l'ouest algérien : cas de l'oued mekerra (sidi bel abbes). *European Journal of Scientific Research* 43, 172–182. [19](#)
- Boudhraa, H. (2007). *Modélisation pluie-débit a base géomorphologique en milieu semi-aride rural Tunisien : Association d'approches directe et inverse*. Thèse de doctorat, Institut National Agronomique, Tunisie. [74](#)
- Boughton, W. and F. Chiew (2007). Estimating runoff in ungauged catchments from rainfall, pet and the awbm model. *Environmental Modelling & Software* 22, 476–487. [67](#)
- Boulay, E. (2011). Etude et modélisation des phénomènes karstiques du bassin versant du rognon. Mémoire master 2, Université de Pierre et Marie Curie, France. [5](#)
- Bourrelier, P. (1997). La prévention des risques naturels. Rapport d'évaluation, Paris, France. [16](#)
- Bouvier, C. (1994). Mercedes : principes du modèle et notice d'utilisation (features of the model and tutorial). Rapport interne, ORSTOM. [74](#)

- Bouvier, C. (2004). *De la pluie à l'inondation : Contribution à la compréhension et à la prévision des événements extrêmes sur des petits bassins versants tropicaux et méditerranéens*. Habilitation à diriger des recherches, Ecole doctorale Sciences de la Terre et de l'Eau, Université de Montpellier II, Pris, France. 4
- Bouvier, C. and F. Delclaux (1996). Athys : a hydrological environment for spatial modelling and coupling with a gis, proceedings hydrogis96. *IAHS publication 235*, 19–28. 5
- Bouvier, C., F. Delclaux, and A. Crespy (1996). Athys : atelier hydrologique spatialisé. *IAHS 238*, 425–435. 23, 61, 75
- Bouvier, C., G. Fuentes, and D. R. (1994). Mercedes : un modèle hydrologique d'analyse et de prévision de crues en milieu hétérogène (a hydrological distributed model for flood analysis and forecast for heterogeneous watersheds). In *23emes Journées de la SHF Crues et Inondations*, Nîmes, France. 68, 74
- Box, G. and G. Jenkins (1970). *Time series analysis, Forecasting, and control*. San Francisco, USA : Halden-day. 65
- Boyle, S., K. Tsanis, and P. Kanaroglou (1998). Developing geographic information systems for land use impact. assessment in flooding conditions. *Water Resources Planning & Management 124*(2), 89–98. 17
- Carter, J., I. White, and J. Richards (2009). Sustainability appraisal and flood risk management. *Environmental Impact Assessment Review 29*(1), 7–14. 15
- Castillo, V., A. Gomez-Plaza, and M. Martinez-Mena (2003). The role of antecedent soil water content in the runo? response of semiarid catchements : a simulation approach. *Journal of Hydrology 284*, 114–130. 53
- Chaponniere, A. (2005). *Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride. Cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain)*. Thèse de doctorat, Institut National Agronomique, Paris-Grignon, France. 46, 53, 61
- Cheikhounis, G., D. Belhaï, J. Chateain, M. Hellel, D. Machane, B. Samet, and M. Habi (2011). Évaluation du phénomène d'inondation dans la plaine orientale de la mitidja (oued el hamiz et oued réghaïa alger-algérie). *Bulletin du Service Géologique National 12*, 199–212. 2
- Chocat, B. (1997). *Encyclopédie de l'Hydrologie Urbaine* (Editions Lavoisier ed.). France. 64

- Chou, C., C. Neelin, J. Chen, and J. Tu (2009). Evaluating the "rich-get-richer" mechanism in tropical precipitation change under global warming. *Journal of Climate* 22(8), 1982–2004. [45](#)
- Chow, V., D. Maidment, and L. Mays (1988). *Applied Hydrology*. New York, USA : McGraw Hill. [xiv](#), [64](#), [65](#), [107](#)
- Clarke, R. (1973). A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. *Journal of Hydrology* 19(1), 1–20. [67](#), [71](#)
- Cloke, H. and F. Pappenberger (2009). Ensemble flood forecasting : A review. *Journal of Hydrology* 375, 613–626. [73](#), [91](#)
- Cognard-Plancq, A., V. Marc, J. Didon-Lescot, and M. Normand (2001). The role of forest cover on streamflow down sub-mediterranean mountain watersheds : a modelling approach. *Journal of Hydrology* 254(1-4), 229–243. [94](#)
- Collier, C. (2007). Flash flood forecasting : what are the limits of predictability? *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 133, 3–23. [91](#)
- CORFU (2014). Flood impact assessment literature review. Collaborative Project in the FP7 Environment Programme, 7, European Community. [20](#)
- Coustau, M. (2011). *Contribution à la prévision des crues sur le bassin du Lez : modélisation de la relation pluie-débit en 15 zone karstique et impact de l'assimilation de débits*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, Montpellier, France. [17](#), [23](#)
- Covello, V., D. Winterfeldt, and P. Slovic (1987). *Communicating scientific information about health and environmental risks : problems and opportunities from a social and behavioral perspective*. New York, USA : Plenum Press,. [121](#)
- Crampton, J. (2001). Maps as social constructions : power, communication and visualization. *Progress in Human Geography* 25(2), 235–252. [126](#)
- Şen, Z. (2008). *Wadi hydrology* (1 ed.). CRC Press. [57](#), [74](#), [91](#)
- Cunderlik, J. and S. Simonovic (2010). Hydrologic models for inverse climate change impact modeling. In *18th Canadian Hydro-technical Conference*, Manitoba, Canada. [95](#)

- Daget, P. (1980). Un élément actuel de la caractérisation du monde méditerranéen, le climat. In *Evolution et la caractérisation de la flore et de la végétation du Circum*, Montpellier, France, pp. 101–120. [43](#)
- Dai, A. (2013). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change* 3(1), 52–58. [43](#), [45](#)
- Dauphiné, A. (2001). *Risques et catastrophes, Observer Spatialiser Comprendre Gérer*. Paris, France : Armand Colin. [14](#)
- Day, J. (1990). Environmental correlates of aquatic faunal distribution in the namib desert. *Transvaal Monograph* 7, 99–107. [52](#)
- Debo, T. and A. Reese (2002). *Municipal Stormwater Management*. Lewis publishers. [xviii](#), [106](#)
- Dechemi, N. and H. Chambaz (1994). La prévision des crues du bassin versant de l'oued dis(sebaou) par la méthode dpft. *Revue des sciences de l'eau* 7, 331–342. [3](#)
- Dendrou, S. (1982). Overview of urban stormwater models. In D. Kibler (Ed.), *Urban Stormwater Hydrology*, Volume 7, Washington, USA, pp. 219–247. American Geophysical Union. [70](#)
- Dennis, A., R. Fuller, and J. Valacich (2008). Media, tasks, and communication processes : A theory of media synchronicity. *MIS quarterly* 32(3), 575–600. [122](#)
- D'Ercole, R. (1994). La vulnérabilité des siciétés et des espace urbanisés : Concepts, typologie, modèles d'analyse. *Revue de géographie Alpine* 82(4), 87–96. [14](#)
- DGPC (2010). Les inondations en algérie. Rapport, Direction Générale De La Protection Civile, Algérie. [2](#)
- Diskin, M. and L. Lane (1972). A basinwide stochastic model of ephemeral stream runoff in south-estern arizona. *Scientific Hydrology Bulletin* 17, 61–76. [46](#), [91](#)
- Djellouli, Y. (1990). Conséquence de la sécheresse des deux dernières décennies sur les écosystèmes naturels algériens. Publication, Association Internationale de Climatologie, Aix en provenance, France. [43](#)
- Dooge, J. (1977). *Mathematical Models for Surface Water Hydrology*, Chapter Problems and Methods of Rainfall-Runoff Modeling, pp. 71–108. New York, USA : John Wiley & Sons. [70](#)

- Dragan, S. and P. Slobodan (2009). Vulnerability of infrastructure to climate change. Background report 1 - hydrique modeling and floodplain mapping. city of london, Université de Western Ontario, Canada. [101](#)
- Drobot, S. and D. Parker (2007). Advances and challenges in flash flood warnings. *Environmental Hazards* 7, 173–178. [3](#)
- Duband, D. (1999). Réflexion actuelle sur la prévision hydrométéorologique. la gestion des risques liés aux inondations rapides et lentes. In *Colloque d'Hydrotechnique*, Volume 161ième session du Comité scientifique et Technique, Paris, France, pp. 65–76. Publications Société Hydrotechnique. [4](#), [64](#)
- Dubrueil, P. (1986). Review of relationships between geophysical factors and hydrological characteristics in the tropics. *Journal of Hydrology* 87, 201–222. [95](#)
- Edijatno and C. Michel (1989). Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche* 2, 113–121. [65](#)
- Eleutério, J. (2012). *Flood risk analysis : impact of uncertainty in hazard modelling and vulnerability assessments on damage estimations*. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, Strasbourg, France. [15](#), [17](#)
- Esteves, M., X. Faucher, S. Galle, and M. Vauclin (2000). Overland flow and infiltration modelling for small plots during unsteady rain : numerical results versus observed values. *Journal of Hydrology* 228(3-4), 265–282. [57](#)
- Estupina, 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 de doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse, France. [4](#), [17](#), [55](#), [58](#), [64](#)
- Excimap (2007). *Handbook on good practices for flood mapping in Europe*. European Exchange Circle on Flood Mapping. [131](#), [132](#)
- Faugères, L. and J. Noyelle (1992). Risques naturels, paysages et environnement en france. *L'Information Géographique* 56, 194–209. [16](#)
- Fehri, N. (2014). L'aggravation des risques d'inondation en tunisie : éléments de réflexion. *Géographie, Physique et environnement* 8, 75–149. [13](#)

- Feldman, A. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS* (Technical Reference Manual ed.). USA : U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC. [95](#)
- Fischhoff, B. (1995). Risk perception and communication unplugged : twenty years of process. *Risk Analysis* 15(2), 137–145. [125](#)
- Fleming, G. (2002). How can we learn to live with rivers? the findings of the institution of civil engineers presidential commission on flood-risk management. *Philosophical Transactions* 360, 1527–1530. [120](#)
- Fleming, M. and W. Scharffenberg (2012). Hydrologic modeling system (hec-hms) : New features for urban hydrology. Rapport technique, Hydraulic Engineer : USACE Hydrologic Engineering Center, USA. [95](#)
- Flügel, W. (1995). Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modeling using prms/mms in the drainage basin of the river bröl. germany. *Hydrological Processes* 9, 423–436. [83](#)
- Fouchier, C. (2010). *Développement d'une méthodologie pour la connaissance régionale des crues*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II Sciences Et Techniques Du Languedoc, France. [14](#), [21](#), [23](#), [29](#), [59](#), [61](#)
- Foufoula-Georgio, E. and W. Krajewski (1995). Recent advances in rainfall modeling, estimation, and forecasting. Rapport national 1125-1137, International Union of Geodesy and Geophysics, USA. [35](#)
- Fourmigue, P. and J. Lavabre (2005). Flood forecasting with GR3H conceptual rainfall-runoff model. adaptability to rainfall uncertainties. *Revue des sciences de l'eau* 18(1), 87–102. [3](#), [4](#), [88](#), [92](#)
- Franchini, M. and M. Pacciani (1991). Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology* 122, 161–219. [72](#)
- Freezb, R. (1971). Three-dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basi. *Water Ressources Research* 7(2), 347–366. [66](#)
- Frewer, L. (2004). The public and effective risk communication. *Toxicology Letters* 149(1-3), 391–397. [125](#)

- Fuhrmann, S. and W. Pike (2005). *Exploring Geovisualization*, Chapter User-centered design of collaborative geovisualization tools, pp. 591–609. Elsevier, UK. [127](#)
- Furusho, C. (2008). Etude du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant periurbain : La chezine. Thèse de master steu, Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines, Nantes, France. [66](#)
- Garambois, P. (2012). *Étude régionale des crues éclair de l'arc méditerranéen français ; élaboration de méthodologies de transfert à des bassins versants non jaugés*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse,, France. [23](#)
- Garnier, P. and S. Rode (2006). Construire l'acceptabilité du risque, une priorité pour les communes? *L'information géographique* 70(1), 25–40. [10](#)
- Gayl, I. (1983). A new real-time weather monitoring and flood warning approach. Master de science, Université de Colorado, USA. [17](#)
- Gerard, L. (2010). Sensibilité des performances d'un modèle de prévision des crues au critère de calage. Stage de fin de 2ème année, Institut National Polytechnique, Toulouse, France. [68](#), [71](#), [88](#)
- Gheith, H. and M. Sultan (2002). Construction of a hydrologic model for estimating wadi runoff and groundwater recharge in the eastern desert, egypt. *Journal of Hydrology* 263, 36–55. [13](#)
- Giddens, A. (1994). *In Reflexive modernization. Politics, tradition and aesthetics in the modern social order*, Chapter Risk, trust and reflexivity, pp. 97–184. Cambridge, Angleterre : Polity Press. [124](#)
- Gigerenzer, G., R. Hertwig, E. van den Broek, B. Fasolo, and K. Katsikopoulos (2005). A 30% chance of rain tomorrow : how does the public understand probabilistic weather forecasts? *Risk analysis* 25(3), 623–629. [123](#)
- Gnouma, R. (2006). *Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron*. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, France. [xiv](#), [62](#)
- Gough, J. (2000). Perceptions of risk from natural hazards in two remote new zealand communities. *The Australasian Journal of Disaster and Trauma Studies* 2. [123](#)

- GPC (1986). *Guide de prévision des crues* (Tome 1 ed.). France : Direction de l'Eau et de la prévention des pollutions et des risque. [10](#), [22](#), [26](#), [131](#)
- Green, H., K. Beven, K. Buckley, and P. Young (1994). *Mixing and Transport in the Environment*. [15](#)
- Göttle, A. (2012). Water management in mountainous regions. Lecture notes, Chair of Water Resources Engineering, Université technique de Munich, Allemagne. [94](#)
- Gupta, V., S. Sorooshian, and P. Yapo (1998). Towards improved calibration of hydrological models : multiple and noncomensurable measures of information. *Water Resources Research* *34*, 751–763. [62](#)
- Haan, C., H. Johnson, and D. Brakensiek (1982). Hydrologic modeling of small watersheds. ASAE Monograph 5, American Society of Agricultural Engineers, Michigan, USA. [61](#), [69](#)
- Halwatura, D. and M. Najim (2013). Application of the hec-hms model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental Modelling & Software* *46*, 155–162. [78](#), [93](#)
- Hamadache, B., A. Terchi, and O. Brachemi (2002). Study of the meteorological situation which affected the west and the center of algeria in general and bab-el-oued in particular on 10 november 2001. In *Proceedings of 4th EGS Plinius Conference on Mediterranean storms*. [19](#)
- HEC (1998). *Flood Hydrograph Package* (User's Manual ed.). USA : Hydrologic Engineering Center. US Army Corps of Engineers. [67](#)
- Horton, R. (1933). The role of infiltration in the hydrological cycle. *Transactions - American Geophysical Union (JournalSeek)* *14*, 446–460. [56](#), [57](#)
- Höppner, C., M. Bründl, and M. Buchecker (2010). *Risk Communication and Natural Hazards*. Switzerland : Birmensdorf. [120](#)
- Hsu, K., V. Gupta, and S. Sorooshian (1995). Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process. *Water Resources Research* *31*, 2517–2530. [65](#)
- Hudson, N. (1981). *Soil Conservation*. London. [57](#)
- Hulme, M., R. Doherty, T. Ngara, M. New, and D. Lister (2001). African climate change : 1900-2100. *Climate Research* *17*(2), 145–168. [43](#)

- Hyung-II, E. and P. Slobodan (2009). City of london : Vulnerability of infrastructure to climate change. Background Report 2 - Climate and Hydrologic Modeling 068, Université de Western Ontario, Canada. [103](#)
- Indarto (2002). *Découpages spatiaux et conséquences sur le bilan hydrologique - Application au bassin de l'Orb à travers une démarche de modélisation hydrologique distribuée*. Thèse de doctorat, École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, Montpellier, France. [68](#)
- INERIS (2003). Evaluation des incertitudes associées aux méthodes géostatistiques. Rapport technique, Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air. [14](#)
- IPCC (2007). Climate change 2007 : the physical science basis. Rapport, Cambridge University Press, Cambridge, Cambridge. [17](#)
- Izambart, G. (2011). L'apport de la pratique de retour d'expérience pour comprendre la vulnérabilité face aux inondations. Mémoire master 1, Université de Toulouse II, France. [11](#), [15](#), [16](#)
- Jain, M., U. Kothyari, and K. Ranga Raju (2004). A gis based distributed rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology* : 299, 107–135. [4](#), [5](#)
- Jain, M. and V. Singh (2005). Dem-based modeling of surface runoff using diffusion wave equation. *Journal of Hydrology* 302, 107–126. [67](#)
- Jakeman, A. and G. Hornberger (1993). How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water Resources Research* 29, 37–49. [67](#)
- Jenson, S. and J. Domingue (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic system analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 54 (11), 1593–1600. [85](#)
- Jonkman, S. and I. Kelman (2005). analysis of the causes and circumstances of flood disaster deaths. *Disasters* 29, 75–97. [11](#)
- Jordan, F. (2007). *Modèle de prévision et de gestion des crues - optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue*. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse. [23](#)
- Kadi, M. (1992). Quelques aspects de la sécheresse en afriques du nord et dans le bassin méditerranéen. In *les climats tropicaux et leur évolution*, France, pp. 171–198. CNES. [44](#)

- Katz, R. and B. Brown (1992). Extreme events in a changing climate : variability is more important than averages. *Climatic change* 21(3), 289–302. 17
- Kedem, B., L. Chiu, and Z. Karni (1990). An analysis of the threshold method for measuring area-average rainfall. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 29, 3–20. 91
- Ketrouci, K. (2014). *Application de modèles hydrologiques dans l'estimation des crues extrêmes en Algérie*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Algérie. 2, 18
- Kettab, A. (2001). Les ressources en eau algérie : Stratégie, enjeux et visions. *Désalination* 136, 25–33. 48
- Keys, C. and M. Cawood (2007, 6-9 October). Why flood warnings fail too often. In Warranambool (Ed.), *5th Flood Management Conference*. 3
- Kingumbi, A. (2006). *Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation. Cas du Merquellil en Tunisie centrale*. Thèse de doctorat, Institut National d'Ingénieur, Tunisie. 59
- Kitanidis, P. and R. Bras (1980). Real-time forecasting with a conceptual hydrologic model. analysis of uncertainty. *Water Resources Research* 16(6), 1025–1033. 63
- Köppen, W. (1884). *The thermal zones of the earth according to the duration of hot, moderate and cold periods and to the impact of heat on the organic world*. -*Mete-oro. Z.* 1, pp. 351–360. 43
- Lahlah, S. (2004, 15/16/décembre 2004). Les inondations en algérie. In *Actes des Journées Techniques/Risques Naturels*, Batna, Algérie, pp. 43–57. 13, 19
- Lalo, A. (2000). Alerting the population in emergency plans : examples of local public policy in provence. *Journal of hazardous materials* 78(1-3), 281–301. 125
- Lane, L. and K. Renard (1971). Evaluation of a basin-wide stochastic-model for ephemeral runoff from semi-arid watersheds. *Transactions of the ASABE* 15(2), 280–283. 63
- Lange, J., C. Liebundgut, and A. Schick (2000). The importance of single events in arid zone rainfall-runoff modelling. *Physics and Chemistry of the Earth art B-Hydrology Oceans and Atmosphere* 25, 673–677. 91

- Larousse, C. (2012). *Le petit Larousse illustré-2012* (1 ed.). 14
- Lavabre, J., C. Fouchier, Y. Gregoris, and A. Faure-Soulet (2003). Mise en œuvre d'un modèle régional pour la prédétermination des crues,. In *SIRNAT-forum JPRN, Les journées pour la prévention des risques naturels*, Orléans. 67
- Le, X. (2008). *Variabilité des processus hydrologiques entrant dans le mécanisme de la genèse des crues sur les bassins à cinétique rapide*. thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse. 4, 51, 68, 75
- Lindley, S., J. O'Neill, J. Kandeh, N. Lawson, R. Christian, and M. O'Neill (2011). *Climate change, justice and vulnerability*. USA : York. 14
- Linsley, R. and N. Crawford (1965). Coordination of precipitation and streamflow networks, symposium on the design of hydrological networks. *IAHS, Québec*, 617–629. 57
- Lo, C. and A. Yeung (2005). Concepts and techniques in geographic information systems. Pearson education, New Jersey, USA. 82, 109
- Loumagne, C. (1988). *Prise en compte d'un indice de l'état hydrique du sol dans la modélisation pluie-débit*. Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud (Orsay), France. 65
- Lu, J. (2006). *Modeling Hydrologic Responses to Forest Management and Climate Change at Contrasting Watersheds in the South-eastern United States*. Thèse de doctorat, North Carolina State University, Raleigh, NC, USA. 71
- Ludlum, D. (1995). National audubon society field guide to north american weather. Rapport, Alfred Knopf, A., New York, USA. 11
- Makoka, D. and M. Kaplan (2005). Poverty and vulnerability : An interdisciplinary approach. rapport, Université de Bonn. 16
- Manandhar, B. (2010). Flood plain analysis and risk assessment of lothar khola. Mémoire de master, Université de Tribhuvan, Pokhara, Nepal. 16
- Marchandise, A. (2007). *Caractérisation des processus de formation des crues éclair en région méditerranéenne. Application à la prévision de crues*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, France. 5, 40, 85

- Maref, N. (2010). Estimation du transport solide dans les cours d'eau à écoulement temporaire. étude du cas du bassin versant de l'oued mekerra (sidi bel abbes). Mémoire de megister, Université de Tlemcen, Algérie. [42](#), [43](#), [48](#), [51](#), [52](#)
- Matei, M. (2012). *Runoff modeling using GIS. Application in torrential basins in the Apuseni Mountains*. These de doctorat, université Technique de Cluj-Napoca, Roumanie. [68](#)
- Maxwell, T. (2003). The public need to know : emergencies, government organizations, and public information policies. *Government Information Quarterly* 20(3), 233–258. [124](#)
- Menad, W. (2012). *Risques de crue et de ruissellement superficiel en métropole méditerranéenne : cas de la partie ouest du Grand Alger*. Thèse de doctorat, Université Paris-Diderot, Paris, France. [43](#)
- Messner, F., E. Penning-ROwsell, C. Green, V. Meyer, S. Tunstall, and A. Van Der Veen (2007). *Evaluating flood damages : guidance and recommmendations on principles and methods*. PROJECT, F. [2](#), [15](#)
- Milly, P. and P. Eagleson (1988). Effect of storm scale on surface runoff volume. *Water Resources Research* 24(4), 620–624. [47](#)
- Mishra, S. and V. Singh (2003). *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*. Dordrecht, Netherland : Kluwer Academic Publishers. [78](#)
- Moel, H., D. Alphen, J. van, and J. Aerts (2009). Flood maps in europe-methods, availability and use. *Natural Hazards and Earth System Science* 9(2), 289–301. [129](#), [131](#)
- Molinari, D. and J. Handmer (2011). A behavioural model for quantifying flood warning effectiveness. *Journal of Flood Risk Management* 4, 23–32. [12](#)
- Monmonier, M. (1993). Mapping it out. In M. Peterson (Ed.), *Maps and the Internet : an introduction*. In *Maps and the Interne*, London, Angleterre, pp. 1–16. The University of Chicago Press : Oxford : Elsevier Science. [128](#)
- Moreda, F. (1999). *Conceptual rainfall - runoff models for different time steps with special consideration for semi-arid and arid catchments*. These de doctorat, Université Vrije Brussels, Belgique. [74](#)
- Morel-Seytoux, H. (1978). Derivation of equations for variable rainfall infiltration. *Water Resources Research* 14(4), 561–568. [66](#)

- Morin, J. and Y. Benyamini (1977). Rainfall infiltration into bare soils. *Water Resources Research* (8), 13–17. [93](#)
- Moulin, L. (2007). *Prévision des crues rapides avec des modèles hydrologiques globaux. Application aux bassins opérationnels de la Loire supérieure : évaluation des modélisations, prise en compte des incertitudes sur les précipitations moyennes spatiales et utilisation de prévisions météorologiques*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Paris, France. [10](#), [11](#), [17](#), [21](#), [23](#), [60](#)
- Moussu, F. (2011). Prise en compte du fonctionnement hydrodynamique dans la modélisation pluie-débit des systèmes karstiques. Thèse upmc, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France. [66](#)
- Muhammad, A., W. Muhammad, A. Jae-Hyun, and K. Tae-Woong (2015, 2010). Improved runoff estimation using event-based rainfall-runoff models. *Water Ressources Management* 29, 1995. [4](#), [75](#)
- Musy, A. (2005). *Cours d'hydrologie générale*. <http://echo.epfl.ch/e-drologie/> : Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. [46](#), [50](#), [55](#), [59](#)
- Musy, A. and C. Higy (1998). *Hydrologie appliquée*. Suisse : Ecole Polytechnique Fédérale de lausanne. [61](#)
- Nash, J. and J. Sutcliffe (1970). River flow forecasting through conceptual models. part i - a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290. [73](#), [87](#), [88](#)
- Nicholson-Cole, S. (2005). Representing climate change futures : a critique on the use of images for visual communication. *Computers, Environment and Urban Systems* 29(3), 255–273. [126](#)
- Obled, C., I. Zin, and B. Hingray (2009). Choix des pas de temps et d'espace pour des modélisations parcimonieuses en hydrologie des crues. *la Houille Blanche* 5, 81–87. [67](#)
- O'Connell, P. and R. Clarke (1981). Adaptative hydrological forecasting - a review. *Hydrological Sciences Bulletin* 26(2), 179–205. [63](#)
- ONU (2004). Guidelines for reducing flood losses. Rapport de synthèse, Organisation des Nations Unies, New York, USA. [2](#), [18](#)
- O'Riordan, T. (1990). *Hazards and the communication of risk*, Chapter Hazard and risk in themodern world : political models for programme design. Angleterre : Gower Technical. [125](#)

- Osborn, H. and R. Hickok (1968). Variability of rainfall affecting runoff from a semiarid rangeland watershed. *Water Resources Research* 4, 199–203. [63](#)
- Oufella, O. and B. Touaïbia (2004). Contribution à la cartographie des zones "inondabilié " cas de la ville de sidi bel abbès. *Journal de l'eau et de l'environnement*, 56–62. [50](#), [51](#)
- Oujbbour, B. (2015). Annonce de crue et la mise en place d'un système d'alarme dans le bassin de guelmim. Mémoire de master sciences et techniques, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Maroc. [18](#)
- Pappenberger, F., K. Scipal, and R. Buizza (2008). Hydrological aspects of meteorological verification. *Atmospheric Science Letters* 9, 43–52. [96](#)
- Payraudeau, S. (2002). *Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens*. Thèse de doctorat, ENGREF, Montpellier, France. [69](#)
- Pellarin, T., G. Delrieu, G. Saulnier, H. Andrieu, B. Vignal, and J. Creutin (2002). Hydrologic visibility of weather radar systems operating in mountainous regions : case study for the ardèche catchment (france). *Journal of Hydrometeorology* 3, 539–555. [22](#)
- Perrin, C., C. Michel, and V. Andréassian (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 279(1-4), 275–289. [64](#)
- Pingel, N., C. Jones, and D. Ford (2005). Estimating forecast lead time. *Natural Hazards Review* 6, 60–66. [24](#)
- Ponce, V. and R. Hawkins (1996). Runoff curve number : Has it reached maturity ? *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE* 1(1), 11–19. [79](#)
- PPR (1997). *Plans de prévention des risques naturels* (ISBN 2-11-004354-7 ed.). Paris : Guide méthodologique. [14](#)
- Pushpalatha, R. (2013). *Low-flow simulation and forecasting on French river basins : a hydrological modelling approach Simulation et prévision des étiages sur des bassins versants français : Approche fondée sur la modélisation hydrologique*. Thèse de doctorat, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), France. [39](#), [40](#)
- Ramos, M., J. Thielen, and A. Roo (2009). Prévision hydrologique d'ensemble et alerte avec le système européen d'alerte aux crues (efas) : cas des crues du bassin du danube en août 2005. Volume 5, Paris, France. Tanguy, J.M. [61](#)

- Randrianasolo, R. (2009). Evaluation de la qualité des prévisions pour l'alerte aux crues. Mémoire de master 2, Université Pierre-et-Marie-Curie, Paris, France. [2](#), [96](#)
- Rao, S. (1978). *Engineering Optimization : Theory and applications*. John Wiley & Sons. [87](#)
- Reed, S., J. Schaake, and Z. Zhang (2007). A distributed hydrologic model and threshold frequency-based method for flash flood forecasting at ungauged locations. *Journal of Hydrology* *337*, 402–420. [61](#)
- Refsgaard, J. and B. Storm (1996). *Distributed Hydrological Modelling*, Chapter Construction, calibration and validation of hydrological models, pp. 41–54. Netherlands : Kluwer Academic Publishers. [64](#), [71](#), [72](#)
- Reisberg, D. (2001). *Cognition : Exploring the science of the mind* (2 ed.). USA. [128](#)
- Renard, K. and R. Keppel (1966). Hydrographs of ephemeral streams in the southwest. *Journal of the Hydraulics Division* *92*(HY2), 33–52. [46](#), [91](#)
- Renner, M., M. Werner, S. Rademacher, and E. Sprokkereef (2009). Verification of ensemble flow forecasts for the river rhine. *Journal of Hydrology* *376*, 463–475. [120](#)
- Richardson, J., J. Reilly, and P. Jones (2003, 16-18 Juillet). Community and public participation : risk communication and improving decision making in flood and coastal defence. In *Presentation at 38th DEFRA Flood & Coastal. Management Conference*, Angleterre. Université de Keele. [123](#)
- Réméniéras, G. (1965). *L'hydrologie de l'ingénieur*. Paris, France. [59](#)
- Roche, L. (2009). La perception du risque d'inondation par les habitants des zones inondables. Projet de fin d'études, Ecole polytechnique de l'université de Tours, France. [15](#), [16](#)
- Rodier, J. and M. Roche (1978). *River flow in arid regions. Hydrometry : Principles and Practices*, Chapter 13, pp. 453–472. John Wiley and Sons. [13](#)
- Ruhrmann, G. (2003). *öffentliche Kommunikation*, Chapter Risikokommunikation, pp. 539–549. Wiesbaden,Allemagne. [121](#)
- Samuels, P. (2005). Language of risk - project definitions. Report : T32-04-01 goce-ct-2004-505420. [xiii](#), [16](#), [120](#)

- Sandstrom, K. (1997). Ephemeral rivers in the tropics. hydrological processes and water resources management : A review and pathfinder. Research Programme on environmental policy and society 8, Institut de Tema, Université de Linköping, Suède. [57](#)
- Scanlon, J. (1990). *Hazards and the communication of risk*, Chapter People and warnings : So hard to convince, pp. 233–245. England : Gower Technical. [124](#)
- Scharffenberg, W. and M. Flemin (2010). *Hydrologic modeling system HEC-HMS v3.2 user's manual*. Davis, USA : USACE-HEC. [67](#)
- Schelfaut, K., I. Pannemans, I. van der Craats, J. Krywkow, J. Mysiak, and J. Cools (2011). Bringing flood resilience into practice : the freeman project. Rapport de projet, Environmental Science & Policy. [123](#)
- Seager, R., N. Naik, and G. Vecchi (2010). Thermodynamic and dynamic mechanisms for large-scale changes in the hydrological cycle in response to global warming. *Journal of Climate* 23(17), 4651–4666. [45](#)
- Seltzer, P. (1976). *Le climat de l'Algérie*. Alger, Algérie : La Typo-litho & Carbonel, J. [43](#)
- Sepulveda, N. (1997). Application of two direct runoff prediction methods in puerto rico. *Journal of Hydrologic Engineering* 2(1(1)), 10–17. [47](#)
- Shah, S., P. O'Connell, and J. Hosking (1996). Modelling the effects of spatial variability in rainfall on catchment response. 1. formulation and calibration of a stochastic rainfall field model. *Journal of hydrology* 175, 67–88. [23](#), [63](#)
- Sharma, M., G. Gander, and G. Hunt (1980). Spatial variability of infiltration in a watershed. *Journal of Hydrology* 5(4), 101–122. [94](#)
- Singh, V. (1988). *Hydrologic systems : Rainfall-runoff modeling*, Volume 1. USA : Prentice Hall, Englewood Cliffs New Jersey. [xiv](#), [62](#), [85](#)
- Singh, V. (1995). Watershed modeling. In *Computer models of watershed hydrology*, Colorado, USA, pp. 1–22. Water Resources Publications, Highlands Ranch. [64](#), [67](#)
- Smith, P. (2003). Probabilistic short-term flood stage prediction using a distributed rainfall-runoff model. Mémoire de master, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japon. [63](#)

- Sorooshian, S. (1983). *Contributions in Hydrology, U.S. National Report to International Union of Geodesy and Geophysics, 1979-1982*, Chapter Surface Water Hydrology : On-Line Estimation, pp. 706–720. USA : American Geophysical Union. [71](#)
- Sorooshian, S. and V. Gupta (1995). *Computer Models of Watershed Hydrology*, Chapter Model calibration, pp. 23–67. Highlands Ranch, USA : Water Resources Publications. [62](#)
- Steenhuis, T., M. Winchell, G. Rossin, J. Zollweg, and M. Walter (1995). Scs runoff equation revisited for variable-source runoff areas. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 121(3), 234–238. [78](#)
- Stone, E., J. Yates, and A. Parker (1997). Effects of numerical and graphical displays on professed risk-taking behavior. *Journal of Experimental Psychology : Applied* 3(4), 243–256. [126](#)
- STUCKY (2005). Etude d'avant-projet détaillé du barrage d'écêtement de tabia, étude géologique et géotechnique. Rapport d'étude, Groupement d'études STUCKY - ENHYD, STUCKY SA, Alger, Algérie. [40](#)
- Tangara, M. (2005). *Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global*. Thèse de doctorat, École pratique des hautes études de Paris & Cemagref, Paris, France. [2](#), [21](#), [23](#), [28](#)
- Tarboton, D. (2003). *Rainfall-Runoff processes*. USA : Université d'État de l'Utah. [55](#), [94](#)
- Thornes, J. (1994). *Geomorphology of desert environments*, Chapter Catchment and channel hydrology, pp. 303–332. London, Angleterre : Chapman and Hall. [46](#), [91](#)
- Tobias, P., F. Till, and B. Axel (2017). lumpr : An r package facilitating landscape discretisation for hillslope-based hydrological models. *Geoscientific Model Developmen*, 1–34. [74](#)
- Todini, E. and J. Wallis (1977). *Mathematical Models for Surface Water Hydrology*, Chapter Using CLS for Daily or Longer Period Rainfall-Runoff Modeling, pp. 149–168. New York, USA : John Wiley & Sons. [72](#)
- Tramblay, Y., C. Bouvier, P. Ayrat, and A. Marchandise (2011). Impact of rainfall spatial distribution on rainfall-runoff modeling efficiency and initial soil moisture conditions estimation. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11, 157–170. [78](#), [80](#)

- Troutman, B. (1985). Errors and parameter estimation in precipitation-runoff models. *Water Resources Research* 21(8), 1195–1222. [72](#)
- Tversky, B. (2001). *Spatial schemas and abstract thought*, Chapter Spatial schemas in depictions, pp. 79–11. Massachusetts, USA : The MIT Press. [128](#)
- UNDRO (1980). Natural disasters and vulnerability analysis. Report of expert group meeting, United Nations Disaster Relief Office, New-York, USA. [14](#)
- UNESCO (1992). Glossaire international d'hydrologie. Rapport OMM-N° 385, UNESCO, Genève. [10](#)
- USACE (2002). *HEC-GeoRAS an Extension for Support of HEC-RAS Using ArcView*. California, USA : US Army Corps of Engineers (USACE), Hydrological Engineering Centre, Davis. [107](#)
- USGS (1998). Water quality in the georgia-florida coastal plain : Georgia and florida 1992-1996. USGS Circular 1151, U.S. Geological Survey, USA. [126](#)
- Varado, N. (2004). *Contribution au développement d'une modélisation hydrologique distribuée. Application au bassin versant de la Donga, au Bénin*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, Grenoble, France. [88](#), [92](#)
- Vernon, K., A. Durgunoglu, and O. Terry (1991). A review of rainfall-runoff modeling for stormwater management. Rapport, Office of Surface Water Resources and Systems Analysis. [69](#)
- Versini, P., E. Gaume, and H. Andrieu (2009). Simulations hydrométéorologiques distribuées et prévision des coupures de routes dans le gard. *La Houille Blanche* 6, 72–75. [26](#)
- Veyret, Y. (2004). Les risques (comprendre, recherche, s'entraîner). *Quercy, Bréal*, 17–47. [14](#)
- Vos, F., J. Rodriguez, R. Below, and D. Guha-Sapir (2010). Annual disaster statistical review 2009 : The numbers and trends. Rapport de recherche, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, Belgique. [11](#)
- Wagener, T., H. Gupta, K. Carpenter, B. James, R. Vazquez, S. Sorooshian, and J. Shuttleworth (2004). A hydroarchive for the free exchange of hydrological software. *Hydrological Processes* 18, 389–391. [xv](#), [70](#)

- Wallis, J., N. Matalas, and J. Slack (1977). Apparent regional skew. *Water Resources Research* 13(1), 159–182. 72
- Weeink, W. (2010). Thresholds for flood forecasting and warning evaluation of streamflow and ensemble thresholds. Mémoire de master, Université de Twente & Cemagref, France. xiii, 20, 25
- Weill, S. (2007). *Modélisation des échanges surface/subsurface à l'échelle de la parcelle par une approche darcéenne multidomaine*. Thèse de doctorat, École des Mines de Paris, France. 57
- Wheater, H., S. Sorooshian, and K. Sharma (2008). *Hydrological Modeling in Arid and Semi-arid Areas*. Cambridge, Angleterre : Cambridge University Press. 43, 63
- Wiedemann, P. and J. Mertens (2005). Sozialpsychologische risikoforschung technikfolgenabschätzung. *Theorie und Praxis* 14(3), 38–45. 121
- WMO (1975). Intercomparison of conceptual models used in operational hydrological forecasting. Operational Hydrology Report 7, World Meteorological Organization, Genève, Suisse. 71
- WMO (1983). *Guide to Hydrological Practice : Analysis, Forecasting and other Applications* (WMO-No.168 ed.). Geneva, Switzerland : World Meteorological Organization (WMO). 21
- WMO (2012). *Glossaire International d'Hydrologie* (WMO-N° 385 ed.). Geneva, Switzerland : Chair, Publications Board World Meteorological Organization (WMO). 21
- Xu, C. (2002). Hydrologic models. Rapport, Université à Uppsala, Suède. 66
- Yacoubi, M. and M. Hanchane (1997). Importance de la pluviométrie en milieu aride et semi-aride marocain. *Hommes Terre et Eaux* 3, 21–22. 96
- Yang, X. (1993). *Mise au point d'une méthode d'utilisation d'un modèle pluie-débit conceptuel pour la prévision des crues en temps réel (Development of a method using a conceptual rainfall-runoff model for real-time flood forecasting, in French)*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France. 2, 20, 27
- Zhao, F., L. Zhang, F. Chiew, J. Vaze, and L. Cheng (2013). The effect of spatial rainfall variability on water balance modelling for south-eastern australian catchments. *Journal of Hydrology* 493, 16–29. 91

Zwick, M. and O. Renn (2008). *Naturrisiken und Sozialkatastrophen*, Chapter Risikokonzepte jenseits von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensermartung, pp. 77–97. Spektrum, Allmagne. [125](#)

Résumé

Ce travail de thèse de doctorat porte sur la mise au point d'une stratégie efficace de prévision et d'alerte contre les inondations en Algérie. Dans ce contexte, le bassin versant de L'Oued Mekerra (Nord- Ouest de l'Algérie) a été choisi comme un cas d'étude pour la mise en œuvre de cette stratégie.

La thèse est divisée en trois thèmes de recherche. La première partie consiste en une modélisation hydrologique de type pluie-débit. À cet effet, le modèle MERCEDES (*Maillage Élémentaire Régulier Carré pour l'Etude Des Ecoulements Superficiels*) a été utilisé pour étudier la relation pluie-débit sur la base de la distribution spatiale des propriétés de surface du bassin versant de l'Oued Mekerra. Dans cette étude de cas, le modèle MERCEDES combine la méthode SCS (*Soil Conservation Service*) pour la fonction de production et la méthode Lag & Route pour la fonction de transfert. Les entrées du modèle comprennent les données journalières de 21 événements de pluie-débit pour la période de 2003 à 2012 et les données spatiales telles que la pente, la direction de drainage et l'occupation du sol qui ont été dérivées des cartes numériques du bassin versant. Les paramètres du modèle proposé ont été calibrés et optimisés en utilisant le critère d'efficacité de Nash-Sutcliffe.

La seconde partie est consacrée à la modélisation hydraulique unidimensionnelle avec le modèle HEC-RAS et l'outil de SIG (HEC-GeoRAS). Cette étude a été menée afin de simuler l'ampleur des inondations et des profondeurs d'eau pour les différentes périodes de retour (Q_{50} et Q_{100}) et représenter ces résultats sur des cartes interactives.

La troisième partie aborde les aspects communicatifs sur les risques liés aux inondations. Dans cette étude, la communication via Internet, en utilisant les cartes interactives, a été adoptée comme un moyen par lequel les informations pertinentes peuvent être présentées aux utilisateurs.

Enfin, ce travail met en évidence que le système de prévision et d'alerte contre les inondations peut être utilisé comme un outil opérationnel et fiable dans le bassin versant de l'Oued Mekerra et peut être généralisé sur l'ensemble des bassins hydrographiques Algériens.

Mots clés : Prévision, Alerte, Crue, Modèle, MERCEDES, HEC-RAS, Communication, Bassin versant, Oued Mekerra.

Abstract

This doctoral thesis work focuses on the development of an effective forecasting and warning strategy of floods in Algeria. In this context, the Wadi Mekerra catchment (North-West of Algeria) was chosen as a case study for the implementation of this strategy.

The thesis is divided into three research themes. The first part consists of hydrological modeling of the rainfall-runoff type. To this effect, the MERCEDES model (*Maillage Élémentaire Régulier Carré pour l'Etude Des Ecoulements Superficiels*) was used to study the rainfall-runoff relationship based on the spatially distributed of the surface properties of the Wadi Mekerra watershed. In this case study, MERCEDES model combines the SCS (Soil Conservation Service) method for production function and Lag & Route method for routing function. The inputs of the model include the daily of 21 rainfall- runoff events during 2003 to 2012 and the spatial data such as slope, flow direction and land use which were derived through numerical maps of the catchment. The parameters of proposed model were calibrated and optimized using Nash-Sutcliffe efficiency criterion.

The second part is dedicated to one-dimensional hydraulic modeling with the HEC-RAS model and the GIS tool. This study was conducted to simulate the magnitude of floods and water depths for the different return periods (Q_{50} and Q_{100}) and to represent these results on interactive maps.

The third part addresses the communicative aspects of flood risks. In this study, communication via the Internet using interactive maps has been adopted as a means by which relevant information can be presented to users. Finally, this work highlights that the flood forecasting and warning system can be used as an operational and reliable tool in the Wadi Mekerra catchment and can be generalized to all Algerian Wadi basins.

Keywords : Forecasting, Warning, Flood, Model, MERCEDES, HEC-RAS, Communication, Catchment, Wadi Mekerra.
