

N° d'ordre :

Université de Saida– Dr. Moulay Tahar

Sciences de Technologie

Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

Doctorat 3ème Cycle

Spécialité : Ressources hydrauliques

Filière : hydraulique

Par :

OTMANI AZZEDDINE

Thème :

Simulation numérique des écoulements à surface libre des bassins versant du ouest et sud-ouest Algérien en moyen du SIG et des modèles hydrologique et hydraulique : Etudes des protections contre les inondations dans un bassin versant type semi-aride



Thèse soutenue le 25 Mai 2024 Devant le jury composé de :

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	Talbi Djilali	MCA	Université de Saida - Dr. Moulay Tahar	Président
02	Hazzab Abdelkrim	Pr.	Université de Saida - Dr. Moulay Tahar	Rapporteur
03	Attalah M'hamed	MCA	Centre Universitaire Nour Bachir El Bayadh	Co-rapporteur
04	Yles Fouad	MCA	Université de Saida - Dr. Moulay Tahar	Examineur
05	Djellouli Fayçal	MCA	Centre Universitaire Nour Bachir El Bayadh	Examineur
06	Benzater Benali	MCA	Université de Mascara Mostafa Stambouli	Examineur

Dédicace

À la douce mémoire de ma grand-mère paternelle, dont l'héritage de force et de bonté m'accompagne à chaque instant. À ma grand-mère maternelle, source d'inspiration et de joie inépuisable, dont l'esprit libre vit en moi.

À mes parents, piliers d'amour et de sacrifice, pour leur soutien sans faille et leurs enseignements précieux qui m'ont façonné et guidé vers l'excellence. Leur dévouement est le fondement sur lequel je bâtis mes rêves.

Aux liens indéfectibles avec mes frères et sœurs, pour les moments de partage, les encouragements mutuels et les souvenirs inestimables qui enrichissent ma vie. Leur présence est un cadeau constant, rempli d'amour et de soutien.

Et à mon fils Mouadh, lueur d'espoir et source d'inspiration quotidienne. Ce travail est aussi le tien, symbole de l'avenir que je souhaite t'offrir, plein de possibilités, de rêves réalisés et de bonheur sans fin.

Cette thèse est le fruit de votre amour, de votre soutien et de vos sacrifices. Elle témoigne de notre histoire commune, de nos valeurs partagées et de notre quête incessante de connaissance et de vérité. À vous tous, mon cœur déborde de gratitude.

Remerciement

Tout d'abord, je tiens à remercier Dieu, le Tout-Puissant, pour m'avoir guidé, soutenu, et accordé la force nécessaire tout au long de ce parcours académique et de la rédaction de cette thèse.

Je souhaite ensuite adresser mes remerciements les plus chaleureux à mon directeur de thèse, le Professeur HAZZAB Abdelkrim, pour sa guidance, son expertise, et son soutien indéfectible. Sa rigueur, sa passion pour la recherche, et son engagement envers l'excellence ont été pour moi une source d'inspiration et un moteur de persévérance dans mon travail.

Un remerciement spécial est également dû à mon co-encadreur, ATTALAH M'hamed, pour ses conseils précieux, son accompagnement, et sa capacité à stimuler ma réflexion et à enrichir ma recherche.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers les membres du jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer mon travail. Mes sincères remerciements vont au Président du jury, Dr TALBI Djilali, ainsi qu'aux estimés Docteurs Yles, Djellouli, et Benzater, pour leur temps, leur expertise, et leurs retours constructifs qui ont contribué à améliorer la qualité de cette thèse.

Enfin, je ne saurais clore ces remerciements sans exprimer ma reconnaissance à mes deux professeurs, Andrea Petroselli et Ciro Apollonio, pour leur soutien académique, leur encouragement, et les connaissances précieuses qu'ils m'ont transmises. Leur influence a grandement enrichi mon parcours éducatif et professionnel.

À tous, je vous suis infiniment reconnaissant.

Table des Matières

Table Des Matières

Liste Des Figures

Liste Des Tableaux

Liste Des Abréviations

<i>Introduction générale</i>	1
 <i>I. Concepts de base relatifs aux risques naturels d'inondation</i>	6
I.1 Introduction	6
I.2 Concept des termes : Risque, Danger, Vulnérabilité, Problématiques et Dommages	6
I.2.1 Les Problématiques	6
I.2.2 Le Danger	7
I.2.3 La Vulnérabilité.....	7
I.2.4 Le Risque.....	8
I.2.5 Le Risque d'inondation.....	8
I.3 Concept d'inondation, ses types, causes et paramètres	9
I.3.1 Types des inondations	10
I.3.2 Causes des inondations.....	11
I.3.3 Les paramètres des inondations.....	11
I.4 Aperçu des inondations dans le monde et en Algérie	12

I.5	Conclusion	15
II.	<i>Gestion des inondations et cartographie : méthodes, technologies et défis.....</i>	16
II.1	Introduction	16
II.2	Gestion intégrée du risque d'inondation	16
II.2.1	Prévention, préparation et culture du risque	16
II.2.1.1	Prévention.....	17
II.2.1.2	Préparation	17
II.2.1.3	Culture du risque	17
II.2.2	Évaluation des dangers d'inondation	18
II.2.3	Réduction du risque d'inondation	19
II.3	Mesures de gestion structurale des inondations.....	19
II.3.1	Interventions dans les bassins versants.....	19
II.3.2	Interventions fluviales :	20
II.3.3	Infrastructure urbaine :	20
II.3.4	Gestion des terres rurales :	20
II.4	Mesures de gestion des inondations non-structurelles.....	20
II.4.1	Les mesures non structurelles.....	20
II.4.2	Cartographie des Inondations :	20
II.4.2.1	Types de Cartes des Inondations	21
II.5	Avancées technologiques dans la cartographie des inondations.....	22
II.6	Conclusion	23

III. Modélisation Hydrologique	24
III.1 Introduction	24
III.2 Processus hydrologiques : fondamentaux et dynamique des hydrogrammes de crue	24
III.2.1 Mécanismes d'écoulement.....	25
III.2.2 Genèse d'écoulement	25
III.2.3 Hydrogrammes de crue.....	26
III.3 Définition de la modélisation hydrologique	27
III.4 Définition d'un modèle	27
III.5 Classification des modèles hydrologiques.....	28
III.5.1 Principaux types de modèles hydrologiques	30
III.5.1.1 Modèles mécanistes (basés sur la physique)	30
III.5.1.2 Modèles paramétriques (Modèles boîte grise ou conceptuels).....	31
III.5.1.3 Modèles métriques (empiriques, boîte noire ou pilotés par les données).....	31
III.5.1.4 Modèles distribués, Semi-distribués et globaux.....	31
III.5.2 Fonctionnalité et complexité du modèle.....	32
III.5.3 Construction et mise en œuvre d'un modèle hydrologique.....	33
III.5.3.1 Processus de construction du modèle.....	33
III.5.3.2 Configuration du modèle.....	34
III.5.4 Protocole de modélisation	35
III.5.5 Calibration et validation :	36
III.5.6 Simulation et évaluation	36
III.5.7 Mesures d'évaluation	36

III.5.8	Sélection du modèle	38
III.5.8.1	Sélection finale du modèle basée sur des critères d'influence :	39
III.6	Conclusion	40
IV.	Modélisation Hydraulique	41
IV.1	Introduction :	41
IV.2	Notion et aperçu sur le modèle hydraulique	41
IV.2.1	Élaboration de modèle hydraulique	42
IV.2.2	Équations de Saint-Venant	42
IV.2.3	Modélisation des pertes énergétiques dans les systèmes fluviaux.....	43
IV.2.4	Modèles 1D	45
IV.2.4.1	Simplifications des équations de Saint-Venant 1D :	46
IV.2.5	Modèles 2D :	47
IV.2.6	Les modèles tridimensionnels (3D).....	49
IV.3	Modélisation hydraulique et sources d'incertitude :	49
IV.4	Conclusion	52
V.	Information Géographique Volontaire (VGI)	53
V.1	Introduction	53
V.2	Définition de l'information géographique volontaire (VGI).....	53
V.2.1	Origine et définition :	53
V.2.2	Termes similaires aux VGI dans la littérature scientifique :	54
V.2.3	Évolution du VGI :	54
V.3	Sources de l'information géographique volontaire (VGI).....	55

V.3.1	Aperçu des sources de VGI :	55
V.3.2	Sources conventionnelles de VGI	55
V.3.3	Sources de VGI non structurées	55
V.4	Caractéristiques et propriétés de l'information géographique volontaire (VGI).....	56
V.4.1	Aperçu des caractéristiques du VGI :	56
V.4.2	Intégration des VGI aux systèmes SIG :	57
V.4.3	Évaluation de la Qualité :	57
V.5	Utilisation des données (V.G.I) dans la gestion des événements d'inondations et la validation des modèles hydrologiques et hydrauliques	58
V.5.1	Application dans la gestion du risque d'inondation :	58
V.5.2	Méthodologie d'extraction des informations liées aux inondations à partir du VGI	58
V.5.3	Défis de l'utilisation du VGI pour la validation des modèles hydrologiques et hydrauliques	59
V.5.4	Défis de l'application du VGI dans la gestion des inondations :	59
V.5.4.1	Catégorisation des Données VGI	59
V.5.4.2	Géoréférencement	60
V.5.4.3	Visualisation.....	61
V.5.4.4	Automatisation dans l'analyse des données VGI.....	62
V.6	Conclusion :	63
VI. Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa		65
VI.1	Introduction	65
VI.2	L'approche méthodologique	66

VI.3	Choix du site d'étude.....	67
VI.3.1	Aperçu historique sur les inondations de l'Oued Deffa.....	68
VI.3.1.1	Inondation du 1er octobre 2011.....	69
VI.3.1.2	Causes de l'inondation de l'oued Deffa d'octobre 2011	69
VI.3.1.3	Les dégâts enregistrés suite à l'inondation du 1er octobre 2011.....	69
VI.3.2	Utilisation des données géographiques volontaires pour l'analyse de l'inondation du 1er octobre 2011à El-Bayadh	70
VI.3.2.1	Collecte de données visuelles post-événement de l'inondation du 1er Octobre 2011	70
VI.3.2.2	Etudes gouvernementales et solutions structurelles après l'inondation du 1er octobre 2011	72
VI.4	Présentation de la zone d'étude et caractéristiques du bassin versant de l'Oued Deffa, Wilaya d'El-Bayadh	73
VI.4.1	Caractéristiques générales du bassin versant de l'Oued Deffa.....	73
VI.4.1.1	Contexte géographique et administratif.....	73
VI.4.1.2	Géomorphologie et zones géographiques.....	73
VI.4.1.3	Contexte géologique.....	73
VI.4.1.4	Contexte pédologique.....	74
VI.4.1.5	Le Couvert végétal	75
VI.4.2	Caractéristiques morphométriques et hydrologiques du bassin versant de l'Oued Deffa	75
VI.4.2.1	Caractéristiques altitudinales du bassin versant de l'Oued Deffa	78
VI.4.2.2	Indices de pentes du bassin versant de l'Oued Deffa	79

VI.4.3	Étude du réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Deffa	81
VI.4.3.1	Topologie et structure du réseau.....	81
VI.4.3.2	Temps de concentration (T_C) du bassin versant de l'Oued Deffa	82
VI.5	Modélisation hydrologique, hydraulique et résultats.....	83
VI.5.1	Modélisation hydrologique de l'évènements	83
VI.5.1.1	Modèles hydrologiques utilisés dans l'étude.....	83
VI.5.1.2	Description et application de chaque modèle	84
VI.5.1.2.1	Méthode rationnelle	84
VI.5.1.2.2	Modèle HECHMS.....	85
VI.5.1.2.3	Modèle EBA4SUB.....	88
VI.5.1.2.4	Etablissement des courbes hauteur-durée-fréquence (IDF)	90
VI.5.1.2.5	Données pluviométriques.....	91
VI.5.1.2.6	Choix de la loi d'ajustement	91
VI.5.1.2.7	Pluie de courte durée et intensités maximales à différentes fréquences.....	94
VI.5.1.2.8	Concept du période de retour	97
VI.5.1.2.9	Couverture terrestre et utilisation des terres.....	97
VI.5.1.2.10	Coefficient de ruissellement et Numéro de Courbe	99
VI.5.1.3	Résultats des simulations hydrologiques.....	102
VI.5.2	Modélisation hydraulique de l'évènements.....	105
VI.5.2.1	Modèle HEC-RAS.....	106
VI.5.2.1.1	Caractéristiques techniques de HEC-RAS	106

VI.5.2.2	Modélisation 2D dans HEC-RAS.....	107
VI.5.2.2.1	Équations de Saint-Venant 2D.....	107
VI.5.2.3	. Avantages et limitations de HEC-RAS	107
VI.5.2.4	Méthodologie de construction d'un modèle de simulation HEC-RAS 2D.....	108
VI.5.2.5	Modèle FLO-2D.....	110
VI.5.2.5.1	Algorithme de solution du logiciel FLO-2D.....	110
VI.5.2.5.2	Avantages et inconvénients de l'utilisation du modèle FLO-2D.....	112
VI.5.2.6	Préparation des données d'entrée pour la modélisation hydraulique.....	113
VI.5.2.6.1	Les données topographiques (création du MNT).....	113
VI.5.2.6.2	Données d'entrée hydrologiques	115
VI.5.2.6.3	Coefficient de rugosité	115
VI.5.2.6.4	Construction du modèle HECRAS 2D de l'étude	116
VI.5.2.6.5	Construction du modèle FLO 2D Basic de l'étude.....	117
VI.5.2.6.6	Résultats de simulation des zones inondées.....	118
VI.5.2.6.7	Evaluation des approches de simulation	121
A.	Zones inondées.....	121
B.	Profondeurs d'inondation	122
VI.6	Conclusion :.....	127
VII.	Mesures conservatoires et stratégies urbaines : Protection de la ville.....	129
VII.1	Introduction :	129
VII.1.1	Initiative de l'état Algérien dans la gestion des risques d'inondation	129
VII.2	Principes et options de protection contre les crues :.....	130

VII.3 Aménagement des cours d'eau.....	132
VII.4 Importance des études préalables	132
VII.5 Options d'Aménagement de l'Oued Deffa	133
VII.5.1 Contexte et planification initiale :	133
VII.5.2 Options de réaménagement envisagées :	133
VII.6 Solutions envisagées pour la protection du centre-ville d'El-Bayadh.....	135
VII.6.1 Contexte et nécessité d'une mise à jour des plans	135
VII.6.2 Planification d'un canal de dérivation :	135
VII.6.3 Zones de concentration des travaux :	135
VII.6.4 Construction du canal de dérivation :	136
VII.7 Conclusion.....	136
Conclusion générale	138
Références bibliographiques	140

Liste des figures

Figure I-1: Composant de risque d'inondation	9
Figure I-2: Répartition mondiale des pays affectés par les inondations entre 1985 et 2010. (Source: G. R. Brakenridge. Global Active Archive of Large Flood Events. Dartmouth Flood Observatory, University of Colorado, USA.).....	12
Figure II-1: Mesures de contrôle des inondations	22
Figure III-1: Etapes pour définir un hydrogramme d'écoulement de crue.	25
Figure III-2: Diminution de la capacité d'infiltration avec le temps (Horton, 1941)	26
Figure III-3: Hydrogramme de crue.	27
Figure III-4: Paramétrique (Modèles boîte grise ou modèles conceptuels)	29
Figure III-5: Paramétrique pour différents types de modèles déterministes.	30
Figure III-6 ; Schéma des étapes suivies pour la sélection finale d'un modèle hydrologique (K. Beven, 2012)	39
Figure IV-1: Perte de charges des casiers	45
Figure IV-2 : Illustration d'un maillage triangulaire typique dans le cadre d'un modèle hydraulique 2D. (Erlich <i>et al.</i> , 2012). Le schéma à droite illustre le modèle hydraulique global adopté, où les cellules sont davantage affinées (EDF, 2010).	49
Figure IV-3: Sources d'incertitude dans la modélisation de l'aléa inondation source.....	51
Figure V-1: Volume d'informations sur les précipitations générées pendant les inondations dévastatrices de l'Attique Occidentale en 2017 (Feng & Sester, 2018).	61
Figure V-2: Impact des Inondations à Mandra, Attique Occidentale, Grèce" (Poser & Dransch, 2010).	62
Figure VI-1: Schéma méthodologique adopté	67

Figure VI-2: Bassine versant et urbain d'oued Deffa	68
Figure VI-3: Géoréférencement et Analyse des Photos via SIG	71
Figure VI-4: Levé topographique de la zone étudiée (Source HYBACO)	72
Figure VI-5: Répartition hypsométrique du bassin versant Oued Deffa.....	77
Figure VI-6 : Schéma explicatif de la courbe hypsométrique.....	78
Figure VI-7 : Réseau hydrographique du bassin oued Deffa.	81
Figure VI-8: Écoulement cumulé Q en fonction de la pluie cumulée P selon la méthode du nombre de courbe.	86
Figure VI-9: Solution graphique de l'équation montrant la profondeur de l'écoulement Q en fonction de la profondeur de la pluie P et du nombre de courbe CN (d'après le Soil Conservation Service, 1972).....	87
Figure VI-10: Expérimentation du modèle HECHMS du bassin versant Oued Deffa	88
Figure VI-11: Illustration des résultats du modèle EBA4SUB pour le bassin versant Oued Deffa	90
Figure VI-12 : Histogramme courbe des précipitations	91
Figure VI-13: Courbe d'ajustement obtenus par la loi de Gumbel.....	94
Figure VI-14: Courbes Intensité- Durée- Fréquence (IDF) à la station d'El-Bayadh	96
Figure VI-15: Courbes Hauteurs - Durée - Fréquence (DDF) à la station d'El-Bayadh	97
Figure VI-16: Carte d'occupation de sol	98
Figure VI-17: Résultat hydrogramme de crues pour les différents périodes de retour du modelé EBA4SUB	104

Figure VI-18: Résultat hydrogramme de crue pour la période de retour 100 ans du modèle HECHMS	104
Figure VI-19: MNT de la surface utiliser dans la modélisation hydraulique 2D.....	115
Figure VI-20: Image de la simulation 2D de l'événement d'inondation 01/10/2011 du logiciel HECRAS 2D	117
Figure VI-21: Simulation de l'événement d'inondation 01/10/2011 a l'aide logiciel FLO2D.	118
Figure VI-22: Résultats spécifiques obtenus avec chaque combinaison de modèle hydraulique et d'hydrogramme. (A, B, C, D, E, F).....	120
Figure VI-23: Les données concernant six sites répartis uniformément dans la zone explorée.	123
Figure VII-1: Synthèse visuelle des actions à entreprendre pour la protection de la ville de El-Bayadh contre les risques d'inondation.	136

Liste des Tableaux

Tableau I-1: Banque de données inondation (Protection civile algérienne) 2017.	14
Tableau III-2 : Comparaison de modèles hydrologique (Brunner <i>et al.</i> , 2021)	33
Tableau V-1 : diverses formes d'information géographique collaborative	54
Tableau V-2: Caracteristiques des VGI et leurs implications a la cartographie et aux SIG	57
Tableau V-3: Classification de la qualité des données VGI (Gómez-Barrón et al. , 2016)	60
Tableau VI-1: Historique des inondations de 1994 a 2011 établie par la DRE de El-Bayadh	69
Tableau VI-2: Superficie et périmètre du bassin versant Oued Deffa	76
Tableau VI-3 : Répartition hypsométrique du bassin versant Oued Deffa	78
Tableau VI-4: Récapitule les altitudes caractéristique du bassin versant d'oued deffa.....	79
Tableau VI-5: Résumé des indices du bassin d'oued Deffa	80
Tableau VI-6: Paramètres morphométriques du bassin versant de l'oued Deffa	83
Tableau VI-7: Les résultats d'ajustement obtenus par la loi de Gumbel	93
Tableau VI-8: Tableau d'intensité- Durée-Période de retour de la station pluviométrique d'El-Bayadh durant une heure	96
Tableau VI-9 Valeur du coefficient de ruissellement pour la période de retour 100ans.....	99
Tableau VI-10: Les limites saisonnières de précipitations pour les classes AMC (Soil conservation service de 1972)	101
Tableau VI-11: Valeur du numéro de courbe (CN).	102
Tableau VI-12: Resultats des simulations hydrologiques du bassin versant d'Oued deffa....	103

Tableau VI-13: Étapes de l'algorithme selon O'Brien et al . (1994)	112
Tableau VI-14: Coefficient de rugosité de Manning (n) de la zone d'étude base sur les données d'occupation du sol CORINE (Manfreda <i>et al.</i> , 2018).....	116
Tableau VI-15: Résultats quantitatifs des zones a risque d'inondation dans la zone étudiée.	122
Tableau VI-16: Résultats des profondeurs d'eau de la reconstruction du l'événement de la crue du 01/10/2011.....	125
Tableau VII-1: Travaux de réhabilitation des parois de l'Oued Deffa	134

Liste d'Abréviation

ANRH	Agence National des Ressources Hydraulique
ASAL	Agence Spatiale Algérienne
BET	Bureau d'Etude Technique
CTC	Contrôle Technique construction
CN	Curve Number
DDF	Depht–Durée–Fréquence
DEM	Digital Elévation Model
DRE	Direction des ressources en eau
DNRM	Délégation nationale aux risques majeurs
ETP	Evapotranspiration potentielle
EM-DAT	Emergency Events Database
FAO	Food and Agriculture Organization
SIG	Système d'Information Géographique
IDF	Intensité–Durée–Fréquence
HECRAS	Hydrologic Engeneering Center River Analysis System
HECHMS	Hydrologic Engeneering Center Hydrologic Modeling System
HYBACO	Hydraulique Bâtiment Consulting
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient
NRCS	Natural Ressource Conservation Service
ONMA	Office National de la Météorologie Algérie
ORSTOM	Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
PPRI	Plan de prévention contre les risques d'inondation
POS	Plan d'occupation du sol
PC	Protection Civil
RMSE	Root Mean Square Error
RN	Route National
SIG	Système d'Information Géographique

الملخص:

تتناول هذه الدراسة تطبيق عدد من النماذج الهيدرولوجية والهيدروليكية بشكل متزامن لدراسة الفيضانات في الأحواض الجريانية التي لا تتوفر فيها قياسات مسبقة. تركز الدراسة على حدث الفيضان الكبير الذي وقع في الأول من أكتوبر 2011 في حوض واد ديفا، في مدينة البيض. في المرحلة الأولى، تقوم الدراسة بتجريب وتقييم أداء مجموعة من النماذج الهيدرولوجية تشمل الطريقة العقلانية والهيدروليكية المختارة، EBA4SUB و HECHMS بالإضافة إلى النماذج الهيدروليكية HEC-RAS 2D و FLO2D. يعتمد هذا التقييم على بيانات من مصادر تقليدية وغير تقليدية بهدف التحقق من دقة تقدير مساحة الفيضانات وعمق المياه وفقاً للنهج المختلفة. لقد أظهرت المقارنة بين القيم الفيزيائية باستخدام النهج المختلفة أن كان الأكثر تميزاً وتوقفاً. بالإضافة إلى ذلك، كشف التحليل الإحصائي لعمق الفيضان المرصود والمحاكي أن نهج EBA4SUB و HECRAS 2D، إلى جانب النهج السابق، قدم تقديرات أدق لعمق الفيضان، مع مؤشرات إحصائية مقبولة. يُعزى هذا الأداء المتميز بشكل أساسي إلى كفاءة نموذج EBA4SUB الهيدرولوجي في تقدير ذروة تدفق الفيضان. ومع ذلك، أبرزت الدراسة تحديات التحقق من صحة النماذج الهيدرولوجية والهيدروليكية في الأحواض الجريانية التي لا تتوفر فيها بيانات قياسية. يشكل نقص هذه البيانات عائقاً أمام عملية المعايرة والتحقق، حيث توفر بيانات المعلومات الجغرافية التطوعية (VGI) مورداً قيماً يساهم في توفير معلومات حاسمة لتحسين والتحقق من صحة النماذج. تشير النتائج إلى أن نهج التمثيل EBA4SUB-FLO2D يعد حلاً واعداً لإدارة مخاطر الفيضان في الأحواض الجريانية غير المقايسة مثل أود ديفا.

تشكل خرائط المناطق المغمورة بالفيضانات المستمدة من هذه النماذج أداة أساسية لاستراتيجية التخفيف من مخاطر الفيضانات. ومن خلال التحديد الدقيق للمناطق التي من المحتمل أن تتأثر والتنبؤ بمستويات المياه، فإنها تساهم بشكل أساسي في التنمية والتخطيط لحالات الطوارئ، مع زيادة فعالية أنظمة الإنذار وتدابير الطوارئ. وبالتالي فإن هذه الخرائط ضرورية لتعزيز قدرة السكان على الصمود وتتطلب تحديثاً مستمراً من خلال جمع البيانات المستمرة، من أجل تحسين دقة التنبؤات بالفيضانات.

الكلمات المفتاحية: EBA4SUB، FLO2D، HEC-RAS 2D النمذجة الهيدرولوجية؛ النمذجة الهيدروليكية؛ رسم خرائط الفيضانات.

Résumé :

La présente étude porte sur l'application simultanée de divers modèles hydrologiques et hydrauliques pour étudier les crues dans les bassins versants non jaugés. L'événement de la crue

extrême survenu le 1er octobre 2011 dans le bassin versant d'Oued Deffa, près de la ville d'El-Bayadh, est considéré. Dans un premier temps et à travers l'expérimentation des modèles hydrologiques et hydrauliques choisis, l'étude examine et évalue les performances des différents modèles. Il s'agit de la méthode rationnelle, les modèles EBA4SUB et HECHMS, ainsi que les modèles hydrauliques HEC-RAS 2D et FLO2D. Cette évaluation repose sur des données provenant de sources à la fois conventionnelles et non conventionnelles, avec pour objectif de valider à la fois l'étendue des zones inondées et la profondeur de l'eau résultante selon les différentes approches de simulation. La comparaison entre les valeurs observées et les simulations de la crue extrême pour différentes approches a mis en évidence que l'approche EBA4SUB-FLO2D se démarquait, surpassant les autres méthodes. En revanche, une analyse statistique des résultats des profondeurs de crue observées et simulées a révélé que, en plus de cette dernière approche, l'approche EBA4SUB-HECRAS 2D fournissait une meilleure estimation de la profondeur de la crue, avec des indicateurs statistiques acceptables. Ceci est principalement attribué à la performance du modèle hydrologique EBA4SUB dans l'estimation du débit de pointe de la crue éclair. Toutefois, il est à noter que la démarche suivie a mis en exergue la complexité de la validation des modèles hydrologiques et hydrauliques dans les bassins versants non jaugés. En effet, le manque ou l'absence de données hydrométriques entrave à la fois la calibration et la validation des modèles expérimentés. Dans de telles situations, les données de l'information géographique volontaire (VGI) présentent un recours intéressant et jouent un rôle central en fournissant des informations cruciales pour affiner et valider lesdits modèles. Les résultats montrent donc que l'approche de modélisation EBA4SUB-FLO2D émerge comme une solution prometteuse pour la gestion des risques d'inondation dans les bassins versants non jaugés à l'exemple de l'Oued Deffa.

Les cartographies des zones inondées dérivées de ces modèles constituent un outil fondamental pour la stratégie d'atténuation des risques d'inondation. En délimitant avec précision les zones susceptibles d'être affectées et en prévoyant les niveaux d'eau, elles contribuent essentiellement à l'aménagement et à la planification d'urgence, tout en augmentant l'efficacité des systèmes d'alerte et des mesures de sensibilisation. Ces cartographies sont donc indispensables pour renforcer la résilience des populations et nécessitent une mise à jour constante à travers la collecte de données continues, afin d'affiner la précision des prévisions des inondations.

Mots clés : Modélisation hydrologique ; modélisation hydraulique ; cartographie des inondations ; EBA4SUB ; FLO2D ; HEC-RAS 2D ; bassin non jaugé

Abstract

This study focuses on applying various hydrological and hydraulic models simultaneously to analyze floods in ungauged watersheds. The extreme flood event that occurred on October 1, 2011, in the wadi Deffa watershed, near the city of El-Bayadh, is considered. Initially, the study examines and evaluates the performance of selected hydrological and hydraulic models through practical experimentation. These include the Rational Method, the EBA4SUB and HECHMS models, as well as the HEC-RAS 2D and FLO2D hydraulic models. This evaluation uses data from both conventional and unconventional sources, aiming to validate the extent of the flooded areas and the resulting water depth across various simulation approaches. The comparison between observed values and simulations of the extreme flood for different approaches highlighted that the EBA4SUB-FLO2D approach stood out, surpassing other methods. However, a statistical analysis of the observed and simulated flood depths revealed that, in addition to this approach, the EBA4SUB-HECRAS 2D approach provided a better estimation of flood depth, with acceptable statistical indicators. This is mainly attributed to the performance of the EBA4SUB hydrological model in estimating the peak flow of the flash flood.

However, it should be noted that the approach followed highlighted the complexity of validating hydrological and hydraulic models in ungauged watersheds. Indeed, the lack or absence of hydrometric data impedes both the calibration and validation of these models. In such cases, Volunteered Geographic Information (VGI) data provides a valuable resource, playing a key role in offering essential information for refining and validating these models. Consequently, the results indicate that the EBA4SUB-FLO2D modeling approach is a promising solution for managing flood risks in ungauged watersheds, such as wadi Deffa.

The mappings of the flooded areas derived from these models are a fundamental tool for the flood risk mitigation strategy. By precisely delineating the areas likely to be affected and predicting water levels, they contribute essentially to land use and emergency planning, while increasing the efficiency of alert systems and awareness measures. Hence, these mappings are vital for enhancing the resilience of communities and necessitate regular updates through ongoing data collection to improve the precision of flood forecasts.

Key words: Hydrological modeling; hydraulic modeling; flood mapping; EBA4SUB; FLO2D; HEC-RAS 2D; ungauged basin

Introduction générale :

Introduction générale :

Les inondations sont au premier rang des catastrophes naturelles les plus dévastatrices dans le monde (Adikari et al. , 2010). Elles sont les plus fréquentes et occasionnent d'importantes pertes humaines et matérielles (Pulvirenti et al. , 2011). Ces dernières décennies, le nombre de crues extrêmes a augmenté. Les principaux facteurs de cette augmentation sont le réchauffement climatique, l'utilisation non durable des terres et l'expansion des activités économiques (Gangrade et al. , 2019; Papaioannou et al. , 2019). Les inondations affectent plus de 520 millions de personnes par an dans le monde, entraînant jusqu'à 25 000 décès par an (Ramada, 2006). Selon l'organisation Food and Agriculture Organizations of the United Nations (F. A. O), les dommages causés par les inondations aux cultures et à l'élevage dans le monde atteignent une moyenne de 7 milliards de dollars par an ((F. A. O), 2017). Toutefois, les inondations sont l'une des catastrophes naturelles les plus gérables si les zones sujettes aux inondations sont identifiées et si des stratégies d'atténuation des inondations appropriées sont mises en œuvre.

Les mesures préventives contre les inondations ont suscité, aussi bien au sein de la communauté des chercheurs que chez les pouvoirs publics des pays affectés, beaucoup d'intérêt (Gangrade et al. , 2019). Généralement, on distingue deux types de mesures : les mesures structurelles consistent en des actions d'aménagements tels que la construction de digues de protection, de barrages écrêteurs de crues ou de canalisations d'évacuation (Aerts, 2018). L'efficacité de ces mesures repose systématiquement sur l'estimation exacte des débits de pointe et/ou des hydrogrammes des crues. Ces derniers sont nécessaires pour concevoir les composants des systèmes de protection afin de minimiser les dommages (Diogo & do Carmo, 2019). Par conséquent, s'il y a des erreurs dans l'estimation des débits de pointe et/ou des hydrogrammes des crues, les actions d'aménagements seront soit sous-dimensionnées, soit surdimensionnées. En revanche, les mesures non structurelles consistent à l'établissement des cartes d'inondation identifiant les zones à risque à l'aide de la modélisation hydraulique selon les épisodes hydrologiques les plus critiques ou la cartographie à l'aide des techniques de la télédétection. Dans ce cas, les schémas présagés d'aménagement offrent une évaluation des risques d'inondation et dépendent de la spécificité des sites examinés. Ainsi, des stratégies de gestion et d'atténuation des plaines inondables spécifiques peuvent être élaborées (Papaioannou et al. , 2016, 2019; Pellicani et al. , 2018).

Pour l'établissement des cartes des zones inondables, le recours à la modélisation est souvent mis en œuvre. Dans ce cas, la modélisation qui consiste en un couplage de modèle hydrologique et hydraulique est la plus conseillée. Cette modélisation est particulièrement difficile dans des

bassins non jaugés. En effet, les difficultés sont dues au manque de données hydrauliques observées. Ces derniers sont nécessaires pour le calibrage et la validation du modèle hydrologique appliqué (Grimaldi et al. , 2013; Szymczak & Krężałek, 2018; Vojtek & Vojteková, 2019).

Les modèles hydrologiques peuvent être du type empirique, conceptuel ou les modèles distribués et semi-distribués (Refsgaard & Knudsen, 1996). Chaque modèle a sa spécificité et son domaine d'application (Abbott & Refsgaard, 2012). Toutefois, la simulation hydrologique des données de débit dans les bassins versants non jaugés est compliquée par le manque de données d'observation pour l'évaluation du modèle.

Dans ce cadre, la télédétection peut améliorer dans une large mesure les méthodes conventionnelles dans les études de pluie et de ruissellement. Dans ce cas, le rôle de la télédétection dans le calcul du ruissellement est de fournir une source de données d'entrée qui est utilisée pour estimer les coefficients d'équation et les paramètres du modèle. Ainsi, l'une des applications de ces données est d'estimer les coefficients de ruissellement dans les modèles hydrologiques appliqués aux zones urbaines et rurales. Le coefficient de ruissellement qui est influencé non seulement par l'occupation du sol, les effets climatiques mais aussi par les impacts humains, est un indicateur fondamental utilisé dans le contrôle des inondations (Dhawale, 2013).

L'étude des impacts des changements de l'occupation du sol sur le comportement des inondations est considérée comme un processus complexe et long car les facteurs qui déterminent le débit des rivières et l'intensité des inondations, tels que l'occupation du sol, varient à la fois dans l'espace et dans le temps. Toutefois, ces problèmes peuvent être surmontés au recours à l'application des technologies de télédétection et du système d'information géographique (SIG), ainsi que des modèles hydrologiques et hydrauliques.

Dans les bassins non jaugés, l'estimation du débit de pointe de conception est généralement évaluée à l'aide de modèles hydrologiques conceptuels. Ces modèles ont l'avantage de reproduire le comportement des systèmes hydrologiques complexes (Mlynski et al. , 2018; Vojtek et al. , 2019) .

En somme, les résultats de la modélisation hydrologique peuvent, après affinement, être insérés dans des modèles hydrauliques-hydrodynamiques. Ce qui permet une meilleure modélisation et une cartographie rigoureuse des inondations.

Les caractéristiques hydrauliques des inondations qui sont nécessaires pour la cartographie et la gestion des risques des crues, telles que la profondeur de l'eau, l'étendue et la durée des crues,

peuvent être déterminées à l'aide de plusieurs modèles hydrauliques et hydrodynamiques. Ces modèles sont soit unidimensionnels 1D, bidimensionnels 2D ou couplés 1D et 2D (Gangrade et al. , 2019; Papaioannou et al. , 2019). Pour une meilleure estimation des caractéristiques des crues et une cartographie fiable des inondations dans les zones urbaines, les modèles bidimensionnels tels que HEC-RAS 2D, FLO 2D sont les plus indiqués (Apollonio et al. , 2020; Papaioannou et al. , 2019; Pellicani et al. , 2018).

La modélisation hydraulique nécessite, préalablement, des données topographiques, y compris une configuration précise du lit de la rivière, la connaissance de l'occupation du sol et une compréhension complète du processus pluie-écoulement pour simuler de manière fidèle la propagation du flux dans les zones sujettes aux inondations (Annis et al. , 2020).

Toutefois, dans les bassins non jaugés et faute de données aux inondations (entendu des crues et profondeur d'eau mesurées), la validation des résultats des modèles n'est pas directement accessible. Pour pallier à ce handicap, des enquêtes exhaustives post-événement sont mises en œuvre (Hall et al. , 2014; Macchione et al. , 2019; Rollason et al. , 2018) . Ces enquêtes peuvent être réalisées à travers un examen minutieux de tous les documents permettant la description des épisodes hydrologiques en temps réel. L'ensemble des données conduit à la validation de la modélisation de l'événement hydrologique (Português Molla et al. , 2016). Dans ce cadre, les enquêtes associées aux données de l'information géographique volontaire (VGI) peuvent être une source fiable dans la reconstruction des crues passées. Les résultats de cette reconstruction constituent un support de validation des modèles hydrologiques et hydrauliques dans les bassins non jaugés (Ferster et al. , 2017; Haklay, 2013; Kjeldsen et al. , n. d. ; Macchione et al. , 2019; Nardi et al. , 2021; Segura-Beltrán et al. , 2016).

Les travaux de Segura-Beltrán et al (2016) représentent un exemple typique de cette stratégie de validation. Ces travaux concernent la reconstruction de la crue éclair de la rivière Gérone (Espagne, 2007). En effet, les VGI obtenus à travers des documents, des photos et des témoignages de citoyens représentaient un support fiable pour la validation des modèles hydrologiques et hydrauliques.

En référence à EM-DAT, l'Algérie a connu au cours du siècle précédent 52 événements hydrométéorologiques extrêmes qui ont causé 4814 morts. Parmi ces événements, on cite les inondations de Bab El Oued à Alger en 2001 (800 morts), Sidi Bel Abbés en 2007 (7 morts), Ghardaïa en 2008 (100 morts) et El-Bayadh en 2011 (12 morts) (Meddi et al. , 2017). Les dégâts matériels sont estimés à 350 millions d'euros par an (DNRM).

Face à l'ampleur de ces catastrophes, l'Algérie s'est dotée d'une politique de prévention des risques majeurs et de gestion des catastrophes, définie par la loi 04-20 du 25 décembre 2004. Les dispositions de cette loi constituent les axes principaux d'une politique donnant priorité et importance à l'amélioration de la connaissance des risques, au développement de l'information préventive, à la prise en compte des risques et à la mise en place de dispositifs de prise en charge de toutes les catastrophes d'origine naturelle. L'élaboration et l'établissement des cartes des zones inondables font partie des mesures préventives prévues par les dispositions de cette loi (Otmani et al. , 2022).

Dans ce cadre, la modélisation hydrologique permet l'établissement de ces cartes et l'estimation du débit de pointe de conception particulièrement dans les bassins non jaugés. Pour cette modélisation hydrologique, la formule rationnelle, la méthode Sokolovsky et le modèle conceptuel HEC-HMS sont couramment utilisés en Algérie. La méthode de Sokolovsky est basée sur les caractéristiques hydrologiques représentatives telles que le temps de concentration et le coefficient de ruissellement (Bennis & Crobeddu, 2007). Toutefois, pour les bassins non jaugés, la validation de cette méthode est difficile en raison du manque de mesure directe de certains paramètres hydrologiques tels que le temps de concentration.

Le modèle conceptuel HEC-HMS, conçu par l'USACE, a la capacité de transformer les précipitations en ruissellement et est fréquemment utilisé en employant l'hydrogramme unitaire synthétique (SIHU) et la fréquence tempête (Derdour & Bouanani, 2018, 2019; Skhakhfa & Ouerdachi, 2016).

En revanche, dans le cadre de la modélisation hydrodynamique, le modèle HEC-RAS unidimensionnel 1D ou bidimensionnel 2D est considéré comme le modèle le plus faible en matière d'estimation de la profondeur de l'eau et de l'étendue des crues (Bekhira et al. , 2019; Yamani et al. , 2016). La quasi-totalité des bassins versants algériens sont des bassins non jaugés (ANRH). Indépendamment de leur situation géographique, ces bassins sont exposés aux risques d'inondations catastrophiques (Atallah et al. , 2018).

Dans le contexte algérien, marqué par des incertitudes inhérentes à la modélisation hydrologique et hydraulique, la modélisation des bassins non jaugés est confrontée à un défi majeur : le manque de modèles appropriés.

Cette étude vise à relever ce défi en élaborant un modèle spécifique pour la cartographie des inondations dans les bassins non jaugés de la région, en utilisant un couplage validé de plusieurs modèles hydrologiques et hydrauliques. L'approche méthodologique proposée implique l'intercombinaison de modèles hydrologiques et de modèles hydrauliques hydrodynamiques

bidimensionnels, y compris la formule rationnelle, le modèle conceptuel HECHMS de l'USARMY et le modèle EBA4SUB hydrologique. Ce dernier, adapté aux petits bassins non jaugés, est basé sur un cadre événementiel qui ne nécessite pas d'étalonnage (Annis et al. , 2020; Pellicani et al. , 2018; Piscopia et al. , 2015). Pour les modèles hydrauliques, les modèles bidimensionnels HECRAS 2D et FLO 2D sont choisis pour leur applicabilité dans les zones urbaines (Apollonio et al. , 2020; Grimaldi et al. , 2013; Ignacio et al. , 2016).

Pour valider le modèle appliqué, des données non conventionnelles de l'information géographique volontaire (VGI), telles que des photos, des vidéos et des relevés topographiques, ainsi que des reportages identifiant les zones inondées, sont utilisées (Otmani *et al.*, 2022).

Comme exemple d'application, l'événement de la crue extrême survenue le 01/10/2011 dans le bassin versant d'Oued Deffa, près de la ville d'El-Bayadh, est considéré. Avec une période de retour estimée à 100 ans, Cet événement a provoqué de graves inondations offrant un cas d'étude pertinent pour tester l'efficacité du modèle en l'absence de données hydrométriques suffisantes (Hafnaoui et al. , 2020).

Ainsi, cette recherche vise à répondre à trois questions fondamentales qui guident la suite de l'étude :

- 1. Comment l'inter-combinaison de modèles hydrologiques et de modèles hydrauliques hydrodynamiques bidimensionnels peut-elle offrir une solution fiable pour la modélisation précise des inondations dans les bassins non jaugés en Algérie ?**
- 2. Comment les données de l'information géographique volontaire (VGI) peuvent-elles être utilisées pour surmonter le manque de données hydrométriques et valider efficacement les modèles hydrologiques et hydrauliques dans ces régions ?**
- 3. Comment l'utilisation de cartes de risque d'inondation élaborées à partir de modèles hydrologiques et hydrauliques avancés peut-elle contribuer à l'établissement de systèmes d'alerte précoce et à l'amélioration de la gestion des risques d'inondation par le renforcement des mesures d'atténuation et de contrôle de leurs impacts dans les zones à risque, notamment dans les bassins versants non jaugés en Algérie ?**

Ces questions représentent les axes principaux autour desquels s'articulera notre analyse, visant à approfondir la compréhension et la gestion des inondations en Algérie particulièrement dans les bassins non-jauges dans les zones arides et semi-arides.

Chapitre I

Concepts de base relatifs aux risques naturels d'inondation

I. Concepts de base relatifs aux risques naturels d'inondation

I.1 Introduction

Dans ce chapitre initial, nous établissons les fondations nécessaires à la compréhension des multiples facettes des risques d'inondation. Notre exploration commence par une définition précise des termes tels que le risque, le danger, la vulnérabilité, ainsi que des problèmes et dommages associés. Cette clarification est cruciale pour appréhender la complexité des inondations et leur impact sur les populations et l'environnement. Nous examinons ensuite le concept d'inondation, en étudiant ses différents types, causes et caractéristiques.

Cette section vise à fournir une compréhension détaillée de la nature des inondations, un phénomène à la fois naturel et souvent aggravé par l'activité humaine.

La section suivante offre un panorama des inondations à l'échelle mondiale, en mettant l'accent sur la situation en Algérie.

La section est enrichie par une base exhaustive des données historiques, offrant ainsi un aperçu des événements passés et de leurs conséquences en Algérie (Hamouda et al. , 2022).

Pour conclure ce chapitre, nous résumons les points clés abordés et présentons les chapitres suivants.

I.2 Concept des termes : Risque, Danger, Vulnérabilité, Problématiques et Dommages

Le risque d'inondation se réfère à la probabilité qu'une zone donnée soit affectée par des inondations et aux conséquences dommageables qui en résultent. Il est déterminé par la combinaison de deux éléments clés : le danger d'inondation et la vulnérabilité des problématiques présentes dans la zone. Dans cette section, nous définirons ces termes et expliquerons comment ils sont liés aux inondations.

I.2.1 Les Problématiques

Les inondations posent un défi crucial pour les populations affectées, mettant en danger les personnes, les biens, les infrastructures et l'environnement (Messner *et al.* , 2007). Les conséquences de ces événements météorologiques extrêmes peuvent causer des dommages considérables et irréparables. La vie humaine est la principale problématique, car chaque individu est exposé au danger pendant les inondations. L'ampleur de cette problématique peut être évaluée sur la base du nombre de personnes potentiellement affectées par ces catastrophes naturelles. Cependant, les biens, qu'ils appartiennent à des individus ou à des populations,

représentent également une problématique majeure. Les dommages matériels causés par les inondations peuvent entraîner des pertes économiques considérables et perturber le fonctionnement quotidien des populations affectées (Glass, 2013).

La protection de ces actifs constitue donc une préoccupation essentielle dans la gestion des inondations. En outre, l'environnement est également une problématique importante, car les inondations peuvent affecter les écosystèmes, la biodiversité, la qualité de l'eau et la fertilité des sols. Les inondations peuvent également déclencher des dangers secondaires, tels que des glissements de terrain, de l'érosion ou de la contamination, qui peuvent endommager davantage l'environnement et ses ressources. En résumé, les problématiques liées aux inondations sont multiples et complexes, englobant des aspects humains, économiques et environnementaux (Shah *et al.* , 2018).

I.2.2 Le Danger

De manière générale, un danger est un événement ou un phénomène naturel caractérisé par son occurrence incertaine, son amplitude variable et sa périodicité. Il représente un élément potentiellement dangereux ou nuisible pour les êtres humains, les biens, les infrastructures ou l'environnement (Shi, 2019).

Concernant le danger d'inondation, il s'agit d'un phénomène spécifique caractérisé par la submersion d'une zone due à une élévation du niveau de l'eau, généralement causée par des événements hydrométéorologiques tels que de fortes pluies, des crues de rivières ou des tempêtes. Le danger d'inondation survient lorsque les précipitations dépassent la capacité d'absorption du sol ou lorsque les rivières débordent de leur lit. Il est marqué par sa nature aléatoire en termes de fréquence, d'intensité et de durée (Doswell, 2015). Comprendre le danger d'inondation nécessite une analyse approfondie de caractéristiques spécifiques telles que l'étendue des zones inondables, les débits des rivières, la topographie du terrain, les prévisions météorologiques, etc.

L'analyse associée vise à évaluer les risques encourus par les personnes, les biens et les infrastructures dans les zones exposées aux inondations. Des données quantifiables telles que les niveaux d'eau, les débits et les cartes de submersion sont utilisées pour représenter et comprendre plus précisément le danger d'inondation (de Moel *et al.* , 2015).

I.2.3 La Vulnérabilité

La vulnérabilité peut être définie comme la mesure des conséquences dommageables d'un événement sur les problématiques présentes, telles que le patrimoine bâti ou la population. Elle

peut se manifester sous des formes physiques, fonctionnelles, humaines, socio-économiques et environnementales. La vulnérabilité n'est pas statique ; elle peut être modifiée et évoluer en fonction des activités humaines (Messner & Meyer, 2005).

Au cours des dernières années, la définition de la vulnérabilité a évolué pour englober une vision plus large. Elle reflète désormais la fragilité d'un système dans son ensemble et sa capacité à faire face à la crise causée par le danger. Cette nouvelle perspective prend en compte les interactions complexes entre les différents éléments constitutifs d'un système, tels que les infrastructures, les institutions, les réseaux sociaux, les processus économiques et les écosystèmes.

Cette évolution dans la compréhension de la vulnérabilité souligne l'importance de prendre en compte les aspects sociaux, économiques et environnementaux dans l'analyse des risques liés à un danger donné. Il est essentiel de comprendre comment ces différents facteurs interagissent et influencent la vulnérabilité globale d'un système. En adoptant cette approche plus holistique, il devient possible de mettre en œuvre des stratégies de réduction de la vulnérabilité qui renforcent la résilience d'un système et sa capacité à se remettre d'une crise (Schneiderbauer et al. , 2017).

I.2.4 Le Risque

Le risque peut être défini de deux manières, conformément aux normes citées par Aven & Renn (2009). Premièrement, il peut être considéré comme une combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences. Ainsi, le risque représente le potentiel de dommage dû à l'exposition à un phénomène dangereux. Deuxièmement, le risque peut également être défini comme l'amalgame de la probabilité d'un dommage et de sa gravité. Il représente alors l'espérance mathématique de perte de vie, de blessures, de dommages matériels et d'impacts sur les activités économiques sur une période déterminée et dans une région spécifique, en relation avec un danger particulier. Par conséquent, le risque est essentiellement le produit du danger et de la vulnérabilité. Il est crucial de noter que le risque est une probabilité et, s'il se réalise, il se manifeste sous la forme d'un accident ou d'une catastrophe. Le risque n'est considéré que lorsqu'il y a une chance probable de dommage, c'est-à-dire lorsque des éléments vulnérables sont susceptibles d'être affectés (Cardona, 2013).

I.2.5 Le Risque d'inondation

Le risque d'inondation peut être décrit comme la combinaison de la probabilité de survenue d'une inondation et de ses conséquences négatives potentielles pour la vie et la santé humaines,

l'environnement, les biens (y compris le patrimoine culturel) et les activités économiques. Pour évaluer précisément ce risque, il est essentiel de bien comprendre les problématiques présentes dans la zone concernée. Une évaluation de la vulnérabilité joue un rôle essentiel dans cette évaluation. Elle fournit des informations détaillées sur la typologie et les caractéristiques des éléments exposés, tels que la population, les bâtiments, les infrastructures, les activités économiques et les actifs environnementaux. Cette évaluation mesure également le degré de susceptibilité ou de sensibilité de ces éléments aux dangers liés aux inondations, en prenant en compte des facteurs tels que leur emplacement, leur conception, leur construction et leur résilience. L'évaluation de la vulnérabilité est primordiale pour identifier les principaux facteurs contribuant aux dommages et pertes potentiels causés par les inondations et pour proposer des mesures réalisables pour leur atténuation (Council, 2007).

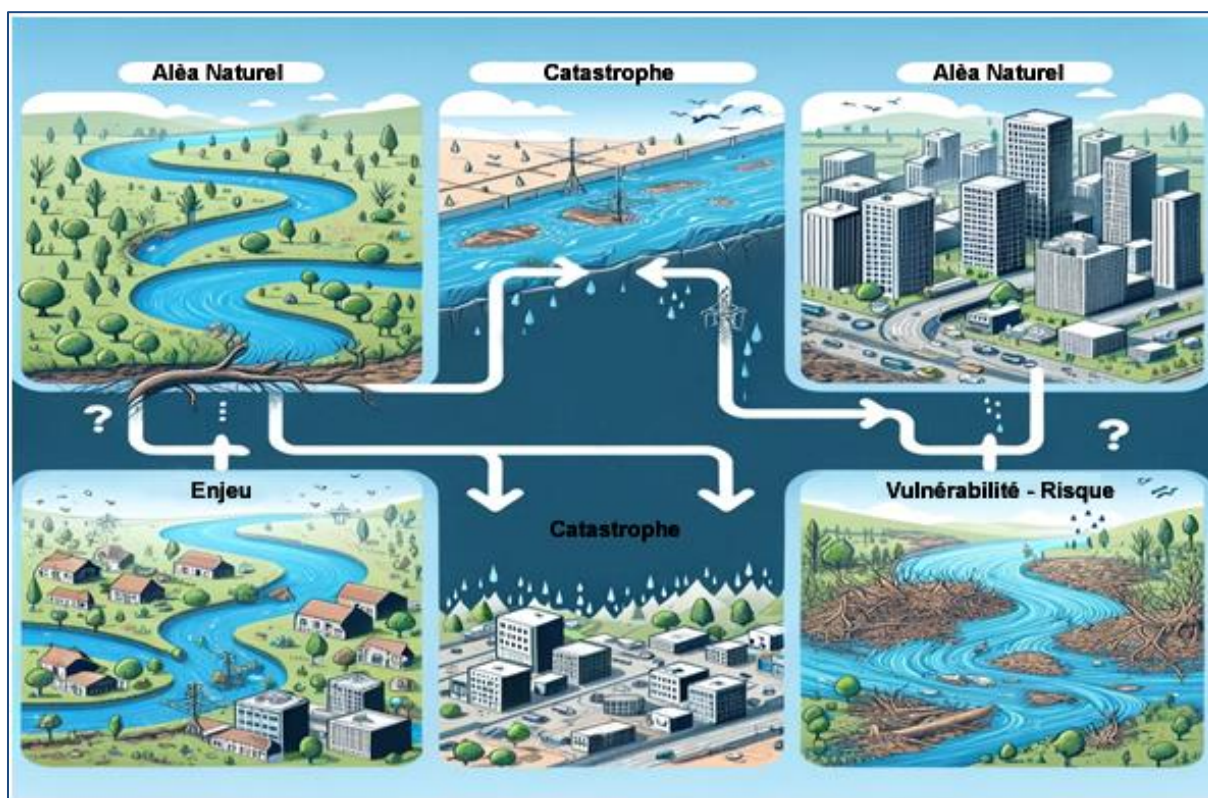


Figure I-1: Composant de risque d'inondation

I.3 Concept d'inondation, ses types, causes et paramètres

L'inondation est un phénomène naturel qui se produit lorsque l'eau recouvre des terres normalement sèches. Elle peut être causée par divers facteurs, tels que de fortes précipitations, la fonte des neiges, le débordement des rivières, les ondes de tempête côtières ou la montée des eaux souterraines. Les inondations peuvent avoir des impacts significatifs sur la vie humaine,

les biens, les infrastructures et l'environnement, en particulier dans les zones vulnérables à ces événements.

Il existe différents types d'inondations, en fonction de la source de l'eau, de l'emplacement, de la durée et de l'étendue de l'inondation. Parmi les principaux types d'inondation, on trouve (Wilson, 2021):

I.3.1 Types des inondations

1. Inondation fluviale :

Ce **type** d'inondation se produit lorsque les rivières, les cours d'eau ou les lacs débordent de leurs rives en raison de précipitations excessives, d'une fonte rapide des neiges, de barrages de glace ou de ruptures de barrages. Les inondations fluviales peuvent affecter de vastes zones et durer des jours ou des semaines. Elles peuvent également provoquer de l'érosion, de la sédimentation et des changements dans la morphologie des rivières. L'inondation fluviale est le type d'inondation le plus courant dans le monde (Booij, 2017).

2. Inondation éclair :

Ce type d'inondation se produit lorsque le niveau de l'eau monte rapidement et de manière inattendue en peu de temps, généralement en quelques minutes ou heures. Les inondations éclair peuvent être déclenchées par des précipitations intenses, des orages, des cyclones tropicaux ou la libération soudaine d'eau provenant de digues, de barrages ou de barrages de glace. Les inondations éclair peuvent affecter de petites zones et se déplacer avec une grande vitesse et force. Elles peuvent également provoquer des glissements de terrain, des coulées de débris et des coulées de boue. L'inondation éclair est considérée comme le type d'inondation le plus dangereux (Eric Gaume et al. , 2016).

3. Inondation urbaine :

Ce type d'inondation se produit lorsque l'eau s'accumule dans les zones urbaines en raison de systèmes de drainage inadéquats, de surfaces imperméables ou d'une capacité d'infiltration réduite du sol. Les inondations urbaines peuvent être causées par de fortes précipitations, la fonte des neiges ou des ondes de tempête. Elles peuvent affecter les bâtiments, les routes, les ponts et autres infrastructures. Elles peuvent également provoquer des débordements d'égouts, une contamination de l'eau et des risques pour la santé. Les inondations urbaines deviennent plus fréquentes et sévères en raison de la croissance démographique, de l'urbanisation et du changement climatique (Sebastian et al. , 2022).

4. Inondation côtière :

Ce type d'inondation se produit lorsque l'eau de mer inonde les zones côtières en raison de marées hautes, d'ondes de tempête, de tsunamis ou de la montée du niveau de la mer. Les inondations côtières peuvent être influencées par le vent, les vagues, les courants et la topographie. Elles peuvent affecter les zones de basse altitude et les îles. Elles peuvent également causer de l'érosion, une intrusion d'eau salée et des dommages aux écosystèmes et infrastructures côtiers. On s'attend à ce que les inondations côtières augmentent à l'avenir en raison du changement climatique et de l'affaissement des terres (Brody *et al.* , 2022).

5. Inondation due à la rupture de lacs glaciaires :

Ce type d'inondation se produit lorsque l'eau d'un lac glaciaire est soudainement libérée. Les inondations dues à la rupture de lacs glaciaires peuvent être causées par la fonte des glaciers, des tremblements de terre, des glissements de terrain, des avalanches ou des éruptions volcaniques. Elles peuvent affecter les zones en aval et causer des dommages catastrophiques et des pertes de vie. Il s'agit d'un type spécifique d'inondation éclair qui se produit dans les régions montagneuses (Richardson & Reynolds, 2000)

I.3.2 Causes des inondations

Les causes des inondations peuvent être classées en deux catégories : météorologiques et hydrologiques. Les causes météorologiques sont liées aux phénomènes météorologiques et climatiques qui produisent ou influencent les précipitations, tels que les pluies, les chutes de neige, l'évaporation et la transpiration. Les causes hydrologiques sont liées au mouvement et au stockage de l'eau à la surface et dans le sous-sol, tels que le ruissellement, l'infiltration, les eaux souterraines et le débit des cours d'eau (Cloke *et al.* , 2017).

I.3.3 Les paramètres des inondations

Les paramètres des inondations sont les variables qui décrivent les caractéristiques et les impacts d'un événement d'inondation, tels que le niveau d'eau, le débit, la vitesse, la durée, la fréquence, l'étendue, la profondeur, le volume et les dommages. Les paramètres des inondations peuvent être mesurés, estimés ou modélisés à l'aide de diverses méthodes et sources de données, telles que les jauges, les satellites, les radars, les enquêtes et les archives historiques. Les paramètres des inondations peuvent être utilisés pour évaluer le danger, l'exposition, la vulnérabilité et le risque d'inondation dans une zone donnée (Seejata *et al.* , 2018).

I.4 Aperçu des inondations dans le monde et en Algérie

Les inondations sont l'un des dangers naturels les plus courants et destructeurs, affectant des millions de personnes et causant d'importantes pertes économiques et environnementales chaque année. Selon la base de données EM-DAT, entre 1900 et 2022, il y a eu 3 784 événements d'inondation dans le monde, entraînant 6,8 millions de décès, affectant 4,4 milliards de personnes et causant des dommages de 1,6 trillion de dollars américains. La fréquence et l'intensité des inondations ont augmenté au cours des dernières décennies en raison du changement climatique, de la croissance démographique, de l'urbanisation et des changements d'utilisation des terres (Source : <https://news.un.org/en/story/2022/10/1129997>).

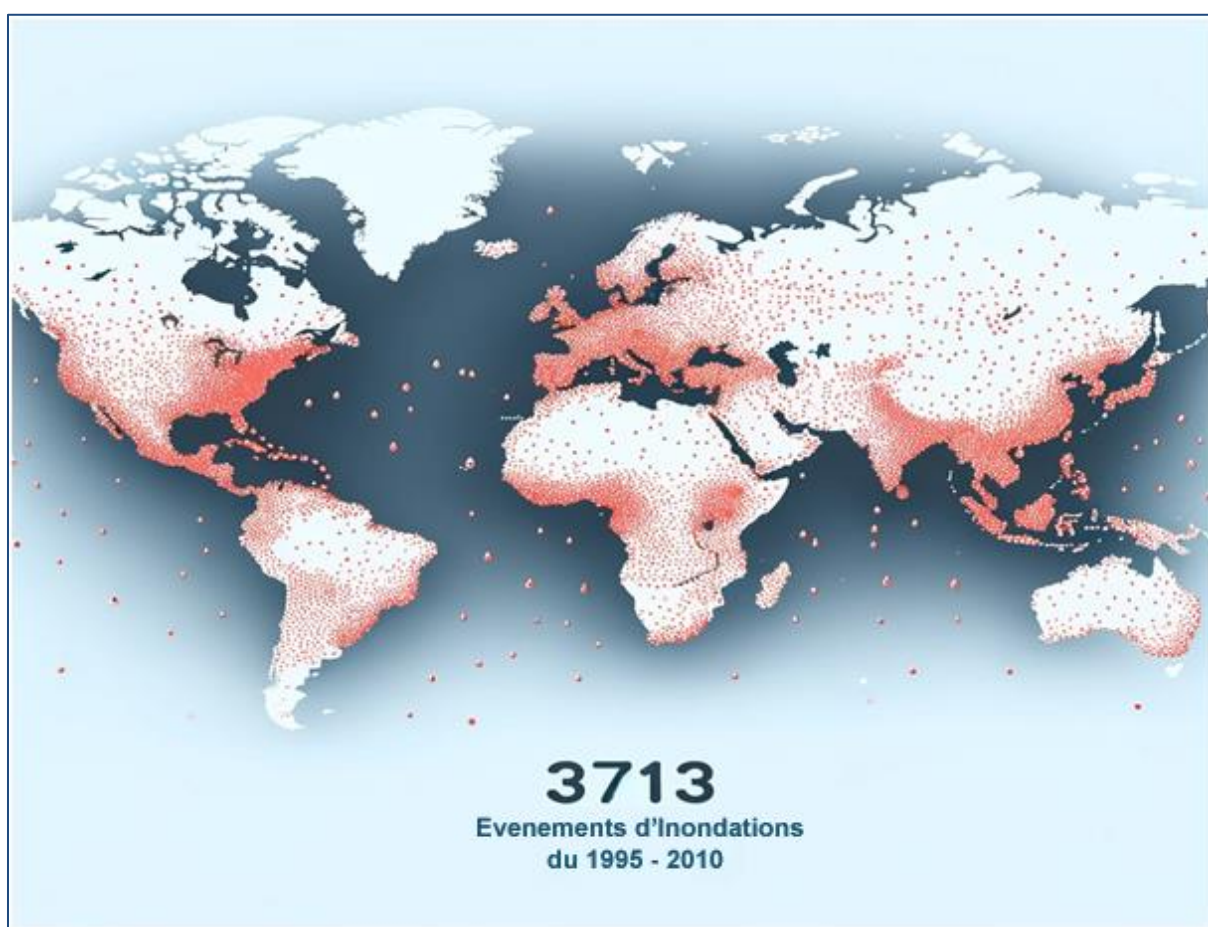


Figure I-2: Répartition mondiale des pays affectés par les inondations entre 1985 et 2010. (Source: G. R. Brakenridge. Global Active Archive of Large Flood Events. Dartmouth Flood Observatory, University of Colorado, USA.)

L'Afrique est l'un des continents les plus vulnérables aux inondations, car de nombreux pays manquent d'infrastructures adéquates, de systèmes d'alerte précoce et de capacités de préparation et de réponse aux catastrophes. Selon le Dartmouth Flood Observatory, entre 1985 et 2022, il y a eu 1 020 événements d'inondation en Afrique, affectant 53, 4 millions de

personnes et causant 32000 décès (Source : <https://www.nbcnews.com/news/world/thousands-feared-dead-libya-dam-collapse-rcna104477>).

Les régions les plus touchées sont l'Afrique de l'Ouest, l'Afrique centrale et la Corne de l'Afrique, où les inondations sont souvent déclenchées par de fortes pluies, des tempêtes tropicales ou le débordement des rivières (Source : <https://www.bbc.co.uk/news/world-africa-15146194>).

L'Algérie, située en Afrique du Nord, endure un climat semi-aride à aride avec des précipitations rares et minimales. Malgré ces conditions, le pays fait face occasionnellement à la dévastation des inondations soudaines, en particulier dans ses zones côtières du nord et ses oasis du sud. Dans ces endroits, de fortes précipitations peuvent entraîner un ruissellement rapide et le gonflement soudain des oueds, ou rivières saisonnières.

Selon la base de données EM-DAT, l'Algérie a subi 52 événements d'inondation importants de 1900 à 2022, affectant 1, 2 millions de personnes et entraînant 1 600 décès. Les données de la Protection Civile Algérienne soulignent la gravité de ces inondations. Certains événements ayant causé plus de mille décès. Parmi ceux-ci, les inondations qui ont frappé Alger en 2001 et Ghardaïa en 2008 sont particulièrement destructrices, causant d'importants dégâts aux habitations, aux infrastructures et à l'agriculture, érodant le patrimoine culturel et augmentant le risque de maladies hydriques, entraînant un déplacement massif (Hamouda *et al.*, 2022).

Le tableau suivant résume les événements d'inondation significatifs en Algérie, avec les dates, les précipitations enregistrées (lorsqu'elles sont disponibles) et le nombre de décès causés par chaque événement.

Tableau I-1: Banque de données inondation (Protection civile algérienne) 2017.

Localité	Date d'événement	Pjmax (mm)	Dégâts (mort)
Azzazga	12 octobre 1971	183 mm	40 morts
Annaba	27 au 29 mars 1973	166 mm	03 morts
Tizi-Ouzou	28 au 31 mars 1974	688 mm en 4 jours	52 morts
El-Eulma	01 septembre 1980	—	44 morts
Annaba	11 novembre 1982	167 mm	02 morts
Birine (W. Djelfa)	22 août 1983	—	10 morts
Jijel	03 février 1984	—	20 morts
Batna	05 juillet 1987	57 mm	02 morts
Biskra	01 septembre 1989	—	02 morts
Ghardaïa	03 juin 1991	—	09 morts
Mascara			02 morts
Tissemsilt	29 sept. au 02 oct. 1994	—	09 morts
Sidi Bel Abbès			02 morts
Annaba	4 avril 1996	—	05 morts
Adrar	14 janvier 1999	74 mm	12 morts
Oued Bou Saada	28 septembre 2000	—	01 mort
AÏN TEMOCHENT	14 octobre 2000	—	04 morts
NAAMA	23 octobre 2000	—	05 morts
TISSEMSILT	24 octobre 2000	—	01 mort
Alger (BAB EL OUED)	9 et 10 novembre 2001	—	800 morts
Ghardaïa	1 et 2 octobre 2008	—	34 morts
AÏN DEFLA	09 octobre 2008	—	06 morts
Bechar	15 et 16 octobre 2008	—	08 morts
El-Bayadh	01 octobre 2011	—	14 morts

I.5 Conclusion

Ce chapitre a introduit le concept de risque d'inondation, en mettant l'accent sur les éléments fondamentaux et en explorant les différents types d'inondations. Il a également souligné l'impact global des inondations.

Nous avons abordé l'importance de l'évaluation du risque d'inondation pour élaborer des stratégies d'atténuation efficaces. Les termes clés tels que le danger, la vulnérabilité et le risque liés aux inondations sont définis, et les principaux facteurs qui les influencent sont examinés. Plusieurs méthodes d'évaluation du risque d'inondation, incluant l'utilisation de statistiques, de systèmes d'information géographique (SIG), de télédétection, de simulations de scénarios et d'apprentissage automatique, sont évoquées.

Le chapitre suivant traitera de la manière dont une gestion intégrée du risque d'inondation peut réduire les impacts et les pertes dus aux inondations. Nous explorerons les principes et composants clés de cette gestion, tels que la prévention, la préparation et la sensibilisation au risque. Nous présenterons différentes mesures, tant structurelles que non structurelles, pour atténuer les risques d'inondation, comme les barrages, les digues, les cartes d'inondation et les systèmes d'alerte précoce. Nous discuterons également des avancées technologiques récentes qui soutiennent l'évaluation et la gestion des risques d'inondation, telles que la télédétection, la modélisation et les SIG. Pour conclure, nous mettrons en évidence les avantages et les défis des différentes approches et outils présentés.

CHAPITRE II :

Gestion des inondations et cartographie : Méthodes, Technologies et Défis

II. Gestion des inondations et cartographie : méthodes, technologies et défis

II.1 Introduction

Ce chapitre propose une exploration approfondie de la gestion et la cartographie des inondations essentielles pour atténuer leurs impacts et leurs risques. Il discute les mesures structurelles et non structurelles dans la gestion des inondations, applicables aux bassins versants, cours d'eau, zones urbaines et rurales. Ainsi, les principes de la gestion intégrée des risques d'inondation, qui englobent la prévention, la préparation et la culture de la sensibilisation aux risques sont abordés. L'accent est mis sur diverses méthodes d'évaluation des risques d'inondation, y compris les approches statistiques, la télédétection, les SIG (systèmes d'information géographique), la simulation de scénarios et éventuellement l'apprentissage automatique. Les différents types de cartes des inondations, telles que les cartes d'étendue, de danger et de risque des inondations sont présentées. Le chapitre met également en avant les dernières avancées technologiques en matière de cartographie des inondations, telles que le Lidar, l'imagerie satellite haute résolution, la technologie des drones, la modélisation hydrologique et hydraulique sophistiquée, l'IA et l'apprentissage automatique, les capteurs de terrain, l'Internet des Objets et les SIG avancés. Le chapitre se termine par un résumé des sujets clés et justifier les orientations de recherche et le choix des méthodes d'exploration retenues dans le cadre de la présente étude.

II.2 Gestion intégrée du risque d'inondation

La gestion intégrée du risque d'inondation (GIRI) est une stratégie globale pour aborder les complexités inhérentes et en constante évolution du risque d'inondation. Elle adopte une approche méthodique, englobant trois éléments étroitement liés et complémentaires de la gestion du risque d'inondation, à savoir; prévention, préparation et culture du risque (Samuels et al., 2010).

II.2.1 Prévention, préparation et culture du risque

Cette approche combine la compréhension et la gestion des dangers liés aux inondations, la réduction de la vulnérabilité et l'utilisation d'une stratégie basée sur le concept des bassins versants. Elle nécessite un engagement politique, une coordination et la participation de toutes les parties concernées. Cette méthode relie différents aspects du risque et les divers acteurs impliqués, tels que les organismes gouvernementaux, le secteur privé et la société civile (Sayers et al., 2014).

II.2.1.1 Prévention

L'objectif ici est de diminuer la fréquence et la gravité des inondations. Cela est réalisé grâce à des mesures telles que la conservation des zones humides pour l'absorption de l'eau, le contrôle des activités humaines dans les zones à risque d'inondation, l'application de normes de construction résistantes aux inondations et l'établissement de bassins de rétention pour le stockage temporaire de l'eau. L'importance des zones humides dans la lutte contre les inondations est bien documentée, comme le montre l'étude de So et al. (2022), qui souligne leur rôle en tant que barrières naturelles contre les inondations.

II.2.1.2 Préparation

Ce processus nécessite l'élaboration de plans et de stratégies d'intervention d'urgence en anticipation de potentielles inondations. Il inclut l'éducation du public aux risques liés aux inondations, l'établissement de systèmes d'alerte précoce, la coordination des missions de sauvetage et l'organisation des évacuations lorsque cela s'avère nécessaire. Une préparation adéquate joue un rôle essentiel dans la réduction significative des pertes humaines et matérielles lors d'inondations. L'importance des systèmes d'alerte précoce dans l'atténuation de l'impact des inondations est clairement démontrée dans les travaux de Sorensen (2000). Dans son étude, l'auteur met en lumière les disparités d'efficacité des systèmes d'alerte et de préparation entre différentes populations. Il montre ainsi comment ces inégalités mènent à une protection inégale face aux catastrophes naturelles. Il souligne notamment l'absence d'une stratégie nationale unifiée et exhaustive en matière d'alerte aux États-Unis, insistant sur la nécessité d'améliorer la coordination et la standardisation pour accroître la résilience et la sécurité face aux désastres. Les recherches de Sorensen constituent une référence essentielle pour comprendre les complexités et les défis liés au développement de systèmes d'alerte précoce efficaces contre les inondations et autres catastrophes naturelles (Guzzetti *et al.*, 2020).

II.2.1.3 Culture du risque

La culture du risque englobe l'éducation et la sensibilisation de la population aux inondations et à leurs conséquences potentielles. Elle vise à encourager les individus et les populations à adopter des comportements responsables face aux risques d'inondation, à prendre des mesures d'adaptation et à intégrer la résilience dans leur mode de vie et leurs activités. L'étude de Weber et al. (2019) sur la perception et le comportement du public pendant les inondations fournit des informations précieuses pour développer une communauté consciente des risques. La gestion intégrée du risque d'inondation met l'accent sur la collaboration et la coordination entre divers

acteurs, y compris les gouvernements, les agences de gestion de l'eau, les organisations locales, les experts scientifiques, les entreprises et la société civile. En adoptant cette approche globale, les populations sont mieux équipées pour gérer les inondations, minimiser les pertes et les dommages, et promouvoir une meilleure gestion des ressources en eau pour un avenir plus résilient face aux aléas climatiques.

II.2.2 Évaluation des dangers d'inondation

Pour atténuer le risque d'inondation, il est essentiel d'employer des méthodes qui améliorent notre compréhension des phénomènes d'inondation et de leurs caractéristiques. Ces méthodes permettent d'identifier les mesures pour réduire la vulnérabilité territoriale et de dimensionner correctement les structures de protection. Une connaissance précise du danger vise à (Tate *et al.*, 2019) :

- A.** Identifier les zones inondables pour différentes fréquences d'inondation, y compris les événements exceptionnels souvent mal compris ou inconnus en termes d'étendue.
- B.** Établir les caractéristiques des inondations telles que la vitesse du courant, la profondeur de submersion et la durée pour mieux comprendre leur impact potentiel.

Les outils disponibles pour améliorer la connaissance des dangers à l'échelle territoriale incluent :

- 1.** Modélisation hydrologique et hydraulique : Ces modèles simulent la réponse des cours d'eau et des systèmes de drainage aux précipitations, prédisant les zones inondables et estimant les profondeurs d'eau.
- 2.** Télédétection et imagerie satellite : Les données satellitaires, les images aériennes et les systèmes radar surveillent les changements dans les cours d'eau et les bassins versants et identifient les zones à risque d'inondation.
- 3.** Systèmes d'information géographique (SIG) : Les SIG compilent, analysent et visualisent les données géographiques liées aux inondations, aidant à une prise de décision éclairée dans la gestion des risques. Ces outils, combinés à une approche intégrée et à une participation active de la communauté, améliorent la connaissance des dangers d'inondation et renforcent la capacité d'adaptation à ce risque naturel.
- 4.** Cartographie des plaines inondables : La combinaison de relevés topographiques et de données hydrauliques peut produire des cartes détaillées montrant les zones inondables pour différentes périodes de retour.

5. Données historiques et archives des inondations : L'analyse des archives des inondations passées fournit des informations précieuses sur les niveaux d'eau des inondations précédentes, améliorant l'évaluation des risques futurs.

II.2.3 Réduction du risque d'inondation

La réduction du risque d'inondation implique d'agir sur deux composantes principales : le danger et la vulnérabilité. La gestion des inondations englobe toutes les mesures visant à mieux comprendre le danger (phénomènes et caractéristiques des inondations) et à réduire la vulnérabilité du territoire à ces événements. En référençant ces méthodologies, il serait bénéfique de citer des travaux fondateurs qui ont façonné le domaine. Par exemple, pour la modélisation hydrologique, le mérite revient au Chow et al (1988). Pour les applications de la télédétection dans l'évaluation des inondations, les études de Smith et al (2017) sont fondamentales. Par ailleurs, les contributions de Goodchild (2007) présentent une référence dans l'application des SIG dans la gestion du risque d'inondation. Ces références offrent un contexte historique et une base dans l'évolution des méthodologies d'évaluation des dangers d'inondation.

II.3 Mesures de gestion structurale des inondations

La gestion structurale des inondations englobe les constructions physiques conçues pour prévenir, contrôler ou atténuer les effets des inondations. Allant des barrages et bassins de rétention aux systèmes de drainage urbains, ces mesures visent à influencer le comportement du ruissellement de l'eau, à protéger les zones à risque et à limiter les dommages (López-marrero, 2010).

II.3.1 Interventions dans les bassins versants

Les interventions dans les bassins versants dans les zones rurales, gèrent le ruissellement pour prévenir les inondations et l'érosion. Dans les contextes urbains, les surfaces imperméables conduisent à des stratégies alternatives telles que les techniques de stockage et d'infiltration intégrées aux systèmes d'égouts. Les bassins de rétention peuvent également servir à des fonctions doubles, telles que des espaces de loisirs pendant les périodes sèches (G. Wang *et al.*, 2016).

II.3.2 Interventions fluviales :

Le long des cours d'eau, des structures telles que des digues et des canaux de dérivation sont mises en place non seulement pour la gestion des inondations, mais aussi pour la protection des écosystèmes, la navigation et l'approvisionnement en eau. Ces travaux d'ingénierie sont cruciaux pour façonner la dynamique des rivières et protéger les terres adjacentes (Jafarzadeh *et al.*, 2018).

II.3.3 Infrastructure urbaine :

Les mesures structurelles urbaines sont conçues pour atténuer les risques d'inondation et améliorer la gestion des eaux pluviales. Parmi les exemples, on compte les pavements structurés en réservoirs et les pavements poreux, qui sont essentiels dans la gestion des eaux de pluie dans les paysages urbains (Jafarzadeh *et al.*, 2018).

II.3.4 Gestion des terres rurales :

Les pratiques de gestion des terres rurales, telles que le maintien de la couverture végétale et la création de barrières d'eau naturelles, visent à réduire l'érosion et à gérer le ruissellement. Combinées à des mesures non structurelles, ces pratiques forment une approche holistique de la gestion des inondations en milieu rural (G. Wang *et al.*, 2016).

II.4 Mesures de gestion des inondations non-structurelles

II.4.1 Les mesures non structurelles

Impliquent de changer l'utilisation des terres et la planification pour gérer le risque d'inondation. Ces mesures, telles que la cartographie des plaines inondables, informent la planification urbaine et la gestion des urgences. Elles facilitent également des mesures réparatrices comme l'assurance et l'indemnisation des populations touchées par les inondations.

II.4.2 Cartographie des Inondations :

La cartographie est un composant fondamental dans la gestion des inondations, impliquant l'évaluation des risques d'inondation à l'aide notamment le couplage des modèles hydrologiques et hydrauliques. Ces cartes aident à identifier les zones potentiellement inondables et jouent un rôle clé dans la planification des réponses d'urgence et le développement urbain. De plus, les cartes des inondations sont essentielles pour la planification réglementaire, car elles définissent

l'étendue des zones susceptibles aux inondations réglementaires, guidant les réglementations de zonage et les restrictions de développement dans ces zones (Afzal *et al.* , 2022).

II.4.2.1 Types de Cartes des Inondations

Les différents types de cartes sont :

1. Cartes de l'étendue des inondations :

Les cartes de l'étendue des inondations sont des outils essentiels dans la gestion des risques d'inondation. Elles permettent de visualiser les zones potentiellement affectées par des événements d'inondation spécifiques, qu'ils soient historiques ou hypothétiques (comme les inondations de 100 ans). Elles peuvent également détailler l'étendue d'un ou plusieurs événements d'inondation et incluent souvent des régions déjà touchées par des inondations. Ces cartes aident à comprendre et à planifier les risques d'inondation, car elles peuvent également inclure des données supplémentaires comme la profondeur de l'eau ou la vitesse du flux en différents points. Ces informations complètes sont essentielles pour une prise de décision éclairée dans la gestion des risques et la planification urbaine dans les zones inondables (Rollason *et al.* , 2018).

2. Cartes des dangers d'inondation :

Les cartes des dangers d'inondation sont établies à partir d'analyses hydrologiques et hydrauliques approfondies et servent des fonctions réglementaires. Elles illustrent spécifiquement l'étendue des inondations réglementaires désignées, comme les inondations nominales utilisées à des fins de planification et légales. Ces cartes sont importantes pour comprendre les zones à risque. Elles sont souvent utilisées pour légiférer les lois de zonage, guider le développement et établir les stratégies d'atténuation des inondations. (Bellos & Tsakiris, 2015)

3. Cartes des risques d'inondation :

Elles sont des outils spécialisés qui vont au-delà de la simple représentation des étendues potentielles d'inondation. Elles intègrent des facteurs socio-économiques comme la perte potentielle ou la vulnérabilité des biens. Ces cartes fournissent des informations sur les impacts sociaux, économiques et environnementaux des événements d'inondation possibles, aidant à comprendre non seulement où les inondations pourraient survenir, mais aussi quelles pourraient être les implications de ces inondations sur les populations et les infrastructures. Cela les rend inestimables pour une gestion et une planification complètes des risques d'inondation (Reghezza, 2007).

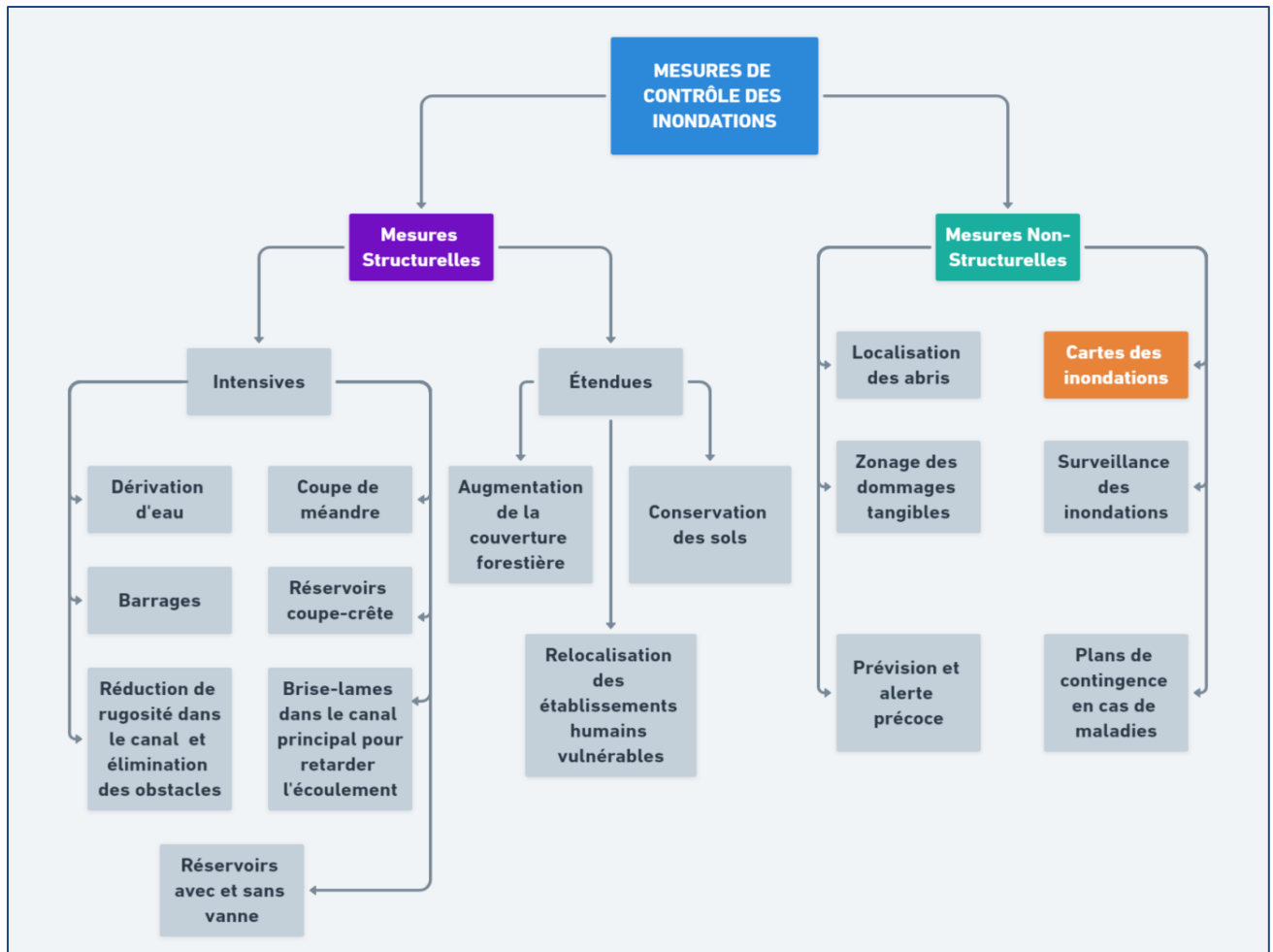


Figure II-1: Mesures de contrôle des inondations

II.5 Avancées technologiques dans la cartographie des inondations

Les avancées technologiques ont considérablement amélioré les capacités de cartographie des inondations et d'évaluation des risques :

1. Technologie Lidar : Comme mentionné par (Evans, 2011, Horritt & Bates, 2001), le Lidar (Light Detection and Ranging) est essentiel pour créer des modèles numériques d'élévation précis, qui sont fondamentaux pour une cartographie précise des plaines inondables.
2. Imagerie satellitaire haute résolution : il est important de souligner le rôle de l'imagerie satellite dans la fourniture d'images détaillées pour le suivi des inondations en temps réel et l'évaluation des dommages (Feng & Sester, 2018).
3. Drones avec Lidar ou caméras haute résolution : l'utilisation, de drones équipés de Lidar ou de caméras haute résolution, offre une approche flexible pour l'étude des zones touchées par les inondations (Annis *et al.*, 2020).

4. Modélisation hydrologique et hydraulique avancée : Selon Mai & De Smedt (2017), ces techniques permettent une compréhension plus approfondie du comportement des inondations et aident à prédire les zones inondables.
5. Systèmes d'Information Géographique (SIG) Avancés : Elkhachy (2015) a noté l'importance des SIG dans l'intégration des données géographiques avec les informations sur les inondations, améliorant les capacités de visualisation et d'analyse.
6. Capteurs de terrain et internet des objets (IoT) : Moreno et al (2019) ont mis en évidence comment ces outils fournissent des données en temps réel sur les niveaux d'eau et les conditions météorologiques, essentielles pour le suivi continu des conditions hydrologiques. Ces innovations technologiques offrent des ressources puissantes pour la prévention, le suivi et l'atténuation des inondations, améliorant considérablement la protection contre les catastrophes liées aux inondations pour les populations et les biens.
7. Intelligence Artificielle et Apprentissage Automatique : Tanim et al (2022) ont exploré comment ces technologies automatisent l'analyse des données issues de la télédétection et de l'imagerie satellite, accélérant le processus de cartographie.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les aspects critiques de la cartographie et de la gestion des inondations, en mettant l'accent sur le rôle de la gestion intégrée du risque d'inondation dans la réduction des impacts des inondations grâce à la prévention, la préparation et la sensibilisation aux risques. Diverses méthodes d'évaluation des dangers d'inondation, y compris des approches innovantes comme l'apprentissage automatique sont examinées. Les mesures structurelles et non structurelles pour l'atténuation des inondations dans les contextes urbains et ruraux, sont également discutées. Dans le chapitre, l'importance des cartes des inondations, de l'étendue aux cartes de risques, est aussi mis en évidence. L'impact transformateur des avancées technologiques telles que le Lidar, les drones et l'IA dans l'amélioration de la précision et de l'utilité de la cartographie des inondations est mis en valeur.

Les deux chapitres suivants, mis notamment l'accent sur les spécificités de la modélisation hydrologique et hydraulique, soulignant leur importance dans les prédictions plus au moins précises des inondations et la préparation à un avenir plus résilient face aux risques d'inondation.

CHAPITRE III

Modélisation Hydrologique

III. Modélisation Hydrologique

III.1 Introduction

L'augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes, notamment des inondations, représente un défi considérable à notre époque. La modélisation hydrologique est devenue un outil indispensable pour relever ces défis complexes, offrant des méthodes adaptées pour comprendre, prévoir et gérer les risques associés aux inondations.

Lorsque les données hydrométriques sont rares, l'importance de la modélisation pluie-débit est renforcée. Cette technique, qui transforme les données de précipitations en estimations des débits de pointe, améliore notre compréhension du comportement hydrologique des bassins versants.

Le rôle de la modélisation hydrologique dans la cartographie des inondations est capital en raison de sa capacité à simuler les processus de ruissellements complexes lors de fortes précipitations. Les modèles prédisant les débits des rivières et simulant la propagation des inondations dans les zones à risque sont essentiels. Ils jouent un rôle essentiel dans l'identification précise des zones à haut risque d'inondation, contribuant ainsi à une planification urbaine résiliente et au développement de stratégies efficaces d'apaisement des inondations.

Dans un premier temps, les différents modèles hydrologiques spécifiquement utilisés dans la cartographie des inondations sont abordés dans ce chapitre. Chaque modèle, avec ses caractéristiques propres, est conçu pour aborder des aspects spécifiques de son sujet. À travers cet examen, nous acquérons une compréhension complète des techniques de modélisation hydrologique et de leurs applications, particulièrement dans la prévision et la réponse aux événements d'inondation.

III.2 Processus hydrologiques : fondamentaux et dynamique des hydrogrammes de crue

L'hydrologie englobe l'interaction complexe des processus au sein du cycle de l'eau, incluant la précipitation, l'évapotranspiration, l'infiltration, l'écoulement souterrain, le ruissellement de surface, le débit des rivières et le transport de sédiment dans l'eau. Influencés tant par des facteurs naturels qu'humains, ces processus nécessitent une modélisation précise pour une gestion efficace des ressources en eau, comme l'ont souligné Maidment *et al.*, (1996) et confirmé Dwarakish & Ganasri (2015).

La précipitation, en particulier, est un facteur décisif qui alimente le système hydrologique et façonne les hydrogrammes résultants. Le débit généré par la précipitation dépend de plusieurs

facteurs tels que la topographie, la végétation et les caractéristiques du sol. Ces derniers, conjugués à des facteurs météorologiques, hydrologiques et anthropogéniques, telle que la croissance urbaine, peuvent avoir un impact significatif sur les événements d'inondation.

La compréhension des mécanismes de génération du débit ainsi qu'une modélisation précise de la précipitation et du ruissellement sont fondamentales pour la gestion des bassins versants. L'hydrologie joue ainsi un rôle vital dans la gestion durable de l'eau et dans la prévision des catastrophes naturelles, particulièrement face aux défis posés par les inondations et la sécurité hydrique.

III.2.1 Mécanismes d'écoulement

Dans un bassin versant, le modèle pluie-ruissellement simule le parcours allant de la précipitation au ruissellement, intégrant les phases de génération, de concentration et de routage. Ces composants varient en forme et en complexité mais sont indispensables au fonctionnement du modèle (Mays, 2010). L'objectif est de définir les processus permettant le calcul d'un hydrogramme de crue à partir des données de précipitations (voir Figure III-1).

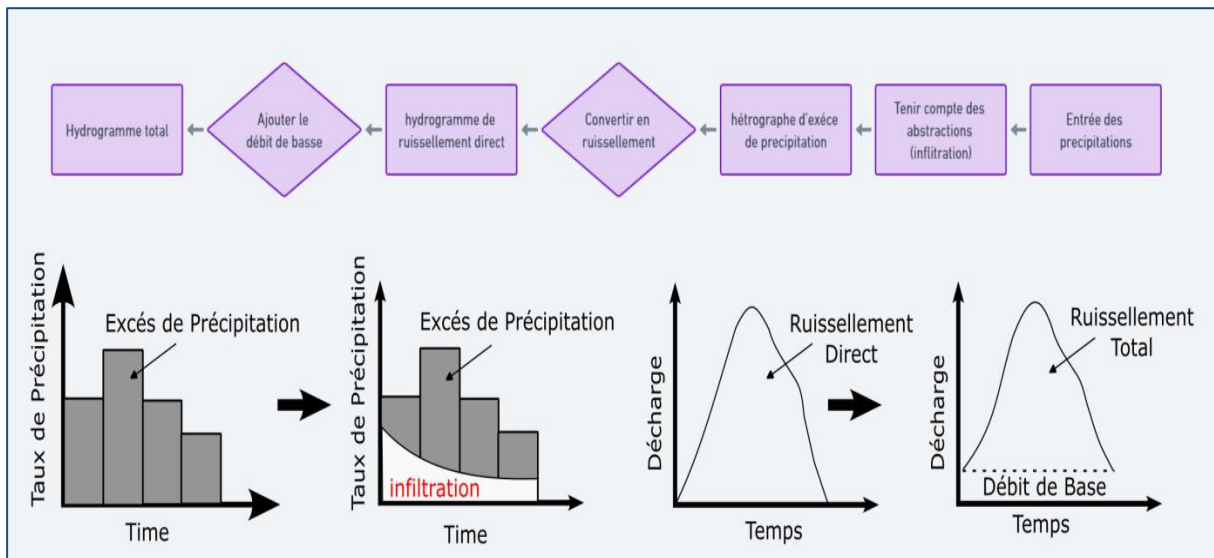


Figure III-1: Etapes pour définir un hydrogramme d'écoulement de crue.

III.2.2 Genèse d'écoulement

La transformation de la précipitation en un hydrogramme de crue implique la séparation du flux en divers composants et la compensation des pertes dues à l'interception, au stockage dans les dépressions et à l'infiltration (K. J. Beven & Cloke, 2012). L'infiltration, qui est le processus de mouvement de l'eau dans le sol, est influencée par la structure du sol, sa conductivité hydraulique et son humidité initiale. Lorsque la capacité d'infiltration du sol est dépassée par l'intensité de la pluie, une accumulation en surface se produit, contribuant au ruissellement de

surface. Horton (1933) a introduit une fonction empirique pour décrire la diminution de la capacité d'infiltration au fil du temps.

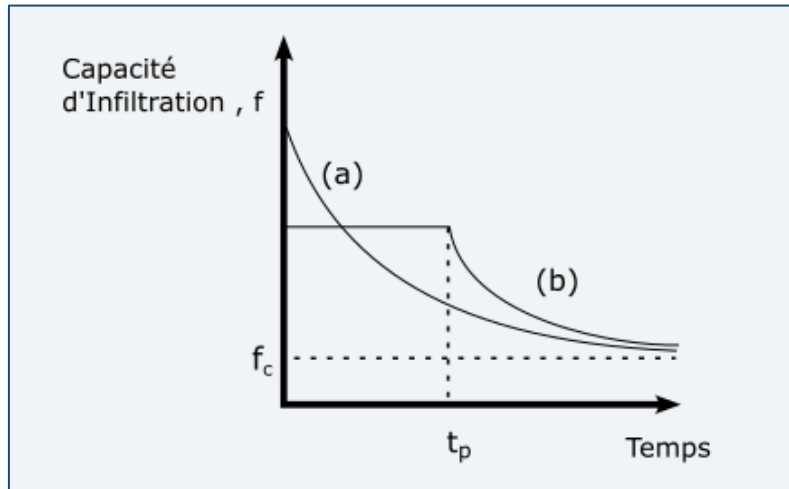


Figure III-2: Diminution de la capacité d'infiltration avec le temps (Horton, 1941)

III.2.3 Hydrogrammes de crue

Un hydrogramme de crue est une représentation chronologique du débit fluvial dans le temps, illustrant graphiquement la réponse d'un bassin versant à une tempête (voir Figure III-2). En forme de U inversé, il retrace le débit du fleuve dès le début d'un événement de tempête. L'hydrogramme est caractérisé par sa montée, son pic de débit et sa descente, représentant la réaction du bassin versant à l'apport de la tempête, depuis les pertes initiales et l'infiltration jusqu'au ruissellement final. L'hydrogramme d'une tempête, également connu sous le nom d'hydrogramme de crue, est produit en mesurant le débit à une station de jaugeage.

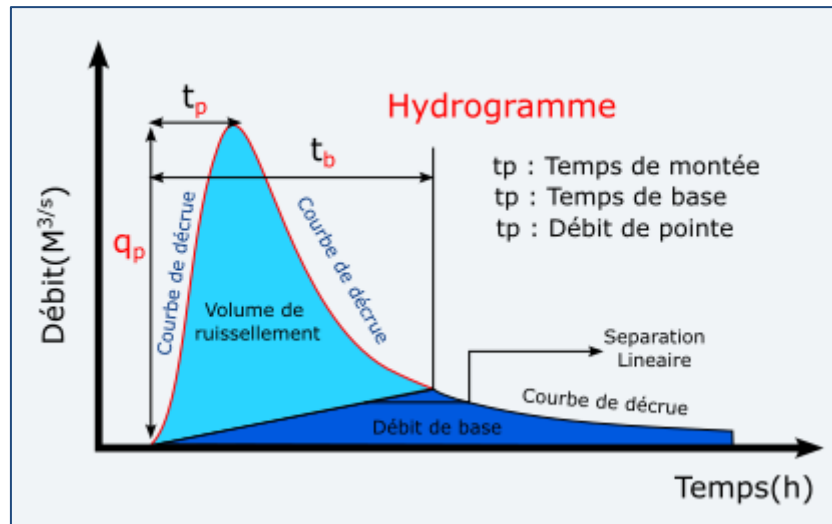


Figure III-3: Hydrogramme de crue.

III.3 Définition de la modélisation hydrologique

Dans le but de simuler de manière exhaustive le cycle de l'eau au sein d'un bassin versant, le recours à la modélisation hydrologique permet de comprendre et de prévoir la dynamique des systèmes d'eau dans une zone donnée, en se concentrant sur des processus tels que l'évaporation, l'infiltration et le ruissellement, (K. Beven, 2012). Ces modèles hydrologiques sont basés sur des équations mathématiques qui reflètent les attributs physiques du paysage. Lesdits modèles sont donc essentiels pour évaluer les réponses hydrologiques sous diverses conditions environnementales et de gestion.

III.4 Définition d'un modèle

Un modèle hydrologique est un cadre conceptuel simplifié utilisé pour imiter et comprendre les mouvements et le stockage de l'eau au sein d'un système environnemental donné, comme les bassins versants. Il intègre des processus clés tels que la précipitation, l'évaporation, l'infiltration, et l'écoulement de l'eau de surface et souterraine, visant à reproduire, de manière fidèle et réaliste, le cycle de l'eau dans un bassin versant et à élucider l'interaction entre différents composants hydrologiques (K. Beven, 2012). Cette modélisation implique souvent des hypothèses pour assurer l'applicabilité du modèle aux systèmes réels. Cela inclut l'hypothèse d'universalité, suggérant l'applicabilité large du modèle à travers des systèmes similaires, et l'hypothèse de réalisme physique, supposant que les variables et paramètres du modèle sont physiquement significatifs (Wagener & Gupta, 2005).

Ces modèles qui sont fondés sur des équations mathématiques, se présentent sous forme d'algorithmes adaptés aux caractéristiques physiques et géographiques du bassin versant. Ces

caractéristiques inclues notamment les propriétés du sol, la végétation et le terrain. Les modèles servent donc à examiner le comportement hydrologique sous diverses conditions météorologiques, modèles d'utilisation des terres et pratiques de gestion de l'eau.

Dans la pratique, un modèle hydrologique comporte des éléments tels que les entrées (par exemple, la pluie, la température), les variables d'état (par exemple, l'humidité du sol, les niveaux des eaux souterraines) et les sorties (par exemple, le débit des cours d'eau, l'évapotranspiration réelle). Des conditions initiales pour ces variables, comme l'humidité du sol au début de la simulation, sont requises aux côtés d'autres paramètres spécifiques tels que la conductivité hydraulique du sol.

Construire des modèles hydrologiques peut être un défi en raison de problèmes tels que la mise à l'échelle des mesures, la définition des conditions limites dépendant du temps, la détermination des conditions initiales et la caractérisation précise des propriétés physiques du domaine (K. Beven, 2012).

Cependant, les avancées informatiques permettent d'explorer des modèles hydrologiques plus complexes, améliorant notre compréhension des systèmes environnementaux réels (Wagener & Gupta, 2005).

En somme, les modèles hydrologiques sont vitaux pour saisir les relations complexes entre les variables environnementales et les processus hydrologiques, permettant une prise de décision éclairée dans la gestion des ressources en eau, en tenant compte de paramètres spécifiques pour les systèmes étudiés (Solomatine & Wagener, 2011).

III.5 Classification des modèles hydrologiques

Au cours des dernières décennies, une multitude de structures de modèles hydrologiques est développée et traduite en code informatique, comme souligné par des sources telles que Todini (1988). Pour clarifier les discussions, il est utile de catégoriser ces structures. Divers auteurs, y compris (Chow *et al.*, 1988, Clarke, 1973, Onof & Wheeler, 1993, Refsgaard & Knudsen, 1996), ont proposé des schémas de classification pour les modèles hydrologiques. Ces classifications reposent généralement sur deux critères principaux :

1. L'étendue des principes physiques appliqués dans la structure du modèle.
2. La manière dont les entrées et les paramètres du modèle sont gérés spatialement et temporellement.

En se concentrant sur le premier critère, c'est-à-dire la description des processus physiques, un modèle pluie-ruissellement peut être divisé en catégories déterministes et stochastiques (voir

Figure III-4). Les modèles déterministes, où une entrée donnée produit toujours la même sortie, ne tiennent pas compte du hasard. En revanche, les modèles stochastiques produisent des sorties qui sont au moins partiellement aléatoires.

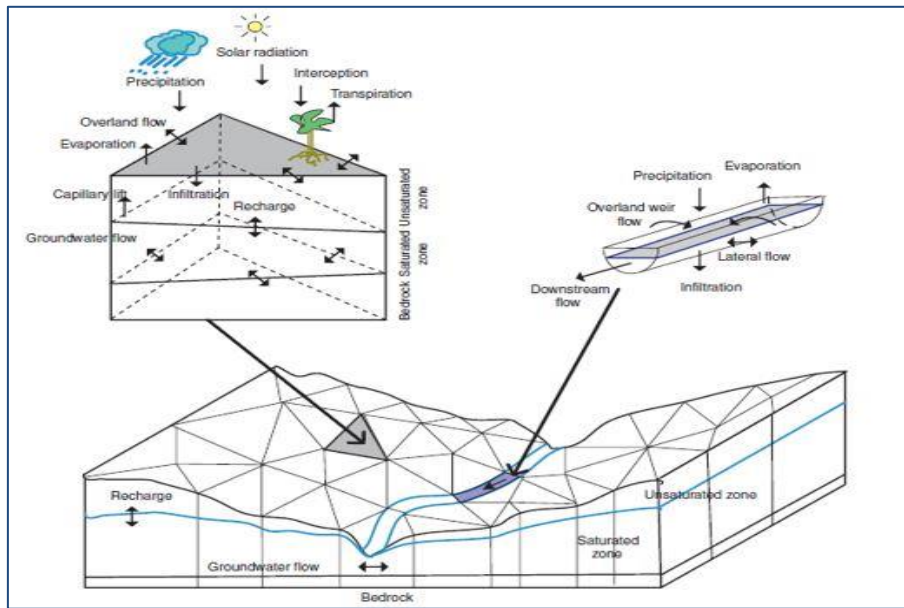


Figure III-4: Paramétrique (Modèles boîte grise ou modèles conceptuels)

Les modèles déterministes sont ensuite classés en fonction de la manière dont ils représentent un bassin versant (comme un système complet ou distribué), et de la manière dont les processus hydrologiques sont décrits – empiriquement, conceptuellement ou sur la base de principes physiques (Refsgaard & Knudsen, 1996). Cela conduit à trois catégories de modèles déterministes :

1. Modèles pilotés par les données, également connus sous le nom de modèles métriques, empiriques ou de type boîte noire.
2. Modèles conceptuels, également appelés modèles paramétriques, qui intègrent explicitement la comptabilité de l'humidité du sol, ou modèles de type boîte grise.
3. Modèles basés sur la physique, également connus sous les noms de modèles physiques, mécanistes ou de type boîte blanche.

Les deux derniers types sont parfois collectivement désignés sous le nom de modèles de simulation ou de processus. La (figure III-5) fournit des aperçus permettant d'estimer la structure et les paramètres des différents types de modèles déterministes.

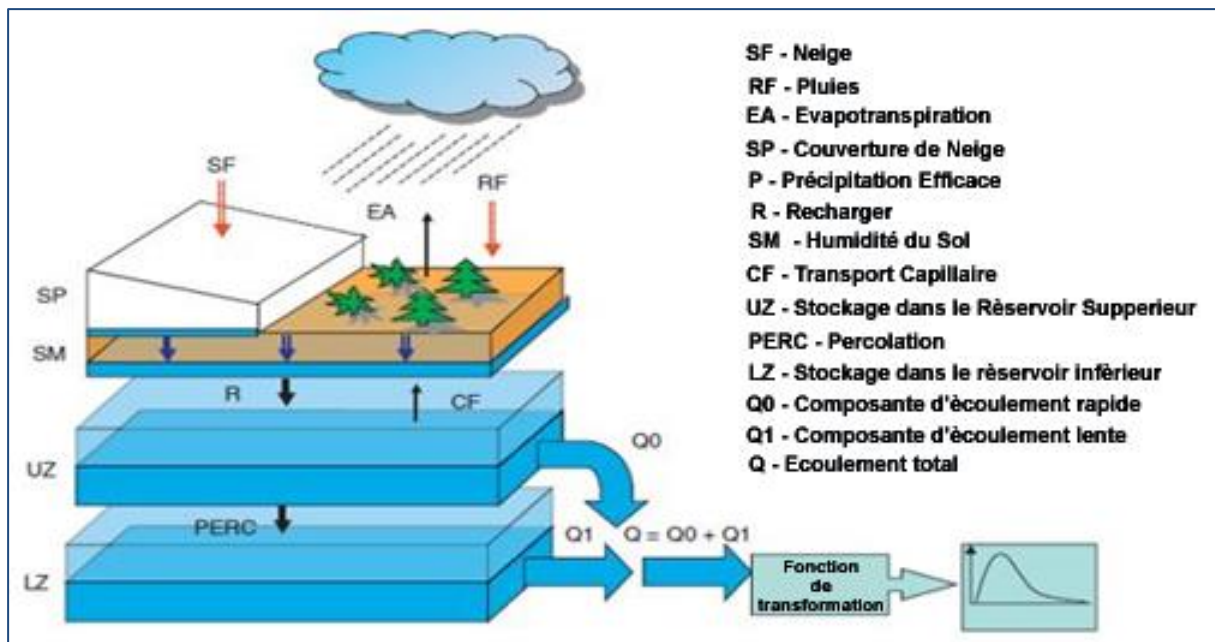


Figure III-5: Paramétrique pour différents types de modèles déterministes.

Il est important de reconnaître que la distinction entre les modèles déterministes et stochastiques n'est pas toujours claire. Dans de nombreuses études de modélisation, il est supposé que les variables ne soient pas purement déterministes, et un cadre de modélisation déterministe plus complexe est alors employé. Pour prendre en compte la stochastique, une analyse supplémentaire de l'incertitude est souvent réalisée, en supposant des distributions de probabilité pour certaines variables et paramètres impliqués (Solomatine & Wagener, 2011).

III.5.1 Principaux types de modèles hydrologiques

Les modèles hydrologiques sont variés et peuvent être classifiés de multiples façons en fonction de leurs caractéristiques et méthodologies. Les classifications couramment utilisées, selon Onof & Wheeler, (1993), sont les suivantes :

III.5.1.1 Modèles mécanistes (basés sur la physique)

Ces modèles, connus sous le nom de modèles basés sur la physique, s'appuient sur des principes physiques et des lois naturelles pour décrire les processus hydrologiques au sein d'un bassin versant. Ils utilisent des équations mathématiques, dérivées de la physique, pour simuler des phénomènes tels que l'infiltration, le ruissellement et l'évaporation. Comme mentionnée plus haut, des données détaillées sur la topographie, les sols, la végétation et les conditions météorologiques sont généralement requises pour ces modèles. Parmi les exemples figurent les modèles hydrodynamiques et le HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System)(Young, 2006).

III.5.1.2 Modèles paramétriques (Modèles boîte grise ou conceptuels)

Souvent appelés modèles boîte grise ou conceptuels, les modèles paramétriques emploient des concepts simplifiés et des paramètres pour représenter les processus hydrologiques. Ces modèles sont moins complexes que les modèles mécanistes et sont utilisés lorsque les données détaillées nécessaires pour les modèles mécanistes ne sont pas disponibles. Ils s'appuient sur des relations empiriques et des hypothèses simplifiées sur le fonctionnement des bassins versants. Un exemple de tels modèles conceptuels paramétriques est le modèle SCS-CN (Soil Conservation Service - Curve Number)(K. Beven, 2000).

III.5.1.3 Modèles métriques (empiriques, boîte noire ou pilotés par les données)

Connus sous le nom de modèles hydrologiques empiriques ou de type boîte noire, les modèles métriques se basent principalement sur des données observées, sans se concentrer sur les processus sous-jacents. Ils utilisent des techniques statistiques et des relations empiriques pour estimer les débits et les variables hydrologiques à partir de données historiques. Ces modèles sont particulièrement adaptés lorsque les données sont limitées ou que des prédictions rapides sont nécessaires. Parmi les exemples courants figurent les réseaux de neurones artificiels et les modèles de séries temporelles (Londhe & Charhate, 2010).

III.5.1.4 Modèles distribués, Semi-distribués et globaux

Outre la classification basée sur l'approche, les modèles hydrologiques peuvent être également catégorisés en fonction de leur discrétisation spatiale, en modèles distribués, semi-distribués ou globaux (Brunner *et al.*, 2021) :

- 1. Modèles distribués** : Ces modèles traitent en détail la variabilité spatiale en divisant le bassin versant en un réseau de petites cellules, chacune avec des caractéristiques spécifiques telles que la topographie, les sols et la végétation. Les équations de bilan hydrique sont résolues pour chaque cellule, offrant une représentation plus précise des processus de ruissellement dans l'ensemble du bassin versant. Bien que complexes et nécessitant des données d'entrée détaillées, ces modèles fournissent des estimations précises pour les bassins versants grands et hétérogènes(Brunner *et al.*, 2021).
- 2. Modèles Semi-Distribués** : Combinant des éléments des modèles conceptuels avec une prise en compte partielle de la variabilité spatiale, les modèles semi-distribués utilisent des paramètres pour représenter des sous-bassins ou des zones spécifiques du bassin versant, tout en agrégeant certaines caractéristiques spatiales. Cette approche est mieux

adaptée à l'hétérogénéité des bassins versants par rapport aux modèles conceptuels simples (Y. Liu *et al.*, 2020).

3. Modèles Globaux : Ces modèles impliquent la combinaison de plusieurs modèles hydrologiques distincts pour améliorer la précision des prédictions et réduire les incertitudes dans la modélisation des processus hydrologiques. Connus aussi sous le nom de modèles d'ensemble ou de méthodes d'agrégation de modèles, l'idée fondamentale est que chaque modèle hydrologique a ses forces et ses faiblesses, et que la combinaison de leurs résultats peut produire des prédictions plus robustes et fiables. Les implémentations comprennent l'agrégation pondérée des résultats des modèles individuels, la fusion statistique des sorties des modèles ou l'ajustement dynamique des poids des modèles en fonction de leurs performances passées. Cette approche vise à minimiser les biais et les erreurs systématiques associés à un seul modèle en exploitant la diversité des modèles dans l'ensemble (Ajami *et al.*, 2016).

Il est important de noter que ces classifications ne sont pas rigides, et certains modèles peuvent avoir des caractéristiques qui se chevauchent entre différentes classes. La sélection du modèle dépend des données disponibles, des objectifs de modélisation et de la complexité souhaitée pour aborder des problèmes hydrologiques spécifiques. Les modèles hydrologiques peuvent également être classifiés en fonction de la discrétisation spatiale du modèle lui-même en modèles distribués, semi-distribués ou globaux (Solomatine & Wagener, 2011).

III.5.2 Fonctionnalité et complexité du modèle

Lors de la sélection d'un modèle pour une application spécifique, il est crucial d'évaluer son adéquation pour simuler les impacts des changements d'utilisation des terres et sa performance de prévision. La fonctionnalité et la complexité du modèle deviennent des critères clés dans ce processus de sélection. La fonctionnalité d'un modèle varie en termes de représentation des processus hydrologiques, des équations utilisées pour simuler ces processus et de la discrétisation du modèle. De plus, la complexité d'un modèle peut être évaluée par les données estimées, les ressources, le temps et le coût nécessaires pour sa paramétrisation et sa calibration, ainsi que le jugement professionnel et l'expérience nécessaires pour exploiter efficacement ces modèles. Des descriptions de plusieurs modèles hydrologiques largement utilisés sont fournies dans le tableau III-2.

Tableau III-1 : Comparaison de modèles hydrologique (Brunner *et al.*, 2021)

Modèle	Composant principal (condensé)	Évapotranspiration	Flux terrestre	Flux souterrain	Échelle
HEC-HMS	Précipitations, pertes, ruissellement	Priestley Taylor	Méthode CN, onde cinématique	Réservoir linéaire	Semi-Distribué
MIKE SHE	Écoulement de surface/canal, fonte des neiges, érosion du sol	Stockage de la canopée, évaporation du sol	Ondes diffusives 2D	Écoulement souterrain 3D	Distribué
SWAT	Hydrologie, sédimentation, propriétés du sol	Penman-monteith, autres	Méthode CN	Écoulement latéral souterrain	Semi-Distribué
DHSVM	Écoulement de surface/souterrain, couverture neigeuse	Penman-monteith	Saturation, infiltration	Écoulement saturé	Distribué
VIC	Infiltration, ruissellement, écoulement de base	Penman-monteith	Saturation, infiltration	Écoulement saturé	Distribué
PAWS	Écoulement de surface, couverture neigeuse, humidité du sol	Penman-monteith+ extraction racinaire	Formule de Manning, formulation d'onde	Équation de Green-Ampt	Distribué

Ce tableau présente une comparaison synthétique de différents modèles hydrologiques, mettant en évidence leurs composants principaux, les méthodes d'évapotranspiration utilisées, ainsi que leur approche du flux terrestre et souterrain, le tout en relation avec l'échelle à laquelle ils opèrent.

III.5.3 Construction et mise en œuvre d'un modèle hydrologique

Le processus de modélisation en hydrologie peut être divisé en deux composants principaux : la construction du modèle et le protocole de modélisation.

III.5.3.1 Processus de construction du modèle

La construction et la mise en œuvre d'un modèle hydrologique impliquent une procédure complexe. En suivant les étapes décrites par Refsgaard & Henriksen (2004) et Scholten et al (2004), le processus peut être résumé comme suit :

1. Plan d'étude du modèle :

Pour répondre à des questions liées à l'eau distinctes, un modèle hydrologique est spécifiquement adapté telles que la prévision des périodes de haut ou de bas débit. Les objectifs de modélisation façonnent significativement le développement du modèle. La pertinence du modèle peut également dépendre des conditions climatiques et physiques de ses applications. Toutefois, le développement de modèles hydrologiques peut être contraint par des facteurs externes, notamment la disponibilité de données enregistrées et l'observation des processus physiques impliqués. Ces éléments doivent être considérés dès le début du processus de modélisation, car ils peuvent influencer de manière critique l'efficacité du modèle.

2. Données et conceptualisation :

Un modèle hydrologique transforme des variables météorologiques d'entrée (principalement la précipitation et l'évapotranspiration potentielle, en une variable hydrologique de sortie. Principalement le débit des cours d'eau sur une période donnée (voir Figure III-5).

Un modèle hydrologique consiste en des représentations mathématiques de processus clés tels que l'évapotranspiration, l'infiltration et le transfert dans les cours d'eau. Techniquement, le modèle est un ensemble de paramètres hydrologiques décrivant les propriétés du bassin versant et d'algorithmes dépeignant les processus physiques. Il existe de nombreuses façons de construire des modèles hydrologiques. Comme mentionné ci-dessus, le choix de l'approche de modélisation (ou d'un modèle existant) peut dépendre des objectifs, des données disponibles et de l'expérience de l'utilisateur. À cette étape de la modélisation, la manière dont le système naturel doit être représenté est définie.

III.5.3.2 Configuration du modèle

La structure d'un modèle hydrologique est généralement mise en œuvre en deux composants principaux :

Module de production : Ce module évalue la partie des précipitations qui contribue au ruissellement à la sortie du bassin versant (pluie efficace). La partie restante est soit stockée, s'infiltre dans les aquifères profonds, soit retourne à l'atmosphère par évapotranspiration.

Module de transfert : Ce module transporte la précipitation efficace jusqu'à la sortie du bassin versant, en fonction des chemins de l'eau (écoulement de surface, écoulement souterrain ou écoulement des eaux souterraines (Bedient *et al.*, 2013).

III.5.4 Protocole de modélisation

Les protocoles de modélisation hydrologique, bien que variés, comprennent généralement deux parties principales : (1) l'identification du modèle et (2) l'évaluation du modèle. La phase d'identification du modèle concerne principalement la sélection des bons paramètres pour le modèle. Cela commence par une analyse approfondie des données disponibles. K. Beven (2000), dans son travail, a fourni des informations précieuses sur l'évaluation de la qualité des données en modélisation hydrologique. Après l'analyse des données, l'étape suivante est la sélection ou le développement du modèle lui-même. Souvent, cela implique de choisir un modèle existant, soit en raison de la familiarité du modélisateur avec celui-ci, soit de son succès prouvé dans des systèmes hydrologiques similaires. L'universalité d'un modèle signifie qu'il peut être adapté à différents systèmes, tant qu'il représente avec précision les processus physiques fondamentaux du système étudié. Le choix du modèle dépend également de l'objectif de la modélisation, qui dicte la résolution spatio-temporelle nécessaire et le niveau de détail requis pour le système (Solomatine & Wagener, 2011).

Une fois une structure de modèle sélectionnée, l'estimation des paramètres est l'étape critique suivante. Les paramètres doivent refléter les caractéristiques physiques locales du système hydrologique. Ceux-ci sont généralement dérivés soit par un processus de calibration, où les sorties du modèle sont comparées aux données observées, soit à partir de connaissances a priori sur les caractéristiques de la zone telles que le sol et la végétation.

Le processus de modélisation hydrologique englobe plusieurs étapes : construire un modèle perceptuel du système, le formaliser en un modèle conceptuel, le traduire en un cadre mathématique, puis mettre en œuvre ce cadre comme un modèle informatique. Ce modèle est ensuite utilisé conformément à un protocole de modélisation bien défini, qui comprend à la fois l'identification des paramètres appropriés et l'évaluation du comportement du modèle par rapport aux données observées.

Ce processus fournit des informations importantes sur le fonctionnement du système hydrologique et sa réponse aux changements environnementaux. Il est important de mener des analyses d'incertitude et de sensibilité pour comprendre la fiabilité et les limites du modèle. Les techniques d'assimilation de données sont également cruciales, permettant d'affiner le modèle au fur et à mesure que de nouvelles données sont collectées (Wainwright & Mulligan, 2013).

III.5.5 Calibration et validation :

Les valeurs des paramètres inclus dans les équations de processus d'un modèle hydrologique ne peuvent pas toujours être déterminées directement à partir de mesures de terrain. Par conséquent, une optimisation numérique est souvent nécessaire pour obtenir un ensemble de paramètres bien adaptés au bassin versant étudié. Cette optimisation nécessite des données de sortie observées sur une période donnée. Diverses approches d'optimisation sont développées, les plus simples partant d'un ensemble initial de paramètres qui sont itérativement modifiés pour améliorer la qualité d'une fonction objective (un critère définissant l'adéquation entre les valeurs de flux observées et simulées) jusqu'à atteindre une valeur optimale. La calibration doit être systématiquement couplée à un test de validation, où les résultats du modèle sont évalués contre un jeu de données indépendant. Il est important de noter que l'incertitude demeure toujours en raison d'erreurs dans la structure, les paramètres, les données du modèle, etc. Cette incertitude doit être correctement évaluée pour une application plus éclairée du modèle (Chow et al. , 1988).

III.5.6 Simulation et évaluation

Une fois qu'un modèle hydrologique est configuré, calibré et validé, il peut être exécuté pour l'application prévue. Les exemples d'applications nécessitant des modèles hydrologiques incluent la conception et la gestion d'installations de contrôle de l'eau comme les barrages, et la prévision de périodes d'inondation ou de sécheresse. L'incertitude dans les résultats doit être analysée pour évaluer la fiabilité de la variable simulée et pour soutenir le processus de prise de décision.

Enfin, les résultats du modèle doivent être évalués, soit en comparant visuellement les tracés observés et simulés, soit en appliquant un critère mathématique pour calculer l'écart entre les données observées et simulées. Les évaluations visuelles et mathématiques peuvent produire des résultats différents, produisant des diagnostics distincts sur la qualité et l'efficacité du modèle (Wheater, 2008).

III.5.7 Mesures d'évaluation

Depuis les premières étapes de la modélisation hydrologique, évaluer les résultats des modèles et mesurer leur efficacité dans la prévision des flux est devenu essentiel. Il est crucial de quantifier les résidus de ces modèles, ce qui peut se faire en comparant les hydrogrammes observés et simulés ou en calculant les différences en pourcentage entre les flux observés et

simulés. La littérature présente une large gamme de critères et d'outils d'évaluation, chacun s'alignant sur des objectifs de modélisation spécifiques ou des variables cibles. Des chercheurs de diverses disciplines environnementales recommandent les critères suivants (Bedient *et al.*, 2013, Chow *et al.*, 1988):

1. Mesures Visuelles :

La méthode la plus simple pour évaluer un modèle implique l'utilisation de représentations graphiques pour comparer les valeurs observées et simulées. Cependant, cette méthode est souvent considérée comme approximative ou qualitative, car l'adéquation du modèle est évaluée visuellement. Les graphiques couramment utilisés dans les résultats des modèles hydrologiques incluent (Solomatine & Wagener, 2011) :

- A.** Hydrogrammes montrant les flux observés et simulés dans le temps, relatant les flux simulés avec les flux observés (courbes Q-Q).
- B.** Fonctions de distribution cumulée des flux observés et simulés, connues sous le nom de courbes de durée de flux. L'inspection visuelle de ces graphiques bénéficie de l'expertise, de l'interprétation et de l'expérience d'un spécialiste, contribuant de manière significative à une évaluation précise de la fidélité du modèle. Cependant, cette approche peut être subjective, reposant fortement sur l'expérience et les critères personnels de l'expert, menant à des évaluations potentiellement divergentes.

2. Mesures mathématiques :

Une autre méthode pour évaluer et comparer les modèles consiste à calculer un critère mathématique mesurant la distance entre les valeurs de flux mesurées et simulées sur une période définie. Ce critère prend généralement la forme d'une norme quantifiant l'écart entre les séries observées et simulées. Ces critères sont souvent considérés comme plus objectifs et quantitatifs. La coexistence de critères qualitatifs et quantitatifs peut placer les hydrologues dans une position délicate, car cela peut conduire à des interprétations divergentes des performances du modèle en fonction du type de critères utilisés. Cependant, l'inspection visuelle conserve sa valeur en tant que méthode d'évaluation à part entière, aussi cruciale que les évaluations basées sur des critères mathématiques.

III.5.8 Sélection du modèle

Choisir le bon modèle pour un projet spécifique est important pour de meilleurs résultats. La sélection du modèle est basée sur l'objectif de modélisation, qu'il s'agisse de comprendre et de répondre à des questions spécifiques sur les processus hydrologiques, d'évaluer la fréquence des événements de ruissellement ou d'estimer le flux de ruissellement à des fins de gestion (Vaze *et al.* , 2010).

La sélection d'un modèle hydrologique approprié pour un projet spécifique est important pour obtenir des résultats optimaux. Ce processus, détaillé par Vaze *et al.* (2010) et Ghonchepour *et al.* (2021), suit trois étapes clés :

1. Sélection initiale basée sur l'objectif de modélisation :

Définir clairement l'objectif de modélisation est essentiel dans la phase initiale de sélection du modèle hydrologique. Le choix initial est guidé par la classification des modèles en fonction de cet objectif. Si l'objectif de modélisation se concentre uniquement sur la prévision des flux et que des données de calibration sont disponibles, des modèles globaux simples peuvent offrir des prédictions aussi précises, sinon supérieures, à des modèles physiques complexes. Une explication détaillée des différentes catégories de modèles hydrologiques est présentée dans les sections précédentes (K. Beven, 2012).

2. Sélection du modèle par intercomparaison :

La sélection du modèle basée sur l'intercomparaison vise à mettre en évidence les forces et les limites de chaque modèle à travers des évaluations à court terme (analyse superficielle) et à long terme (analyse approfondie). Dans l'approche à court terme, les performances des modèles sont comparées sur la base des hydrogrammes simulés par chaque modèle, qui sont ensuite comparés aux données observées. Pour parvenir à la sélection finale du modèle, les modèles concurrents sont évalués les uns contre les autres dans une perspective à long terme. Cette approche, adaptée de (K. Beven, 2012), peut être suivie selon schéma :

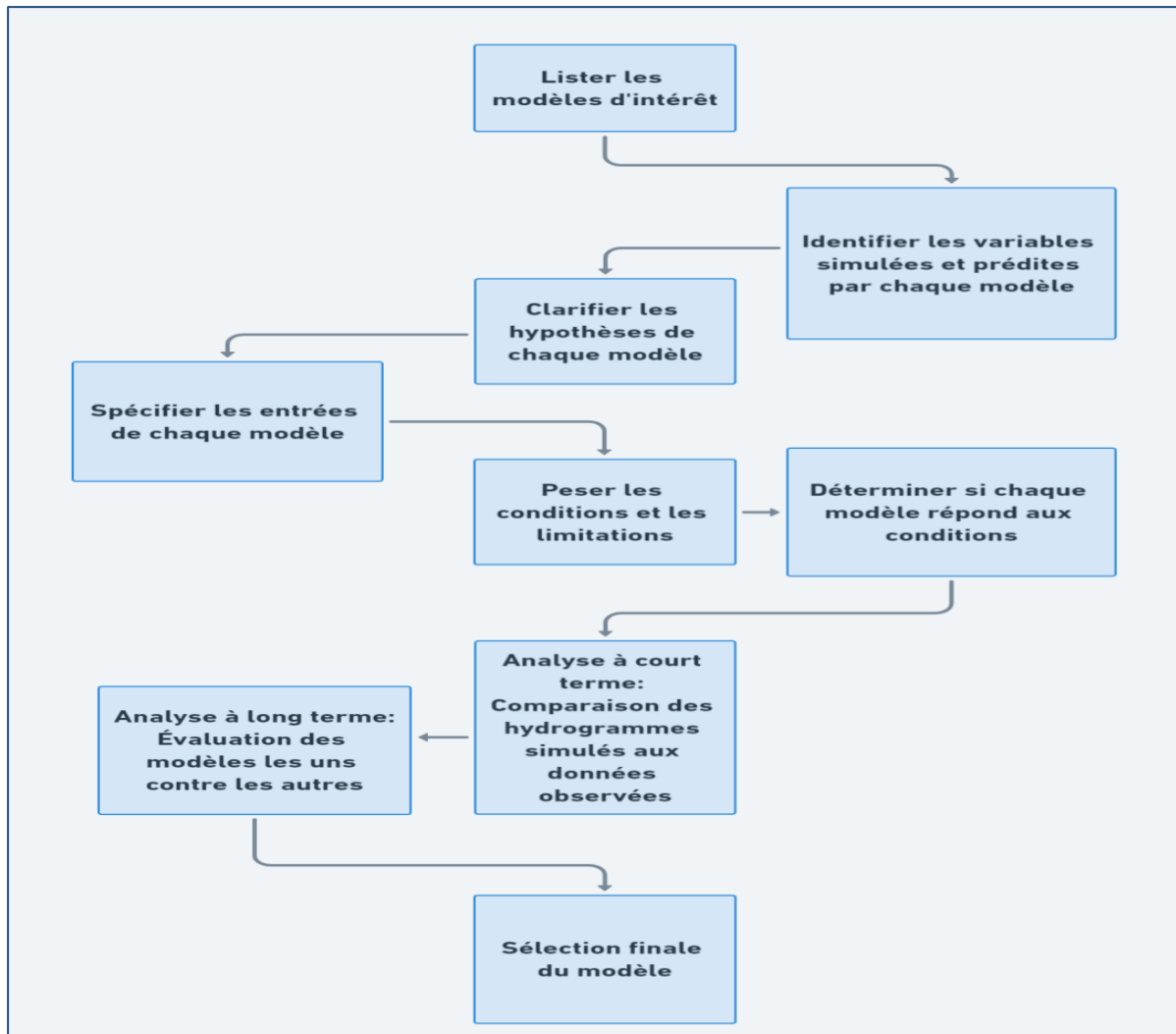


Figure III-6 ; Schéma des étapes suivi pour la sélection finale d'un modèle hydrologique (K. Beven, 2012)

Ce processus permet une évaluation objective des modèles et l'identification de celui qui répond le plus étroitement aux exigences du projet.

III.5.8.1 Sélection finale du modèle basée sur des critères d'influence :

La sélection finale du modèle basée sur des critères d'influence implique de prendre en compte des facteurs clés pour choisir le modèle hydrologique le plus approprié pour un projet spécifique. Ces facteurs comprennent (K. Beven, 2012):

1. La disponibilité du temps et des ressources financières pour l'utilisateur du modèle.
2. La disponibilité du modèle, de son code source et de la documentation associée pour un usage public.
3. L'échelle temporelle et spatiale du modèle, en accord avec les besoins du projet.
4. La variété des applications du modèle dans différentes régions géographiques.
5. La pertinence des conditions climatiques pour lesquelles le modèle est développé.

6. La quantité et la qualité des données climatiques et hydrologiques disponibles pour la calibration et la validation du modèle.

Ce cadre méthodologique assure que le modèle sélectionné est le plus adapté aux besoins spécifiques du projet, prenant en compte à la fois les objectifs de modélisation et les contraintes pratiques.

III.6 Conclusion

Le chapitre III est consacré au monde complexe de la modélisation hydrologique, une ressource essentielle pour comprendre, prévoir et faire face aux risques liés aux inondations. Il a souligné le rôle déterminant de la modélisation hydrologique dans la cartographie efficace des inondations en simulant le comportement de l'eau pendant des pluies intenses et en calculant avec précision les débits de pointe dans les cours d'eau incluant les oueds. Ceci est essentiel pour identifier les zones à risque susceptibles d'être inondées. Le calcul associé à la modélisation aboutit à des débits de pointe précis, un instrument essentiel pour évaluer l'étendue des inondations et élaborer des plans stratégiques de mitigation des inondations.

Le chapitre a également mis en évidence l'importance croissante de la modélisation hydrologique dans le contexte de la fréquence croissante des événements météorologiques extrêmes. Il a expliqué le processus de transformation des données de pluie en estimations du débit des rivières à travers la modélisation pluie-débit, un processus particulièrement important dans les régions avec peu de données hydrométriques.

La discussion sur les hydrogrammes de crue a mis en lumière leur capacité à refléter la réaction d'un bassin versant aux tempêtes. Un éventail de modèles hydrologiques a également été examiné, chacun offrant des perspectives distinctes sur divers phénomènes hydrologiques.

Alors que nous nous orientons vers la modélisation hydraulique, comprendre l'interaction et les distinctions entre la modélisation hydrologique et hydraulique devient vital.

La modélisation hydraulique se penche sur une analyse plus détaillée de la dynamique des fluides au sein des masses d'eau, affinant la cartographie des inondations en fusionnant les données hydrologiques sur les volumes et les timings d'eau avec la représentation spatiale de l'étendue et du mouvement des inondations par les modèles hydrauliques. Cette approche symbiotique qui sera abordée dans le chapitre suivant, a pour objet d'améliorer la précision et le détail des cartes d'inondation, un facteur crucial dans la gestion efficace des risques d'inondation.

CHAPITRE IV

Modélisation Hydraulique

IV. Modélisation Hydraulique

IV.1 Introduction :

L'outil de modélisation hydraulique est fondamental pour simuler le mouvement de l'eau dans divers contextes, y compris les cours d'eau, les réseaux d'assainissement et les aires côtières. Ce type de modélisation intègre les modèles mathématiques, numériques et physiques pour reproduire fidèlement la dynamique des fluides dans des conditions réelles, indispensable dans la conception d'infrastructures et la gestion de l'eau. La modélisation hydraulique a connu des avancées significatives grâce aux progrès technologiques, ce qui a amélioré sa précision et son champ d'application. Toutefois, elle se trouve souvent face à des défis dus à la complexité des variables et à l'incertitude des données.

Un domaine d'application essentiel de la modélisation hydraulique est l'évaluation et la gestion des risques d'inondation. Dans ce contexte, la modélisation présente à la fois un recours fondamental pour créer des cartes des zones inondables et un outil important pour l'élaboration des politiques et la prise de décisions, en particulier dans les régions où les données hydrométriques sont limitées. Les modèles examinent ainsi divers facteurs relatifs aux inondations, comme la profondeur et la vitesse de l'eau, et utilisent des données topographiques détaillées pour estimer avec précision les impacts des inondations.

Dans ce chapitre, un aperçu complet de la modélisation hydraulique est présenté, après examen des principes de base. En mettant un accent particulier sur la cartographie des inondations, les différents types de modèles disponibles et leur fiabilité dans diverses situations sont discutés.

IV.2 Notion et aperçu sur le modèle hydraulique

Un modèle hydraulique représente les caractéristiques d'une crue se propageant en amont et en aval d'un cours d'eau, incluant les débits, les vitesses, les hauteurs d'eau et les zones inondées en cas de débordement. Ce type de modèle repose sur les équations de Saint-Venant, formulées en 1871 par Barré de Saint-Venant, ou sur leurs simplifications (telles que les modèles d'ondes cinématiques ou les modèles d'ondes diffusives). Lorsqu'une structure hydraulique (comme un barrage ou un seuil) est présente, ces équations sont localement remplacées par des relations spécifiques à ces structures (Gangrade *et al.*, 2019).

En outre, des pertes de charge supplémentaires sont prises en compte lorsque la section du cours d'eau subit des changements brusques, comme la présence d'un pont ou de gorges. Ainsi, les

modèles conservent un certain degré d'incertitude. Pour pallier cette incertitude et le manque de données nécessaires au bon fonctionnement de ces modèles, il est possible de les enrichir en intégrant des données provenant d'autres sources que les relevés manuels sur le terrain ou les stations de mesure automatisées (Tanguy, 2012) .

IV.2.1 Élaboration de modèle hydraulique

La conception d'un modèle hydraulique nécessite un éventail de données incluant la topographie qui cartographie le tracé du cours d'eau, en tenant compte de ses affluents éventuels (lit mineur), ainsi que les zones à risque d'inondation (lit majeur). Il est également important d'intégrer dans le modèle les éléments influençant le débit de l'eau, comme les digues de protection, les barrages pour la navigation et les ponts. La rugosité de la surface et les informations hydrologiques doivent aussi être prises en compte. Pour obtenir des données sur le lit mineur, des relevés topographiques sont effectués sur le terrain, soit par des méthodes de nivellement classiques, soit par GPS, tandis que pour les zones submergées, des techniques de sondage sont utilisées (Crowder, 2009).

Actuellement, diverses méthodes numériques sont disponibles pour la résolution de ces modèles, avec deux approches principales : la modélisation unidimensionnelle (1D) et bidimensionnelle (2D). Les méthodes hybrides, telles que le modèle 1D-2D (Domeneghetti *et al.* , 2012), combinent ces deux dimensions. La modélisation 1D représente le cours d'eau et les zones inondables à l'aide de sections transversales perpendiculaires à l'écoulement, tandis que la modélisation 2D considère les écoulements dans différentes directions. Dans les modèles 2D, la topographie et la géométrie sont basées sur des modèles numériques de terrain. Les méthodes de résolution numérique varient (différences finies, volumes finis, éléments finis) et utilisent des grilles numériques structurées ou non structurées. Les modèles 2D basés sur des grilles non structurées offrent des avantages en termes d'efficacité computationnelle et peuvent mieux capturer les caractéristiques de surface.

IV.2.2 Équations de Saint-Venant

Classiquement, le système global des équations de Saint-Venant comprend une équation de continuité, assurant la préservation de la masse, et une équation dynamique, exprimant la conservation de la quantité de mouvement. Il est également important de noter que ces équations aux dérivées partielles peuvent être dérivées en adaptant les équations de Navier-Stokes et en effectuant une moyenne dans la direction verticale (Hager *et al.* , 2019).

Les équations de Saint-Venant forment un système d'équations aux dérivées partielles décrivant le mouvement de l'eau dans les canaux ou les rivières. Ces équations sont, en fait, une simplification des équations de Navier-Stokes plus complètes et complexes qui décrivent le comportement des fluides. Leur résolution peut être complexe et nécessite souvent l'usage de méthodes numériques pour obtenir des solutions aussi précises que possible (Lemos, 2002). Les techniques de résolution numérique varient en fonction du logiciel hydraulique utilisé et de la nature des écoulements considérés, qu'ils soient permanents ou non, fluviaux ou torrentiels. Les équations de Saint-Venant sont généralement résolues à l'aide de schémas spécifiques, qui sont donnés comme suit :

1. Schémas aux différences finies : Ils se fondent sur l'approximation des dérivées partielles des équations par des différences finies. Parmi ces schémas, les méthodes de Lax-Wendroff et MacCormack sont fréquemment utilisées (Machalińska-murawska & Szydłowski, 2015).
2. Schémas aux volumes finis : Ils consistent à discrétiser l'espace en volumes finis et à approximer les flux à travers les faces de ces volumes. Les choix courants incluent les schémas de Godunov et Roe (Godunov & Bohachevsky, 1959, P. L. Roe, 1981).
3. Schémas aux éléments finis : Basés sur la discrétisation de l'espace en éléments finis, ces schémas approximent la solution à l'intérieur de chaque élément en utilisant des fonctions polynomiales. Parmi les schémas couramment utilisés figurent ceux de Galerkin et Petrov-Galerkin (Atallah *et al.* , 2018).

L'ensemble de ces schémas permettent de résoudre les équations de Saint-Venant, mais chacun présente des avantages et des inconvénients en termes de précision, de stabilité et de temps de calcul. Le choix du schéma est souvent dicté par la géométrie spécifique et les conditions aux limites, ainsi que par les contraintes computationnelles et temporelles.

Les paramètres d'un modèle hydraulique, tels que les coefficients de Strickler, les coefficients de perte de charge ou les lois régissant les structures, sont habituellement ajustés en fonction de données provenant de certaines crues passées pour lesquelles des observations sont disponibles (débits estimés, niveaux d'eau dans le lit majeur, etc.). En principe, ces paramètres peuvent être utilisés pour d'autres crues sans nécessiter de répéter la procédure d'ajustement.

IV.2.3 Modélisation des pertes énergétiques dans les systèmes fluviaux

Selon l'étude menée par Geoffroy *et al.* (2007), il existe une classification approfondie des pertes énergétiques dans les systèmes hydrauliques, mettant en lumière les interactions entre le

lit fluvial et le mouvement des fluides. Ces pertes énergétiques, localisées dans des zones spécifiques, jouent un rôle essentiel dans la compréhension et la gestion des dynamiques fluviales. Une synthèse des trois catégories de pertes énergétiques identifiées est présentée comme suit :

1. **Pertes par frottement** : Ces pertes surviennent en raison des micro-turbulences au contact du lit de la rivière, où la rugosité et la texture de ce dernier génèrent un frottement qui entraîne une dissipation énergétique.
2. **Pertes dues aux macro-turbulences** : Elles sont provoquées par les macro-turbulences issues des différences de vitesse au sein de l'écoulement, particulièrement entre les lits mineur et majeur. Ces variations de vitesse génèrent des tourbillons importants et désordonnés, conduisant à une perte notable d'énergie.
3. **Pertes liées au transfert de quantité de mouvement** : Ces pertes découlent de l'échange de quantité de mouvement entre les différents lits fluviaux, par exemple quand l'eau du lit majeur, plus rapide, se mélange avec celle du lit mineur, plus lent, et inversement. Ce phénomène peut engendrer des pertes d'efficacité et donc d'énergie.

Chacune de ces catégories de pertes est associée à des zones spécifiques du système fluvial et illustre divers processus physiques influençant l'écoulement de l'eau. La compréhension de ces pertes d'énergie est primordiale pour une modélisation hydraulique précise, qui est elle-même indispensable pour une gestion efficace des rivières et la conception d'ouvrages hydrauliques adaptés.

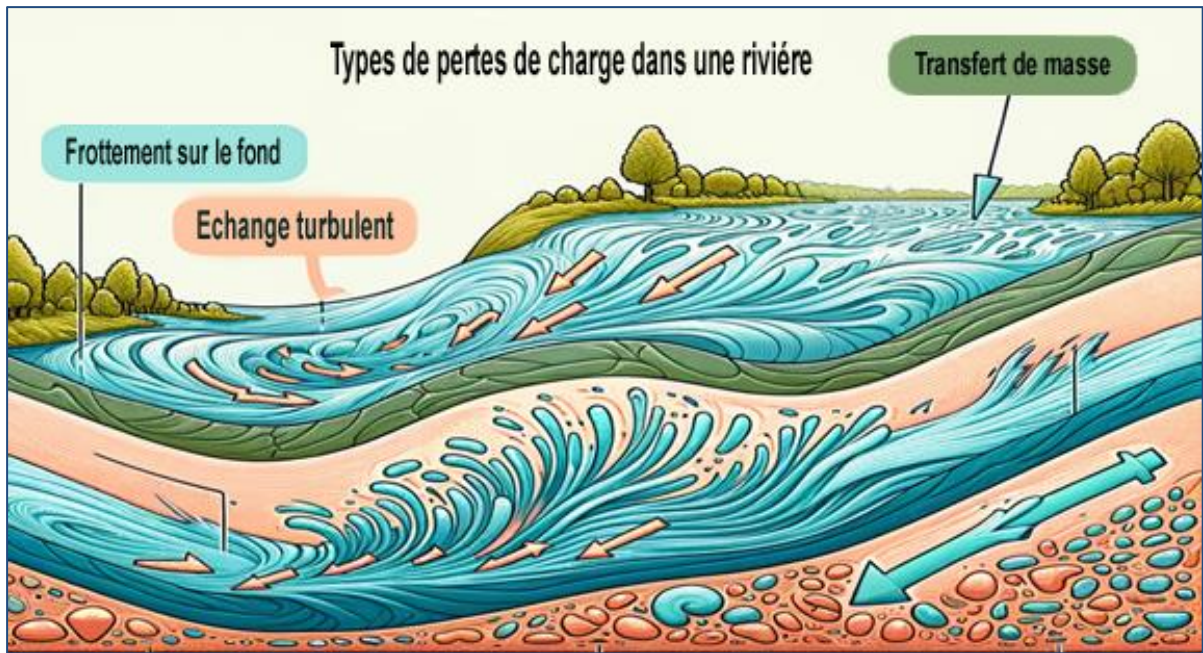


Figure IV-1: Perte de charges des casiers

IV.2.4 Modèles 1D

Les modèles hydrauliques unidimensionnels (1D), couramment utilisés pour simuler les écoulements dans les rivières avec des chenaux composés (lits mineur et majeur), tels que HEC-RAS, SWMM, LISFLOOD-FP, et Mike 11, sont principalement conçus pour tenir compte des pertes d'énergie de type 1. Cependant, des modèles plus avancés tentent d'intégrer les trois types de pertes d'énergie. Il est essentiel de noter que les modèles 1D ont une caractéristique majeure : ils calculent la hauteur moyenne de l'eau (et parfois la vitesse) à travers chaque section transversale des lits mineur et majeur. Cette approche découle de leur structure intrinsèque et des équations directrices, basées sur les équations de Saint-Venant 1D. Cette méthode présente une limitation remarquable car elle ne tient pas compte de l'inclinaison variable des surfaces libres pendant les inondations ou des variations de vitesse non uniformes au sein de la même section (G. Papaioannou et al. , 2016) .

Les modèles 1D sont basés sur la résolution des équations hyperboliques de Saint-Venant 1D (Saint-Venant, 1871).

Comme mentionne plus haut, ces équations dans leurs formes générales sont, en fait, une simplification des équations de Navier-Stokes plus complètes et complexes qui décrivent le comportement des fluides. Il faut noter que les équations de Navier-Stokes prennent en compte les variations tridimensionnelles de la vitesse et de la pression dans un fluide, tandis que Saint-Venant 1D se concentre sur les variations unidimensionnelles le long d'un cours d'eau.

Cette simplification est une opportunité qui rend les calculs plus gérables dans les modèles 1D. Toutefois, elle comporte des limitations, notamment l'incapacité à représenter précisément la turbulence et les variations locales complexes. Malgré ces limitations, le modèle 1D est parfois utilisé pour l'étude des inondations dans les grands fleuves, en particulier lorsque les influences en aval liées au régime fluvial sont considérées (Cleveland et al. , 2011) .

Cependant, pour les inondations fluviales, la vitesse ne peut plus être considérée comme uniforme à travers une section transversale, rendant ainsi les modèles 1D inappropriés (Teng et al. , 2017).

En résumé, bien que les modèles 1D soient utiles dans certaines conditions, ils présentent des limitations significatives lors de la simulation d'écoulements complexes, en particulier pendant les inondations. Les principales équations qui gouvernent le modèle 1D sont :

1. L'équation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial X} = q \quad (1)$$

2. L'équation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{Q^2}{S} + P \right) = -g \frac{Q|Q|}{K^2 S R^{3/4}} + B + K_q \frac{Q}{S} \quad (2)$$

Où :

t désigne le temps, x: l'abscisse longitudinale, S: la section mouillée, Q: le débit volumique, q: le débit d'apport latéral, K_q : un coefficient, g: l'accélération de la pesanteur, Z: la cote du fond, K: le coefficient de Strickler, R: le rayon hydraulique, h: la hauteur d'eau, L: la largeur,

$P = \int_0^h g(h-y) L(x,y) dy$: la pression et $B = \int_0^h g(h-y) \frac{\partial L}{\partial X} dy$: la pression latérale.

IV.2.4.1 Simplifications des équations de Saint-Venant 1D :

Les modèles de simulation hydraulique unidimensionnelle (1D) sont basés sur des simplifications des équations de Saint-Venant. Ils se manifestent sous deux formes : l'approche par onde diffusive et l'approche par onde cinématique.

1. L'Onde diffusive : cette simplification de l'équation dynamique est utilisée pour la modélisation des inondations, permettant de négliger les termes d'inertie. Cette simplification est pertinente lorsque les vitesses d'écoulement sont considérablement plus faibles que la vitesse de propagation de l'onde, et que les oscillations s'étendent sur une période beaucoup plus longue que la période examinée (P. D. Bates & De Roo, 2000, Chaudhry, 2008).
2. L'Onde cinématique : basée sur l'hypothèse que la pente de la surface de l'eau est suffisamment douce pour que les forces de gravité l'emportent sur les forces de frottement, entraînant une profondeur d'eau uniforme à travers la section transversale de la rivière ou du canal. Cette hypothèse réduit l'équation dynamique à $S_f = S_0$ (où la pente de la ligne d'énergie est égale à la pente du lit). Selon Richardson, J & Julien, P (1994), l'approximation par onde cinématique est valable pour les rivières à pente raide (supérieure à 0,002 m/m). Bien que ces simplifications soient utiles pour des calculs rapides, elles peuvent conduire à des erreurs dans les prédictions, en particulier pour les écoulements rapides ou les rivières présentant des variations topographiques significatives (Chow *et al.*, 1988).

IV.2.5 Modèles 2D :

Les modèles hydrauliques bidimensionnels (2D) visent à fournir une représentation plus détaillée des écoulements, en se libérant de la contrainte d'un écoulement unidirectionnel. Les équations de Saint-Venant 2D sont similaires aux équations mentionnées précédemment, mais intègrent une dimension horizontale supplémentaire, notée y .

Les calculs sont effectués sur une grille bidimensionnelle, avec la possibilité de choisir une disposition régulière (carrée) ou irrégulière (basée sur des triangles ou des quadrangles) en fonction des outils utilisés. Cette grille est généralement raffinée dans le lit mineur, où les variations topographiques sont plus prononcées, nécessitant une précision accrue pour une simulation précise des écoulements. Inversement, dans le lit majeur où les variations sont moins marquées, une résolution moins fine peut être adoptée sans compromettre la qualité de la modélisation. Cette stratégie a l'avantage de réduire les temps de calcul tout en optimisant l'efficacité de la modélisation (Chaudhry, 2014).

De plus, la résolution de la grille est améliorée à proximité des obstacles dans le lit majeur, pour améliorer les résultats de la simulation. Les paramètres évalués par le modèle (tels que la hauteur, le débit, la vitesse, etc.) sont moyennés verticalement, résultant en une valeur unique par cellule de grille. Il est également important de noter que le choix de la résolution de la grille

dépend des objectifs de la modélisation hydraulique. Pour des simulations d'écoulements très précises, un maillage plus fin sera nécessaire, même dans le lit majeur. Inversement, pour évaluer les impacts de développements hydrauliques sur une grande zone, un maillage plus grossier peut être adopté sans sacrifier la qualité de la modélisation (Yana, 2023).

Les équations de Saint-Venant bidimensionnelles s'écrivent de la façon suivante :

1. L'équation de Conservation de la masse :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial X} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

2. L'équation de conservation de la quantité de mouvement (direction x) :

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial\left(hu^2 + g\frac{h^2}{2}\right)}{\partial X} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh\frac{\partial z}{\partial x} - g\frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{kS^2h^{\frac{3}{4}}} \quad (4)$$

3. L'équation de conservation de la quantité de mouvement (direction y) :

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial\left(hv^2 + g\frac{h^2}{2}\right)}{\partial y} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} = -gh\frac{\partial z}{\partial y} - g\frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{kS^2h^{\frac{3}{4}}} \quad (5)$$

Où :

u et v: les vitesses dans directions x et y, h: la hauteur d'eau, Z: la cote du fond, g: l'accélération de la pesanteur, K_s :le coefficient de Strickler

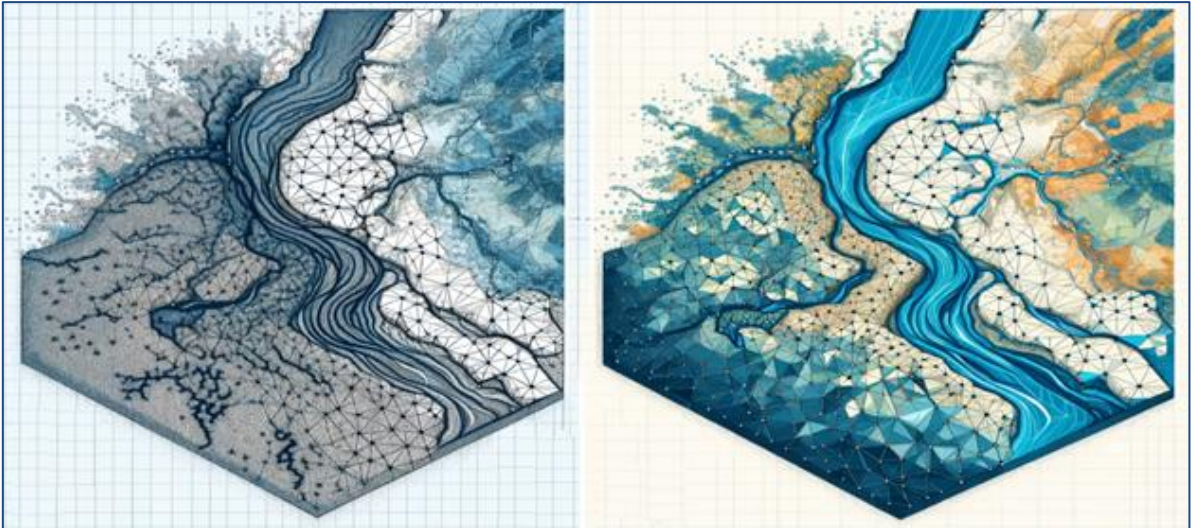


Figure IV-2 : Illustration d'un maillage triangulaire typique dans le cadre d'un modèle hydraulique 2D. (Erlich *et al.* , 2012). Le schéma à droite illustre le modèle hydraulique global adopté, où les cellules sont davantage affinées (EDF, 2010).

IV.2.6 Les modèles tridimensionnels (3D)

Les progrès récents en matière de modélisation hydraulique ont élargi la portée des modèles intégrant les équations complètes de Navier-Stokes. Traditionnellement, ces types de modèles se limitent à l'étude de zones confinées, ne s'étendant généralement que sur quelques dizaines de mètres d'un cours d'eau. Ces modèles sophistiqués sont capables de calculer les écoulements dans les plans horizontal et vertical, offrant ainsi une analyse détaillée de la dynamique des fluides. Les développements en cours dans le domaine de la dynamique des fluides numérique (CFD) ont progressivement amélioré la performance de ces modèles.

Par ailleurs, les capacités informatiques modernes ont permis une application plus étendue de ces modèles. Des publications antérieures, telles que celle de Rüther & Olsen (2007), soulignaient les importantes ressources informatiques requises pour de telles simulations détaillées. Ceci est particulièrement pertinent dans les scénarios d'écoulement spécifiques et complexes, où la compréhension des nuances du mouvement des fluides est essentielle (Abril-hernández *et al.*, 2018).

IV.3 Modélisation hydraulique et sources d'incertitude :

Les modèles hydrauliques de simulation sont des instruments clés dans l'étude des inondations. Ils permettent de prédire numériquement comment les caractéristiques hydrauliques telles que les hauteurs d'eau, les vitesses d'écoulement et l'étendue des zones inondées évoluent dans le temps et dans l'espace durant les crues (Paul D. Bates ,2004). Cependant, il est important de reconnaître que les modèles hydrauliques simplifient les processus physiques qu'ils tentent de

décrire, entraînant des incertitudes liées à ces simplifications. Plusieurs chercheurs soulignent la nécessité de caractériser et de quantifier ces incertitudes pour soutenir les processus de prise de décision (Paul D. Bates, 2004, Pappenberger *et al.* , 2005). En effet, dans un contexte de prise de décision, les modèles hydrauliques doivent non seulement fournir des résultats techniques mais aussi mettre en évidence les implications et les limitations de leur application et surtout identifier les niveaux d'incertitude associés aux résultats (Vidal *et al.* , 2007).

Dans la modélisation hydraulique, les sources d'incertitude sont variées (Vaze *et al.* , 2010). Les incertitudes prédominantes dans la modélisation hydraulique des inondations sont généralement associées à des facteurs topographiques et hydrologiques (Stelling & Verwey, 2005). Ces incertitudes affectent différents aspects du modèle, tels que :

1. Les conditions amont et aval du modèle (Pappenberger *et al.* , 2005).
2. Les conditions initiales du modèle (P. D. Bates & Anderson, 1996) .
3. Les coefficients de rugosité utilisés (Kidson *et al.* , 2006) .
4. Les données utilisées pour la calibration et la validation du modèle (Pappenberger *et al.* , 2005).
5. Les incertitudes découlant de la structure même du modèle (Stelling & Verwey, 2005).

Parmi les variables les plus sujettes à incertitude dans la modélisation hydraulique figure le débit (Pappenberger & Beven, 2006). L'incertitude associée aux données de débit provient principalement de deux sources : l'analyse de fréquence hydrologique et les courbes de tarage. L'analyse de fréquence hydrologique, largement utilisée pour estimer les débits de crue, implique l'étude d'événements passés pour déterminer les probabilités de survenance future (Meylan *et al.* , 2008). Avant d'entreprendre une analyse de fréquence, il est essentiel de vérifier si les séries observées satisfont aux hypothèses d'homogénéité, d'indépendance et de stationnarité. Diverses catégories d'incertitudes sont identifiées dans les modèles de fréquence (Meylan *et al.* , 2008).

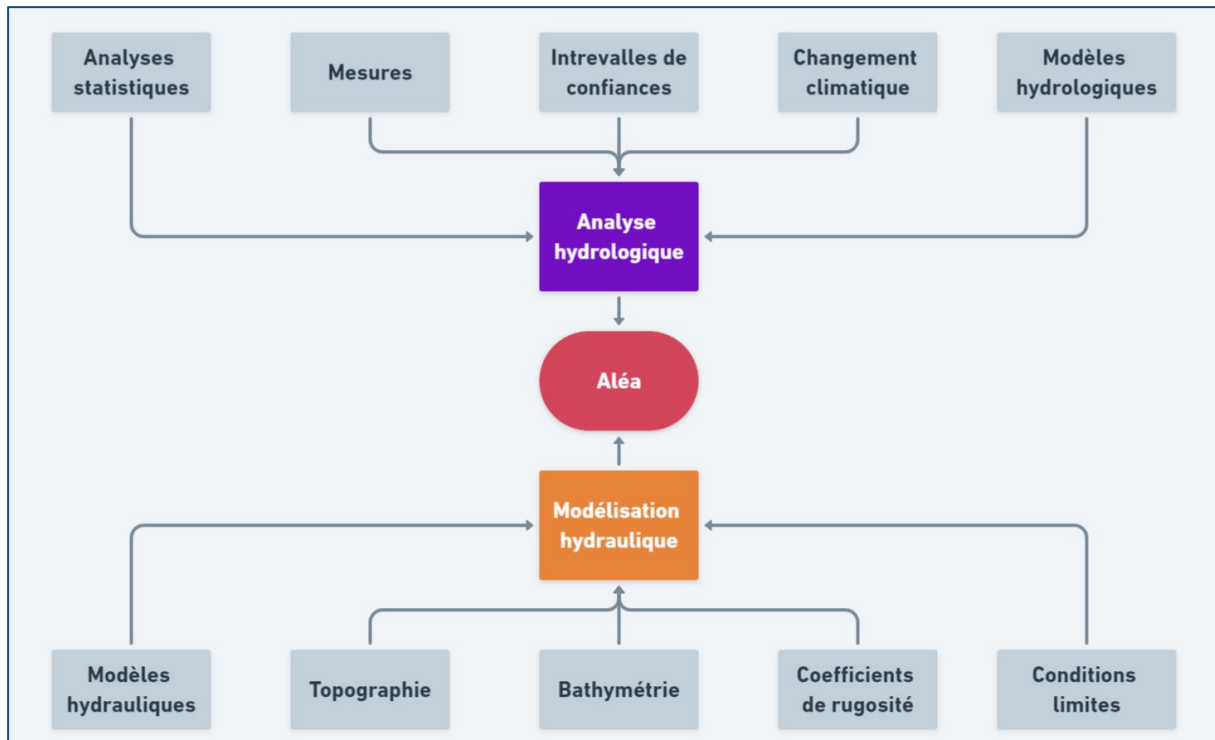


Figure IV-3:Sources d'incertitude dans la modélisation de l'aléa inondation source

Ces incertitudes qui s'imposent dans toutes démarches de modélisation, sont amplifiés dans les bassins non jaugés, où les données de débit direct sont limitées ou inexistantes. En effet, les bassins non jaugés se caractérisent par un manque de mesures de débit fiables, rendant la calibration et la validation des modèles plus difficiles. La modélisation hydraulique des inondations devient donc dans de pareils cas plus complexes.

Dans ces situations, la modélisation hydraulique s'appuie souvent sur des techniques indirectes pour estimer les débits, telles que l'utilisation de données pluviométriques, de modèles de ruissellement et d'autres méthodes d'estimation. Cela introduit une source supplémentaire d'incertitude, car les résultats du modèle dépendent fortement des hypothèses et des approximations faites lors de ces estimations (Sivapalan *et al.* , 2012).

L'incertitude liée à la topographie et à la géométrie du bassin versant devient également plus préoccupante dans les bassins non jaugés, car les données de terrain peuvent être moins précises ou indisponibles.

A titre d'exemple, la modélisation bidimensionnelle (2D), sujet de l'application de la présente étude, devient plus critique pour prendre en compte les écoulements multidirectionnels dans ces situations, mais la disponibilité de données topographiques précises reste un défi (Wagener & Montanari, 2011).

En résumé, les bassins non jaugés posent des défis majeurs en termes d'incertitude dans la modélisation hydraulique des inondations. La nécessité de s'appuyer sur des estimations

indirectes et le manque de données de débit direct rendent la calibration, la validation et l'interprétation des résultats des modèles plus complexes. Une approche prudente et une évaluation rigoureuse des incertitudes sont essentielles pour garantir que les résultats des modèles restent pertinents et utiles malgré ces limitations (Di Baldassarre & Montanari, 2009).

IV.4 Conclusion

Ce chapitre s'articule sur le concept de la modélisation hydraulique. À travers une analyse rigoureuse, divers aspects fondamentaux qui constituent la base de la modélisation hydraulique moderne sont explorés.

La construction de modèles hydrauliques, centrée sur les équations de Saint-Venant et les lois régissant les structures et les pertes de charge, est examinée en détail. Ces éléments forment le fond mathématique et physique nécessaire pour représenter avec précision le comportement des cours d'eau en particulier les oueds lors des événements d'inondation.

Une revue des différentes approches de la modélisation hydraulique est présentée.

Aussi, les incertitudes liées aux données topographiques, aux conditions limites, aux coefficients de rugosité, aux données de débit et à la structure même du modèle sont discutés. Ces incertitudes, rappellent que la modélisation bien qu'étant un outil puissant, reste une représentation simplifiée de la réalité.

Le chapitre suivant, explore l'utilisation des données d'Information Géographique Volontaire (VGI) pour valider les modèles hydrauliques dans les bassins non jaugés. Cette approche émergente tire parti des données géographiques générées par la communauté, offrant de nouvelles possibilités pour améliorer la précision des modèles et réduire les incertitudes, en particulier dans les zones où les sources de données traditionnelles sont rares ou inexistantes.

CHAPITRE V

Information Géographique Volontaire (VGI)

V. Information Géographique Volontaire (VGI)

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, l'impact significatif de l'Information Géographique Volontaire (VGI) sur la validation des modèles hydrologiques et hydrauliques, ainsi que son rôle indispensable dans la gestion des catastrophes liées aux inondations est exploré. Le VGI marque une avancée majeure par rapport aux méthodes conventionnelles de collecte de données, ouvrant ainsi la voie à une variété d'applications qui renforcent considérablement les stratégies de gestion des inondations. Son influence dépasse la simple amélioration de la précision des modèles d'inondation notamment dans les bassins versants non jaugés.

Les caractéristiques distinctives et les tendances évolutives du VGI sont abordées. Un examen approfondi de la littérature récente révèle une diversité d'initiatives rendues possibles grâce à ces contributions volontaires. Le domaine d'application du VGI va au-delà des aspects techniques liés à la validation des modèles dans les bassins non jaugés, incluant un éventail étendu de stratégies de gestion de crise.

Ce chapitre offre une vue d'ensemble sur le cycle de vie du VGI, depuis l'engagement des volontaires jusqu'au traitement et à l'analyse sophistiquée des données provenant des réseaux sociaux et d'autres plateformes de VGI. L'importance capitale du VGI dans la révolution des stratégies de gestion des crises liées aux inondations est ainsi soulignée.

V.2 Définition de l'information géographique volontaire (VGI)

V.2.1 Origine et définition :

Le terme "Information Géographique Volontaire" (VGI), conceptualisé par le géographe américain Michael Goodchild (2007), fait référence aux données géographiques créées volontairement et souvent de manière collaborative par des individus ou des organisations non professionnelles. Tel que défini dans sa publication de 2007, le VGI met en évidence l'importance croissante des contributions citoyennes dans la production de données géographiques et la cartographie participative. Ce concept s'est considérablement étendu, en partie grâce aux avancées des technologies numériques et des plateformes participatives en ligne, permettant la collecte et le partage de données géographiques par les citoyens.

V.2.2 Termes similaires aux VGI dans la littérature scientifique :

Pour décrire le concept de VGI, différents termes sont utilisés dans la littérature scientifique, reflétant ainsi la diversité des approches et des perspectives concernant la production et l'utilisation de données géographiques issues de sources non professionnelles.

Dans ce contexte, le tableau V-1 fournit à titre exhaustif un inventaire des diverses formes d'information géographique collaborative et leurs sources académiques.

Tableau V-1 : diverses formes d'information géographique collaborative

Type d'information géographique collaborative	Références
Information géographique collaborative (CCGI)	(See <i>et al.</i> , 2016)
Observatoire citoyen	(Grainger, 2017)
Information géographique participative	(Basupi <i>et al.</i> , 2017)
Néo-géographie	(Trojan <i>et al.</i> , 2019)
Cartographie ubiquitaire	(J. Liu <i>et al.</i> , 2020)
Systèmes d'information géographique participatifs	(Loc <i>et al.</i> , 2021)
Contenu spatial généré par les utilisateurs	(Tu, 2021)
Science citoyenne	(Nardi <i>et al.</i> , 2021)
Sensing citoyen	(Coulson <i>et al.</i> , 2021)
Réseaux de capteurs humains	(Mei <i>et al.</i> , 2023)

Malgré la variété des termes, l'VGI "Information Géographique Volontaire" reste le terme prédominant utilisé pour décrire ce phénomène.

V.2.3 Évolution du VGI :

Initialement, le VGI désignait les données géographiques générées par les utilisateurs via les technologies web, facilitant une plus grande interaction des utilisateurs sur Internet. Avec le temps, la portée du VGI s'est élargie pour englober une variété d'activités participatives et de mobilisation communautaire, à la fois numériques et non numériques. Cette évolution reflète les changements dans les pratiques technologiques et sociales, mettant en lumière l'augmentation de la participation citoyenne à la création et à l'utilisation des données géographiques.

Cette transformation est significative dans la production, la collecte et l'utilisation des données géographiques, intégrant de plus en plus les contributions citoyennes et favorisant la collaboration entre les parties prenantes. Elle s'est avérée particulièrement pertinente dans la recherche géographique, où les données VGI se sont révélées complémentaires et enrichissantes par rapport aux données géographiques traditionnelles. Le VGI offre de nouvelles perspectives

et des informations détaillées sur des phénomènes spécifiques, s'avérant précieux notamment pour la validation des modèles hydrologiques et hydrauliques, la gestion des catastrophes naturelles, l'urbanisme et d'autres domaines de la recherche géographique (Haklay, 2013).

V.3 Sources de l'information géographique volontaire (VGI)

V.3.1 Aperçu des sources de VGI :

L'Information Géographique Volontaire (VGI) provient de deux catégories principales de sources : conventionnelles et non structurées. Chaque catégorie a ses avantages et ses limites uniques, particulièrement pertinents dans le contexte de la gestion du risque d'inondation.

V.3.2 Sources conventionnelles de VGI

Les sources conventionnelles de VGI se caractérisent par leur création intentionnelle et leur nature structurée. Ces sources incluent des données issues de questionnaires en ligne, d'enquêtes de terrain réalisées après des événements d'inondation, de sondages publics, et de données extraites de plateformes en ligne telles qu'OpenStreetMap.

Les contributions réalisées via des applications mobiles font également partie de cette catégorie. En général, ces sources sont considérées comme plus fiables et précises en raison de leur nature structurée. Les études de Eckle et al (2016), ont mis en évidence l'utilisation des données OpenStreetMap dans la gestion du risque d'inondation, démontrant leur utilité dans l'évaluation des zones à risque d'inondation et l'identification des itinéraires d'évacuation potentiels. De plus, ces données facilitent l'identification d'infrastructures clés comme les ponts et les barrages, s'avérant inestimables dans la préparation aux inondations et la planification des interventions d'urgence. Les travaux de E. Gaume & Borga (2008), ont souligné la valeur des enquêtes post-inondation pour réduire les erreurs dans les estimations des débits de crue, révélant des informations essentielles sur les caractéristiques des crues éclair, y compris les types de sols et les comportements atypiques dans certaines régions.

V.3.3 Sources de VGI non structurées

Les données VGI non structurées, souvent involontaires, proviennent principalement de plateformes en ligne comme les médias sociaux. Cette catégorie inclut typiquement des contenus textuels, des photos, des vidéos et des enregistrements audios. Bien que ces sources soient généralement considérées comme moins fiables et précises, elles sont cruciales pour la surveillance en temps réel d'événements tels que les inondations, les tempêtes et les

tremblements de terre. L'étude de Sagl et al (2014) a trouvé que les médias sociaux sont une source vitale de VGI non structuré pour la gestion des risques de catastrophe. Les utilisateurs partagent fréquemment des informations géographiques sur ces plateformes, parfois involontairement, par le biais de balises de localisation ou de hashtags géolocalisés. Ces données peuvent être instrumentales dans la gestion des catastrophes et les processus décisionnels. Dans ce contexte, les médias sociaux ont joué un rôle significatif pendant l'ouragan Harvey en 2017, aidant à identifier les zones affectées et à coordonner les efforts de secours (Li et al. , 2019). Cependant, les défis liés à la qualité, la fiabilité et la représentativité sont inhérents au VGI non structuré. Les données générées par les utilisateurs peuvent être sujettes à des inexactitudes ou à des biais, nécessitant une considération prudente lors de leur utilisation et leur traitement pour la gestion des inondations.

V.4 Caractéristiques et propriétés de l'information géographique volontaire (VGI)

V.4.1 Aperçu des caractéristiques du VGI :

L'information géographique volontaire (VGI) représente une nouvelle catégorie de données spatiales, apportant à la fois des opportunités et des défis aux domaines de la cartographie et des Sciences de l'Information Géographique (SIG). Ces caractéristiques et propriétés sont largement étudiées dans la littérature scientifique, mettant en évidence des points clés (Haklay, 2013, Sui et al. , 2013). Le tableau fournit un aperçu structuré des caractéristiques du VGI et de leurs implications pour la cartographie et les SIG.

Tableau V-2: Caracteristiques des VGI et leurs implications a la cartographie et aux SIG

Caractéristique	Description
Volontariat	Les données sont fournies par des individus sur une base volontaire, souvent avec une connaissance personnelle des données qu'ils fournissent.
Hétérogénéité	La diversité des contributeurs entraîne une gamme de qualité et de précision des données.
Volume	La quantité de données est substantielle, constituant une source significative d'information géographique.
Rapidité de Production	Le VGI est produit rapidement, souvent en réponse à des événements spécifiques, soulignant son actualité.
Accessibilité	Les données sont facilement accessibles au public pour le téléchargement, la visualisation et l'analyse.
Incertitude	La diversité de la qualité des données introduit des erreurs et des ambiguïtés, qui doivent être prises en compte dans leur utilisation.
Contextualisation	Les données sont souvent générées dans des contextes spécifiques, ajoutant des détails riches aux informations fournies.
Potentiel Collaboratif	Encourage la collaboration et la participation du public dans la création de données géographiques.
Flexibilité	Les données peuvent être générées sur divers appareils, favorisant une participation plus large.
Actualité	Les données peuvent être fréquemment mises à jour, permettant le suivi d'événements et de situations dynamiques.

V.4.2 Intégration des VGI aux systèmes SIG :

Alors que les sources conventionnelles de VGI sont souvent alignées avec les spécifications techniques pour une intégration plus facile dans les SIG existants, les données provenant de sources moins conventionnelles peuvent nécessiter un traitement supplémentaire. Ce processus d'intégration pourrait impliquer le nettoyage des données, la normalisation, le géoréférencement, la validation et la conversion de format pour s'intégrer de manière transparente dans les systèmes SIG (Noardo *et al.* , 2020).

V.4.3 Évaluation de la Qualité :

La qualité de l'Information Géographique Volontaire (VGI) ne dépend pas uniquement du nombre de contributeurs, contrairement à la Loi de Linus. D'autres facteurs tels que l'expertise, la motivation, la connaissance locale et la validation des données jouent un rôle crucial dans la

qualité du VGI. Par conséquent, il est essentiel de réaliser une évaluation approfondie de la qualité des données VGI avant de les utiliser dans des applications de recherche ou de prise de décision (Grinberg et al. , 2019).

V.5 Utilisation des données (V.G.I) dans la gestion des événements d'inondations et la validation des modèles hydrologiques et hydrauliques

V.5.1 Application dans la gestion du risque d'inondation :

La recherche s'est de plus en plus concentrée sur l'utilisation des sources d'Information Géographique Volontaire (VGI) pour la gestion du risque d'inondation. L'utilisation de sources de données non conventionnelles, comme les médias sociaux, est évaluée pour extraire des informations pertinentes, y compris des photos et des vidéos, pour surveiller les événements d'inondation dans la gestion des catastrophes. Les études de McDougall & Temple-Watts, (2012) and Dashti et al (2014) sur des inondations importantes en Australie (2010-2011) et les inondations du Colorado en 2013 ont montré que le VGI contribue de manière substantielle à la surveillance en fournissant des informations immédiates et détaillées pendant toutes les phases de la gestion des inondations - prévention, atténuation, préparation et intervention. Ces études soulignent comment le VGI peut améliorer la compréhension des situations d'urgence, conduisant à des décisions mieux informées dans la planification des opérations d'aide. Elles mettent également en évidence l'importance cruciale d'une surveillance minutieuse de toutes les phases des catastrophes naturelles pour minimiser les impacts négatifs d'événements futurs similaires. De plus, les sources de VGI ont comblé d'importantes lacunes d'information, en particulier depuis le début des inondations jusqu'à l'arrivée des équipes scientifiques sur place.

V.5.2 Méthodologie d'extraction des informations liées aux inondations à partir du VGI

Selon Feng & Sester (2018), une méthodologie pour extraire les informations liées aux inondations à partir de sources VGI est présentée. Cette étude a fourni des aperçus sur les méthodes de classification automatique les plus efficaces pour catégoriser les informations publiées. En se concentrant sur la gestion des inondations, les auteurs se sont concentrés sur la détection des événements d'inondation pluviale et fluviale. La collecte d'informations spécialisées à partir de photos géolocalisées a contribué efficacement à la surveillance et à la vérification des modèles hydrologiques conventionnels. Les résultats ont démontré que l'utilisation judicieuse de la classification et du géoréférencement peut fournir des informations avancées sur les événements d'inondation. L'automatisation de ces méthodes permet une

cartographie en temps réel des conséquences des événements d'inondation, extrêmement bénéfique pour ajuster et valider les modèles hydrologiques et hydrauliques. De plus, comparer les résultats des simulations de reconstruction d'événements extrêmes avec les observations des données VGI aide à évaluer la précision des résultats modélisés et des méthodes de modélisation (Macchione *et al.* , 2019) . Le VGI peut également être utilisé pour améliorer la résolution spatiale et temporelle des données d'entrée des modèles, en particulier dans les zones non couvertes par les réseaux de surveillance hydrologique et hydraulique conventionnels (zones comportant des bassins non jauges). En outre, elles peuvent être utiles pour la surveillance en temps réel des systèmes hydrologiques et hydrauliques et facilitent la prise de décision dans la gestion des inondations.

V.5.3 Défis de l'utilisation du VGI pour la validation des modèles hydrologiques et hydrauliques

L'utilisation des données VGI pour valider les modèles hydrologiques et hydrauliques présente en elle-même également des défis. Les données VGI peuvent être très hétérogènes en termes de qualité, de précision et de fiabilité, ce qui peut potentiellement entraîner des erreurs et des biais dans les résultats des modèles. Il est donc essentiel de disposer de méthodes appropriées pour filtrer et évaluer la qualité des données VGI avant leur utilisation dans les modèles hydrologiques et hydrauliques. Les VGI peuvent jouer ainsi un rôle significatif dans la validation des modèles hydrologiques et hydrauliques en fournissant des données de terrain supplémentaires, en améliorant la résolution spatiale et temporelle des données d'entrée, en évaluant la précision des résultats modélisés et en contribuant à la gestion des risques et les impacts des inondations.

V.5.4 Défis de l'application du VGI dans la gestion des inondations :

L'utilisation des données VGI dans la gestion des inondations rencontre des défis classés en quatre catégories principales liées à la qualité : catégorisation, géolocalisation, représentation visuelle et automatisation (Gómez-Barrón *et al.*, 2016).

V.5.4.1 Catégorisation des Données VGI

Le premier défi concerne la catégorisation appropriée des informations relatives aux inondations. Une structure de classification complète et pertinente est essentielle pour extraire des informations précieuses sur les différentes phases d'une inondation. Divers cadres de

classification sont proposés dans la littérature scientifique (Dashti *et al.*, 2014, Gómez-Barrón *et al.*, 2016), et l'obtention d'une catégorisation largement acceptée pourrait faciliter des progrès plus cohérents dans la recherche.

Tableau V-3: Classification de la qualité des données VGI (Gómez-Barrón *et al.*, 2016)

Niveau de Qualité	Description
Données VGI Vérifiées	Ont subi une vérification par des experts ou des autorités, offrant une fiabilité et une précision maximales.
Données VGI de Haute Qualité	Produites par des contributeurs qualifiés utilisant des outils fiables ; de haute qualité mais non formellement validées.
Données VGI de Qualité Moyenne	Qualité variable provenant de diverses sources ; peuvent comporter des erreurs mais utilisables pour des tâches moins exigeantes.
Données VGI de Faible Qualité	Provenant de sources et contributeurs peu fiables ; risque élevé d'erreur et adaptées uniquement pour des besoins de faible précision.

Le tableau fournit ainsi une référence rapide à la hiérarchie et à la fiabilité attendue des données VGI en fonction du niveau de processus d'assurance qualité qu'elles ont subi.

V.5.4.2 Géoréférencement

Le deuxième défi concerne la précision et l'exactitude du géoréférencement des données VGI. Le géoréférencement consiste à associer précisément les données collectées par les contributeurs sur les plateformes en ligne à des informations géographiques spécifiques, essentielles pour positionner les données VGI sur une carte et les intégrer dans les Systèmes d'Information Géographique (SIG) en vue d'une éventuelle analyse spatiale. Les défis clés se posent, en particulier lors de la manipulation de jeux de données provenant principalement de sources VGI non conventionnelles.

Diverses méthodes sont utilisées pour le géoréférencement, comme l'emploi de coordonnées GPS précises ou de localisations approximatives basées sur les métadonnées des photos. Cependant, le géoréférencement des données VGI peut être sujet à des erreurs, en particulier dans les zones rurales ou mal cartographiées où les informations géographiques sont limitées. Des imprécisions peuvent également survenir en raison de données de localisation imprécises fournies par les contributeurs ou de méthodes de géoréférencement peu fiables (Wieczorek *et al.*, 2004).



Figure V-1: Volume d'informations sur les précipitations générées pendant les inondations dévastatrices de l'Attique Occidentale en 2017 (Feng & Sester, 2018).

Cette carte est présentée à titre d'exemple et d'illustration. Elle fournit ainsi une représentation visuelle de la fréquence des tweets relatifs à la détection des précipitations, offrant aux intervenants dans la gestion des inondations une évaluation préliminaire des risques potentiels d'inondation, en particulier dans les régions où les tweets sur les précipitations sont significativement plus fréquents que dans d'autres.

V.5.4.3 Visualisation

La visualisation des données VGI, potentiellement aux côtés de données fondamentales sous-jacentes, présente des défis uniques différents de la visualisation de cartes conventionnelles. Le premier défi concerne la conception graphique et la sélection des informations pertinentes, tandis que le second réside dans la communication des disparités de qualité des données. Plus précisément, les cartes et les graphiques générés doivent être facilement compréhensibles même pour des individus non familiers avec la géographie ou la science, qui pourraient jouer un rôle dans la gestion des catastrophes. La complexité dans la transmission des informations limite souvent la diffusion des méthodologies à tous les niveaux de gestion des inondations. Malgré des taux d'alphabétisation plus élevés, la littératie géographique reste un défi à l'échelle mondiale (Flanagin & Metzger, 2008).

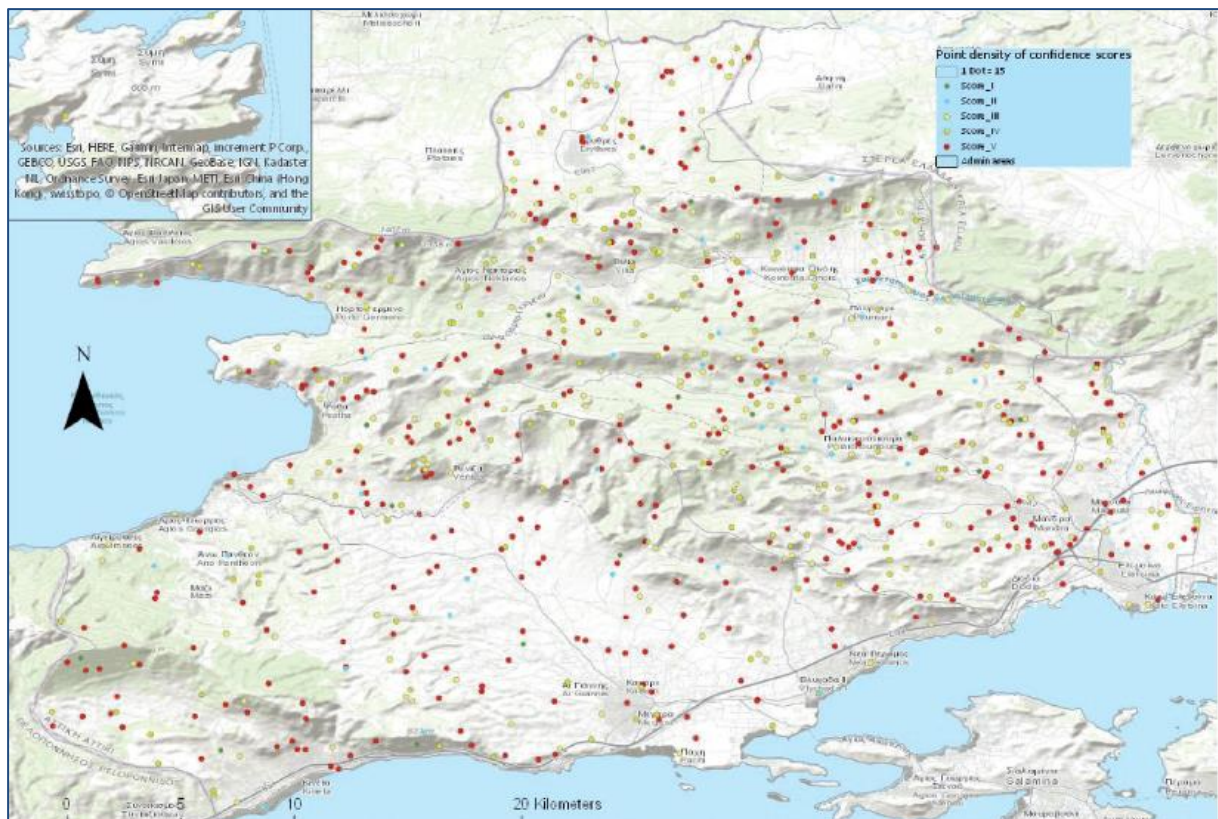


Figure V-2: Impact des Inondations à Mandra, Attique Occidentale, Grèce" (Poser & Dransch, 2010).

Cette carte met en évidence les effets d'une inondation en Attique Occidentale, Grèce. Chaque point sur la carte représente un indicateur d'impact, avec de multiples marqueurs rouges indiquant des décès lors des deux inondations.

V.5.4.4 Automatisation dans l'analyse des données VGI

L'analyse des données de l'Information Géographique Volontaire (VGI) peut être un processus chronophage en raison de la diversité des sources et du volume des données. Grunder-Fahrer Dakota, (2018) et Imran et al (2013), ont suggéré l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle (IA), comme les Machines à Vecteurs de Support (SVMs), pour accélérer ce processus en classifiant les informations et en résolvant les ambiguïtés. Les SVMs, des modèles d'apprentissage automatique pour la classification et la régression, peuvent être entraînés avec des données annotées pour classifier diverses informations géographiques et automatiser la classification de nouvelles données. Cette approche promet de réduire le temps nécessaire à l'analyse manuelle, comme le démontrent les recherches récentes utilisant des SVMs (Feng & Sester, 2018).

Toutefois, l'application de l'IA dans l'analyse des données VGI ne se limite pas aux SVMs, d'autres méthodes d'apprentissage automatique et d'IA étant également exploitables (Mei *et al.*, 2023), soulignant l'importance de reformuler les idées lors de la réutilisation de contenu pour préserver l'intégrité académique.

V.6 Conclusion :

Ce chapitre visait à fournir une compréhension des principes fondamentaux de l'Information Géographique Volontaire (VGI) et de son application dans la gestion des événements d'inondation, ainsi que dans l'utilisation des informations extraites du VGI pour la reconstruction d'événements extrêmes et la validation des modèles hydrologiques et hydrauliques dans les bassins versant non jaugés. Les études liées au VGI dans la gestion des inondations a démontré l'efficacité de l'utilisation du VGI pour identifier les événements d'inondation, documenter leurs différentes phases et surveiller les conséquences néfastes et les tâches critiques nécessaires à la préparation de futures inondations potentielles. De plus, l'exploitation du VGI contribue de manière significative à l'étalonnage et à la validation des modèles hydrologiques et hydrauliques dans les bassins non jaugés, offrant des informations spécifiques spatiales et temporelles. Les initiatives participatives jouent également un rôle notable dans la préparation en identifiant les points vulnérables et en effectuant des ajustements dans les environnements urbains, améliorant ainsi la résilience face aux inondations. Des approches similaires impliquant des experts peuvent fournir un soutien inestimable dans les processus décisionnels liés à la gestion des inondations.

Bien que les sources de données VGI puissent fournir un volume substantiel d'informations sur les inondations, leur qualité peut varier et ne pas répondre aux exigences de l'atténuation et de la gestion des inondations extrêmes. Les sources de données VGI conventionnelles, généralement plus ciblées, peuvent fournir des données mieux adaptées aux besoins de gestion, mais leur production est souvent limitée. Il est donc crucial de comprendre les limitations des sources de données VGI et de les utiliser judicieusement en les combinant avec des sources conventionnelles telles que les données satellitaires et les capteurs. Cette approche permet une compréhension plus complète et précise des inondations. De plus, un système de gestion des données efficace est essentiel pour garantir une collecte, un stockage, un traitement et une analyse appropriés des informations.

S'appuyant sur les informations recueillies dans ce chapitre, le chapitre suivant se concentrera sur une étude de cas du bassin non jaugé de Oued Deffa à El-Bayadh. Cette étude examinera

l'application pratique du VGI dans un contexte spécifique, en explorant comment les méthodologies et les principes discutés peuvent être mis en œuvre dans un scénario réel. Les défis et les opportunités présentés par un bassin versant non jaugé sont explorés. Aussi, la question comportant comment le VGI peut jouer un rôle transformateur dans la compréhension et la gestion de tels environnements hydrologiques complexes, est appréhendée.

CHAPITRE VI

**Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans
le bassin versant de l'Oued Deffa**

VI. Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

VI.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à une étude du cas de bassin versant de l'Oued Deffa, situé dans la région d'El-Bayadh. Il vise à présenter en détail la méthodologie adoptée pour cartographie l'événement a reconstitué, la caractérisation complète de la zone d'étude, et les résultats obtenus à travers une analyse hydrologique et une modélisation hydraulique rigoureuse. Cette étude est d'autant plus pertinente qu'elle s'attaque à un cas de bassin versant non jaugé, présentant des défis uniques en termes de collecte de données et d'analyse.

La méthodologie employée combine des modèles hydrologiques et hydrauliques hydrodynamiques bidimensionnels pour modéliser et cartographier l'événement de crue soudaine survenu le 01/10/2011. L'événement a été choisi du fait de son extrémité, son ampleur et de sa particularité historique dans la région d'étude.

Des modèles tels que la formule rationnelle, HECHMS, EBA4SUB, FLO2D et HEC-RAS 2D sont utilisés pour produire des hydrogrammes précis et simuler les caractéristiques des inondations.

Une attention particulière est accordée à la collecte des données topographiques précises et à l'utilisation des données volontaires d'informations géographiques (VGI) pour pallier le manque de mesures hydrométriques spécifiques qui sont nécessaires notamment pour le calibrage des modèles. La validation est ainsi effectuée en comparant les résultats simulés avec des observations réelles, en utilisant des indicateurs d'évaluation tels que le RMSE, le CSI et le coefficient de Nash-Sutcliffe.

En dépit des défis posés par le manque de données, le chapitre met en lumière l'importance de la modélisation hydraulique dans la gestion des risques d'inondation, Il illustre ainsi comment l'intégration de différentes méthodologies et l'utilisation innovante de données disponibles peuvent conduire à une compréhension plus profonde et à une meilleure gestion des risques d'inondation dans des contextes difficiles comme celui de l'Oued Deffa.

VI.2 L'approche méthodologique

Dans cette partie de l'étude, une approche de modélisation combinée, qui intègre des modèles hydrologiques et des modèles hydrauliques hydrodynamiques bidimensionnels, est adoptée. Cette méthode est mise en œuvre pour la modélisation et la cartographie des inondations dans le bassin versant non jaugé de l'Oued Deffa, situé à El-Bayadh.

Divers modèles hydrologiques, notamment la formule rationnelle, le modèle conceptuel HECHMS et le modèle hydrologique EBA4SUB, sont appliqués. Les hydrogrammes générés par ces modèles servent comme entrées pour les modèles hydrauliques bidimensionnels FLO2D et HEC-RAS 2D. L'objectif est de modéliser et de cartographier avec précision l'événement de crue soudaine survenu le 1er octobre 2011.

Des données topographiques collectées suite à l'événement de crue (post-inondation) sont incorporées pour renforcer la précision de la modélisation hydraulique. Ces données, rappelons-le, sont essentielles pour élaborer un modèle numérique de terrain (MNT) à haute résolution.

Face au manque de données spécifiques sur les inondations, telles que les mesures de débit et les caractéristiques hydrauliques (profondeur de l'eau), le recours à des données d'informations géographiques volontaires (VGI), relatives à la crue exceptionnelle du 01/10/2011, est un choix judicieux. Ces données jouent un rôle clé dans la validation des modèles hydrologiques et hydrauliques. Le processus de validation implique ainsi une comparaison entre les profondeurs d'eau simulées et celles observées sur le terrain, en utilisant des indicateurs statistiques tels que le RMSE (Root Mean Square Error) et le coefficient de Nash-Sutcliffe.

En revanche, la validation de l'étendue des inondations est basée sur la comparaison entre les zones inondées simulées et les zones réellement inondées, telles qu'elles sont identifiées par l'Agence Spatiale Algérienne. L'approche de modélisation couplée fournit une méthode intégrée pour une meilleure compréhension et gestion des inondations dans le bassin versant de l'Oued Deffa, en dépit de la rareté des données hydrométriques. Elle illustre l'efficacité d'utiliser conjointement des informations géographiques volontaires et des modèles hydrologiques-hydrauliques dans l'évaluation des impacts des crues.

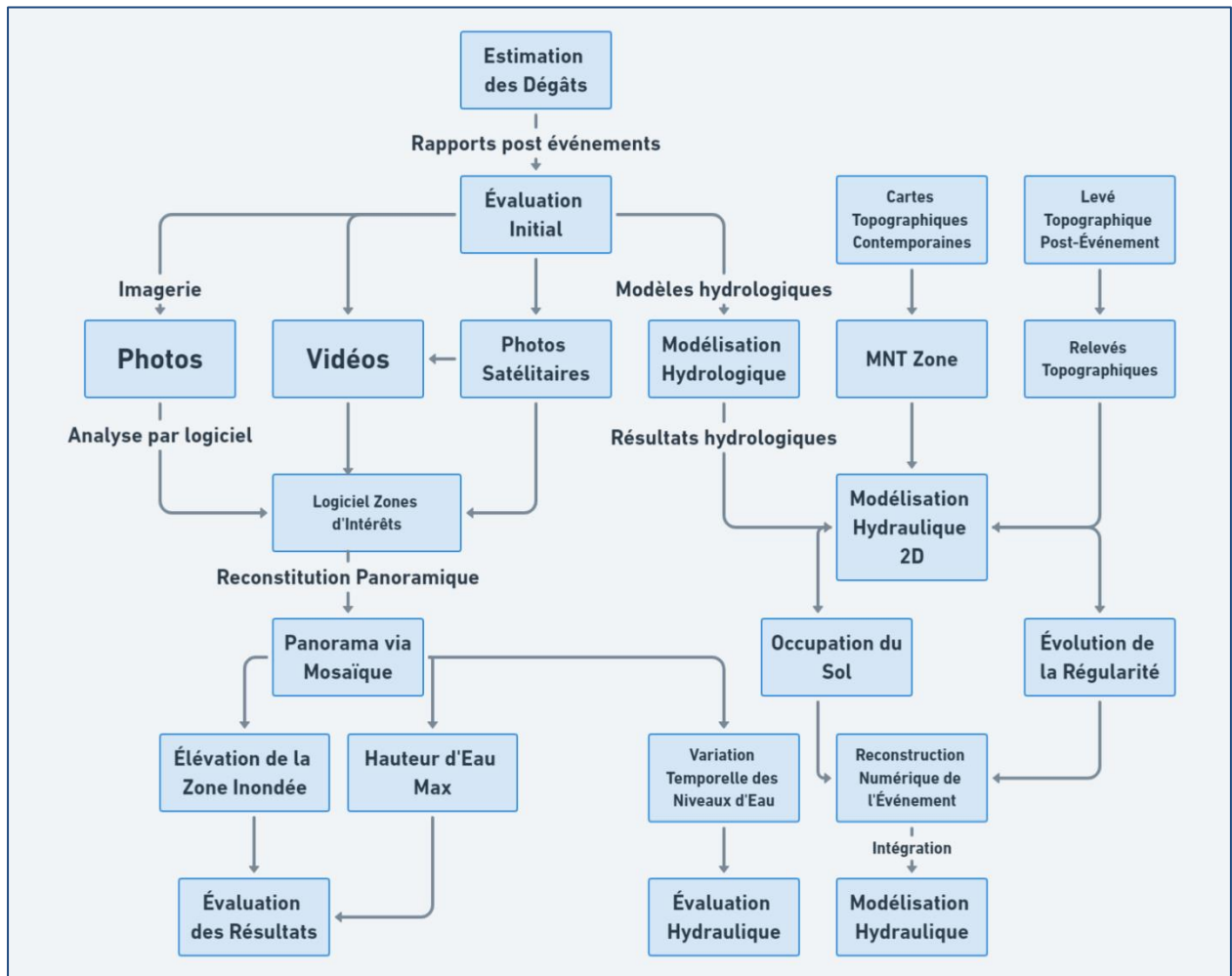


Figure VI-1: Schéma méthodologique adopté

VI.3 Choix du site d'étude

Pour la présente étude, le choix du lieu se focalise sur la ville d'El-Bayadh. Une région stratégique en Algérie pour plusieurs raisons. En effet, la région joue un rôle prépondérant en tant que capitale de l'élevage ovin et se positionne comme un centre principal d'approvisionnement en viandes rouges dans le pays. Sa contribution ne se limite pas à l'agriculture, elle se distingue également en tant que pôle industriel dans le secteur agro-alimentaire.

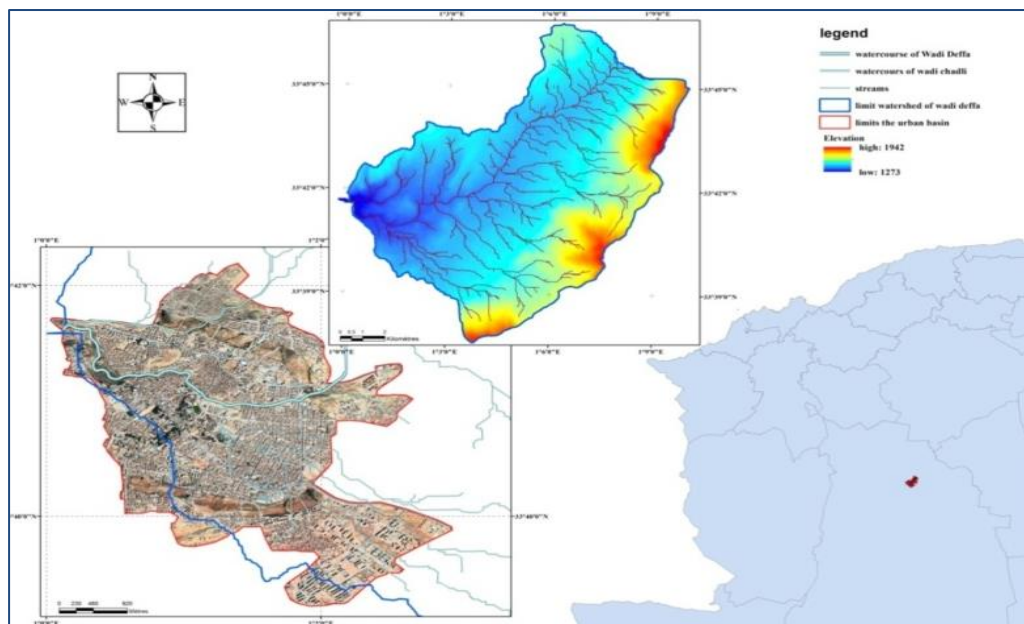
La situation géographique d'El-Bayadh lui confère un avantage remarquable. Située au carrefour entre les hauts plateaux et les régions présahariennes de l'Ouest de l'Algérie, elle forme un lien vital entre différentes zones géographiques et économiques du pays.

En plus de ses atouts économiques et géographiques, El-Bayadh bénéficie de l'attention gouvernementale dans le cadre de stratégies de développement régional. Afin de freiner l'exode

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

rural vers le littoral et de promouvoir l'intégration de la population locale, le gouvernement a mis en place le Fonds de développement des hauts plateaux. Cette initiative vise à stimuler l'économie locale et à valoriser les potentialités régionales (Bounoua et al., 2023).

C'est dans ce contexte, alliant importance économique, position géographique stratégique et soutien gouvernemental au développement, que la région d'El-Bayadh est choisie comme site pour la présente étude. Cette sélection est le fruit d'une analyse approfondie des enjeux régionaux et de l'adéquation du site avec les objectifs de cette recherche.



VI-2 Bassin versant et urbain d'oued Deffa

VI.3.1 Aperçu historique sur les inondations de l'Oued Deffa

A l'instar des régions aride et semi arides, la région d'El-Bayadh souffre d'un déficit pluviométrique significatif, est périodiquement confrontée à des averses orageuses intenses (Aroua, 2022).

Ces épisodes de précipitations soudaines ont souvent des conséquences graves, tant sur le plan humain que matériel, marquant l'histoire de la région par des inondations exceptionnelles et désastreuses (Hafnaoui et al., 2022).

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

Tableau VI-1: Historique des inondations de 1994 à 2011 établie par la DRE de El-Bayadh

Ville	Date de la crue	Pjmax	Nombre de morts	Nombre Sinistrés (famille)
El-Bayadh	18/10/1991	51.5 mm	12	9
El-Bayadh	1/06/1993	42.2 mm	3	20
El-Bayadh	09/04/1997	38.5 mm	1	12
El-Bayadh	29/03/2004	48.1 mm	2	39
El-Bayadh	01/10/2011	39 mm	14	400

VI.3.1.1 Inondation du 1er octobre 2011

Le 1er octobre 2011, la ville d'El-Bayadh a été l'objet à une inondation la plus sévère de son histoire. Cette catastrophe naturelle est déclenchée par une tempête exceptionnelle qui a apporté plus de 60 mm de pluie en très peu de temps (45 minutes), équivalant à la quantité de précipitations normalement attendue sur trois mois. Cette situation extrême a eu des conséquences tragiques, entraînant la mort de 14 personnes, blessant 37 autres et provoquant des dégâts matériels considérables. L'ampleur et les répercussions de cet événement font de l'inondation d'El-Bayadh un sujet d'étude important, particulièrement en raison de son intensité et de l'étendue de son impact.

VI.3.1.2 Causes de l'inondation de l'oued Deffa d'octobre 2011

L'inondation de l'Oued Deffa en octobre 2011 est principalement causée par des pluies torrentielles qui ont dépassé la moyenne annuelle, avec des précipitations atteignant environ 60 mm. Un facteur aggravant est le rétrécissement du lit de l'Oued Deffa, résultant de l'urbanisation croissante et des constructions non autorisées dans la région. Ces éléments ont intensifié l'impact de l'inondation, provoquant des dommages significatifs dans des zones telles que Haï El-Grabba et aux alentours du pont Mahboula, soulignant les effets combinés des phénomènes naturels extrêmes et de l'intervention humaine sur l'influence et l'impact des catastrophes naturelles.

VI.3.1.3 Les dégâts enregistrés suite à l'inondation du 1er octobre 2011

Au lendemain de la tragique inondation du 1er octobre 2011, les autorités algériennes ont mobilisé une équipe pluridisciplinaire composée d'experts en contrôle technique de construction (CTC), en contrôle technique hydraulique (CTH), ainsi que de topographes. Leur

mission était d'évaluer et de localiser tous les bâtiments et infrastructures endommagés par l'inondation.

Le rapport technique résultant a révélé des dommages significatifs : un pont situé dans la partie ouest de la ville a subi de sérieux dommages ; deux passerelles sont emportées par les eaux et 53 habitations situées à proximité de l'oued ont également été endommagées. Bien que ces données soient précieuses pour estimer indirectement les zones affectées par l'inondation, elles ne permettent pas à elles seules de délimiter ni de visualiser avec précision la distribution spatiale de l'étendue des inondations dans le cadre de cette étude.

VI.3.2 Utilisation des données géographiques volontaires pour l'analyse de l'inondation du 1er octobre 2011 à El-Bayadh

Outre les pertes humaines, la crue a provoqué d'importants dégâts économiques et a sérieusement endommagé les habitations, les ponts et d'autres infrastructures de la ville.

En l'absence de données hydrauliques standard, telles que les mesures de débit ou de profondeur d'eau issues des stations hydrométriques, nous nous sommes orientés vers des sources de données moins conventionnelles, connues sous le nom de "Volunteered Geographic Information" (VGI). Ces données VGI, comprenant des photographies, des vidéos et des témoignages de citoyens, se sont révélées cruciales pour fournir des informations géolocalisées sur l'étendue de la catastrophe. Selon Hung et al (2016), McDougall & Temple-Watts (2012) et Rollason et al. (2018). Ces informations peuvent être interconnectées pour créer un flux de données cohérent et utile.

Pour les besoins de la modélisation hydraulique et la validation de l'événement, les données non conventionnelles recueillies sur les inondations comprennent principalement : (1) des images et vidéos post-événement, ainsi que (2) des rapports d'études effectuées par diverses institutions gouvernementales, comme indiqué par Macchione et al (2019), (3) des estimations des dommages. Ces données VGI sont intégrées dans cette étude pour une compréhension approfondie et une modélisation précise de l'événement extrême.

VI.3.2.1 Collecte de données visuelles post-événement de l'inondation du 1er Octobre 2011

Les photographies et vidéos prises durant la crue du 1er octobre 2011 à El-Bayadh offrent un aperçu inestimable de l'ampleur spatiale et temporelle de cet événement, un aspect mis en

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

évidence par Sakaki et al (2010). Ces ressources visuelles se révèlent être des sources d'information cruciales pour évaluer la portée et la gravité des zones touchées par l'inondation. Des photographes professionnels ont méticuleusement documenté cette catastrophe, se concentrant en particulier sur les quartiers historiques d'El-Grabba. Leurs images forment une partie essentielle pour la base de données non conventionnelles, utilisée dans la présente étude. Les contributions professionnelles sont complétées par des photographies et vidéos amateurs, provenant de diverses sources, qui offrent des perspectives supplémentaires sur d'autres zones impactées, notamment aux abords du pont du 20 août.

Par ailleurs, l'intervention de l'Agence spatiale algérienne (ASAL), agissant dans le cadre de la Charte internationale "Espace et risques majeurs" de la Commission européenne, a été déterminante. En effet L'ASAL a exploité des images satellitaires de haute résolution prises avant et après l'inondation pour délimiter les zones touchées et identifier les régions où l'humidité du sol était la plus marquée (voir Figure VI-3). Ces images satellitaires jouent un rôle fondamental dans la validation de l'étendue de l'inondation telle qu'elle est modélisée dans la présente étude.



Figure VI-3 : Géoréférencement et Analyse des Photos via SIG

L'emploi de système d'information géographique (SIG) joue également un rôle clé dans l'étude. Il permet la localisation précise des sites illustrés dans les photographies et vidéos collectées. Ainsi, des techniques avancées d'analyse d'images pour extraire des données quantitatives pertinentes, telles que les niveaux et profondeurs d'écoulement, directement à partir de ces ressources visuelles, sont appliquées. Une attention particulière est accordée à la sélection des

photographies offrant une vue claire et détaillée de l'inondation. Ces images sont cruciales pour corroborer et valider les résultats des simulations, notamment en ce qui concerne la profondeur et l'étendue de l'inondation, assurant ainsi une simulation plus précise et fiable de l'événement.

VI.3.2.2 Etudes gouvernementales et solutions structurelles après l'inondation du 1er octobre 2011

Pour un examen approfondi et efficace de la problématique des inondations récurrentes dans la région d'El-Bayadh, les autorités gouvernementales ont mandaté le bureau d'études HYBACO pour étudier et proposer des solutions structurelles appropriées. Après une analyse hydrologique et hydraulique approfondie, HYBACO a recommandé deux stratégies principales pour minimiser le risque d'inondation. La première suggère de réaménager l'oued Deffa en élargissant son chenal, tandis que la seconde propose la création d'une déviation du cours d'eau pour contourner la ville.

Ces études ont fourni des informations essentielles, notamment des données topographiques détaillées de la zone inondée et une cartographie à l'échelle 1/500 de l'oued Deffa. Ces données se sont révélées précieuses pour la modélisation hydraulique de l'événement dans la région (Direction des ressources en eau Wilaya d'El Bayadh, 2013).

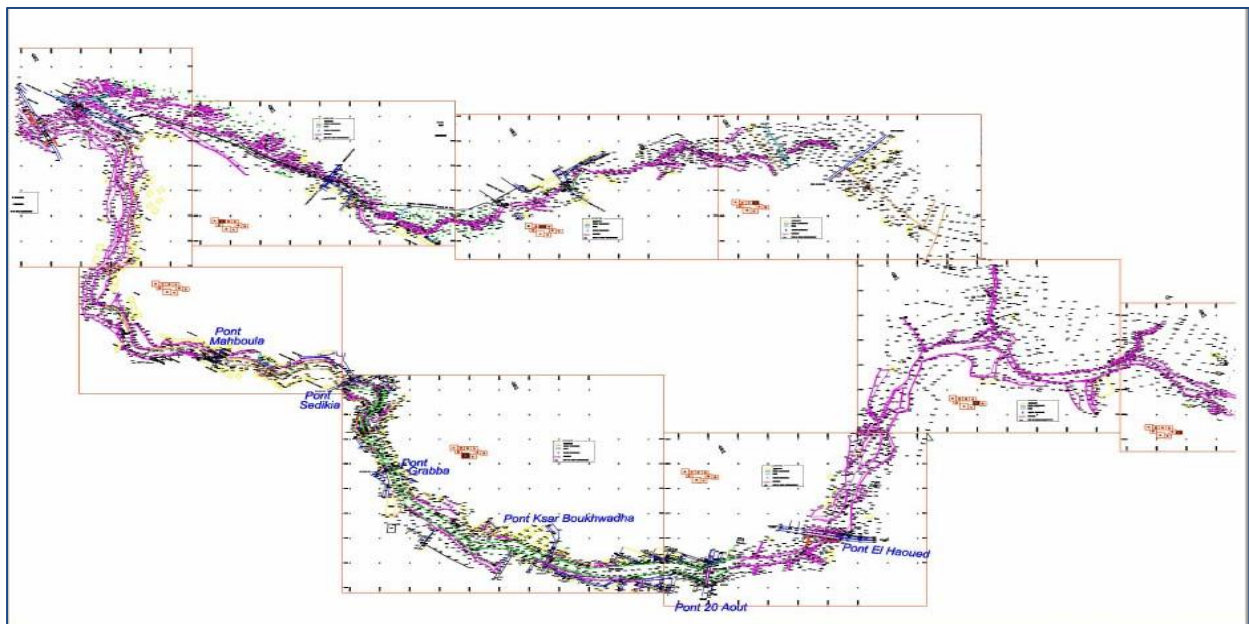


Figure VI-4 : Levé topographique de la zone étudiée (Source HYBACO)

VI.4 Présentation de la zone d'étude et caractéristiques du bassin versant de l'Oued Deffa, Wilaya d'El-Bayadh

VI.4.1 Caractéristiques générales du bassin versant de l'Oued Deffa

VI.4.1.1 Contexte géographique et administratif

La Wilaya d'El-Bayadh, autrefois connue sous le nom de Géryville durant la colonisation française, est située à environ 370 km au sud-est d'Oran et 520 km au sud-ouest d'Alger. En tant que chef-lieu de la région, El-Bayadh occupe une position stratégique, bordée par plusieurs communes et traversée par d'importants axes routiers nationaux dont la N 6 A, la N 111, la N 47 et la N 107.

VI.4.1.2 Géomorphologie et zones géographiques

La zone d'El-Bayadh, située dans le synclinal d'El-Bayadh en Algérie, est entourée par des massifs montagneux imposants. Elle se trouve dans une région qui se divise en trois zones géographiques distinctes (Zerey *et al.*, 2009) :

- 1. Hautes plaines :** Une zone aride avec des altitudes allant de 900 à 1400 mètres et des précipitations annuelles moyennes de 208 mm. Elle subit des gelées fréquentes et est affectée par le sirocco.
- 2. Atlas saharien :** Cette région bénéficie d'un climat semi-aride froid, avec des reliefs variants entre 1300 et 2000 mètres. Elle est caractérisée par des précipitations hivernales plus abondantes, y compris des chutes de neige.
- 3. Prés sahariens :** La plus grande partie de la wilaya, avec un paysage désertique et des altitudes diminuant du nord au sud. Les conditions climatiques sont sahariennes avec des gelées hivernales et une faible moyenne de précipitations annuelles (129 mm).

Chaque zone présente des caractéristiques distinctes qui influencent le climat, la géomorphologie, et l'activité agricole de la région.

VI.4.1.3 Contexte géologique

La région d'El-Bayadh est un point de convergence de trois principaux domaines géologiques, s'étendant du nord au sud :

- 1. Domaine des hautes plaines :** Caractérisé par une structure tabulaire, ce domaine comprend des formations continentales issues du Miocène, du Pliocène et du Quaternaire.
- 2. Domaine de l'Atlas saharien :** Ce domaine se distingue par une structure plissée orientée Nord-est, Sud-ouest, datant de l'ère du Jurassique et du Crétacé.
- 3. Domaine de la plate-forme saharienne :** Il est marqué par des dépôts détritiques d'âge paléozoïque et des formations continentales plus récentes du Pliocène et du Miocène.

Les principales formations géologiques de la région, qui influencent à la fois la nature des sols et les matériaux alluvionnaires, comprennent :

1. Le Trias, caractérisé par des argiles schisteuses, gypseuses et salées.
2. Le Jurassique, dominé par des calcaires durs et dolomitiques et des couches de marnes colorées.
3. Le Crétacé, principalement composé de roches calcaires tendres.
4. Le Cénomanien, avec des marnes et marno-calcaires alternant avec des calcaires plus durs.
5. Le Turonien, formé de calcaires compacts et durs.
6. Le Sénonien, dominé par des marnes et des marno-calcaires.

Ces formations géologiques jouent un rôle crucial dans la constitution des sols et la disponibilité des matériaux alluvionnaires dans la région d'El-Bayadh (POUGET, 1980, Zerey *et al.*, 2009).

VI.4.1.4 Contexte pédologique

La région d'El-Bayadh présente une diversité de types de sols étroitement liée à sa géomorphologie. Les sols principalement destinés à l'agriculture, connus sous le nom de "dayas". Ces sols sont caractérisés par une faible profondeur et un profil alluvial. Ils affichent une teneur en matière organique généralement inférieure à 2%, une texture grossière, et une structure grumeleuse, offrant une stabilité structurale relative (Zerey *et al.*, 2009).

Les différents types de sols de la région incluent (Pouget, 1980) :

1. Sols minéraux bruts : Présents sur les sommets des montagnes (djebels).
2. Sols peu évolués : Situés sur les substrats géologiques et dans les zones à apport continu.

3. Sols Calcimagnésiques : Localisés sur les versants des djebels et les piémonts.
4. Sols Isohumiques : Trouvés dans les glacis d'érosion polygénique du Quaternaire récent.
5. Sols Halomorphes : Situés dans le Chott Chergui et les Sebkhas.

Ces classifications de sols reflètent la diversité et la complexité du paysage pédologique de la région, qui jouent un rôle crucial dans les potentiels agricoles et environnementaux de la région d'El-Bayadh.

VI.4.1.5 Le Couvert végétal

Le couvert végétal de la région d'El-Bayadh est largement influencé par les conditions du sol et le climat de la région. La steppe, adaptée à l'environnement aride, est la végétation dominante dans la majorité de la région. En revanche, les forêts, constituées principalement de maquis et de garrigues, se retrouvent principalement sur les sommets montagneux de l'Atlas Saharien (Hafnaoui *et al.*, 2022).

Dans l'Atlas Saharien, les zones de pâturages présentent une diversité notable. Ces régions bénéficient d'un climat plus clément, avec des précipitations annuelles variant entre 200 et 250 mm, ce qui, malgré la sécheresse, les rend particulièrement propices à la végétation steppique (Zerey *et al.*, 2009).

VI.4.2 Caractéristiques morphométriques et hydrologiques du bassin versant de l'Oued Deffa

L'analyse du bassin versant de l'Oued Deffa, basée sur des données topographiques fournies par l'Agence Nationale du CADASTRE Algérien (ANC) associées à celles du modèle numérique de terrain (MNT) à résolution spatiale de 30 mètres, a permis d'identifier plusieurs caractéristiques clés :

1. **Superficie et périmètre** : La superficie du bassin versant est estimée à 136 km², avec un périmètre de 59.04 km. Ces dimensions sont essentielles pour comprendre l'impact hydrologique du bassin sur la région.

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

Tableau VI-2: Superficie et périmètre du bassin versant Oued Deffa

Bassin Versant	Superficie (km ²)	Périmètre (Km)	K _c	Rectangle équivalent	
				Longueur (Km)	Largeur (Km)
Oued Deffa	136	59. 04	1. 4	23. 02	5. 88

- 2. Indice de compacité de gravéllius (K_c) :** L'indice de gravéllius calculé vaut (1.4). Il permet d'évaluer la complexité du réseau de drainage, suggérant que le bassin possède un réseau de drainage relativement complexe.
- 3. Rectangle équivalent :** Il est utilisé pour simplifier l'analyse morphométrique. Le rectangle équivalent du bassin a une longueur de 23. 02 km et une largeur de 5. 88 km.
- 4. Étude du relief :** Le relief du bassin versant de l'Oued Deffa joue un rôle fondamental dans le processus d'écoulement de l'eau. La topographie de la région, surtout montagneuse, est particulièrement marquée dans la partie orientale du bassin.

La Figure (VI-5) illustre cette topographie et indique que l'exutoire du bassin se trouve à une altitude d'environ 1279 mètres, ce qui a une influence significative sur les caractéristiques hydrologiques de la zone d'étude.

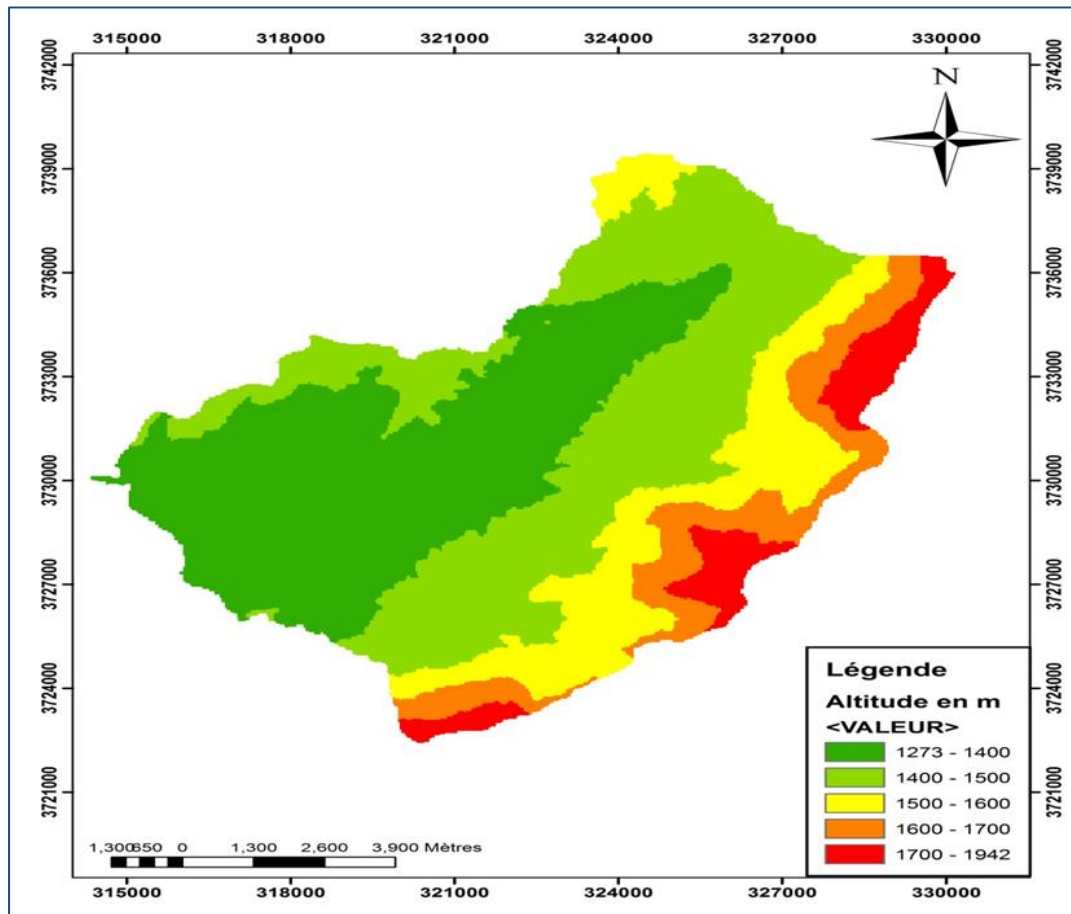


Figure VI-5 : Répartition hypsométrique du bassin versant Oued Deffa

La courbe hypsométrique est un outil essentiel pour l'analyse du relief dans le bassin versant de l'Oued Deffa. Elle synthétise la répartition des pentes en représentant la surface du bassin à différentes altitudes. Sur la courbe correspondante, l'axe horizontal montre soit la superficie, soit le pourcentage de la superficie totale du bassin qui se situe au-dessus d'une altitude donnée, indiquée sur l'axe vertical.

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

Le tableau (VI-3) illustre la répartition hypsométrique du bassin de la zone d'étude. Les données montrent comment la surface du bassin se répartit en fonction de l'altitude :

Tableau VI-3 : Répartition hypsométrique du bassin versant Oued Deffa

Altitude	Surface	Surface en %	Surface cumulée en %
1273-1400	48. 40	35, 58	35, 58
1400-1500	46. 31	34, 05	69, 63
1500-1600	21. 03	15, 57	85, 20
1600-1700	12. 20	8, 94	94, 14
1700-1942	8. 06	5, 85	99, 99

En plus du tableau (VI-3), la Figure (VI-6) fournit un schéma explicatif de la courbe hypsométrique. Pour obtenir cette courbe, un planimètre est utilisé pour mesurer les zones entre les courbes de niveau. La courbe permet ensuite de calculer la dénivelée (D) de la zone d'étude, définie comme la différence d'altitude entre les 5 et 95ème percentiles de la courbe hypsométrique.

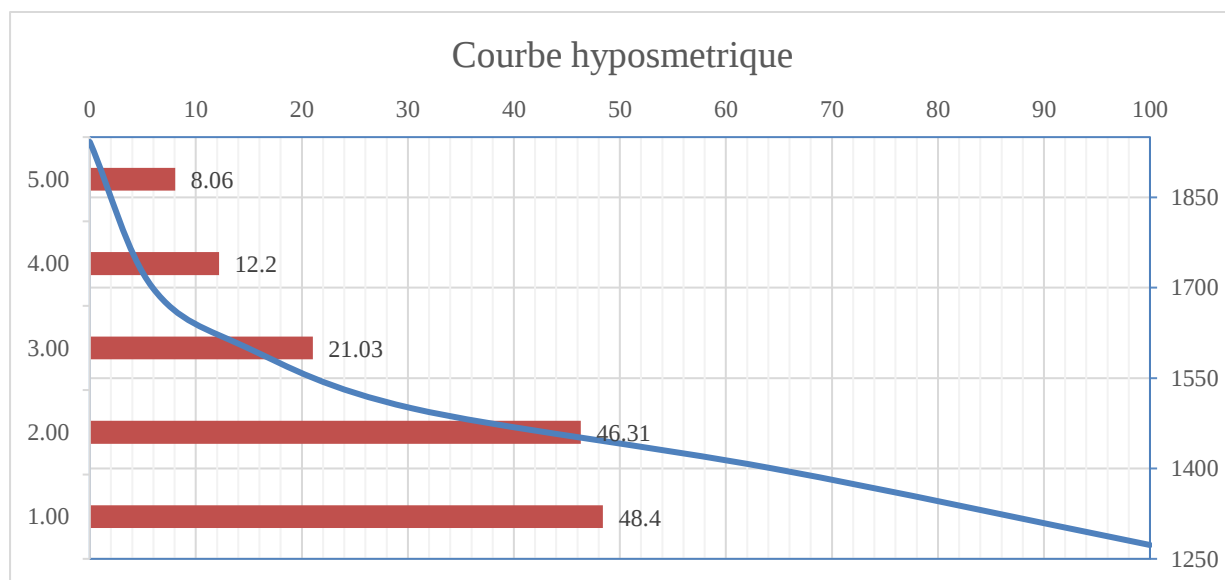


Figure VI-6 : Schéma explicatif de la courbe hypsométrique

VI.4.2.1 Caractéristiques altitudinales du bassin versant de l'Oued Deffa

Les caractéristiques altitudinales jouent un rôle déterminant dans les analyses hydrologiques du bassin versant de l'Oued Deffa. Ces caractéristiques comprennent une altitude maximale et

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

une minimale. Ces valeurs sont essentielles pour comprendre la dynamique hydrologique et climatologique du bassin. L'altitude maximale est le point le plus élevé, tandis que l'altitude minimale est située à l'exutoire du bassin. Ces altitudes influencent l'amplitude altimétrique du bassin et sont déterminantes pour le calcul de la pente (Andersson & Nyberg, 2009).

1. Altitude Moyenne :

Calculée en utilisant la formule

$$H_{moy} = \sum \frac{A_i \times H_i}{A} \quad (06)$$

Où

A_i : est l'aire entre deux courbes de niveau,

H_i : l'altitude moyenne entre ces courbes,

A : la superficie totale du bassin.

L'altitude moyenne, mesurée à 1462 mètres, offre un aperçu général de l'altitude du terrain dans le bassin versant.

2. Altitude Médiane :

Cette valeur est déduite en trouvant l'altitude correspondant à 50% de la surface totale du bassin sur la courbe hypsométrique. Elle donne une approximation de l'altitude moyenne lorsque la courbe présente une pente régulière (Andersson & Nyberg, 2009).

Tableau VI-4: Récapitule les altitudes caractéristiques du bassin versant d'oued deffa

Bassin	H _{max}	H _{min}	D=H5%-H95%	H _{moy}	H5%	H95%
Oued Deffa	1942	1273	450	1462	1750	1300

VI.4.2.2 Indices de pentes du bassin versant de l'Oued Deffa

1. Indice de Pente de Roche :

Proposé par M. Roche, cet indice évalue l'influence de la pente sur le régime hydrologique. Il est calculé en utilisant la formule

$$Ip = \frac{\sqrt{D}}{L} \sum \sqrt{B_i} \quad (07)$$

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

B_i : est le pourcentage de la surface totale entre deux altitudes successives. Cette méthode simplifiée, basée sur le concept de rectangle équivalent, fournit une estimation rapide et efficace de la pente du bassin.

2. Indice de Pente Globale (I_g) :

Pour des évaluations plus rapides, l'indice de pente globale

$$I_g = \frac{D}{L} \left(\frac{m}{km} \right) \quad (08)$$

Où :

D : est la dénivelée (différence entre les 5ème et 95ème percentiles de la courbe hypsométrique)

L : est la longueur du rectangle équivalent.

3. Dénivelée Spécifique (D_s) : Cet indice,

$$D_s = I_s \times \sqrt{s} \quad (09)$$

Prend en compte à la fois la dénivelée et la forme du bassin. Il permet de comparer des bassins de différentes tailles en éliminant les distorsions dues à la taille du bassin.

Tableau VI-5: Résumé des indices du bassin d'oued Deffa

Bassin	Superficie (km ²)	I_p	I_g (m/km)	D_s (m)	Classe de relief selon I_g	Classe de relief selon D_s
Oued Deffa	136	4.34	0.0195	194.48	Relief modéré	Relief assez fort

4. Pente moyenne d'un cours d'eau : La pente moyenne du cours d'eau principal,

Calculée par :

$$P_{moy} = \frac{\Delta H_{max}}{L} \quad (10)$$

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

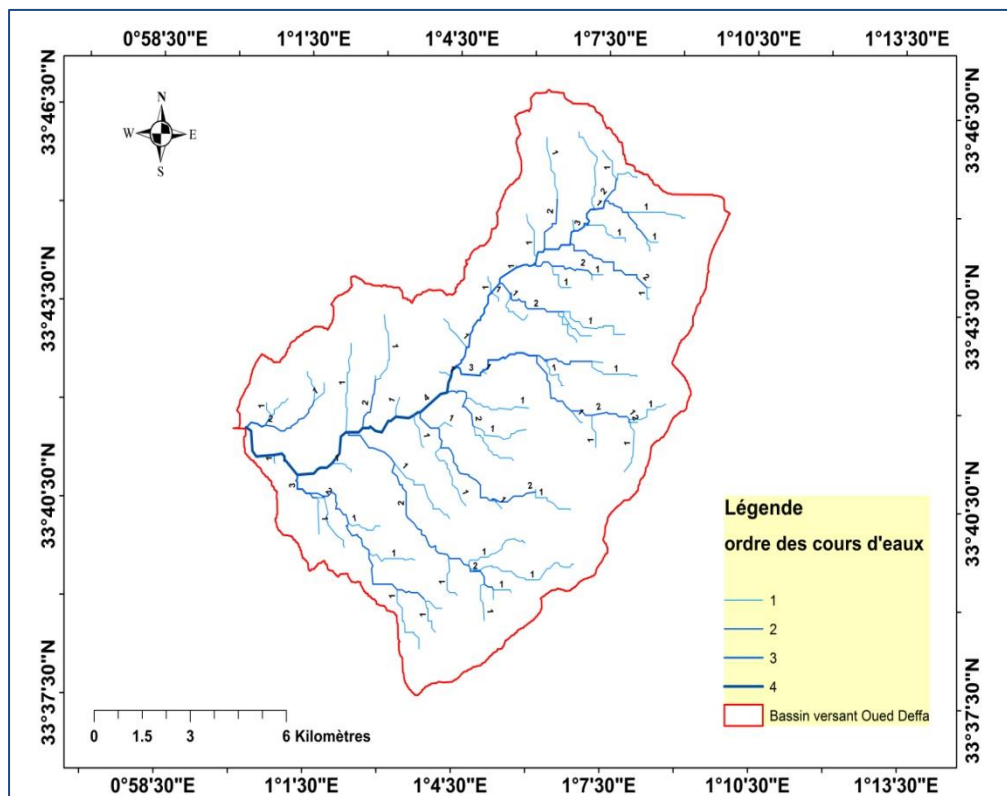
Cette dernière influence le temps de concentration et donc le débit maximal. Une pente abrupte accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce favorise l'infiltration de l'eau dans le sol.

VI.4.3 Étude du réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Deffa

À partir des données d'un modèle numérique de terrain (MNT), l'analyse du réseau hydrographique de l'Oued Deffa, a donné les caractéristiques clés incluent :

VI.4.3.1 Topologie et structure du réseau

La classification du réseau de drainage s'effectue selon des règles spécifiques. Tout cours d'eau sans tributaires est classé d'ordre un. Lors de la confluence de deux cours d'eau de différents ordres, le cours résultant prend l'ordre du plus élevé. Si les cours d'eau ont le même ordre, l'ordre du cours résultant est augmenté d'un.



5. Densité de Drainage (D_d) :

Cette mesure est déterminée par la longueur totale des thalwegs du bassin divisée par sa superficie. La densité de drainage reflète les effets combinés de la composition

géologique et des précipitations sur le réseau hydrographique (Menani & Bennedjai, 2009) .

6. Coefficient de Torrentialité (C_t) :

Ce coefficient évalue le caractère torrentiel du réseau hydrographique. Il est calculé en multipliant la densité de drainage par la fréquence des cours d'eau d'ordre un dans le bassin (Menani & Bennedjai, 2009).

7. Rapport de Confluence (R_c) :

Le rapport de confluence, qui mesure la distribution des confluences entre les différents ordres de cours d'eau, est le quotient du nombre de cours d'eau d'un ordre donné par celui de l'ordre immédiatement supérieur.

8. Rapport des Longueurs (R_L) :

Ce rapport, défini comme le quotient de la longueur des cours d'eau d'un ordre par celle de l'ordre immédiatement inférieur, permet d'étudier la morphologie et l'évolution du réseau hydrographique.

VI.4.3.2 Temps de concentration (T_c) du bassin versant de l'Oued Deffa

Le temps de concentration est un paramètre essentiel dans l'analyse des crues. Il représente le temps nécessaire pour qu'une particule d'eau, partant du point le plus éloigné du bassin, atteigne l'exutoire. Ce calcul, basé sur la formule de Kirpich (1940) citée par Grimaldi et al (2012) est crucial pour comprendre la dynamique des crues et le comportement hydrologique du bassin.

La formule de Kirpich pour le temps de concentration est la suivante :

$$T_c = 0.0195 \times L^{0.77} \times S^{-0.385} \quad (11)$$

Où :

T_c : est le temps de concentration en minutes,

L : est la longueur de la rivière principale en mètres,

S : est la pente moyenne de la rivière principale en mètres par mètre.

Tableau VI-6: Paramètres morphométriques du bassin versant de l'oued Deffa

Bassin versant	Dd (km/km ²)	R _L	R _c	C _t	T _c
Oued Deffa	2. 58	1.76	1. 87	0. 57	2. 74

VI.5 Modélisation hydrologique, hydraulique et résultats

VI.5.1 Modélisation hydrologique de l'évènements

VI.5.1.1 Modèles hydrologiques utilisés dans l'étude

Dans cette étude, nous avons choisi d'implémenter deux modèles de simulation pluie-ruissellement : HECHMS, développé par l'armée américaine, et EBA4SUB, conçu par des chercheurs. En complément, nous avons également utilisé la méthode rationnelle, une approche classique pour estimer les débits de crue.

Le HECHMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) est un modèle hydrologique élaboré par le Hydrologic Engineering Center de l'armée américaine. Il vise à simuler le cycle hydrologique dans les bassins versants, en prenant en compte des données météorologiques, topographiques, et d'occupation des sols. Ce modèle permet une analyse détaillée et complète du comportement de l'eau dans le bassin étudié (Halwatura & Najim, 2013).

Le modèle EBA4SUB (Event-based approach for ungauged basins) représente une autre méthode significative pour la simulation pluie-ruissellement. Développé pour des petits bassins versants non jaugés, le modèle se base sur une approche événementielle, considérant les particularités hydrologiques uniques à chaque bassin versant. Il est spécialement utile pour estimer le ruissellement dans des situations où les données de jaugeage sont limitées ou inexistantes (Piscopia *et al.*, 2015).

Quant à la méthode rationnelle, elle continue d'être une approche classique, utilisée depuis longtemps pour le calcul des débits de crue. Fondée sur l'équation rationnelle, elle établit une relation entre le débit de crue, l'intensité des précipitations, la superficie du bassin versant et les coefficients de ruissellement. Cette méthode est particulièrement adaptée aux petites zones de drainage avec des périodes de retour courtes (Grimaldi & Petroselli, 2014).

L'utilisation combinée de ces modèles et méthodes a pour but d'obtenir une estimation précise et fiable du volume de ruissellement dans le bassin versant étudié, en tenant compte des spécificités et des limites de chaque approche.

VI.5.1.2 Description et application de chaque modèle

VI.5.1.2.1 Méthode rationnelle

La méthode rationnelle, largement décrite dans les règles de gestion des eaux pluviales, est couramment utilisée pour calculer le ruissellement (Cleveland et al. , 2011). Développée il y a plus de 125 ans, cette méthode est toujours pertinente pour estimer les taux et volumes de ruissellement issus de petites zones de drainage, telles que les parkings (Grimaldi & Petroselli, 2014). Elle se fonde sur une équation linéaire empirique pour calculer le débit de pointe du ruissellement, basée sur une période d'intensité de pluie uniforme, et suppose une couverture de surface et une topographie généralement uniforme.

L'équation rationnelle est une méthode simple et directe pour déterminer le débit de pointe dans un bassin versant. Elle est formulée comme suit :

$$Q = \frac{C_r \times I \times A}{360} \quad (12)$$

Où :

Q : est le débit de pointe en mètres cubes par seconde, C_r : représente le coefficient de ruissellement, I : est l'intensité des précipitations en millimètres par heure, et A : la surface du bassin versant en hectares.

Le coefficient de ruissellement, C_r , varie en fonction du type de sol et de la pente du bassin versant. Une estimation précise de ce coefficient nécessite la prise en compte de ces caractéristiques spécifiques du bassin versant. L'intensité des précipitations est généralement dérivée des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF), spécifiques à chaque région géographique. La durée retenue pour ces courbes correspond habituellement à la durée de concentration de la zone de drainage.

L'application de la méthode rationnelle permet d'estimer efficacement le débit de pointe du ruissellement d'un bassin versant, en considérant sa superficie, les caractéristiques du sol, la pente, ainsi que l'intensité des précipitations adaptées à la région concernée.

VI.5.1.2.2 Modèle HECHMS

Le modèle est spécialement adapté pour simuler le processus pluie-ruissellement dans des bassins versants dendritiques en tenant compte des variations spatiales des paramètres hydrologiques. Il est reconnu pour sa flexibilité et sa précision dans la simulation de divers types d'événements hydrologiques, ce qui le rend indispensable pour l'évaluation des risques d'inondation dans divers contextes (Knebl *et al.* , 2005). Il a été notamment utilisé pour modéliser le ruissellement dans des bassins versants non jauges (Zeleelew & Melesse, 2018), démontrant ainsi sa polyvalence.

Dans la présente étude focalisée sur le bassin versant d'Oued Deffa, la version 4.2 de HECHMS, complétée par l'extension Arcview (hecgeohms) est appliquée. Cette combinaison nous a permis de construire un modèle complexe comprenant à la fois des éléments du bassin et des aspects météorologiques. Le modèle intègre des données d'entrée variées, telles que les caractéristiques physiques et hydrologiques du bassin, ainsi que des spécifications de contrôle pour la gestion des simulations.

La simulation de l'excès de précipitations dans HECHMS est réalisée via la méthode du nombre de courbes (CN) développée par le Soil Conservation Service (SCS). Cette méthode est essentielle pour la conversion des précipitations en ruissellement, en tenant compte de la capacité d'absorption et de rétention du sol. Elle est exprimée par la formule (N. Wang & Xuefeng, 2023):

$$Pe = \frac{(P - 0,2 S)}{(P + 0.8S)} \quad (13)$$

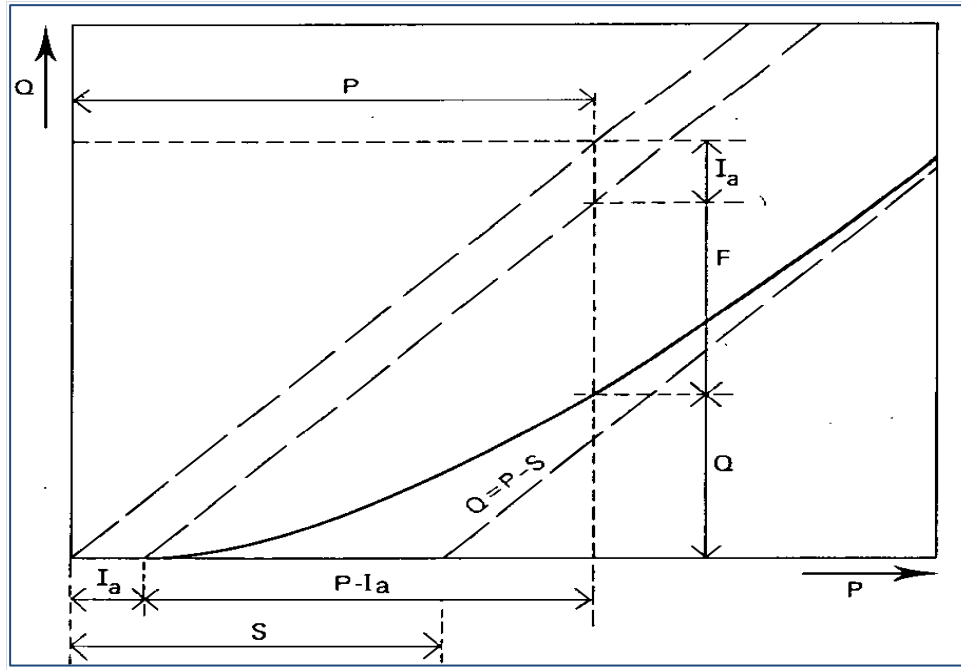


Figure VI-8 : Écoulement cumulé Q en fonction de la pluie cumulée P selon la méthode du nombre de courbe.

Où :

P_e : est l'excès de précipitation, P : représente la profondeur totale des précipitations, et S : est la rétention maximale potentielle. Cette rétention est transformée en un nombre de courbe CN , variant de 100 pour des zones totalement imperméables à 0 pour des zones hautement perméables :

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (14)$$

Cette approche, validée et adaptée dans plusieurs régions du monde, est fondamentale pour évaluer correctement le ruissellement en fonction des caractéristiques du bassin (US Army Corps of Engineers, 2016).

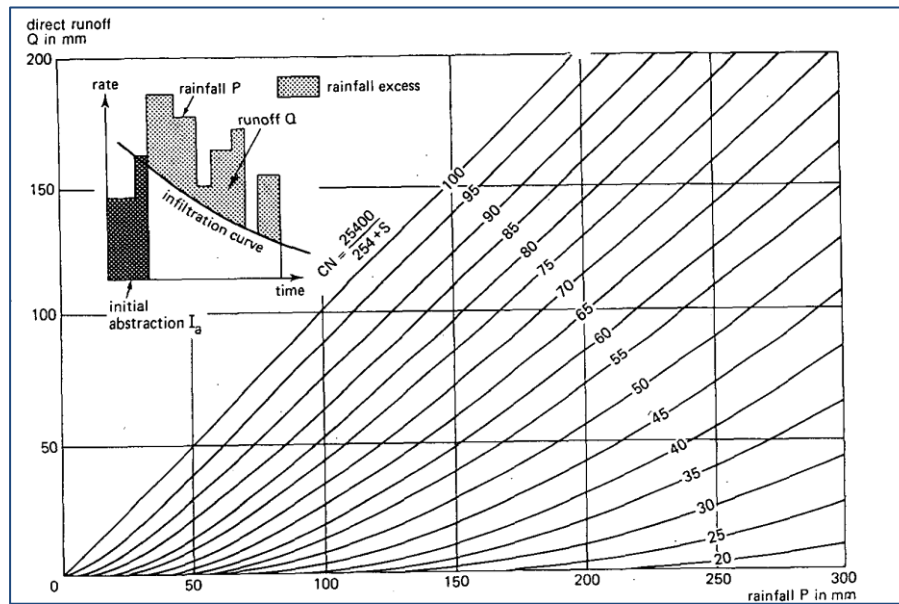


Figure VI-9 : Solution graphique de l'équation montrant la profondeur de l'écoulement Q en fonction de la profondeur de la pluie P et du nombre de courbe CN (d'après le Soil Conservation Service, 1972).

Pour l'estimation du ruissellement, HECHMS utilise également la méthode de l'hydrogramme unitaire SCS, centrée sur le paramètre du 'temps de latence' (T_{lag}). Ce temps, crucial pour la prédiction des pics de débit, est dérivé de la formule de Kirpich (Yi *et al.*, 2022):

$$T_{lag} = 0.6 \times T_c \quad (15)$$

$$T_c = 0.0195 \times L^{0.77} \times S^{-0.385} \quad (16)$$

Où

T_c : représente le temps de concentration, L : la longueur du cours d'eau principal, et S : sa pente moyenne.

Le modèle météorologique intégré à HECHMS génère des tempêtes synthétiques basées sur la méthode des tempêtes de fréquence, qui utilise des statistiques de précipitations pour modéliser des scénarios de pluie extrêmes (Chow *et al.*, 1988, Forsee & Ahmad, 2011, Willems & Vrac, 2011).

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

En somme, le processus de transformation pluie-débit dans HECHMS s'articule autour de l'interaction entre de divers modules, offrant ainsi une vue d'ensemble complète et précise du comportement hydrologique du bassin versant.

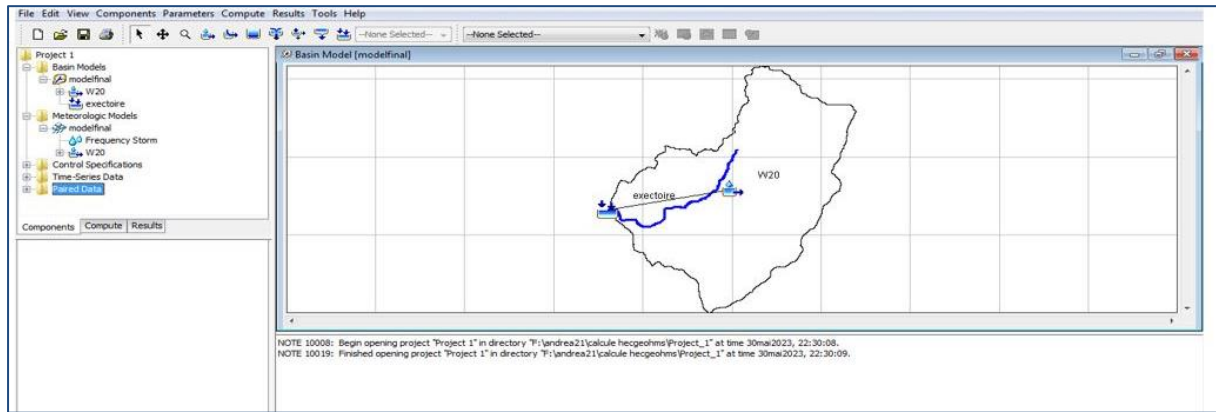


Figure VI-10 : Expérimentation du modèle HECHMS du bassin versant Oued Deffa

VI.5.1.2.3 Modèle EBA4SUB

Le modèle EBA4SUB, développé par Petroselli et al (2020) et Piscopia et al (2015), est un modèle conceptuel événementiel de ruissellement pluie-débit. Il comprend trois modules principaux :

1. Estimation des précipitations brutes.
2. Estimation des précipitations excédentaires.
3. Transformation des précipitations excédentaires en écoulement direct.

Dans le module des précipitations brutes, le EBA4SUB utilise des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) pour sélectionner la durée critique des précipitations et le modèle d'hyétographe de conception (avec des options telles que les modèles rectangulaire, triangulaire et de Chicago).

La durée critique des précipitations est définie par défaut comme étant égale au temps de concentration du bassin (T_c), calculée à partir des données du modèle numérique de terrain (MNT) du bassin, mais l'utilisateur peut la modifier si nécessaire (Houessou-dossou *et al.*, 2022).

Pour l'estimation des précipitations excédentaires, le modèle applique la méthode Numéro de Courbe pour Green-Ampt (CN4GA) (Grimaldi *et al.*, 2013). Cette méthode combine deux approches : la première est la méthode du numéro de courbe pour déterminer le temps d'accumulation d'eau et le volume des précipitations excédentaires. La deuxième approche

utilise le modèle d'infiltration de Green et Ampt (GA), pour modéliser l'infiltration et les précipitations excédentaires avec la résolution temporelle requise (Grimaldi & Petroselli, 2014).

Dans le modèle EBA4SUB, les approches du numéro de courbe et de GA sont mélangées en deux étapes. D'abord, la méthode du numéro de courbe est appliquée pour estimer le volume cumulé des précipitations excédentaires. Ensuite, le volume cumulé est distribué dans le temps selon l'équation de GA, avec une calibration automatique des paramètres.

Pour construire les données requises par EBA4SUB, les étapes suivantes sont recommandées (Houessou-dossou *et al.*, 2022).

Ouvrir EBA4SUB et accéder à Outils > Modèle par défaut. Définir le pas de discrétisation des hyétogrammes à 15 minutes et la zone seuil du réseau de drainage à 1 km².

1. Charger le MNT et la carte d'occupation des sols (DEM. ASCII et Land-cover. ASCII).
Ajuster les valeurs de CN et de T_c si nécessaire en modifiant AMC (Absorption Maximale) ou HSG (Groupe d'État Hydrique).
2. Importer les données pluviométriques estimé à partir des courbes IDF et choisir le type d'hyétographe (essayez rectangulaire ou Chicago) avec une position de pic de 0,5, ce qui signifie que le pic est au milieu de l'hyétographe brut.
3. Effectuer les calculs de débit et ajuster les paramètres selon les besoins.

Le modèle EBA4SUB fonctionne aussi bien avec des données DDF dans le mode de l'hydrogramme de conception, qu'avec des événements pluviométriques observés pour la modélisation pluie-débit.

Pour simuler la crue exceptionnelle du 1er octobre 2011, la préparation des données d'entrée s'est appuyée sur diverses méthodes de modélisation mentionnées précédemment. Ces modèles requièrent des données d'entrée spécifiques pour des prévisions précises et joueront un rôle crucial dans la simulation hydraulique ultérieure.

A titre d'exemple, la figure VI-11 illustre les résultats de l'application du modèle avec les données hydrologiques du bassin étudié.

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

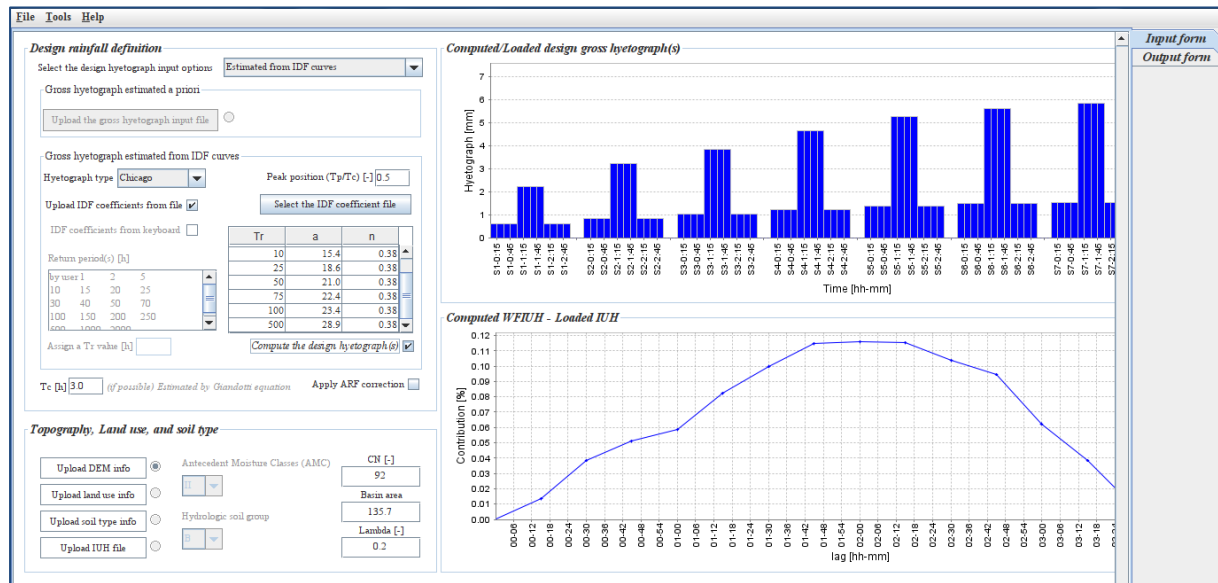


Figure VI-11 : Illustration des résultats du modèle EBA4SUB pour le bassin versant Oued Deffa

VI.5.1.2.4 Etablissement des courbes hauteur-durée-fréquence (IDF)

La réalisation de courbes Hauteur-Durée-Fréquence (IDF) est essentielle pour évaluer les précipitations et leur impact sur les zones urbaines et agricoles, jouant un rôle déterminant dans la planification de projets d'atténuation des inondations et la conception de systèmes d'assainissement. Ces courbes, qui estiment les valeurs maximales probables de précipitations pour différentes durées, sont fondamentales pour prévoir les débits de crue. En particulier, la durée de ces courbes est souvent calibrée en fonction du temps de concentration du bassin versant, comme souligné par (Musy & High, 1998).

Pour la région d'El-Bayadh, les courbes IDF spécifiques sont dérivées des données de la station pluviométrique d'El-Bayadh, fournissant des informations essentielles pour la modélisation hydrologique,

En l'absence d'équipements pour mesurer les écoulements de surface dans le bassin versant de l'Oued Deffa, l'utilisation de modèles empiriques pour estimer le ruissellement devient nécessaire. Ces méthodes s'appuient sur les caractéristiques physiographiques du bassin, telles que le temps de concentration, l'occupation du sol et la pluviométrie, détaillées dans les chapitres précédents. Par conséquent, il est impératif d'adopter une approche probabiliste pour analyser les distributions des événements pluvieux extrêmes, comme les précipitations

journalières maximales et les averses de courte durée, qui sont les principaux facteurs de risque d'inondation dans cette région (Deidda *et al.*, 2021).

VI.5.1.2.5 Données pluviométriques

Les données utilisées dans cette étude sont fournies par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH). Elles comprennent des relevés de précipitations maximales journalières sur une période de 41 ans, allant de 1971 à 2011. Elles correspondent aux informations qui proviennent de la station pluviométrique d'El-Bayadh, identifiée par le code 081202. La station est localisée aux coordonnées géographiques X (Km) 344, 8, Y (Km) 343, 8 et à une altitude de Z (m) 1310. L'analyse de ces données permet d'établir des courbes Hauteur-Durée-Fréquence (IDF) pour la région étudiée.

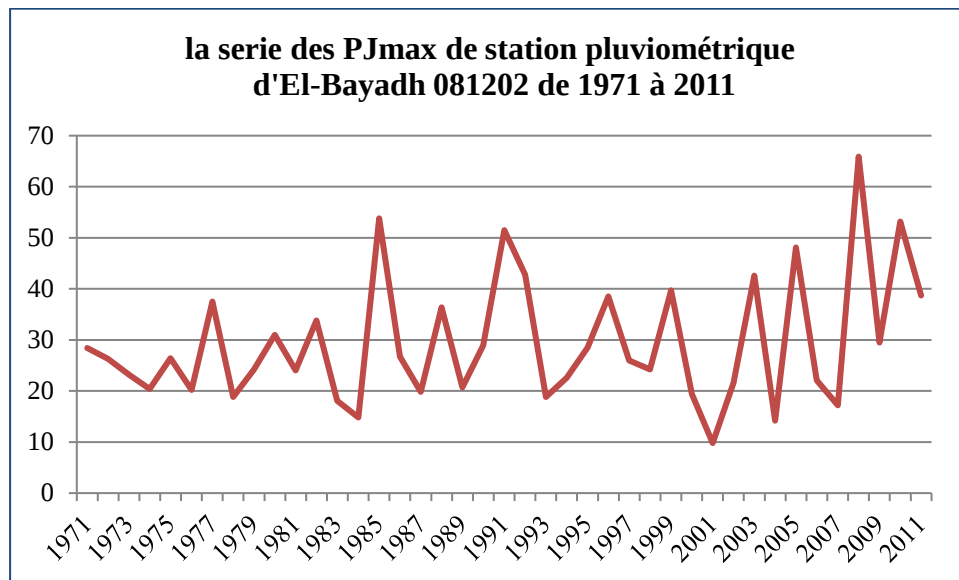


Figure VI-12 : Histogramme courbe des précipitations

VI.5.1.2.6 Choix de la loi d'ajustement

La sélection de la loi d'ajustement pour estimer les précipitations maximales probables est fondamentale. Les précipitations exprimées en intensités des précipitations conduisant à un débit. Il varie en fonction des types de tempêtes génératrices de précipitations extrêmes, et le climat ainsi que des facteurs tels que la taille du bassin, sa localisation, topographie.

Les méthodes d'estimation simples et rapides se basent souvent sur des approches empiriques et statistiques.

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

Dans le processus d'ajustement des données, la sélection d'une distribution de probabilités adéquate est basée sur les caractéristiques des données hydrologiques. Plusieurs distributions de probabilités sont utilisées en hydrologie, mais certaines, comme la distribution des valeurs extrêmes de type I ou de Gumbel, la distribution Log-Pearson de type III, et la distribution gamma incomplète, sont privilégiées pour leur adéquation avec divers types de données hydrologiques. Les précipitations maximales horaires ou journalières sont généralement bien modélisées par ces distribution (Anghel & Ilinca, 2022).

Dans le cadre de la présente étude, l'analyse des précipitations maximales journalières est effectuée en adoptant la distribution de Gumbel. Il s'agit d'un choix judicieux pour modéliser les événements extrêmes dans le domaine de l'hydrologie. La méthode des moments est employée pour ajuster les données, appuyée par l'utilisation du logiciel spécialisé Hyfran Plus. La distribution de Gumbel se caractérise par sa fonction de répartition

$$F(x) = e^{-e^{-y}} \quad (17)$$

Où

y Est une variable réduite définie comme $y = a(x - x_0)$. Où $1/a$ représenté la pente de la droite de Gumbel, et x_0 l'ordonnée à l'origine, tandis que x symbolise la valeur des précipitations maximales journalières.

La transformation des probabilités en variables réduites de Gumbel se fait via la relation

$$y = -\ln(-\ln(F(x))) \quad (18)$$

Les résultats de l'ajustement par la loi de Gumbel sont synthétisés dans le Tableau (VI-7), qui donne les périodes de retour, les variables réduites, les niveaux de précipitations, les probabilités associées, ainsi que les ajustements correctifs nécessaires.

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

Tableau VI-7: Les résultats d'ajustement obtenus par la loi de Gumbel

Période de retour année	Variable Réduit	Precip. (mm)	Prob. de Idée	Correction Intervalle fixe
	YT	XT' (mm)	F (XT)	XT (mm)
2	0.3665	26.1092	0.5000	29.5035
5	1.4999	37.4263	0.8000	42.2918
10	2.2504	44.9192	0.9000	50.7587
25	3.1985	54.3865	0.9600	61.4568
50	3.9019	61.4099	0.9800	69.3932
75	4.3108	65.4922	0.9867	74.0062
100	4.6001	68.3814	0.9900	77.2710
500	6.2136	84.4916	0.9980	95.4755

Le test d'homogénéité est effectué via le test d'adéquation du Khi-carré, avec les hypothèses suivantes :

1. H_0 : L'échantillon provient d'une loi Gumbel ;
2. H_1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi Gumbel.

Les résultats ont montré une statistique

$X^2=4.46$ avec une P-value de 0.4848, 5 degrés de liberté et 8 classes.

En conséquence, l'hypothèse nulle (H_0) est acceptable au niveau de signification de 5%, indiquant que la série pluviométrique s'ajuste bien à la loi de Gumbel. Cette conclusion est illustrée dans la Figure VI-13, représentant l'ajustement à la loi de Gumbel.

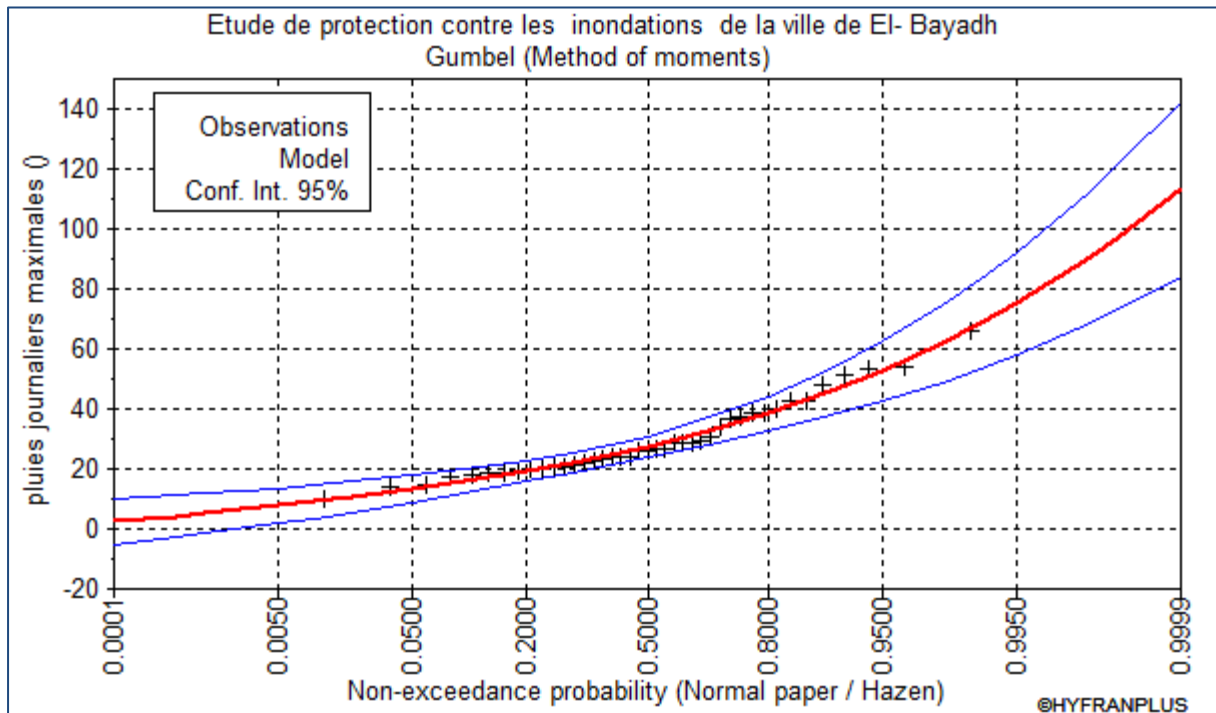


Figure VI-13 : Courbe d'ajustement obtenus par la loi de Gumbel

VI.5.1.2.7 Pluie de courte durée et intensités maximales à différentes fréquences

Pour estimer les précipitations exceptionnelles de courte durée (P_{ct}), inférieures à 24 heures, la relation de Montanari, comme énoncée par Mohymont & Demarée (2006), est utilisée. Elle relie ces précipitations à la pluie maximale journalière fréquentielle (P_{jmax}) selon la formule suivante :

$$P_{ct} = P_{jmax} \times \left(\frac{24}{t}\right)^b \quad (19)$$

Où :

P_{ct} : représente la pluie de courte durée, ayant la même fréquence que P_{jmax}

P_{jmax} : est la pluie maximale journalière pour différentes fréquences

t : est la durée en heures,

b est l'exposant climatique, calculé en fonction de divers paramètres (X, Y, Z, P_{jmax}) selon l'équation :

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

$$b = -0.00003X + 0.00094Y - 0.00009Z + 0.0024P_{j\max} - 0.03$$

Pour déterminer les intensités maximales pour différentes périodes de retour, la formule suivante est utilisée :

$$I = \frac{A \times T^b}{t^c} \quad (20)$$

Où :

c : Paramètres d'ajustement

A : Terme constant de régression

b : Coef. de régression

I : est l'intensité (mm/h),

T : est la période de retour (années),

t : est la durée de la pluie (min).

Enfin, nous avons l'équation d'intensité valide pour le bassin :

$$I = \frac{111.3719 \times T^{0.206917}}{t^{0.61639}}$$

Les résultats de cette relation pour la durée considérée sont illustrés dans le tableau VI-8. Les intensités maximales pour différentes fréquences et durées sont données.

Tableau VI-8: Tableau d'intensité- Durée-Période de retour de la station pluviométrique d'El-Bayadh durant une heure

Les Figures VI-14 et VI-15 montrant respectivement les courbes IDF et DDF correspondantes aux données de la station du bassin d'étude.

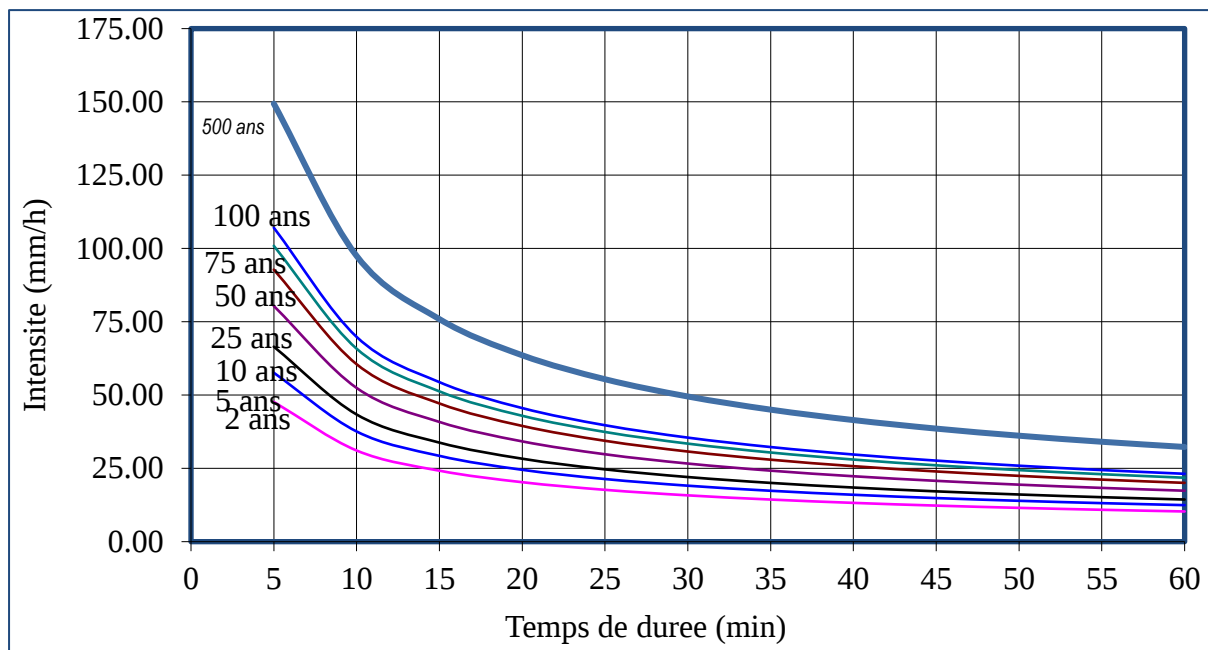


Figure VI-14 : Courbes Intensité- Durée- Fréquence (IDF) à la station d'El-Bayadh

Tableau d'intensité - Durée - Période de retour												
Fréquence Période de retour	Durée en minutes											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	47.67	31.09	24.22	20.28	17.68	15.80	14.37	13.23	12.30	11.53	10.87	10.30
5	57.62	37.59	29.27	24.52	21.37	19.10	17.36	15.99	14.87	13.94	13.14	12.46
10	66.51	43.38	33.79	28.30	24.66	22.04	20.04	18.46	17.17	16.09	15.17	14.38
25	80.39	52.44	40.84	34.21	29.81	26.64	24.23	22.31	20.75	19.45	18.34	17.38
50	92.79	60.53	47.14	39.48	34.41	30.75	27.96	25.75	23.95	22.44	21.16	20.06
75	100.91	65.82	51.27	42.94	37.42	33.44	30.41	28.01	26.05	24.41	23.02	21.81
100	107.10	69.86	54.41	45.57	39.71	35.49	32.28	29.73	27.64	25.91	24.43	23.15
500	149.42	97.47	75.91	63.58	55.41	49.52	45.03	41.47	38.57	36.14	34.08	32.30

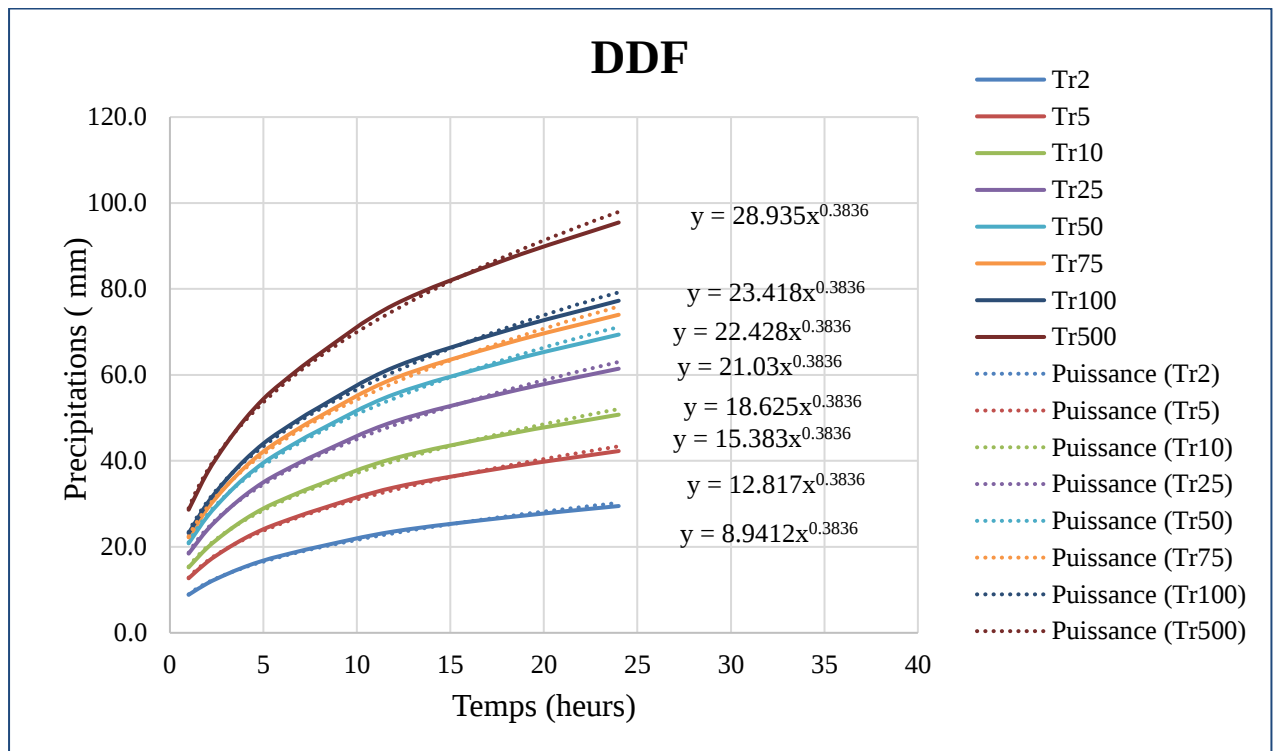


Figure VI-15 : Courbes Hauteurs - Durée - Fréquence (DDF) à la station d'El-Bayadh

VI.5.1.2.8 Concept du période de retour

Le concept de période de retour est particulièrement important en hydrologie des petits bassins versants. Dans ces derniers, les débits de pointe sont liés à l'intensité des précipitations et au temps de concentration, comme le montrent les courbes intensité-durée-fréquence. Dans les zones urbaines, pour la conception de mesures de protection contre les inondations telles que les digues et l'élargissement des canaux, les périodes de retour varient souvent entre 50 et 100 ans.

Pour simuler l'hydrogramme de crue de l'événement pluvieux du 01/10/2011, les résultats des Intensités-Durées-Fréquences (IDF) et (DDF) correspondant à une période de retour de 100 ans sont adoptés, Hafnaoui et al (2020). Cela permet d'évaluer les zones inondables et de concevoir des mesures de protection efficaces.

VI.5.1.2.9 Couverture terrestre et utilisation des terres

L'analyse de l'utilisation des terres et de la couverture terrestre est essentielle pour la modélisation hydrologique, particulièrement en ce qui concerne l'infiltration qui est un

processus influencé par la texture et l'utilisation du sol. La précision des données sur l'occupation des sols est importante pour une modélisation fiable.

Pour la cartographie de l'occupation des sols, des images satellites Landsat 8 avec une résolution spatiale de 30 m sont utilisées. Les images obtenues spécifiquement à partir des données Landsat L1TP, couvrent le bassin versant de l'Oued Deffa. La classification de l'utilisation des terres est effectuée via une méthode de classification d'image supervisée, utilisant des images haute résolution de Google Earth Pro comme référence. Ces images historiques, datant de la période de l'événement pluvieux du 01/10/2011, aident à sélectionner des échantillons d'apprentissage pour la classification des images satellites.

Google Earth Pro est choisi comme source d'images de référence en raison de sa fiabilité dans l'étude de l'impact du changement de couverture terrestre sur le débit de pointe des crues, Kabeja et al (2020). En référence à la classification CLC 2000 (Ribeiro *et al.*, 2007), la méthode de classification du maximum de vraisemblance (MLC) est appliquée pour affiner les résultats. Cinq classes de couverture terrestre sont identifiées dans cette classification, portant les codes 111, 212, 313, 321 et 332. La carte d'occupation des sols obtenue, illustre ces différentes classes, voir Figure (VI-16).

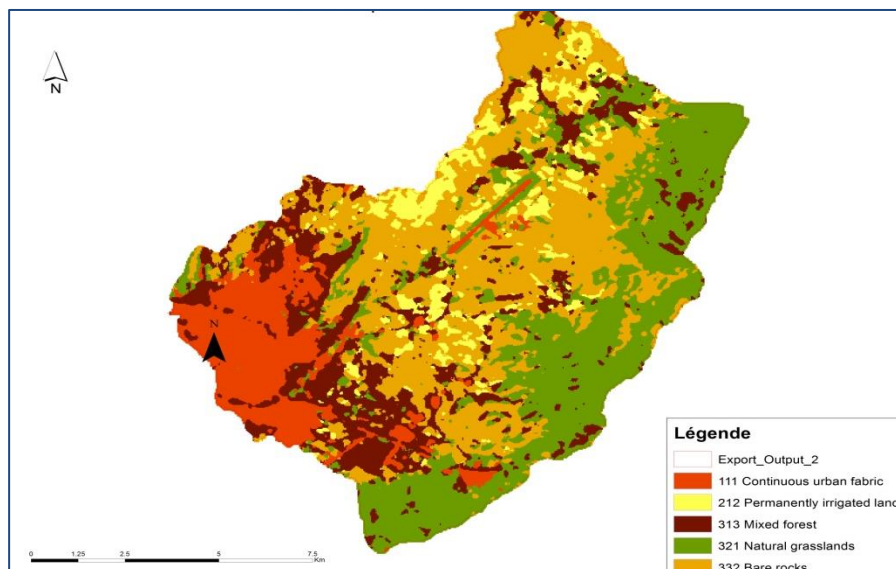


Figure VI-16 : Carte d'occupation de sol

VI.5.1.2.10 Coefficient de ruissellement et Numéro de Courbe

1. Le coefficient de ruissellement (C_r)

Le coefficient de ruissellement est un paramètre essentiel dans la méthode rationnelle pour calculer le débit de pointe du ruissellement dans un bassin versant. Il représente la proportion de l'intensité des précipitations qui se transforme en ruissellement. Le coefficient de ruissellement (C_r) est le rapport entre la hauteur de ruissellement et la précipitation totale pendant une averse. Principalement, ce coefficient dépend de l'intensité des pluies, de la nature des sols, de la pente, et du couvert végétal. Par conséquent, la valeur de C_r n'est pas constante ; elle peut varier sur un même site en fonction de la nature, du volume, et de l'intensité de la pluie, ainsi que des types de surfaces, Pazwash (2016).

Les valeurs de C_r sont calculées selon la formule suivante :

$$C_r = 0.8 \left[1 - \left(\frac{P_0}{P_{jmax}} \right) \right] \quad (21)$$

Où :

P_{jmax} est la précipitation quotidienne maximale pour une période de retour T.

$$P_0 = \sum P_{0i} \times A_i \quad (22)$$

Où :

P_{0i} : est la rétention initiale du couvert végétal i ;

A_i : est le pourcentage de la superficie de couverture végétale i.

Valeur de coefficient de ruissellement d'après Sogreah (sogreah p, 1996) voir Annexe.

Tableau VI-9 Valeur du coefficient de ruissellement pour la période de retour 100ans

Périodes	Fréquences	Coefficient de ruissellement
100	0.99	0.7

2. Le coefficient du nombre de courbe (Curve Number, CN)

Le coefficient du nombre de courbe est un paramètre sans dimension qui reflète la réactivité d'un bassin versant au ruissellement. Dans la méthode du nombre de courbe, le CN est influencé par plusieurs facteurs, notamment l'utilisation des terres, le traitement des terres, l'état hydrologique, le groupe hydrologique du sol, et l'humidité antérieure du sol.

Pour déterminer la valeur appropriée du CN, plusieurs approches sont disponibles. Des tableaux existent pour établir des correspondances entre le CN et des facteurs tels que l'utilisation des terres, la couverture végétale, le traitement des terres, l'état hydrologique, et le groupe hydrologique des sols. Ces éléments sont collectivement désignés sous le terme de complexe hydrologique sol-couverture, et la corrélation entre la valeur du CN et ces complexes est généralement établie pour des conditions moyennes d'humidité (classe II).

Il existe également des tableaux de conversion pour ajuster la valeur du CN en fonction des données de précipitations des 5 jours précédents, permettant de classer l'humidité antécédente en classe I ou III.

Ainsi, le CN est un élément clé pour évaluer la réponse d'un bassin versant au ruissellement, et sa détermination repose sur la corrélation entre divers facteurs pour des conditions hydrologiques variées.

La classe de condition d'humidité antérieure (AMC) du sol dans un bassin versant est un facteur déterminant dans la valeur finale du coefficient du nombre de courbe (CN) dans la méthode du Curve Number. Trois classes d'humidité antécédente sont distinguées (Dorji, 2018) :

1. **AMC I** : Les sols sont presque secs, avec une teneur en humidité au point de flétrissement.
2. **AMC II** : Condition moyenne d'humidité.
3. **AMC III** : Les sols sont presque saturés en raison des précipitations antérieures, atteignant la capacité au champ.

Ces classes sont établies sur la base des précipitations cumulées des cinq jours précédant l'écoulement. La méthode originale du Soil Conservation Service (SCS) distinguait entre la

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

saison dormante et la saison de croissance pour prendre en compte les variations d'évapotranspiration.

Tableau VI-10: Les limites saisonnières de précipitations pour les classes AMC (Soil conservation service de 1972)

Classe de condition d'humidité antécédente	Saison de dormance (mm)	Saison de croissance (mm)	Moyenne (mm)
I	< 13	< 36	< 23
II	13 – 28	36 – 53	23 – 40
III	> 28	> 53	> 40

La valeur du CN pour les conditions moyennes d'humidité (AMC II) est associée aux deux autres conditions typiques d'humidité initiale du sol (AMC I et AMC III) grâce à des relations empiriques énoncées par Chow et al. (1988):

$$CNI = 104.2 \times CNII - 0.058 \times CNII \quad (23)$$

$$CNIII = 1023 \times CNII + 0.13 \times CNI \quad (24)$$

Ces formules permettent de relier le CN sous différentes conditions d'humidité du sol, fournissant une estimation plus précise du ruissellement potentiel pour divers états du bassin versant.

Pour estimer la valeur du numéro de courbe (CN), la méthode du Service de Conservation des Sols (SCS) est appliquée. Cette méthode est reconnue pour caractériser les propriétés d'infiltration des sols selon leur occupation et leur texture.

En raison de restrictions budgétaires limitant la réalisation d'enquêtes détaillées pour acquérir des données précises sur les conditions réelles de l'événement d'inondation, une méthode alternative est adoptée.

Dans ce contexte et en raison de la similitude avec le bassin d'étude, les données du bassin hydrographique d'Ain Sefra sont choisies. Ces données ont déjà été calibrées et validées dans des études antérieures, Derdour & Bouanani (2019). Cette démarche vise à estimer les conditions lors de l'événement d'inondation dans notre bassin hydrographique, améliorant ainsi la précision des estimations et la compréhension des caractéristiques du sol et de leur impact sur le processus d'inondation.

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

En ce qui concerne l'humidité du sol au moment de l'événement d'inondation, les données pluviométriques fournies par l'Office National de la Météorologie d'El-Bayadh (Aéroport d'El-Bayadh), sont utilisées. Elles enregistrent des précipitations de plus de 60 mm sur une période de quatre jours consécutifs. Ces informations pluviométriques sont fondamentales pour évaluer l'humidité du sol au moment de l'inondation, offrant ainsi une meilleure perspective du processus hydrologique dans le bassin hydrographique d'étude.

Le tableau VI-11 présente les valeurs des coefficients CNII et CNIII pour des localités spécifiques (Ain Sefra et Oued Deffa) pour une période de retour de 100 ans.

Tableau VI-11: Valeur du numéro de courbe (CN).

Périodes	CNII (Ain Sefra)	CNIII (Oued Deffa)
100	82	92

VI.5.1.3 Résultats des simulations hydrologiques

Le Tableau (VI-12) regroupe les données essentielles à la simulation de la crue extrême survenue le 01/10/2011 dans le bassin versant de l'Oued Deffa et les résultats obtenus par l'application des modèles HECHMS, EBA4SUB et la méthode rationnelle. Chaque modèle a recours à des paramètres spécifiques et offre des perspectives uniques sur le comportement hydrologique du bassin, notamment en ce qui concerne l'estimation du débit de pointe, un élément clé pour l'analyse des crues.

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

Tableau VI-12: Resultats des simulations hydrologiques du bassin versant d'Oued deffa

Modèles	HECHMS		EBA4SUB		Rational
Paramètres					
Temps de concentration	2. 74		2. 74		2. 74
Tc (heur)					
Nombre de courbe CN et coefficient de ruissellement Cr	92		92		0. 70
	Fréquence tempête (mm)		Chicago		Intensité (mm/h)
	1 heur	23. 20	a	N	I _{tc}
	2 heures	30. 10	23. 4	0. 38	12. 50 mm/h
	3 heures	35. 50			
	6 heures	47. 10			
	12 heures	61. 80			
	1 jour	77. 30			
Résultats					
$Q_{max}[m^3.s^{-1}]$	310. 2		400. 21		330. 13

Les résultats des trois modèles hydrologiques utilisés pour le bassin versant de l'Oued Deffa son illustré par les hydrogrammes (voir figures VI-17 et VI-18). L'analyse de ces résultats révèle des différences notables dans les estimations du débit de pointe. Les points clés de cette analyse sont les suivants :

- 1. Modèles Comparés :** Les trois modèles considérés sont HECHMS, EBA4SUB et la Méthode Rationnelle.
- 2. Débit de Pointe :**
 - A. EBA4SUB** a généré le débit de pointe le plus élevé pour l'Oued Deffa.
 - B. La Méthode Rationnelle** a fourni des estimations de débit de pointe légèrement inférieures à celles d'EBA4SUB.
 - C. HEC-HMS** a produit le débit de pointe le plus bas, avec un écart de 22 % par rapport au plus élevé.

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

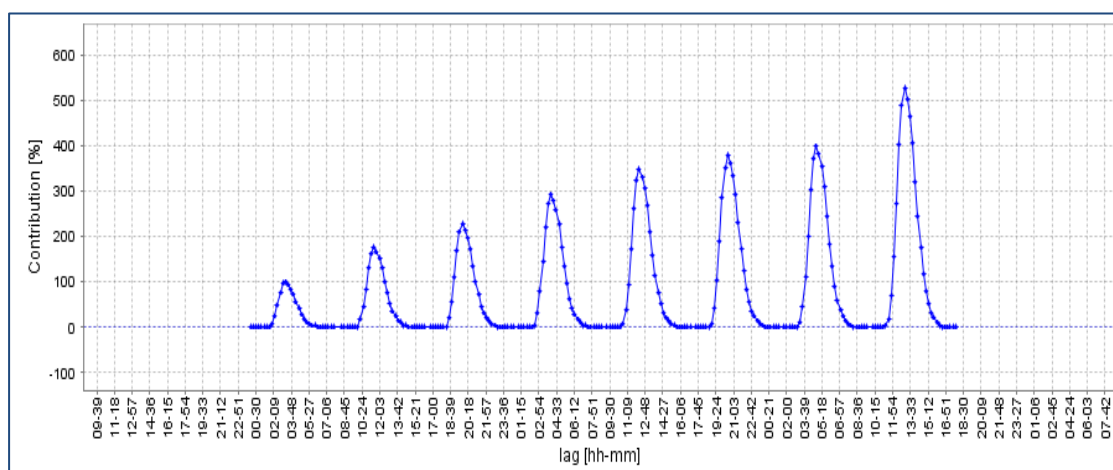


Figure VI-17 : Résultat hydrogramme de crues pour les différents périodes de retour du modelé EBA4SUB

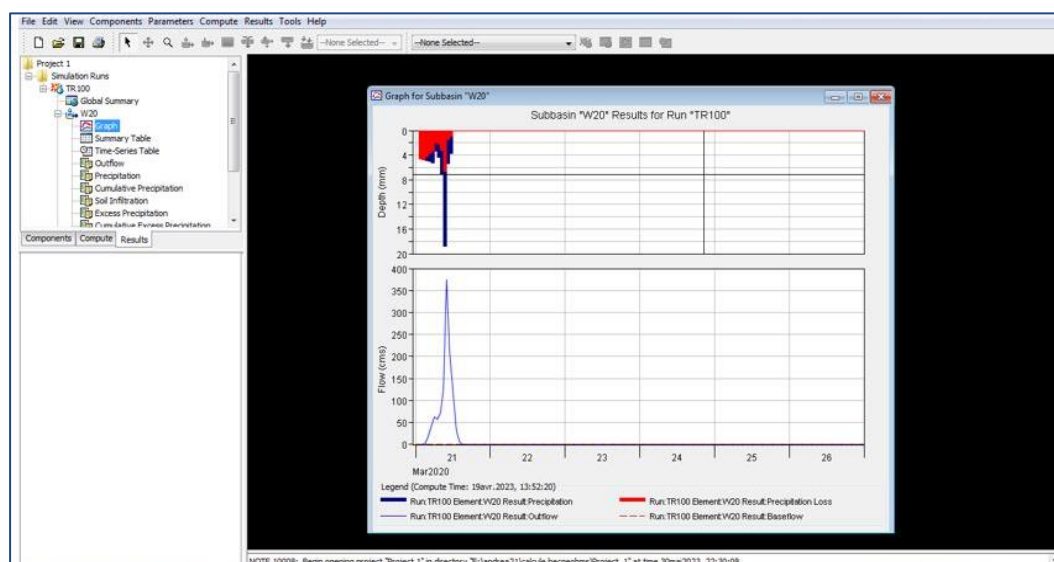


Figure VI-18 : Résultat hydrogramme de crue pour la période de retour 100 ans du modèle HECHMS

3. Analyse des hydrogrammes : Les hydrogrammes montrent des coefficients de propagation des ondes proches de 1, indiquant une similitude marquée entre les volumes des phases montante et descendante de l'hydrogramme.

4. Comparaison des hydrogrammes :

A. Le modèle EBA4SUB a tendance à surestimer le pic de débit pour les périodes de retour longues et à le sous-estimer pour les périodes plus courtes. Cette caractéristique peut être attribuée à l'utilisation de l'hyétographe de Chicago et à la valeur initiale d'abstraction dans l'approche SCS-CN. Cette observation est soutenue par les études de

Mlynski et al (2018), (Nardi et al (2018) et Petroselli & Grimaldi (2018), qui notent que l'EBA4SUB peut avoir cette tendance en raison des particularités de son approche de modélisation.

B. Selon Walega et al. (2020) , l'hyétographe de Chicago et l'approche SCS-CN réduisent l'excès dans les hyétogrammes de précipitation pour les périodes de faible rendement.

Les résultats de la simulation hydrologique sont intégrés dans deux modèles hydrauliques distincts. Cette démarche permettra non seulement de simuler divers scénarios d'inondation mais également d'évaluer la performance de chaque modèle dans la reproduction des conditions hydrologiques observées. La validation des résultats issus de ces simulations hydrauliques constituera une étape clé. En effet, à travers une comparaison rigoureuse entre les données simulées et les observations réelles, la précision et de la fiabilité de chaque modèle peut être ainsi jugée.

Le processus de validation est essentiel pour assurer que les modèles sélectionnés sont non seulement théoriquement solides mais également pratiquement efficaces dans la prédiction et la gestion des événements d'inondation. Ainsi, l'approche en matière de planification hydraulique et de gestion des risques d'inondation dans le bassin de l'Oued Deffa, peut être optimisée.

VI.5.2 Modélisation hydraulique de l'évènements

Pour analyser l'événement de crue éclair survenu dans le bassin versant de l'Oued Deffa le 1er octobre 2011, une approche de modélisation hydraulique utilisant deux modèles hydrodynamiques bidimensionnels, HEC-RAS 2D et FLO-2D, est adoptée. Ces modèles sont choisis pour leur capacité à simuler en détail les dynamiques d'inondation, notamment dans des situations complexes telles que celles observées dans l'Oued Deffa. L'objectif de cette modélisation est de reconstituer avec précision les conditions hydrologiques de l'époque en se basant sur des données historiques et des observations, afin de comprendre les mécanismes sous-jacents de la crue éclair.

HEC-RAS est particulièrement efficace pour simuler les flux fluviaux et leurs interactions avec les infrastructures, tandis que FLO-2D est optimal pour modéliser des inondations étendues et complexes en surface. L'emploi combiné de ces deux modèles permet de tirer parti de leurs forces respectives dans le domaine de la modélisation hydraulique (Francisco *et al.*, 2021).

L'un des objectifs clés de cette étude est de tester la performance de HEC-RAS 2D et FLO-2D dans l'élaboration de cartes d'inondation pour le bassin de l'Oued Deffa. Cette démarche vise à évaluer l'efficacité de ces modèles pour fournir des prévisions précises et fiables, essentielles pour la planification de mesures de prévention et d'intervention en cas de futures inondations.

VI.5.2.1 Modèle HEC-RAS

Le modèle HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), est un logiciel conçu pour la modélisation hydraulique des cours d'eau, développé par le Hydrologic Engineering Center, une division du U. S. Army Corps of Engineers. Lancé en 1995, HEC-RAS est créé pour répondre aux besoins en modélisation des flux fluviaux, des infrastructures liées aux cours d'eau, et des projets de gestion des ressources en eau.

Le logiciel s'est imposé comme un outil essentiel dans l'étude des dynamiques fluviales et la gestion des risques d'inondation. Sa capacité à simuler les écoulements en une dimension (1D) et en deux dimensions (2D) lui confère une grande polyvalence. Il est largement utilisé par les ingénieurs en hydraulique pour analyser les débits dans le lit des rivières, évaluer les risques d'inondation, et concevoir des structures telles que des ponts, des ponceaux, et des systèmes de déviation des cours d'eau (U. S. Army Corps of Engineers, 2010).

L'adoption généralisée de HEC-RAS par des organismes gouvernementaux, des institutions académiques, et des entreprises privées à travers le monde témoigne de sa fiabilité et de son efficacité. Son rôle dans la modélisation des conditions d'écoulement et dans l'élaboration de stratégies de gestion des risques d'inondation est crucial, surtout dans le contexte des changements climatiques et de l'augmentation des événements météorologiques extrêmes. (Teng *et al.* , 2017).

VI.5.2.1.1 Caractéristiques techniques de HEC-RAS

HEC-RAS est un logiciel avancé conçu pour modéliser les écoulements des cours d'eau, utilisant des approches en une dimension (1D) et deux dimensions (2D). Cette flexibilité le rend adapté à divers types d'écoulements et répond aux exigences spécifiques des projets d'ingénierie hydraulique.

1. **Écoulement permanent** : Pour simuler les conditions stables et uniformes d'écoulement, HEC-RAS utilise le principe de conservation de l'énergie, complété par les équations de pertes de charge basées sur la méthode de Manning. Cette méthode est

particulièrement efficace pour analyser des situations où le débit reste constant sur la durée, comme dans le cas des canaux régulés ou des rivières à débit uniforme (Díaz, 2005, U. S. Army Corps of Engineers, 2010).

2. **Écoulement non-permanent** : Dans les scénarios où l'écoulement varie avec le temps, comme lors d'inondations ou de crues éclair, HEC-RAS utilise les équations de Saint-Venant. Ces équations, traitées par une méthode de volume fini, permettent de modéliser des régimes d'écoulement transitoires et variables, capturant les variations de débit et les changements rapides des conditions de l'écoulement (Teng et al. , 2017).

VI.5.2.2 Modélisation 2D dans HEC-RAS

VI.5.2.2.1 Équations de Saint-Venant 2D

La modélisation 2D de HEC-RAS utilise une approche basée sur les équations de Saint-Venant en deux dimensions. Ces équations sont résolues par un algorithme implicite de volume fini, offrant une plus grande stabilité et robustesse comparativement aux méthodes traditionnelles comme les différences finies. Cette approche permet des pas de temps plus grands, rendant le modèle plus efficace pour des simulations complexes (U. S. Army Corps of Engineers, 2010).

1. **Flexibilité des régimes d'écoulement** : L'algorithme est capable de résoudre des écoulements sous-critiques, supercritiques, et mixtes, offrant une flexibilité accrue dans la modélisation.
2. **Propriétés de stabilité et efficacité** : Les équations 2D de diffusion des ondes, utilisées dans cette approche, permettent une exécution plus rapide et une stabilité améliorée, assurant ainsi une précision satisfaisante même dans des conditions de simulation complexes.

VI.5.2.3 . Avantages et limitations de HEC-RAS

a) Avantages :

1. **Polyvalence** : HEC-RAS est capable de modéliser à la fois en 1D et 2D, ce qui le rend adapté à une large gamme de scénarios hydrauliques.
2. **Précision** : Le logiciel offre une représentation précise des ouvrages hydrauliques et du lit mineur, préservant l'exactitude des relevés topographiques.

3. Soutien et Validation : Soutenu par le U. S. Army Corps of Engineers, HEC-RAS bénéficie d'améliorations continues et est validé par de nombreux organismes gouvernementaux et entreprises privées.

4. Documentation Complète : L'accès au téléchargement direct de HEC-RAS est accompagné d'une documentation détaillée, facilitant son utilisation et sa compréhension (US Army Corps of Engineers, 2016).

b) Limitations :

1. Sensibilité aux Instabilités Numériques : Dans certaines situations, HEC-RAS peut être sujet à des instabilités, affectant la précision des résultats.

2. Exigences de Topographie Précise : Le logiciel nécessite une topographie détaillée pour des résultats fiables, ce qui peut impliquer l'usage de technologies avancées de relevé telles que le LIDAR.

3. Complexité de Calcul : HEC-RAS peut exiger des ressources informatiques importantes, surtout pour les modèles 2D avec des maillages fins.

4. Limitations en 2D : Certaines fonctionnalités présentes en 1D, comme la modélisation du transport de sédiments, ne sont pas encore pleinement développées en 2D (US Army Corps of Engineers, 2016) .

VI.5.2.4 Méthodologie de construction d'un modèle de simulation HEC-RAS 2D

Le logiciel HEC-RAS 2D nécessite une série de données spécifiques pour modéliser efficacement les écoulements hydrauliques. Ces données se classent en trois catégories principales :

1. Données topographiques

A. Description physique : Les données topographiques offrent une description détaillée de la zone modélisée. Elles impliquent l'importation d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) qui représente les élévations du sol et autres caractéristiques topographiques.

B. Importance pour la géométrie de l'écoulement : Ces données sont fondamentales pour définir la géométrie de la zone d'écoulement bidimensionnel, car elles déterminent les contours physiques et les obstacles que l'eau peut rencontrer.

2. Données géométriques

A. Création de la zone d'écoulement :

Les données géométriques servent à établir la zone d'écoulement bidimensionnel. Elles comprennent l'utilisation du MNT pour délimiter la géométrie de cette zone.

B. Maillage et rugosité :

La création d'un maillage divise la zone d'écoulement en éléments finis pour une meilleure précision. L'identification des coefficients de rugosité, souvent réalisée en important une carte d'occupation des sols, aide à simuler l'interaction de l'eau avec le terrain.

C. Conditions aux limites :

Les lignes de conditions aux limites sont tracées pour définir les paramètres de l'écoulement bidimensionnel aux frontières de la zone modélisée.

3. Données Hydrauliques

A. Définition de l'écoulement :

Ces données comprennent les débits, qui représentent les hydrogrammes entrant dans le système, et les conditions aux limites, qui définissent le comportement de l'écoulement aux frontières de la zone modélisée.

B. Spécification du régime d'écoulement :

Il est également nécessaire de spécifier le régime d'écoulement, qu'il soit sous-critique, supercritique, ou autre, pour que le modèle puisse simuler correctement les dynamiques d'écoulement.

En conclusion, pour utiliser HEC-RAS 2D de manière efficace, il est essentiel de rassembler des données topographiques, géométriques et hydrauliques complètes et précises. Ces données permettent de caractériser avec précision la zone modélisée, de définir la géométrie et les conditions de l'écoulement, et de créer un maillage adapté pour une modélisation hydraulique détaillée et fiable.

VI.5.2.5 Modèle FLO-2D

Conçu en 1988 au Colorado, le FLO-2D est un modèle innovant de routage des inondations en deux dimensions qui fusionne des aspects hydrologiques et hydrauliques. Sa conception originale visait à offrir une solution plus complète pour la simulation et la gestion des inondations, en combinant un modèle pluie-débit avec un modèle d'écoulement de surface. Cette combinaison permet de simuler avec précision le mouvement du volume d'inondation à travers une grille, où l'écoulement vers les canaux est géré par l'équation d'onde de Saint-Venant en une dimension.

Le FLO-2D se distingue par sa polyvalence. Il est applicable dans divers contextes tels que les études de mitigation des inondations, la modélisation des réseaux d'assainissement pluvial, l'analyse de rupture de barrage, ainsi que dans l'étude des interactions complexes entre les eaux de surface et souterraines, les coulées de boue et le transport des sédiments, (O'Brien *et al.* , 1994).

Les caractéristiques clés du modèle incluent une Interface Utilisateur Graphique (GUI) intuitive, un Système de Développement de Grille (GDS) pour une gestion précise des données spatiales, et un outil MAPPER++ pour la visualisation et la création de cartes détaillées des risques et dangers liés aux inondations. Ces outils rendent FLO-2D particulièrement efficace dans le traitement de différents types de données topographiques et sa capacité à se coupler avec le logiciel tiers EPA-SWMM, élargit encore ses fonctionnalités.

A notre connaissance, le modèle FLO-2D est tester pour la première fois en Algérie dans le cadre de la présente étude. Cette démarche permet d'apporter une nouvelle dimension à l'analyse et à la gestion des risques d'inondation dans notre pays. En effet, ce test pourrait notamment se concentrer sur des zones spécifiquement vulnérables aux inondations en Algérie, offrant ainsi des perspectives précieuses pour le développement de stratégies de mitigation et de préparation aux inondations adaptées aux défis locaux.

VI.5.2.5.1 Algorithme de solution du logiciel FLO-2D

Dans le cadre du modèle FLO-2D de routage des inondations, l'algorithme traite les écoulements dans les cours d'eau via des équations de Saint-Venant en une dimension (1D), tandis que les écoulements dans les plaines inondables sont simulés à l'aide d'une approche quasi bidimensionnelle (2D) basée sur une grille à différences finies. L'algorithme explicite

des différences finies est appliqué pour résoudre l'équation de la quantité de mouvement, permettant de déterminer la vitesse d'écoulement à travers les frontières des éléments de la grille. Cette approche considère huit directions d'écoulement possibles, traitant chaque élément de la grille individuellement. (Keum *et al.* , 2022)

Deux équations principales sont utilisées dans ce processus :

1. **Équation de la quantité de mouvement en onde diffusive** : Elle sert de base pour le calcul initial de la vitesse d'écoulement.
2. **Équation de la quantité de mouvement en onde dynamique complète** : Si cette équation est utilisée, la vitesse calculée en onde diffusive est prise comme première approximation. La méthode de Newton-Raphson est ensuite employée pour affiner la solution, prenant en compte les différentes composantes telles que la pression, la friction, et l'accélération (convective et locale) à chaque pas de temps.

Les étapes de l'algorithme de solution intègrent différentes étapes O'Brien et al. (1994). Le tableau fournit une vue d'ensemble structurée des différentes étapes de l'algorithme décrivent selon O'Brien.

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

Tableau VI-13: Étapes de l'algorithme selon O'Brien et al. (1994)

Étape	Description
Calcul de la géométrie du Flux	Détermination de la géométrie moyenne du flux, de la rugosité et de la pente entre deux éléments de la grille.
Estimation de la profondeur du flux	Utilisation d'une estimation linéaire pour prédire la profondeur du flux au pas de temps suivant, basée sur les données du pas de temps précédent.
Première estimation de la vitesse	Calculée à l'aide de l'équation de l'onde diffusive, où la vitesse du flux est la variable inconnue.
Solution de Newton-Raphson	Utilisée pour résoudre l'équation de l'onde dynamique complète à partir de la vitesse diffusive prédite.
Calcul du Débit Q	Multiplication de la vitesse par la section transversale du flux. Pour les flux de surface, ajustement par les facteurs de réduction de largeur (WRF).
Addition des Débits Incrémentiels	Calcul du changement de volume en sommant les débits à travers les huit limites de la grille ou des éléments de canal, pour déterminer une augmentation incrémentielle de la profondeur du flux.

VI.5.2.5.2 Avantages et inconvénients de l'utilisation du modèle FLO-2D

A. Avantages :

1. Capacités de modélisation complètes : Le FLO-2D intègre l'hydrologie et l'hydraulique, permettant la simulation de divers scénarios d'inondation et l'analyse d'aspects variés tels que la mitigation des inondations, la modélisation des réseaux d'assainissement pluvial, l'analyse de rupture de barrage, et le transport des sédiments.
2. Intégration de données géospatiales : Capable de traiter des données géospatiales diversifiées, incluant LIDAR, images aériennes, fichiers Shape, cartes de contours et modèles numériques de terrain (MNT), le FLO-2D offre une représentation précise du relief et des plaines inondables.

3. Interface conviviale : Avec une interface utilisateur graphique intuitive, le FLO-2D facilite le traitement des données de la grille, la définition des structures hydrauliques, et la visualisation des résultats, réduisant ainsi la courbe d'apprentissage.
4. Couplage avec d'autres logiciels : Sa capacité à s'intégrer avec des logiciels comme SWMM et MODFLOW augmente son utilité et sa polyvalence dans diverses applications de gestion de l'eau.
5. Modélisation des surcotes et tsunamis : Le modèle est également capable de simuler les impacts des surcotes et des tsunamis, ce qui est essentiel pour les zones côtières et les régions à risque de tsunamis.

B. Inconvénients :

1. Complexité de la modélisation : La nature bidimensionnelle et la combinaison de l'hydrologie et de l'hydraulique peuvent rendre l'utilisation de FLO-2D complexe, notamment pour les utilisateurs novices.
2. Besoin de données précises : Des résultats précis nécessitent des données géospatiales détaillées, telles qu'un modèle numérique de terrain exact et des informations complètes sur les structures hydrauliques, ce qui peut être coûteux ou difficile à acquérir.
3. Limitations des modèles 1D et 2D : FLO-2D, malgré ses capacités, ne peut pas toujours capturer tous les détails et interactions complexes des systèmes hydrologiques réels, pouvant ainsi simplifier ou négliger certaines caractéristiques spécifiques.

Il est important de considérer ces avantages et inconvénients pour déterminer l'adéquation du modèle FLO-2D aux besoins spécifiques de modélisation et aux ressources disponibles.

VI.5.2.6 Préparation des données d'entrée pour la modélisation hydraulique

VI.5.2.6.1 Les données topographiques (création du MNT)

Dans les zones urbaines et suburbaines, il est primordial d'obtenir une résolution adéquate du modèle numérique d'élévation (MNT) afin d'assurer la fiabilité des résultats de modélisation et de cartographie des inondations. De plus, il est crucial que la topographie représentée soit

chronologiquement proche de l'événement d'inondation étudié (P. D. Bates & De Roo, 2000). Bien que le niveau du lit puisse différer entre le pic d'écoulement et le niveau avant la crue, les relevés topographiques réalisés après l'événement contribuent à améliorer la précision des calculs de modélisation (Macchione *et al.* , 2019) .

Pour ce faire, un relevé topographique détaillé est effectué immédiatement après l'événement par HYBACO, comme mentionné dans le chapitre précédent. Ce relevé a couvert les éléments suivants :

1. Le lit et les rives du cours d'eau sur une longueur de 7 640 mètres ;
2. Six ponts situés dans le chenal principal, ainsi que deux passerelles ;
3. La zone inondée sur une largeur de 150 mètres.

À l'aide du logiciel COVADIS, un modèle numérique d'élévation est créé en utilisant la méthode de Delaunay, qui permet de calculer et de dessiner automatiquement le modèle numérique de terrain. Cette méthode se base sur les points et les lignes de rupture obtenus grâce au relevé topographique détaillé. Le modèle numérique d'élévation (projection UTM WGS 84 zone 31), obtenu est utilisé pour représenter les zones inondées en 2011, qui, rappelons-le, n'ont pas été sensiblement modifiées au fil du temps et dont les relevés topographiques sont actualisés récemment (novembre 2020) et appliqués dans la présente étude.

Le résultat obtenu est un modèle numérique de terrain qui reflète avec fidélité l'état du terrain, offrant une précision satisfaisante tant au niveau planimétrique qu'altimétrique. Chaque pixel, mesurant 50 × 50 cm, représente la moyenne des altitudes à l'intérieur de sa zone respective.

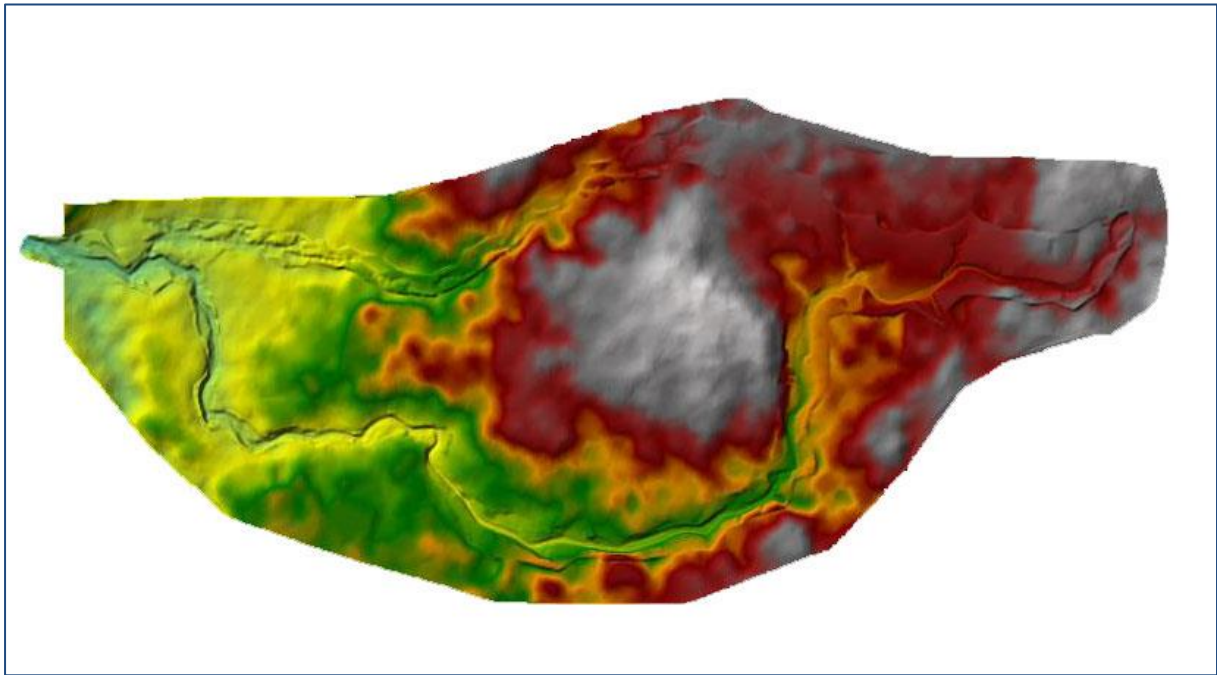


Figure VI-19 : MNT de la surface utilisée dans la modélisation hydraulique 2D

VI.5.2.6.2 Données d'entrée hydrologiques

Les deux modèles hydrauliques utilisés dans cette étude, décrits ci-dessous, sont appliqués dans un routage à l'état instationnaire :

Tout d'abord, l'hydrogramme de crue résultante de la méthode rationnelle est utilisé, suivi de l'hydrogramme résultant du modèle HEC-HMS.

En suite l'hydrogramme de crue résultante du modèle EBA4SUB.

Ces différentes approches permettent de déterminer un total de six zones inondées qui ont ensuite été comparées à l'observation réelle.

Comme cela est spécifié précédemment, les hydrogrammes de dimensionnement sont estimés pour un temps de retour de 100 ans et en supposant une condition de teneur en humidité du sol élevée (AMC III).

VI.5.2.6.3 Coefficient de rugosité

Dans les applications hydrauliques, le coefficient de rugosité est considéré comme l'un des paramètres critiques, jouant un rôle important dans la détermination de l'étendue des inondations. Plusieurs approches méthodologiques sont proposées pour estimer ce coefficient (Liu *et al.* , 2019). Dans cette étude, l'approche de calcul du coefficient de rugosité repose sur

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

l'utilisation de données combinées du coefficient de rugosité et de l'occupation du sol CORINE (Dimitriadis *et al.* , 2016, Manfreda *et al.* , 2018, George Papaioannou *et al.* , 2019).

Pour la présente étude, les valeurs considérées pour le coefficient de rugosité sont présentées dans le tableau.

Tableau VI-14: Coefficient de rugosité de Manning (n) de la zone d'étude base sur les données d'occupation du sol CORINE (Manfreda *et al.* , 2018)

Etiquette	Désignation	Coefficient de Manning (n)
1. 1. 1	Tissu urbain continu	0. 013
2. 1. 2	Terres irriguées de façon permanente	0. 03
3. 1. 3	Forêt mixte	0. 10
3. 2. 1	Prairies naturelles	0. 04
3. 3. 2	Affleurements rocheux	0. 035

VI.5.2.6.4 Construction du modèle HECRAS 2D de l'étude

Pour simuler l'étendue et la profondeur d'inondation de l'événement pluvieux du 01/10/2011 dans la zone urbaine de la ville d'El-Bayadh, le logiciel (HEC-RAS 5. 0. 7) est utilisé dans cette étude. La configuration du modèle HEC-RAS 2D est établie comme suit :

1. Pour représenter avec précision des zones urbaines et des ponts, l'espacement moyen des points de calcul du maillage flexible est de 5 m ;
2. La représentation précise des six ponts dans le chenal principal a l'aide des combinaisons de ponceaux ;
3. Les lignes de fracture qui représentent le cours d'eau principal et les ponts sont utilisées pour générer des cellules qui s'alignent avec les lignes de fracture ;
4. Une solution d'onde de diffusion 2D est utilisée pour la simulation ;
5. L'intervalle du temps de calcul est fixé à cinq (5) secondes.

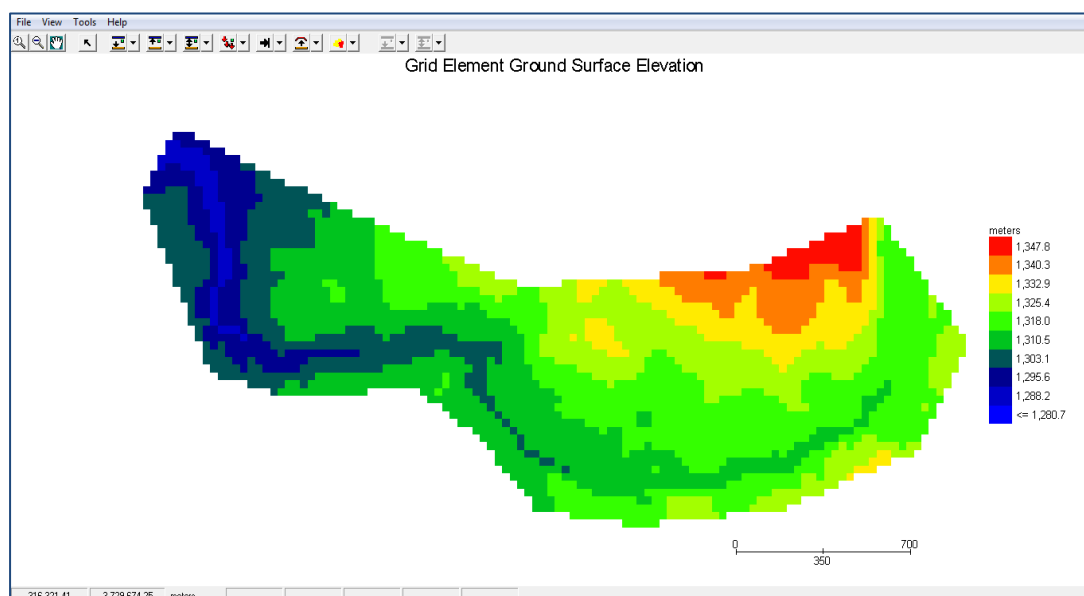


Figure VI-21 : Simulation de l'événement d'inondation 01/10/2011 à l'aide logiciel FLO2D.

VI.5.2.6 Résultats de simulation des zones inondées

La figure (VI-22) offre un aperçu des niveaux d'eau et des étendues inondées lors de l'événement du 1er octobre 2011, tels que simulés par les modèles HEC-RAS 2D et FLO-2D. Pour ces simulations, trois types d'hydrogrammes sont utilisés : l'hydrogramme EBA4SUB, celui généré par la formule rationnelle, et l'hydrogramme issu du modèle HEC-HMS.

La figure se divise en six sections distinctes, chacune démontrant les résultats obtenus à partir d'une combinaison spécifique de modèle hydraulique et d'hydrogramme. Les détails sont les suivants :

1. Sous-figure A : Cette partie montre les résultats obtenus avec HEC-RAS 2D en utilisant l'hydrogramme EBA4SUB.
2. Sous-figure B : Elle donne les détails les résultats de HEC-RAS 2D couplé à l'hydrogramme HEC-HMS.
3. Sous-figure C : Elle illustre des résultats avec HEC-RAS 2D en appliquant la Formule Rationnelle.
4. Sous-figure D : Cette partie de figure présente les résultats de FLO-2D avec l'hydrogramme EBA4SUB.

5. Sous-figure E : Elle expose les résultats de FLO-2D en combinaison avec l'hydrogramme HEC-HMS.
6. Sous-figure F : la dernière partie affiche les résultats de FLO-2D en utilisant la Formule Rationnelle.

L'ensemble des sections permet une comparaison directe entre les différentes approches de modélisation, mettant en évidence leur capacité à prédire la profondeur et l'étendue des inondations, tout en les comparant aux observations réelles réalisées par l'ASAL et aux données VGI.

Il est à noter que la fidélité de la simulation des effets de l'événement dépend étroitement de la qualité du MNT (Modèle Numérique de Terrain), particulièrement en milieu urbain, comme le soulignent George Papaioannou et al. (2013).

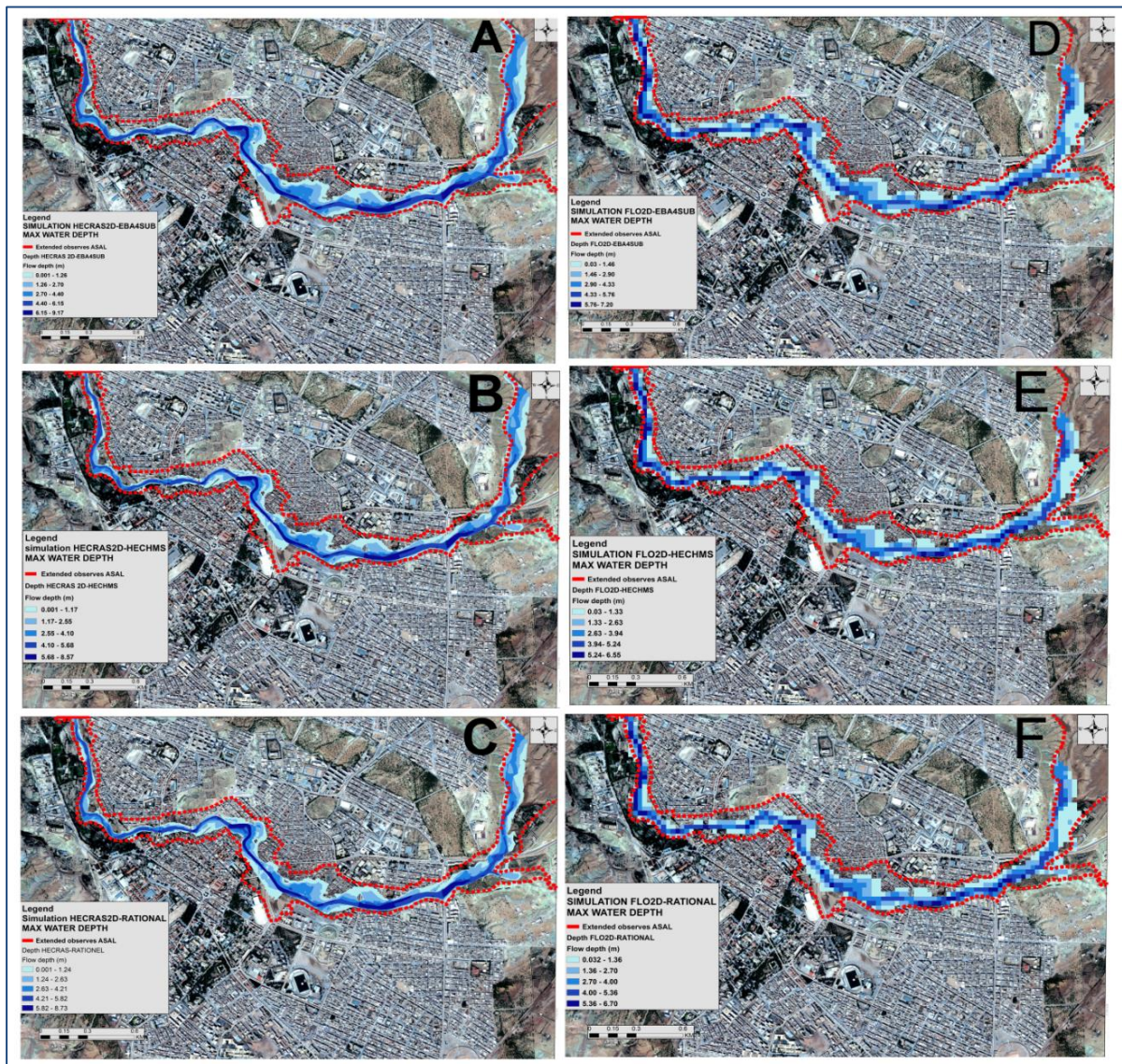


Figure VI-22 : Résultats spécifiques obtenus avec chaque combinaison de modèle hydraulique et d'hydrogramme. (A, B, C, D, E, F).

L'analyse qualitative des résultats de modélisation hydraulique révèle des différences notables entre les cartes produites par les modèles HECRAS 2D et FLO2D. Malgré ces divergences, les simulations des zones inondables réalisées par chaque modèle présentent de légères variations selon les trois hydrogrammes utilisés. Il est également intéressant de noter une similarité frappante entre les cartes générées par chaque modèle hydraulique lors de l'utilisation de l'hydrogramme de la formule rationnelle et du modèle HECHMS.

VI.5.2.6.7 Evaluation des approches de simulation

A. Zones inondées.

Pour une évaluation quantitative, le tableau VI-15 fournit un comparatif des superficies des zones à risque d'inondation dans la zone étudiée. Cette approche permet d'apprécier les différences et les similarités entre les modèles de manière plus concrète, en se basant sur des données mesurables et comparables. Pour une analyse complète des performances de chaque modèle ; le tableau est essentiel car il permet de déterminer l'approche de simulation la plus appropriée dans le contexte de la zone étudiée.

En absence des données hydrométriques, le recours aux données VGI de l'événement extrême du 1er octobre 2011 à Oued Deffa (El-Bayadh), devient nécessaire. Dans ce contexte l'étendue de l'inondation résultant de la crue du 01/10/2011, obtenue à partir des relevés post-inondation de l'Agence Spatiale Algérienne (ASAL), est utilisée comme repère de référence. Cette inondation a couvert une superficie de 79 hectares voire Figure (VI- 3).

La comparaison des résultats du tableau VI-15 montre notamment que les superficies des zones inondables calculées par le modèle FLO-2D surpassent celles produites par le modèle HEC-RAS. La différence relative entre les valeurs extrêmes des deux approches de modélisation, FLO-2D-EBA4SUB et HEC-RAS 2D-HEC-HMS, est d'environ 35, 06 %. La plus grande zone inondable, couvrant une superficie totale de 67, 21 hectares, est obtenue avec l'approche FLO-2D-EBA4SUB. À l'inverse, la plus petite zone inondable, correspondant à 43, 63 hectares, est générée par la modélisation HEC-RAS 2D-HEC-HMS. La comparaison révèle également que les variations de superficie, en fonction des différents hydrogrammes, sont moins prononcées avec FLO-2D (6, 71 %) qu'avec HEC-RAS 2D (10, 7 %).

L'évaluation de la précision de la simulation de l'étendue inondée est réalisée au moyen de l'Indice de Succès Critique (CSI). Cet indice mesure le degré d'ajustement statistique entre l'étendue simulée et observée en excluant les zones mal concordantes (sous-estimations et surestimations du modèle), (Paul D. Bates *et al.* , 2010, Sampson *et al.* , 2015).

L'indice est calculé selon la formule suivante :

$$CSI(\%) = \frac{(ZoneObs \cap ZoneMod)}{(ZoneObs \cup ZoneMod)} \times 100 \quad (25)$$

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

Les études antérieures suggèrent qu'un CSI supérieur à 65 % peut être considéré comme satisfaisant (Altenau *et al.* , 2017, Segura-Beltrán *et al.* , 2016).

Pour la présente étude, les résultats de ce paramètre pour les différentes approches de modélisation sont répertoriés dans le tableau VI-15.

Tableau VI-15: Résultats quantitatifs des zones a risque d'inondation dans la zone étudiée

Approches de modélisation	Superficie inondable (ha)	CSI%
EBA4SUB-FLO2D	67. 21	80%
RATIONAL-FLO2D	63. 81	75%
HEC-HMS-FLO2D	62. 70	74%
EBA4SUB-HECRAS2D	48. 87	56. 5%
RATIONAL-HECRAS 2D	44. 29	52. 5%
HEC-HMS-HECRAS 2D	43. 63	51. 3%

La comparaison entre l'étendue de l'inondation observée et celle simulée par FLO-2D avec différentes approches hydrologiques montre une bonne concordance. Les taux de réussite des trois approches, EBA4SUB, rationnelle et HEC-HMS, dépassent le seuil critique de 65 %, atteignant respectivement 80 %, 75 % et 74 %. Ces résultats confirment la performance des simulations FLO-2D, qui génèrent des zones inondables en accord avec l'étendue observée de la crue. En revanche, HEC-RAS affiche des valeurs de CSI inférieures à 65 % pour les trois approches, avec des scores de 51, 3 %, 52, 5 % et 56, 5 % respectivement, suggérant une précision moindre dans ses simulations.

Les valeurs de débit associées aux conditions aux limites du modèle pourraient impacter significativement les résultats. En conclusion préliminaire et en tenant compte de l'étendue de la crue observée, l'approche FLO-2D+EBA4SUB apparaît comme étant la plus adaptée.

B. Profondeurs d'inondation

Dans le but d'évaluer de manière précise les niveaux d'inondation, nous avons exploité des données VGI (Volontariat Généré par les Internautas), notamment des photos et des vidéos. Nous les considérons comme des représentations fidèles des niveaux d'eau observés sur le terrain. Ces données sont extraites grâce à une analyse minutieuse des photographies. Notre expertise dans le domaine d'étude et l'utilisation de systèmes d'information géographique (SIG) ont joué un rôle essentiel dans cette collecte, comme décrit dans le chapitre précédent.

Nous avons appliqué des techniques avancées de traitement et d'analyse d'images aux photographies et aux vidéos pour obtenir des données quantitatives sur les inondations, en

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

mettant un accent particulier sur les niveaux d'eau. Ces photos se sont avérées être des ressources extrêmement précieuses pour obtenir une vision claire et détaillée de la situation lors de l'inondation, reflétant fidèlement les conditions telles qu'elles se sont produites au moment de la capture.

Afin d'obtenir des informations précises sur les niveaux d'eau observés, nous avons utilisé le logiciel de retouche photo Gimp 2. 10. 4. Concrètement, nous avons exploité l'outil de mesure pour calculer les distances et les angles entre différents points de l'image. En maintenant le clic gauche et en déplaçant le curseur, nous avons pu déterminer l'angle ainsi que le nombre de pixels entre le point de référence initial et d'autres points d'intérêt dans l'image, comme illustré dans la figure (VI-23).

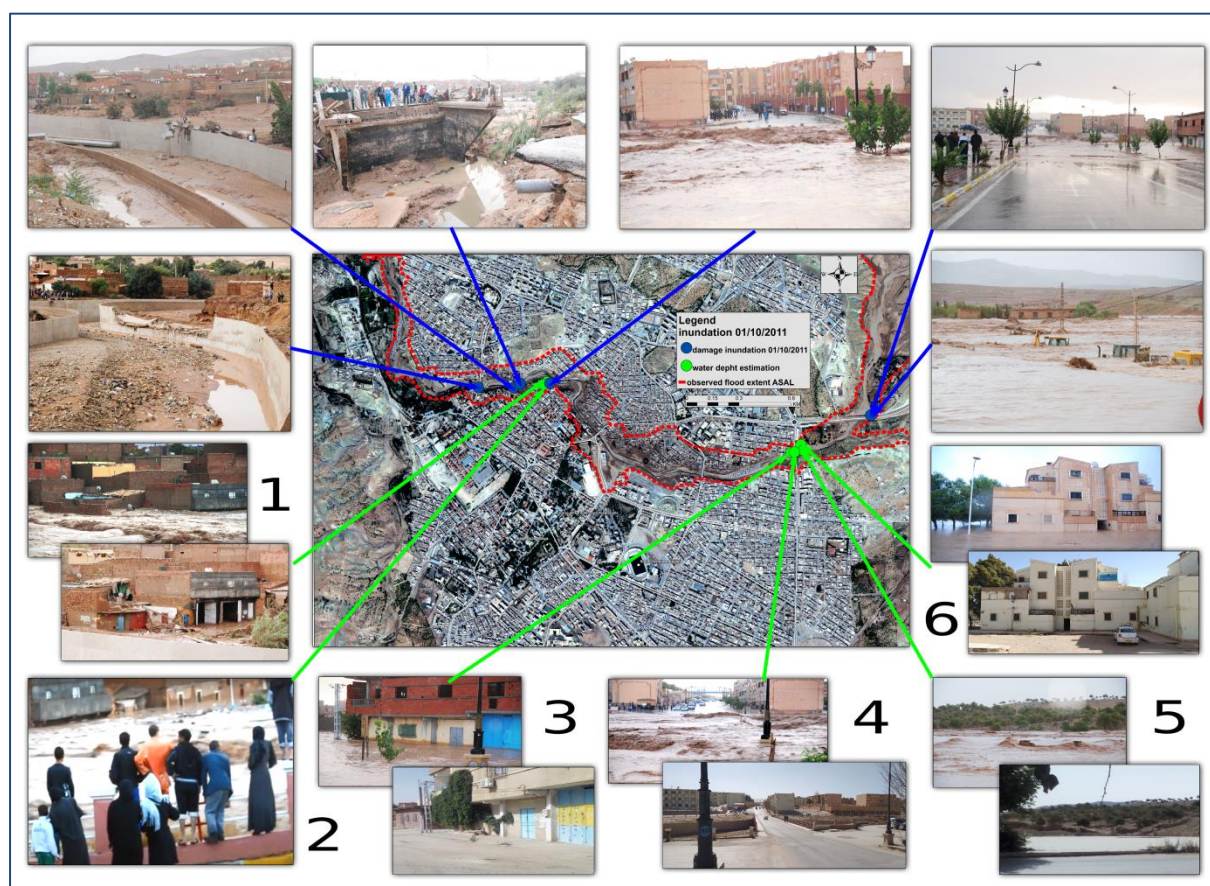


Figure VI-23: Les données concernent six sites répartis uniformément dans la zone explorée.

Ces données VGI sont corroborées par des enquêtes sur le terrain. Les habitants vivant près de la rivière ont confirmé que la crue avait atteint son point culminant, ce qui est matérialisé par des photos prises lors du sauvetage d'une mère et de son fils. En plus de ces photos, qui ont permis de déduire le débit maximal de la crue, d'autres images montrent les berges de la rivière

Deffa, d'une hauteur de six mètres, submergées par l'eau lors de la crue. Ces berges, construites pour protéger la zone urbaine des inondations, ont subi des dommages à plusieurs endroits le long de la rivière. Ces observations suggèrent que la hauteur de l'eau était supérieure à six mètres pendant de longues périodes lors de la crue et de la décrue.

Dans le cadre de l'évaluation de la performance des différentes approches de simulation, la comparaison de la profondeur d'eau simulée et observée est réalisée. Cette évaluation est procédée en utilisant l'erreur quadratique moyenne (RMSE) ainsi que l'Indice d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE), introduit par Nash & Sutcliffe (1970).

Le RMSE permet d'évaluer l'écart entre les résultats de simulation et les données observées en termes de profondeur. Des valeurs de RMSE proches de zéro indiquent un bon ajustement et des performances satisfaisantes du modèle (Kastridis *et al.* , 2020, Moriasi *et al.* , 2007).

L'Indice NSE de Nash-Sutcliffe est couramment utilisé en hydrologie pour évaluer la qualité de l'ajustement des modèles de simulation (Gupta *et al.* , 2009, McCuen *et al.* , 2006). Des valeurs de NSE supérieures à 0.55 sont généralement considérées comme acceptables d'après les études antérieures (Kastridis *et al.* , 2020, Segura-Beltrán *et al.* , 2016).

Les résultats du RMSE et du NSE, concernant la comparaison les différentes approches de simulation pour l'événement de crue du 01/10/2011, sont présentés dans le tableau VI-16.

Chapitre VI : Etude de cas : reconstruction de l'événement extrême dans le bassin versant de l'Oued Deffa

Tableau VI-16: Résultats des profondeurs d'eau de la reconstruction du l'événement de la crue du 01/10/2011

Site	EBA4SUB - FLO2D			RATIONAL- FLO2D			HEC-HMS- FLO2D			EBA4SUB - HECRAS2D			RATIONAL HECRAS2D			HEC-HMS - HECRAS2D		
	Profondeur Observée (VGI) (m)	Profondeur simulée (m)	Erreur (%)	Profondeur simulée (m)	Erreur (%)	Profondeur simulée (m)	Erreur (%)	Profondeur simulée (m)	Erreur (%)	Profondeur simulée (m)	Erreur (%)	Profondeur simulée (m)	Erreur (%)	Profondeur simulée (m)	Erreur (%)	Profondeur simulée (m)	Erreur (%)	Profondeur simulée (m)
1	3.18 m	3.00 m	5.6%	2.9 m	8.8%	2.9 m	8.8%	2.9 m	8.8%	2.89m	9.1%	2.53 m	20%	2.49 m	21%			
2	1.80 m	1.50 m	16%	1.5 m	16%	1.5 m	16%	1.5 m	16%	1.7 m	11%	1.38 m	23%	1.28 m	28%			
3	0.95 m	0.7 m	26%	0.7 m	26%	0.7 m	26%	0.7 m	26%	0.77m	19%	0.62 m	34%	0.53 m	44%			
4	1.00 m	0.7 m	30%	0.7 m	30%	0.7 m	30%	0.7 m	30%	0.62m	38%	0.65 m	35%	0.62 m	38%			
5	1.10 m	0.7 m	36%	0.7 m	36%	0.7 m	36%	0.7 m	36%	0.92m	16%	0.73 m	33%	0.7 m	36%			
6	0.8 m	0.7 m	12.5%	0.7 m	25%	0.6 m	25%	0.6 m	25%	0.58m	27.5 %	0.23 m	71%	0.1 m	87%			
125																		
Résultats																		
RMSE		0.272		0.294		0.294		0.294		0.238		0.462		0.530				
NSE		0.892		0.873		0.873		0.873		0.916		0.688		0.583				

Les résultats du tableau VI-16, révèlent que les approches de modélisation FLO-2D sont les plus performantes, avec des valeurs de RMSE variant de 0,27 à 0,29 et des indices NSE supérieurs ou égaux à 0,87.

Cependant, les deux approches (HEC-RAS 2D-HEC-HMS ; HEC-RAS 2D-Rationnelle) de la modélisation HEC-RAS 2D sont affectées par des erreurs et semblent être moins précises.

En effet, la comparaison, des résultats simulés par ces deux dernières approches par rapport aux données de profondeur observée, présente des valeurs de l'erreur quadratique moyenne RMSE qui sont relativement importantes (0,46 et 0,53).

En revanche, l'autre approche de modélisation HEC-RAS 2D, c'est-à-dire HEC-RAS 2D-EBA4SUB, offre les meilleurs indicateurs de performance de simulation avec un RMSE de 0,23 et un NSE de 0,91.

En ce qui concerne la modélisation hydraulique HEC-RAS 2D, la différence de performance entre le modèle EBA4SUB et les autres modèles hydrologiques HEC-HMS et formule rationnelle pourrait s'expliquer par la différence de débits de pointe en entrée. En effet, le débit considéré dans la simulation de l'approche HEC-RAS 2D-EBA4SUB donne des profondeurs généralement plus proches des profondeurs observées pour les six sites d'expérimentation. L'erreur moyenne entre les valeurs simulées et observées pour les six sites est d'environ 20 %, tandis qu'elle atteint 36 % pour l'approche HEC-RAS 2D-Rationnelle et 42 % pour l'approche HEC-RAS 2D-HEC-HMS. En termes de profondeur sur le site d'expérimentation, l'approche HEC-RAS 2D-EBA4SUB présente la meilleure performance au site 1, avec une erreur relative n'atteignant que 9 %.

D'autre part, en considérant les différentes approches de modélisation FLO-2D, la valeur de l'erreur moyenne entre les résultats simulés et les données observées ne dépasse pas 25 %. En effet, en plus du choix du modèle et de sa précision, différents facteurs influencent la qualité de la reproduction de la crue. Un choix approprié de ces paramètres réduit les erreurs et les incertitudes dans l'estimation des caractéristiques des crues et de la cartographie de la plaine inondable (Lamichhane & Sharma, 2018). Parmi ces facteurs, la rugosité exprimée par le coefficient de Manning joue un rôle déterminant. Une surestimation des valeurs du coefficient de Manning réduit les vitesses d'écoulement et augmente les profondeurs d'inondation, tandis que de petites valeurs de ce paramètre produisent des vitesses plus élevées avec des niveaux d'eau réduits (Chow *et al.*, 1988).

Par ailleurs, la comparaison des indicateurs de performance des différentes approches de modélisation hydraulique FLO-2D, la simulation HEC-RAS 2D-EBA4SUB se révèle également la plus performante. Cela peut être attribué à la différence de résolution de calcul. En effet, la résolution est de 5 mètres dans la simulation HEC-RAS 2D et de 30 mètres dans la modélisation FLO-2D de base. Une résolution plus fine conduit à de meilleurs résultats de simulation par rapport à une résolution plus grossière (Zejin *et al.* , 2019).

Il convient de rappeler que l'approche HEC-RAS 2D-EBA4SUB est celle qui a mieux reproduit le profil de l'écoulement au niveau des sites des ponts du 20 Août et El-GRABBA en milieu urbain. Dans tous les cas et quel que soit le modèle hydraulique, son association avec le modèle hydrologique EBA4SUB donne les meilleurs résultats de simulation pour le site exploré.

Par conséquent, en référence au degré de performance des différentes approches de simulation, les résultats de validation indiquent qu'en ce qui concerne les critères d'étendue et de profondeur, l'approche FLO-2D-EBA4SUB semble être la plus appropriée en termes de performance et de précision.

VI.6 Conclusion :

L'étude de cas présentée dans ce chapitre a mis en lumière l'importance de l'intégration de modèles hydrologiques et hydrauliques avancées, telles qu'EBA4SUB et FLO-2D, pour une analyse fiable et la reconstruction fidèle des crues extrêmes dans les bassins versants non jaugé à l'exemple de celui d'Oued Deffa.

Les performances des modèles expérimentés ont été quantifiées par des métriques clés : un CSI de 80% qui traduit une précision remarquable dans la prédiction des zones inondées, et un RMSE de 0.272, faible. Ce qui indique une grande fidélité des simulations par rapport aux observations réelles. De plus, l'estimation du coefficient de Nash a abouti à une valeur égale 0.892, proche de 1, témoignant ainsi de l'efficacité des modèles à reproduire les débits observés lors des crues et mettant en évidence leur capacité à simuler les processus hydrologiques avec une exactitude très satisfaisante.

EBA4SUB, en minimisant la subjectivité et en affinant les estimations concernant le coefficient de ruissellement et le temps de concentration, ainsi que FLO-2D, avec sa capacité à produire des simulations détaillées de la dynamique des inondations, marquent un progrès notable dans le domaine de la modélisation des crues.

Par ailleurs et en l'absence de mesures hydrométriques, le recours à l'utilisation stratégique des données VGI, enrichie par des observations satellitaires a non seulement facilité une validation efficace de ces modèles mais a également souligné l'importance des technologies spatiales et des données ouvertes dans l'analyse de phénomènes hydrologiques complexes.

Grâce à sa précision hydrologique, le modèle EBA4SUB offre des estimations fiables des débits de crue avec un nombre restreint de paramètres, un atout important dans les régions dépourvues de données. Parallèlement, FLO-2D se distingue par son aptitude exceptionnelle à cartographier de manière précise les zones inondées, fournissant une analyse approfondie des étendues et profondeurs des inondations grâce à ses capacités de modélisation bidimensionnelle.

La combinaison de ces outils, validée par l'apport des données VGI, constitue donc une méthode robuste pour évaluer les risques d'inondation, s'avérant être une ressource inestimable pour la gestion des risques et le développement de stratégies de mitigation et d'alerte précoce face aux crues extrêmes dans le bassin versant d'Oued Deffa.

CHAPITRE VII

Mesures conservatoires et stratégies urbaines : Protection de la ville

VII. Mesures conservatoires et stratégies urbaines : Protection de la ville

VII.1 Introduction :

Dans les bassins versant non jauges notamment les régions arides et semi arides, les cours d'eau, en période de crues, peuvent causer des dégâts importants, de l'érosion des berges à l'élargissement des zones inondées. Face à ces défis, il est important de développer des stratégies d'adaptation pour protéger les zones urbaines. Ce chapitre aborde d'une manière générale les stratégies à préconiser et les mesures à prendre pour la prévision, prévention, préparation et culture du risque pour atténuer et maîtriser les risques (Samuels et al., 2010). Le cas de la ville d'El-Bayadh est considéré comme exemple. Ainsi, et au vu des résultats de simulation obtenus, il est questionné de proposer des mesures d'aménagement et d'adaptation basées sur les caractéristiques hydrologiques et géographiques locales. L'objectif étant de minimiser les risques liés aux inondations, en respectant l'équilibre naturel des cours d'eau et en garantissant une protection durable.

VII.1.1 Initiative de l'état Algérien dans la gestion des risques d'inondation

La nouvelle loi en préparation vise à moderniser la gestion des inondations en remplaçant la loi actuelle n°04-20 de 2004. Elle s'aligne sur les engagements internationaux, privilégiant la gestion du risque plutôt que la gestion des catastrophes. La loi introduit un changement majeur en consacrant le principe de l'aide de l'État aux sinistrés, avec une obligation de souscrire à des assurances contre les catastrophes naturelles. De plus, elle prévoit une stratégie nationale sur 15 ans pour améliorer la prévention des inondations et mettre en place un système d'alerte précoce, intégrant des technologies avancées. Cette loi reflète l'engagement de l'Algérie à renforcer sa résilience face aux risques d'inondation.

Par ailleurs, face aux défis croissants posés par les inondations, l'État algérien, à travers l'Agence Nationale de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (AGIRE), a mis en place des projets significatifs. Un aspect majeur de cette initiative est l'élaboration d'une stratégie nationale de lutte contre les risques d'inondation. Cette stratégie, axée sur les Plans de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI), vise à identifier systématiquement les zones

inondables et à élaborer des mesures adaptées à chaque contexte spécifique, dans le but de prévenir efficacement les risques.

Dans le cadre de cette étude, une analyse approfondie a permis d'identifier 689 sites à risque d'inondation. Cette identification est un élément clé pour orienter les futurs efforts de planification et pour la mise en place de mesures préventives ciblées.

L'objectif principal de cette démarche stratégique est la création d'un document détaillé décrivant les risques, les enjeux et la vulnérabilité liés aux inondations. Ce document, en fournissant une analyse exhaustive et une compréhension approfondie des différentes facettes des inondations, joue certainement un rôle déterminant dans la planification urbaine et territoriale.

Une fois finalisé, ce document intégrera les plans d'occupation des sols (POS) et les Plans directeurs d'aménagements urbains (PDAU), ainsi que d'autres documents de planification. Son intégration garantira que les risques d'inondation soient systématiquement pris en compte dans la planification et la gestion urbaine. En fournissant des informations essentielles sur les zones à risque, ce document permettra aux décideurs et aux urbanistes de prendre des décisions éclairées et de développer des stratégies d'aménagement durable intégrant la gestion des risques d'inondation.

VII.2 Principes et options de protection contre les crues :

Avant d'envisager des solutions pour la protection contre les crues, il est capital de comprendre les principes fondamentaux qui régissent les mesures de protection modernes. Ces principes assurent une approche holistique et efficace dans la gestion des risques d'inondation. Ces principes sont :

- 1. Évaluation de la situation de danger :** Il est vital d'analyser avec précision la situation hydrologique, les caractéristiques des cours d'eau, et les différents types de dangers associés. Cela implique l'étude de documents tels que les registres des inondations passées et les cartes de risques. Cette évaluation doit être régulièrement actualisée et intégrée dans

les plans d'aménagement urbain et les plans d'occupation des sols des villes (Aureli *et al.*, 2021).

2. Gestion des déficits écologiques : Une protection durable implique la préservation de la végétation des rives et la promotion de la diversité écologique. Il est essentiel de maintenir et de renforcer les liens entre les différents écosystèmes pour assurer leur pérennité (Anteur *et al.*, 2022).

3. Priorisation des objectifs de protection : Il est important de distinguer les zones en fonction de leur valeur. Les zones urbaines, les infrastructures industrielles et les infrastructures critiques doivent bénéficier d'une protection supérieure par rapport aux terres agricoles ou aux constructions isolées. Des zones moins critiques peuvent nécessiter des niveaux de protection moindres (Borges *et al.*, 2020).

4. Gestion des eaux de crue : Il est préférable de retenir les eaux de crue à l'aide d'espaces de rétention pour diminuer les pics de débit. Si cela n'est pas réalisable, des couloirs d'écoulement doivent être aménagés, particulièrement dans les zones urbaines densément peuplées (Oberascher *et al.*, 2021).

5. Minimisation des interventions : Il est impératif de conserver des sections d'écoulement adéquates pour assurer une protection efficace contre les crues, tout en minimisant les interventions dans les espaces naturels (Hettiarachch *et al.*, 2022).

6. Identification et renforcement des points faibles : L'inspection régulière des ouvrages de protection est cruciale, particulièrement après des événements extrêmes. Cela permet d'identifier les faiblesses potentielles et de les corriger à travers des améliorations ciblées (Tarrant & Agency, 2018).

7. Entretien continu des cours d'eau : Un entretien régulier conforme aux normes est essentiel pour maintenir l'intégrité et la fonctionnalité des structures de protection contre les inondations (Jordan *et al.*, 2019).

8. Allocation de l'espace nécessaire aux cours d'eau : Il est important que les autorités planifient et allouent l'espace nécessaire aux cours d'eau dans le cadre des projets d'aménagement territorial, en les intégrant dans les plans directeurs et les plans d'affectation (Tann *et al.*, 2020).

VII.3 Aménagement des cours d'eau

L'aménagement des cours d'eau varie en fonction de leurs caractéristiques spécifiques et des objectifs de gestion des risques. Ces interventions peuvent inclure :

1. **Dragage** : Cette méthode vise à approfondir le lit du cours d'eau pour améliorer son débit et sa capacité à gérer les crues.
2. **Canalisation** : Elle consiste à bétonner les berges, et parfois le fond, pour renforcer les structures et prévenir l'érosion.
3. **Endiguement** : Cette technique augmente la hauteur des berges pour prévenir les débordements lors de crues importantes.
4. **Rectification du Cours** : Cette approche implique le recoupement des méandres et le re-calibrage du lit du cours d'eau pour augmenter sa capacité en modifiant sa profondeur et sa largeur.

Ces mesures sont souvent motivées par la nécessité de protéger les terres cultivables et les zones habitées, en particulier les centres urbains, ainsi que de lutter contre l'érosion des berges. L'Oued Deffa, par exemple, nécessite une attention particulière en raison de sa prédispositions aux inondations.

VII.4 Importance des études préalables

Avant de procéder à de tels aménagements, il est essentiel de réaliser une étude approfondie pour identifier les zones à risque d'inondation. Cette étude doit évaluer les différentes options d'aménagement en fonction des conditions locales et des risques spécifiques. Elle doit également prendre en compte les impacts environnementaux et sociaux de chaque intervention.

VII.5 Options d'Aménagement de l'Oued Deffa

VII.5.1 Contexte et planification initiale :

Le contexte préalable aux inondations du 1er octobre 2011 dans la région d'El-Bayadh, notamment l'aménagement de l'oued Deffa, est guidé par des estimations hydrologiques planifiant une crue centennale à 264,44 m³/s. Cette valeur a été le pilier du dimensionnement du canal de protection. Néanmoins, les analyses post-inondation ont mis en lumière une capacité d'absorption du canal limitée à 170 m³/s, en contraste marqué avec le débit réel de crue, qui a avoisiné les 430 m³/s, voire atteint un sommet de 460 m³/s selon l'ANRH. Cette situation a non seulement exposé les vulnérabilités infrastructurelles, engendrant des dommages matériels conséquents, des répercussions économiques, des menaces pour la sécurité des populations et des atteintes à l'environnement, mais a également souligné l'impératif d'aligner la conception des infrastructures et l'évaluation des risques d'inondation avec les dynamiques actuelles du changement climatique et l'intensification des événements météorologiques extrêmes.

En effet, les désastres survenus lors de l'ouragan Katrina en 2005 (John W *et al.*, 2007) et en Thaïlande en 2011 (Sayama *et al.*, 2015), illustrent de façon similaire les conséquences de négliger ces nécessités. Ce qui réaffirme le besoin pressant de revoir périodiquement les estimations des risques d'inondation, en mettant en place des stratégies globales de gestion des crues par notamment le renforcement des infrastructures.

Ces événements catastrophiques rappellent l'importance de prendre en compte la variabilité climatique et l'escalade des phénomènes extrêmes dans les plans de gestion hydrologique afin d'éviter les impacts dévastateurs liés à une sous-évaluation future des risques.

VII.5.2 Options de réaménagement envisagées :

Face à ces constatations, diverses alternatives de réaménagement sont envisagées pour renforcer la capacité de l'oued Deffa à gérer de tels débits :

- 5. Restauration des protections endommagées :** Rétablissement des structures endommagées lors des inondations de 2011, avec un renforcement des zones critiques,

conformément aux recommandations du Centre Technique de l'Hydraulique (CTH) voir tableau VII-1.

6. Réaménagement des Parois : Modification des parois de l'oued pour réduire les contraintes dues aux géométries complexes, comme les virages, qui affectent l'écoulement de l'eau et la résistance des structures.

7. Extension de la Protection en Amont : Augmentation de la longueur des protections existantes en amont de la ville sur 1272 mètres linéaires.

8. Extension de la protection en aval : Prolongation des protections en aval sur 2064 mètres linéaires, jusqu'au point de confluence avec le talweg nord-ouest.

9. Révision de la Hauteur des Murs : Surélévation des murs existants, dont la hauteur actuelle de 6 mètres s'est avérée insuffisante, comme l'ont montré les simulations hydrauliques révélant des hauteurs d'eau dépassant 7, 5 mètres par endroits.

10. Mesures de Correction Torrentielle : Mise en œuvre de mesures correctives en amont de l'oued et sur le bassin versant pour réguler le débit et réduire les risques d'inondation.

Tableau VII-1: Travaux de réhabilitation des parois de l'Oued Deffa

Désignation	Rive droite	Rive gauche	Lit d'oued
Voiles à reprendre (ml)	22	23	-
Voiles à projeter (ml)	3 028	3 299	-
Mur en blocs de béton à reprendre (ml)	8	-	-
Mur existant en pierre (ml)	-	38	-
Démolition mur en parpaing (ml)	-	11	-
Démolition mur en pierre (ml)	-	-	50

Le tableau VII-1 détaille les travaux nécessaires, incluant la réparation et la construction de murs en blocs de béton et en pierre, ainsi que la démolition de structures existantes en parpaing

et en pierre, avec les longueurs spécifiques pour chaque type de travail à réaliser sur les différentes sections de l'oued.

VII.6 Solutions envisagées pour la protection du centre-ville d'El-Bayadh

VII.6.1 Contexte et nécessité d'une mise à jour des plans

Suite aux inondations dévastatrices du 1er octobre 2011, qui ont causé des pertes humaines et le déplacement de nombreuses familles, la Wilaya de El-Bayadh a entrepris de revoir l'étude réalisée précédemment par la SAETI sur l'aménagement de l'oued Deffa. Cette révision vise à renforcer la protection des biens et des personnes en cas de crues, en prenant en compte une période de retour centennale augmentée de 50 %, conformément aux directives de l'ANRH. Le débit de projet envisagé est de 670 m³/s.

VII.6.2 Planification d'un canal de dérivation :

Pour préserver les infrastructures et assurer la sécurité de la ville, une dérivation du débit excédentaire est nécessaire. Il est prévu de construire un canal de dérivation en amont de la ville, le long de l'oued Deffa. Ce canal, conçu pour un débit de projet de 500 m³/s, comprendra un ouvrage excréteur ou de dérivation pour gérer un débit de 170 m³/s, correspondant au débit actuellement supporté par le canal existant.

VII.6.3 Zones de concentration des travaux :

Les efforts se concentreront sur deux zones principales :

- 1. Protection de la ville d'El-Bayadh :** Assurer la sécurité le long de l'oued Deffa, en renforçant les structures de protection existantes et en intégrant les nouvelles constructions dans le tissu urbain.
- 2. Zone de dérivation :** Gérer l'écoulement de la majorité du débit prévu à travers la construction du nouveau canal de dérivation.

VII.6.4 Construction du canal de dérivation :

Le canal de dérivation prévu s'étendra sur une longueur totale de 5 000 mètres, du point de départ jusqu'au point de jonction avec l'oued Deffa. La construction de ce canal nécessitera également l'installation d'ouvrages d'art le long de son tracé, pour assurer sa fonctionnalité et sa durabilité.



Figure VII-1: Synthèse visuelle des actions à entreprendre pour la protection de la ville de El-Bayadh contre les risques d'inondation.

VII.7 Conclusion

Ce chapitre souligne l'importance de la gestion des risques d'inondation dans la ville d'El-Bayadh. La reconnaissance du risque majeur que représentent les inondations pour cette région nécessite une intégration soignée dans tous les programmes de planification urbaine et territoriale. L'identification et la classification des zones à risque en fonction du potentiel des crues sont essentielles pour réduire les dommages causés par ces catastrophes naturelles et pour atténuer l'impact des inondations. La mise en œuvre d'un ensemble d'actions, telles que la cartographie des risques d'inondation, la création de cartes de vulnérabilité et la limitation des

constructions dans les zones à haut risque, est primordiale. De plus, l'élaboration de systèmes efficaces de prévision, de surveillance et d'alerte, ainsi que l'organisation adéquate des interventions en cas d'inondation, sont indispensables pour assurer la sécurité des personnes et des biens. La réhabilitation post-inondation joue également un rôle crucial dans le maintien de la résilience de la ville. Enfin, malgré le coût élevé associé au projet de déviation du débit de l'oued Deffa, cet investissement est essentiel pour garantir une protection durable contre les crues extrêmes. Investir dans des mesures de prévention et de gestion des inondations est donc indispensable pour la sécurité et le bien-être de la population d'El-Bayadh, contribuant à construire une communauté plus sûre et résiliente face aux défis environnementaux actuels et futurs.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans un but général qui vise la gestion et l'atténuation des inondations dans les bassins versants non jaugés des régions aride et semi-aride, la nécessité de disposer d'un outil approprié, pour une compréhension approfondie des dynamiques hydrologiques et hydrauliques des écoulements dans les cours d'eau des bassins versants, est fondamentale.

Dans ce contexte, la simulation des crues et la cartographie des zones inondées, en tant que moyen non structurel, joue un rôle important dans la prévision, prévention et la mise en œuvre des stratégies de contrôle de risque des inondations. Ceci permet d'anticiper les risques, coordonner les secours, réduire les dommages et guider les décisions politiques.

L'étude réalisée dans le cadre de la présente thèse, propose une approche novatrice qui combine des modèles hydrologiques et hydrauliques avec une utilisation astucieuse des données de l'Information Géographique Volontaire (VGI), qui permet de reconstituer avec fidélité les événements de crues passés et d'évaluer l'efficacité des modèles appliqués, offrant ainsi une vision détaillée des zones susceptibles d'être inondées lors d'événements extrêmes.

Pour l'estimation des paramètres de ruissellement, l'adoption de modèles hydrologiques événementiels, tels que le HECHMS, associée à la méthode SCS-CN, s'avère être une méthode fiable et efficace pour les bassins versants non jaugés. Ces modèles tirent avantage des informations numériques et de la puissance de calcul pour surmonter les limites des méthodes empiriques, largement utilisées dans la modélisation des bassins non jaugés. Elle se distingue par leurs capacités à supprimer la subjectivité présente dans le coefficient de ruissellement (C_r) et à réduire l'influence du temps de concentration, qui est entaché d'une grande incertitude dans les bassins versants non jaugés.

Par ailleurs, l'application de modèles hydrauliques bidimensionnels, comme FLO-2D, en combinant avec des modèles numériques de terrain (MNT) haute résolution, confirme leur capacité à cartographier avec précision les zones inondées. L'amélioration de la puissance de calcul et l'accès accru aux données spatialement distribuées renforcent l'attrait des modèles 2D pour simuler la dynamique complexe des inondations dans les milieux urbains.

D'un autre côté et dans le cadre du processus d'évaluation et de validation des modèles de simulation des crues dans les bassins versants non jaugés qui se caractérisent par l'absence de

données hydrométriques, une méthodologie innovante est adoptée. Cette méthodologie utilise des techniques de modélisation avancées à l'utilisation de données alternatives, comme les observations satellitaires, les systèmes d'information géographique (SIG) et les VGI. En conséquence, l'approche permet donc une reconstruction aussi précise des crues, offrant une compréhension détaillée de la dynamique des inondations dans des zones non jaugées. Comme source alternative pour confirmer les résultats de la modélisation, les VGI jouent donc un rôle essentiel dans la validation des résultats des modèles utilisés.

L'étude de cas, porte sur le bassin versant non jaugé d'Oued Deffa en Algérie, une région semi-désertique isolée, caractérisée par des crues rares mais intenses, avec une période de retour estimée à 100 ans. L'application des modèles expérimentés de l'approche adoptée démontre l'efficacité de la méthodologie. En effet, la modélisation a permis de reconstruire l'événement de crue de 2011 et confirmer l'efficacité des modèles. Les comparaisons avec les données observées (VGI) ont validé la fiabilité de l'approche FLO-2D-EBA4SUB, offrant des résultats plus précis que d'autres méthodes.

En conclusion, les résultats de l'étude soulignent que la gestion efficace des inondations requiert une approche multidisciplinaire, associant modélisation hydrologique événementielle, modélisation hydraulique bidimensionnelle, utilisation de données diversifiées, y compris les VGI, et collaboration étroite entre toutes les parties prenantes. Les enseignements tirés de cette étude confirment l'utilité de l'utilisation des outils numériques associés aux moyens non conventionnel comme bases solides pour l'amélioration continue des méthodes de prévision et de gestion des inondations dans des situations difficiles. En intégrant les connaissances scientifiques, les avancées technologiques et une planification stratégique, il est possible d'élargir l'étendu de l'application de l'approche proposée contextes similaires ce qui permet de réduire significativement les impacts des inondations et de protéger les populations vulnérables.

Références

Références

- Abbott, M. B. & Refsgaard, J. C. (2012) *Distributed Hydrological Modelling*. Water Science and Technology Library. doi:10.1007/978-94-009-0257-2
- Abril-hernández, J. M., Periañez, R., Connor, J. E. O. & Garcia-castellanos, D. (2018) Computational Fluid Dynamics simulations of the Late Pleistocene Lake Bonneville Flood. *J. Hydrol.* **561**(October 2017), 1–15. Elsevier. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.03.065
- Adikari, Y., Osti, R. & Noro, T. (2010) Flood-related disaster vulnerability: An impending crisis of megacities in Asia. *J. Flood Risk Manag.* **3**(3), 185–191. doi:10.1111/j.1753-318X.2010.01068.x
- Aerts, J. C. J. H. (2018) A review of cost estimates for flood adaptation. *Water (Switzerland)* **10**(11). doi:10.3390/w10111646
- Afzal, M. A., Ali, S., Nazeer, A., Khan, M. I., Waqas, M., Aslam, R. A., Jehanzeb, M., et al. (2022) Flood Inundation Modeling by Integrating HEC – RAS and Satellite Imagery : A Case Study of the Indus River Basin. *Water (Switzerland)*. doi:https://doi.org/10.3390/w14192984
- Ajami, H., Khan, U., Tuteja, N. K. & Sharma, A. (2016) Development of a computationally efficient semi-distributed hydrologic modeling application for soil moisture, lateral flow and runoff simulation. *Environ. Model. Softw.* **85**, 319–331. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.envsoft.2016.09.002
- Altenau, E. H., Pavelsky, T. M., Bates, P. D. & Ne, J. C. (2017) Water Resources Research editor. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union* **64**(46), 929. doi:10.1029/eo064i046p00929-04
- Andersson, J. O. & Nyberg, L. (2009) Using official map data on topography, wetlands and vegetation cover for prediction of stream water chemistry in boreal headwater catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **13**(4), 537–549. doi:10.5194/hess-13-537-2009
- Anghel, C. G. & Ilinca, C. (2022) Parameter Estimation for Some Probability Distributions Used in Hydrology. *Appl. Sci.* doi:https://doi.org/10.3390/app122412588
- Annis, A., Nardi, F., Petroselli, A., Apollonio, C., Arcangeletti, E., Tauro, F., Belli, C., et al. (2020) UAV-DEMs for Small-Scale Flood Hazard Mapping. *Water (Switzerland)* **12**(9), 1–16. doi:doi:10.3390/w12061717
- Anteur, D., Abdelkrim, B., Hafidha, B., Areas, S. & Ahmed, S. (2022) Contents available at ISC and SID The Impact of Exclosure on the Rehabilitation of Steppe Vegetation at Naâma Rangelands in Algeria. *J. Rangel. Sci.* **12**(2). doi:10.30495/rs.2022.682375
- Apollonio, C., Bruno, M. F., Iemmolo, G., Molfetta, M. G. & Pellicani, R. (2020) Flood risk evaluation in ungauged coastal areas: The case study of Ippocampo (Southern Italy). *Water (Switzerland)* **12**(5), 1–25. doi:10.3390/w12051466
- Aroua, N. (2022) Long term city development versus water strategy in Al-Maghreb. *Larhyss J.* (50), 173–197.

- Atallah, M., Hazzab, A., Seddini, A., Ghenaim, A. & Korichi, K. (2018) Inundation maps for extreme flood events: Case study of Sidi Bel Abbès city, Algeria. *J. Water L. Dev.* **37**(1), 19–27. doi:10.2478/jwld-2018-0021
- Aureli, F., Mignosa, P., Prost, F. & Dazzi, S. (2021) Hydrological and Hydraulic Flood Hazard Modeling in Poorly Gauged Catchments : An Analysis in Northern Italy. *Hydrology* **8**, 149. doi:https://doi.org/10.3390/hydrology8040149
- Aven, T. & Renn, O. (2009) On risk defined as an event where the outcome is uncertain. *J. Risk Res.* (April 2013), 37–41. doi:10.1080/13669870802488883
- Baldassarre, G. Di & Montanari, A. (2009) Uncertainty in river discharge observations: A quantitative analysis. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **13**(6), 913–921. doi:10.5194/hess-13-913-2009
- Basupi, L. V., Quinn, C. H. & Dougill, A. J. (2017) Using Participatory Mapping and a Participatory Geographic Information System in Pastoral Land Use Investigation: Impacts of Rangeland Policy in Botswana. doi:doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.03.007
- Bates, P. D. & Anderson, M. G. (1996) A preliminary investigation into the impact of initial conditions on flood inundation predictions using a time/space distributed sensitivity analysis. *Catena* **26**(1–2), 115–134. doi:10.1016/0341-8162(95)00041-0
- Bates, P. D. & Roo, A. P. J. De. (2000) A simple raster-based model for flood inundation simulation. *J. Hydrol.* **236**(1–2), 54–77. doi:10.1016/S0022-1694(00)00278-X
- Bates, Paul D. (2004) Remote sensing and flood inundation modelling. *Hydrol. Process.* **18**(13), 2593–2597. doi:10.1002/hyp.5649
- Bates, Paul D., Horritt, M. S. & Fewtrell, T. J. (2010) A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *J. Hydrol.* **387**(1–2), 33–45. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.03.027
- Bedient, P. B., Huber, W. C. & Vieux, B. E. (2013) *Hydrology and Floodplain Analysis*, SIXTH EDIT.
- Bekhira, A., Habi, M. & Morsli, B. (2019) Management of hazard of flooding in arid region urban agglomeration using HEC-RAS and GIS software: The case of the Bechar's city. *J. Water L. Dev.* **42**(1), 21–32. doi:10.2478/jwld-2019-0041
- Bellos, V. & Tsakiris, G. (2015) Comparing Various Methods of Building Representation for 2D Flood Modelling In Built-Up Areas. *Water Resour. Manag.* **29**(2), 379–397. doi:10.1007/s11269-014-0702-3
- Bennis, S. & Crobeddu, E. (2007) New Runoff Simulation Model for Small Urban Catchments. *J. Hydrol. Eng.* **12**(5), 540–544. doi:10.1061/(asce)1084-0699(2007)12:5(540)
- Beven, K. (2000) On the future of distributed modelling in hydrology. *Hydrol. Process.* **14**(16–17), 3183–3184. doi:10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17<3183::aid-hyp404>3.0.co;2-k

- Beven, K. (2012) *Rainfall-Runoff Modelling. Rainfall-Runoff Model.* doi:10.1002/9781119951001
- Beven, K. J. & Cloke, H. L. (2012) Comment on “Hyperresolution global land surface modeling: Meeting a grand challenge for monitoring Earth’s terrestrial water” by Eric F. Wood et al. *Water Resour. Res.* **48**(1), 2–4. doi:10.1029/2011wr010982
- Booij, M. J. (2017) Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions (March 2005). doi:10.1016/j.jhydrol.2004.07.013
- Borges, L., Humberto, J. S., Alencar, M. H., Jos, R., Ferreira, P. & Almeida, A. T. De. (2020) International Journal of Disaster Risk Reduction GIS-based multidimensional decision model for enhancing flood risk prioritization in urban areas **48**(March). doi:10.1016/j.ijdr.2020.101582
- Bounoua, L., Bachir, N., Souidi, H., Bahi, H., Lagmiri, S., Khebiza, M. Y., Nigro, J., et al. (2023) Sustainable Development in Algeria ’ s Urban Areas : Population Growth and Land Consumption.
- Brody, S., Lee, Y. & Kothuis, B. B. (2022) *Coastal Flood Risk Reduction: The Netherlands and the U.S. Upper Texas Coast. Coast. Flood Risk Reduct. Netherlands U.S. Up. Texas Coast.* Elsevier. doi:10.1016/C2020-0-02449-7
- Brunner, M. I., Clark, M., Slater, L. & Tallaksen, L. M. (2021) Challenges in modeling and predicting floods and droughts : A review (November 2020), 1–32. doi:10.1002/wat2.1520
- Cardona, O. D. (2013) *The Need for Rethinking the Concepts of Vulnerability and Risk from a Holistic Perspective : A Necessary Review and Criticism for Effective risk management. Mapp. vulnerability.*
- Chaudhry, M. H. (2008) *Open-Channel Flow.*
- Chaudhry, M. H. (2014) *Applied Hydraulic Transients*, Third Edit. doi:DOI 10.1007/978-1-4614-8538-4
- Chow, v. t, Maidment, D. R. & Mays, L. . (1988) *Applied Hydrology. McGraw-Hill Ser. water ressources Environ. Eng.*
- Clarke, R. T. (1973) A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. *J. Hydrol.* **19**(1), 1–20. doi:10.1016/0022-1694(73)90089-9
- Cleveland, Thompson & Fang, X. (2011) *Use of the Rational and Modified Rati onal Method for Hydraulic Design.*
- Cloke, H., Baldassarre, G. Di, Landeg, O., Pappenberger, F. & Ramos, M.-H. (2017) Hydrological risk: floods. In: *Understanding disaster risk: Hazard related risk issues, UNDERSTANDING DISASTER RISK: HAZARD RELATED RISK I.*

- Coulson, S., Woods, M. & Eu, M. S. (2021) Citizen Sensing : An Action-Orientated Framework for Citizen Science **6**(April), 1–13. doi:10.3389/fcomm.2021.629700
- Council, N. R. (2007) *Scientific Review of the Proposed Risk Assessment Bulletin from the Office of Management and Budget. Sci. Rev. Propos. Risk Assess. Bull. from Off. Manag. Budg.* National Academies Press. doi:10.17226/11811
- Crowder, R. A. (2009) Hydraulic analysis and design. *Fluv. Des. Guid.* 1–44. Retrieved from <http://www.defra.gov.uk/enviro/fcd/research/default.htm>
- Dashti, S., Palen, L., Heris, M. P., Anderson, K. M., Anderson, T. J. & Anderson, S. (2014) Supporting disaster reconnaissance with social media data: A design-oriented case study of the 2013 Colorado floods. *ISCRAM 2014 Conf. Proc. - 11th Int. Conf. Inf. Syst. Crisis Response Manag.* (May), 632–641.
- Deidda, R., Hellies, M. & Langousis, A. (2021) A critical analysis of the shortcomings in spatial frequency analysis of rainfall extremes based on homogeneous regions and a comparison with a hierarchical boundaryless approach. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* **35**(12), 2605–2628. Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/s00477-021-02008-x
- Derdour & Bouanani. (2018) Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS in a semi-arid region : Case study in Ain Sefra watershed , Ksour Mountains (SW Algeria). doi:10.2478/jwld-2018-0005
- Derdour & Bouanani. (2019) Coupling HEC-RAS and HEC-HMS in rainfall–runoff modeling and evaluating floodplain inundation maps in arid environments: case study of Ain Sefra city, Ksour Mountain. SW of Algeria. *Environ. Earth Sci.* **78**(19). doi:10.1007/s12665-019-8604-6
- Des, D., En, R., Wilaya, D. E. L. A. & Bayadh, E. L. (2013) De La Wilaya El Bayadh Actualisation De L ' Etude Du Reamenagement De L ' Oued Deffa Phase a – Etude Preliminaire.
- Dhawale, A. W. (2013) Runoff Estimation for Darewadi Watershed using RS and GIS. *Int. J. Recent Technol. Eng.* **1**(6), 46–50. Retrieved from <https://doaj.org/article/31fcc428fe87488bae0f3726b9ad39f1>
- Díaz, R. G. (2005) Analysis of Manning coefficient for small-depth flows on vegetated beds. *Hydrol. Process.* **19**(16), 3221–3233. doi:10.1002/hyp.5820
- Dimitriadis, P., Tegos, A., Oikonomou, A., Pagana, V., Koukouvinos, A., Mamassis, N., Koutsoyiannis, D., et al. (2016) Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping. *J. Hydrol.* **534**(2016), 478–492. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.01.020
- Diogo, A. F. & Carmo, J. A. do. (2019) Peak flows and stormwater networks design-current and future management of urban surface watersheds. *Water (Switzerland)* **11**(4). doi:10.3390/w11040759
- Domeneghetti, A., Castellarin, A. & Brath, A. (2012) Assessing rating-curve uncertainty and

- its effects on hydraulic model calibration. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **16**(4), 1191–1202. doi:10.5194/hess-16-1191-2012
- Dorji, K. Y. (2018) The effect of antecedent moisture condition on hec-hms model performance: a case study in kelani river basin, SRI LANKA.
- Doswell, C. A. (2015) Hydrology, Floods and Droughts | Flooding. In: *Encyclopedia of Atmospheric Sciences: Second Edition*, 201–208. Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-382225-3.00151-1
- Dwarakish, G. S. & Ganasri, B. P. (2015) Impact of land use change on hydrological systems: A review of current modeling approaches. *Cogent Geosci.* **1**(1), 1115691. Cogent. doi:10.1080/23312041.2015.1115691
- Eckle, M., Albuquerque, J. P. De, Herfort, B., Zipf, A., Leiner, R., Wolff, R. & Jacobs, C. (2016) Leveraging OpenStreetMap to support flood risk management in municipalities: A prototype decision support system. *Proc. Int. ISCRAM Conf.* **0**.
- Elkhrachy, I. (2015) Flash Flood Hazard Mapping Using Satellite Images and GIS Tools: A case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA). *Egypt. J. Remote Sens. Sp. Sci.* **18**(2), 261–278. Authority for Remote Sensing and Space Sciences. doi:10.1016/j.ejrs.2015.06.007
- Erlich, M., Girard, C. & David, E. (2012) Integration Du Modele Hydraulique 2D Dans La Chaîne De Prevision Des Crues-Eclairs En Temps Reel 1–12.
- Evans, T. (2011) Professionals, managers and discretion: Critiquing street-level bureaucracy. *Br. J. Soc. Work* **41**(2), 368–386. doi:10.1093/bjsw/bcq074
- Feng, Y. & Sester, M. (2018) Extraction of pluvial flood relevant volunteered geographic information (VGI) by deep learning from user generated texts and photos. *ISPRS Int. J. Geo-Information* **7**(2). doi:10.3390/ijgi7020039
- Ferster, C. J., Nelson, T., Robertson, C. & Feick, R. (2017) *Current Themes in Volunteered Geographic Information. Compr. Geogr. Inf. Syst.*, Vol. 3. doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.09620-2
- Flanagin, A. J. & Metzger, Æ. M. J. (2008) The credibility of volunteered geographic information. *GeoJournal* **72**, 137–148. doi:10.1007/s10708-008-9188-y
- Forsee, W. J. & Ahmad, S. (2011) Evaluating Urban Storm-Water Infrastructure Design in Response to Projected Climate Change. *J. Hydrol. Eng.* **16**(11), 865–873. doi:10.1061/(asce)he.1943-5584.0000383
- Francisco, P., Nardi, F., Melesse, A. & Obeysekera, J. (2021) Assessing geomorphic floodplain models for large scale coarse resolution 2D flood modelling in data scarce regions. *Geomorphology* **389**, 107841.
- Gangrade, S., Kao, S. C., Dullo, T. T., Kalyanapu, A. J. & Preston, B. L. (2019) Ensemble-based flood vulnerability assessment for probable maximum flood in a changing

- environment. *J. Hydrol.* **576**(5), 342–355. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.06.027
- Gaume, E. & Borga, M. (2008) Post-flood field investigations in upland catchments after major flash floods: proposal of a methodology and illustrations. *J. Flood Risk Manag.* **1**(4), 175–189. doi:10.1111/j.1753-318x.2008.00023.x
- Gaume, Eric, Borga, M., Llasat, M. C., Maouche, S., Lang, M. & Diakakis, M. (2016) Subchapter 1.3.4. Mediterranean extreme floods and flash floods. *Mediterr. Reg. under Clim. Chang.* 133–144. IRD Éditions. doi:10.4000/BOOKS.IRDEDITIONS.23181
- Ghonchepour, D., Sadoddin, A., Bahreman, A., Croke, B., Jakeman, A. & Salmanmahiny, A. (2021) A methodological framework for the hydrological model selection process in water resource management projects. *Nat. Resour. Model.* **34**(3). doi:10.1111/nrm.12326
- Glass, C. E. (2013) Dangers from Floods. In: *Interpreting Aerial Photographs to Identify Natural Hazards*, Elsevier., 111–122. Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-420018-0.00007-5
- Godunov, S. K. & Bohachevsky, I. (1959) Finite difference method for numerical computation of discontinuous solutions of the equations of fluid dynamics. *Mat. Sb.* **47(89)**(3), 271–306. Retrieved from <https://hal.science/hal-01620642%0Ahttps://hal.science/hal-01620642/document>
- Gómez-Barrón, J. P., Manso-Callejo, M. Á., Alcarria, R. & Iturrioz, T. (2016) Volunteered geographic information system design: Project and participation guidelines. *ISPRS Int. J. Geo-Information* **5**(7). doi:10.3390/ijgi5070108
- Goodchild, M. F. (2007) Citizens as sensors: The world of volunteered geography. *GeoJournal* **69**(4), 211–221. doi:10.1007/s10708-007-9111-y
- Grainger, A. (2017) Observation Science. *Remote Sens.* **9**(02), 153. doi:10.3390/rs9020153
- Grimaldi, S. & Petroselli, A. (2014) Avons-nous encore besoin de la formule rationnelle ? Une méthode empirique alternative pour l'estimation du débit de pointe dans les petits bassins et les bassins non jaugés. *Hydrol. Sci. J.* **60**(1), 67–77. Taylor & Francis. doi:10.1080/02626667.2014.880546
- Grimaldi, S., Petroselli, A., Arcangeletti, E. & Nardi, F. (2013) Flood mapping in ungauged basins using fully continuous hydrologic-hydraulic modeling. *J. Hydrol.* **487**, 39–47. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.02.023
- Grimaldi, S., Petroselli, A., Tauro, F. & Porfiri, & M. (2012) Time of concentration: a paradox in modern hydrology. *Hydrol. Sci. J.* **57**(2), 217–228. doi:10.1080/02626667.2011.644244
- Grinberg, N., Joseph, K., Friedland, L., Swire-Thompson, B. & Lazer, D. (2019) Political science: Fake news on Twitter during the 2016 U.S. presidential election. *Science* (80-.). **363**(6425), 374–378. doi:10.1126/science.aau2706
- Grunder-Fahrer Dakota, D. (2018) *The Devil is in the Details: Parsing Unknown German Words BT - Language Technologies for the Challenges of the Digital Age.*

- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K. & Martinez, G. F. (2009) Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol.* **377**(1–2), 80–91. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003
- Guzzetti, F., Gariano, S. L., Peruccacci, S., Brunetti, M. T., Marchesini, I., Rossi, M. & Melillo, M. (2020) Earth-Science Reviews Geographical landslide early warning systems. *Earth-Science Rev.* **200**(September 2019), 102973. Elsevier. doi:10.1016/j.earscirev.2019.102973
- Hafnaoui, M. A., Madi, M., Hachemi, A., Farhi, Y., Amin, M., Madi, M., Hachemi, A., et al. (2020) El Bayadh city against flash floods : case study El Bayadh city against flash floods : case study. *Urban Water J.* 1–6. doi:10.1080/1573062X.2020.1714671
- Hafnaoui, M. A., Madi, M., Said, M. Ben & Ahmed, B. (2022) FLOODS IN EL BAYADH CITY : CAUSES AND FACTORS (September).
- Hager, W. H., Castro-orgaz, O. & Hutter, K. (2019) Comptes Rendus Mecanique Correspondence between de Saint-Venant and Boussinesq . 1 : Birth of the Shallow – Water Equations. *Comptes Rendus Mec.* **347**(9), 632–662. Elsevier Masson SAS. doi:10.1016/j.crme.2019.08.004
- Haklay, M. (2013) Crowdsourcing geographic Knowledge: Volunteered geographic information (VGI) in theory and practice. *Citiz. Sci. Volunt. Geogr. Inf. Overv. Typology Particip.* 105–122. doi:10.1007/978-94-007-4587-2
- Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., Brázdil, R., Claps, P., Kiss, A., Kjeldsen, T. R., et al. (2014) Understanding flood regime changes in Europe: A state-of-the-art assessment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **18**(7), 2735–2772. doi:10.5194/hess-18-2735-2014
- Halwatura, D. & Najim, M. M. M. (2013) Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environ. Model. Softw.* **46**, 155–162. Elsevier. doi:10.1016/j.envsoft.2013.03.006
- Hamouda, B., Boulmaiz, T., Lameche, E. K., Lefkir, A., Hasbaia, M., Abdelbaki, C., Moulahoum, A. W., et al. (2022) Flood Analysis and Mitigation Strategies in Algeria. In: *Natural Disaster Science and Mitigation Engineering*, 95–118. Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-981-16-2904-4
- Hettiarachch, S., Wasko, C. & Ashish, S. (2022) Rethinking urban storm water management through resilience – The case for using green infrastructure in our warming world. *Cities* **128**. doi:https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103789
- Horritt, M. S. & Bates, P. D. (2001) Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow. *J. Hydrol.* **253**(1–4), 239–249. doi:10.1016/S0022-1694(01)00490-5
- Horton, R. E. (1933) The role of infiltration in the hydrology cycle. *Trans. Am. Geophys. Union* **14**(1), 446–460.
- Horton, R. E. (1941) An Approach Toward a Physical Interpretation of Infiltration-Capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **5**(C), 399–417. doi:10.2136/sssaj1941.036159950005000c0075x

- Houessou-dossou, E. A. Y., Gathenya, J. M., Njuguna, M., Gariy, Z. A. & Petroselli, A. (2022) Comparative analysis of flood and rainfall frequency in the ungauged sub-watersheds of Kakia and Esamburumbur in Narok town, Kenya, using the EBA4SUB rainfall-runoff model. *J. Agric. Eng.* **53**(2). doi:10.4081/jae.2022.1307
- Hung, K. C., Kalantari, M. & Rajabifard, A. (2016) Methods for assessing the credibility of volunteered geographic information in flood response: A case study in Brisbane, Australia. *Appl. Geogr.* **68**(April 2015), 37–47. doi:10.1016/j.apgeog.2016.01.005
- Ignacio, J. A. F., Cruz, G. T., Nardi, F. & Henry, S. (2016) Assessing the effectiveness of a social vulnerability index in predicting heterogeneity in the impacts of natural hazards: Case study of the Tropical Storm Washi flood in the Philippines. *Vienna Yearb. Popul. Res.* **1**(October), 91–129. doi:10.1553/populationyearbook2015s91
- Imran, M., Elbassuoni, S., Castillo, C., Diaz, F. & Meier, P. (n.d.) Imran_Elbassuoni_Castillo_Diaz_Meier_2013_Practical_Extraction_Disaster_Crisis.Pdf 1–4.
- Jafarzadeh, M. S., Ostad-ali-askari, K., Eslamian, S. & Singh, V. P. (2018) Water Management in Urban Watersheds. *Int. J. Emerg. Eng. Res. Technol.* **6**(2), 23–36.
- John W, J. D., Boesch, D. F., Clairain, E. J., Kemp, G. P., Laska, S. B., Mitsch, W. J., Orth, K., et al. (2007) Restoration of the Mississippi Delta : Lessons from Hurricanes **315**(March), 1679–1684.
- Jordan, P., Manojlovic, N. & Fröhle, P. (2019) Maintenance of Flood Protection Infrastructure in the North Sea Region – An Analysis of Existing Maintenance Strategies. *Proc. Coast. Struct. Hanover, Ger.* **30**. doi:10.18451/978-3-939230-64-9
- Kabeja, C., Li, R., Guo, J., Rwatangabo, D. E. R., Manyifika, M., Gao, Z., Wang, Y., et al. (2020) The impact of reforestation induced land cover change (1990-2017) on flood peak discharge using HEC-HMS hydrological model and satellite observations: A study in two mountain Basins, China. *Water (Switzerland)* **12**(5). doi:10.3390/W12051347
- Kastridis, A., Kirkenidis, C. & Sapountzis, M. (2020) An integrated approach of flash flood analysis in ungauged Mediterranean watersheds using post-flood surveys and unmanned aerial vehicles. *Hydrol. Process.* **34**(25), 4920–4939. doi:10.1002/hyp.13913
- Keum, H., Seo, J. & Choo, Y. (2022) Evaluation of Inundation Probability and Inundation Depth through Rainfall – Runoff Analysis. *Water* **14**(24), 4076. doi:https://doi.org/10.3390/w14244076
- Kidson, R. L., Richards, K. S. & Carling, P. A. (2006) Hydraulic model calibration for extreme floods in bedrock-confined channels: Case study from northern Thailand. *Hydrol. Process.* **20**(2), 329–344. doi:10.1002/hyp.6086
- Kjeldsen, T. R., Jones, D. A. & Morris, D. G. (n.d.) Using multiple donor sites for enhanced flood estimation in ungauged catchments. doi:10.1002/2013WR015203
- Knebl, M. R., Yang, Z. L., Hutchison, K. & Maidment, D. R. (2005) Regional scale flood

- modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/ RAS: A case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *J. Environ. Manage.* **75**(4), 325–336. doi:10.1016/j.jenvman.2004.11.024
- Lamichhane, N. & Sharma, S. (2018) Effect of input data in hydraulic modeling for flood warning systems. *Hydrol. Sci. J.* **63**(6), 938–956. doi:10.1080/02626667.2018.1464166
- Lemos, a. C. (2002) Numerical Methods for Singular Differential Equations Arising from Steady Flows in Channels and Ducts (May), 169.
- Li, J., Stephens, K. K., Zhu, Y. & Murthy, D. (2019) Using social media to call for help in Hurricane Harvey: Bonding emotion, culture, and community relationships. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* **38**(December 2018), 101212. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.ijdrr.2019.101212
- Liu, J., Guo, W., Guo, C., Gao, K. & Jing, S. (2020) Rethinking ubiquitous mapping in the intelligent age. *Acta Geod. Cartogr. Sin.* **49**. doi:10.11947/j.AGCS.2020.20190539
- Liu, Y., Zhang, K., Li, Z., Liu, Z., Wang, J. & Huang, P. (2020) A hybrid runoff generation modelling framework based on spatial combination of three runoff generation schemes for semi-humid and semi- arid watersheds. *J. Hydrol.* **590**(August), 125440. Elsevier. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125440
- Liu, Z., Merwade, V. & Jafarzadegan, K. (2019) Investigating the role of model structure and surface roughness in generating flood inundation extents using one- and two-dimensional hydraulic models. *J. Flood Risk Manag.* **12**(1). doi:10.1111/jfr3.12347
- Loc, H. H., Park, E., Thu, T. N., Diep, N. T. H. & Can, N. T. (2021) An enhanced analytical framework of Participatory GIS for Ecosystem Services 2 assessment applied to a Ramsar wetland site in the Vietnam Mekong Delta. *Ecosyst. Serv.* **48**, 0–24. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101245
- Londhe, S. & Charhate, S. (2010) Comparison of data-driven modelling techniques for river flow forecasting. *Hydrol. Sci. J.* **55**(7), 1163–1174. doi:10.1080/02626667.2010.512867
- López-marrero, T. (2010) An integrative approach to study and promote natural hazards adaptive capacity : a case study of two flood-prone communities in Puerto Rico. *Geogr. J.* doi:10.1111/j.1475-4959.2010.00353.x
- Macchione, F., Costabile, P., Costanzo, C. & Lorenzo, G. De. (2019) Extracting quantitative data from non-conventional information for the hydraulic reconstruction of past urban flood events. A case study. *J. Hydrol.* **576**(June), 443–465. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.06.031
- Machalińska-murawska, J. & Szydłowski, M. (2015) Lax-Wendroff and McCormack Schemes for Numerical Simulation of Unsteady Gradually and Rapidly Varied Open Channel Flow. *Arch. ofHydro-Engineering Environ. Mech.* **60**(January 2013), 51–62. doi:10.2478/heem-2013-0008
- Mai, D. T. & Smedt, F. De. (2017) A combined hydrological and hydraulic model for flood

- prediction in Vietnam applied to the Huong river basin as a test case study. *Water (Switzerland)* **9**(11). doi:10.3390/w9110879
- Maidment, D. R., Olivera, F., Calver, A., Eatherall, A. & Fraczek, W. (1996) Unit hydrograph derived from a spatially distributed velocity field. *Hydrol. Process.* **10**, 831–844.
- Manfreda, S., Samela, C., Refice, A., Tramutoli, V. & Nardi, F. (2018) *Advances in large scale flood monitoring and detection. Hydrology*, Vol. 5. doi:10.3390/hydrology5030049 Manfreda S, Samela C, Refice A, Tramutoli V, Nardi F. 2018. Advances in large scale flood 39 monitoring and detection.
- Mays, L. W. (2010) First edition. *Water Resour. Eng.* **48**(1), 1–16.
- McCuen, R. H., Knight, Z. & Cutter, A. G. (2006) Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index. *J. Hydrol. Eng.* **11**(6), 597–602. doi:10.1061/(asce)1084-0699(2006)11:6(597)
- McDougall, K. & Temple-Watts, P. (2012) The use of LIDAR and volunteered geographic information to MAP flood extents and inundation. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **1**(September), 251–256. doi:10.5194/isprsannals-I-4-251-2012
- Meddi, M., Toumi, S. & Assani, A. A. (2017) Application of the L-moments approach to the analysis of regional flood frequency in Northern Algeria. *Int. J. Hydrol. Sci. Technol.* **7**(1), 77–102. doi:10.1504/IJHST.2017.080959
- Mei, X., Han, D., Chen, Y., Wu, H. & Ma, T. (2023) Target localization using information fusion in WSNs-based Marine search and rescue. *Alexandria Eng. J.* **68**, 227–238. Faculty of Engineering, Alexandria University. doi:10.1016/j.aej.2023.01.028
- Menani, M. R. & Bennedjai, N. (2009) Statistical approach of the physiographical parameters influence on runoffs observed at the exit of basins - A case of Algerian basins. *J. Eng. Appl. Sci.* **4**(3), 48–53.
- Messner, F. & Meyer, V. (2005) *Flood damage, vulnerability and risk perception-challenges for flood damage research.* (vulnerability and mitigation measures. Flood risk management: hazards, Ed.), Helmholtz. Uconstor.
- Messner, F., Penning-rowsell, E., Green, C., Tunstall, S., Veen, A. Van Der, Tapsell, S., Wilson, T., et al. (2007) Evaluating flood damages : guidance and recommendations on principles and methods **T09-06–01**.
- Meylan, P., Favre, A.-C. & Musy, A. (2008) Hydrologie fréquentielle: Une science prédictive 173. Retrieved from <http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=R6Q3hQ1MtYYC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Hydrologie+fr?quentielle:+une+science+pr?dictive&ots=nd7cFeK8Xx&sig=MfGIQ017004S3zj8Adbtk2OKaDg%5Cnhttp://books.google.com/books?id=R6Q3hQ1MtYYC&pgis=1>
- Mlynski, D., Petroselli, A. & Wałęga, A. (2018) Flood frequency analysis by an event-based rainfall-runoff model in selected catchments of Southern Poland. *Soil Water Res.* **13**(3), 170–176. doi:10.17221/153/2017-SWR

- Moel, H. de, Jongman, B., Kreibich, H., Merz, B., Penning-Rowsell, E. & Ward, P. J. (2015) Flood risk assessments at different spatial scales. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.* **20**(6), 865–890. Kluwer Academic Publishers. doi:10.1007/S11027-015-9654-Z/TABLES/1
- Mohymont, B. & Demarée, G. R. (2006) Courbes intensité-durée-fréquence des précipitations à Yangambi, Congo, au moyen de différents modèles de type Montana. *Hydrol. Sci. J.* **51**(2), 239–253. doi:10.1623/hysj.51.2.239
- Moreno, C., Aquino, R., Ibarreche, J., Pérez, I., Castellanos, E., Álvarez, E., Rentería, R., et al. (2019) Rivercore: IoT device for river water level monitoring over cellular communications. *Sensors (Switzerland)* **19**(1). doi:10.3390/s19010127
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D. & Veith, T. L. (2007) *M e g s q a w s* **50**(3), 885–900.
- Musy, A. & High, C. (1998) *Hydrologie_Appliquee_Tempus.Pdf*.
- Nardi, F., Annis, A. & Biscarini, C. (2018) On the impact of urbanization on flood hydrology of small ungauged basins: the case study of the Tiber river tributary network within the city of Rome. *J. Flood Risk Manag.* **11**(1975), 594–603. doi:10.1111/jfr3.12186
- Nardi, F., Cudennec, C., Abrate, T., Allouch, C., Annis, A., Assumpção, T., Aubert, A. H., et al. (2021) Citizens AND HYdrology (CANDHY): conceptualizing a transdisciplinary framework for citizen science addressing hydrological challenges. *Hydrol. Sci. J.* 1–18. doi:10.1080/02626667.2020.1849707
- Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970) River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *J. Hydrol.* **10**(3), 282–290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6
- Noardo, F., Harrie, L., Ohori, K. A., Biljecki, F., Ellul, C., Krijnen, T., Eriksson, H., et al. (2020) Tools for BIM-GIS integration (IFC georeferencing and conversions): Results from the GeoBIM benchmark 2019. *ISPRS Int. J. Geo-Information* **9**(9). doi:10.3390/ijgi9090502
- O'Brien, J. S., Julien, P. Y., Fullerton, and W. T. & Members, A. (1994) Two-DIMENSIONAL WATER FLOOD AND MUDFLOW SIMULATION. *Sci. York* **119**(2), 244–261. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:2(244)
- Oberascher, M., Kinzel, C., Kastlunger, U., Kleidorfer, M., Zingerle, C., Rauch, W. & Sitzenfrie, R. (2021) Integrated urban water management with micro storages developed as an IoT-based solution – The smart rain barrel. *Environ. Model. Softw.* **139**(March), 105028. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.envsoft.2021.105028
- Onof, C. & Wheater, H. S. (1993) Modelling of British rainfall using a random parameter Bartlett-Lewis Rectangular Pulse Model. *J. Hydrol.* **149**(1–4), 67–95. doi:10.1016/0022-1694(93)90100-N
- Otmani, A., Hazzab, A., Atallah, M., Apollonio, C., Petroselli, A., Otmani, A., Hazzab, A., et

- al. (2022) Using volunteered geographic information data for flood mapping – Wadi Deffa El Bayadh Algeria. *J. Appl. Water Eng. Res.* (December). doi:10.1080/23249676.2022.2155716
- P. L. Roe. (1981) Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors, and Difference Schemes. *J. Comput. Phys.* **43**, 357–372.
- Papaioannou, G., Loukas, A., Vasiliades, L. & Aronica, G. T. (2016) Flood inundation mapping sensitivity to riverine spatial resolution and modelling approach. *Nat. Hazards* **83**, 117–132. Springer Netherlands. doi:10.1007/s11069-016-2382-1
- Papaioannou, George, Loukas, A. & Georgiadis, C. (2013) The effect of riverine terrain spatial resolution on flood modeling and mapping. *First Int. Conf. Remote Sens. Geoinf. Environ.* **8795**, 87951H. doi:10.1117/12.2028218
- Papaioannou, George, Loukas, A., Vasiliades, L. & Aronica, G. T. (2016) Flood inundation mapping sensitivity to riverine spatial resolution and modelling approach. *Nat. Hazards* 1–16. doi:10.1007/s11069-016-2382-1
- Papaioannou, George, Varlas, G., Terti, G., Papadopoulos, A., Loukas, A. & Dimitriou, Y. P. and E. (2019) Flood Inundation Mapping at Ungauged Basins Using Coupled Hydrometeorological – Hydraulic Modelling : The Catastrophic Case of the 2006 Flash flood in volos city, Greece. *Water (Switzerland)* **11**, 1–28. doi:10.3390/w11112328
- Pappenberger, F., Beven, K., Horritt, M. & Blazkova, S. (2005) Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. *J. Hydrol.* **302**(1–4), 46–69. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.06.036
- Pappenberger, F. & Beven, K. J. (2006) Ignorance is bliss: Or seven reasons not to use uncertainty analysis. *Water Resour. Res.* **42**(5). doi:10.1029/2005WR004820
- Pazwash, H. (2016) *Hydrologic Calculations. Urban Storm Water Manag. Second Ed.* doi:10.1201/b19658-4
- Pellicani, R., Parisi, A., Iemmolo, G. & Apollonio, C. (2018) Economic risk evaluation in urban flooding and instability-prone areas: The case study of san giovanni rotondo (southern Italy). *Geosci.* **8**(4). doi:10.3390/geosciences8040112
- Petroselli, A., Asgharinia, S., Sabzevari, T. & Saghafian, B. (2020) Comparison of design peak flow estimation methods for ungauged basins in Iran. *Hydrol. Sci. J.* **65**(1), 127–137. Taylor & Francis. doi:10.1080/02626667.2019.1686506
- Petroselli, A. & Grimaldi, S. (2018) Design hydrograph estimation in small and fully ungauged basins: a preliminary assessment of the EBA4SUB framework. *J. Flood Risk Manag.* **11**, S197–S210. doi:10.1111/jfr3.12193
- Piscopia, R., Petroselli, A. & Grimaldi, S. (2015) A software package for predicting design-flood hydrographs in small and ungauged basins. *J. Agric. Eng.* **46**(2), 74–84. doi:10.4081/jae.2015.432

- Poser, K. & Dransch, D. (2010) Volunteered geographic information for disaster management with application to rapid flood damage estimation. *Geomatica* **64**(1), 89–98.
- POUGET, M. (1980) *SOL-VEGETATION dans les steppes sud-algéroises*.
- Pulvirenti, L., Chini, M., Pierdicca, N., Guerriero, L. & Ferrazzoli, P. (2011) Flood monitoring using multi-temporal COSMO-skymed data: Image segmentation and signature interpretation. *Remote Sens. Environ.* **115**(4), 990–1002. Elsevier Inc. doi:10.1016/j.rse.2010.12.002
- RAMADE, F. (2006) Des catastrophes naturelles. In: *Des catastrophes naturelles* (D. Paris, ed.), 1. 2006.
- Refsgaard, J. C. & Henriksen, H. J. (2004) Modelling guidelines - Terminology and guiding principles. *Adv. Water Resour.* **27**(1), 71–82. doi:10.1016/j.advwatres.2003.08.006
- Refsgaard, J. C. & Knudsen, J. (1996) Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resour. Res.* **32**(7), 2189–2202. doi:10.1029/96WR00896
- Reghezza, M. (2007) Réflexions autour de la vulnérabilité métropolitaine : la métropole parisienne face au risque de crue centennale . (*Doctoral Diss. Univ. Nanterre-Paris X*).
- Ribeiro, C., Thilsted, W. & Guedes, R. (2007) Roughness length classification of Corine Land Cover classes. *Proc. Eur. Wind energy Conf. Milan, Italy* **710**(January 2007), 110.
- Richardson, J. R. & Julien, P. Y. (1994) Suitability of simplified overland flow equations. *Water Resour. Res.* **30**(3), 665–671. doi:0043.1397/94/93WR-03098
- Richardson, S. D. & Reynolds, J. M. (2000) An overview of glacial hazards in the Himalayas **66**, 31–47.
- Rollason, E., Bracken, L. J., Hardy, R. J. & Large, A. R. G. (2018) The importance of volunteered geographic information for the validation of flood inundation models. *J. Hydrol.* **562**(April), 267–280. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.05.002
- Rüther, N. & Olsen, N. R. B. (2007) Modelling free-forming meander evolution in a laboratory channel using three-dimensional computational fluid dynamics. *Geomorphology* **89**(3–4), 308–319. doi:10.1016/j.geomorph.2006.12.009
- Sagl, G., Delmelle, E. & Delmelle, E. (2014) Mapping collective human activity in an urban environment based on mobile phone data. *Cartogr. Geogr. Inf. Sci.* **41**(3), 272–285. doi:10.1080/15230406.2014.888958
- Sakaki, T., Makoto, O. & Yutaka, M. (2010) Earthquake Shakes Twitter Users: Real-time Event Detection by Social Sensors. *WWW '10 Actes la 19e conférence Int. sur le World Wide Web* 851–860. doi:https://doi.org/10.1145/1772690.1772777
- Sampson, C. C., Smith, A. M., Bates, P. D., Neal, J. C., Alfieri, L. & Freer, J. E. (2015) A high resolution global flood hazard model. *Water Resour. Res.* **51**(9), 7358–7381.

doi:10.1002/2015WR016954.Received

- Samuels, P. G., Morris, M., Sayers, P. & Creutin, J. (2010) A framework for integrated flood risk management.
- Sayama, T., Tatebe, Y., Iwami, Y. & Tanaka, S. (2015) Hydrologic sensitivity of flood runoff and inundation : 2011 Thailand floods in the Chao Phraya River basin (1), 1617–1630. doi:10.5194/nhess-15-1617-2015
- Sayers, P., Galloway, G., Penning-rowsell, E., Yuanyuan, L. & Fuxin, S. (2014) Strategic flood management : ten ‘ golden rules ’ to guide a sound approach. *Int. J. River Basin Manag.* (October). doi:10.1080/15715124.2014.902378
- Schneiderbauer, S., Calliari, E., Eidsvig, U. & Hagenlocher, M. (2017) The most recent view of vulnerability. In: *Joint Research Centre (European Commission).*, 1–27.
- Scholten, H., Refsgaard, J. C. & Kassahun, A. (2004) Structuring multidisciplinary knowledge for model based water management: the HarmoniQuA approach. *iEMSs 2004 Int. Congr. Complex. Integr. Resour. Manag. Int. Environ. Model. Softw. Soc. Osnabrück, Ger.* (January).
- Sebastian, A., Juan, A. & Bedient, P. B. (2022) Urban flood modeling: Perspectives, challenges, and opportunities. In: *Coastal Flood Risk Reduction: The Netherlands and the U.S. Upper Texas Coast*, 47–60. Elsevier. doi:10.1016/B978-0-323-85251-7.00005-6
- See, L. M., Comber, A., Estima, J. & Fritz, S. (2016) Crowdsourcing , Citizen Science or Volunteered Geographic Information ? The Current State of Crowdsourced Geographic Information. *Int. J. Geo-Information* (April). doi:10.3390/ijgi5050055
- Seejata, K., Yodying, A., Wongthadam, T., Mahavik, N. & Tantanee, S. (2018) Assessment of flood hazard areas using Analytical Hierarchy Process over the Lower Yom Basin, Sukhothai Province. *Procedia Eng.* **212**, 340–347. No longer published by Elsevier. doi:10.1016/J.PROENG.2018.01.044
- Segura-Beltrán, F., Sanchis-Ibor, C., Morales-Hernández, M., González-Sanchis, M., Bussi, G. & Ortiz, E. (2016) Using post-flood surveys and geomorphologic mapping to evaluate hydrological and hydraulic models: The flash flood of the Girona River (Spain) in 2007. *J. Hydrol.* **541**, 310–329. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.04.039
- Senaratne, H., Mobasher, A., Ali, A. L., Capineri, C. & Haklay, M. (Muki). (2017) A review of volunteered geographic information quality assessment methods. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* **31**(1), 139–167. doi:10.1080/13658816.2016.1189556
- Shah, M. A. R., Rahman, A. & Chowdhury, S. H. (2018) Challenges for achieving sustainable flood risk management. *J. Flood Risk Manag.* **11**, S352–S358. Blackwell Publishing Inc. doi:10.1111/JFR3.12211
- Shi, P. (2019) Hazards, Disasters, and Risks. In: *Disaster Risk Science*, 1–48. Nature Publishing Group. doi:10.1007/978-981-13-6689-5_1

- Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S. W., Gupta, V. K., Karambiri, H., Liang, X., McDonnell, J. J., et al. (2012) IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003 – 2012 : Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrol. Sci. J.* **66**67, 2003–2012. doi:10.1623/hysj.48.6.857.51421
- Skhakhfa, I. D. & Ouerdachi, L. (2016) Hydrological modelling of Wadi ressoul watershed, Algeria, by HEC-HMS model. *J. Water L. Dev.* **31**(1), 139–147. doi:10.1515/jwld-2016-0045
- Smith, L., Liang, Q., James, P. & Lin, W. (2017) Assessing the utility of social media as a data source for flood risk management using a real-time modelling framework. *J. Flood Risk Manag.* **10**(3), 370–380. doi:10.1111/jfr3.12154
- So, C., Ferreira, S., Poto, K. & Kapovi, M. (2022) Nature-Based Solutions for Flood Mitigation and Resilience in Urban Areas. *Environ. Socio-Economic Asp.* (May 2021), 59–78. doi:10.1007/698
- Sogreah, F. (1999) *Plan de prevention des risques inondation-Bassin de risque de la cesse.*
- Solomatine, D. P. & Wagener, T. (2011) Hydrological Modeling. *Treatise Water Sci.* **2**, 435–457. doi:10.1016/B978-0-444-53199-5.00044-0
- Sorensen, J. H. (2000) HAZARD WARNING SYSTEMS:REVIEW OF 20 Y EARS OF PROGRESS. *Nat. HAZARDS Rev.* **Vol. 1**, No(May), 119–125.
- Stelling, G. S. & Verwey, A. (2005) Numerical Flood Simulation. *Encycl. Hydrol. Sci.* (1966), 1–14. doi:10.1002/0470848944.hsa025a
- Sui, D., Elwood, S. & Goodchild, M. (2013) Crowdsourcing geographic Knowledge: Volunteered geographic information (VGI) in theory and practice. *Crowdsourcing Geogr. Knowl. Volunt. Geogr. Inf. Theory Pract.* **9789400745**, 1–396. doi:10.1007/978-94-007-4587-2
- Szymczak, T. & Krężałek, K. (2018) Prognostic Model of Total Runoff and Its Components From a Partially Urbanized Small Lowland Catchment. *Acta Sci. Pol. Form. Circumiectus* **3**(3), 185–203. doi:10.15576/asp.fc/2018.17.3.185
- Tanguy, M. (2012) *Cartographie du risque d'inondation en milieu urbain adaptée à la gestion de crise analyse préliminaire.Rapport de rechercheN° R1395, 322 Ministère de la Sécurité publique du Québec.*
- Tanim, A. H., McRae, C. B., Tavakol-davani, H. & Goharian, E. (2022) Flood Detection in Urban Areas Using Satellite Imagery and Machine Learning. *Water (Switzerland)* **14**(7). doi:10.3390/w14071140
- Tann, L. Von Der, Sterling, R., Zhou, Y. & Metje, N. (2020) ScienceDirect Systems approaches to urban underground space planning and management – A review. *Undergr. Sp.* **5**(2), 144–166. doi:10.1016/j.undsp.2019.03.003
- Tarrant, O. & Agency, E. (2018) Identifying the signs of weakness , deterioration and damage

- to flood defence infrastructure from remotely sensed data and mapped information. *J Flood Risk Manag.* **11**(03), 317–330. doi:10.1111/jfr3.12326
- Tate, E., Mu, C. & Suchan, J. (2019) Uncertainty and Sensitivity Analysis of the HAZUS-MH Flood Model. *Nat. Hazards Rev.* **16**(03), 04014030. doi:10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000167
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D. & Kim, S. (2017) Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environ. Model. Softw.* **90**(2017), 201–216. doi:10.1016/j.envsoft.2017.01.006
- TODINI, E. (1988) No TitleВорона. *J. Hydrol.* **1**(2), 1–12.
- Trojan, J., Schade, S., Lemmens, R. & Frantál, B. (2019) Citizen science as a new approach in Geography and beyond : Review and reflections **27**(4), 254–264. doi:10.2478/mgr-2019-0020
- Tu, Z. (2021) RAPIQUE : Rapid and Accurate Video Quality. *IEEE Open J. Signal Process.* **2**(June), 425–440. IEEE. doi:10.1109/OJSP.2021.3090333
- U.S. Army Corps of Engineers, 2010. (2010) US Army Corps of Engineers (Corps or USACE) Civil Works SUMMARY Agency Recovery Act Plan (March).
- US Army Corps of Engineers. (2016) Hydrologic Modeling System HEC-HMS User’s Manual CPD-74A (Agosto), 598. Retrieved from http://www.hec.usace.army.mil/software/hechhms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_4.0.pdf
- Vaze, J., Chiew, F. H. S., Perraud, J. M., Viney, N., Post, D., Teng, J., Wang, B., et al. (2010) Rainfall-runoff modelling across southeast Australia: Datasets, models and results. *Aust. J. Water Resour.* **14**(2), 101–116. doi:10.1080/13241583.2011.11465379
- Vidal, J. P., Moisan, S., Faure, J. B. & Dartus, D. (2007) River model calibration, from guidelines to operational support tools. *Environ. Model. Softw.* **22**(11), 1628–1640. doi:10.1016/j.envsoft.2006.12.003
- Vojtek, M., Petroselli, A., Vojteková, J. & Asgharinia, S. (2019) Flood inundation mapping in small and ungauged basins: Sensitivity analysis using the EBA4SUB and HEC-RAS modeling approach. *Hydrol. Res.* **50**(4), 1002–1019. IWA Publishing. doi:10.2166/nh.2019.163
- Vojtek, M. & Vojteková, J. (2019) Land use change and its impact on surface runoff from small basins: A case of Radiša basin. *Folia Geogr.* **61**(2), 104–125.
- Wagener, T. & Gupta, H. V. (2005) Model identification for hydrological forecasting under uncertainty. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* **19**(6), 378–387. doi:10.1007/s00477-005-0006-5
- Wagener, T. & Montanari, A. (2011) Convergence of approaches toward reducing uncertainty in predictions in ungauged basins. *WATER Resour. Res.* **47**(April 2010), 1–8. doi:10.1029/2010WR009469

- Wainwright, J. & Mulligan, M. (2013) *Environmental Modelling Finding Simplicity in Complexity*. John Wiley & Sons Ltd.
- Walega, A., Amatya, D. M., Caldwell, P., Marion, D. & Panda, S. (2020) Assessment of storm direct runoff and peak flow rates using improved SCS-CN models for selected forested watersheds in the Southeastern United States. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **27**(2019), 100645. doi:10.1016/j.ejrh.2019.100645
- Wang, G., Mang, S., Cai, H., Liu, S., Zhang, Z., Wang, L. & Innes, J. L. (2016) Integrated watershed management : evolution , development and emerging trends. *J. For. Res.* (July). Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/s11676-016-0293-3
- Wang, N. & Xuefeng, C. (2023) A Modified SCS Curve Number Method for Temporally Varying Rainfall Excess Simulation. *Water* (2005). doi:https://doi.org/10.3390/w15132374
- Weber, A. K., Wernhart, S., Stickler, T., Fuchs, B. & Balas, M. (2019) Risk Communication on Floodings : Insights Into the Risk Awareness of Migrants in Rural Communities in Austria. *Mt. Res. Dev.* **39**(2). doi:https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-18-00060.1
- Wheater, H., Soroosh, S. & K. D, S. (2008) Modelling hydrological processes in arid and semi-arid areas : an introduction to the workshop. *Cambridge Univ. Press* 1–10.
- Wieczorek, J., Guo, Q. & Hijmans, R. J. (2004) The point-radius method for georeferencing locality descriptions and calculating associated uncertainty. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* **18**(8), 745–767. doi:10.1080/13658810412331280211
- Willems, P. & Vrac, M. (2011) Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change. *J. Hydrol.* **402**(3–4), 193–205. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.02.030
- Wilson, M. (2021) Types of floods and flood features. In: *Dynamic planet: exploring geological disasters and environmental change*.
- Yamani, K., Hazzab, A., Sekkoum, M. & Slimane, T. (2016) Mapping of vulnerability of flooded area in arid region . Case study : area of Ghardaï. *Model. Earth Syst. Environ.* doi:10.1007/s40808-016-0183-x
- Yana, E., Sarahid, A. & Walter, Y. (2023) *Optimization of hydraulic simulation , computational time , and mesh size of 2D and 3D models applied to the main open channel of the Pocsi district , city of Arequipa*. doi:https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3131526/v1 License:
- Yi, B., Chen, L., Zhang, H., Singh, V. P., Jiang, P., Liu, Y. & Guo, H. (2022) A time-varying distributed unit hydrograph method considering soil moisture. *Hydrol. Earth Syst. Sci* 5269–5289. doi:https://doi.org/10.5194/hess-26-5269-2022
- Young, P. C. (2006) The data-based mechanistic approach to the modelling , forecasting and control of environmental systems. *Annu. Rev. Control* **30**, 169–182. doi:10.1016/j.arcontrol.2006.05.002

- Zejin, Liu, J., Mei, C., Shao, W., Wang, H. & Yan, D. (2019) Comparative Analysis of Building Representations in TELEMAC-2D for Flood Inundation in Idealized Urban Districts. *Water (Switzerland)*. doi:10.3390/w11091840
- Zegelew, D. G. & Melesse, A. M. (2018) Applicability of a Spatially Semi-Distributed Hydrological Model for Watershed Scale Runoff Estimation in Northwest Ethiopia. *Water (Switzerland)*. doi:10.3390/w10070923
- Zerey, W. El, Salah Eddine Bachir, Bouiadjra Mohamed, B. & Mederbal, K. (2009) L'écosystème steppique face à la désertification Cas de la région d'El Bayadh, Algérie. *[VertigO] La Rev. électronique en Sci. l'environnement* **09 N02**.

ANNEXE

ANNEXE 1 : Estimation de la rétention initiale P_0 donnée par le tableau (Sogreah, 1999)

Couverture végétale	Morphologie	Pente %	Terrain sable grossier	Terrain limoneux	Terrain argileux ou rocaillieux compact
Bois	Presque plat	0 - 5	90	65	50
Garrigue	ondulé	5 - 10	75	55	35
	montagneux	10 - 30	60	45	25
	Presque plat	0 - 5	85	60	50
Pâturages	ondulé	5 - 10	80	50	30
	montagneux	10 - 30	70	40	25
	presque plat	0 - 5	65	35	25
Cultures	ondulé	5 - 10	50	25	10
	montagneux	10 - 30	35	10	0

ANNEXE 2: CORINE Land Cover (CLC) nomenclature (Source: http://www.igeo.pt/gdr/pdf/CLC2006_nomenclature_addendum.pdf).

Level 1	Level 2	Level 3
1 Artificial surfaces	11 Urban fabric	111 Continuous urban fabric 112 Discontinuous urban fabric
	12 Industrial, commercial and transport units	121 Industrial or commercial units 122 Road and rail networks and associated land 123 Port areas 124 Airports
	13 Mine, dump and construction sites	131 Mineral extraction sites 132 Dump sites 133 Construction sites
	14 Artificial, non-agricultural vegetated areas	141 Green urban areas 142 Sport and leisure facilities
2 Agricultural areas	21 Arable land	211 Non-irrigated arable land 212 Permanently irrigated land 213 Rice fields
	22 Permanent crops	221 Vineyards 222 Fruit trees and berry plantations 223 Olive groves
	23 Pastures	231 Pastures
	24 Heterogeneous agricultural areas	241 Annual crops associated with permanent crops 242 Complex cultivation patterns 243 Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation 244 Agro-forestry areas
3 Forest and semi natural areas	31 Forests	311 Broad-leaved forest 312 Coniferous forest 313 Mixed forest
	32 Scrub and/or herbaceous vegetation associations	321 Natural grasslands 322 Moors and heathland 323 Sclerophyllous vegetation 324 Transitional woodland-shrub
	33 Open spaces with little or no vegetation	331 Beaches, dunes, sands 332 Bare rocks 333 Sparsely vegetated areas 334 Burnt areas 335 Glaciers and perpetual snow
	41 Inland wetlands	411 Inland marshes 412 Peat bogs
	42 Maritime wetlands	421 Salt marshes 422 Salines 423 Intertidal flats
5 Water bodies	51 Inland waters	511 Water courses 512 Water bodies
	52 Marine waters	521 Coastal lagoons 522 Estuaries 523 Sea and ocean

ANNEXE 3 : Tableau d'intensité - Durée - Période de retour

Temps	Fréquence (années) – Intensité (mm / min)							
(Minute)	2	5	10	25	50	75	100	500
5	47.67	57.62	66.51	80.39	92.79	100.91	107.1	149.42
10	31.09	37.59	43.38	52.44	60.53	65.82	69.86	97.47
15	24.22	29.27	33.79	40.84	47.14	51.27	54.41	75.91
20	20.28	24.52	28.3	34.21	39.48	42.94	45.57	63.58
25	17.68	21.37	24.66	29.81	34.41	37.42	39.71	55.41
30	15.8	19.10	22.04	26.64	30.75	33.44	35.49	49.52
35	14.37	17.36	20.04	24.23	27.96	30.41	32.28	45.03
40	13.23	15.99	18.46	22.31	25.75	28.01	29.73	41.47
45	12.3	14.87	17.17	20.75	23.95	26.05	27.64	38.57
50	11.53	13.94	16.09	19.45	22.44	24.41	25.91	36.14
55	10.87	13.14	15.17	18.34	21.16	23.02	24.43	34.08
60	10.3	12.46	14.38	17.38	20.06	21.81	23.15	32.3
120	6.72	8.13	9.38	11.34	13.08	14.23	15.10	21.07
180	5.24	6.33	7.30	8.83	10.19	11.08	11.76	16.41
240	4.38	5.3	6.12	7.39	8.53	9.28	9.85	13.74
300	3.82	4.62	5.33	6.44	7.44	8.09	8.59	11.98
360	3.42	4.13	4.76	5.76	6.65	7.23	7.67	10.7
480	2.86	3.46	3.99	4.82	5.57	6.05	6.43	8.97
720	2.23	2.69	3.11	3.76	4.34	4.72	5.00	6.98
1080	1.74	2.10	2.42	2.93	3.38	3.67	3.9	5.44
1440	1.45	1.76	2.03	2.45	2.83	3.08	3.26	4.55

Liste des publications et Communications

Publications internationales

Azzedine Otmani, Abdelkrim Hazzab, M'hamed Atallah, Ciro Apollonio et Andrea Petroselli. (2022). **Using volunteered geographic information data for flood mapping–Wadi Deffa El-Bayadh Algeria**. Journal of Applied Water Engineering and Research:

<https://doi.org/10.1080/23249676.2022.2155716>

Communications internationales

1) Azzedine Otmani, Abdelkrim Hazzab, M'hamed Atallah, Ciro Apollonio et Andrea Petroselli, “Une approche intégrée de l’analyse des crues éclair dans les bassins versants non jaugés à l’aide d’enquêtes post-inondation : l’étude de cas oued Deffa, El- Bayadh, Algérie“. Séminaire international vulnérabilité, prévention, adaptation et résilience des territoires Le 20 et 21 mai 2023 Constantine.

2) Azzedine Otmani, Abdelkrim Hazzab, M'hamed Atallah, Ciro Apollonio et Andrea Petroselli, “ Modélisation hydrologique des crues extrêmes dans les bassins versants du sud-ouest Algérien : l’étude de cas oued Deffa El Bayadh Algérie“. 1 st international colloquium hybrid water & environment sharing to preserve Maghnia 07 – 09 June 2023

Communications nationales

1) Azzedine Otmani, Abdelkrim Hazzab, M'hamed Atallah “Modélisation numérique des écoulements à surface libre“, dixième journée doctorale de physique à l’Université Dr. MOULAY Tahar Saida 06 juillet 2019.

2) Azzedine Otmani, Abdelkrim Hazzab, M'hamed Atallah “Modélisation 1Det 2D dans la gestion des risques des inondations“, Journée doctorale de physique (2022), Saida 18 juin 2022.

