



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

**FACULTE DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : BEKKAYE HADDA

DOMAINE : Sciences et Techniques

FILIERE : Hydraulique

OPTION : Ressources Hydrauliques

Thème

**Analyse Et Evaluation De La Vulnérabilité Aux Inondations
Du Bassin Versant De Oued M'zi (Wilaya De Laghouat)**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom

Chettih Mohamed
Boulaghmen Farida
Hamlat Abdelkader

Qualité

Président
Examinatrice
Rapporteur

2017-2018

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Tout d'abord je remercie **ALLAH** le tout puissant de m'avoir donné la force, le courage et la patience de mener à bien ce modeste travail.

Ma profonde gratitude et mes remerciements les plus chaleureux vont particulièrement à mon encadreur **Mr Hamlat Abdelkader** Maître de conférences à l'Université de Laghouat, de m'avoir suivi et dirigé tout au long de la réalisation de ce travail. Aussi, je le remercie pour sa disponibilité permanente, pour son orientation efficace et pour ses idées originales qui ont servi à enrichir ce mémoire.

Je remercie aussi Monsieur **Chettih Mohamed**, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de jury

Je suis très honorée par la présence de Madame **Boulaghmen Farida** qui a bien voulu examiner ce manuscrit et juger ce travail.

Je remercie profondément tous les enseignants, les membres techniques et administratifs de département de Génie Civil.

Ma pensée va à Mon Mari **H.Benniche** , qui a subi l'envers du décor...Merci pour l'intérêt que tu portes à mon travail, ta patience, ton soutien et tes encouragements à travers les mots doux et les prières, m'ont permis de ne jamais baisser les bras et d'atteindre mon but.

Enfin, Je tiens aussi à exprimer mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin dans la réalisation du présent travail particulièrement les directions suivantes :

- ✓ Direction de la protection civile de la wilaya de Laghouat.
- ✓ Direction de l'hydraulique de la wilaya de Laghouat.
- ✓ Direction de travaux publique de la wilaya de Laghouat.
- ✓ Conservation de forêts de la wilaya de Laghouat.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mon père et à ma mère.

À mon marie.

À mes chers frères et sœurs.

Je dédie à la famille de mon marée.

À toute ma famille.

et

À mes amis surtout Tourkia et Yousra .

H.Bekkaye

Résumé :

Cette étude d'analyse du processus pluie-débit des inondations dans le bassin d'Oued M'zi en utilisant un nouveau modèle Rainfall-Runoff-Inundation (RRI), qui simule simultanément les processus de ruissellement pluvial et les inondations en deux dimensions grâce aux équations de l'onde diffusive. Le modèle a été calé en se basant sur des crues récentes, dans notre étude le modèle a été calé sur la crue de 08 septembre 2015 et validé sur la crue de 30 septembre 2016. Les résultats des simulations montrent un bon accord avec une carte de l'inondation produite basée sur l'image satellitaire Sentinel-2. L'application du modèle a démontré que, même sur un bassin versant où les données disponibles sont limitées en quantité et en qualité, ce modèle peut apporter des informations utiles pour la mise en place de la gestion intégrée de l'eau par bassin versant.

Mots clefs : Oued M'zi ; modèle RRI ; inondation ; Sentinel ; Simulation ; pluie-débit

Abstract:

This analysis study of the rain-flow process of floods in the Watershed of Oued M'zi using a new Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) model, which simultaneously simulates the processes of rain runoff and floods in two dimensions due to the diffusive wave equations. The model was calibrated based on recent floods, in our study the model was calibrated on the flood of September 08, 2015 and validated on the flood of September 30, 2016 events. The simulation results show a good agreement with a flood map produced based on the Sentinel-2 satellite image. The application of the RRI model has shown that, even in a watershed where available data are limited in quantity and quality, this model can provide useful information for the implementation of integrated watershed management.

Keywords: Oued M'zi ; RRI model; flood; Sentinel; Simulation, Rainfall-Runoff-Inundation

ملخص

قمنا في هذه الدراسة بتحليل نمذجة تحول الأمطار إلى جريان سطحي و فيضانات في حوض واد مزي عن طريق تطبيق النموذج (Rainfall-Runoff-Inundation) RRI، و الذي يقوم بمحاكات تحول الأمطار إلى جريان سطحي و فيضانات في نفس الوقت عن طريق بعدين اثنين، بفضل معادلات الموجة المنتشرة. تمت معايرة النموذج على اساس الفيضانات الأخيرة، في دراستنا تمت معايرة النموذج على فيضان 08 سبتمبر 2015 و تمت مطابقته على فيضان 30 سبتمبر 2016. نتائج المحاكاة اظهرت تطابق جيد مع خريطة الفيضانات المستخرجة من صورة القمر الصناعي Sentinel-2. أظهرت النتائج أيضا بأن تطبيق هذا النموذج في أحواض التغذية التي تعاني من نقص في المعطيات الكمية والنوعية يمكنه ان يوفر نتائج جيدة لتنفيذ الادارة المتكاملة للمياه في حوض التغذية.

الكلمات المفتاحية : واد مزي، نموذج RRI، فيضان، حارس، محاكاة، تدفق امطار

Table des Matières

Remerciement	I
Dédicaces	II
Résumé	III
Table des Matières	V
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	IX
Liste des abréviations	X
Introduction	1
Chapitre I : Problèmes et enjeux associés aux inondations	
I.1 Généralités sur l'inondation	2
I.1.1 Inondation	2
I.1.2 Vulnérabilité	3
I.1.3 Aléa	3
I.1.4 Crue	4
I.2. Le processus de formation des crues	5
I.3 La période de retour de crues	5
I.4 Paramètres influençant les inondations	6
I.4.1 Influence des facteurs naturels	6
I.4.2 Influence des facteurs anthropiques	7
I.5. Les inondations en Algérie	7
Chapitre II : Modèle RRI	
II.1. Un modèle hydrologique, définition et classification	9
II.1.1 Définitions	9
II.1.2 Classification des modèles	10
II.1.2.1 Représentation des processus	10
II.1.2.2 Représentation de l'espace	11
II.1.3 Discrétisation temporelle	11
II.2. Description du modèle RRI	12
II.2.1 Structure du modèle RRI	12
II.2.2 Les équations du modèle	13
II.2.3 Modèle de routage fluvial unidimensionnel	17
II.2.4 Échange d'eau entre la rivière et la surface	17
II.2.5 Schéma numérique	19
Chapitre III : Présentation de la région d'étude	
III.1 Contexte et cadre générale	21

III.2. Caractéristique géoclimatiques	21
III.2.1. Relief	21
III.2.2. Géologie de la zone d'étude	23
III.2.3. Climatologie	23
III.2.3.1. Pluviométrie	24
III.3. Réseau hydrographique	24
III.4. Sol et occupation de sol	26
III.5. Inondations et environnement	28
Chapitre VI : Application du modèle	
VI.1 Configuration du modèle RRI	31
VI.2 Préparation des entrées du modèle RRI	33
VI.3. Modèle Numérique de Terrain (MNT)	36
VI.3.1. Flow accumulation : Accumulation de flux	37
VI.3.2. Direction de flux : Flow Direction	39
VI.3.3. Carte d'Occupation du sol	40
Chapitre V : Résultats et interprétations	
V.1 Résultats et discussions	41
V.2. Solutions proposées	47
Conclusion Générale	49
Bibliographie	XI
Annexe	VI

Liste des Figures

Figure I.1	Type de catastrophes survenues dans le monde de 1990 à 2007	2
Figure I.2	Aléa, Enjeux et Risque	4
Figure II.1	Modélisation de la plaine inondable par le modèle RRI	12
FigureIII.1	<i>Situation du bassin versant de Oued M'zi</i>	21
Figure III.2	Modèle numérique du terrain de la zone d'étude	22
FigureIII.3	Chronique des précipitations mensuelles a la station de Laghouat	24
FigureIII.4	Réseau hydrographique du bassin versant d'Oued M' zi	25
FigureIII.5	La densité de drainage du bassin versant d'Oued M' zi	26
FigureIII.6	Carte d'occupation du sol (FAO)	27
FigureIII.7	Crue de Oued M'zi (30 septembre 2016)	28
FigureVI.1	Organigramme de la méthodologie d'application du modèle RRI	32
FigureVI.2	Capture d'écran de l'interface graphique du modèle RRI	32
FigureVI.3	Capture d'écran de l'interface graphique du modèle RRI 'DATA'	33
FigureVI.4	a, b La distribution globale des précipitations le 08 septembre 2015 et 30 septembre 2016 respectivement	35
FigureVI.5	Le Modèle Numérique de Terrain de la région d'étude	37
FigureVI.6	Matrice d'explication. Tutorial d'ArcGis	38
FigureVI.7	flux accumulés ou surfaces drainées dans le bassin d'Oued M' zi	38
FigureVI.8	Détermination de l'accumulation de flux. Tutorial d'ArcGis	39
FigureVI.9	Directions d'écoulement ou directions de flux dans le bassin d'Oued M' zi	40
FigureVI.10	Extrait de la carte d'occupation du sol (FAO)	40
Figure V.1	Capture d'écran de l'interface graphique du modèle RRI (RRI Viewer) simulation du débit	41
Figure V.2	Capture d'écran de l'interface graphique du modèle RRI (RRI Viewer) simulation des hauteurs des eaux	42

Figure V.3	Carte d'inondation extrait à partir d'une image satellitaire Sentinel-2	43
Figure V.4	la répartition spatiale des hauteurs d'eau pendant la période de simulation (Crue du 08septembre 2015)	44
Figure V.5	la répartition spatiale des hauteurs d'eau pendant la période de simulation (Crue du 16septembre 2016)	45
Figure V.6	Capture d'écran de l'interface graphique du modèle RRI (RRI Viewer) Hydrogramme de crue produit par le modèle	46
Figure V.7	Capture d'écran de l'interface graphique du modèle RRI (RRI Viewer) : Simulation de débit	46
Figure V.8	La suppression d'une partie de la butte rocheuse (SETS 2017)	48

Liste des tableaux

Tableau III.1	Crue de Oued M'zi (30 septembre 2016): Historique des inondations d'Oued M'zi (Direction de la Protection Civile 2018)	24
Tableau VI.1	le temps de calcul suivant les caractéristiques de l'ordinateur (ICHARM2016)	25
Tableau VI.2	Les caractéristiques des stations pluviométriques	28
Tableau VI.3	Résumés des caractéristiques des produits utilisés	30

Liste des Abréviations

RRI	Rainfall-Runoff-Inundation
SIWI	Stockholm International Water Institute
GSMaP	Global satellite Mapping of Precipitation
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
NASA	National Aeronautics and Space Administration, en français l'Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace
MNT	Modèle Numérique de Terrain
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
FAO	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

Introduction générale

Introduction générale

L'Algérie, est parmi les régions méditerranéennes les plus affectées par les crues qui engendrent des inondations dues généralement aux débordements des cours d'eau traversant des villes et des agglomérations. Ces crues dont l'apparition est soudaine, souvent difficilement prévisibles, sont généralement liées à des épisodes pluvieux intenses et se manifestent sur des bassins de taille modérée. Les modèles pluie-débit sont des outils très utilisés suite à la non accessibilité débimétriques que les données pluviométriques. L'intérêt des modèles n'est pas seulement de reproduire des débits qui n'ont pas été observés sur un bassin donné (reconstitution sur des longues périodes, simulation d'événements extrêmes), mais aussi de simuler les effets de modifications du bassin ou du climat sur les écoulements, et enfin, d'être appliqué à des bassins non jaugés.

Cette étude vise à analyser le processus pluie-débit et l'inondation dans le bassin versant d'Oued M'zi, le choix du modèle s'est donc porté sur un modèle hydrologique distribué. Ce modèle, appelé RRI (Rainfall-Runoff-Inundation model) développée par le Centre international de gestion des risques associés à l'eau (ICHARM). Le modèle a été appliquée dans plusieurs bassins versant dans le monde (Thaïlande, Pakistan, Japon, Indonésie, etc...).

Le modèle RRI simule simultanément les processus de ruissellement pluvial et les inondations en deux dimensions grâce aux équations de l'onde diffusive il permet de calcule les hauteurs d'eau dans chaque cellule régulière d'une grille et à chaque pas de temps, et peut donc simuler la propagation dynamique des ondes de crue sur les plaines inondables à topographie complexe.

La première partie de ce mémoire présente une recherche bibliographique sur les problèmes et enjeux associe aux inondations, dans la deuxième partie nous présentons le modèle RRI. La troisième et quatrième partie serontréservées respectivementà la présentation de la région d'étudeet la mise en œuvredu modèle RRI sur le domaine d'étude. La cinquième et dernière partie est consacrée à la présentation et la discussion des résultats obtenus.

I.1 Généralités sur les inondations

I.1.1 Inondation :

Les inondations sont parmi les catastrophes naturelles qui causent des pertes et des dommages matériels dans le monde. Elles constituent le risque le mieux distribué sur la planète (White, 1999). De plus, leur grande fréquence dans certaines régions du globe, leur dépendance face aux changements climatiques et la pression démographique de plus en plus forte sur les rives des cours d'eau en font des événements de plus en plus préoccupants et difficiles à gérer. Selon l'Institut international de l'eau de Stockholm (SIWI), pour la période 1996-2005, environ 80 % des catastrophes naturelles étaient d'origine météorologique ou hydraulique, et les inondations auraient lors de cette décennie affecté en moyenne 66 millions de personnes par an entre 1973 et 1997. Ce sont les catastrophes naturelles qui produisent le plus de dégâts.

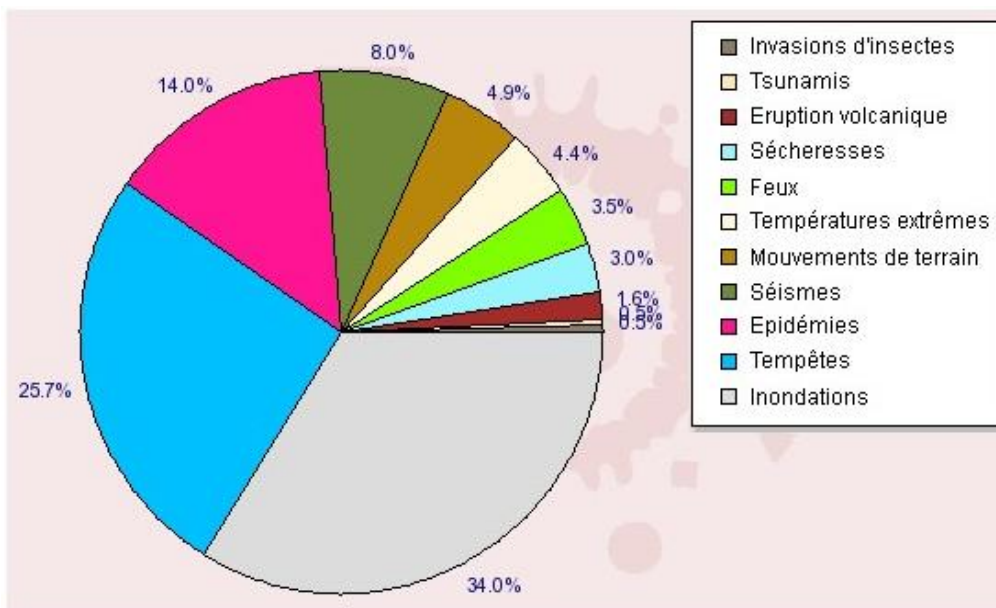


Figure I.1 : Type de catastrophes survenues dans le monde de 1990 à 2007
(Source: EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database, 2008)

L'inondation est l'un des risques majeurs naturels présentés par une submersion, plus au moins rapide, d'une zone habituellement hors d'eau, pouvant être habitée, avec des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement variables. « L'inondation est une submersion (rapide ou lente) d'une zone pouvant être habitée. Elle correspond au débordement des eaux lors d'une crue. Une crue correspond à l'augmentation du débit d'un cours d'eau, dépassant plusieurs fois le débit moyen ; elle se traduit par une augmentation de la hauteur d'eau » (XAVIER .L et JEAN.P)

I.1.2 Vulnérabilité

La vulnérabilité de l'occupation des sols aux inondations traduit le fait que les dommages économiques directs et indirects, et plus au moins sévères, apparaissent lorsque l'eau inonde une parcelle. De façon classique, des courbes de dommages qui relient entre eux les paramètres de profondeur d'eau et le coût des dommages correspondants peuvent être construites d'une manière classique. La vulnérabilité se définit dans le même espace que l'aléa, à savoir en termes de profondeur, durée et période de retour (h, d, T) (Gilard et Gendreau, 1998).

Par exemple, une vulnérabilité maximale, pour un aléa d'intensité I , signifie la ruine de l'aménagement ou la mort des personnes concernées si une crue d'intensité supérieure ou égale à I se produit ce qui implique que la vulnérabilité est étroitement liée à l'intensité du phénomène.

L'évaluation des dommages occasionnés par une inondation est particulièrement complexe) car ils peuvent être directs ou indirects. Les impacts indirects sont les plus délicats à appréhender et chiffrer car ils dépendent de la sensibilité des secteurs touchés et sont parfois intangibles, c'est à dire qu'il n'existe pas d'unité de mesure, en particulier monétaire, permettant de les comparer et de les classer. Pour contourner ce problème, on suppose fréquemment que dommages indirects et tangibles directs sont proportionnels, de sorte que l'évaluation des dommages tangibles directs soit suffisante (DAMIEN-2003).

I.1.3 Aléa :

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

La notion de “vitesse” du courant est parfois utilisée comme paramètre complémentaire de caractérisation de l’aléa mais elle est encore assez mal connue. Sa mesure ou sa modélisation posent des problèmes théoriques et pratiques puisque actuellement, seule la vitesse moyenne par section en travers, peu pertinente en terme d’aléa est accessible (Gilard et Gendreau, 1998).

Selon leur intensité et leur occurrence, les degrés d’aléa peuvent être classés comme suit :

- ✓ Aléa majeur : aléa très exceptionnel, les risques de dommage sont extrêmement graves et immédiats. Les vies humaines sont directement menacées.
- ✓ Aléa fort : les risques de dommage y sont très redoutables. En général, il n’existe pas de mesures de protection efficaces et économiquement opportunes.
- ✓ Aléa moyen : zone concernée par des manifestations physiques encore très dommageables. En général, des mesures de protection sont possibles.
- ✓ Aléa faible : zone concernée par des manifestations très limitées toutefois, on n’y est pas à l’abri localement des conséquences de tout autre aléa, notamment en cas d’événement très exceptionnel.



Figure I.2 : Aléa, Enjeux et Risque.

I.1.4 Crue :

La crue correspond à l’augmentation de la quantité d’eau qui s’écoule dans la rivière et peut concerner l’ensemble du lit majeur de la rivière. De nombreux géographes et hydrologues ont adopté le critère qu’une rivière est en crue lorsque son débit est trois à cinq fois supérieur à son débit moyen. De façon plus pratique, on admet qu’une rivière est en crue lorsqu’elle déborde des limites de son lit mineur. Il s’agit d’un phénomène naturel périodique qui n’est exceptionnel que lorsque les

débats deviennent considérables par rapport à son module ; on parle alors de crue critique, laquelle peut engendrer une inondation sur les zones riveraines.

Une crue se caractérise par son hydro gramme graphique qui représente les variations de débit en fonction du temps. Plus précisément, c'est la partie montante de Cette hydro gramme qui est appelé « crue », la partie descendante étant « la décrue ». Une crue se définit par différents critères : sa genèse, sa durée, sa fréquence, son débit de pointe et son volume (*Salomon, 1997*).

I.2. Le processus de formation des crues :

Comprendre ce processus de formation des crues revient à analyser les différents Facteurs concourant à la formation et à l'augmentation temporaire des débits d'un Cours d'eau. En simplifiant, on distingue :

- **L'eau mobilisable** : constituée de l'eau reçue par le bassin versant.
- **Le ruissellement** : qui correspond à la part de l'eau qui n'a pu s'infiltrer dans le sol. Il dépend de la nature du sol, de sa pente, de son occupation de surface et de l'intensité de l'épisode pluvieux.
- **Le temps de concentration** : qui est défini par la durée nécessaire pour
- Qu'une goutte d'eau partant du point le plus éloigné de l'exutoire du bassin versant parvienne jusqu'à celui-ci.
- **La propagation de l'onde de crue** : qui est fonction de la structure du lit et de la vallée alluviale, notamment de la pente et des caractéristiques du champ d'inondation (*Asnoui, 2014*).

I.3 La période de retour de crues :

On associe souvent à la notion de crue la notion de période de retour (crue décennale, centennale, millénaire, etc.) : plus cette période est grande, plus les débits et l'intensité sont importants.

Selon ce paramètre, on distingue :

- **Les crues fréquentes** : dont la période de retour est comprise entre un et deux ans.
- **Les crues moyennes** : dont la période de retour est comprise entre dix et vingt ans.
- **Les crues exceptionnelles** : dont la période de retour est de l'ordre de cent ans.
- **La crue maximale vraisemblable** : qui occupe l'intégralité du lit majeur. (*Yahiaoui, 2012*).

I.4 Paramètres influençant les inondations :

Un grand nombre de facteurs autres que celles dictés précédemment interviennent, souvent de façon aggravante, dans les dégâts occasionnés par les inondations. Parmi ces derniers, on peut rappeler l'influence des facteurs naturels et anthropiques (*Ledoux et al, 2006*).

I.4.1 Influence des facteurs naturels :

Surface et forme du bassin versant : ainsi pour une même surface, l'allure de l'hydrogramme de crue résultant d'une pluie donnée est très différente suivant la forme du bassin versant ; un bassin très allongé ne réagit pas comme un bassin de forme ramassée ce qui a amené l'utilisation d'un indice pour évaluer le « coefficient de compacité ». En principe plus cet indice est faible, plus la concentration des eaux apportées par les affluents est rapide et plus les crues risquent d'être brutales et bien différenciées (*Defrance, 2009*).

Configuration du relief des lits des cours d'eau : La pente exerce une influence directe sur la rapidité de l'écoulement et donc sur la puissance de la crue. Si le profil en long du cours d'eau est assimilable à une suite de segments plus ou moins pentus, il exerce une action visible sur la crue. Le profil en travers est aussi important ; pour un même débit de crue, un cours d'eau encaissé verra sa hauteur d'eau monter beaucoup plus vite qu'un cours d'eau à profil plus évasé. En contrepartie, ce dernier a de plus grands risques de débordements.

Densité des cours d'eaux et perméabilité du bassin versant : ainsi la densité des cours d'eau était fonction de la nature des terrains, le réseau est d'autant plus développé et complexe que le terrain est moins perméable. On comprend aisément que plus l'imperméabilité est forte, plus les eaux météoriques sont disponibles pour le ruissellement de surface. De ce point de vue, à priori les cours d'eau drainant les régions imperméables ont une plus forte probabilité à développer des crues dangereuses (*Baroco, 2006*).

Facteurs biogéographiques : la végétation joue un rôle climatique complexe, elle agit sur le ruissellement, retient une part des pluies, évapore l'eau, etc. L'on sait depuis longtemps qu'une couverture végétale dense réduit et ralentit considérablement l'écoulement. D'abord la forêt intercepte la pluie et la neige, cette dernière pouvant mettre très longtemps à fondre sous couvert.

Ensuite elle accroît fortement l'évapotranspiration ; pour la zone tempérée celle-ci atteint ou dépasse fréquemment 500 à 700 mm/an. On comprend facilement que cela limite le ruissellement direct et l'alimentation des cours d'eau. Bien souvent une végétation vigoureuse aux arbres dotés de racines nombreuses et bien enchevêtrées, constitue une excellente protection naturelle, quasi totale, contre l'érosion torrentielle. Inversement la destruction du couvert végétal constitue un facteur aggravant la puissance des crues. (*Ledoux, 2006*).

I.4.2 Influence des facteurs anthropiques :

Occupation de zones riveraines : la concentration des personnes et l'accumulation des biens dans les champs d'inondation génère le risque d'inondation par accroissement des enjeux, augmentation des vulnérabilités et absence de prévention-précaution.

- Imperméabilisation forte (conséquences d'aménagements urbains ou agricoles).
- Défiance des dispositifs de protection (digues, déversoirs) (*Ledoux et al, 2006*).

I.5 Les inondations en Algérie

Au cours de la décennie écoulée, nous avons pu avoir les données de quelques inondations parmi lesquelles

- ✚ Le 20 octobre 1993 (ouest algérien) : 22 décès et 14 blessés à Oued Rhiou (à Chlef). (*Boudjerda et al, 2005*).
- ✚ Mois d'octobre 1994, des inondations ont été signalées dans plusieurs régions du pays, bilan 60 décès et des dizaines de disparus au cours de dix jours d'inondations. (*Boudjerda et al, 2005*).
- ✚ Le 22 octobre 2000 : des inondations à l'ouest algérien, plus de 24 décès. (*Boudjerda et al, 2005*).
- ✚ Les 10 et 11 novembre 2001 : à Bab El Oued (Alger), les pluies diluviennes ont fait 733 victimes, 30 000 personnes sans-abris et d'importants dégâts matériels. (*Boudjerda et al, 2005*).
- ✚ Le 1er octobre 2008 : des pluies diluviennes s'étaient abattues sur la région de Ghardaïa, faisant dangereusement monter les cours d'eau. Au moins 33 personnes sont mortes, quatre-

vingt-quatre personnes ont été blessées et près de 600 maisons détruites dans des inondations très importantes. (*Boudjerda et al, 2005*).

- ✚ Le 09 octobre 2008 : dans la wilaya d'Aïn Defla, les intempéries ont causé six décès et huit autres blessés parmi la population, suite à une inondation qui a surpris la région. (*Boudjerda et al, 2005*).
- ✚ La nuit du 12 octobre 2008 a été fortement pluvieuse, de 20h45mn à 23h35 mn, de pluie ont été enregistrée, surtout dans les localités de Khemis Miliana et Sidi Lakhdar où la force de l'averse a fait que le revêtement bitumeux de la chaussée en certains endroits a été endommagé, de même que des habitations noyées par des eaux chargées de terre argileuse et de gravier. Des torrents de boue provenant des collines surplombant la ville de Khemis Miliana ont envahi la majorité des quartiers. Même la voie ferrée n'a pas été épargnée par ces inondations. (*Boudjerda et al, 2005*).
- ✚ Durant ce mois d'Octobre 2008, d'autres crues et inondations sont signalées à Batna (450 km au sud-est d'Alger) où deux personnes ont été emportées par les eaux d'oueds en crue. A Bechar, région habituellement désertique et aride, situé à plus de 1.000 km au sud-ouest d'Alger, au moins huit personnes sont mortes noyées dans des inondations qui l'ont frappé mercredi et jeudi 15 et 16 octobre 2008. (*Boudjerda et al, 2005*).
- ✚ Le soir du 01 octobre 2011 a été fortement pluvieuse de P=60 mm à la ville d'EL Bayadh, de 17h à 18h30 mn, Au moins 11 personnes sont mortes, et près de 170 maisons détruites, et deux ponts dans des inondations très importantes (*Boudjerda et al, 2005*).

II.1. Modèle hydrologique, définition et classification

II.1.1 Définitions

Un modèle hydrologique, ou modèle pluie-débit, est un outil numérique de représentation de la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Il permet de transformer des séries temporelles décrivant le climat d'un bassin versant donné (séries de précipitations et de températures par exemple, séries qui sont les entrées du modèle hydrologique) en une série de débits (sortie du modèle hydrologique) (*Contributeurs de Wikipédia 2017*).

De nombreux modèles hydrologiques ont été développés depuis la fin des années 1960. Le choix du type de modèle à utiliser dépend généralement de l'objectif de modélisation ainsi que des données d'entrées disponibles.

Les modèles hydrologiques permettent donc de transformer des séries décrivant le climat d'un bassin versant (typiquement des séries de précipitations et de températures) en une série de débits. Cette transformation est souvent divisée en deux parties:

- a. Une première partie souvent appelée la "production", qui consiste en la détermination de bilans d'eau à l'échelle du bassin versant. Ce bilan permet notamment de répartir la pluie brute observée (la totalité de la pluie qui est tombée sur le bassin versant et qui est mesurée par un ou plusieurs pluviomètres) en pluie "nette" (la proportion de la pluie brute qui participe au débit du bassin versant étudié), en quantité d'eau évapotranspirée et en quantité d'eau stockée par le bassin versant.
- b. Une deuxième partie souvent appelé le "transfert" ou "le routage", qui consiste à répartir dans le temps la quantité d'eau participant au débit du bassin versant étudié.

De nombreuses classifications de modèles hydrologiques existent dans la littérature. En effet, un grand nombre de caractéristiques des modèles peut être utilisé pour construire une classification. De plus, la plupart des modèles hydrologiques sont des assemblages de modules ayant des propriétés différentes: un modèle hydrologique à base physique peut ainsi

Chapitre II Le Modèle Rainfall-Runoff-Inundation (RRI)

posséder certains modules empiriques par exemple et donc être à la frontière entre deux types de modèle hydrologique.

II.1.2 Classification des modèles

II.1.2.1 Représentation des processus

Différents types d'approches ont été développées pour représenter la relation pluie-débit: les approches empiriques, les approches conceptuelles et les approches à base physique. Le choix d'un type d'approche de représentation des processus conditionne particulièrement les autres caractéristiques d'un modèle hydrologique: un modèle hydrologique empirique ne nécessite pas de discrétisation spatiale des processus par exemple et est donc généralement global.

(a) Modèle empirique

Un modèle empirique est construit autour de relations mathématiques directes établies entre les entrées et les sorties observées sur le bassin versant considéré. Ce type de modèle ne cherche pas à décrire les processus impliqués dans la relation pluie-débit et est donc souvent caractérisé comme des modèles "boîtes noires".

(b) Modèle conceptuel

Un modèle conceptuel cherche à représenter les principaux processus de la relation pluie-débit sans utiliser les lois physiques régissant les processus concernés. Ce type de modèle est généralement constitué de réservoirs connectés entre eux, dont les niveaux augmentent et diminuent au cours du temps et qui sont censés représenter les différents compartiments hydrologiques des bassins versants. L'utilisation de différents réservoirs permet une première séparation des composantes de la relation pluie-débit.

(c) Modèle à base physique

Un modèle à base physique représente les processus de la relation pluie-débit en utilisant les lois physiques régissant ces processus. Les modèles de surface continentale sont également des modèles à base physique qui représentent la relation pluie-débit. Ce type de modèle permet, de plus, de calculer les différents termes du bilan d'eau du bassin versant étudié.

Chapitre II Le Modèle Rainfall-Runoff-Inundation (RRI)

II.1.2.2 Représentation de l'espace

(a) Modèle global

Dans un modèle global, le bassin versant est représenté comme une seule entité spatiale homogène. La variabilité spatiale des processus étudiés n'est donc pas explicitement prise en compte avec ce type de modèle.

(b) Modèle semi-distribué

Dans un modèle semi-distribué, certains processus sont modélisés en divisant le bassin versant en plusieurs entités spatiales. Ce découpage de l'espace peut être réalisé grâce à des critères hydrologiques (découpage en sous bassin versant), ou des critères topographiques (découpage par bandes d'altitude). Ce modèle permet de prendre en compte la variabilité spatiale des processus étudiés.

(c) Modèle distribué

Dans un modèle distribué, le bassin versant est divisé en plusieurs entités spatiales. Ce découpage de l'espace peut être sous la forme d'un maillage régulier, ou par sous bassins-versants. Ce modèle permet de prendre en compte la variabilité spatiale des processus étudiés.

II.1.3 Discrétisation temporelle

La plupart des modèles hydrologiques transforme la pluie en débit au pas de temps journalier et ont donc besoin de données d'entrées au pas de temps journalier. Néanmoins, certains modèles fonctionnent à des pas de temps plus importants (mensuel, annuel, voire pluriannuel) alors que d'autres fonctionnent à des pas de temps beaucoup plus fins (infra-journaliers, voire infra-horaires).

Enfin, la transformation de la pluie au débit peut être réalisée en continu (grâce aux modèles hydrologiques "continus") ou discontinu, à l'échelle d'épisodes pluvieux particuliers (grâce aux modèles hydrologiques "événementiels").

II.2. Description du modèle RRI

II.2.1 Structure du modèle RRI

Le modèle pluie-débit-Inondation (RRI) est un modèle bidimensionnel capable de simuler simultanément le Pluit-débit et l'inondation (*Sayama et al., 2012, Sayama et al., 2015*). Le modèle RRI est un modèle distribué: - distribué pour prendre en compte la variabilité spatiale des pluies. Le bassin est discrétisé en mailles carrées régulières (pixel), et la pluie, les conditions de production et de transfert seront calculées pour chaque maille; Il calcule les hauteurs d'eau dans chaque cellule régulière d'une grille et à chaque pas de temps, et peut donc simuler la propagation dynamique des ondes de crue sur les plaines inondables à topographie complexe. Pour une meilleure représentation des processus pluie-débit-inondation, le modèle RRI simule également l'écoulement souterrain latéral, le flux d'infiltration verticale et le débit de surface. L'écoulement souterrain latéral, qui est généralement plus important dans les régions montagneuses, est traité en termes de relation débit-gradient hydraulique, qui prend en compte à la fois les écoulements de surface et souterrains dans la zone saturée. D'autre part, le flux d'infiltration verticale est estimé en utilisant le modèle Green-Ampt. L'interaction du débit entre la rivière et la surface est estimée à partir de différentes formules de débordement, en fonction des conditions de niveau d'eau et de hauteur de la digue (*Takahiro SAYAMA 2013*).

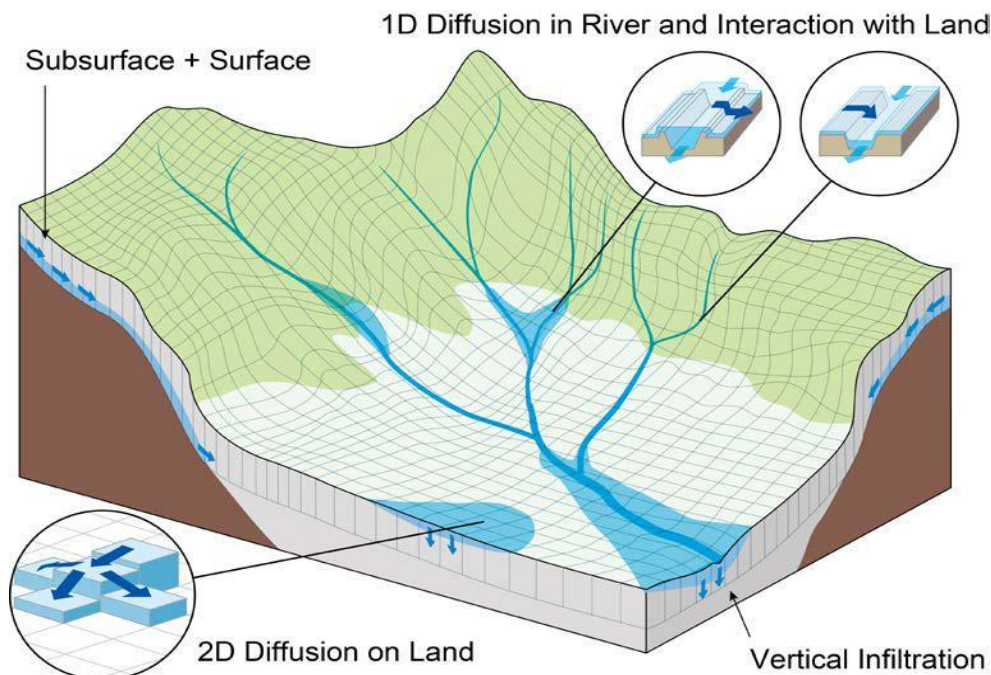


Figure II .1 : Modélisation de la plaine inondable par le modèle RRI (*Takahiro SAYAMA 2013*)

II.2.2 Les équations du modèle

Une méthode de calcul des écoulements latéraux sur des cellules de grille est caractérisée comme « un modèle d'inondation basé sur des cellules de stockage ». Les équations du modèle sont basées sur l'équation du bilan de masse pour un écoulement non permanent graduellement varié (*Takahiro SAYAMA 2013*) :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = r - f \quad (\text{II.1})$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial uq_x}{\partial x} + \frac{\partial vq_x}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho_w} \quad (\text{II.2})$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial uq_y}{\partial x} + \frac{\partial vq_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho_w} \quad (\text{II.3})$$

Où

h est la hauteur d'eau à partir de la surface, q_x et q_y sont les débits unitaires dans les directions x et y . u et v sont les vitesses d'écoulement dans les directions x et y ; r est l'intensité des précipitations, f est le taux d'infiltration, H est la hauteur d'eau à partir d'une référence, ρ_w est la densité de l'eau, g est l'accélération, et τ_x et τ_y sont les contraintes de cisaillement dans les directions x et y . Les deuxièmes termes du côté droit de (II.2) et (II.3) sont calculés avec l'équation de Manning.

$$\frac{\tau_x}{\rho_w} = \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (\text{II.4})$$

$$\frac{\tau_y}{\rho_w} = \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (\text{II.5})$$

Où

n est le coefficient de la rugosité de Manning.

Chapitre II Le Modèle Rainfall-Runoff-Inundation (RRI)

Sous l'approximation de l'onde de diffusion, les termes d'inertie (les termes du côté gauche de (II.2) et (II.3)) sont négligés. De plus, en séparant les directions x et y (c'est-à-dire en ignorant les termes v et u dans les équations (II.2) et (II.3) respectivement), les équations suivantes sont dérivées:

$$q_x = -\frac{1}{n} h^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad (\text{II. 6})$$

$$q_y = -\frac{1}{n} h^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial y} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \quad (\text{II. 7})$$

Où sgn est la fonction signe

Le modèle RRI discrétise spatialement l'équation de bilan de masse (1) comme suit:

$$\frac{dh^{i,j}}{dt} + \frac{q_x^{i,j-1} - q_x^{i,j}}{\Delta x} + \frac{q_y^{i-1,j} - q_y^{i,j}}{\Delta y} = r^{i,j} - f^{i,j} \quad (\text{II. 8})$$

Où

$q_x^{i,j}$, $q_y^{i,j}$ sont les débits dans les directions x et y d'une cellule de grille en (i, j).

En combinant les équations de (II.6), (II.7) et (II.8), les profondeurs d'eau et les débits sont calculés à chaque cellule de la grille pour chaque pas de temps. L'importante différence entre le modèle RRI et les autres modèles de simulation de l'inondation est que le premier utilise différentes formes de relation débit- gradient hydraulique, de sorte qu'il peut simuler les écoulements de surface et de sub surface avec le même algorithme.

Le modèle RRI remplace les équations (II.6) et (II.7) par les équations suivantes (II.9) et (II.10), conceptualisées initialement par Ishihara et Takasao (1962) et formulées avec une seule variable par Takasao et Shiiba (1976, 1988) sur la base d'approximations d'ondes

Chapitre II Le Modèle Rainfall-Runoff-Inundation (RRI)

cinématiques. Les premières équations de (II.9) et (II.10) ($h \leq d_a$) décrivent l'écoulement souterrain dans la zone saturée basé sur la loi de Darcy, tandis que les secondes équations ($d_a \leq h$) décrivent la combinaison de l'écoulement superficiel et souterrain dans la zone saturée. Notez que pour le modèle de l'onde cinématique, le gradient hydraulique est supposé être égal à la pente topographique, tandis que le modèle RRI suppose que la pente de la surface de l'eau est comme le gradient hydraulique.

$$q_x = \left\{ \begin{array}{ll} -k_a h \frac{\partial H}{\partial x}, & (h \leq d_a) \\ -\frac{1}{n} (h - d_a)^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) - k_a h \frac{\partial H}{\partial x}, & (d_a < h) \end{array} \right\} \quad (\text{II. 9})$$

$$q_y = \left\{ \begin{array}{ll} -k_a h \frac{\partial H}{\partial y}, & (h \leq d_a) \\ -\frac{1}{n} (h - d_a)^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial y} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) - k_a h \frac{\partial H}{\partial y}, & (d_a < h) \end{array} \right\} \quad (\text{II. 10})$$

Où

k_a est la conductivité hydraulique saturée horizontal et d_a est la profondeur du sol multipliée par la porosité effective.

Les équations (II.11) et (II.12) peuvent également être utilisées pour simuler l'effet d'un écoulement souterrain insaturé et saturé et d'un écoulement de surface avec la variable unique de h (Tachikawa et al. 2004).

$$q_x = \left\{ \begin{array}{ll} -k_m d_m \left(\frac{h}{d_m} \right)^\beta \frac{\partial H}{\partial x}, & (h \leq d_m) \\ -k_a (h - d_m) \frac{\partial H}{\partial x} - k_m d_m \frac{\partial H}{\partial x}, & (d_m < h \leq d_a) \\ -\frac{1}{n} (h - d_a)^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) - k_a (h - d_m) \frac{\partial H}{\partial x} - k_m d_m \frac{\partial H}{\partial x}, & (d_a < h) \end{array} \right\} \quad (\text{II. 11})$$

$$q_y = \left\{ \begin{array}{l} -k_m d_m \left(\frac{h}{d_m}\right)^\beta \frac{\partial H}{\partial y}, (h \leq d_m) \\ -k_a (h - d_m) \frac{\partial H}{\partial y} - k_m d_m \frac{\partial H}{\partial y}, (d_m < h \leq d_a) \\ -\frac{1}{n} (h - d_a)^{5/3} \sqrt{\left|\frac{\partial H}{\partial y}\right|} \operatorname{sgn}\left(\frac{\partial H}{\partial y}\right) - k_a (h - d_m) \frac{\partial H}{\partial y} - k_m d_m \frac{\partial H}{\partial y}, (d_a < h) \end{array} \right\} \quad (\text{II. 12})$$

Notez que pour assurer la continuité du changement de débit lorsque $h = d_m$, la conductivité hydraulique latérale dans la zone non saturée (k_m) peut être calculée par $k_m = k_a / \beta$, de sorte que k_m n'est plus le paramètre du modèle.

Ces équations de relation hauteur-débit ont été développées pour être appliquées à des zones forestières humides avec une couche de sol hautement perméable, où un écoulement souterrain latéral est le mécanisme de génération de ruissellement dominant. D'un autre côté, pour les zones relativement plates, le processus d'infiltration verticale durant la première période de pluie a plus d'impact sur les inondations à grande échelle; par conséquent, l'infiltration verticale peut être traitée comme une perte pour une simulation basée sur des événements. Ici, nous calculons la perte d'infiltration f avec le modèle d'infiltration Green-Ampt (*Raws et al., 1992*).

$$f = k_v \left[1 + \frac{(\varphi - \theta_i) S_f}{F} \right] \quad (\text{II. 13})$$

Où

k_v est la conductivité hydraulique saturée verticale, φ est la porosité du sol, θ_i est la teneur initiale en eau, S_f est l'aspiration au front de mouillage vertical et F est la profondeur d'infiltration cumulative.

Typiquement pour les zones montagneuses où les écoulements superficiels latéraux et les excès de surface saturés dominent, les équations (II.9) et (II.10) (ou (II.11) et (II.12)) peuvent être utilisées avec f égal à zéro. (Notez que les équations (II.9) et (II.10) (ou (II.11) et (II.12)) supposent implicitement que le taux d'infiltration verticale dans le sol est infini.) D'un autre côté, pour les zones de plaine où l'excès d'infiltration domine, les équations d'écoulement de

Chapitre II Le Modèle Rainfall-Runoff-Inundation (RRI)

surface (II.6) et (II.7) peut être utilisé avec la considération de l'infiltration verticale par l'équation (II.13). Si l'infiltration verticale f est définie comme non nulle et les équations latérales de subsurface sont utilisés à la place de l'équation d'écoulement de surface, l'eau souterraine latérale est infiltrée dans le substrat rocheux par le taux de f .

Comme on peut le voir à partir des équations, les valeurs des paramètres de k_a , k_m et k_v déterminent les équations à utiliser; c'est-à-dire (II.6) et (II.7) sont utilisés lorsque k_a et k_m sont nulle, (II.9) et (II.10) sont utilisés lorsque k_m est égale à zéro, et (II.13) est inactivé lorsque k_v est égale à zéro.

II.2.3 Modèle de routage fluvial unidimensionnel « One-dimensional River Routing Model »

Un modèle de propagation unidimensionnelle des ondes est appliqué aux cellules de la rivière. La géométrie est supposée être un rectangle, dont les formes sont définies par la largeur W , la profondeur D et la hauteur de la digue H_e . Lorsque les informations géométriques détaillées ne sont pas disponibles, la largeur et la profondeur sont estimées par la formule suivante (*Takahiro SAYAMA 2013*):

$$W = C_w A^{S_w} \text{ (II.14)}$$

$$D = C_D A^{S_D} \text{ (II.15)}$$

Où

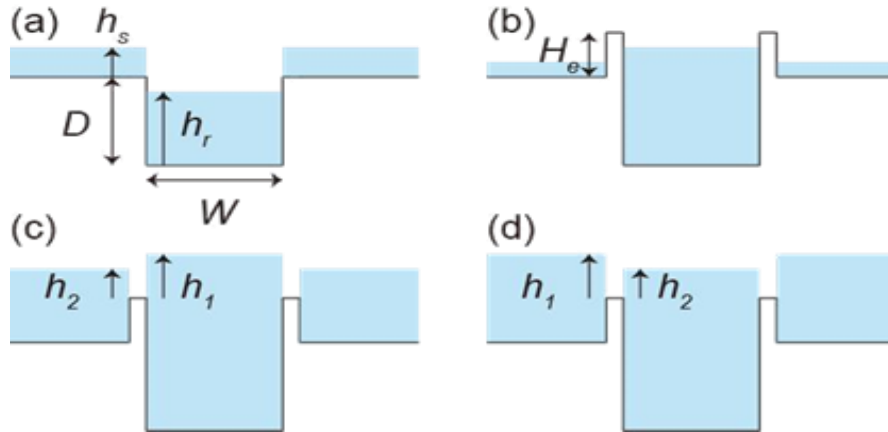
C_w , S_w , C_D et S_D sont des paramètres de la géométrie. Ici, les unités de W et D sont des mètres.

II.2.4 Échange d'eau entre la rivière et la surface « River and Slope Water Exchange »

L'échange d'eau entre une cellule de grille de la surface et une cellule de grille de la rivière sus-jacente est calculé à chaque pas de temps en fonction de la relation entre les niveaux de la surface d'eau, niveau d'eau dans la rivière, sommet de la digue et du sol. La figure ci-dessous montre quatre conditions différentes. Pour chaque condition, différentes formules de dépassement sont appliquées pour calculer le débit unitaire de la surface vers la rivière (q_{sr})

Chapitre II Le Modèle Rainfall-Runoff-Inundation (RRI)

ou d'une rivière à l'autre (qrs), qui sont ensuite multipliés par la longueur du vecteur de la rivière à chaque cellule de la grille pour calculer le débit d'échange total (*Iwasa and Inoue, 1982*).



- (a) Lorsque le niveau d'eau dans la rivière est inférieur au niveau du sol, qsr est calculé par la formule suivante.

$$q_{sr} = \mu_1 h_s \sqrt{gh_s} \quad (\text{II. 16})$$

Où

μ_1 est le coefficient constant ($= (2/3)^{3/2}$), et h_s est la profondeur d'eau dans une cellule de surface. Dans la mesure où le niveau de l'eau de la rivière est inférieur au niveau du sol, la même équation est utilisée même pour le cas avec des digues de sorte que l'eau dans la surface peut ruisseler vers la rivière.

- (b) Lorsque le niveau d'eau dans la rivière est supérieur au niveau du sol et que les niveaux d'eau dans la rivière et dans la surface sont inférieurs à la hauteur de la digue, aucun échange d'eau n'est prévu entre la surface et la rivière.

- (c) Lorsque le niveau d'eau dans la rivière est plus élevé que la hauteur de la digue et le niveau de l'eau dans la surface, la formule suivante est utilisée pour calculer le débit de déversement qrs de la rivière vers la surface.

$$q_{rs} = \left\{ \begin{array}{l} \mu_2 h_1 \sqrt{2gh_1} h_2 / h_1 \leq 2/3 \\ \mu_3 h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} h_2 / h_1 \leq 2/3 \end{array} \right\} \text{(II.17)}$$

Où

μ_2 et μ_3 sont des coefficients constants (= 0.35, 0.91), et h_1 est la différence entre le niveau de l'eau dans la rivière et le sommet de la digue.

(d) Lorsque le niveau d'eau à la surface est plus élevé que la hauteur de la digue et le niveau de l'eau dans la rivière, la même formule (II.17) est utilisée pour calculer le débit de débordement q_{sr} de la rivière vers la surface. Dans ce cas, h_1 est la différence d'élévation entre la surface et la rivière, et h_2 est la différence de l'altitude entre la rivière et le sommet de la digue.

(e)

II.2.5 Schéma numérique

Pour résoudre les équations (II.8), (II.9) et (II.10), la méthode de Runge-Kutta de cinquième ordre avec contrôle adaptatif du pas de temps est appliquée. Cette méthode résout une équation différentielle ordinaire par la formule générale de Runge-Kutta de cinquième ordre et estime son erreur par une formule de quatrième ordre intégrée pour contrôler le pas de temps. (*Cash and Karp 1990, Press et al. 1992*). La forme générale de la formule de Runge-Kutta de cinquième ordre est :

$$k_1 = \Delta t f(t, h_t)$$

$$k_2 = \Delta t f(t + a_2 \Delta t, h_t + b_{21} k_1) \quad \text{(II.18)}$$

$$k_6 = \Delta t f(t + a_6 \Delta t, h_t + b_{61} k_1 + \dots + b_{65} k_5)$$

$$h_{t+1} = h_t + c_1 k_1 + c_1 k_2 + c_1 k_3 + c_1 k_4 + c_1 k_5 + c_1 k_6 + O(\Delta t^6)$$

Alors que la formule de quatrième ordre incorporée (*Cash et Karp 1990*) est

$$h_{t+1}^* = h_t + c_1^* k_1 + c_2^* k_2 + c_3^* k_3 + c_4^* k_4 + c_5^* k_5 + c_6^* k_6 + O(\Delta t^5) \text{(II.19)}$$

Chapitre II Le Modèle Rainfall-Runoff-Inundation (RRI)

En soustrayant h_{t+1} moins h_{t+1}^* , l'erreur peut être estimée en utilisant k_1 à k_6 comme suit,

$$\delta \equiv h_{t+1} - h_{t+1}^* = \sum_{i=1}^6 (c_i - c_i^*) k_i \quad (\text{II.20})$$

Les valeurs constantes (a_i , b_{ij} , c_i , c_i^*) utilisées dans cette étude sont celles introduites par Cash et Karp (1990). Si δ dépasse une précision désirée δ_d , h_{t+1} est recalculé avec un pas de temps plus petit (Δt_{post}).

$$\Delta t_{\text{post}} = \max \left(0.9 \Delta t \left| \frac{\delta_d}{\delta} \right|^{0.25}, 0.5 \Delta t \right) \quad (\text{II.21})$$

Comme décrit ci-dessus, le modèle RRI calcule les interactions entre les surfaces, les rivières et les interactions surface-rivière. Les utilisateurs du modèle spécifient le pas de temps pour l'interaction surface-rivière Δt , qui est également utilisé comme un pas de temps initial pour les calculs de dans la surface. Les calculs des rivières nécessitent généralement un pas de temps plus court en raison de la vitesse et de la profondeur de l'eau, le modèle permet aux calculs des rivières de progresser indépendamment avec des pas de temps différents jusqu'au prochain pas de temps de calcul surface/rivière.

III.1 Contexte et cadre générale

Le bassin versant de L'Oued M'Zi d'orientation E-W appartenant à la wilaya de Laghouat, chevauche deux domaines géologiques assez différents avec au Nord les reliefs escarpés de l'Atlas saharien central ou Djebel Amour et au Sud la plate- forme saharienne, il est limité (Icosium Forage & Engineering Services 1997 ; Aissaoui 2016):

- À l'Est et à l'Ouest respectivement par les longitudes $3^{\circ}1'$ Est et $1^{\circ}56'$ Est.
- Au Nord et au Sud par les latitudes Nord $34^{\circ}16'$ et $33^{\circ}24'$.

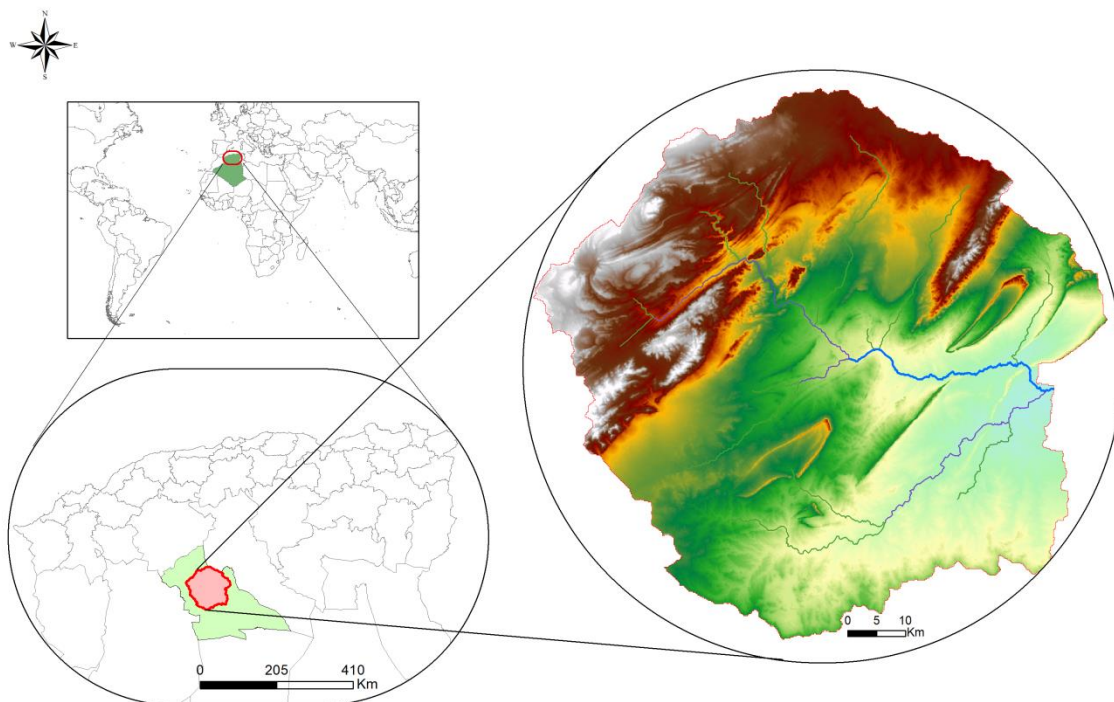


Figure III.1 : Situation du bassin versant de Oued M'zi

III.2. Caractéristique géoclimatiques :

III.2.1. Relief

Le relief de la région du groupement de la wilaya de Laghouat est en général plat à pente moyenne variable, constituée d'unités morphologique suivantes (*HPO 2012*):

- La chaîne montagneuse « Dakhla et Djebel Lahmar » au Nord ;
- Le plateau saharien au Sud et Sud-Est ;
- Le Djebel kheneg au Sud-Ouest.

Chapitre III Présentation de la région d'étude

Les altitudes caractéristiques montrent que le bassin de l'oued M'zi est constitué par deux unités orographiques bien distinctes, il s'agit (Aissaoui 2016):

- Des reliefs escarpés de l'Atlas saharien central où l'altitude de fréquence $\frac{1}{2}$ des sous-bassins (Mellah, Morra, Meska, M'zi amont) est supérieure à 1222 mètres.
- De la plate-forme saharienne où l'altitude moyenne est inférieure à 920 mètres (Messaad, M'zi aval)

Pour l'ensemble des sous – bassin versants de l'Oued M'zi l'altitude de fréquence $\frac{1}{2}$ (50%) est supérieure à l'altitude moyenne. On note donc une dissymétrie vers les fortes altitudes qui pourrait se traduire par une influence du relief sur les paramètres climatiques (précipitations, Températures),

Les constatations ci-dessus montrent que les variations de pente globale entre le M'zi amont et le M'zi aval localises entre deux unités assez différentes, au point de vue orographique (atlas saharien et plate-forme saharienne) sont à l'origine des inondations à l'aval de la ville de Laghouat lors des crues de l'Oued M'zi.

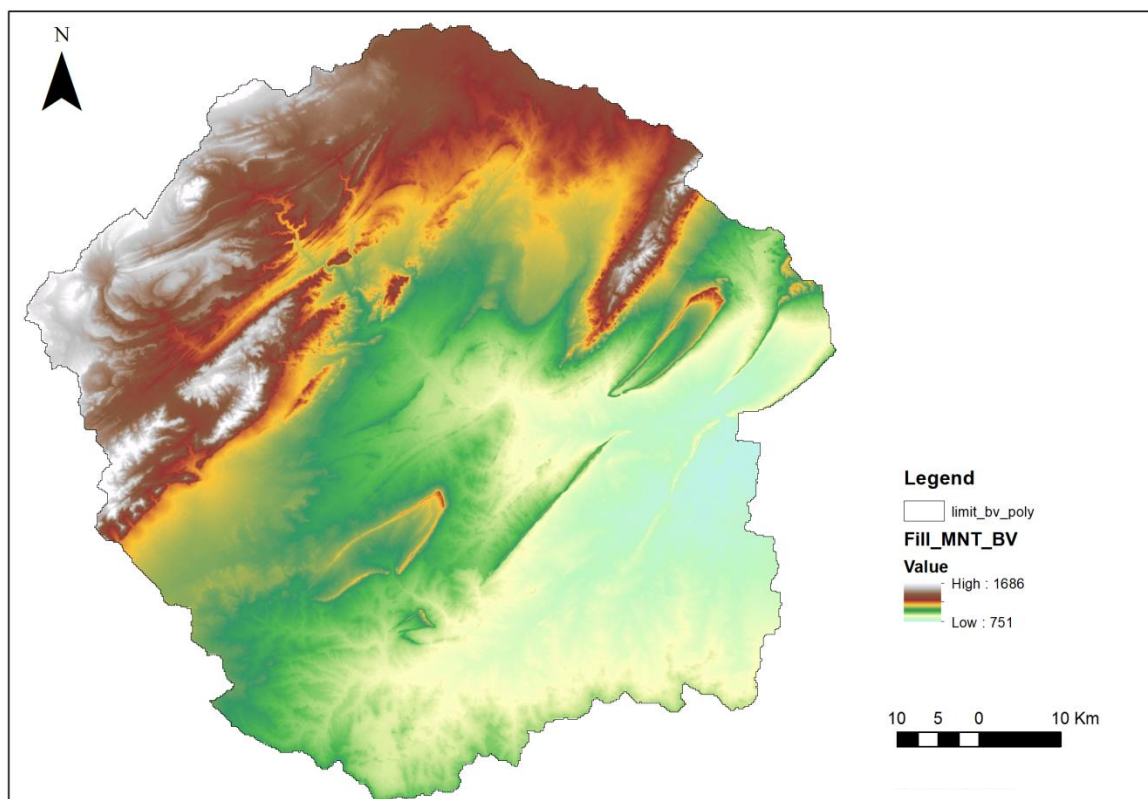


Figure III.2 : Modèle numérique du terrain de la zone d'étude

Chapitre III Présentation de la région d'étude

III.2.2. Géologie de la zone d'étude :

Le territoire de la wilaya de Laghouat s'étend sur deux domaines géologiques nettement différents, notamment sur le plan de la structure et de l'évolution (*Perron, 1883 ; Ritter, 1902 ; Emberger, 1960 ; IAP, 1972 ; Hannachi, 1981 ; Houyou 2015*), ces domaines sont :

- L'Atlas Saharien au nord, formé par les monts des Ammours et les monts des Ouled Nails ;
- La plateforme Saharienne au Sud, formée par un ensemble de plateaux subtabulaires diversifiés selon leurs structures, leurs positions et la nature de la roche qui les constituent.

Ces plateaux sont communément désignés par les noms arabes (*Hmada et Erg*).

La vallée de l'Oued M'zi est occupée par un remplissage des alluvions fluviale. On y distingue deux séries :

- Le Quaternaire ancien: formé d'éléments grossiers, mal arrondis avec encroutement calcaires, leurs altitudes au-dessus des talwegs est de 3 m.
- Le quaternaire récent : formé par des alluvions calcaires limono-sableuses, situées à 1m au-dessus des talwegs.

Les dépôts de la vallée de l'Oued M'zi sont grossiers (graviers, galets et sables), de faible épaisseur, surtout aux cluses du pont de Laghouat et du Kef Seridja, Rocher des chiens et au Ksar Kabeg ou le substratum remonte pour former un seuil (*Hannachi 1981*).

Dans le domaine atlasique saharien le Quaternaire surmonte directement les terrains secondaires, contrairement au domaine saharien o. les alluvions quaternaires reposent sur les dépôts détritiques tertiaires.

III.2.3. Climatologie :

La région d'étude, sur le plan météorologique, constitue une zone de transition entre plusieurs phénomènes climatiques, notamment, le passage du régime climatique méditerranéen au

Chapitre III Présentation de la région d'étude

climat saharien caractérisé par des influences desséchantes qui règnent, pendant une partie de l'année, sur le Sahara Septentrional (Aissaoui 2016).

Le relief caractérisé par les derniers chaînons de l'Atlas Saharien et formant une barrière aux influences méditerranéennes accentue les contrastes climatiques.

III.2.3.1. Pluviométrie

La région a connu une grande période de sécheresse durant la décennie écoulée. La pluviométrie est irrégulière et insuffisante d'une année à une autre. Il est à signaler que la saison automnale est relativement la plus pluvieuse avec 31% du cumul annuel (HPO 2012).

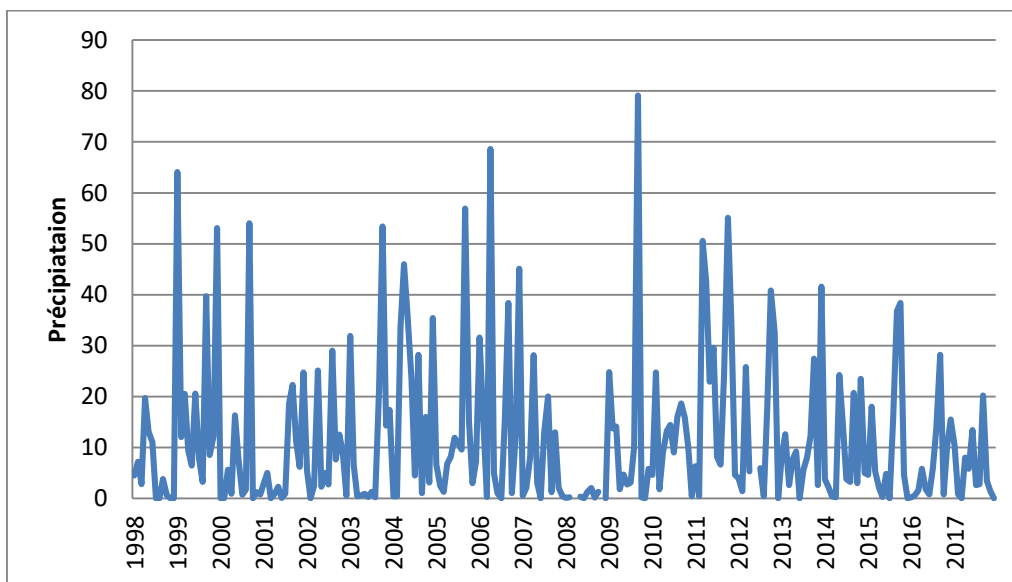


Figure III.3 : Chronique des précipitations mensuelles à la station de Laghouat

III.3. Réseau hydrographique :

Le bassin versant d'Oued M'zi d'une superficie globale de 6267 km^2 chevauche deux domaines totalement différents (Atlas saharien et plateforme saharienne), il est drainé par l'Oued M'zi, né de la confluence avec les oueds (O. Morra, O. Mellah, O. Messad, O. Meska) ; Oued M'zi constitue l'un des plus importants cours d'eau dans l'Atlas Saharien Central, il prend sa source au niveau d'Aflou dans le massif de Djebel Amour, vers le Sud-Est de Laghouat il rejoint l'Oued Messaad d'où il prend le nom de l'Oued Djedi qui se débouche dans le Chott Melghir au sud de Biskra après un parcours de 450 km formant ainsi un système endoréique typique des régions arides et semi-aride (F Soliel Havoup 1974). En période de

Chapitre III Présentation de la région d'étude

- Une infiltration importante au niveau de l'Oued M'zi aval ou ($Dd = 0.47 \text{ KM} / \text{Km}^2$) ce qui pourrait être expliqué d'une part par la lithologie perméable des formations alluviales et les faibles pentes ($I_p = 2.06 \%$) et par le réseau hydrographique épars, non hiérarchisé et endoréique.
- Une infiltration moyenne au niveau des autres sous-bassins à ce niveau les pentes deviennent plus importantes. ($I_p = 9.3 \%$ (sous-bassin Oued Mellah)) et les formations crétacées perméables, peuvent montrer des intercalations marneuses.

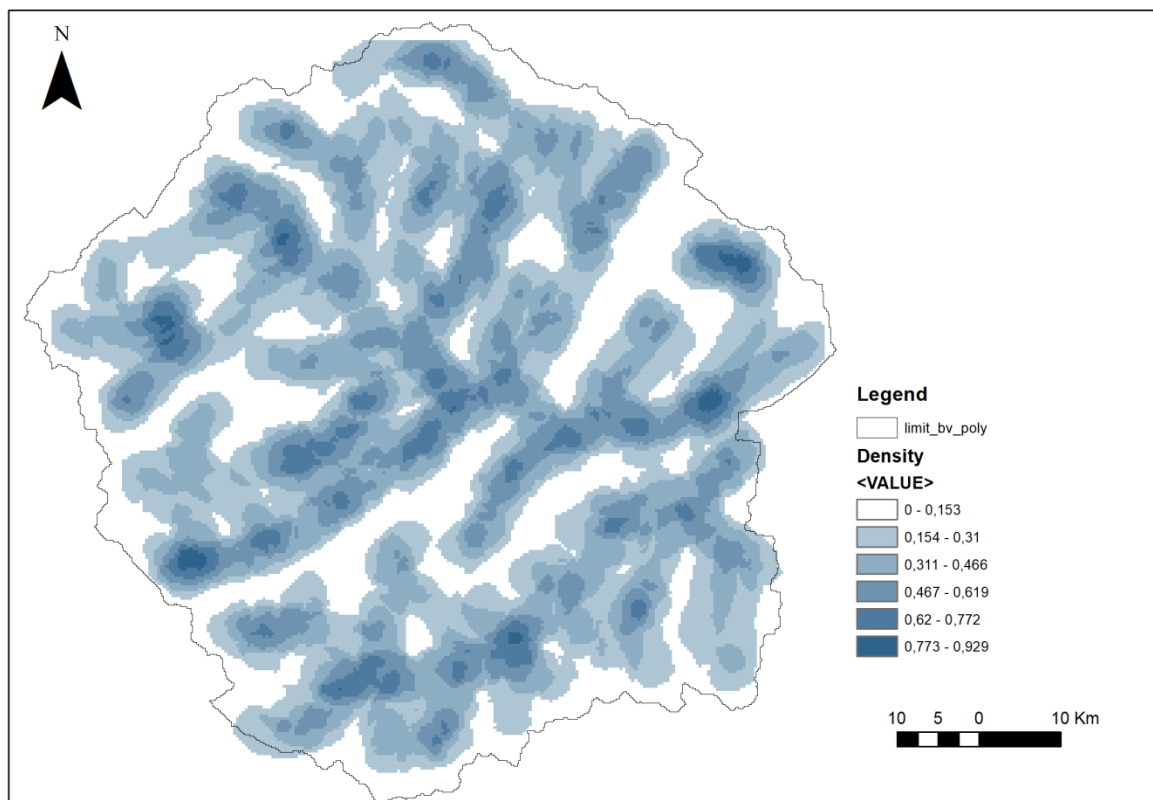


Figure III.5 : La densité de drainage du bassin versant d'Oued M' zi

III.4. Sol et occupation de sol

Dans la partie qui couvre la wilaya de Laghouat, cinq classes de sols sont dispersées (sols minéraux bruts, sols peu évolués, sols calcimagnésiques, sols isohumiques, et sols des dayas), et dans lesquelles treize types de sols sont identifiés (Houyou 2015).

Les précipitations et l'altitude conditionnent en grande partie l'importance et la variété de la végétation ; on distingue sur les hautes plaines, parcours et alfa et une dégradation très

Chapitre III Présentation de la région d'étude

poussée du couvert végétal. Par ailleurs, la zone montagneuse de l'atlas saharien demeure une région de l'arboriculture (foret et Maquis).

Par contre, dans la zone semi-aride (plateau saharien), et compte tenu de la qualité saline de ses sols, la flore est généralement inexistante.

Les domaines bioclimatiques et édaphiques confèrent à la wilaya de Laghouat trois types de végétation. La zone semi-aride supérieure et moyenne à 300 mm de pluie est caractérisée par une végétation forestière et matorral présente surtout sur les reliefs de l'Atlas Saharien. La végétation de type steppique est rencontrée sur les formations du Quaternaire dans les zones semi arides et arides.

La limite inférieure de la zone aride correspondait à un brusque accroissement du taux des espèces saharo-arabiques dans la composition de la flore ; le taux des espèces sahariennes passe soudainement de 20 à 40 %, inversement le taux des espèces méditerranéo-steppiques diminue de 76 à 59 % par rapport à la partie méridionale de la zone aride. La limite sud de 100 mm correspond à l'apparition d'un couvert végétal diffus sur les regs et les glacis d'érosion ou les sols sont squelettiques. Sur substrat sableux, la végétation peut conserver le mode diffus jusqu'à sous 50 mm de pluviosité moyenne annuelle ou même moins (*Houyou 2015*). **Figure III .7** :Crue de Oued M'zi (30 septembre 2016)

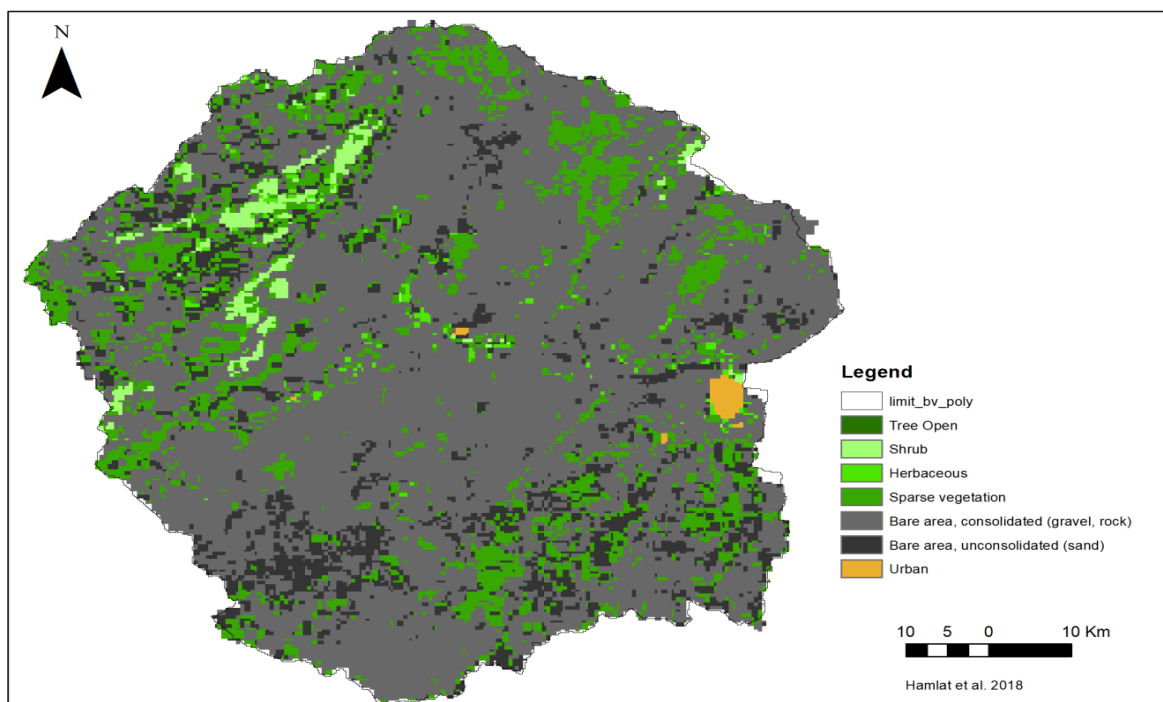


Figure III.6 : Carte d'occupation du sol (FAO)

Chapitre III Présentation de la région d'étude

III.5. Inondations et environnement

Sur ce bassin, les crues surviennent essentiellement en automne, lors d'épisodes pluvieux pouvant atteindre plusieurs centaines de mm en 24h. Actuellement, le problème des inondations touche les communes traversées par les oueds Messaad et M'zi qui menacent leur environnement et plus particulièrement le chef-lieu de Laghouat.



Figure III .7 :Crue de Oued M'zi (30 septembre 2016)

III .1 Crue de Oued M'zi (30 septembre 2016): Historique des inondations de Oued M'zi (Direction de la Protection Civil 2018)

DATE	LIEU DIT	COMMUNE	BILAN	CAUSE
15.09.1942	Oued M'zi	Laghouat –ksar el Hirane	Hauteur d'eau 80 mm	Crue
16.11.1942	Oued M'zi	Laghouat –ksar el Hirane	Hauteur d'eau 70 mm	Crue
24.04.1943	Oued M'zi	Laghouat –ksar el Hirane	$Q = 25 \text{ m}^3 / \text{s}$	Crue
10.12.1943	Oued M'zi	Laghouat	$Q = 403 \text{ m}^3 / \text{s}$ et hauteur d'eau 1 m25 cm	Crue
09.09.1944	Oued M'zi	Laghouat	$Q = 54 \text{ m}^3 / \text{s}$	Crue
11.08.1955	Oued M'zi	Laghouat	-	Crue

Chapitre III Présentation de la région d'étude

13 et 14.10.1957	Oued M'zi	Laghouat – Benacer Ben Chohra	Hauteur d'eau 0.8 à 1m	Crue
14.01.1961	Oued M'zi	Laghouat	Q = 120 m ³ /s	Crue
1969	Oued M'zi	Laghouat	Q = 422 m ³ /s	Crue
1986	Oued M'zi	Laghouat	Q = 357 m ³ /s et Hauteur d'eau 0.85 m	
5 au 8 mars 1988 à 14 H00	Oued M'zi	A travers tous les communes de wilaya	<p>Zones inondées 3.748 ha effondres : 320 - maison menaçant ruine : 463 -famille sinistrées évacuées : 716 -famille sinistrées recasées : 643</p> <p>Puits : 303 Abris de moteurs : 82 Groupe motopompe : 206 Pompes verticale : 08 Canalisations (ML) : 1268 Tentes : 12 Cheptel caprins : 106 Cheptel bovins : 11 Cheptel ovins : 251 Cheptel équins : 07 Cheptel Poulets de chairs : 5300 Cheptel poulets de ponte : 3600 Digues : 04 Brise vents : 03 Aliments concentrés : 70 Agriculteurs</p>	
Octobre 1942	Oued M'zi	Laghouat	Hauteur d'eau 0.90 m	crue
1997	Laghouat	Laghouat	Hauteur d'eau 1.00 m	crue
02.10.1994	Centre-ville	Laghouat	01 Km inondé	Crue
08.04.1997	Centre-ville	Laghouat	Centre-ville	Forte pluie
09.04.1997	Centre-ville	Centre-ville	04 maisons effondrées	Forte pluie
10.04.1997	Centre-ville	Laghouat	04 maisons effondrées	Forte pluie
11.04.1997	Centre-ville	Laghouat	03maisons effondrées	Forte pluie
12.04.1997	Centre-ville	Laghouat	04 maisons effondrées	Forte pluie
25.08.1997	Centre-ville	Laghouat	06 maisons effondrées	Forte pluie
30.09.1997	Pont oued M'zi	Laghouat	Pont emporte par la crue	Crue
Octobre 1997	Pont oued M'zi	Laghouat	Q = 400 m ³ /s et hauteur d'eau 1.00 m	Crue

Chapitre III Présentation de la région d'étude

18.12.1999	Centre-ville	Laghouat	10 maisons inondées. - 02 ERP	Forte pluie
25 au 27 .12.1999	Centre-ville	Laghouat	06 maisons inondées	Forte pluie
10.01.2003 à 11h35	Rue ibn badis	Laghouat	1 chambre effondrée	Forte pluie
24.09.2003 à 14h15	Bouchaker	Laghouat	1 mur d'une maison effondre	Forte pluie
23.10.2003 à 13h10	Cite chetit	Laghouat	1 chambre effondrée	Forte pluie
23.10.2003 à 13h10	Cite 1 novembre	Laghouat	01 maison effondrée	Forte pluie
23.10.2003 à 18h25	Rue djoudi Abdelkader	Laghouat	1 chambre effondrée	Forte pluie
24.10.2003 à 10h30	Cite essadikia	Laghouat	2 chambres effondrées	Forte pluie
27.10.2003 à	Cite essadikia	Laghouat	1 chambre effondrée	crue
28.03.2004	Rue ibn badis	Laghouat	1 chambre effondrée	Forte pluie
24.04.2004	El fetha oued M'zi	Laghouat	Sauvetage d'une 01 personne coincée par l'oued Récolte agricole	Forte pluie
2005	Centre-ville	Laghouat		Forte pluie
2006	Centre-ville	Laghouat	-	Forte pluie
27.09.2011	Bordj Senouci	Laghouat	-	Forte pluie
08-09.09.2015	Centre-ville	Laghouat	-	Forte pluie
30.09.2016	-Bordj Senouci. - Merdja. Rue Djoudi Abdelkader .Hôtel Marhaba	Laghouat	-	Forte pluie

VI.1 Configuration du modèle RRI

Le modèle a été appliqué au bassin versant d'Oued M' zi. Les paramètres du modèle ont été spécifiés à partir des observations disponibles et des données de la littérature. Le modèle RRI tient compte de la spatialisation des précipitations, le modèle est susceptible de fonctionner de manière optimale avec, en forçage d'entrée, un champ de pluie (issu de l'interpolation des pluviomètres ou d'une grille de pluie issue d'un radar météorologique), il peut être également utilisé avec une pluie moyennée sur le bassin (comme pour un modèle dit global).

Il est noté que le temps de calcul requis pour une zone avec une période spécifique dépend fortement de caractéristiques de l'ordinateur, telles que la fréquence du processeur et la quantité de mémoire. On note que certains paramètres du modèle par exemple, le coefficient de rugosité de la rivière affecte le temps de calcul de manière significative, cela prend généralement environ 5 heures de temps de calcul pour 10 000 cellules de grille par 30 jours de période de simulation (ICHARM 2016).

Tableau VI.1 : Le temps de calcul suivant les caractéristiques de l'ordinateur (ICHARM2016)

PC type	CPU (type ,clock frequency(GHz)	Memory (GB)	Grid Size (m)	Number of grid cells	Simulation Period (days)	Calculation time
Desktop	Core i7 ,3.60GHz	16GB	500	28.000	180	40
Desktop	Core i7 ,3.60GHz	16GB	500	14.000	90	10
Desktop	Core i7 ,3.60GHz	16GB	500	9.600	90	7

Chapitre VI Application du modèle Pluie Débit (RRI)

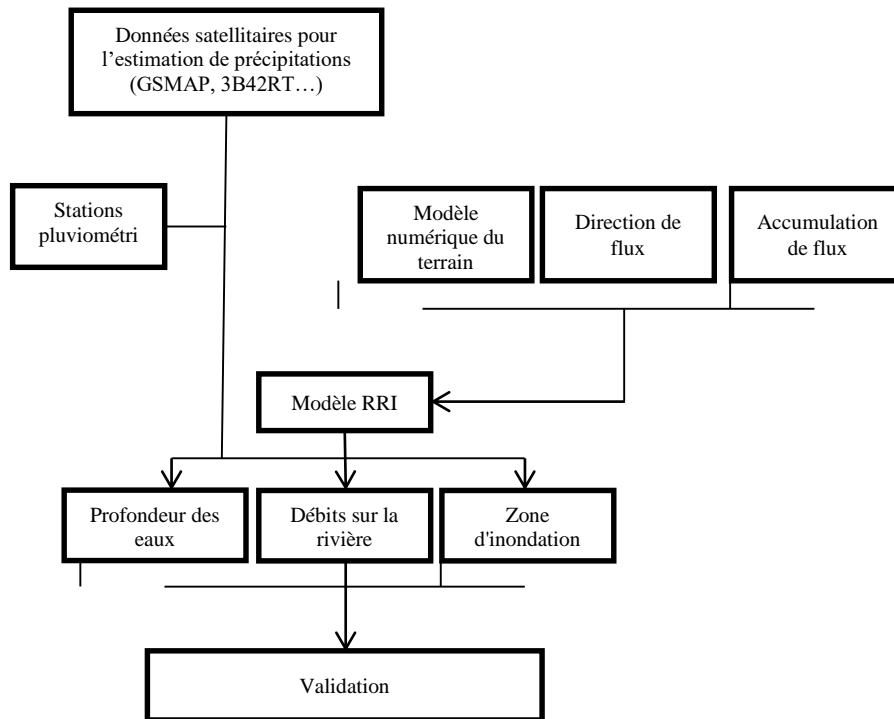


Figure VI.1 : Organigramme de la méthodologie d'application du modèle RRI

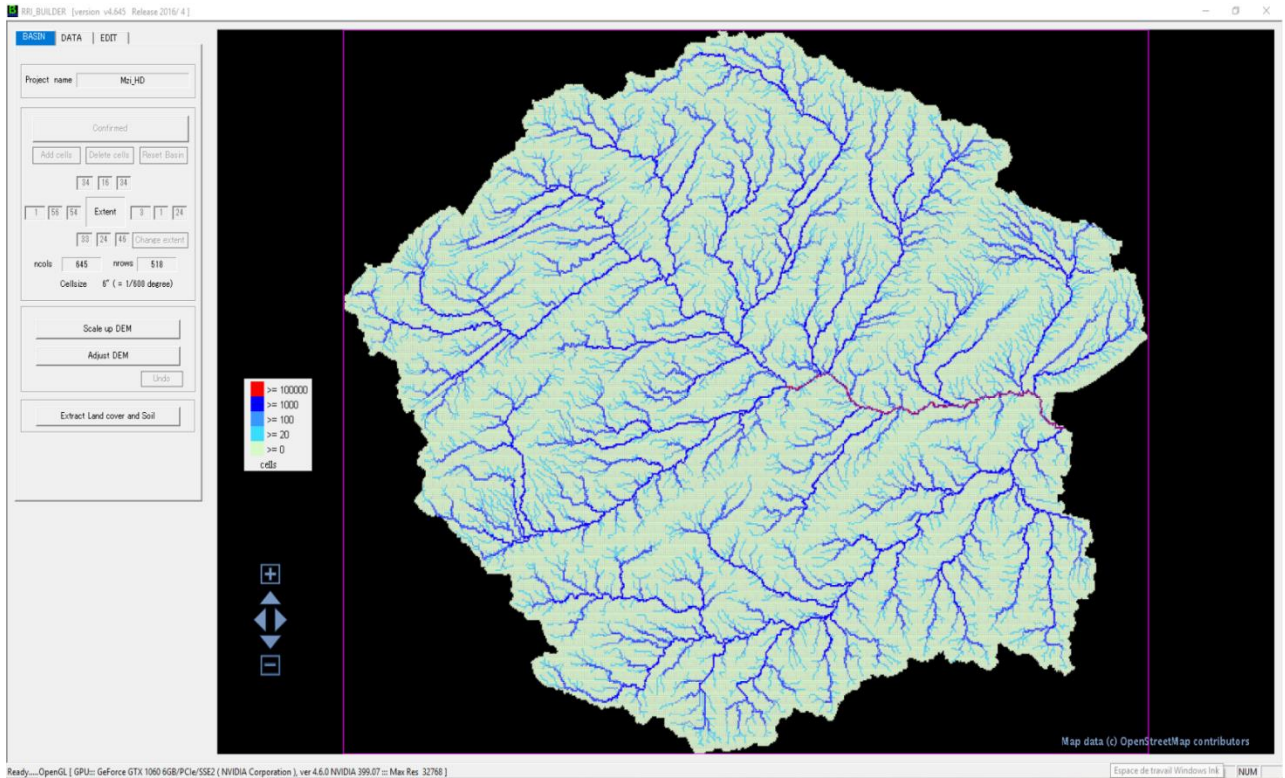


Figure VI.2 : Capture d'écran de l'interface graphique du modèle RRI (RRI Builder)

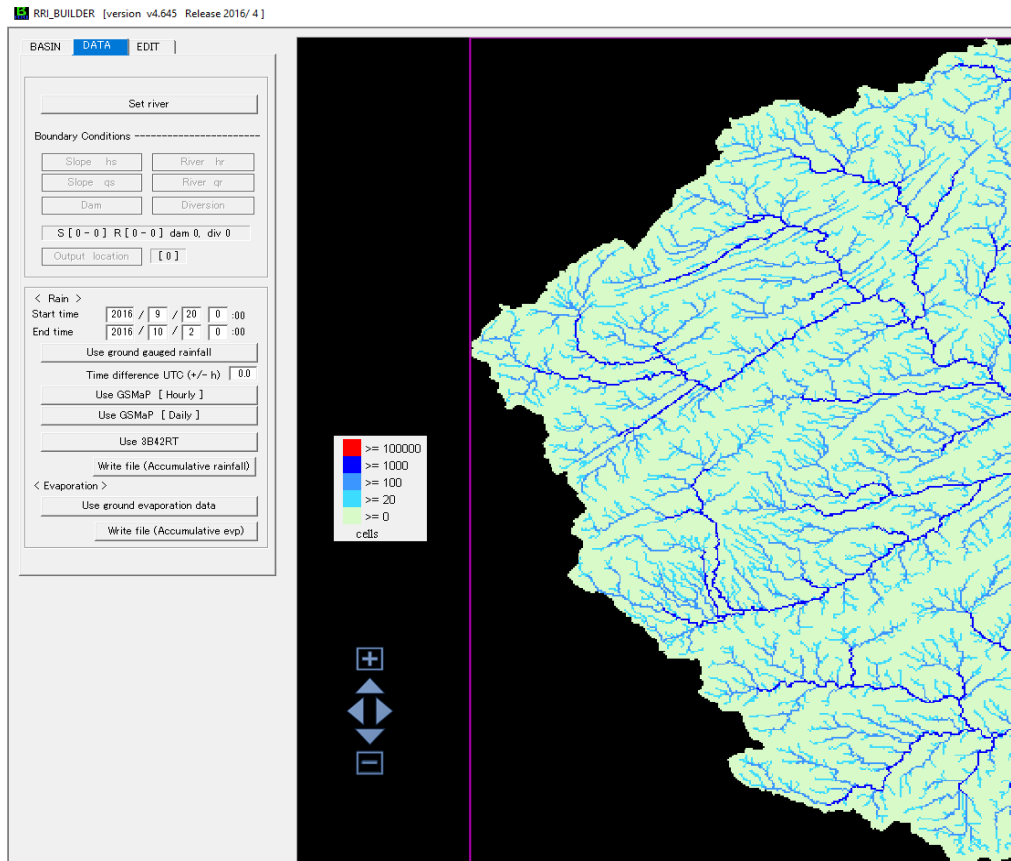


Figure VI.3 : Capture d'écran de l'interface graphique du modèle RRI « DATA »

VI.2 Préparation des entrées du modèle RRI

La prévision, la gestion et le suivi de l'évolution des inondations nécessite d'avoir des mesures pluviométriques et débitométriques instantanées pour de longues durées. L'accès à ces données est souvent difficile vu la rareté des stations de mesures au sol et parfois le manque d'entretien. C'est pourquoi, l'utilisation des données climatologiques satellitaires pourrait être une solution pour combler cette lacune en fournissant des données pluviométriques.

Dans la région d'étude, il existe quelques stations pluviométriques (Tableau VI.2). Elles ne couvrent pas principalement toute la région, ce qui ne présente pas un grand intérêt pour la prévision hydrologique : les quelques stations qui se trouvent à l'intérieur du territoire ne permettent pas d'avoir une connaissance suffisamment précise pour alimenter un modèle hydrologique. De plus, se pose l'épineux problème de la transmission des données, qui est nécessaire pour une utilisation en temps réel de manière opérationnelle. Par contre, ces stations ont l'avantage de fournir une connaissance historique qui peut servir de référence pour calibrer d'autres estimations de pluie, notamment les estimations par satellite.

Chapitre VI Application du modèle Pluie Débit (RRI)

Tableau VI.2 : Les caractéristiques des stations pluviométriques

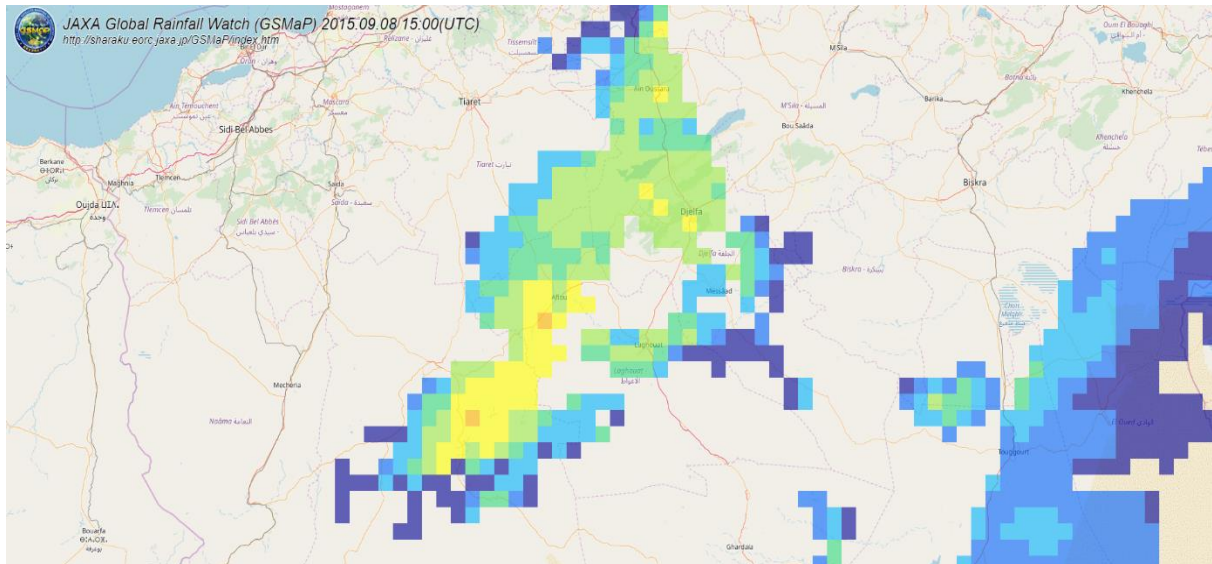
Station	Code ANRH	Coordonnées		Altitude (m)	Date d'installation
		X (Km)	Y (Km)		
Aflou	01.02.03	444.800	390.500	1400	1874
Sekhlafa	06.01.04	467.500	378.500	1233	1960
ElGhicha	06.01.02	449.000	370.200	1160	1960
Ain Madhi	06.02.02	463.400	355.000	985	1960
El Houita	06.03.02	475.100	340.000	900	1960
Tadjmout	06.02.06	484.050	363.900	894	1924
SidiMakhlouf	06.04.06	529.000	392.000	889	1960
Laghouat	06.04.05	516.450	356.900	765	1874
KsarElHirane	06.04.03	541.100	354.700	716	1960

Le modèle RRI permet d'intégrer les données satellitaires pour l'estimation de précipitations dans la gestion des inondations. Le modèle RRI utilise les données pluviométriques recueillies par satellite dans le cadre du projet GSMaP (cartographie spatiale des précipitations dans le monde) et les produits d'estimation des pluies TRMM qui sont issus du programme conjoint entre la NASA et l'agence d'exploration aérospatiale japonaise (JAXA) Tropical Rainfall Measuring Mission. Ces produits sont construits à partir des données du satellite météorologique TRMM. Afin d'y intégrer des observations pluviométriques faites au sol et d'améliorer la qualité (notamment la précision et l'échéance) des prévisions et/ou des alertes.

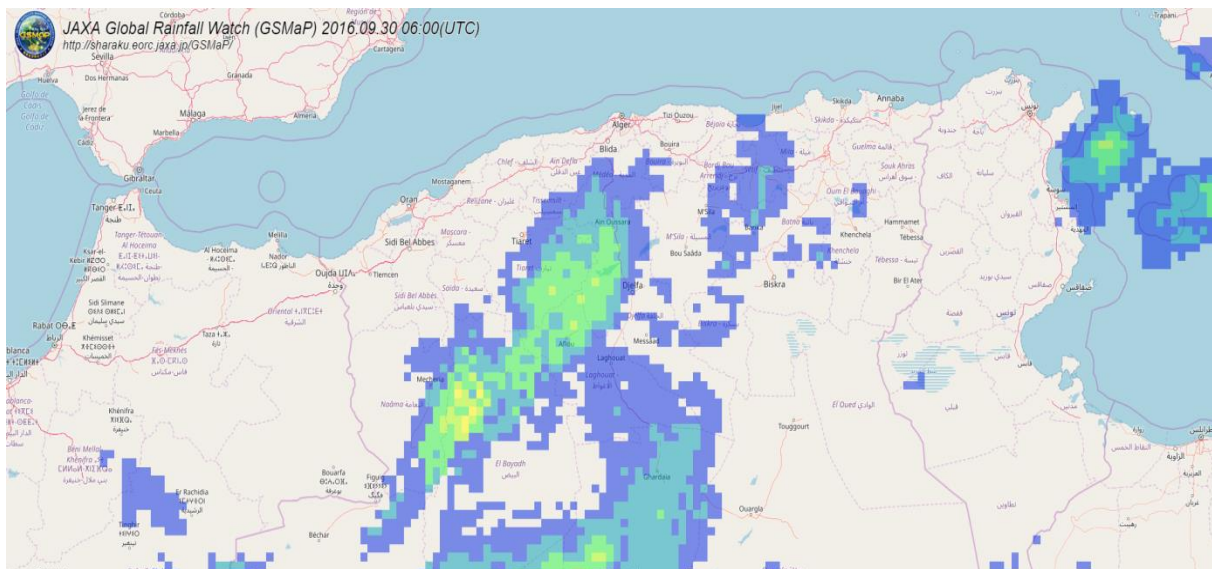
Les données pluviométriques GSMaP, qui sont actualisées toutes les heures, sont fournies à quatre heures d'échéance. La résolution des données pluviométriques GSMaP utilisées actuellement par l'équipe scientifique de la mission de la JAXA chargée de mesurer les précipitations est d'environ 0,1 degré sur 0,1 degré (soit environ 10 km sur 10 km). Ces données sont généralement produites à partir de données recueillies par divers radiomètres passifs disponibles au niveau mondial (par exemple, TRMM/TMI, Aqua/AMSR-E, ADEOS-II/AMSR, DMSP/SSM/I) et de données sur la température de brillance provenant de tous les satellites géostationnaires disponibles (GOES-8 et GOES-10, Météosat-7 et Météosat-5, et satellite météorologique géostationnaire Himawari), fusionnées à l'aide d'un filtrage de Kalman. Le produit est disponible en temps réel pour des résolutions de 0.25°, et en archive à

Chapitre VI Application du modèle Pluie Débit (RRI)

une résolution et de 0.1° . La version archive est généralement disponible après un délai de 6 mois. http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP_crest/



(a)



(b)

Figure VI.4:(a), (b) La distribution globale des précipitations le 08 septembre 2015 et 30 septembre 2016 respectivement.

Cette image montre la distribution globale des précipitations le 30 septembre 2016. GSMaP fournit des données en temps quasi-réel (environ 4 heures après observation) grâce à plusieurs satellites, dans le cadre d'une coopération internationale. Cette technique intervient

Chapitre VI Application du modèle Pluie Débit (RRI)

désormais dans la gestion des risques d'inondation en Asie du sud-est, contribuant ainsi à la sécurité et à la durabilité dans la région.

Le second produit satellitaire est appelé TRMM rainfall ; Les produits d'estimation des pluies TRMM sont issus du programme conjoint entre la NASA et l'agence d'exploration aérospatiale japonaise (JAXA) Tropical Rainfall Measuring Mission. Ces produits sont construits à partir des données du satellite météorologique TRMM. Nous avons utilisé le produit TRMM issu de l'algorithme 3B42RT qui est un produit disponible en temps réel. Les deux produits ont une définition spatiale de 0.25° et temporelle de 3 heures. <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>

Tableau VI.3: Résumés des caractéristiques des produits utilisés

	Données	Couverture	Résol. Temp	Résol. Spa.	Période Disponible	Agences	Sites
GSMAP	Satellite	N 60°-S 60°	1heurs	0.1°(10km)	1997-Présent	JAXA	http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP_crest/
3B42RT	Satellite	N 50°-S 50°	3heurs	0.25°(30 km)	2000-Présent	NASA	http://trmm.gsfc.nasa.gov/

VI.3.Modèle Numérique de Terrain (MNT) :

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) correspond à un découpage en mailles régulières et carrées du terrain naturel. Il y a trois grandes conséquences à l'utilisation du MNT par rapport à la modélisation globale : - prise en compte plus fine de la pluviométrie, dans la mesure où la pluie sur chaque maille pourra être différente, - possibilité d'individualisation des modèles de production et de transfert sur des classes de mailles, voire sur chaque maille. Ainsi, en distinguant par exemple différentes natures du sol du bassin versant étudié on pourra mettre en œuvre des modèles différents, ou pour un même modèle des jeux de paramètres différents, en fonction de la nature du sol.

Le MNT a été élaboré à partir des images radar (SRTM : Shuttle Radar Topography Mission) avec une résolution de 90 m.

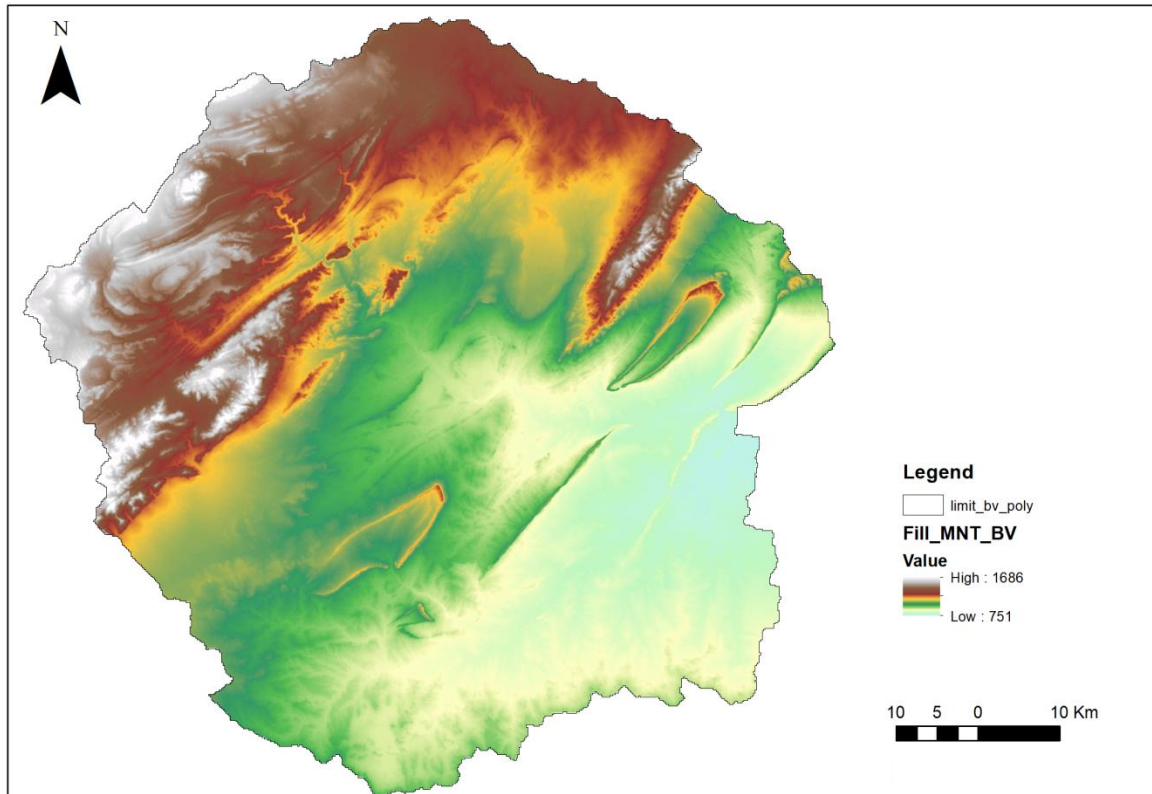


Figure VI.5 : Le Modèle Numérique de Terrain de la région d'étude.

VI.3.1. Flow accumulation : Accumulation de flux

Cette carte a été élaborée en utilisant Arcmap 10.2, L'outil Accumulation de flux dans Arcmap permet de calculer le flux cumulé sous la forme d'une pondération cumulée de toutes les cellules s'écoulant dans chaque cellule en pente descendante du raster en sortie. Si aucun raster de pondération n'est fourni, on attribue la pondération 1 à chacune des cellules, et la valeur des cellules du raster en sortie correspond au nombre de cellules qui s'écoulent vers chaque cellule.

Dans le diagramme ci-dessous, l'image située en haut à gauche montre la direction du flux de chaque cellule, et celle située en haut à droite le nombre de cellules qui circulent dans chaque cellule.

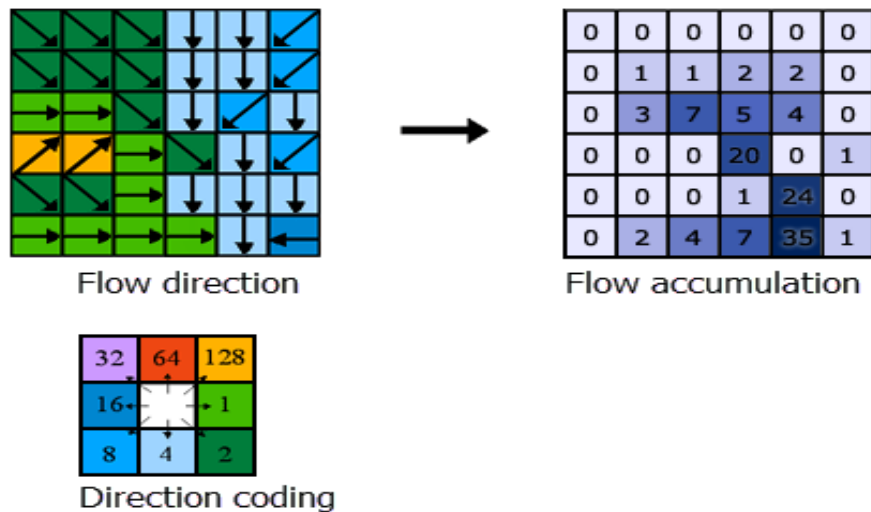


Figure VI.6 : Matrice d'explication. Tutorial d'ArcGis

Les cellules présentant une accumulation de flux élevée sont des zones de flux concentré qui peuvent être utilisées pour identifier des canaux d'écoulement. Les cellules présentant une accumulation de flux nulle sont des zones topographiques locales élevées qui peuvent être utilisées pour identifier des crêtes.

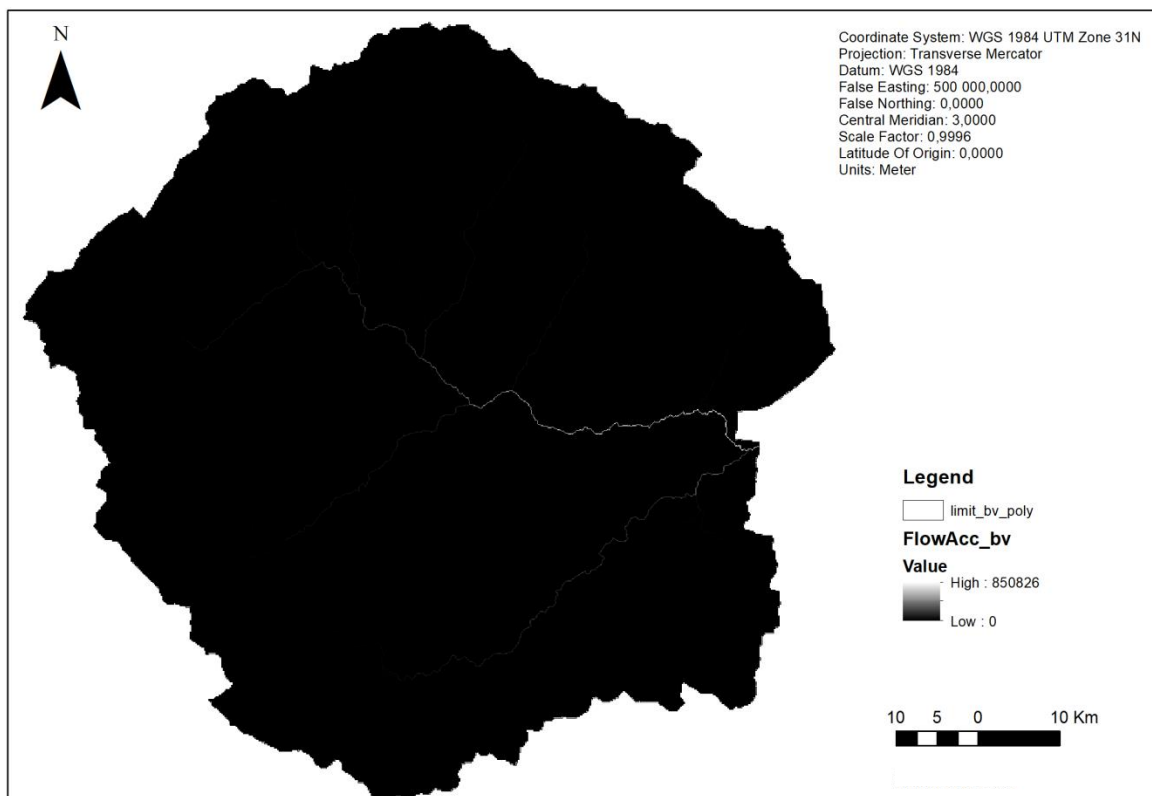


Figure VI.7 : flux accumulés ou surfaces drainées dans le bassin d'Oued M' zi

VI.3.2. Direction de flux : Flow Direction

- Fonctionnement de l'outil Direction de flux

Cette carte a été élaborée en utilisant Arcmap 10.2, L'un des principaux aspects de la dérivation des caractéristiques hydrologiques d'une surface est la capacité à déterminer la direction du flux de chaque cellule d'un raster. Cette opération est possible grâce à l'outil Direction de flux dans Arcmap.

Cet outil se sert d'une surface comme entrée et génère un raster représentant la direction du flux sortant de chaque cellule.

Il y a huit directions en sortie valides relatives aux huit cellules adjacentes dans lesquelles le flux peut circuler. Cette méthode, généralement appelée « modèle de flux à huit directions (D8) », repose sur l'approche de Jensen et Domingue (1988).

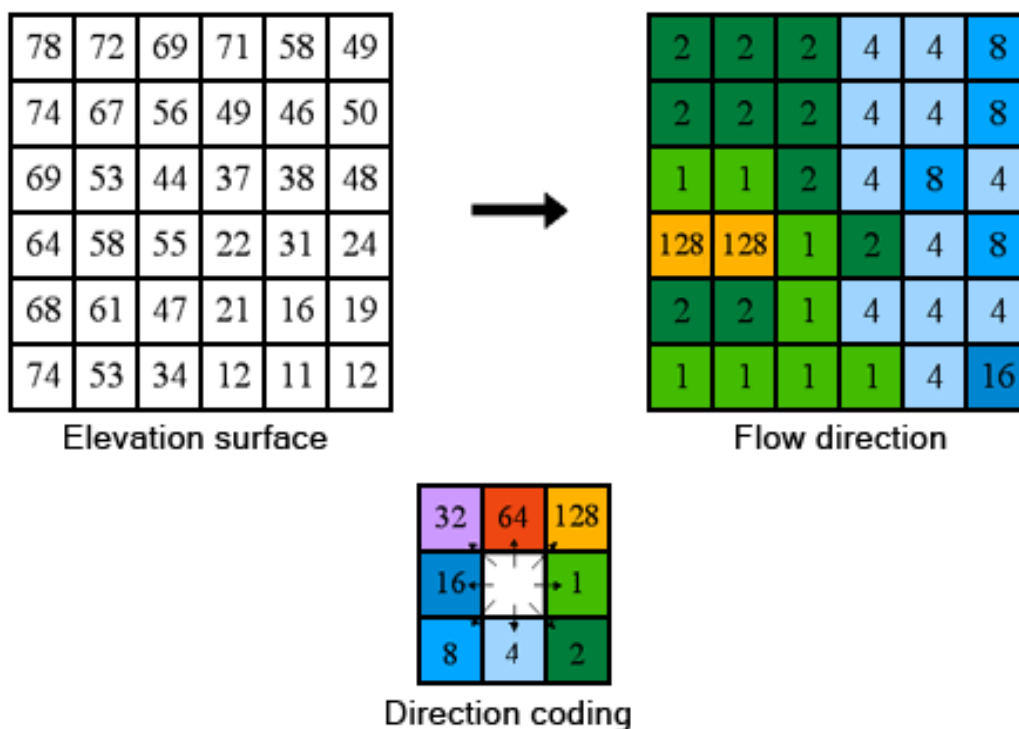


Figure VI.8 : Détermination de l'accumulation de flux. Tutorial d'ArcGis

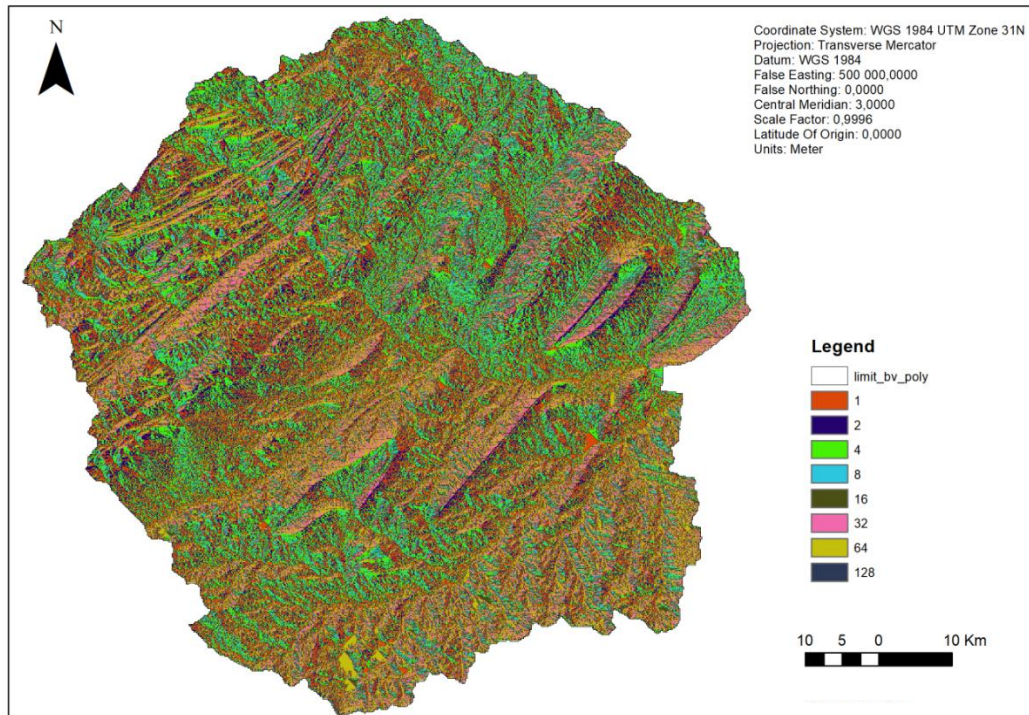


Figure VI.9 : Directions d'écoulement ou directions de flux dans le bassin de Oued M'zi

VI.3.3. Carte d'Occupation du sol

La carte d'occupation du sol a été extraite à partir de de la carte des sols de la FAO.

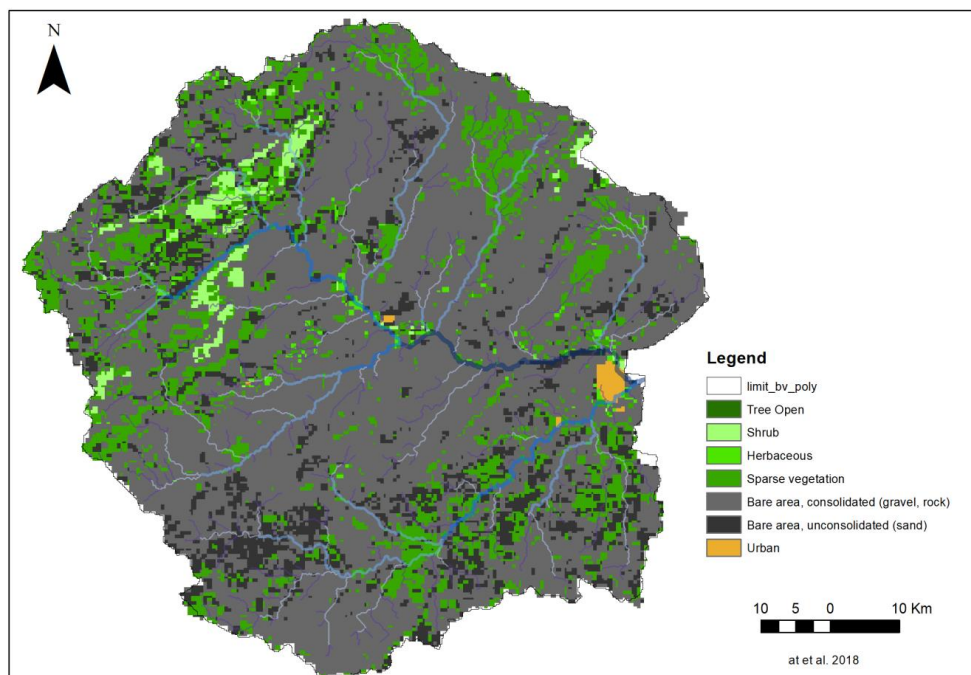


Figure VI.10 : Extrait de la carte d'occupation du sol (FAO)

Chapitre V Résultats et Interprétations

V.1 Résultats et discussions

Le modèle de simulation utilisé RRI a été calé en se basant sur des crues récentes, dans notre étude le modèle a été calé sur la crue de 08 septembre 2015 et validé sur la crue de 30 septembre 2016 ; pour lesquelles on dispose de données suffisantes (précipitations journalières, évaporation, laisses de crues, image satellitaire de l'inondation,). L'opération du calage consiste à ajuster les lois qui régissent l'écoulement dans le modèle (rugosité de l'Oued et du sol, largeur et profondeur de l'Oued, etc.) afin que celui-ci reproduise fidèlement la réalité.

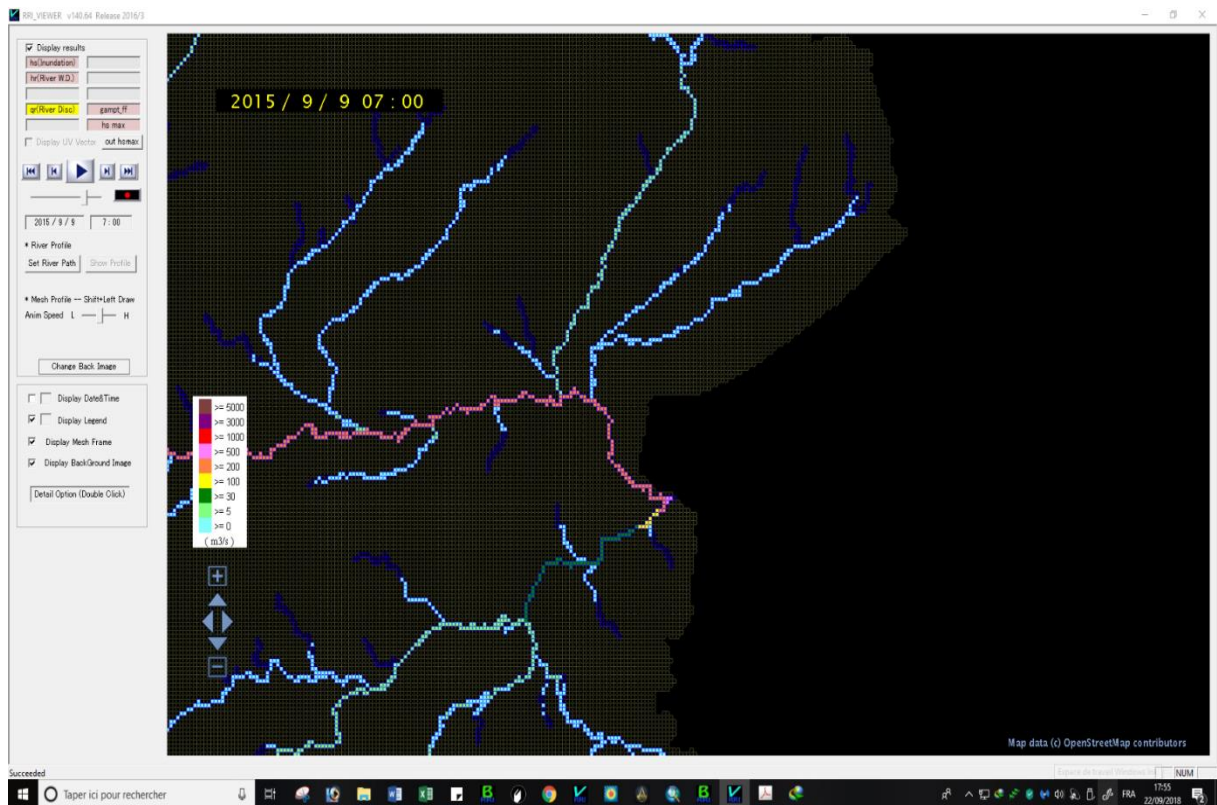


Figure V.1 : Capture d'écran de l'interface graphique du modèle RRI (RRI Viewer) : simulation du débit

Chapitre V Résultats et Interprétations

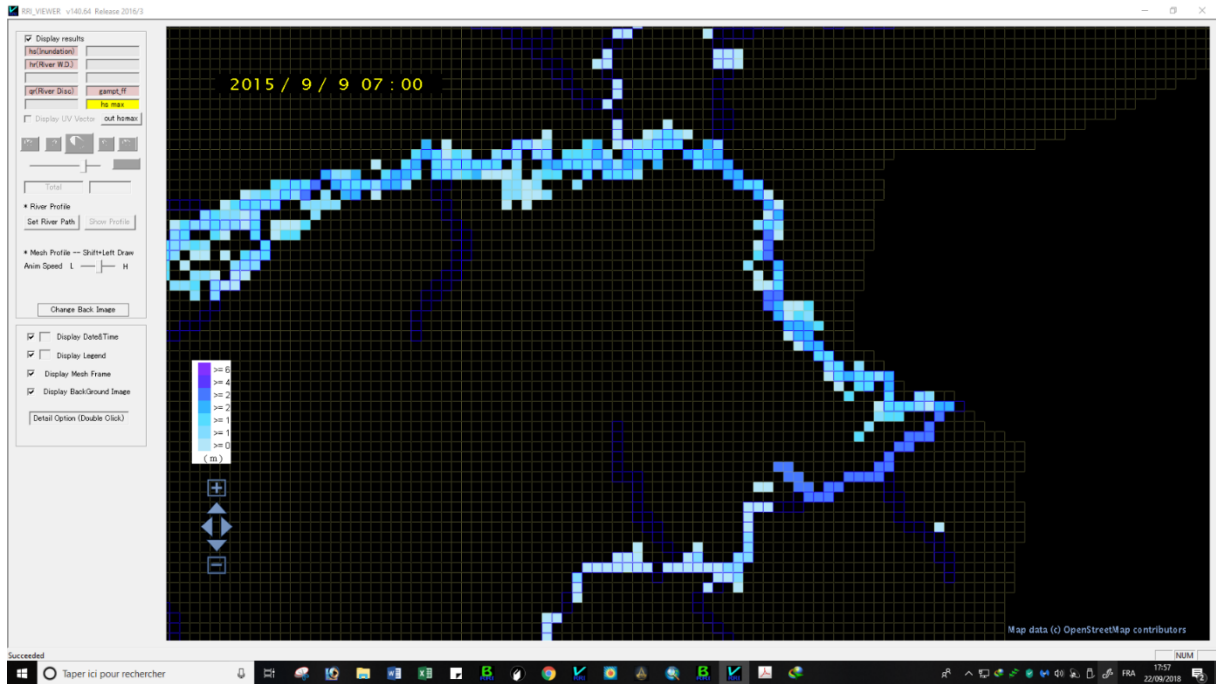


Figure V.2 : Capture d'écran de l'interface graphique du modèle RRI (RRI Viewer) : simulation des hauteurs des eaux

Plusieurs cartes ont été réalisées, dont certaines montrent les étendues d'eau recouvrant les plaines lors d'inondations passées, tandis que d'autres mettent en évidence les débits et niveaux au-delà desquels les infrastructures urbaines sont affectées par les étendues d'eau ou risquent de l'être lors de débordements. À titre d'exemple, la figure V.1 et V.2 illustre une carte des étendues d'eau recouvrant les plaines d'inondation réalisée à partir du modèle de simulation RRI. Les étendues d'eau représentée correspondent à des niveaux atteints lors des inondations du 08 septembre 2015 et 30 septembre 2016. La représentation cartographique de ces inondations permet également la validation du modèle de simulation, puisque, pour certaines de ces inondations, les données de leur étendue sont connues. En effet, les résultats du modèle de simulation peuvent être comparés à des cartes satellitaires (cf. figure V.3). De cette façon, il est possible de vérifier si le modèle de simulation représente adéquatement l'étendue d'eau lors d'un débordement.

Les images satellites sont utilisées afin de représenter les étendues d'eau recouvrant les plaines d'inondation en période de crue. Les satellites radar comme Radarsat-2, TerraSARX et Sentinel-2 sont généralement utilisés dans l'acquisition des images lors d'une inondation ou d'un tsunami, à cause de leur capacité de pénétration à travers le couvert nuageux et la possibilité d'obtenir des images en tout moment de la journée y compris la nuit.

Chapitre V Résultats et Interprétations

Une inondation de grande envergure pourrait ainsi ne pas être entièrement couverte par une image de très haute résolution spatiale, le satellite Sentinel-2 SAR (bande C) permet d'acquérir des images avec une résolution spatiale allant jusqu'à 5 m en mode Stripmap, tout en ayant une largeur de fauchée de 80 km, ce qui permet d'imager l'intégralité d'une zone inondée. Le traitement de l'image satellitaire et l'extraction de la carte d'inondation sont réalisés avec les logiciels « Erdas Imagine » et Arc Gis 10.2. La phase préliminaire était de définir les limites du bassin versant de l'Oued M'zi et de procéder au découpage des bandes spectrales qui sont au nombre de 7 (1, 2, 3, 4, 5,7 et 8). Le canal 6 n'a pas été retenu puisque ses propriétés se focalisent sur la thermique. La bande 8 représente la bande panchromatique de 15 m de résolution spatiale.

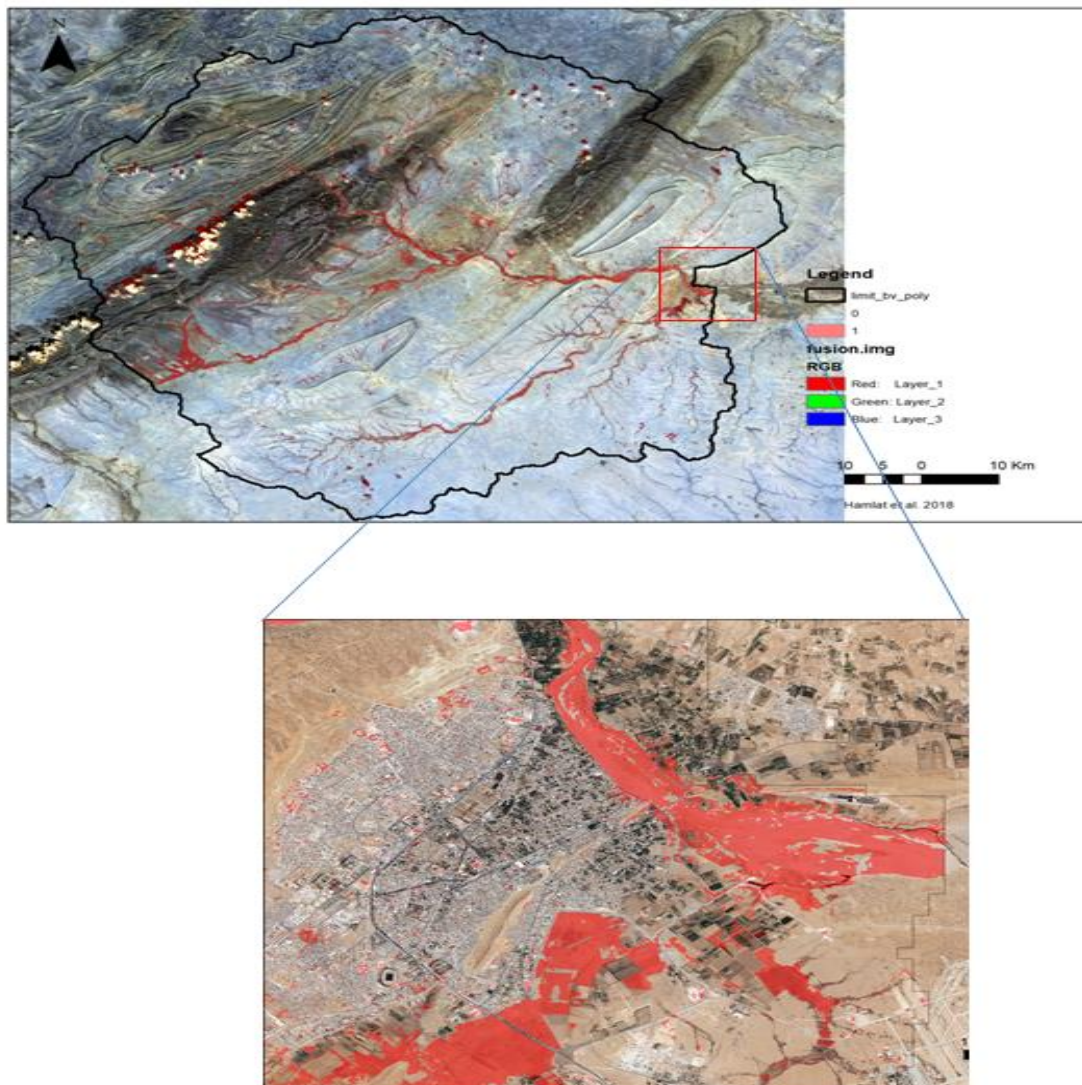


Figure V.3 : Carte d'inondation extraite à partir d'une image satellitaire Sentinel-2

Chapitre V Résultats et Interprétations

Les résultats des simulations montrent un bon accord avec une carte de l'inondation produite basée sur l'image satellitaire Sentinel-2. De plus, la simulation permet d'identifier les zones affectées par les crues, dont l'endommagement a été confirmé par une carte de l'inondation (cf. Figure V.3). La figure V.4 montre la répartition spatiale des hauteurs d'eau pendant la période de simulation. Les zones encadrées A et B de la figure V.5 montrent un accord raisonnable avec les zones inondées détectées par l'image satellitaire.

La zone A se situe le long du Oued M'zi juste en aval du point de confluence de Oued Messaad. Les résultats de simulation montrent que les zones limitrophes de Oued M'zi particulièrement sur sa rive droite ont été touché (Merdja, Rue Djoudi Abdelkader ex-Kabou , Rue Djoudi Belkacem ex-Boukfifila, Cité Ben Adjila «Zgag Zebara», Hôtel Marhaba, ...) et Bordj Senouci sur sa rive gauche (cf. tableau). La zone B est située autour dans l'exutoire de Oued Messad (Es-Seddikia, Ksar elbezaim, Dhaya,). Les résultats de simulation montrent que c'est une zone fortement exposée à l'inondation.

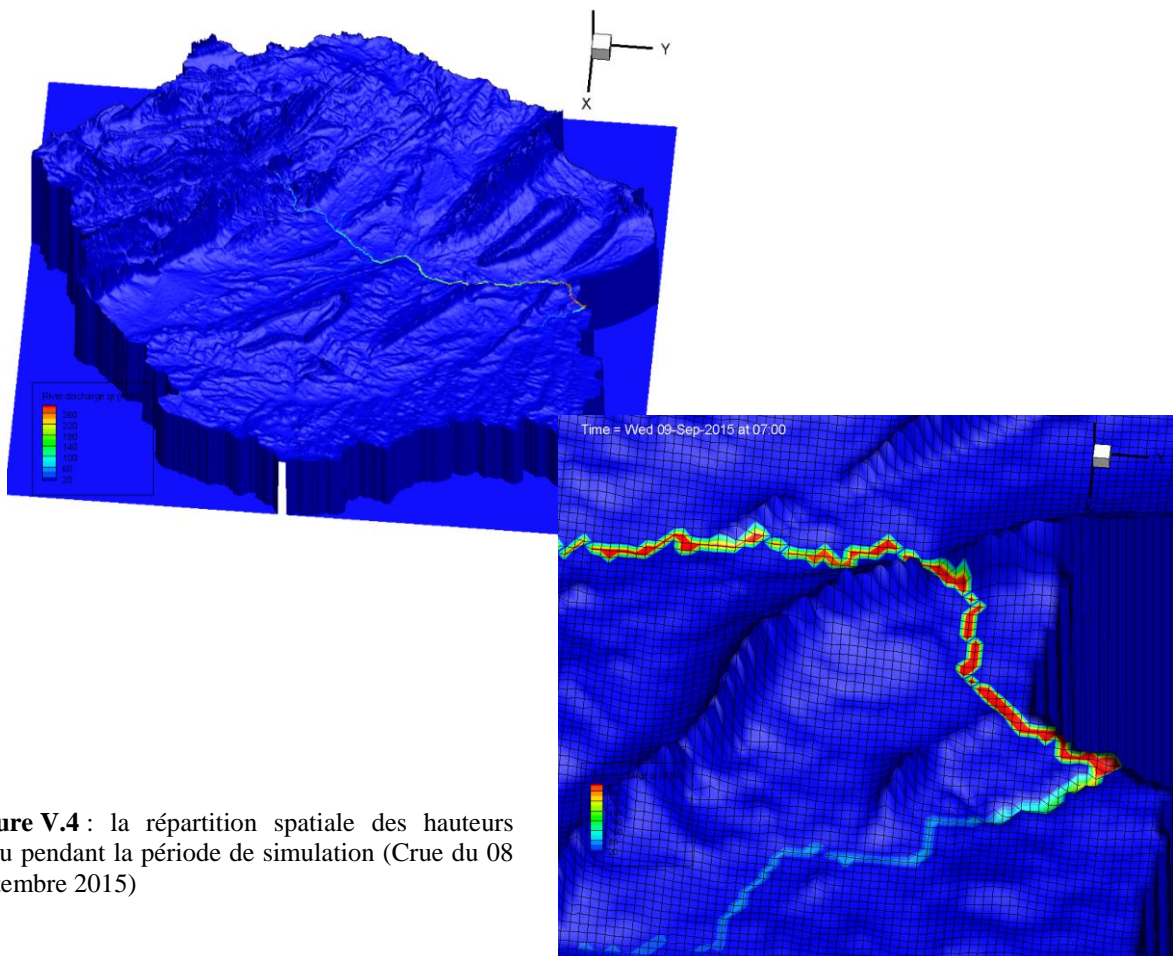


Figure V.4 : la répartition spatiale des hauteurs d'eau pendant la période de simulation (Crue du 08 septembre 2015)

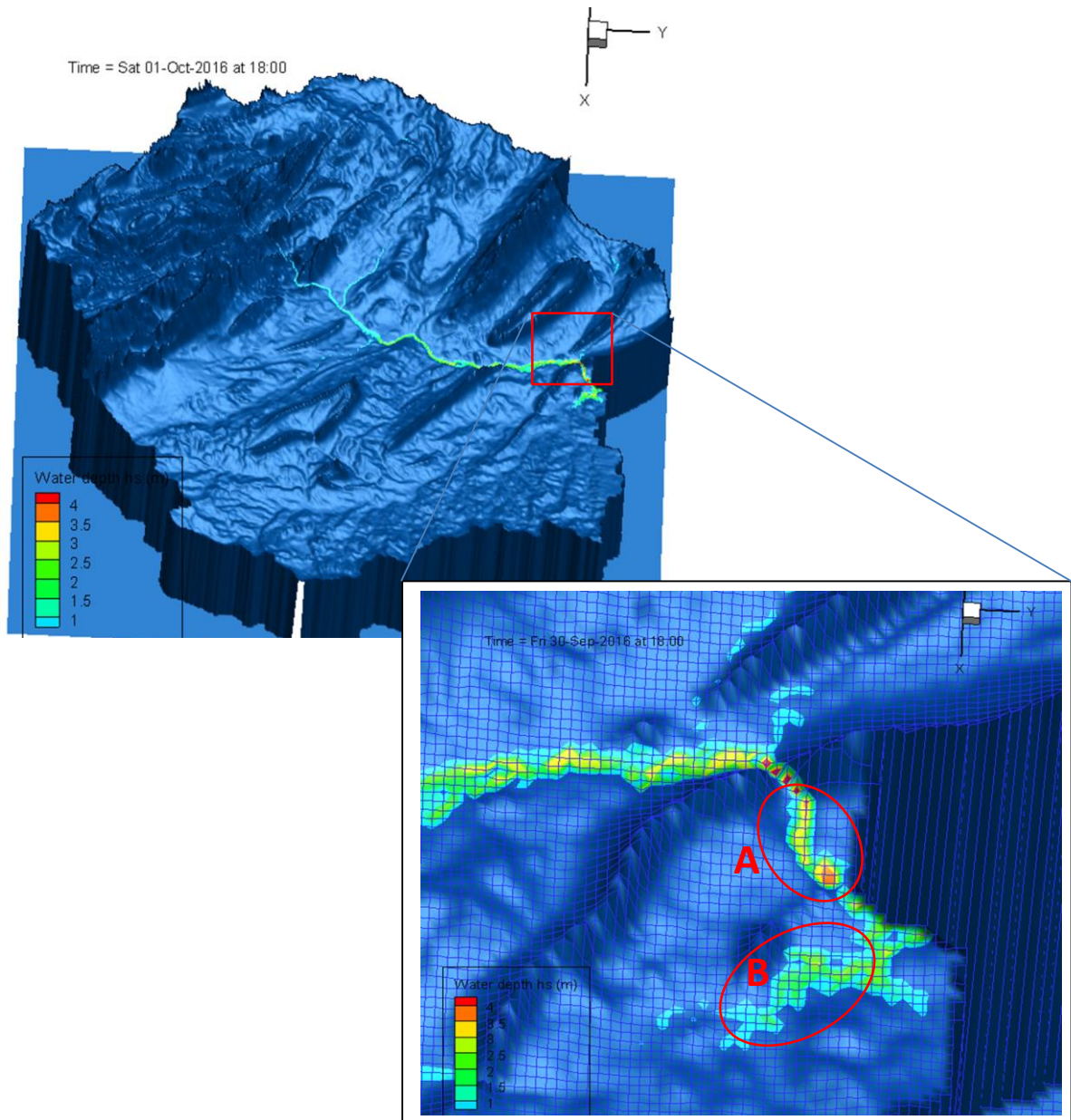


Figure V.5 : la répartition spatiale des hauteurs d'eau pendant la période de simulation (Cruée du 16 septembre 2016)

Il est présenté sur la figure V.5, les profondeurs d'eau simulées au 30 septembre 2016 sont recouvertes sur l'image de télédétection de Sentinel-2. Le schéma général indique un bon accord entre l'observation et la simulation en termes de zone d'inondation.

Les simulations ont montré que le débit de la crue de 30 septembre 2016 a atteint 1100 m³/s qui est très proche par ceux déterminé par quelques auteurs (Monsieur Stambouli ; DTP 2016) en se basant sur différentes méthodes empiriques qui est de l'ordre de 814,89 à 1033,69 m³ / s.

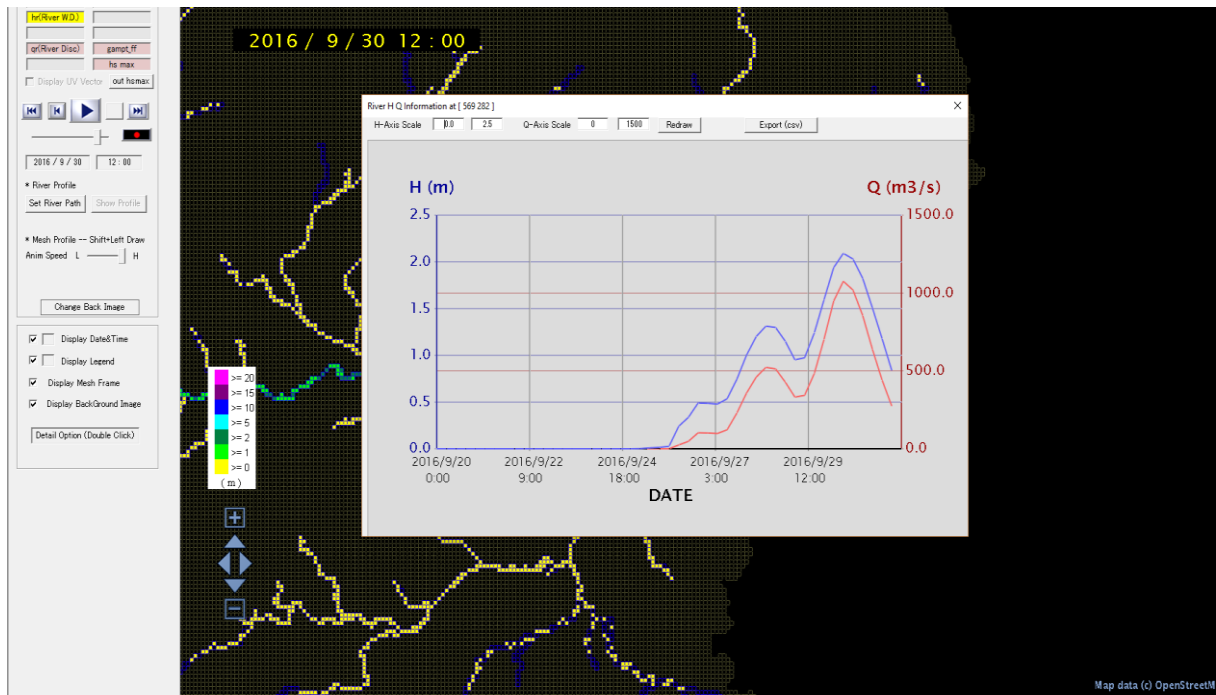


Figure V.6 : Capture d'écran de l'interface graphique du modèle RRI (RRI Viewer) : Hydrogramme de crue produit par le modèle

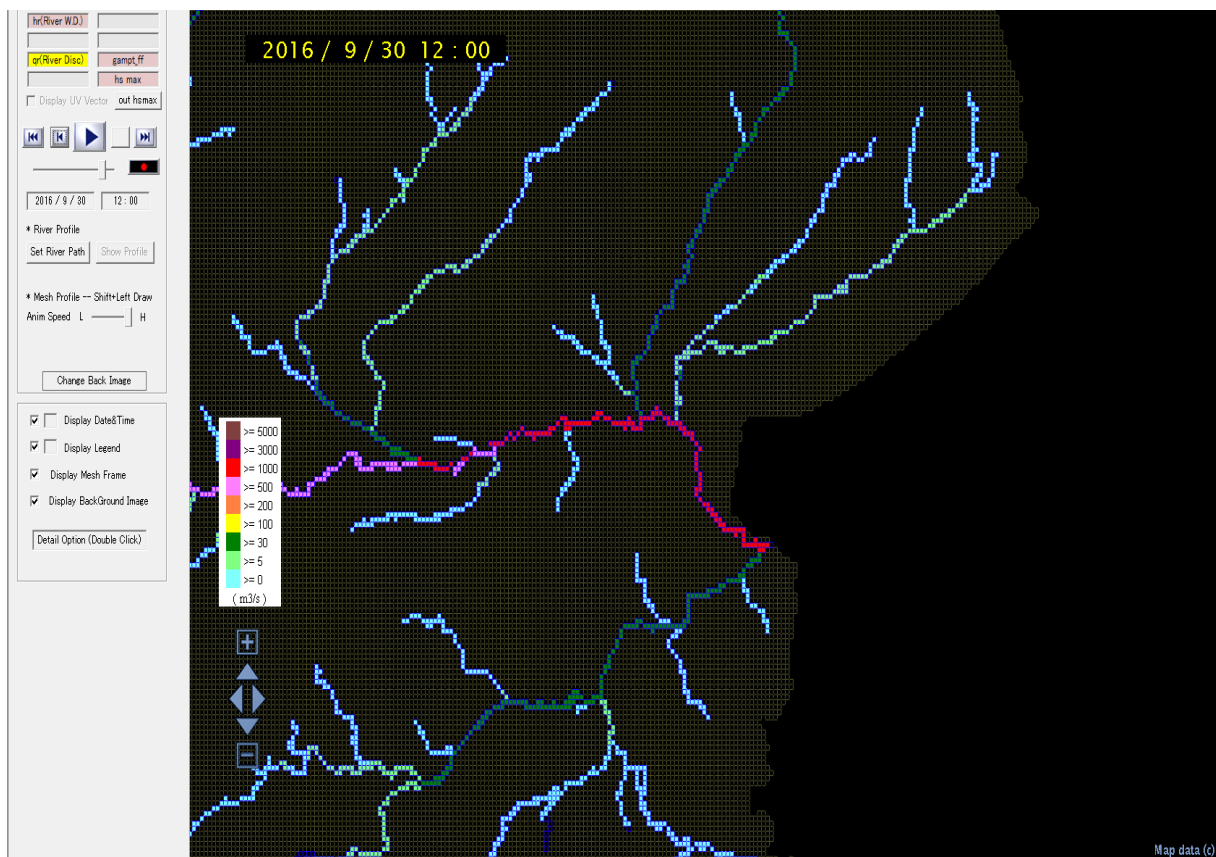


Figure V.7 : Capture d'écran de l'interface graphique du modèle RRI (RRI Viewer) : Simulation de débit

Chapitre V Résultats et Interprétations

V.2. Solutions proposées

Ne pouvant empêcher les inondations de se produire, il est cependant possible d'en atténuer les effets ou d'en diminuer la fréquence en priorité au niveau des zones les plus sensibles et les plus exposées. Pour diminuer les effets des inondations occasionnées par les crues cycliques de Oued M'zi, plusieurs actions ont été déjà réalisées et en cours de réalisations qui ont pour objectif de chercher une solution afin de protéger la ville et bien sur toute la wilaya dans les limites de son urbanisation.

- La suppression d'une partie de la butte rocheuse, située en rive gauche de l'ouvrage de tel manière d'assurer un section d'écoulement homogène jusqu'à l'entrée de l'ouvrage.
- Une digue de protection réaliser par des matériaux extrais de la bute rocheuse sur la rive gauche.
- Des murs de soutènement au niveau des méandres pour éviter le débordement et l'inondation des zones limitrophes
- Un rehaussement du tablier peut donner un peu plus de sécurité et une tirante d'aire admissible
- La surélévation des rives dans les zones inondables, afin d'aboutir à une surface (mouillée) d'évacuation des crues suffisantes par le gabionnage seul ou renforcé par les palles planches si la surélévation est importante.
- Le pavage des berges (fixation des sols) dans le cas au la surface ne nécessite pas un grand élargissement.
- Le reprofilage de l'Oued avec le bétonnage des rives ou implanter des terrassements de grande masse (sablière).
- Ecartement de toutes sources de perturbation qui ils ont un impact sur l'hydrologie du bassin versant et du régime d'écoulement de Oued M'zi (eg. Sablières installées le_long_d'Oued M'zi

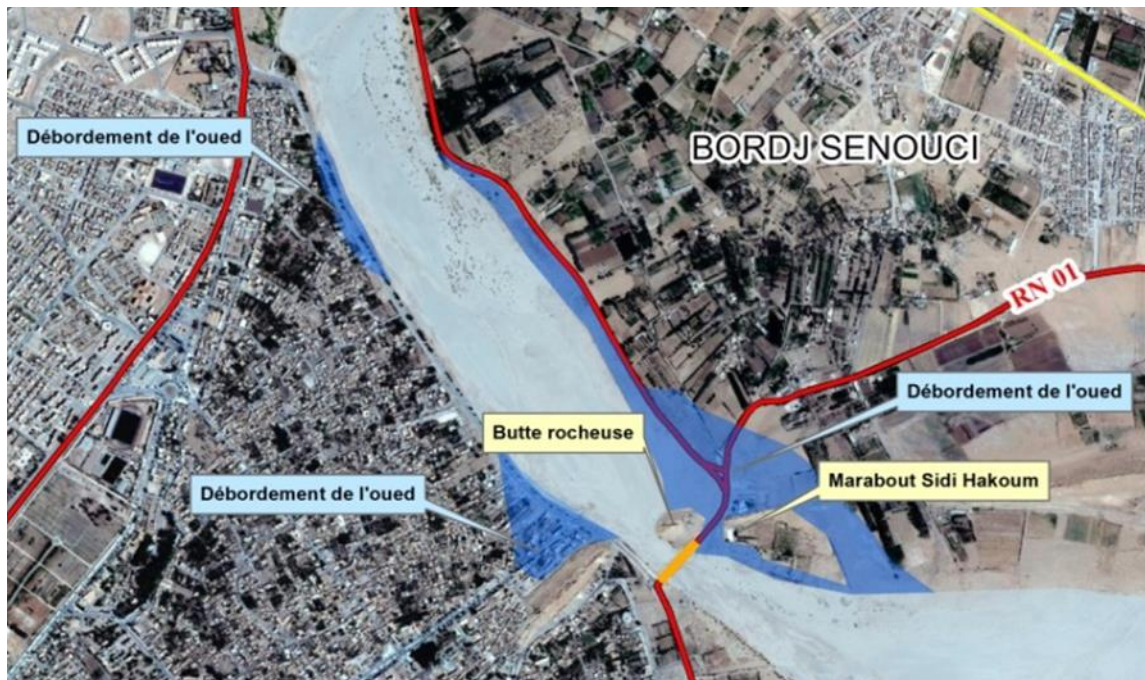


Figure V.8: La suppression d'une partie de la butte rocheuse (SETS 2017)

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La prise de conscience effectuée ces dernières années par les grandes administrations incite à trouver des solutions alternatives aux problèmes des inondations. Cependant, pour les crues exceptionnelles ou quand les autres mesures se sont révélées impuissantes, il est important d'apprendre à anticiper les crues au moyen de systèmes de prévision. Le modèle RRI tient compte de la spatialisation des précipitations, le modèle est susceptible de fonctionner de manière optimale

Cette étude a analysé le processus pluie-débit et l'inondation dans le bassin versant d'Oued M'zi avec un nouveau modèle Pluie Débit : Rainfall-Runoff-Inundation (RRI), qui simule simultanément les processus de ruissellement pluvial et les inondations en deux dimensions grâce aux équations de l'onde diffusive. Le modèle a été calé en se basant sur des crues récentes, dans notre étude le modèle a été calé sur la crue de 08 septembre 2015 et validé sur la crue de 30 septembre 2016 ;

Le modèle RRI permet d'intégrer les données satellitaires pour l'estimation de précipitations dans la gestion des inondations. Le modèle RRI utilise les données pluviométriques recueillies par satellite dans le cadre du projet GSMaP et les produits d'estimation des pluies TRMM.

Les résultats des simulations montrent un bon accord avec une carte de l'inondation produite basée sur l'image satellitaire Sentinel-2. De plus, la simulation permet d'identifier les zones affectées par les crues, dont l'endommagement a été confirmé par une carte de l'inondation. Comme le modèle est conçu pour être utilisé même immédiatement après une catastrophe, il peut être un outil efficace pour analyser les inondations à grande échelle et pour fournir des informations complémentaires aux services en charge des opérations de secours.

En conclusion, ce modèle pluie-débit distribué aux grandes administrations fournit des performances très satisfaisantes, avec des paramètres conservant une forte signification physique, et se prête à des applications à vocation opérationnelle pour les collectivités locales dans le domaine de la prédétermination et de la prévision de crues. L'application du modèle a démontré que, même sur un bassin versant où les données disponibles sont limitées en

Conclusion Générale

quantité et en qualité, ce modèle peut apporter des informations utiles pour la mise en place de la gestion intégrée de l'eau par bassin versant.

Bibliographie

Aissaoui Asma (2016) Hydrologie et hydrogéologie du bassin versant de l'Oued M'zi (Laghouat – Algérie). Thèse de de Magister Sciences de la Terre. Université d'Oran 2.

Atallah CHENAFI (2013) Cartographie et protection qualitative des eaux souterraines en zone aride, cas de Milok - Metlili, Atlas Saharien Central (Laghouat – Algérie). Thèse de Magister en Science de la terre, Université d'Oran

BATES, P. D. et A. P. J. DE ROO (2000). « A simple raster-based model for flood inundation simulation », *Journal of hydrology*, vol. 236, p. 54-77.

Contributeurs de Wikipédia. Modèle hydrologique [Internet] (2017). Wikipédia, l'encyclopédie libre; 2017 oct. 23, 16:17 UTC [cited Monsieur 2017 oct. 23]. Disponible à l'adresse:

http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Mod%C3%A8le_hydrologique&oldid=141823552
d'inondation de plaine » Thèse Doctorat ; Science de l'eau dans l'environnement-

Damien. R : « Méthodologie d'exploitation quantitative des photographies aérienne

DEFRANCE B., 2009, Plan de prévention des risques naturels d'inondation (PPRNI) Brévenne –Turdine », *Compte-Rendu de la 1ère réunion publique le 1er octobre 2009 à Tarare*, P69, p80

Drouin, A. (2008). Élaboration d'un modèle de simulation des niveaux d'inondation à partir d'un SIG et application à un site : rivière Saint-François à Sherbrooke. *Environnement Urbain*, 2, 33. doi:10.7202/019220ar

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

Hannachi, A., 1981. Relation entre aquifères superficiels et profonds : Hydrogéologie de la vallée d'oued M'zi à l'Est de Laghouat. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 121p.

HOUYOU, Zohra. (2015) Impact de la mise en culture en pluvial sur la dégradation du sol par érosion éolienne dans la steppe centrale (cas de la région de Laghouat). 2015. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure Agronomique EL-Harrach-Alger.

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Risques-technologiques,12992.html>

Hydro Projet Ouest HPO (2012) Etude d'avant-projet détaillé de l'alimentation en eau potable à partir du barrage de Seklafa. Wilaya de Laghouat. Rapport de Synthèse. Ministère des ressources en eau

I.A.P., 1972. Notice explicative de la carte géologique à 1/200.000 de Laghouat. In HOUYOU, **Zohra**. (2015) Impact de la mise en culture en pluvial sur la dégradation du sol par érosion éolienne dans la steppe centrale (cas de la région de Laghouat). 2015. Thèse de doctorat.Ecole Nationale Supérieure Agronomique EL-Harrach-Alger.

ICHARM (2016) Republic of the Union of Myanmar: Transformation of Urban Management - Flood Management Component (Financed by the Japanese Fund for Poverty Reduction).Final Report Part 2. Ministry of Construction and Ministry of Transport and Communications,

ICOSIUM FORAGE & ENGINEERING SERVICES. (1997) Etude hydroclimatologique du sous-bassin versant de l'Oued M'zi (bassin versant de l'Oued Melrhir). Ministère de l'Equipement, Direction de l'Hydraulique de la Wilaya de Laghouat.

LEDOUX B., 2006, La gestion du risque inondation, Edition TEC et DOC 11, rue La vorisier-Paris.

Meddi, M., & Bouchaib, F. B. (2010). Etude des crues dans le bassin du Cheliff. Application de la méthode du Gradex. Nature & Technology, (3), 21.

Modèle hydrologique. (2017). Wikipédia, l'encyclopédie libre. Page consultée le, 23 octobre 23,2017 à partir de http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Mod%C3%A8le_hydrologique&oldid=141823552.

Nastiti, K. D., Kim, Y., Jung, K., & An, H. (2015). The Application of Rainfall-Runoff-inundation (RRI) Model for Inundation Case in Upper Citarum Watershed, West Java-Indonesia.Procedia Engineering, 125, 166–172. doi:10.1016/j.proeng.2015.11.024

Peron, A., 1883. Description géologique de l'Algérie. In HOUYOU, Zohra. (2015) Impact de la mise en culture en pluvial sur la dégradation du sol par érosion éolienne dans la steppe centrale (cas de la région de Laghouat). 2015. Thèse de doctorat.Ecole Nationale Supérieure Agronomique EL-Harrach-Alger.

Ritter, E., 1902. Le djebel Amour et les Monts des Ouled Nails. Bulletin du service de la carte géologique de l'Algérie. In HOUYOU, Zohra. (2015) Impact de la mise en culture en pluvial sur la dégradation du sol par érosion éolienne dans la steppe centrale (cas de la région

de Laghouat). 2015. Thèse de doctorat.Ecole Nationale Supérieure Agronomique EL-Harrach-Alger.

Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S., & Fukami, K. (2012). Rainfall–runoff–inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin. *Hydrological Sciences Journal*, 57(2), 298–312. doi:10.1080/02626667.2011.644245

Sayama, T., Tatebe, Y., Tanaka, S. (2015) An emergency response-type rainfall-runoff-inundation simulation for 2011 Thailand floods, *Journal of Flood Risk Management*,

Société d'Etudes Techniques de Sétif « S.E.T.S » (2017). Effondrement de l'ouvrage d'art sur Oued M'zi au Niveau de Sidi Hakoum. Direction des Travaux Publics de la wilaya de Laghouat.

Soleilhavoup, F. (1975). Crues de l'Oued M'zi à Laghouat, d'octobre 1972 à février 1974: chronologie et description des principaux processus ayant affecté la surface du lit de l'oued. *L'enseignement des sciences naturelles en Algérie*, 13, 32, 97.

Takahiro SAYAMA (2013) *Rainfall-Runoff-Inundation Model User's Manual*. ver. 1.4.2. International Center for Water Hazard and Risk Management (ICHARM), 2013.

XAVIER .L et JEAN.P, «Risque et urbanisme», le moniteur, Paris 2004, P 13.

XAVIER .L et JEAN.P, «Risque et urbanisme», le moniteur, Paris 2004, P 53.

Yahiaoui Abdelhalim (2012) *Inondations Torrentielles Cartographie des Zones Vulnérables en Algérie du Nord (Cas de l'oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbès)*.Thèse de Doctorat en Hydraulique. Ecole Nationale Polytechnique

Annexe

Tableau des rugosités de Manning

Valeurs du coefficient n de Manning

Nature des surfaces	Etats des parois			
	Parfait	Bon	Assez bon	Mauvais
A) Canaux artificiels				
Ciment lissé	0,01	0,011	0,012	0,013
Mortier de ciment	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs en bois raboté	0,01	0,012	0,013	0,014
Aqueducs en bois non raboté	0,011	0,013	0,014	0,015
Canaux revêtus de béton	0,012	0,014	0,016	0,018
Moëllons bruts	0,017	0,02	0,025	0,03
Pierres sèches	0,025	0,03	0,033	0,035
Moëllons dressés	0,013	0,014	0,015	0,017
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire lisse	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire plissée	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre droits et uniformes	0,017	0,020	0,0225	0,025
Canaux avec pierres, lisses et uniformes	0,025	0,030	0,033	0,035
Canaux avec pierres, rugueux et irréguliers	0,035	0,040	0,045	-
Canaux en terre à larges méandres	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre dragués	0,025	0,0275	0,030	0,033
Canaux à fond en terre, côtés avec pierres	0,028	0,030	0,033	0,035
B) Cours d'eau naturels				
1) Propres, rives en ligne droite	0,025	0,0275	0,030	0,033
2) Idem 1 avec quelques herbes et pierres	0,030	0,033	0,035	0,040
3) Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres	0,035	0,040	0,045	0,050
4) Idem 3, l'eau à l'étiage, pente et sections plus faibles	0,040	0,045	0,050	0,055
5) Idem 3, avec quelques herbes et pierres	0,033	0,035	0,040	0,045
6) Idem 4, avec pierres	0,045	0,050	0,055	0,060
7) Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	0,050	0,060	0,070	0,080
8) Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	0,075	0,100	0,125	0,150

Reference Table : Green-Ampt Infiltration Parameters for different soil texture

Soil texture class	k_v (m/s)	ϕ [gammaa]	S_f (m)
Sand	6.54E-05	0.437	0.0495
Loamy sand	1.66E-05	0.437	0.0613
Sandy loam	6.06E-06	0.453	0.1101
Loam	3.67E-06	0.463	0.0889
Silt loam	1.89E-06	0.501	0.1668
Sandy clay loam	8.33E-07	0.398	0.2185
Clay loam	5.56E-07	0.464	0.2088
Silty clay loam	5.56E-07	0.471	0.273
Sandy clay	3.33E-07	0.43	0.239
Silty clay	2.78E-07	0.479	0.2922
Clay	1.67E-07	0.475	0.3163