

Etude De La Vulnerabilite Aux Risques D'inondations Dans La Ville De Meknes. Apport Des Sig, Du Mnt Et Des Modeles Empiriques

Abdelaziz Rhazi, Dr.
Ali Essahlaoui, PES
Abdellah El Hmaidi, PES
Abdelhadi El Ouali, PES

Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences, Département de Géologie,
Equipe de Recherche « Sciences de l'Eau et Ingénierie de
l'Environnement », Laboratoire de Géo-ingénierie et Environnement, B.P
11201, Zitoune, Meknès, Maroc.

Doi: 10.19044/esj.2017.v13n36p102 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2017.v13n36p102](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2017.v13n36p102)

Abstract

The present study aims to assess, identify and map the risk of flooding urban in the aim of protecting the city of Meknes (center of northern Morocco) from the flooding of the Oued Boufekrane which runs along the city from the south to the north. It is carried out using the tools modeling, of empirical formulae and functions integrated into the software dedicated to the systems of Geographic Information System (GIS) and by exploiting the climate data, hydrological, topographical, geological, etc. The slopes of the watershed of the Oued Boufekrane vary approximately between 1 and 19%. They allow determining the areas and neighborhoods vulnerable to the risk of flooding with slopes not exceeding the 6%. The vulnerability to the risk of flooding which requires a priority intervention affects mainly the neighborhoods located in the southwest of the agglomeration of Meknes and along the valley of the Oued Boufekrane.

Keywords: Mapping, GIS, Empirical models, MNT, Flooding risk, Danger map

Résumé

La présente étude vise à évaluer, identifier et à cartographier le risque d'inondation urbaine dans le but de protéger la ville de Meknès (centre du Nord du Maroc) des crues de l'Oued Boufekrane qui longe la ville du Sud vers le Nord. Elle est réalisée à l'aide des outils de modélisations, des

formules empiriques et des fonctions intégrées dans les logiciels dédiés aux Systèmes d' Informations Géographiques (SIG) et en exploitant les données climatiques, hydrologiques, topographiques, géologiques, etc. Les pentes du bassin versant de l'Oued Boufekrane varient environ entre 1 et 19%. Elles permettent de déterminer les zones et quartiers vulnérables aux risques d'inondations ayant des pentes ne dépassant pas les 6%. La vulnérabilité aux risques d'inondations qui nécessite une intervention prioritaire touche principalement les quartiers situés dans le Sud-Ouest de l'agglomération de Meknès et le long de la vallée de l'Oued Boufekrane.

Mots-clés: Cartographie, SIG, Modèles empiriques, MNT, Risque d'inondations, Carte de danger

Introduction

A l'instar d'autres pays méditerranéens le Maroc, par son climat semi-aride, n'a pas échappé aux effets des inondations liés directement aux changements climatiques. Une rétrospective du passé, montre bien qu'au fil du temps, il y avait des successions alternées et extrêmes du climat qui se manifestent en longues périodes de sécheresses et courtes durées des crues. Les périodes de sécheresses étaient longues et fréquentes et se succèdent et sont parfois alternées par des temps humides et pluvieux au point de crues.

En effet, plusieurs crues qui ont marqué notre histoire et ont gravé notre mémoire. Il y a lieu d'évoquer la crue qui a dévasté la ville de Sefroule 25 Septembre 1950, lorsque la ville a été inondée avec une lame d'eau de 6m de haut entraînant des centaines de morts. Aussi celle qui a ravagé la vallée de Ziz le 05 Novembre 1965 laissant 25 000 habitants sans abri et qui a imposé la construction du barrage Hassan Adakhil à l'amont, au nord de la ville d'Errachidia. Aussi, la crue de la Moulouya, survenue le 23 mai 1968, était d'une violence qu'elle a emporté l'assise rive gauche du barrage Mohammed V avec un débit de pointe de 7200 m³/s et un volume de 570 millions de m³ soit la capacité de la retenue.

D'autres évènements catastrophiques avaient frappé fortement Ourika en 1995, El Hajeb en 1997, Settat et Mohammedia en 2002, Tan Tan, Nador, Al Hoceima et Khénifra en 2003. De violentes crues du Sebou, qui traversent le Gharb, avaient constituées un danger permanent sur les groupements d'habitation, villes (Belksiri, Sidi Slimane, etc.) et centres riverains en débordant de son lit en moyenne tous les deux ans avant la construction du barrage Al Wahda en 1997.

Le présent travail tente de porter une plus-value à la recherche scientifique en matière de gestion et de prévention des risques naturels dans le milieu urbain de Meknès dans l'horizon d'une généralisation des résultats obtenus à l'ensemble des espaces urbains et périurbains de notre pays.

Plusieurs difficultés ont été rencontrées pour adopter les approches historique et géomorphologique. Ainsi, notre approche méthodologique se basera plutôt sur le système d'information géographiques (SIG) et l'utilisation des formules empiriques pour analyser et cartographier les zones à risques d'inondations dans l'agglomération de Meknès où la dimension du risque est rarement prise en considération dans la planification urbaine.

Description de la zone d'étude

La ville de Meknès est compartimentée en plusieurs parties de plateau plus ou moins étendues, séparées les unes des autres par des vallées avec des profondeurs importantes, dont la largeur varie de l'amont à l'aval. Elle se trouve sur le côté Nord du plateau de Saïss-Meknès qui la sépare des collines pré-rifaines, surplombant la dépression regroupant les affluents du R'dom (vallée Bouishak, vallée de Boufekrane et vallée de Ouislane) (Fig. 1).

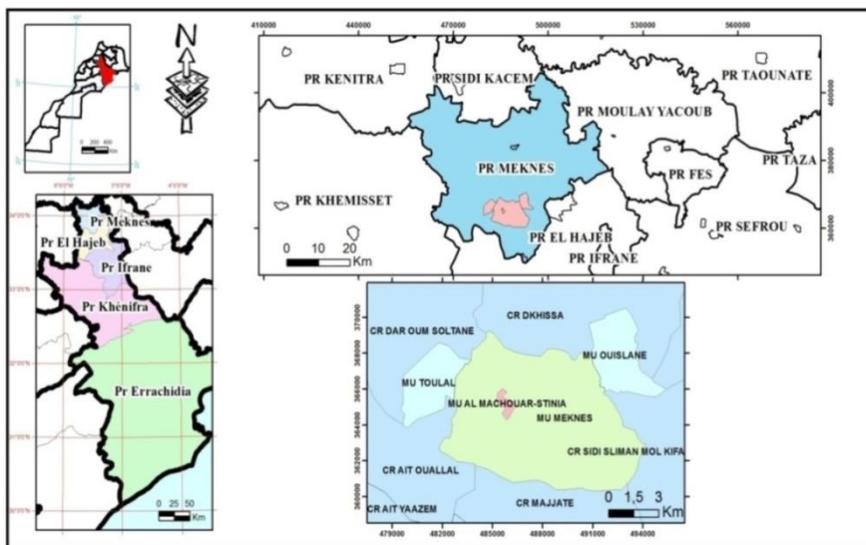


Figure 1: Situation de la Ville de Meknès.

Le plateau de Meknès, ou le Saïss occidental occupe une partie du Karst perché appelé par les géographes « le bassin lacustre de Meknès-Fès » qui forme la partie Nord du sillon sud-Rifain (El Idrissi – Rarhni, 1992). Il représente les 2/3 environ du Saïss. Ses limites sont assez étroitement associées à l'extension des calcaires lacustres qui affleurent en surface (Taltasse, 1953) (Fig.02).

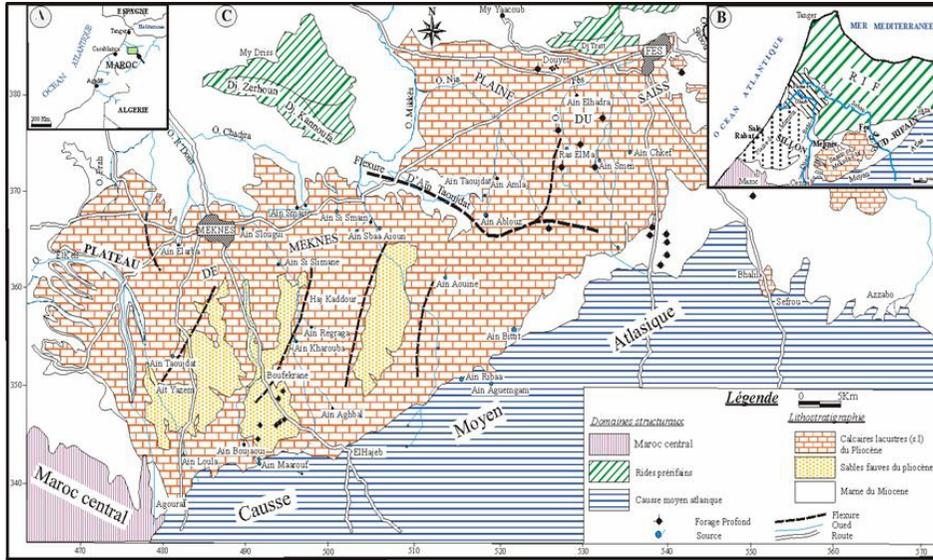


Figure 2 : Carte géo-structurale simplifiée du bassin de Saïss (Taltasse, 1953).

Historique des inondations dans la ville de Meknès

L’analyse des crues historiques permet à un certain degré de déterminer le caractère exceptionnel ou non d’une inondation tout en calculant la récurrence ou le temps de retour de la crue qui lui correspond. C’est une notion très sollicitée qu’il est intéressant de bien comprendre. En effet, on retrouve cette pratique dans plusieurs études hydrologiques ou dans la détermination du plan de prévention des risques, dans des études ou des projets de territoires, etc.

Malheureusement, on a consacré un temps important de chercher l’information dans des études qui ont été établies dans divers domaines s’intéressant à cette typologie de risque mais en vain, hormis quelques citations timides dans les documents d’urbanisme. Cela nous a permis d’ores et déjà de déduire que la notion du risque vient dans le second plan pendant l’établissement de la planification urbaine. Les études d’inondations dans la vallée de l’Oued Boufekrane et Marjane II sont les seules qui ont été produites dans ce sens, bien qu’il existe plusieurs sites qui sont vulnérables (ABHS, 2008).

Cependant, nous avons mené des enquêtes dans différents quartiers qui ont été édifiés soit dans les lits des vallées soit dans leurs champs immédiats. Là encore, on a été surpris par le manque de l’information exacte sur les dates dans lesquelles des crues ont été survenues, à part quelques cas comme les inondations qui ont submergé Bab Bouaamayer dans le début des années 60 du siècle dernier où le Maroc a connu de fortes précipitations comme celles de 1995, 1997, 2008, 2009 et 2010 qui ont causé des dégâts

matériels importants. Il y a donc un manque énorme au niveau de la conscience collective des habitants et des institutions qui ont la charge de la gestion urbaine.

Le temps de retour a été déterminé par modélisation à l'aide des simulations hydrauliques dans le cadre de l'étude des zones inondables pour des crues 1/10, 1/20, 1/50, 1/100 et 1/1000 (ABHS, 2008). Cette étude a permis d'établir les superficies inondées pour différents tronçons de la vallée de l'Oued Boufekrane uniquement dans la ville de Meknès.

Vulnérabilité de l'espace physique de la ville de Meknès face aux risques des crues

La ville de Meknès appartient au bassin versant de Sebou considéré parmi l'un des bassins les plus arrosés du Maroc. Dans ce bassin, l'Oued R'Dom constitue l'un des affluents importants de la rive gauche, tandis que la rive droite, le plateau de Meknès, est drainée en partie par l'oued Boufekrane et l'oued Ouislane (Fig. 03).

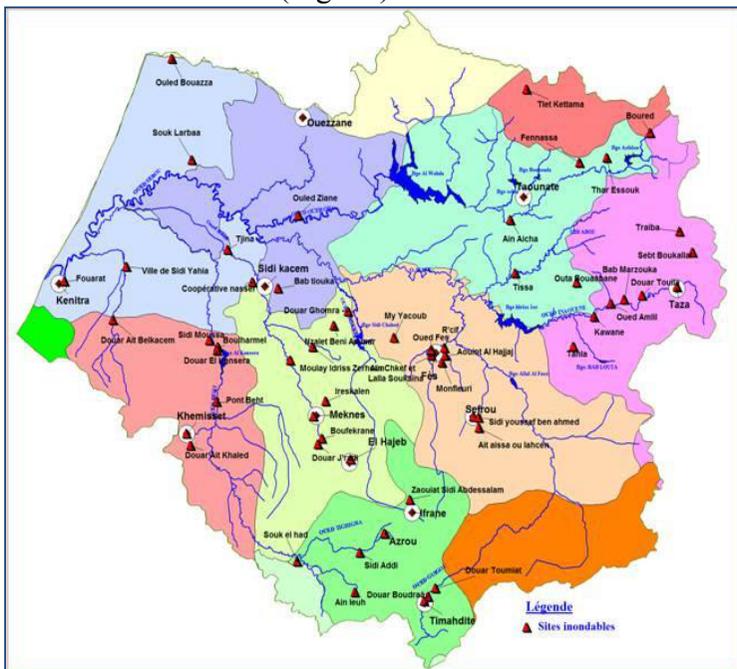


Figure 3 : Détermination des sites inondables dans le Bassin de Sebou (ABHS, 2008).

Le fait qu'elle est traversée surtout par l'oued Boufekrane, cela fait de l'agglomération de Meknès un espace « quasi-permanent » exposé aux risques d'inondations, d'où la vulnérabilité de son site. Dans le bassin de Sebou, l'analyse proprement dite du territoire fait ressortir deux sortes de crues qui engendrent des inondations et des dégâts importants matériels et humains (ABHS, 2008) (Fig. 03).

Les crues subites entrainées par des orages assez violents et brusques sont localisées principalement dans des zones montagneuses ou à leur piémont, comme le cas par exemple de la ville d'El Hajeb se trouvant au début du causse du Moyen Atlas et déversant une bonne partie des eaux de pluie dans le bassin versant de l'oued Boufekrane. Ces crues se produisent généralement en deux saisons, l'été et l'automne, c'est-à-dire en période allant du mois de juin au mois d'octobre.

Les inondations surviennent au niveau des petits bassins versants ne dépassant pas quelques dizaines de Km² et avec un temps de montée de quelques heures. L'autre type de crues est dû aux précipitations généralisées et homogènes qui donnent lieu aux inondations à temps de montée important dépassant les 6 heures. Ces crues quoi qu'elles produisent des inondations, elles ne sont pas à forts risques.

La différence entre les deux types de crues s'explique par le fait que les premières sont des crues imprévues, qui restent toujours méconnues et sont rarement annoncées par les populations étant donné leur localisation très restreinte dans l'espace.

Quant à elles, les zones urbaines sont les plus vulnérables aux inondations notamment celles longeant les cours d'eau ou même celles situées sur les lits majeurs des oueds et vallées notamment les vallées de Boufekrane, Ouislane et Bouishak. Les points singuliers d'écoulement constituent également des zones à risque d'inondation et le lieu où les eaux quittent leurs lits naturels.

Cadre climatique

Températures

Comme toute ville appartenant au sous étage méditerranéen, Meknès subit des influences continentales pendant les saisons d'hiver et d'été. Mais, vu que la région est marquée par une diversité géologique, cela fait de chacune de ses composantes naturelles des nuances climatiques particulières. D'où un climat de type semi-aride.

La région thermique de Meknès est marquée par l'éloignement des côtes, d'où une importante amplitude thermique extrême éteignant 25,4°C. La température du mois le plus chaud varie entre 29°C et 38°C, et celle du mois le plus froid varie entre 2°C et 7°C (ABHS, 2009). D'une manière générale, les températures varient d'une période à autre et se présentent de la manière suivante (Fig.04) :

- De janvier à avril : la hausse mensuelle de la température est progressive et régulière. Elle est de l'ordre de 1°C à 2°C par mois.
- D'avril à août : une hausse mensuelle est de l'ordre de 3°C à 5°C : la température maximale moyenne mensuelle est atteinte au mois d'août, soit 35,6°C.

- D’août à décembre : une baisse de l’ordre de 2° à 4° C par mois.

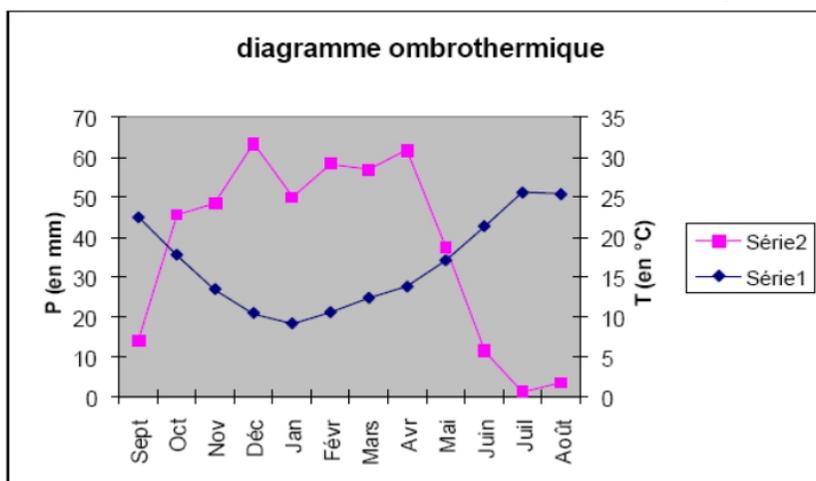


Figure 4: Diagramme ombrothermique de la ville de Meknès (température en bleu, précipitation en violet).

Précipitations

La période de pluie la plus importante s’étale d’octobre à mai, avec 9 à 10 jours de pluie par mois. Soit disant, une moyenne de pluie qui est estimée à 84 jours et une pluviométrie moyenne qui atteint les 500 mm/an. La répartition des pluies au cours de l’année se caractérise par de fortes pluies en automne, une légère baisse en hiver avec un maximum relatif au début du printemps (Fig.04 et 05).

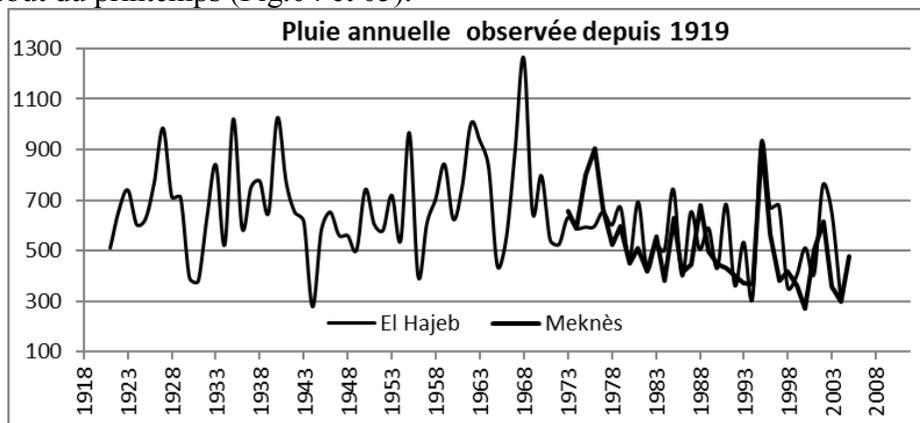


Figure 5: Évolution interannuelle des précipitations(ABHS, 2009).

Hydrologie

Il s’agit de trois émergences de débordement de la nappe libre du Lias. Les sources Ain Boujaoui et Ain Maarouf sont situées à 20 km au Sud de la ville de Meknès au niveau du piémont du Causse d’Agourai. Elles

constituent les apports principaux de l’oued Boufekrane. La 3^{ème} source Ain Aghbal est située au piémont d’El Hajeb à environ 20 km au SE de la ville de Meknès.

Trois oueds traversent la ville de Meknès suivant une orientation SE /NO et qui font partie du bassin versant de l’Oued R’dom, affluent de l’Oued Sebou d’Est en Ouest. Ainsi, on trouve successivement (Tableau 1) :

L’Oued Ouislane, très encaissé, constitue la limite Est de la ville, il commence en Sud/Est de Boufekrane selon une orientation sensiblement Sud / Nord jusqu’à la cimenterie la Farge. Il reprend à 5 Km en aval la direction Ouest et reçoit l’Oued Boufekrane puis l’Oued Sejra au confluent duquel il devient l’Oued R’dom. Il connaît un plus fort débit des trois oueds variant entre 300 et 400l/s (Agence urbaine de Meknès, 1993) .

L’Oued Boufekrane dont le cours encaissé et sinueux donne son caractère au site urbain de Meknès en séparant, par une coulée verte, les deux plateaux sur lesquels la ville est construite. Ses versants sont généralement boisés et possèdent une pente moyenne dépassant les 10 %. Il prend sa source au Sud de la ville tout en se jettant dans l’Oued Ouislane à quelques kilomètres au Nord de Meknès. Son débit varie de 200 à 250 l/s (Agence urbaine de Meknès, 1993).

L’Oued Bouishak prend sa source à quelques kilomètres au sud de Toulalite limite la ville de Meknès à l’Ouest. Peu encaissé en amont de la route principale RP1, son cours a profondément entaillé le calcaire en aval de celle-ci. En dépit de la faible longueur de son cours (15Km), l’Oued de Bouishak n’en possède pas moins un bassin versant étendu : il reçoit en effet trois cours d’eau avant de se jeter dans l’Oued Boufekrane au Nord de Sidi Baba. Son débit est très faible, il est de l’ordre de 1 l/s.

Les apports annuels minimums moyens relatifs à une période de 40 années sont respectivement de 4, 3 et 8 Mm³ au niveau de Boufekrane, Ouislane et Boufekrane à sa confluence avec le Rdom, soit un apport minimum de 7 hm³/an à l’entrée de Meknès (Tableau 1).

L’évolution du débit moyen annuel des deux sources Boujaoui et Maarouf du piémont du Causse d’Agourai, durant la période de 1984 à 2009, suit une tendance à la baisse due essentiellement à la régression des apports pluviaux dans la région (ABHS, 2009).

Tableau 1 : Débits moyens mensuels des oueds.

	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Module
Boufekrane (l/s)	0.15	0.362	0.502	0.705	1.016	1.112	0.874	0.721	0.533	0.262	0.132	0.105	0.539
Ouislane (l/s)	0.107	0.265	0.347	0.471	0.739	0.785	0.617	0.514	0.384	0.186	0.091	0.071	0.385
Rdom (l/s)	0.365	0.884	1.224	1.722	2.479	2.714	2.135	1.761	1.3	0.639	0.322	0.257	1.316
C de variation	0.908	1.016	0.521	0.615	1.212	1.072	0.912	0.897	0.889	1.026	0.992	0.91	0.673

Les deux sources Maarouf et Boujaoui ont un comportement très proche avec des fluctuations annuelles modérées, preuve de leur appartenance à un même système aquifère à réserves relativement importantes (Fig.06).

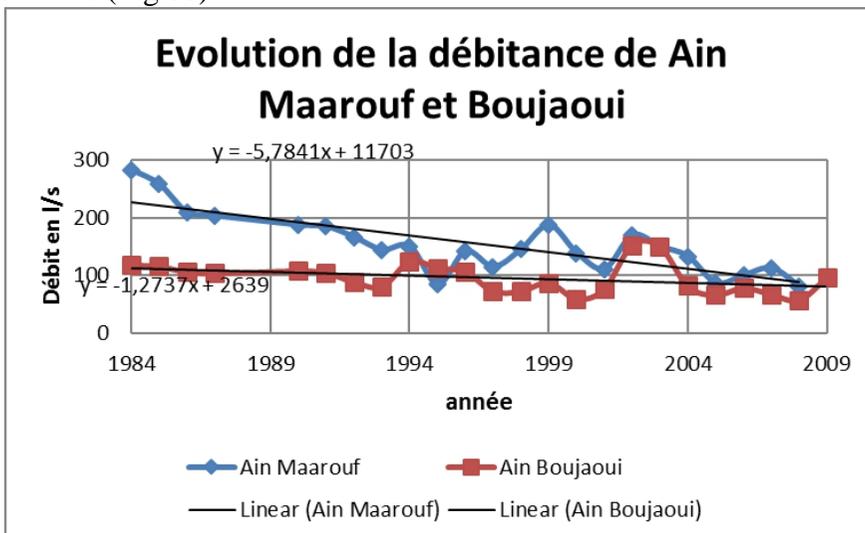


Figure 6: Evolution de la débitance des sources de Ain Maarouf et Ain Boujaoui pour la période 1984/2009 (ABHS, 2009).

L'Oued R'Domest représenté au niveau du bassin d'étude par ses deux principaux affluents oued Boufekrane et oued Ouislane qui présentent des caractéristiques voisines de celles de l'oued Mikkès.

En étiage, l'oued Boufekrane affluent principal de l'oued R'Dom, est alimenté essentiellement par les sources Boujaoui et Maarouf (dont les droits d'eau appartiennent aux habbous) qui lui assurent un débit pérenne jusqu'à la ville de Meknès qui est turbiné par la microcentrale hydroélectrique de Meknès, puis l'eau est déviée vers l'ancienne Médina de Meknès (débit de l'ordre de 300 l/s en été 1984).

L'oued Ouislane, affluent rive droite de Boufekrane collecte les eaux de l'oued Ain Arhbal, oued Défali, Oued Kharouba et draine la nappe à partir d'Ain Sidi Slimane. A son entrée à la ville de Meknès, l'oued Boufekrane reçoit les eaux de d'Ain Bou Ameir, Ain Maaza et Ain Kébira et collectent avec l'oued Ouislane les eaux usées de la ville de Meknès. Ces dernières sont rejetées en bordures aval du bassin de la zone d'étude et n'ont pas d'impact sur les eaux souterraines du bassin de la zone d'étude. Ces eaux sont rejetées sur les affleurements de marnes miocènes, qui constituent le substratum de la nappe phréatique et sont réutilisées pour l'irrigation. En aval de la ville de Meknès, l'oued Ouislane rejoint l'oued Boufekrane et forme l'oued R'Dom qui s'acheminent vers la plaine du Gharb (ABHS, 2009).

Méthodologie de travail

Laméthodologiepoursuivie dans la présente étude comporte plusieurs étapes (Figure 7). A partir de l'image satellitaire landsat, différentes cartes thématiques sont générées en se basant sur le model numérique du terrain (MNT). L'utilisation des formules empiriques et des différentes applications, intégrées dans les logiciels dédiés au Système d'Information Géographique (SIG), permettra de mieux cerner la problématique et de proposer des actions d'aménagement de telle sorte à rechercher les équilibres, à faire face aux effets des risques et à réduire la vulnérabilité de la ville de Meknès pour qu'elle soit résiliente et durable. La méthodologie consiste tout d'abord à intégrer au sein d'un SIG les informations géographiques pertinentes telles que la carte urbaine, la carte topographique, la photographie aérienne, le modèle numérique de terrain, l'imagerie satellitaire, etc. (Fig.07).

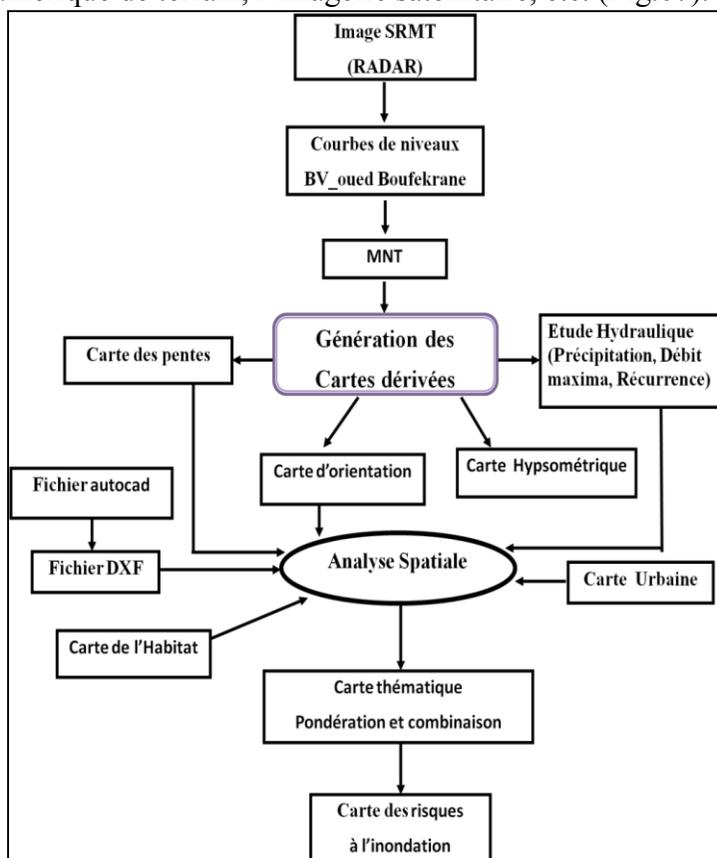


Figure 7 : Différentes étapes suivies pour élaboration des cartes thématiques.

Le MNT est une représentation numérique du terrain en termes d'altitude. Il constitue une base de données altimétriques à partir de laquelle un grand nombre de produits peuvent être dérivés, notamment la pente,

l'exposition, le volume, les cartes d'inter visibilité, les cartes des sous-bassins versants, etc. Ils peuvent être dérivés à partir de plusieurs sources telles que les levés topographiques directs, les photographies aériennes à l'aide des techniques de photogrammétrie et la numérisation des cartes topographiques.

L'analyse spatiale des facteurs naturels et anthropiques permettra de réaliser une typologie des risques. Les résultats peuvent être réutilisés comme des supports d'aide à la décision pour l'élaboration de futures documents d'urbanisme ou plus largement pour l'optimisation du projet urbain du territoire de la ville de Meknès. Les images TM de Landsat ont été retenues pour leur caractère synoptique sur une vaste zone, leur répétitivité, leur disponibilité sur une longue période (20 ans) et pour la possibilité qu'elles offrent par rapport à l'échelle des documents d'urbanisme à élaborer.

Résultats et discussion

Topographie et apport du modèle numérique de terrain

L'analyse spatiale à base du MNT permet une visualisation presque réelle de l'allure ou de la topographie de l'aire d'étude, puisque elle permet une modélisation informatique du relief (Fig.08). Ce dernier montre globalement deux parties: l'une en amont constituée par le plateau de Meknès avec une altitude variable entre 500 et 1000m et l'autre en aval entre 500 et 250m. Ce sont des données de base qui permettent de produire des cartes en rapport avec le risque d'inondation. Nous allons pouvoir ainsi mettre en évidence les pentes les plus fortes et délimiter les zones comportant le plus grand risque en termes d'inondation. Diverses fonctions du logiciel ArcGIS permettront de distinguer ces zones à risques.

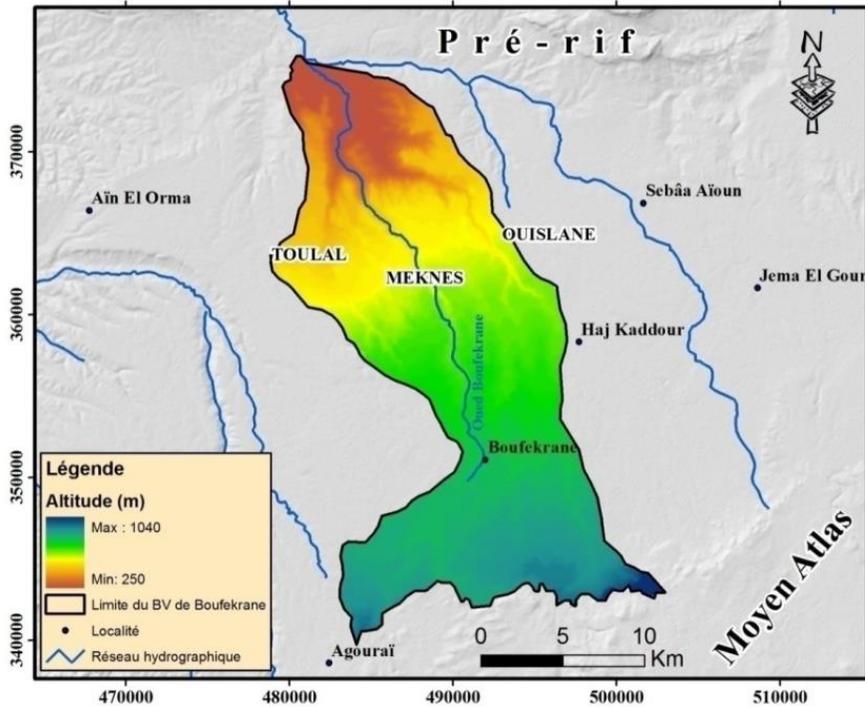


Figure 8 : Modèle numérique du terrain (MNT) du bassin versant de l’Oued Boufekrane.

La carte hypsométrique est obtenue par planimétrie des cartes topographiques, en calculant la répartition de la surface du bassin versant de l’Oued Boufekrane soit en pourcentage soit en Km^2 , et ce en fonction de son altitude en mètre (m). Dans le présent travail, elle a été générée à partir du MNT (Fig.09). La majorité des facteurs météorologiques et hydrologiques dépend de l’altitude à partir de laquelle, on peut déduire une vue synthétique sur le profil du bassin versant et sur sa pente moyenne. La carte hypsométrique peut aussi servir à la détermination de la pluie moyenne sur un bassin versant et à donner des indications sur son comportement hydrologique, ainsi que sur son système de drainage. C’est pourquoi elle est considérée par les hydrologues comme un outil pratique pour comparer divers bassins versants entre eux.

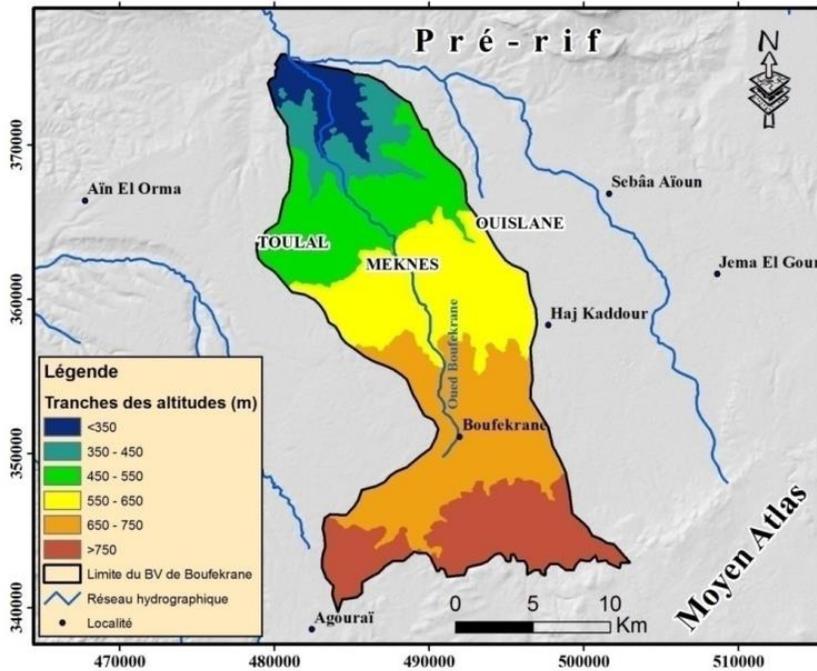


Figure 9 : Carte hypsométrique du bassin versant de l’Oued Boufekrane générée à partir du MNT.

Caractéristiques géométriques du bassin versant de l’oued Boufekrane
Indice de compacité de Gravelius:

$$K_c = K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

$$K_G = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec **P** = Périmètre du bassin versant ; **P = 119,32 Km**

A = Surface du bassin versant ; **A = 383,94 Km²**

K_G = 1.7; donc **K_G > 1** et par conséquent, le bassin a une forme allongée.

Surface équivalente ou rectangle équivalent

$$L = \frac{kc\sqrt{A}}{1.12} \times \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2}\right) = 52,10 \text{ Km}$$

$$l = \frac{kc\sqrt{A}}{1.12} \times \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2}\right) = 7,37 \text{ Km}$$

Avec **L**: Longueur; **L = 52,10 km**

l: Largeur; **l = 7,37 km**

Altitudes caractéristiques:

Altitude maximale = 1048 m

Altitude minimale = 244 m

Altitude moyenne

L'altitude moyenne se déduit automatiquement de la courbe hypsométrique (Fig. 10 et 11) ou tout simplement de la lecture d'une carte topographique. Elle correspond, sur la courbe hypsométrique, à la projection du point correspondant à 50% de la superficie totale du bassin versant. Selon la courbe, cette altitude est de l'ordre de 630 m environ. Elle est de l'ordre de 616,95m selon le calcul par la formule.

$$H_{moy} = \sum_n^j \frac{A_i h_i}{A}$$

- H_{moy} : altitude moyenne du B.V (m) ;
- A_i : aire comprise entre deux courbes de niveaux (Km²) ;
- h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveaux (m) ;
- A = superficie totale du bassin versant (Km²) ;
- $H_{moy250} = 16.82m$
- $H_{moy350} = 19.64 m$
- $H_{moy450} = 41.62 m$
- $H_{moy550} = 74.35 m$
- $H_{moy650} = 80.72 m$
- $H_{moy750} = 101.16 m$
- $H_{moy850} = 158.17 m$
- $H_{moy950} = 119.51 m$
- $H_{moy1050} = 4.96 m$

Application: $H_{moy} = \sum_{i=250}^{1050} \frac{A_i h_i}{A} \rightarrow$
 $H_{moy} = 616.95 m$

Effet de la pente sur les orientations

Indices de pente

Pour connaître le temps de parcours du ruissellement, c'est-à-dire le temps de concentration, il y a lieu de calculer la pente moyenne qui n'est autre que le quotient de la différence entre les hauteurs maximum et minimum par la longueur du rectangle équivalent.

$$P_{moy} = \frac{H}{L} \text{ Avec } H = H_{max} - H_{min}$$

P_{moy} : Pente moyenne.

H : Représente la dénivellation entre les deux côtes d'altitudes extrêmes du bassin.

L : Représente la distance entre les deux points les plus éloignés du bassin, à vol d'oiseau, le long de l'axe collecteur principal.

$$\text{Donc : } P_{moy} = \frac{1048-244}{52100} = 0,015 = 1,5 \%$$

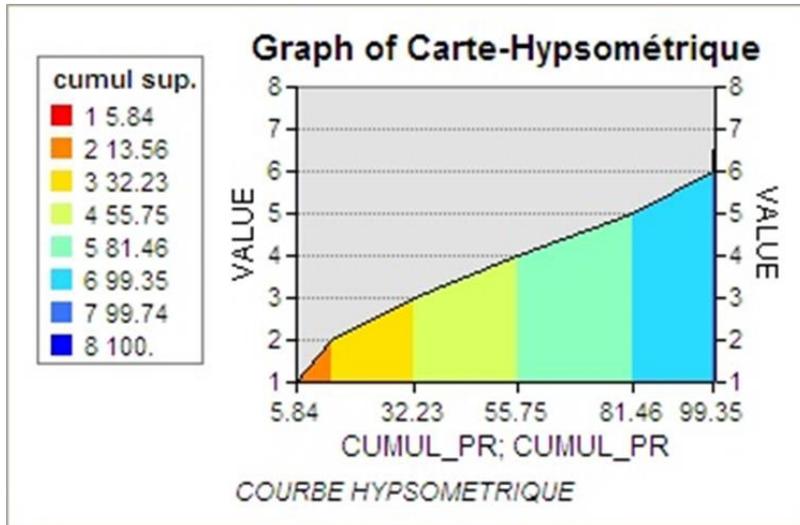


Figure 10 : Courbe hypsométrique.

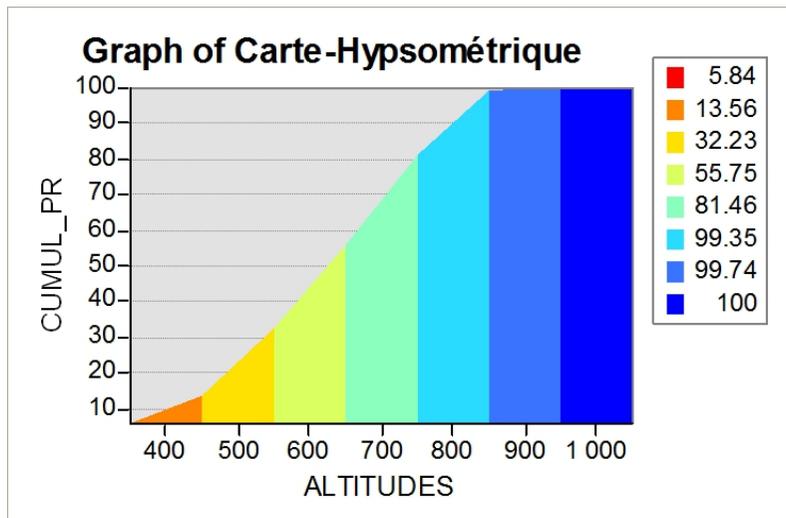


Figure 11 : Courbe hypsométrique (altitudes).

Les différentes cartes obtenues des pentes et de leurs orientations ainsi que la carte relative au réseau hydrographique permettent de déterminer les cheminements des cours d’eaux et leurs lieux d’accumulations. Elles aident aussi à situer les zones urbaines sensibles et vulnérables aux risques d’inondations (Fig. 12 et 13). Ainsi, les zones vulnérables ont été définies à l’aval, notamment les quartiers de la ville de Meknès qui sont exposés aux risques d’inondations selon des pentes ne dépassant pas les 4% et ce tout en superposant ces cartes avec la carte urbaine de la ville de Meknès géo-référenciée.

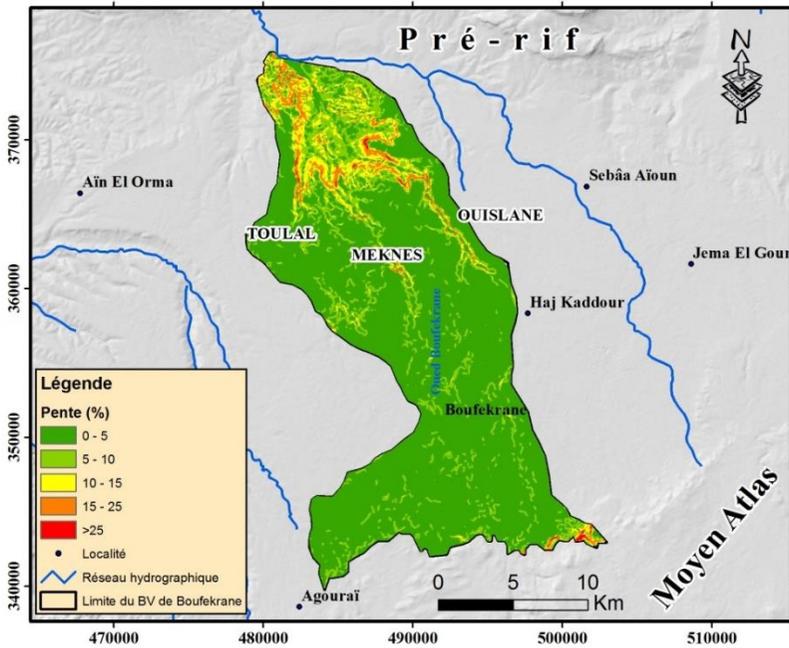


Figure 12 : Carte des pentes (en %) du bassin versant de l'Oued Boufekrane générée à partir du MNT.

Les pentes sont de plus en plus fortes et varient entre 5% à 25% et sont généralement orientés vers le Nord et le Nord Ouest du bassin versant de l'Oued Boufekrane.

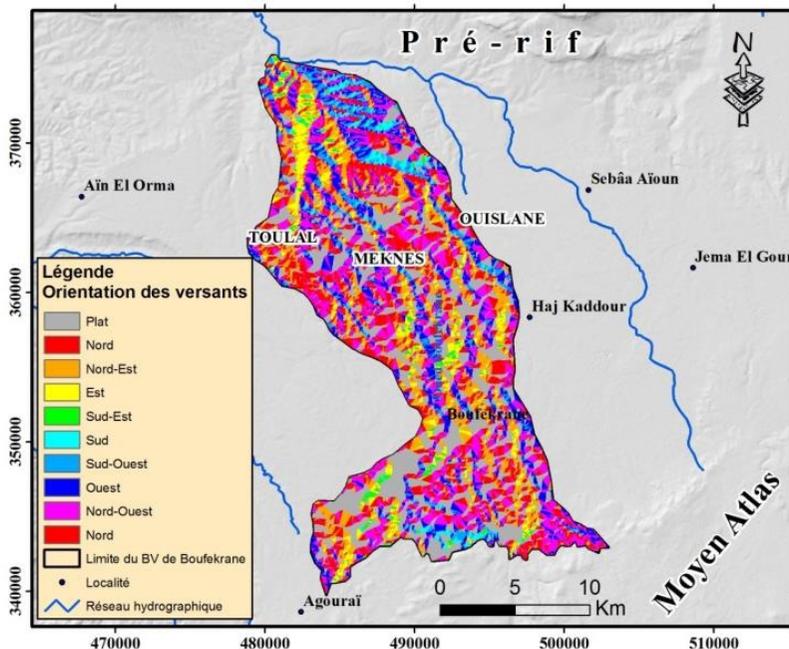


Figure 13 : Carte d'orientation des pentes du bassin versant de l'Oued Boufekrane générée à partir du MNT.

L'examen de la topographie du bassin versant de l'Oued Boufekrane a permis de déterminer les principales caractéristiques morphologiques et d'identifier le plus long cours d'eau ainsi que les côtes extrêmes (Tableau 2).

Tableau 2 : Caractéristiques morphologiques du bassin versant de l'Oued Boufekrane.

Bassin versant	Surface	Longueur	Pente	Dénivelée
	Km ²	Km	%	m
Oued Boufekrane	383,94	52,10	1,5	804

Temps de concentration

Le temps de concentration des eaux sur un bassin versant se définit comme le temps mis par une goutte d'eau tombée sur le point le plus éloigné hydrologiquement de l'exutoire pour y parvenir (Ourahhou, 2009). Cette valeur est influencée par diverses caractéristiques morphologiques telles que la taille (la surface), la forme (surface et longueur) et le relief du bassin versant (longueur et pente). A ces facteurs s'ajoutent encore le type de sol, le couvert végétal et les caractéristiques hydrologiques du réseau hydrographique. Ce temps est estimé de différentes manières, entre autres, à partir des formules empiriques (Tableau 3).

Tableau 3 : Temps de concentration à partir des formules empiriques

	Giondotti	Ventura	Kirpich	Passini
Formules	$60.(4.S^{0.5}+1,5.L)/0,8.H^{0.5}$	$7.62.(S/P)^{0.5}$	$1/52.(L^{0.77}/I^{0.385})$	$6.48.(LS)^{1/3}/p^{0.5}$
Temps de concentration (mn)	15.005	122.73	90.18	60.01

Débit centennal

Le débit centennal est calculé à l'aide de la méthode rationnelle à une superficie des moyens et des grands bassins versant :

$$Q = C_r \times I_{TC} \times S / 3.6$$

I_{TC} : intensité moyenne de la pluie (en mm/h) pendant le temps de concentration T_c .

S : surface en Km²

C_r : coefficient de ruissellement (argile = 0,60)

Pour bien déterminer les débits relatifs à différentes fréquences de retours du bassin versant, l'approche adoptée repose sur les formules empiriques qui permettent de calculer le temps de concentration. Ce dernier est retenu à partir de la moyenne des temps de concentrations calculés par les formules de Ventura, Kirpich et Passini qui donnent des valeurs comparables et assez voisines. La formule de Kirpich donne un temps de concentration

plus court et celle de Giondoti donne un temps de concentration surestimé pour les petits bassins versants (ABHS, 2009), assez faible pour l’oued Boufekrane et très éloigné des valeurs calculées par les autres formules. Des travaux antérieurs confirment que la méthode de Giondoti surestime largement les temps de concentration et que la formule de Kirpich est plus appropriée pour les bassins montagneux et donc donne un temps de concentration assez courts.

La moyenne de la somme des temps de concentration calculés (Tableau 3) est égale à 71,98 mn. Cette valeur pousse à retenir le temps de concentration calculé à l’aide de la formule de Kirpich qui est de l’ordre de 90,18 mn puisqu’il est le plus proche de la moyenne.

Réseau hydrographique du bassin versant de l’oued Boufekrane

Le réseau hydrographique a été généré automatiquement à partir du MNT en utilisant l’extension arc hydro (Fig. 14) . Les facteurs saillants influençant sont comportement sont la nature géologique, le climat, l’allure du terrain (pente) et l’action anthropique (présence humaine).

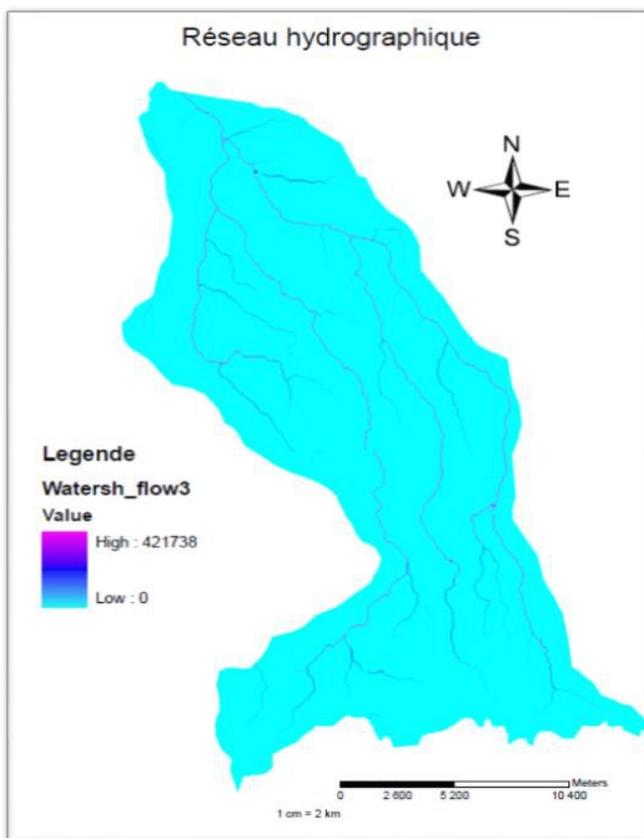


Figure14 : Réseau hydrographique du bassin versant de l’Oued Boufekrane.

Comme il a été démontré auparavant, le bassin versant de la vallée de l’oued Boufekrane a une forme allongée. Néanmoins, si on veut étudier la vulnérabilité des zones à risque d’inondation notamment à l’aval la ville de Meknès, on peut dire que cette forme n’est pas spécifique pour une meilleure analyse de l’aire d’étude. D’où, il est préférable d’étudier les facteurs favorisant ces risques « exogènes » et d’étudier surtout les caractéristiques principales du réseau hydrographique du bassin versant de l’Oued Boufekrane.

Détermination des zones vulnérables aux risques d’inondations

L’analyse urbaine et cartographique de la carte des pentes montre nettement que ces dernières ont une utilité de grande importance dans la détermination des zones et quartiers vulnérables. En effet, les pentes du bassin versant de l’Oued Boufekrane varient environ entre 1 et 19% (Fig. 15).

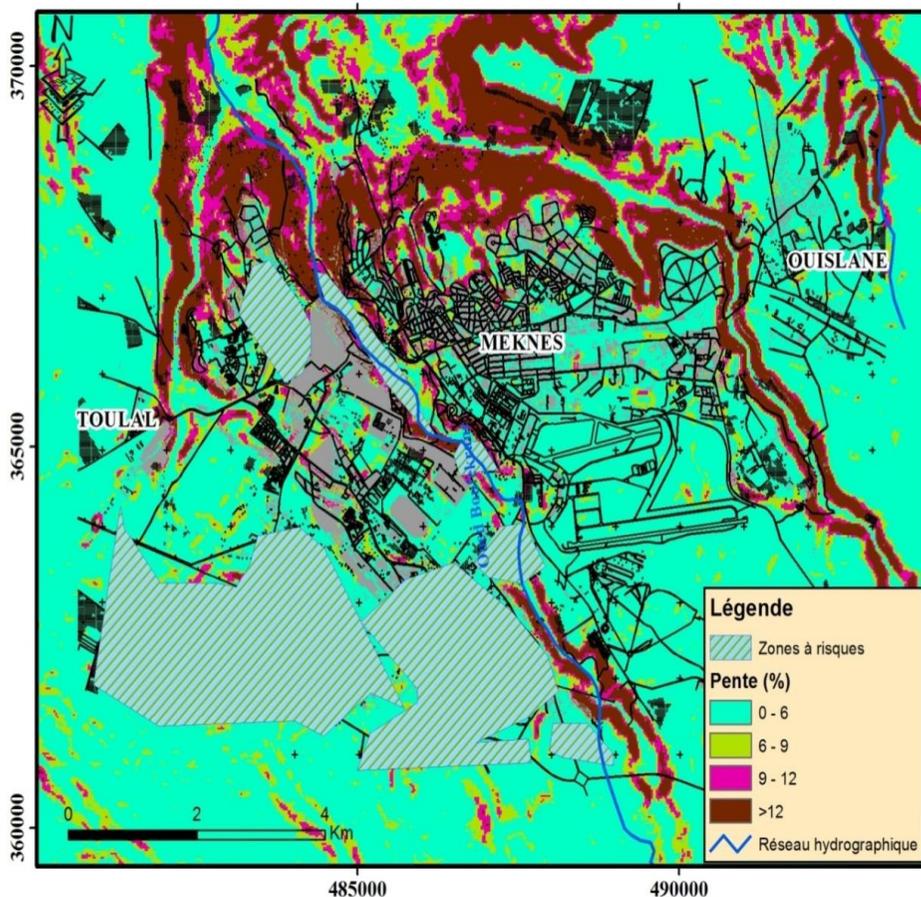


Figure 15: Carte de vulnérabilité aux risques d’inondations dans la ville de Meknès

En fixant les zones se situant sur des sites ayant des pentes ne dépassant pas les 6% comme menacées par les risques d'inondations en aval notamment dans l'agglomération de Meknès et en superposant la trame urbaine sur la carte des pentes, plusieurs sites seraient vulnérables à cette typologie de risque. Il s'agit bien de la zone industrielle de Sidi Bouzekri, de la zone dite Marjane (récemment ouverte à l'urbanisation), de la zone Al Mansour, des quartiers Hay Al Atlas, Hay Al Ouahda, Hay Assalam, des lotissements Al Andalou, Azzahwa et Belle vue 3, du quartier Zitoune au niveau du collège Jaber Ibn Hayane, de la grande mosquée nouvellement construite et de la zone d'activité commerciale implantée sur la rive gauche de la chaaba (Figure. 14).

Conclusion

La cartographie des risques d'inondation dans l'agglomération de Meknès (centre du Nord du Maroc) a été réalisée à l'aide du MNT, des SIG et des modèles empiriques. Elle a fait appel aux données topographiques, climatiques et hydrologiques et a été validée par les données du terrain.

Les risques d'inondation liés aux crues par débordement des cours d'eaux concernent principalement les quartiers du Sud-Ouest de la ville de Meknès et le long de la vallée de l'Oued Boufekrane. Ces sites menacés et vulnérables représentent malgré tout de grandes zones ouvertes à l'urbanisation et à la prolifération de l'habitat non réglementaire et qui sont sous menace permanente du fait qu'ils sont dépourvus de toute infrastructure de base, notamment le réseau d'assainissement. Ils méritent une attention particulière vu leurs natures topographique, morphologique, géologique, hydrographique en plus des conditions hydrologiques dans un contexte de changements climatiques.

Les d'inondations restent parmi les risques naturelles les plus destructives, leur étude demande des outils de pointe, des modèles performants et des données climatiques et hydrologiques continues sur une longue période. L'utilisation de l'imagerie satellitaire à haute résolution spatiale pourrait améliorer les résultats obtenus.

References :

1. Dauphiné A., (2001). Risques et catastrophes. Observer – Spatialiser – Comprendre- Gérer. Edition : Armand Colin, 288p.
2. De Martonne E., (1909). Traité de géographie physique : climat, hydrographie, relief du sol, biogéographie. Edition : Armand Colin, 910p.
3. Debarbieux B., (1988). Les problématiques de l'image et de la représentation en géographie. Edition : Armand Colin, 211p.

4. Degardin F., Gaide P.A. & Noyelle J., (2001). Prise en compte des risques par la valorisation des zones inondables en ville. Colloque Risques et Territoires, Lyon, CERTU – CNRS, volume 2, 213 – 223.
5. Dubois–Maury J.&Chaline C., (2002). Les risques urbains. Edition : Armand Colin, ,208p.
6. Essahlaoui A., (2000). Contribution a la reconnaissance des formations aquifères dans le bassin de Meknès Fès, prospection géoélectrique, étude hydrogéologique et intervenir des ressources en eau. Thèse de Doctorat, Université Mohamed V, Rabat, 258 p.
7. Fassi D., (1999). Les formations superficielles du Saïss de Fès et de Meknès. Du temps géologique à l'utilisation actuelle des sols. *Notes et Mémoire du Service Géologique, Maroc*, 389, 524 p.
8. El Idrissi – Rarhani M., (1992). Différenciations des sols du plateau de Meknès. Relations avec le modèle et le substrat calcaire. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie, Paris.
9. Gartet A., (2007). Risques naturels, anthropiques et technologiques dans l'agglomération de Fès et son arrière-pays, aménagement, gestion et prévention. Thèse de doctorat, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Fès – Saïss, 413p.
10. Meschinet de Richmond N., (1997). Les inondations catastrophiques sur la bordure montagnaise du Roussillon: dégâts et sinistrés. Thèse de doctorat, Université Paris X.
11. Pagny P., (1994). Les catastrophes naturelles. Editions : Nathan, Paris PUF,128p.
12. Pigeon P., (1994). Ville et environnement. Editions : Nathan, Paris, 191p.
13. Thouret J-C. & Robert d'Ercolle R., (1999). Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : Effets, facteurs et réponses sociales. *Cah.Sci. Hum.*,407-422p.
14. Troin J-F., (1985). Le Maghreb, hommes et espaces. Armand Colin, Paris.
15. ABHS (Agence du Bassin Hydraulique de Sébou), (2009). Atlas des zones inondables dans le Bassin de Sebou, Région Meknès-Tafilalt.
16. AUMK (Agence Urbaine de Meknès), (2008). Plan urbain de l'agglomération de Meknès.
17. Ourahhou M., (2009). Etude hydrologique des bassins versants. Office régional de mise en valeur agricole de Tafilalt, Service Equipement rural, 49p.
18. AUMK (Agence Urbaine de Meknès), (2010). Rapport diagnostic. 30p.

19. AUMK (Agence Urbaine de Meknès), (2013). Rapport prospectif relatif à l'établissement du schéma directeur d'aménagement urbain (SDAU). 182p.
20. Chaline C. & Dubois – Maury J., (1994). La ville et ses dangers. Edition : Masson, 2004p.
21. Dubois – Maury J.&Chaline C., (2002). Les risques urbains. Edition : Armand Colin, 208p.
22. El Idrissi–Rarhani M., (1992). Différenciations des sols du plateau de Meknès. « relations avec le modèle et le substrat calcaire ». Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Paris.
23. Gartet A., (2007). Risques naturels, anthropiques et technologiques dans l'agglomération de Fès et son arrière-pays, aménagement, gestion et prévention. Thèse de doctorat, Université Sidi Mohamed Ben Abdallah, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Fès – Saïss, 413p.
24. Lefèvre C. & Shneider J-L., (2002). Les risques naturels majeurs. Collection Géosciences,275p.
25. Taltasse P., (1953). Recherche géologique et hydrogéologique dans le bassin de Fès-Meknès. *Notes et Mémoires du service géologique*, Rabat, Maroc, 115, 300 p.
26. <http://www.irma-grenoble.com/> (Institut des risques majeurs de Grenoble, France).