



CARTOGRAPHIE DU RISQUE D'INONDATION DE LA VILLE DE MEDJEZ EL BAB PAR DEBORDEMENT DE LA MEDJERDA

FLOOD RISK MAPPING OF THE CITY OF EL BAB MEDJEZ BY THE OVERFLOW OF THE MEDJERDA

AYARI K.¹, DJEBBI M.², CHAKROUN H.³

¹ URME, ENIT, Université de Tunis El Manar, Tunisie
Rue Béchir Salem Belkhiria Campus universitaire, BP 37, 1002, Le Belvédère, Tunis

² LMHE, ENIT, Université de Tunis El Manar, Tunisie

³ LMHE, ENIT, Université de Tunis El Manar, Tunisie

khadija.ayari@gmail.com

RESUME

Les principaux objectifs de la présente étude sont la simulation des écoulements locaux de la Medjerda en crue, la cartographie des enjeux exposés et la quantification du risque d'inondation de la ville de Medjez El Bab par débordement de la Medjerda. L'aléa est évalué moyennant un modèle hydrodynamique bidimensionnel : le modèle SMS. La méthode d'analyse hiérarchique multicritères (AHP) est utilisée pour quantifier la vulnérabilité. La cartographie du risque est enfin obtenue par croisement de la carte de l'aléa inondation et de la carte de vulnérabilité des enjeux exposés. La comparaison des cartes de risque obtenues pour différents scénarios d'aléa a mis en évidence l'augmentation du risque d'inondation dans certaines zones en fonction de l'importance de l'aléa.

MOTS-CLES : aléa, enjeu, vulnérabilité, risque d'inondation, Medjerda, Modèle hydrodynamique bidimensionnel, AHP

ABSTRACT

The main objectives of this study are the simulation of the local flows of Medjerda in flooding, the mapping of the exposed issues and the quantification of the risk of flood. The hazard is evaluated with the help of a two-dimensional hydrodynamic model: the SMS model. The Analytic Hierarchy Process (AHP) is used to quantify the vulnerability. Flood risk maps are finally obtained by crossing the flood hazard map and the vulnerability map of the exposed issues. The comparison of risk maps obtained for different hazard scenarios highlighted the increased risk of flooding in some areas depending on the hazard importance.

KEYWORDS: hazard, issue, vulnerability, flood risk, Medjerda, two-dimensional hydrodynamic model, Analytic Hierarchy Process

INTRODUCTION

Une bonne gestion du risque d'inondation de la Medjerda à l'aval du barrage de Sidi Salem nécessite la connaissance et la quantification de ce risque. Plusieurs travaux ont été réalisés afin d'étudier les inondations de la Medjerda (Marzouki, 2005; Daouthi, 2007; Jaballah, 2009; JICA, 2009; Sendi, 2010; Ben Amor, 2012...). Les études précitées ont limité la quantification du risque à la simple cartographie de l'aléa hydraulique sans tenir compte de l'analyse de vulnérabilité des différents enjeux menacés. Cependant, la connaissance de l'aléa séparée de l'analyse de vulnérabilité ne suffit pas à comprendre le risque.

L'objectif principal de la présente étude est donc de mettre en application une démarche pour la cartographie du risque d'inondation de la ville de Medjez-El-Bab qui est souvent inondée par débordement de l'oued Medjerda en cas de crue importante, tout en prenant compte de la vulnérabilité des enjeux exposés.

En plus d'une introduction et d'une conclusion, cet article comprend cinq parties : la première partie est consacrée à la présentation de la ville de Medjez El Bab. La deuxième partie présente la méthodologie retenue. La troisième partie détaille la modélisation de l'aléa. La quatrième présente la cartographie de la vulnérabilité et la cinquième partie présente la cartographie du risque d'inondation.

PRESENTATION DE LA VILLE DE MEDJEZ EL BAB

La ville de Medjez-El Bab est située au Nord de la Tunisie (Figure 1). Elle s'étend sur les deux rives de l'oued Medjerda sur une plaine entourée de deux chaînes montagneuses (Tell de nord et Dorsal Tunisien).

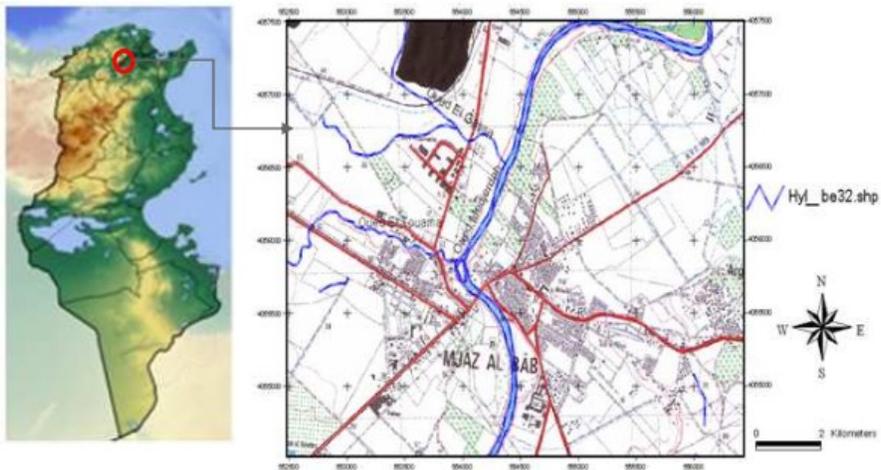


Figure 1 : Localisation de la ville de Medjez-El-Bab et des oueds responsables de son inondation en cas de crue

La population totale de Medjez El Bab est de 20308 habitants distribués sur 4810 ménages et 4934 logements (Recensement de l'institut National des statistiques (INS) de 2004). Compte tenu de son rôle urbain et économique important, la ville de Medjez El Bab comporte plusieurs équipements socio-collectifs : un hôpital, des lycées, des écoles, des établissements administratifs, des bureaux de service à caractère privé et des équipements collectifs ou communautaires. De même, la ville de Medjez-El-Bab compte un réseau de voiries d'une importance capitale sur le plan régional. Ce réseau comprend : la route nationale (R.N.) vers Tunis, la route nationale (R.N. n°6) vers Béja, la route nationale (R.N. n°5) vers Kef, la route régionale (R.R. n°28) reliant Goubellat à Tunis, la route régionale (R.R. n°50) vers Tebourba, la route régionale (R.R. n°49) vers l'Aroussa, la route locale (R.L. n°585) vers El Frich et la route locale (R.L. n°617) vers le centre ville.

L'une des caractéristiques de Medjez-El-Bab est la présence de l'un des plus anciens ponts de la Medjerda en plein centre de cette ville (Figure 2). Ce pont appelé pont Andalous ou aussi pont Mouradi est situé sur la route nationale 5 allant de Tunis au Kef au point kilométrique 57.379. C'est un pont en maçonnerie à voûtes multiples, qui était mis en service depuis l'année 1669.

L'encombrement des cellules du pont Andalous par les dépôts a causé un engraissement progressif du lit de l'oued Medjerda. Cet engraissement est responsable de la diminution considérable de la débitance de l'oued Medjerda, d'où l'augmentation des débordements de cet oued au niveau de la ville de Medjez-El Bab. La figure 3 représente l'évolution de la section du lit de la Medjerda au niveau du pont Andalous de l'année 1969 à l'année 2003. La comparaison des deux profils de 1969 et de 2003 montre une diminution de la section mouillée de l'oued qui s'explique par le fait que l'oued a connu un alluvionnement important durant cette période. La destruction du pont Andalous peut éventuellement réduire l'intensité des crues dans la région de Medjez-El-Bab, mais, vu la valeur historique de cet ouvrage, la décision de sa destruction est loin d'être envisagée (JICA, 2009).



Figure 2 : Pont Andalous à Medjez el Bab

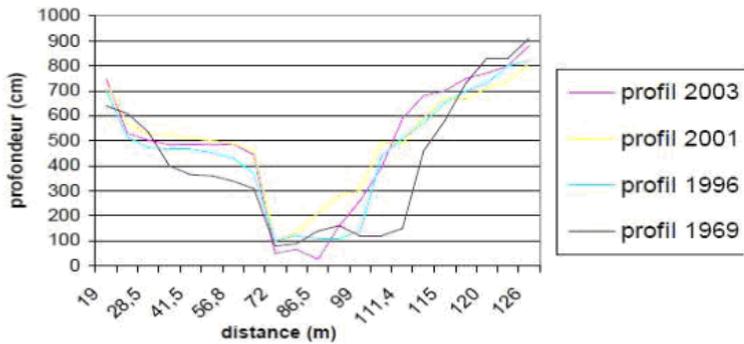


Figure 3 : Evolution du profil en travers du lit de la Medjerda au niveau du pont Andalous (INAT et al., 2004)

METHODOLOGIE DE LA MODELISATION SPATIALE DU RISQUE D'INONDATION PAR DEBORDEMENT DE LA VILLE DE MEDJEZ EL BAB

Modélisation de l'aléa inondation

L'aléa hydraulique, origine des inondations, constitue un phénomène naturel très complexe dont l'analyse nécessite le recours à des modèles hydrauliques très performants. La modélisation numérique présente en effet, un outil couramment employé pour la compréhension, l'analyse et la gestion du risque des inondations. Elle vise à prédire l'évolution spatiotemporelle des caractéristiques hydrauliques au cours d'une crue (débit, vitesses, hauteur d'eau, surfaces inondées..), ce qui permet de cartographier les limites de la zone inondée et de distinguer les différentes classes d'aléa en fonction de son ampleur et sa violence.

L'approche de modélisation hydrodynamique retenue pour la modélisation de l'aléa est une approche bidimensionnelle intégrée sur la verticale moyennant le logiciel SMS (Surface Water Modeling System) développé au laboratoire de recherche de la modélisation en hydraulique et environnement (EMRL) de « Brigham Young University » en coopération avec l'« U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station » (WES) et l'« U.S. Federal Highway Administration » (FHWA).

Ce logiciel a été largement utilisé et sa validité pour la simulation des écoulements peu profonds a été maintes fois prouvée. A titre indicatif, les

travaux de (Holtschlag and Koschik, 2002; Zar, 2004 ; Marzouki, 2005; Daouthi, 2007; Larsen, 2007; Missaoui, 2007; Jacob and Aaron, 2008; Rezgui et al., 2008; Jaballah, 2009; Mrabet, 2009; Université Joseph Fourier, 2011; Wango et al.,2011) ont profité des possibilités offertes par ce logiciel.

Le logiciel SMS comprend de nombreux modules spécifiques parmi lesquels nous avons seulement utilisé les modules de maillage GFGen et de simulation hydrodynamique RMA2. Le module GFGen (Geometric File GENERation) permet de construire, sous le format approprié aux programmes de simulation numériques tels que RMA2, un maillage aux éléments finis unidimensionnels, bidimensionnels ou mixtes (éléments de jonction 1D - 2D) de la zone d'étude.

Le modèle hydrodynamique RMA2 (Resource Management Associates) permet de simuler des écoulements de surface peu profonds. Il calcule les hauteurs d'eau (h) et les vitesses moyennées sur la verticale dans les deux directions horizontales (composantes u et v).

Les équations résolues par le modèle RMA2 sont celles de conservation de la masse et de la quantité de mouvement intégrées sur la hauteur d'eau pour les écoulements stationnaires ou transitoires. Ces équations sont couramment appelées équations de Saint-Venant 2D, et elles s'écrivent dans un repère orthogonal (O, x, y) comme suit :

- L'équation de bilan de masse

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = m_0$$

- L'équation de quantité de mouvement suivant Ox :

$$\underbrace{h \frac{\partial u}{\partial t}}_{\text{Terme d'accumulation}} + \underbrace{hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y}}_{\text{Terme de convection}} - \underbrace{h \left[\frac{E_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{E_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right]}_{\text{Terme de diffusion}} + \underbrace{gh \left[\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right]}_{\text{Gradient de pression hydrostatique}} + \underbrace{\frac{g u n^2}{h^3} (u^2 + v^2)^{1/2}}_{\text{Cisaillement au fond}} - \underbrace{\zeta V_a^2 \cos \Psi}_{\text{Cisaillement à la surface libre}}$$

- L'équation de quantité de mouvement suivant Oy :

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - h \left[\frac{E_{yx}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{E_{yy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + gh \left[\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{g v n^2}{h^3} (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \sin \Psi = 0$$

Dans ces équations, u désigne la vitesse de l'écoulement suivant l'axe Ox [LT⁻¹], v la vitesse de l'écoulement suivant l'axe Oy [LT⁻¹], h la hauteur d'eau h [L], m₀ les échanges d'eau en surface (pluie, évaporation) ou au fond (infiltration, drainage de la nappe) [LT⁻¹]; n le coefficient de rugosité du fond de Manning [L^{1/3}T]; E_{ij} les coefficients de dispersion [L²T⁻¹]; g l'accélération de la pesanteur

[LT^{-2}]; t le temps [T]; ρ la masse volumique de l'eau [ML^{-3}]; ρ_a la masse volumique de l'air [ML^{-3}]; a la cote du fond [L]; ζ le coefficient de cisaillement du vent []; V_a la vitesse du vent [LT^{-1}], Ψ la direction du vent par rapport à l'axe Ox [rd].

Dans le cas général, les équations données ci-dessus n'admettent pas de solutions analytiques. Elles sont alors résolues numériquement. Pour ce faire, le modèle RMA2 utilise la méthode des éléments finis. Cette méthode consiste à remplacer le calcul des variables exactes (u , v , h) en tout point du domaine concerné, par celui de variables approchées en un nombre fini.

Modélisation de la vulnérabilité

La méthode retenue pour la cartographie de la vulnérabilité des enjeux exposés aux inondations de la ville de Medjez El Bab par débordement de la Medjerda est la méthode d'analyse hiérarchique multicritères (AHP). L'utilisation de cette méthode pour l'évaluation de la vulnérabilité d'un territoire face à l'inondation est justifiée par le fait que les problèmes de planification des aménagements de protection contre les inondations sont des problèmes de décision à référence spatiale complexes et de nature multicritère (Mousseau and Roy, 2006). Ces problèmes impliquent plusieurs intervenants dans l'espace et conjuguent des objectifs généralement conflictuels reflétant la diversité d'intérêts et des préoccupations des intervenants dans le territoire. Leur résolution demande donc une quantité considérable de données quantitatives et qualitatives hétérogènes qui n'ont pas la même importance (Malczewski, 2006).

Les différentes étapes de la méthode de l'analyse multicritères sont résumées dans la figure 4.

La première étape de modélisation de vulnérabilité par la méthode AHP consiste donc à analyser le problème afin d'identifier les divers aspects et caractéristiques susceptibles de participer à sa résolution. Une fois définis, ces éléments seront organisés en niveaux homogènes selon le principe de construction hiérarchique.

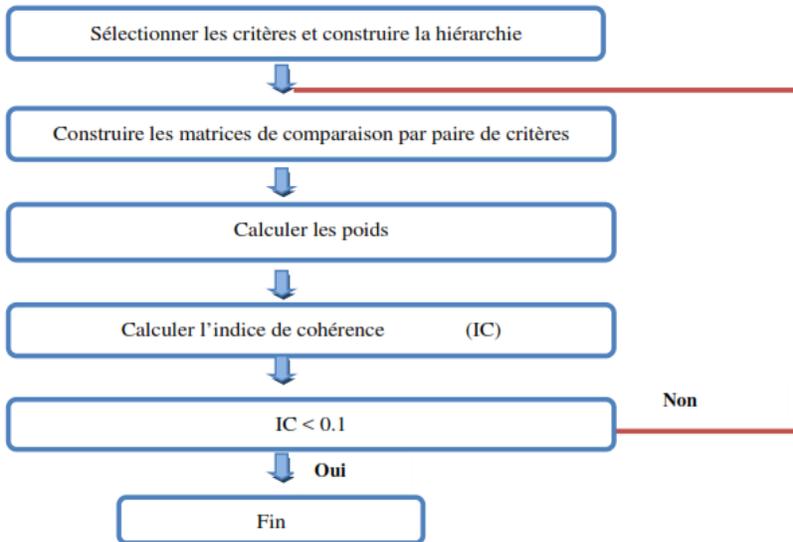


Figure 4 : Procédure d'analyse hiérarchique multicritères (Chen et al., 2010)

La seconde étape de la méthode AHP consiste à évaluer les priorités à partir du jugement d'experts. L'évaluation des priorités repose sur un processus de comparaisons par paire. Les critères de même niveau sont comparés deux à deux relativement au critère père de niveau supérieur. Les comparaisons par paires sont alors analysées pour calculer l'Importance Relative des Critères (IRC) également appelée "poids". La somme des IRC doit être égale à 1 pour chaque critère. L'IRC prend par conséquent, la forme du vecteur propre W de la matrice tel que:

$W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ où w_i représente l'importance relative d'un critère donné par rapport à sa famille d'appartenance. Le vecteur W peut être obtenu en calculant la moyenne de chaque colonne de la matrice M normalisée où chaque élément est divisé par la somme des éléments de la même colonne.

Soit M' la matrice de comparaisons normalisée issue de M et telle que :

$$m'_{i,j} = \left(\sum_{k=1}^n m_{k,j} \right)^{-1} * m_{i,j}$$

avec, $i, j, k = 1, \dots, n$

Alors le vecteur d'importances relatives W est tel que :

$$w_i = \frac{1}{n} * \sum m'_{i,j}$$

avec $i, j = 1, \dots, n$

Une fois les poids sont calculés, la cohérence des jugements doit être calculée afin de valider les priorités obtenues. Les situations de cohérence parfaite sont rares. Ainsi, la méthode AHP propose de calculer un Indice de Cohérence (ou IC) qui indique la probabilité que les estimations ont été aléatoirement assignées. Les valeurs de IC inférieures à 0.10 indiquent la bonne cohérence, alors que quand les valeurs de IC dépassent 0,10, la matrice des pondérations doit être réévaluée. L'indice de cohérence est calculé moyennant la formule suivante :

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

λ_{max} est la valeur propre maximale de la matrice. Une méthode simple pour estimer λ est de considérer :

$$W' = M * W = (w_i) \quad \text{alors} \quad \lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{w'_i}{w_i}$$

avec $i, = 1, \dots, n$

CARTE D'ALEA

Construction du modèle hydrodynamique

L'élaboration d'une carte d'aléa inondation nécessite souvent de considérer un événement de fréquence donnée (Manche, 2000). Cependant, les apports de la Medjerda sont contrôlés par des ouvrages de stockage et les crues courantes sont pratiquement artificielles. Ainsi, les inondations des villes situées à l'aval du barrage de Sidi Salem par débordement de la Medjerda ne dépendent pas uniquement de l'aléa climatique, mais aussi des volumes d'eau lâchés par ce barrage. Dans ces conditions, la considération du facteur temporel nécessiterait la prise en compte de la gestion simultanée de tous les barrages amont. La prise en compte d'une telle gestion sortirait largement du cadre du présent travail. Dans ces conditions, des scénarios à débits d'apport supposés constants sont retenus pour la présente étude. Ces scénarios correspondent à des débits amont variant de 500 m³/s et allant de 500m³/s à 3500 m³/s. Rappelons que le débit 3000 m³/s est le débit maximum estimé à Medjez El Bab lors de la crue exceptionnelle de 1973 et que le débit 3500 m³/s est presque celui de la crue centennale à Medjez El Beb (INAT et al., 2004).

Le tableau.1 ci-dessous représente les hauteurs d'eau correspondant aux différents scénarios de débits.

Tableau 1 : Conditions aux limites des différents scénarios

Scénario	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6	N°7
Débit amont (m ³ /s)	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500
Hauteur aval (m)	51.5	52.6	53.2	53.65	54.1	54.5	55.65

De même, et dans l'objectif de mieux tenir compte de la réalité de la zone d'étude, nous avons opté pour la prise en compte des lots de bâtiments dans la géométrie du modèle hydrodynamique de la ville de Medjez El Bab. En effet, les cartes d'aléa obtenues pour la configuration avec bâtiments seront mieux représentatives des caractéristiques de l'écoulement que les cartes obtenues pour la configuration sans bâtiments, puisqu'elles tiennent compte, au moins partiellement, des obstacles permanents qui sont présents dans la zone d'étude.

La préparation de la géométrie du modèle hydrodynamique correspondant à la configuration retenue a été faite sur la base des couches «Oued» et «Zone urbaine» de la base de données de la ville de Medjez El Bab. Ces couches ont en particulier servi à la précision de la localisation, la forme et la disposition des lots bâtis par rapport au lit mineur de l'oued Medjerda.

La géométrie de la ville de Medjez El Bab a été donc décrite par trois polygones représentant le lit mineur et les rives gauche et droite du lit majeur de l'oued et de cent quarante et un autres polygones représentant les lots de bâtiments. Le maillage correspondant à cette configuration est constitué de 9264 éléments et 21475 nœuds, l'écoulement à l'intérieur des polygones représentant les lots de bâtiments étant négligé.

Concernant les paramètres du modèle, en supposant négligeables les effets du frottement interfacial dû au vent, la résolution des équations de Saint Venant nécessite l'introduction des paramètres traduisant la turbulence des écoulements (coefficients de dispersion hydrodynamique E) et la résistance du lit de l'oued à l'écoulement (coefficients de Manning n).

Les paramètres utilisés dans le cadre de cette étude sont ceux déterminés par Ayari (2013) : E= 6000 Pascal-sec ; n= 0.1 m^{-1/3}.s dans les zones urbaines et 0.07 m^{-1/3}.s dans le reste du lit majeur ; n= 0.05 m^{-1/3}.s dans le lit mineur ; et n=0.15 m^{-1/3}.s au voisinage du pont Andalous.

Ces valeurs ont permis à Ayari (2013) de mieux retrouver les hauteurs mesurées au niveau de la station Pont Andalous lors de la crue exceptionnelle de 2003.

RESULTATS ET DISCUSSION

Le modèle SMS permet d'obtenir les cartes d'iso-hauteurs et celles d'iso-vitesses calculées pour des différents scénarios d'inondation simulés. A titre indicatif, les figures 5 et 6 représentent les cartes simulées pour un débit amont égal à $3500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Par ailleurs, les figures 7 et 8 représentent respectivement la comparaison des profondeurs d'eau et des vitesses d'écoulement calculées pour les différents scénarios d'inondation et ce, au niveau du même profil localisé sur la figure 9. Les résultats obtenus confirment que les profondeurs d'eau et les vitesses de l'écoulement sont d'autant plus élevées que le débit imposé est plus important. Selon le lieu considéré le long du profil choisi, la sensibilité des variables calculées aux débits imposés illustre les effets locaux de la géométrie.

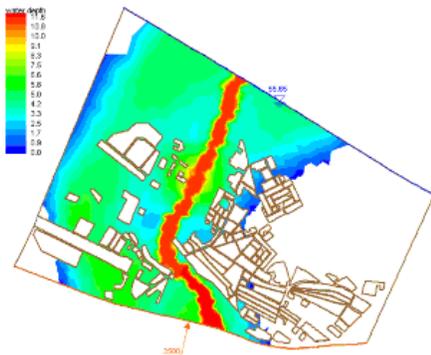


Figure 5 : Carte des iso-hauteurs pour $Q=3500 \text{ m}^3/\text{s}$

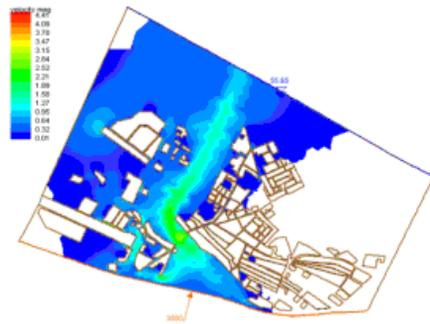


Figure 6 : Carte des iso-vitesses pour $Q=3500 \text{ m}^3/\text{s}$

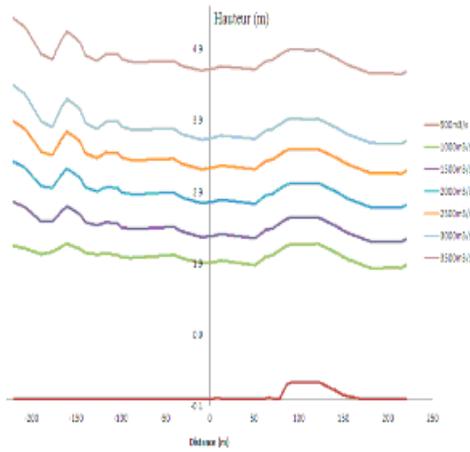


Figure 7 : Comparaison des profondeurs d'eau calculées pour les différents scénarios d'inondation

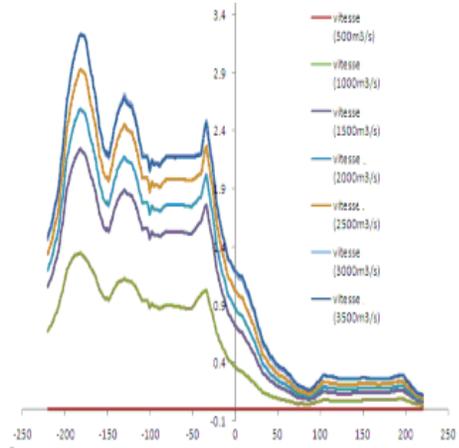


Figure 8 : Comparaison des vitesses d'écoulement calculées pour les différents scénarios d'inondation

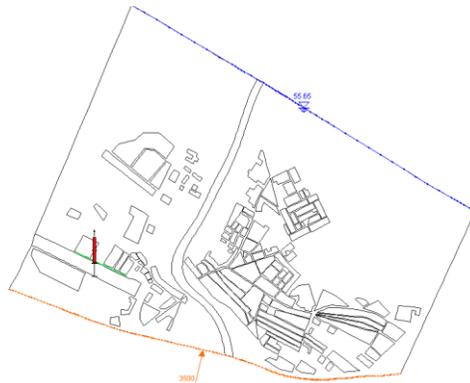


Figure 9 : Localisation du profil d'observation

Une inondation, au sens d'aléa, est caractérisée par sa violence (vitesse de l'écoulement) et par son ampleur (hauteur d'eau). Ayant besoin de grouper ces deux variables indépendantes pour évaluer l'aléa, nous avons suggéré de considérer l'énergie spécifique E donnée par la formule ci-dessous. L'application de cette formule permet d'avoir une seule carte d'aléa exprimée dans la même unité (m).

$$E = h + \frac{v^2}{2g}$$

L'utilisation des cartes d'aléa obtenues pour la configuration avec bâtiments néglige toutefois, les écoulements à l'intérieur des bâtiments. Cette hypothèse est justifiable en ce qui concerne les vitesses qui sont très faibles suite aux effets des obstacles (murs, meubles,...). Elle est cependant discutable en ce qui concerne les hauteurs d'eau puisque l'eau s'infiltré et arrive à envahir l'intérieur des bâtiments même en prenant toutes les précautions (sacs de sable,...). A l'intérieur des bâtiments, bien que les vitesses de l'écoulement soient très faibles, la hauteur de l'eau est au contraire de l'ordre de celle à l'extérieur des bâtiments, notamment quand la crue est importante et sa durée est longue. Par conséquent, nous avons choisi de négliger les vitesses de l'écoulement et d'interpoler les hauteurs d'eau au niveau des zones bâties.

La figure 10 représente la carte d'énergie spécifique obtenue pour le débit 3500m/s avant interpolation (a) et après interpolation des hauteurs d'eau (b). Cette figure confirme que l'intensité de l'aléa est très importante au niveau du lit mineur de l'oued et que plus on s'éloigne, plus l'intensité de l'aléa diminue.

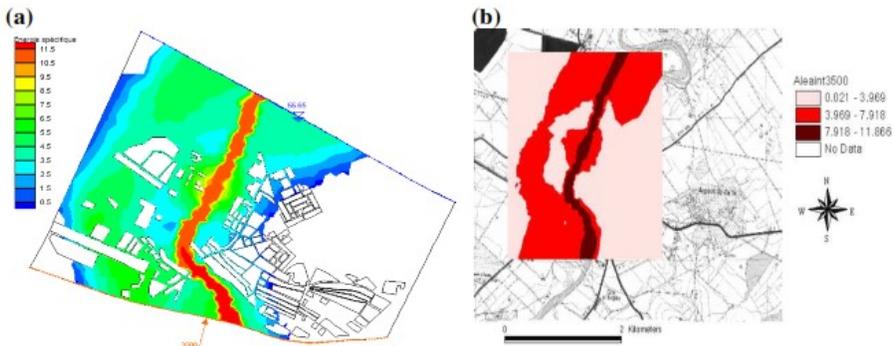


Figure 10 : Carte d'aléa pour un débit amont de 3500 m³/s (a) avant interpolation et (b) après interpolation des hauteurs d'eau

Le tableau 2 représente la comparaison des valeurs critiques des cartes d'aléa obtenues pour les différents scénarios d'inondation. L'examen de ce tableau confirme que l'intensité de l'aléa augmente avec le débit à l'origine de l'inondation. Les valeurs moyennes et maximales de l'énergie spécifique (aléa) des différents scénarios simulés augmentent avec le débit. L'énergie spécifique minimale est dans tous les cas nulle parce que le territoire considéré n'est pas entièrement inondé.

Tableau 2 : Comparaison des valeurs critique des cartes d'aléa pour les différents scénarios d'inondation

Q (m ³ /s)	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500
E max (m)	7.31	8.67	9.22	9.82	10.44	10.97	11.86
E min (m)	0	0	0	0	0	0	0
E moy (m)	2.05	2.95	3.20	3.53	3.93	4.27	5.06

Une fois les cartes d'aléa élaborées, la modélisation spatiale du risque d'inondation nécessite de cartographier la vulnérabilité des enjeux menacés.

EVALUATION DE LA VULNERABILITE DE LA VILLE DE MEDJEZ EL BAB

La hiérarchie retenue pour la modélisation de la vulnérabilité de la ville de Medjez El Bab après analyse des différentes données disponibles sur cette ville est donnée par la figure 11.

Les discussions approfondies avec des experts en matière d'inondations urbaines ainsi que la consultation de plusieurs articles traitant la modélisation de la vulnérabilité du territoire par la méthode AHP (tels que Hossain et al. 2006 ; Barczak and Grivault, 2007 ; Caradot et al, 2010) nous ont permis d'attribuer les notes indiquées dans les tableaux 3 à 7 ci-dessous à chaque niveau de la hiérarchie.

Les poids sont développés en fournissant une série de comparaisons de l'importance relative par paire de critères. La comparaison de chaque paire de variables est faite selon une échelle de neuf points telle que :

- le niveau 1 correspond à une variable de la ligne d'égale importance que la variable de colonne ;
- le niveau 9 correspond à une variable de ligne qui est extrêmement plus importante que la variable de colonne. Une fois, les poids sont calculés, nous calculons l'indice de cohérence pour déterminer si les jugements effectués sont cohérents ou non ;
- le 1/9 la variable de la ligne est extrêmement moins importante que la variable de colonne.

Premier niveau de la hiérarchie

Le premier niveau de la hiérarchie retenue (figure 11) est constitué des entités : «Zone urbaine», «Route», «Zone agricole» et «Zone industrielle». Les notes de vulnérabilité sont attribuées dans une logique de donner, plus d'importance à la présence humaine dans ces entités spatiales. Une approximation de l'importance de la valeur économique de l'entité considérée est examinée en second lieu.

Les quartiers et les routes sont l'environnement actif dans lequel les gens circulent. Néanmoins, la zone urbaine constitue évidemment le principal lieu de concentration des gens et de biens. En plus de leur valeur économique et des biens qu'ils contiennent, les bâtiments de la zone urbaine présentent les premiers éléments de protection contre les manifestations naturelles de l'environnement, notamment les inondations.

Les routes constituent le deuxième lieu de concentration des gens et des biens, notamment les voitures et les réseaux de service publics (poteaux d'électricité et de réseaux de télécommunication, conduites d'eau potable, etc.). Le rôle des routes est de plus en plus important en cas de manifestation de crues. En effet, la coupure des routes durant les inondations peut retarder l'arrivée des services de sécurité en cas de besoin. Eventuellement, la probabilité d'avoir des accidents de route augmente aussi. Certes le nombre de gens qui circule dans les routes durant l'événement climatique ne sera pas de la même importance que celui des gens qui occupent les bâtiments. C'est pour cela que nous avons affecté aux routes une importance inférieure à celle des bâtiments.

Les zones industrielles sont peu occupées durant les inondations. Néanmoins, leur valeur économique reste très importante. En plus de leurs valeurs économiques et des machines qui y existent, les usines constituent le lieu de travail de plusieurs gens. C'est pour cela que nous avons affecté à l'entité «Zone industrielle» une note d'importance inférieure à celle des bâtiments et des routes, mais supérieure à celle des zones agricoles.

Les zones agricoles ont la plus faible note d'importance de point de vue présence des hommes en cas d'inondation. Cependant, leur valeur économique ainsi que l'importance des dommages qui peuvent les affecter durant l'événement (perte au niveau des cultures, destruction des engins agricoles, dommages aux installations d'irrigation, etc.), ne permettent pas de négliger leur vulnérabilité aux inondations.

Le tableau 3 représente les notes de vulnérabilité attribuées aux entités du premier niveau de la hiérarchie, et leur poids. L'indice de cohérence de la matrice obtenue est 0. La cohérence des jugements établis est donc acceptable.

Tableau 3 : Notes de vulnérabilité relatives au premier niveau de la hiérarchie

Vulnérabilité aux inondations	Zone urbaine	Zone industrielle	Zone agricole	Route	W
Zone urbaine	1	3	6	2	0.4959
Zone industrielle	1/3	1	2	1/2	0.1542
Zone agricole	1/6	1/2	1	1/3	0.0827
Route	1/2	2	3	1	0.2672

Deuxième niveau de la hiérarchie

Le deuxième niveau de la hiérarchie est constitué pour l'entité «Zone urbaine» des classes «Habitation», «Hôpital» et «Etablissement public». Certes les hôpitaux représentent les éléments les plus importants dans ce niveau. En effet, en plus de leur valeur économique et des matériels qu'ils contiennent, ces endroits présentent des centres fonctionnels qui ne doivent pas arrêter de travailler, notamment en cas d'inondation. Les hôpitaux doivent protéger les malades qui s'y trouvent, spécialement, les gens alités et doivent être capables aussi d'accueillir les gens blessés durant l'événement. L'importance des autres établissements publics (école, lycée, faculté, etc.) vient naturellement après celle des hôpitaux. Mise à part leur valeur économique, et les biens qu'ils contiennent, les dommages qui peuvent les affecter durant les inondations touchent certainement à l'intérêt de plusieurs gens, à l'inverse des habitations privées qui sont considérés les moins vulnérables dans ce niveau de la hiérarchie.

Le tableau 4 représente les notes de vulnérabilité relatives aux différentes classes de «Zone urbaine» et leur poids. L'indice de cohérence calculé pour cette matrice. La cohérence des jugements est alors acceptable.

D'après la carte agricole, les routes traversant la ville de Medjez El Bab se classent en route nationale, route régionale, route locale et route non classée. Le tableau 5 représente les notes de vulnérabilité et les poids relatifs aux différentes classes de routes en tenant compte de leur coût de construction et de leur

importance dans le trafic routier. L'indice de cohérence calculé pour cette matrice est de 0.07. La cohérence des jugements est ainsi acceptable.

Tableau 4 : Notes de vulnérabilité relatives aux classes de la zone urbaine

Zone urbaine	Habitation	Hôpital	Etablissement public	W
Habitation	1	¼	½	0.1429
Hôpital	4	1	2	0.5714
Etablissement public	2	½	1	0.2857

Tableau 5 : Notes de vulnérabilité relatives au type de route

Route	Nationale	Régionale	Locale	Non classée	W
Nationale	1	2	4	9	0.5
Régionale	1/2	1	2	9	0.2864
Locale	1/4	1/2	1	9	0.1795
Non classée	1/9	1/9	1/9	1	0.0337

Le niveau «Zone agricole» se distingue en «Périmètre Public irrigué» et «Périmètre privé irrigué». Les périmètres publics irrigués sont certainement plus importants, vu que les dégâts qui peuvent s'y occasionner touchent à l'intérêt de la collectivité nationale. Le tableau 6 représente les notes de vulnérabilité et les poids attribués aux deux classes de la zone agricole.

Tableau 6 : Notes de vulnérabilité relatives aux deux classes de la zone agricole

Zone Agricole	Périmètre Public irrigué	Périmètre privé irrigué	W
Périmètre Public irrigué	1	4	0.8
Périmètre privé irrigué	¼	1	0.2

Le niveau «Zone industrielle» se divise en «Zone industrielle continue» et «Zone industrielle discontinue». La zone industrielle continue a une valeur économique plus importante que celle de la zone industrielle discontinue. Le tableau 7 représente les notes de vulnérabilité et les poids attribués aux deux classes de la zone industrielle.

Tableau 7 : Notes de vulnérabilité relatives aux deux classes de la zone industrielle

Zone industrielle	Continue	Discontinue	Poids
Continue	1	3	0.75
Discontinue	1/3	1	0.25

La figure 11 représente la hiérarchie obtenue et résume les poids attribués à chacun de ses éléments.

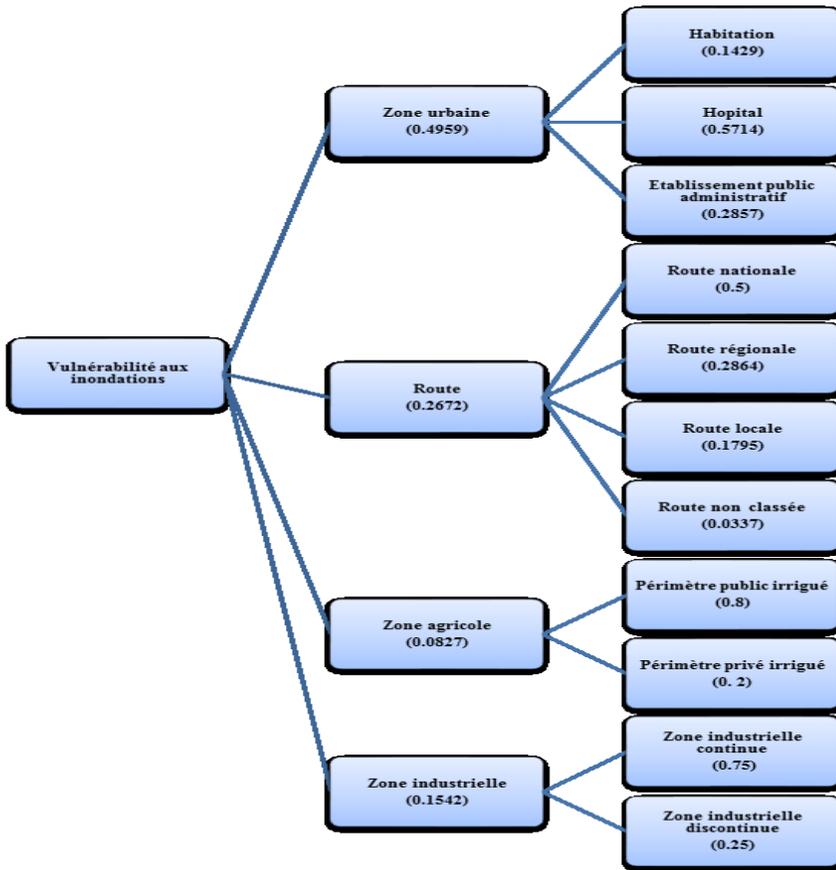


Figure 11 : Poids attribués aux différents niveaux de la hiérarchie selon le premier scénario

ELABORATION DES CARTES DE RISQUE

La carte de risque résulte de la multiplication de la carte d'aléa et de la carte de vulnérabilité. Cette multiplication nécessite d'exprimer ces deux cartes dans la même échelle. Pour ce faire, nous avons divisé la grille de la vulnérabilité par sa valeur maximale, et les grilles d'aléa par la valeur maximale d'énergie du scénario 3500 m³/s. Nous avons donc obtenu des cartes normalisées avec des valeurs comprises entre [0-1]. Ainsi, la carte de risque est obtenue par croisement des cartes standardisées de l'aléa et de la vulnérabilité.

Afin de définir les classes de risque, nous avons considéré la carte de risque obtenue pour le scénario d'aléa minimal ($Q=500$ m³/s) comme cartes de référence. Dans un premier temps, les cellules ayant une valeur de risque nulle ont été converties en cellules sans valeur. La plage des valeurs restantes est ensuite divisée en 3 intervalles égaux, définissant respectivement les classes de risque faible, moyen et fort. Les limites du premier et du deuxième intervalle ainsi que la borne inférieure de la classe de risque maximal sont maintenues constantes pour toutes les cartes de risque alors que la borne supérieure de la classe de risque fort soit prise égale à la valeur maximale de chaque carte de risque correspondant à un aléa donné. Les cellules sans valeur sont finalement converties en cellules ayant une valeur nulle. Ces dernières définissent les zones à risque nul.

Les figures 12 et 13 représentent les cartes de risque obtenues respectivement pour les carte d'aléa correspondantes à $Q=500$ m³/s et $Q=3500$ m³/s).

La comparaison des cartes de risque obtenues pour les différents scénarios d'inondation montre que l'étendue de la zone à risque est toujours identique à l'étendue de la zone de manifestation de l'aléa. De même, toutes les cartes de risque obtenues pour les différents scénarios considérés d'aléa classent le pont Andalous comme étant la zone la plus risquée en cas d'inondation, ce qui est conforme à la réalité de la zone d'étude.

En outre, la comparaison de la valeur maximale des grilles de risque obtenues pour différents scénarios d'aléa montre que le risque maximal varie linéairement en fonction du débit qui est à l'origine de l'inondation (Figure 14).

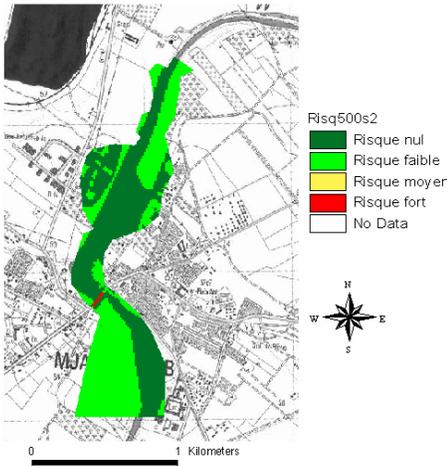


Figure 12 : Carte de risque pour un débit de 500 m³/s

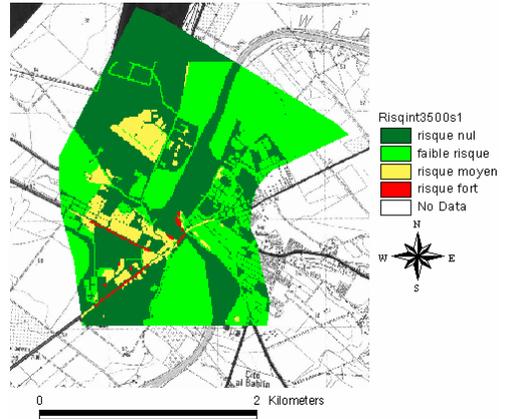


Figure 13 : Carte de risque pour un débit de 3500 m³/s

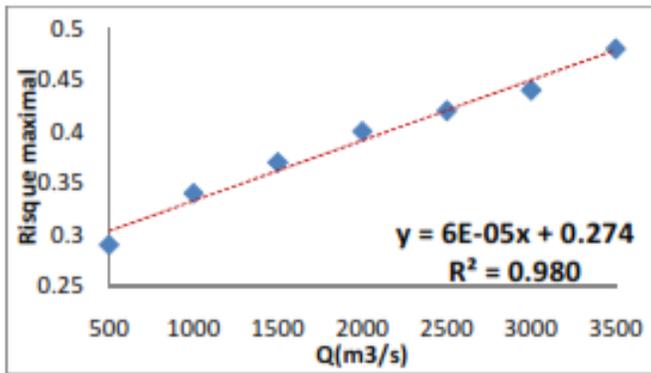


Figure 14 : Variation du risque d'inondation maximal en fonction du débit origine de l'inondation

CONCLUSION

D'une manière générale, des cartes de risque d'inondation sont d'un intérêt majeur pour l'aménagement du territoire, la prévention et la protection contre les inondations. L'élaboration de telles cartes nécessite l'évaluation de l'aléa inondation et la quantification de la vulnérabilité des enjeux exposés. Dans ce

contexte, et concernant l'oued Medjerda, la simulation des écoulements à l'aide d'un modèle hydrodynamique bidimensionnel intégré sur la verticale a permis de préciser plusieurs scénarios d'aléa en présence des bâtiments au niveau de la ville de Medjez El Bab. La méthode d'analyse Hiérarchique Multicritères a permis d'attribuer des degrés de vulnérabilité à chaque type d'enjeu exposé. Le croisement des cartes d'aléa et des cartes de vulnérabilité a finalement permis d'aboutir à des cartes géoréférencées de risque d'inondation de la ville de MedjezEl Bab par débordement de la Medjerda en cas de crue. La comparaison des cartes de risque relatives à chaque scénario d'aléa a mis en évidence l'augmentation du risque d'inondation en fonction de l'importance de l'aléa.

En termes de perspectives, il serait préférable d'envisager la prise en compte de la morphodynamique du lit de l'oued en cas de crues d'intensité importante qui pourrait améliorer l'estimation de l'aléa mais au prix d'une résolution d'équations supplémentaires de transport de sédiments. De même, disposer d'un outil informatique puissant permettrait d'envisager des simulations à échelle plus fine afin d'intégrer des éléments ayant une grande influence sur le phénomène des inondations urbaines (regards du réseau d'assainissement, lampadaires, trottoirs, arbres, ...). En outre, il serait utile d'étudier l'évolution dynamique de la vulnérabilité à l'échelle de l'aléa lui-même. Ce genre d'étude constitue le prolongement naturel visant la prise en compte d'embâcles qui amplifient le risque notamment en cas de forte crue.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AYARI, K. 2013. Modélisation spatiale du risque d'inondation. Mémoire de mastère. Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis), p. 80.
- BARCZAK, A., GRIVault, C., 2007. Système d'information géographique pour l'évaluation de la vulnérabilité au risque de ruissellement urbain. NOVATECH SESSION 1.2, 139-146.
- BEN AMOR, H. 2012. Modélisation SPH des inondations de la Medjerda. Mémoire de mastère. Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis), p. 118.
- CARADOT, N., GRANGER, D., ROSTAING, C., CHERQUI, F., CHOCAT, B., 2010, L'évaluation du risque de débordement des systèmes de gestion des eaux urbaines : contributions méthodologiques de deux cas d'études (Lyon et Mulhouse). NOVATECH Session 1.9, pp.1-12.
- CHEN, Y., YU, J., KHAN, S., 2010. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. Environmental Modelling & Software 25, pp.1582-1591.

- DAOUTH, S., 2007. Etude et modélisation hydrodynamique de débordements de la Medjerda. Mémoire de mastère. Ecole Nationale des ingénieurs de Tunis, 130p.
- HOLTSCHLAG, D.J., KOSCHIK, J.A., 2002. A Two-Dimensional Hydrodynamic Model of the St. Clair–Detroit River Waterway in the Great Lakes Basin, Water Resources Investigations Report 01-4236, 61p.
- INAT, ESIER, DGBGTH, DG.RE/CRDA(s) Béja et Manouba, 2004. Etude des risques d'inondations sur l'oued Medjerda : les crues de janvier-février 2003, la campagne topographique de juin 2003 et les périmètres inondés de janvier 2004 (Institut National Agronomique de Tunisie), p. 62.
- JABALLAH, M., 2009. Modélisation Hydro-géomorphologique et Cartographie du Risque d'Inondation. Mémoire de mastère. Ecole Nationale d'ingénieurs de Tunis, 107p.
- JICA, 2009. Etude sur la gestion intégrée du bassin axée sur la régulation des inondations dans le bassin de la Mejerda en république Tunisienne (Direction Générale des Barrages et des Grands Travaux Hydrauliques), 313 p.
- JACOB, B., AARON, T. 2008. St. Clair River Hydrodynamic Modelling Using RMA2 Phase 1 Report (International Upper Great Lakes Study), 20 p.
- LARSEN, G., 2007. Modelling hydrodynamic processes within pumicestone passage, Northern Moreton Bay, Queensland. Mémoire de mastère. School of Natural Resource Sciences, Brisbane, Australia, 190 p.
- MALCZEWSKI, J., 2006. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. International Journal of Geographical Information Science 20, pp.703-726.
- MANCHE, Y., 1998. Cartographie multirisques: une méthode semi-automatique. Ingénieries – EAT – Risques naturels, pp. 115-119.
- MARZOUKI, A., 2005. Modélisation de la Medjerda en période de crue. Mémoire de mastère. Ecole Nationale des ingénieurs de Tunis, 102p.
- MISSAOU, M., 2007. Modélisation des écoulements en zone urbaine : Application aux inondations de Megrine. Mémoire de mastère .Ecole Nationale des ingénieurs de Tunis, 106p.
- Mousseau V., Roy B., 2006. Cartographie décisionnelle multicritère : Formalisation et implémentation informatique. Thèse de doctorat. Université Paris Dauphine D.F.R.Sciences Des Organisations, 262p.
- MRABET, I., 2009. Modélisation de la dispersion de la tache thermique dans l'oued Hamdoun et la zone côtière. Mémoire de mastère. Ecole nationale des ingénieurs de Tunis, 82 p.

- REZGUI, A., MAIZ, N.B., MOUSSA, M., 2008, Fonctionnement hydrodynamique et écologique du Lac Nord de Tunis par modélisation numérique. *Revue des sciences de l'eau* 21, 349p.
- SENDI N., 2010. Etude de la dynamique Fluviale de la Medjerda- Gestion de crues. Mémoire de mastère. Institut National Agronomique de Tunisie, 122p.
- Université Joseph Fourier, 2011. ANFAS:Fusion de données pour l'analyse des inondations et l'aide à la décision, 58 p.
- WANGO, T.E., MOUSSA, M., ADOPO, K.L., MONDE, S., 2011. Calage du modèle hydrodynamique à 2D du complexe lagunaire de Côte d'Ivoire. *Geo-Eco-Trop*: 35, pp.23-32.
- ZAR, H., 2004. Étude des processus hydrosédimentaires –Application à la retenue du barrage de Sidi Salem. Mémoire de mastère. Ecole Nationale des ingénieurs de Tunis, 114p.