Cartographie numérique du risque d'inondation dans le Nord-Est de la Tunisie par la méthode du rapport de fréquence et l'indice statistique

Radhia Mansour, Abdessalem El Ghali

Laboratoire de géodynamique et de Télédétection, faculté des sciences de Bizerte, Université de Carthage, Zarzouna, Bizerte-7021, Tunisie

dsmansour.radhia@gmail.com; absabselghali@gmail.com

RÉSUMÉ. Les crues soudaines « inondations éclaires » constituent un type de catastrophe naturelle qui représente une menace majeure pour la population, les constructions urbaines et les infrastructures routières et l'environnement. En Tunisie, ce phénomène est connu depuis les années soixante et s'est poursuivi jusqu'à nos jours. Les plus importantes ont été enregistrées pendant les années pluvieuses de 1969, 1983, 2003 et 2012. Afin d'identifier les zones à risque d'inondation et réduire la vulnérabilité des enjeux, une approche cartographique numérique (Flash Flood Risk Mapping ; FFRM) a été adoptée pour l'élaboration d'un plan de prévention des risques d'inondation (PPRI) dans le Nord-Est de la Tunisie. Cette méthode consiste à : 1) intégrer dans un système d'information géographique (SIG) les facteurs pertinents et les composantes de l'aléa et de la vulnérabilité des enjeux liés aux inondations, 2) extraire les interactions entre les paramètres déterminants de l'évolution spatio-temporelle du phénomène et 3) estimer ses impacts socio-économiques sur la Tunisie nord-orientale. L'élaboration des relations dialectiques entre les zones inondées et leurs facteurs de prédisposition et l'établissement de cartes de sensibilité aux inondations ont été faites en appliquant deux modèles : le rapport de la fréquence (FR) et l'indice statistique (SI). La pondération des différents paramètres de conditionnement et leur combinaison selon ces deux modèles nous aide à définir un indice FR et un SI qui permettent de cartographier la susceptibilité aux inondations (Flash Flood Hazard Susceptibility Mapping, FFHSM). L'évaluation de la fiabilité de ces deux modèles par l'application de la méthode de l'aire sous courbe (AUC) montre que l'approche par la fréquence FR, avec taux de précision de 79 %, est la plus précise.

ABSTRACT. Flash floods are a type of natural disaster that poses a major threat to the population, urban constructions and road infrastructure and the environment. In Tunisia, this phenomenon is known since the sixties and has continued until today. The most important ones were recorded during the rainy years of 1969, 1983, 2003 and 2012. In order to identify areas at risk of flooding and reduce the vulnerability of the stakes, a Flash Flood Risk Mapping (FFRM) approach has been adopted for the development of a flood risk prevention plan (PPRI) in northeastern Tunisia. This method consists in: 1) integrating into a geographic information system (GIS) the relevant factors and the components of the hazard and vulnerability of the stakes related to floods, 2) extracting the interactions between the determining parameters of the spatio-temporal evolution

Revue internationale de géomatique - n° 3-4/2019, 339-360

of the phenomenon and 3) estimate its socio-economic impacts on North-East Tunisia. The dialectical relations between the flooded areas and their predisposing factors and the development of flood sensitivity maps were developed by applying two models: the frequency ratio (FR) and the statistical index (SI). The weighting of the different conditioning parameters and their combination according to these two models helps us to define an index FR and another SI that make it possible to map the susceptibility to floods (Flash Flood Hazard Susceptibility Mapping, FFHSM). The evaluation of the reliability of these two models by the application of the area under curve (AUC) method shows that the approach of the frequency FR with a precision rate of 79% seems the most accurate.

MOTS-CLÉS : risque d'inondation, susceptibilité, indice statistique (SI), rapport de la fréquence (FR).

KEYWORDS: flood risk, susceptibility, statistical index (SI), frequency ratio (FR).

DOI: 10.3166/rig.2019.00093 © 2019 Lavoisier

1. Introduction

Dans le domaine de prévention des risques naturels, en utilisant le système d'information géographique (SIG) et les modèles d'exploration de données, une analyse des relations entre les zones inondables et les facteurs hydrologiques corrélés est nécessaire pour cartographier la sensibilité régionale aux inondations dans le bassin versant de l'oued Miliane. Les cartes thématiques générées par l'application des modèles statistiques permettent de mieux comprendre les événements grâce à la visualisation de leurs localisations, leurs caractéristiques, leurs contextes spatiaux et les phénomènes qui leurs sont potentiellement liés (Cécile *et al.*, 2015).

Les inondations soudaines sont définies comme les catastrophes les plus fréquentes, les plus envahissantes et les aléas naturels les plus dévastateurs. Elles sont des événements hydrologiques cycliques dont chacun est caractérisé par une période de retour qui indique sa probabilité d'occurrence.

Depuis plusieurs décennies et à cause de sa position géographique sur la bordure du continent africain, la Tunisie était sujet aux catastrophes liées aux perturbations climatiques, en particulier, dans le Nord-Est du pays (Mbaye, 2009) où les concentrations urbanisées et les infrastructures de base ont connu des chocs destructifs associés à des pics de pluies torrentielles.

La cartographie de l'aléa d'inondation élaborée par la présente étude pourra en particulier servir comme document technique dans le cadre de l'élaboration d'un plan de prévention des risques naturels(PPR) pour le bassin versant de Miliane du Nord-Est de la Tunisie.

Dans ce cadre, afin de cartographier les zones exposées au risque d'inondation, des nombreuses études ont appliqué les techniques SIG et de télédétection pour produire des cartes thématiques des différents facteurs de prédisposition des inondations tels que la géomorphologie, la couverture du sol, les modèles de drainage, la géologie, et la pédologie.



Figure 1. Position géographique du bassin versant de l'oued Miliane

En raison d'un ensemble complexe de facteurs liés aux inondations, il est important d'utiliser des techniques d'exploration de données afin de procéder à une évaluation appropriée de la sensibilité aux inondations. Diverses approches d'exploration de données ont été utilisées pendant des décennies pour prévoir et évaluer la survenue d'une inondation (Harun *et al.*, 2017 ; Mojaddadi *et al.*, 2017). En général, des techniques d'exploration de données numériques et statistiques ont récemment été utilisées, telles que le modèle basé sur l'arbre de décision (Chapi *et al.*, 2017; Rahmati et Pourghasemi, 2017), modèle basé sur un réseau de neurones artificiels (ANN) (Aziz *et al.*, 2014), une machine à vecteurs de support (Ahmadi et Pournik, 2016) ou le modèle de régression (LR) (Lee et Lee, 2017). De façon proactive, deux modèles statistiques de base, le rapport de fréquence (FR) et l'indice statistique (SI), ont été utilisés pour observer les tendances entre les facteurs liés aux inondations (Bathrelios *et al.*, 2016 ; Tehhrany *et al.*, 2016a).

Des évaluations plus approfondies ont incorporé la modélisation numérique et l'analyse du processus de hiérarchie analytique, Youssef *et al.* (2015a) ont démontré des modèles hydrauliques ou créé des cartes thématiques supplémentaires en mélangeant des enquêtes avec SIG et techniques de télédétection (Youssef *et al.*, 2015b).

2. Zone d'étude

L'étude a été réalisée sur le bassin versant de l'oued Miliane, situé dans le Nord-Est de la Tunisie et qui couvre une superficie de 2239 km², de longitude allant de 9°29'2.02" à 10°18'44.98" Est et de latitude 36° 7'26.64"à 36°45'37.53" Nord (figure 1).

Le climat est semi-aride avec environ 720 mm de précipitations annuelles moyennes. Le réseau hydrographique principal de Miliane se jette dans le golfe de Tunisie. La partie amont est couverte par les forêts ; les pentes sont abruptes et les terrains sont morphologiquement accidentés.

L'altitude maximale de la région d'étude est de 1266 m et avec un minimum d'élévation qui peut atteindre -8 mètres. La géologie du bassin correspond à deux ensembles lithologiques : un ensemble marno-calcaire en amont et un ensemble alluvio-sableux couvrant la partie avale du bassin. La tectonique est caractérisée par des failles et des fractures d'ampleur variable en profondeur et en longueur (figure 1).

3. Méthodologie

Dans cette étude, la méthodologie adoptée se schématise par un organigramme comme illustré dans la figure 2. Ce dernier ayant pour objectif la cartographie du risque d'inondation par : l'évaluation de cet aléa, la caractérisation du danger et l'interaction des facteurs potentiels à l'échelle du bassin versant de l'oued Miliane. Cet organigramme comprend deux parties dont la première consiste à hiérarchiser la susceptibilité aux inondations en appliquant la méthode de fréquence FR et celle de l'indice statistique SI. Ces deux dernières présentent des simples outils d'évaluation géospatiale permettant de mettre en évidence la relation probabiliste et statistique bivariée entre les variables dépendantes et les variables indépendantes d'occurrence des inondations. L'évaluation de la composante spatiale de cet aléa est basée sur le zonage de la région affectée et sa possible extension en s'appuyant sur l'analyse des relations existantes entre les facteurs environnementaux de prédisposition et la susceptibilité des zones inondées. Quant à la deuxième partie, elle n'est qu'une estimation des conséquences potentielles de cet aléa. Elle consiste à quantifier les pertes selon plusieurs critères tels que les préjudices corporels, les dommages structurels, les pertes fonctionnelles.

Les différentes combinaisons des cartes thématiques élémentaires obtenues par traitement numérique de l'ensemble des données à référence spatiale aboutissent à la réalisation de la carte résultante du risque d'inondation du bassin versant de l'oued Miliane.



Figure 2. Organigramme de la méthodologie adoptée

3.1. Données utilisées

3.1.1. Facteurs de conditionnement

Afin de générer un modèle d'évaluation de la susceptibilité aux dangers en appliquant les deux modèles du rapport de fréquence et l'indice statistique, une base de données géospatiales liées aux inondations doit être définie (Tehrany *et al.*, 2015b ; Jebur *et al.*, 2015) (tableau 1).

| Données de base | Cartes dérivées | Type de données |
|---|---|--------------------|
| Données altimétriques | Elévation (m) Pente topographique (°) Indice de la puissance du réseau hydrographique Indice topographique d'humidité Profil de courbure Distance par rapport au réseau hydrographique principal | Pixel |
| Carte pédologique | – Texture du sol | Vecteur |
| Carte agricole | Carte agricole – L'occupation du sol | |
| Carte géologique – Les faciès lithologiques | | Vecteur |

Tableau 1. Les données utilisées

Les facteurs de conditionnement des inondations les plus pertinents et les plus utilisés par la plupart des auteurs (Lee *et al.*, 2012 ; Tehrany *et al.*, 2014 ; Rahmati *et al.*, 2016) tels que l'altitude, la pente, l'indice d'humidité topographique (TWI), l'indice de puissance du flux (SPI), le facteur de longueur de la pente (SLF), le ruissellement de surface, le relief, la lithologie, la distance par rapport au réseau hydrographique principal, la couverture des sols, la texture et le drainage du sol ont été utilisés dans cette étude.

La détermination de ces paramètres a été géotraitée à l'aide d'un système d'information géographique (SIG). L'élaboration des cartes thématiques relatives à ces facteurs a été basée essentiellement sur la topographie du secteur d'étude, et ce suite à la forte relation entre l'occurrence d'inondation et les caractéristiques géomorphologiques du bassin versant étudié.

La vitesse de ruissellement des eaux de surface varie en fonction du facteur topographique, on trouve des eaux s'écoulant des altitudes les plus élevées aux altitudes les plus basses et elles s'accumulent dans les régions basses et plates, provoquant ainsi l'augmentation du risque d'occurrence des inondations. Cette relation a été confirmée par (Botzen *et al.*, 2013, Kazakis *et al.*, 2015) qui ont mis en relief l'influence des facteurs topographiques (altitude, la pente et la courbure) sur la quantité de ruissellement et l'infiltration en surface et affirment que les crues éclaires ne se produisent généralement pas dans les régions de haute altitude. Dans cette étude, tous les facteurs topographiques et hydrologiques ont été dérivés de MNT à une résolution de 30 m. Le MNT a permis aussi d'obtenir d'autres indices tels que l'indice de puissance de flux (SPI) l'indice topographique d'humidité (TWI) et l'indice de la longueur de pente (SLF) (tableau 2).

3.1.2. Carte de susceptibilité produite par le rapport de fréquence (FR)

La génération de la carte de susceptibilité aux inondations éclaires (FFHSM) a été adoptée suite à une application du modèle du rapport de fréquence (FR). Ce dernier est un simple outil d'évaluation géo-spatiale pour comprendre la relation probabiliste entre les variables dépendantes et les variables indépendantes du système, y compris les jeux de données géographiques avec plusieurs niveaux de classification (Laxton, 1996a). Cette approche est basée sur l'extraction d'un coefficient de pondération FR qui reflète la valeur quantitative de la relation entre l'occurrence des risques d'inondation éclaire et les différents paramètres de conditionnement. Cet indice peut être mesuré en faisant la somme des FR de tous les facteurs, il est exprimé sur la base de l'équation (1) :

$$FFHSI = \Sigma FR \tag{1}$$

Où FFHSI est l'indice de susceptibilité au risque d'inondation éclaire et FR est le rapport de la fréquence pour chaque paramètre. Le FR peut être défini dans l'équation (2) (Laxton, 1996b) :

Cartographie numérique du risque d'inondation 345

| Indice | Expression | Caractéristiques |
|--------|--|---|
| SPI | SPI = As x tan(β) Avec As = l'aire de captage spécifique β = le gradient de la pente locale en degrés (Dewan et Yamaguchi, 2008) | Le SPI est l'indice de la puissance érosive d'un flux, il peut être utilisé pour décrire l'érosion potentielle d'un cours d'eau en un point donné de la surface du terrain. L'augmentation de la valeur de SPI est proportionnelle à l'accélération de la vitesse de ruissèlement qui est en relation directe avec l'augmentation du degré de pente topographique. |
| TWI | TWI = ln ($\alpha/tan\beta$) Avec α est l'aire de captage spécifique (m ² /m) ; β (radian) la pente (en degrés) (Regmi et Vitek, 2010). | TWI est un facteur topographique utilisé dans le modèle de liquidation. Il indique la probabilité d'écoulement des eaux de surface sur une pente locale vers un point spécifique (Beven et Kirkby, 1979). |
| SLF | SLF = $(L/22,13)$ x (0,065 + 0,045xS + 0,065xS ²) où S est l'inclinaison de la pente en %, m est un paramètre tel que m = 0,5 si la pente est > 5 %, m = 0,4 si la pente est de 3,5 à 4,5 %, m = 0,3 si la pente est de là 3 % et m = 0,2 si la pente est < 1 % (Sadiki <i>et al.</i> , 2004). | Le facteur topographique (SLF) a été calculé à partir de l'inclinaison des pentes et de leur longueur, décrit par (Wischmeier et Smith, 1978). |

Tableau 2. Les différents indices topographiques

$$FR = (A/B)/(M/N)$$
(2)

Où A est le nombre de pixels avec un risque d'inondation soudaine pour chaque classe de chaque paramètre ; B est le nombre total de pixels présentant des risques d'inondation éclair dans la zone d'étude ; M est le nombre de pixels pour chaque classe du paramètre ; et N est le nombre total de pixels dans la zone d'étude.

3.1.3. Carte de susceptibilité produite par l'indice statistique (SI)

La méthode de l'indice statistique (SI) a été introduite par VanWesten (Wu *et al.*, 2016a). C'est une analyse statistique bivariée qui a été largement utilisée dans des

nombreuses études (Wu *et al.*, 2016b ; Ozetekin et Topal, 2005). Il est exprimé sur la base de l'équation suivante (3) :

$$FFHSI = \sum_{R=1}^{R=n} Wij$$
(3)

Où FFHSI, Wij et n représentent respectivement l'indice de susceptibilité au risque des crues, la valeur pondérée de la i-ème classe du j-ème paramètre en utilisant le modèle SI et le nombre de paramètres de conditionnement.

Dans la méthode de l'indice statistique, la valeur pondérée de chaque catégorie d'unité est définie comme le logarithme naturel de la crue éclaire. Il peut être exprimé par la formule (4) :

$$Wij = \ln(Dij/D) = \ln[(Nij/Mij)/(N/M)]$$
(4)

Où Wij est le poids attribué à la classe i du paramètre j. Dij est la densité du risque d'inondation éclair dans la i-ème classe du j-ème paramètre. D est la densité totale de risque d'inondation éclair dans la zone d'étude. Nij est le nombre de pixels avec risque d'inondation flash dans la i-ème classe de la j-ème paramètre. Mij est le nombre de pixels dans la i-ème classe du j-ème paramètre. N est le nombre total de risques d'inondation éclair dans la zone d'étude. Nest le nombre total de risques d'inondation éclair dans la zone d'étude. Nest le nombre total de risques d'inondation éclair dans la zone d'étude. M est le nombre total de pixels dans la zone d'étude.

4. Résultats et discussions

L'évaluation spatiale et la cartographie numérique de la susceptibilité aux inondations éclaires est basée essentiellement sur l'analyse des variables indépendantes, appelées facteurs de conditionnement (Pradhan, 2009 ; Pourghasemi *et al.*, 2012). La distribution spatiale et statistique des données de base pour tous les dix (10) facteurs de conditionnement étudiés à savoir, altitude, pente, indice d'humidité topographique (TWI), indice de puissance de réseau hydrographique (SPI), l'indice de la longueur de pente (SLF), lithologie, distance au fleuve principal, la texture du sol, la courbure et l'occupation du sol a été élaborée et classifiée en plusieurs catégories dont chacune est caractérisée par un coefficient de pondération (FR) et (SI) bien spécifique (figure 3 et tableau 3).

4.1. Résultats de la méthode du rapport de fréquence (FR)

La détermination de l'indice FR pour chaque classe de chaque facteur de conditionnement d'inondation affiché dans le tableau 3 aboutit à indiquer le degré d'association entre les différentes classes des paramètres utilisés et l'occurrence spatiale d'inondation.

Ce tableau montre que la plupart des indices FR ayant les valeurs les plus importantes, et qui correspondent à des zones susceptibles aux inondations passées, sont



Figure 3. Facteurs de conditionnement (a) Altitude, (b) Pente topographique, (c) SPI, (d) TWI, (e) Courbure, (f) Occupation du sol, (g) Texture du sol, (h) Géologie, (i) Distance par rapport à la rivière, (j) SLF

348 RIG. Volume $29 - n^{\circ} 3-4/2019$



Figure 3. (Suite)

Figure 3. (Suite)

associés à des faibles altitudes ayant des valeurs comprises entre 150-200 m. Cette classe se manifeste par la plus haute valeur de FR qui est égal à 2,41. Cet indice FR diminue progressivement en allant vers les hautes altitudes jusqu'il s'annule au sommet. La variation de pente permet la détermination des différentes formes morphologiques du secteur d'étude telles que les plaines qui se présentent par des pentes raides ayant une valeur inférieure à 1,5° et se caractérisent par l'indice FR le plus important. Pour le paramètre de courbure, les zones planes s'avèrent les plus susceptibles aux inondations avec la plus haute valeur de FR qui est égale à 1,18. En ce qui concerne le paramètre SPI, la classe supérieure à 11,6 avait la valeur de FR la plus élevée. D'autre part, le paramètre lithologique semble aussi influencer l'occurrence des inondations ; ainsi la classe des alluvions présente la plus grande valeur de FR (2,78), reflétant une forte susceptibilité aux inondations dans cette région.

Quant à la texture du sol, les résultats ont montré que le sol limoneux a la valeur de FR la plus élevée (1,02), ce qui implique que ces caractéristiques sont favorables aux risques d'inondation éclair.

La combinaison des divers indices associés aux facteurs décrits ci-dessus génère la carte de susceptibilité du modèle FR de la région étudiée (figure 4a). Le degré de susceptibilité a été subdivisé en cinq classes : très faible, faible, moyen, fort et très fort. L'étendue spatiale de ces classes représente respectivement un pourcentage de 2,5 %, 10,6 %, 20,4 %, 31 % et 35,3 % de la surface totale du secteur d'étude.

| Paramètre | Classe | No. pixels du domaine (M), MiJ | Nb. inondation (A) ; NiJ | % d'aléa d'inondation | FR | SI |
|----------------------------|-------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|------|-------|
| | Argile | 3490 | 1358 10,2 | | 0,60 | -0,84 |
| | Sebkhas | 589 | 495 | 3,74 | 1,30 | -0,07 |
| Gáalagia | Marne | 5375 | 1472 | 11,13 | 0,42 | -1,19 |
| Geologie | Allumions | 7262 | 8961 | 67,81 | 1,92 | 0,30 |
| | Conglomérat | 1504 | 583 | 4,411 | 0,60 | -0,84 |
| | Calcaire | 2356 | 344 | 2,603 | 0,22 | -1,82 |
| | <50 | 2355 | 2310 | 17,48 | 1,52 | 0,42 |
| | 50-100 | 2192 | 1646 | 12,45 | 1,16 | 0,15 |
| | 100-150 | 2099 | 2278 | 17,23 | 1,68 | 0,52 |
| | 150-200 | 2919 | 4525 | 34,24 | 2,41 | 0,88 |
| Elévation | 200-250 | 2875 | 1513 11,44 | | 0,81 | -0,19 |
| (m) | 250-350 | 2863 | 557 | 4,21 | 0,3 | -1,19 |
| | 350-550 | 2973 | 240 | 1,81 | 0,12 | -2,07 |
| | 550-700 | 2035 | 93 | 0,70 | | -2,64 |
| | 700-900 | 227 | 13 | 0,098 | 0,08 | -2,41 |
| | >900 | 39 | 0 | 0 | | 0 |
| | 0-1,5 | 4662 | 4806 | 36,37 | 1,60 | 0,47 |
| | 1,5-3 | 4769 | 3801 28,76 | | 1,24 | 0,21 |
| | 3-5 | 3735 | 1632 | 12,35 | 0,68 | -0,38 |
| | 5-7 | 2502 | 915 6,92 | | 0,56 | -0,56 |
| \mathbf{D}_{onto} | 7-9 | 1451 | 590 4,46 | | 0,63 | -0,45 |
| Pente (°) | 9-11 | 1046 | 400 | 3,08 | 0,59 | -0,51 |
| | 11-15 | 1220 | 472 | 3,57 | 0,60 | -0,5 |
| | 15-17 | 312 | 150 1,13 | | 0,74 | -0,28 |
| | 17-22 | 438 | 216 1,63 | | 0,76 | -0,26 |
| | >22 | 330 | 318 | 2,4 | 1,5 | 0,4 |

Tableau 3. Facteurs relatifs aux rapports de fréquence (FR) et l'indice statistique (SI)

7

| Paramètre | Classe | No. pixels du domaine (M), MiJ | Nb. inondation (A) ; NiJ | % d'aléa d'inondation | FR | SI |
|--------------|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|------|-------|
| | (-15)-(0,25) | 5668 | 3153 | 23,8 | 0,86 | -0,14 |
| Courbure | (-0,25)-0,25 | 9276 | 7076 | 53,54 | 1,18 | 0,17 |
| | 0,25-21 | 5612 | 3082 | 23,32 | 0,85 | -0,15 |
| | <6,5 | 2 | 690 | 5,22 | 537 | 6,28 |
| | 6,5-7,5 | 61 | 252 | 1,90 | 6,43 | 1,86 |
| | 7, 5-8, 5 | 831 | 577 | 4,36 | 1,08 | 0,07 |
| | 8,5-10,5 | 5015 | 2905 | 21,98 | 0,90 | -0,1 |
| TWI | 10,5-12,5 | 4946 | 3808 | 28,81 | 1,19 | 0,18 |
| | 12,5-14,5 | 4350 | 2378 | 17,99 | 0,85 | -0,16 |
| | 14,5-16 | 2129 | 569 | 4,30 | 0,41 | -0,87 |
| | >16 | 3242 | 2035 | 15,40 | 0,97 | -0,02 |
| Distance | 100 | 487 | 96 | 0,72 | 0,30 | -1,18 |
| par rapport | 200 | 966 | 196 | 1,483 | 0,31 | -1.15 |
| à la rivière | 300 | 1410 | 271 | 2,05 | 0,29 | -1.2 |
| | Sableuse | 975 | 581 | 4,396 | 0,92 | -0,07 |
| Texture | Limoneuse | 11094 | 7310 | 55,32 | 1,02 | 0,02 |
| | Argileuse | 8463 | 5322 | 40,27 | 0,97 | -0,02 |
| | Bare Solls | 107 | 36 | 0,27 | 0,52 | -0,64 |
| Occupation | Périmètre irrigué | 1724 | 2838 | 21,47 | 2,56 | 0,94 |
| uu soi | Terre agricole | 13640 | 8203 | 62,07 | 0,93 | -0,06 |
| | Forêt | 3920 | 1543 | 11,67 | 0,61 | -0,48 |

Tableau 3 – (suite)

| Paramètre | Classe | No. pixels du domaine (M), MiJ | Nb. inondation (A) ; NiJ | % d'aléa d'inondation | FR | SI |
|-----------------------|-----------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|------|-------|
| | 0-1,37 | 10498 | 9126 | 69,06 | 1,35 | 0,30 |
| | 1,37-3,4 | 6477 | 2464 | 18,64 | 0,59 | -0,52 |
| SPI/10 ^a) | 3,4-6,4 | 2582 | 978 | 7,401 | 0,58 | -0,52 |
| | 6,5-11,6 | 785 | 487 | 3,68 | 0,96 | -0,03 |
| | >11,6 | 120 | 130 | 0,98 | 1,68 | 0,52 |
| | 0-0,04 | 7260 | 4888 | 36,99 | 1,04 | 0,04 |
| | 0,04-0,27 | 2331 | 2462 | 18,63 | 1,64 | 0,49 |
| | 0,27-0,55 | 3263 | 2244 | 16,98 | 1,07 | 0,06 |
| | 0,55-0,94 | 2308 | 1190 | 9 | 0,8 | -0,21 |
| SI E | 0,94-2,23 | 3130 | 1246 | 1246 9,42 | | -0,47 |
| SLF | 2,23-3,19 | 826 | 367 2,77 | | 0,69 | -0,36 |
| | 3,19-4,5 | 587 | 248 1,87 | | 0,65 | -0,41 |
| | 4, 5-6, 5 | 361 | 207 | 1,56 | 0,89 | -0,11 |
| | 6,5-7 | 45 | 37 | 0,28 | 1,28 | 0,24 |
| | >7 | 348 | 297 | 2,247 | 1,32 | 0,28 |

Tableau 3 – (suite)

4.2. Résultats de la méthode de l'indice statistique (SI)

Les coefficients de pondération de différents paramètres de conditionnement obtenus par cette approche statistique (SI) pour chaque classe i de chaque facteur j sont indiqués dans le tableau 3. Selon ce tableau, pour le degré de pente de deux classes les plus faibles, des valeurs pondérées positivement de 0,47 et 0,21 ont été respectivement obtenues, alors que les classes de forte pente sont caractérisées par des poids négatifs. Naturellement, ceci est expliqué par la prédisposition aux inondations dans les plaines et les secteurs à faibles pentes.

Sur le plan géométrie de surface, Tehrany *et al.* (2015) ont démontré que les surfaces planes sont plus susceptibles à l'inondation que celles convexes. À l'échelle du secteur

Figure 4. Cartes de susceptibilité aux inondations (a) rapport de fréquence (FR), (b) indice statistique (SI)

d'étude et d'après le tableau 3, l'indice de courbure plat a la plus haute valeur de SI, alors qu'il est faible pour les deux autres classes concave (0,15) et convexe (-0,14).

La topographie est un des facteur majeur des inondations déterminant la répartition spatiale des monts, des talus, des cuvettes et des plaines en fonction de leur intervalle d'altitude (tableau 3). Dans ce contexte, dix classes d'altitude ont été distinguées avec des reliefs correspondant à des altitudes supérieures à 900 m situés à l'abri des eaux inondables. Vers le bas, des talus couvrent les intervalles d'altitude variable entre 50 et 900 m qui sont légèrement risqués. Sous ces entités topographiques (monts et talus), se trouvent des terrains quasi plats sensibles à l'inondation ayant des altitudes inférieures à

50 m. Ces zones planes sont formées essentiellement par des faciès quaternaires fortement susceptibles aux inondations. Ces alluvions à dominance limono-sableuse sont caractérisées par un SI le plus élevé. Pour des valeurs inférieures de TWI, des poids négatifs ont été obtenus ; tandis que pour des valeurs plus élevées, l'indice SI devient de plus en plus important. En général, on peut dire qu'en augmentant le TWI, la probabilité d'inondation augmente. Le poids le plus élevé obtenu est égal à 1,86 et correspond au TWI variant de de 6,5 à 7,5. Les zones susceptibles aux inondations présentent un facteur SPI dans la plage correspondant à la classe dont le SPI est supérieur à 11,6*10*. Dans le domaine des sites d'inondation, en augmentant la valeur SPI, un poids plus élevé est acquis.

La considération du ruissellement du réseau hydrographique principal est importante pour l'étude du degré de susceptibilité aux inondations. Ce dernier est très élevé sur les rives des cours d'eaux et leur lit majeur ainsi que les terrasses bordières. Ceci, est montré dans ce travail où il y avait une corrélation négative entre la distance de la rivière et la survenue d'inondation. Cela implique que la susceptibilité à ce phénomène naturel diminue avec la distance par rapport à la rivière. Quant au facteur d'occupation du sol, comme le montre le tableau 2, la valeur d'indice SI la plus élevée est enregistrée pour la classe caractéristique des périmètres irrigués.

Selon l'équation (4), la somme de tous les coefficients pondérés des paramètres utilisés permet l'élaboration de la carte des risques d'inondations (FFHSI) selon l'approche de l'indice statistique (SI) (figure 4b). Cet indice de sensibilité à l'inondation a été classé en cinq zones sensibles (Feizizadeh et Blaschke, 2013) : très faible, faible, modérée, élevée, et très élevée. L'étendue spatiale de ces classes représente respectivement un pourcentage de 23,3 % 22,2 %, 15,7 %, 25,3% et 13,5 % de la superficie totale du secteur d'étude.

Les cartes résultantes générées par ces deux modèles montrent que le degré de susceptibilité aux inondations a été principalement influencé par le paramètre topographique, la variation des lames d'eau de ruissellement ainsi que les taux d'infiltration. Par ailleurs, les zones à hautes altitudes et à fortes pentes sont rangées dans les classes de susceptibilité à l'inondation faible et très faible.

4.3. Validation

Pour valider les résultats de la susceptibilité aux inondations, il existe de nombreux modèles proposés par différents auteurs (Chung et Fabbri, 2003 ; Tien Bui *et al.*, 2012). Dans cette étude, la méthode de l'aire sous la courbe (AUC) a été utilisée pour évaluer l'efficacité et la fiabilité de deux cartes de susceptibilité aux inondations dérivées des méthodes FR et SI. Elle utilise à la fois les données d'apprentissage et de localisation des inondations passées. En général, la valeur de 100 % représente la plus grande précision, ce qui indique la capacité du modèle de prédiction des aléas naturels (Pradhan et Buchroithner, 2010).

Dans ce travail, l'application de la méthode AUC a permis de calculer les pourcentages de succès et de taux de prévision de chaque modèle.

Figure 5. Diagramme de la fréquence cumulative montrant l'indice de probabilité des inondations (axe-X) et le pourcentage cumulatif des inondations (axe-Y)

À la suite de la validation de la précision, d'aprés la figure 5, les résultats des modèles FR et SI ont montré une précision de 79 % et 71 %, respectivement.

4.4. Évaluation de la vulnérabilité et du risque d'inondation

Dans une region donnée, l'évaluation du risque d'endomagement causé par le phénomène d'inondation est étroitement liée à la vulnérabilité de son terrain et les différents enjeux qui l'occupe (personnes physiques, infrastructures, biens, environnement, etc.). Pour plusieurs auteurs cette vulnérabilité n'a été abordée que du point de vue financier (Blong, 2003 ; Leone, 1996). Ils considèrent que les enjeux peuvent être des personnes, des activités ou des fonctions diverses et que la vulnérabilité s'évalue en quantifiant leur niveau d'endommagement concernant les préjudices corporels, les dommages structurels, les pertes fonctionnelles et le niveau de méconnaissance de l'aléa par les populations.

La vulnérabilité est obtenue en croisant l'intensité des dommages avec les éléments exposés, ainsi pour chaque enjeu, un chiffre compris entre 1 et 5 attribue un taux d'endommagement qui, couplé avec la valeur des éléments exposés permet l'évaluation de la vulnérabilité par un indice de pertes compris entre 0 et 5, 5 étant la valeur maximale d'indice de perte. En général, la valeur 5 a été attribuée à la classe considérée comme

étant la plus vulnérable ; puis les autres valeurs sont attribuées en fonction de leur gravité (Guillard, 2009) (tableau 4).

La carte de vulnérabilité totale (figure 6a) montre que les zones fortement vulnérables sont caractérisées par un coefficient d'endommagement élevé couvrant souvent les domaines urbanisés et les ouvrages hydrauliques (tableau 4).

Le risque est défini comme étant la conjonction spatiale et temporelle d'un aléa naturel caractérisé par sa localisation, son intensité et sa fréquence d'apparition, avec des enjeux vulnérables. La carte du risque (figure 6b) des inondations soudaines dans le bassin versant de l'oued Miliane est le produit de la combinaison entre la carte de susceptibilité résultante du modèle FR avec la carte de répartition de l'indice d'endommagement (figure 6a). Cette carte montre que la partie nord du secteur d'étude

| Tableau 4. | La | répartition | du | coefficient | d'en | dommagemen | t en | fonction | des | enjeux |
|------------|----|-------------|----|-------------|-------|------------|------|----------|-----|--------|
| | | | | ass | ociés | | | | | |

| Coefficient d'endommagement | Degré de vulnerabilité | Enjeux | | |
|--------------------------------|---------------------------|-------------------------|--|--|
| 5 | Trés élevé | Biens, Infrastructures | Dommages énormes | |
| | | Personnes | Un à trois décès | |
| 4 | Élevé | Biens et infrastructure | Dommages importants (pertes partielles) | |
| | | Environnement | Impact important | |
| | | Personne | Blessures graves | |
| 3 | Moyen | Bien et infrastructure | Dommages localisés | |
| | | Environnement | Impact localisé | |
| | | Personne | Blessures mineures | |
| 2 | Faible | Bien et infrastructure | Dommages légers | |
| | | Environnement | Impact mineur | |
| | | Environnement | Pas d'impact ou impact faible | |
| 1 | Trés faible | Personne | Pas de blessés ou blessure légères | |
| | | Bien et infrastructure | Pas de dommage ou dommages légers | |

Figure 6. Carte de vulnérabilité (a), carte du risque (b)

est fortement exposée au risque d'inondation car elle est assez peuplée et comprend un barrage construit sur le cours d'eau principal de l'oued Miliane.

5. Conclusion

Les inondations constituent l'un des phénomènes naturels qui peuvent causer des catastrophes touchant la vie humaine, la dégradation de l'état de sanitaire d'une population, la destruction des moyens d'existence tels que les biens et les services socioéconomiques indispensables pour le bon déroulement de la vie quotidienne d'une société. Ces endommagements se produisent généralement dans des zones particulières d'un bassin versant fortement arrosé par des pluies torrentielles. Dans ce contexte, la réduction du risque de catastrophe (RRC) peut être abordée par l'intégration et le traitement de données multivariables intégrées dans un système d'information géographique (SIG) dont et le cas présenté ici (le bassin versant de l'oued Miliane) constitue un exemple d'application de deux approches : le rapport de fréquence (FR) et l'indice statistique (SI). Les résultats obtenus correspondent à une série de cartes thématiques intégrant le maximum de facteurs pertinents de l'évènement et reflétant les zones les plus vulnérables et susceptibles d'être inondées. Quant à la carte du risque, elle délivre 5,07 % de la superficie du bassin versant de l'oued Miliane fortement menacée par le plus haut degré d'envahissement par les eaux pluviales. Dans cette région à risques élevés, des zones urbaines s'étalent largement telles que les constructions informelles dans le lit de l'oued, les villes d'El Kobaa, Sidi Joumi, El Mourouj, Morneg et la cité Saada, situées dans le secteur aval du bassin versant. Pour protéger ces zones en amont, un plan de prévention du risque d'inondation (PPRI) doit être planifié, et les résultats de ce travail peuvent constituer une partie de la base de données nécessaires.

Bibliographie

- Ahmadi M.A., Pournik M. (2016). A predictive model of chemical flooding for enhanced oil recover purposes : Application of least square support vector machine. *Journal of advancing Research Evolving Science*, vol. 31, n° 5, p. 1473-1487.
- Aziz K., Frang G., Shrestha S. (2014). Application of articial neural networks in regional flood frequency analysis : a case study for Australia. *Journal of Stochastic Environmental Reasearch and Risk Assessment*, vol. 24, n° 3, p. 541-554.
- Bathrelios G., Skilodimou H.D., Karymbalis E., Papanastasiou K.G. (2016). Urban flood hazard assessment in the basin of Athens Metropolitan city, Greece. https://www.researchgate.net/ publication/283010055_Urban_flood_hazard_assessment_in_the_basin_of_Athens_Metropolitan_city_Greece.
- Beven K.J., Kirkby M.J. (1979). Aphysically based variable contributing area model of basin hydrology. *Journal of Hydrological Sciences Bulletin*, vol. 24, n° 1, p. 43-69.
- Blong R. (2003). A New Damage Index. Journal of Natural Hazards, vol. 30, nº 1, p. 1-23.
- Botzen W.J.W., Aerts J.C.C.H., Van den Bergh J.C.J.M. (2013). Individual preferences for reducing flood risk to near zero through elevation. *Journal of Mitigation and adaptation Strategies for Global Change*, vol. 18, n° 2, p. 229-244.
- Cécile S.M., Paule Davoine, Marlène V.O. (2015). Cartographie des ionndations historiques majeurs superposées sur un territoire. http://www.lecfc.fr/new/articles/226-article12.pdf. (2017). https://www.researchgate.net/publication/291425164_Identification_of_flash_flood_ hazard_zones_in_mountainous_small_watershed_of_Aceh_Besar_Regency_Aceh_Province_Indonesia.
- Chapi K., Singh V.P., Shirzadi A., Shahabi H., Bui D.T., Pham B.T., Khasravi K. (2017). Anovel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment. *Journal of Environmental Modelling & Software*, vol. 95, p. 229-245.
- Chung C.J.F., Fabbri A.G. (2003). Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. *Journal of Natural Hazards*, vol. 30, n° 3, p. 451-472.
- Dewan A., Yamaguchi Y. (2008). Effect of land cover changes on flooding : Exemple from Greater Dhaka of Bangladesh. *International Journal of Geoinformatics*, vol. 4, n° 1, p. 11-20.
- Feizizadeh B., Blaschke T. (2013). GIS-multicriteria decision analysis for landslide susceptibility mapping: Comparing three methods for the Urmia lake basin, Iran. *Journal of Natural Hazards*, vol. 65, n° 3, p. 2105-2128.
- Guillard C. (2009). Mémoire en « Evaluation et cartographie du risque glissement de terrain d'une zone située au nord de Lisbonne. École des Mines de Saint-Étienne.
- Harun N.A., Makhtar M., Zakaria ZA., Abdullah F.S., Jusaoh J.A. (2017). The application of Apriori in Predicting Flood Areas. *International Journal on advanced Science Engineering Information Technology*, vol. 7, nº 3, p. 763-769.
- Jebur M.N., Pradhan B., Therany M.S. (2015). Optimization of landslides conditioning factors using very hugh_resolution airborne laser scaning (lidar) data at catchement scale. *IEEE*

Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 8, n° 2, p. 674-690.

- Kazakis N., Kougias L., Patsialis T. (2015). Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based and analytical hierarchy process: Application in Rhodope-Evros region, Greece. *Journal of Science of the total Environment*, vol. 538, p. 555-563.
- Laxton J.L. (1996). Areview of : « Geographic Information Systems for Geoscientists-Modelling with GIS ». *International Journal of Geographic Information Systemes*, vol. 10, n° 3, p. 355-356.
- Lee S., Lee M. (2017). Susceptibility mapping of Umyeonsan using logistic regression (LR) model and post-validation through field investigation. *Journal of Remote Sensing*, n° 33, p. 1047-1060.
- Leone F. (1996). Thèse en Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain. Orléans, Université Joseph Fourier, Grenoble I.
- Mbaye E.A. (2009). *Etude de protection contre les inondations des zones Nord et Est du Grand Tunis*, mai.
- Mojaddadi H., Pradhan B., Nampak H., Ahmad N., Ghazali A.H. (2017). Ensemble machinelearning-based geospatial approach for flood risk assessment using multi-sensor remote-sensing data and GIS. *Journal of Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 8, n^o 2, p. 1080-1102.
- Ozetekin O., Topal T. (2005). GIS-based detachment susceptibility analyses of a cut slope in limestone, Ankara, Turkey. *Journal of Environmental Geology*, vol. 49, n° 1, p. 124-132.
- Pourghasemi H.R., Pradhan B., Gokceoglu C. (2012). Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Journal of Natural Hazards*, vol. 63, n^o 2, p. 1-32.
- Pradhan B. (2009). Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing. *Journal of Spatial Hydrology*, vol. 9, n° 2, p. 1-18.
- Pradhan B., Buchroithner M. (2010). Comparison and Validation of Landslide Susceptibility Maps Using an Artificial Neural Network Model for Three Test Areas in Malaysia. *Journal of Environmental and Engineering Geoscience*, vol. 16, n° 2, p. 107-126.
- Rahmati O., Pourghasemi H.R. (2017). Identification of Critical Flood Prone areas in Data-Scarce and Ungauged Regions: A Comparison of Three Data Mining Models. *Journal of Water Resources Management*, vol. 32, n° 5, p. 1473-1487.
- Regmi N.R., Vitek J.D. (2010). Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach : Western Colorado, USA. *Journal of Geomorphology*, vol. 115, n° 1-2, p. 172-187.
- Sadiki A., Bouhlassa S., Auajjar J. (2004). Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab. *Bulletin de l'institut scientifique*, n° 26, p. 69-79.

- Tehrany M.S., Pradhan B., Jebur M.N. (2015). Flood susceptibility analysis and its verification using a novel ensemble support vector machine and frequency ratio method. *Journal of Stochastic Environmental Research Assessment*, vol. 29, n° 4, p. 1149-1165.
- Tien Bui D., Pradhan B., Lofman O., Revhaug I., Dick O.B. (2012). Landslide susceptibility mapping at Hoa Binh province (Vietnam) using an adaptive neuro- o-fuzzy inference system and GIS. *Journal of Computers & Geosciences*, vol. 45, p. 199-211.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning. *Science and Education Administration*, U.S.A, department of Agriculture.
- Wu Y.L., Li W.P., Wang Q.Q., Liu Q.Q., Yang D.D., Xing M.L., Pei Y.B., Yan S.S. (2016). Landslide susceptibility assessment using frequency ratio, statistical index and certainty factor models for the Gangu County, China. *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 9, n° 84.
- Youssef A.M., Pradhan B., Sefry S.A. (2015). Flash flood susceptibility assessment in Jeddah City (Kingdom of Saudi Arabia) using bivariate and multivariate statistical models. https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12665-015-4830-8.