



HAL
open science

Hydroclimatologie des zones urbaines dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid : approche intégrée du risque inondation

Wafa Nasrallah

► To cite this version:

Wafa Nasrallah. Hydroclimatologie des zones urbaines dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid : approche intégrée du risque inondation. Géographie. Université Paul Valéry - Montpellier III; Université de Tunis (1958-1988), 2019. Français. NNT : 2019MON30071 . tel-02939307

HAL Id: tel-02939307

<https://theses.hal.science/tel-02939307>

Submitted on 15 Sep 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

Pour obtenir le grade de
Docteur

Délivré par

UNIVERSITE DE TUNIS

Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis

Et

UNIVERSITE MONTPELLIER – PAUL-VALÉRY

Arts et Lettres, Langues et Sciences Humaines et Sociales

Spécialité :

**GEOGRAPHIE ET AMENAGEMENT DE L'ESPACE /
SCIENCES GEOGRAPHIQUES**

**Hydroclimatologie des zones urbaines dans
les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid:
Approche intégrée du risque inondation**

Présentée par **Wafa NASRALLAH**

Soutenue le 20/12/2019 devant le jury composé de

Taoufik EL MELKI, Professeur, Université de la Manouba

Habib BEN BOUBAKER, Professeur, Université de la Manouba

Freddy VINET, Professeur, Université Paul Valéry Montpellier 3

Salem DAHECH, Professeur, Université Paris Diderot

Noômène FEHRI, Maître de conférences – HDR, Université de la Manouba

Frédéric LEONE, Professeur, Université Paul Valéry Montpellier 3

Président

Directeur de thèse

Directeur de thèse

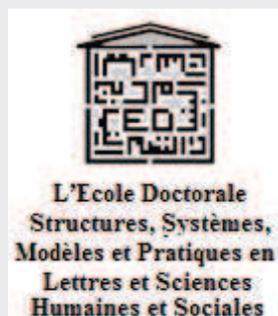
Rapporteur

Rapporteur

Examinateur



Avec le soutien des structures de recherche



Remerciements

Si cette thèse a pu voir le jour, c'est grâce au soutien de nombreuses personnes que je tiens à remercier vivement. Je tiens tout d'abord à témoigner ma reconnaissance à mes directeurs de thèse Messieurs Habib Ben Boubaker et Freddy Vinet qui m'ont fait le grand honneur d'accepter de diriger mes travaux de thèse. Je les remercie pour tout le temps qu'ils m'ont consacré, pour leurs multiples relectures et leurs précieuses corrections. J'adresse mes vifs remerciements aux membres du jury pour avoir bien voulu évaluer ce travail. Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à M. Noômène Fehri pour son suivi et pour son énorme soutien. Je le remercie ainsi que Hayet Hmercha d'avoir accepté de m'accompagner sur terrain. Mes remerciements vont à tous les membres et les doctorants de l'UMR GRED que j'ai contactés durant mes séjours à Montpellier, auprès desquels j'ai trouvé l'aide et l'assistance dont j'avais besoin. Je cite en particulier Mme Monique, M. Frédéric, Adrien, Stéphanie, Taher et Oumeïma. Je tiens également à exprimer toute ma gratitude à Mme Samia Miossec pour son soutien et à Mme Sylvie Deveze pour ses conseils sur la bibliographie et sur le logiciel Zotero. Mes remerciements vont également à mes professeurs du département de Géographie à la Manouba ainsi qu'aux membres du laboratoire BiCADE.

Cette thèse a nécessité l'obtention de nombreuses données et je voudrais ici remercier toutes les personnes qui m'ont permis d'y avoir accès. Je pense particulièrement à M. Taoufik El Melki qui m'a fourni les données de radiosondages et M. Mohsen Latrech de m'avoir aidé à les analyser. Je dois aussi beaucoup d'estime à Mme Naïma Azaïz et Messieurs Zouhaier Hlaoui, Hammoda Samaâli, Jalel Dallel et Abderrahmen Abdelkhalek qui m'ont donné leurs conseils et leurs documentations. C'est aussi l'occasion de remercier toutes les personnes avec qui j'ai pu échanger et grâce à qui ma réflexion s'est enrichie. Je voudrais remercier plus particulièrement Mme Latifa Hénia, M. Amor Gammar et M. Jean Marie Miossec. J'en profite pour remercier M. Mohamed Saleh Khasskhoussi de la municipalité de Sidi Bouzid et messieurs Lotfi Yazid et Abdelatif Ouni de la D.H.U de Kairouan pour leur aide et leur collaboration.

Je ne laisserai pas cette occasion passer sans remercier la famille Dutartre, Roger et Mado, qui ont accepté de m'héberger chez eux. Je les remercie pour leur accueil chaleureux et leur gentillesse. Je remercie mes proches et ma famille surtout mes parents pour leur soutien moral, leurs encouragements ainsi que leur patience. Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes amis, qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de cette thèse : Sonia, Malek, Nesrine, Marwa, Chokri, Mouna, Cyrine, Fathi, Dalel, Chiraz, Hamdi, Marwen, Ali...

Merci à toutes et à tous

Sommaire

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Première partie : Données, méthodes, cadre géo-climatique et humain.....	12
---	-----------

Introduction.....	13
--------------------------	-----------

Chapitre 1 : Données et méthodes d'investigation.....	14
--	-----------

Chapitre 2 : Cadre géographique et hydrologique.....	24
---	-----------

Chapitre 3 : Caractéristiques climatiques.....	56
---	-----------

Chapitre 4 : Caractéristiques anthropiques : Une hydrologie fortement affectée par l'Homme.....	72
--	-----------

Conclusion.....	86
------------------------	-----------

Deuxième partie : Aléa hydro-climatique et susceptibilité des terrains au risque inondation.....	87
---	-----------

Introduction.....	88
--------------------------	-----------

Chapitre 5 : Pluies extrêmes et risque d'inondation dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid.....	89
---	-----------

Chapitre 6 : Historique des crues extrêmes et des inondations dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid.....	98
---	-----------

Chapitre 7 : Cartographie de la susceptibilité des terrains à l'inondation dans le bassin versant Septentrional de la plaine de Kairouan et le bassin versant de l'oued El Fekka.....	141
--	------------

Conclusion.....	155
------------------------	------------

Troisième partie : Le risque inondation dans les villes de Kairouan et Sidi Bouzid : Cartographie, gestion et moyens de lutte.....	156
---	------------

Introduction.....	157
--------------------------	------------

Chapitre 8 : Cartographie du risque inondation à Macro – échelle : À l'échelle des villes de Kairouan et Sidi Bouzid.....	158
--	------------

Chapitre 9 : Diagnostic du risque inondation à Micro – échelle : Application sur les quartiers Mansourah Nord à Kairouan et Ouled Chelbi à Sidi Bouzid.....	224
--	------------

Chapitre 10 : La gestion du risque inondation.....	262
---	------------

Conclusion.....	271
------------------------	------------

Conclusion générale.....	273
---------------------------------	------------

Bibliographie.....	275
---------------------------	------------

Webographie.....	282
-------------------------	------------

Liste des figures.....	283
-------------------------------	------------

Liste des tableaux.....	290
--------------------------------	------------

Liste des photos.....	296
------------------------------	------------

Annexes.....	298
---------------------	------------

Table des matières.....	303
--------------------------------	------------

Liste des abréviations

A.I.C : Critère d'Information d'Akaike
B.I.C : Bayésian Information Criterion
B.I.R.H : Bureau de l'Inventaire et des Ressources Hydrauliques
B.V : Bassin Versant
Ccm : Convectif, convergent, maritime
C.E.S : Conservation des Eaux et des Sols
C.N : Curve Number
C.N.T : Centre National de la Télédétection
C.O.S : Coefficient d'Occupation du Sol
C.R.D.A : Commissariat Régional du Développement Agricole
D.G.A.C.T.A : Direction Générale d'Aménagement et de Conservation des Terres Agricoles
D.G.A.T : Direction Générale de l'Aménagement du Territoire
D.G.P.C : Direction Générale des Ponts et Chaussées
D.G.R.E : Direction Générale des Ressources en Eau
D.H.U : Direction de l'Hydraulique Urbaine
D.P.C : Degré de Propagation des Crues
D.P.S : Degré de Protection des Sols
D.R.E.H : Direction Régionale de l'Équipement et de l'Habitat
E.P.Ex : Évènement Pluvieux Extrême
E.T.P : Evapotranspiration Potentielle
G.E.V : Valeur-Extrême Généralisée
G.I.Z : Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
I.D.F : Intensités, Durées et Fréquences
I.G.N : Institut Géographique National
I.N.M : Institut National de la Météorologie
I.N.S : Institut National de Statistique
M.A.E : Ministère des Affaires Étrangères
M.A.E.R.H : Ministère de l'Agriculture de l'Environnement et des Ressources Hydrauliques
M.A.M.R.O.T : Ministère des Affaires Municipales, des Régions et de l'Occupation du Territoire
M.D.D.E.F.P : Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs
M.E.H.A.T : Ministère de l'Équipement de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire
M.N.T : Modèle Numérique du Terrain
N.R.C.S : Natural Resources Conservation Service
O.M.M : Organisation Météorologique Mondiale
O.N.A.S : l'Office National d'Assainissement
O.S.M : Open Street Map
O.T.C : Office de la Topographie et de la Cartographie
P.A.I : Plan Annuel d'Investissement
P.A.U : Plan d'Aménagement Urbain
P.N.U.D : Programme des Nations Unies pour le Développement
P.P.R.I : Plan de Prévention de Risque Inondation
R.G.P.H : Recensement Général de la Population et de l'Habitat
S.C.S : Soil Conservation Service
S.D.A : Schéma Directeur d'Aménagement
S.I.G : Système d'Informations Géographiques
S.R.T.M : Shuttle Radar Topography Mission
S.T.I : Susceptibilité des Terrains au risque Inondation

Introduction générale



Sidi Bouzid – Inondations Janvier 1990

Source : *La Presse de la Tunisie* (Dimanche 28 Janvier 1990)

① Problématiques

En Tunisie, dans le contexte du changement climatique attendu, les résultats d'une étude réalisée par le M.A.E. et la G.I.Z., (2011), ont montré que : Dans les prochaines décennies (aux horizons 2030 et 2050), les villes tunisiennes seront menacées par la multiplicité des phénomènes extrêmes (y compris les phénomènes des inondations). Situées au centre de la Tunisie les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid, sont fortement concernées par ce risque. En effet, la Tunisie centrale a connu tout au long du XX^{ème} siècle des phénomènes hydroclimatiques aux conséquences parfois tragiques. Citons par exemple les inondations des années: 1902, 1932, 1958, 1969, 1973, 1982 et 1990. Lors des inondations de l'automne 1969, le nombre de décès dans la Tunisie centrale est estimé à 542 morts, (Fig.1). Mais malgré leurs sites propices aux inondations, ces deux villes ne cessent de s'étendre sur des secteurs déjà inondés en 1969 et les territoires sont devenus plus vulnérables à ce risque. Ceci est dû à la confiance senti par la population envers l'ensemble des aménagements hydrauliques qui ont été construits suite à la catastrophe de 1969 (Les deux barrages de Sidi Sâad sur Oued Zroud en 1982 et El Houareb sur Oued Marguellil en 1990 pour la protection de la ville de Kairouan, la digue autour de la ville de Sidi Bouzid...). Cette recherche s'inscrit dans le domaine de l'hydro-climatologie urbaine. Ceci, en combinant trois approches : hydrologique, climatique et urbaine.

② Définitions des concepts

En effet, pour bien aborder la question, des notions fondamentales sont à éclaircir, à savoir:

* **L'urbanisation** : *« est ce processus complexe de développement quantitatif (multiplication, croissance, extension...) et qualitatif (forme, mécanismes, transformation...) des villes »*. Outre, c'est la concentration de la population dans l'espace urbain tout en gagnant sur l'espace rural, ce qui peut engendrer des transformations au niveau de l'espace, de la société... (Belhedi, 1993).

* **La climatologie urbaine** : On entend souvent par climatologie urbaine l'influence du milieu urbain sur son climat. Il est à signaler que, les climatologues se sont toujours intéressés à évoquer la notion de « **l'îlot de chaleur** », puisqu'il représente le symptôme climatique le plus célèbre de la climatologie urbaine. Pourtant, la pluviométrie peut être aussi perturbée. En outre, la présence d'une agglomération peut engendrer : *« une modification du régime des pluies. En effet, par temps stable, comme en hiver, l'urbanisation aurait plutôt tendance à réduire les précipitations alors que lors du passage de masses d'air instable, comme en été, l'agglomération jouerait plutôt le rôle d'un catalyseur »*. (Colombert et al., 2006).

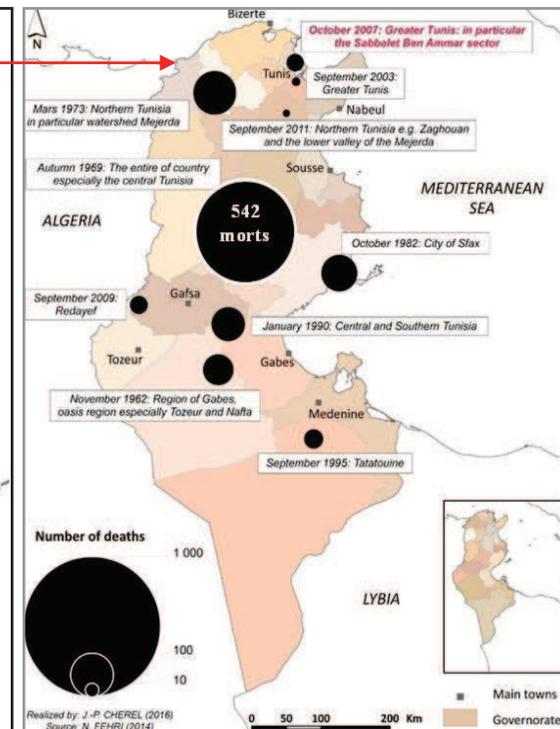
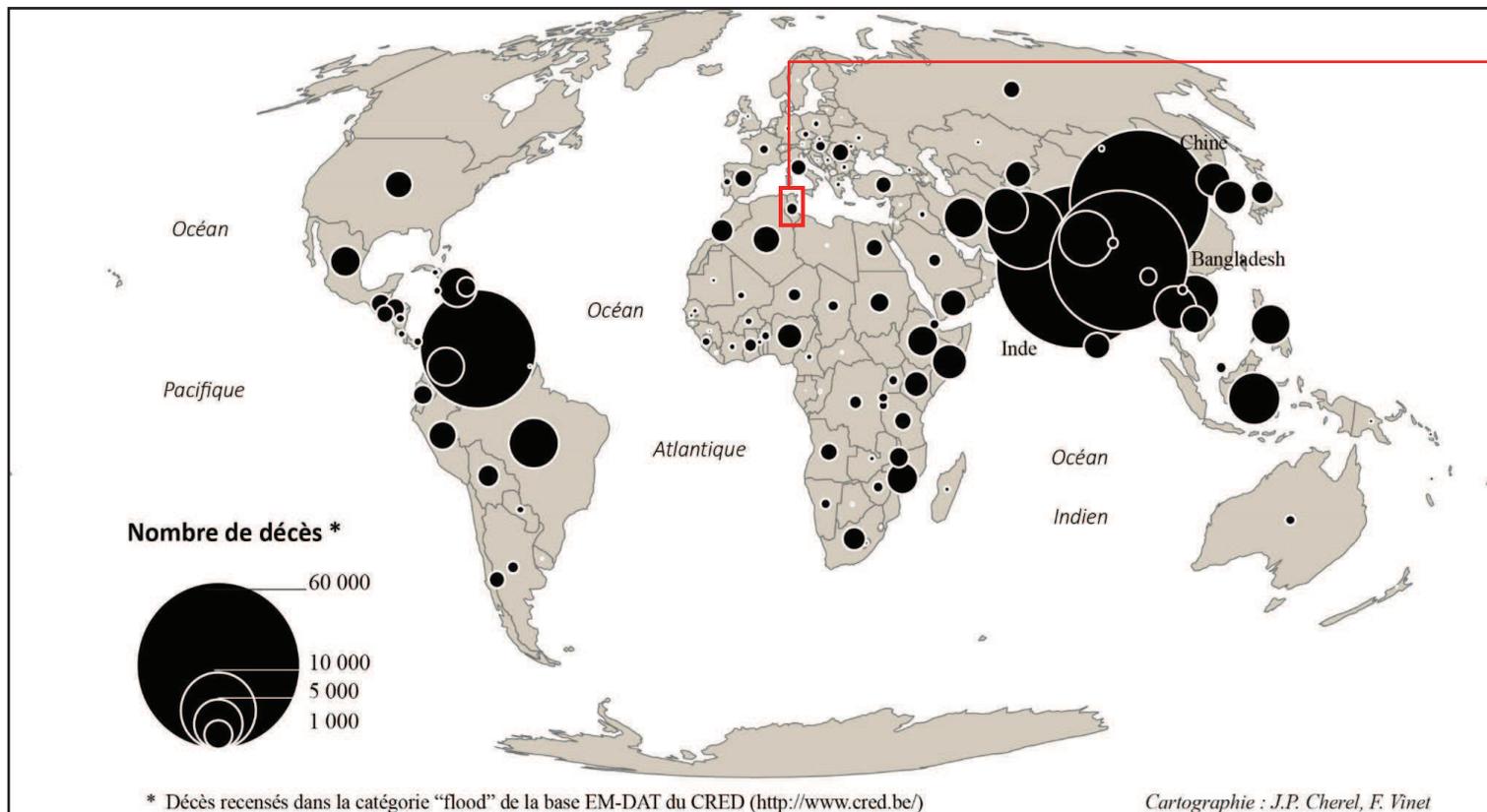


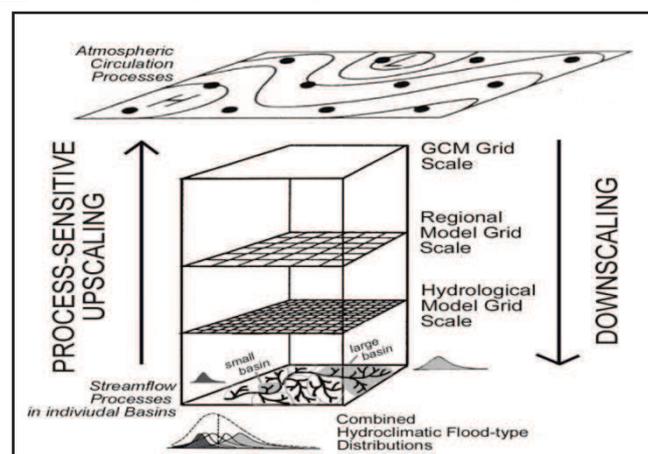
Figure 1 : Les décès liés aux inondations dans la Tunisie (1962 - 2011). (Vinet et al., 2016).

* **L'hydrométéorologie** : « est l'application de la météorologie aux problèmes impliquant le cycle hydrologique, l'équilibre de l'eau et les statistiques de précipitations, de tempêtes... ». (Shelton, 2008). Elle se caractérise par une échelle de temps courte, une échelle spatiale locale ou régionale et par des prévisions et des avertissements en temps réel. (Hirschboeck, 2007).

* **L'hydrologie urbaine** : Selon le dictionnaire de l'environnement l'hydrologie urbaine est la « branche de l'hydrologie s'intéressant à la partie du cycle de l'eau affectée par l'urbanisation ou affectant le fonctionnement de la ville ». Belhadj, (2005), a signalé qu'il est difficile de distinguer entre l'hydrologie urbaine et l'hydrologie rurale à cause du développement récent des zones périurbaines et le changement des modes de vie. De ce fait, l'hydrologie urbaine aura tendance à évoluer vers d'autres sciences comme celles d'hydrologie humaine, ou d'hydrologie des milieux fortement anthropisés... Il affirme aussi que « l'hydrologie urbaine doit donc être restituée dans une perspective historique de la gestion urbaine de l'eau d'abord et de l'assainissement ensuite ».

* **L'hydroclimatologie** : a été définie par Langbein, (1967) comme « l'étude de l'influence du climat sur les eaux de la terre ». Il comprend l'hydrométéorologie ainsi que les processus d'évaporation, ruissellement, recharge des eaux souterraines et les eaux superficielles et l'interception près de la surface. Le cycle hydrologique total, est alors la base pour une discussion de l'hydroclimatologie, (Wendland, 1998). Elle se caractérise par une perspective saisonnière ou à long terme, des scénarios météorologiques causatifs d'inondation spécifiques au site et à la synthèse régionale. Elle se base aussi sur les liens régionaux et les différences identifiées, ce qui permet de connaître l'histoire des inondations et par conséquent avoir des repères pour des événements futurs, (Hirschboeck, 2007). En outre, l'hydroclimatologie fournit une structure systématique pour analyser comment le système climatique provoque les variations temporelles et spatiales (à la fois globales et locales) dans le cycle hydrologique. En fait, les changements dans la relation entre le système climatique et le cycle hydrologique sont à la base des inondations, de la sécheresse et des influences futures possibles du réchauffement climatique sur les ressources en eau, (Shelton, 2008). En bref, l'hydroclimatologie est le passage de la variabilité du climat à l'échelle globale aux variations hydrologiques à l'échelle locale (à l'échelle du bassin versant), (Fig.2).

Figure 2: Schéma simplifié du phénomène d'hydroclimatologie



Source : (Hirschboeck, 1988)

* L'hydroclimatologie des inondations

L'hydroclimatologie des inondations est définie selon Hirschboeck,(1988) comme étant : « *L'analyse des crues dans le cadre de leur histoire de variation en amplitude, fréquence et saisonnalité sur une période de temps relativement longue ainsi que dans le cadre spatial du changement des combinaisons causées par des mécanismes météorologiques* ».

En outre, il assure que pour les inondations, les changements climatiques peuvent être conceptualisés comme des régimes de circulation atmosphérique variant dans le temps qui génèrent une probabilité des distributions du débit variable au fil du temps (Fig.3).

Figure 3: Les mécanismes causatifs des inondations

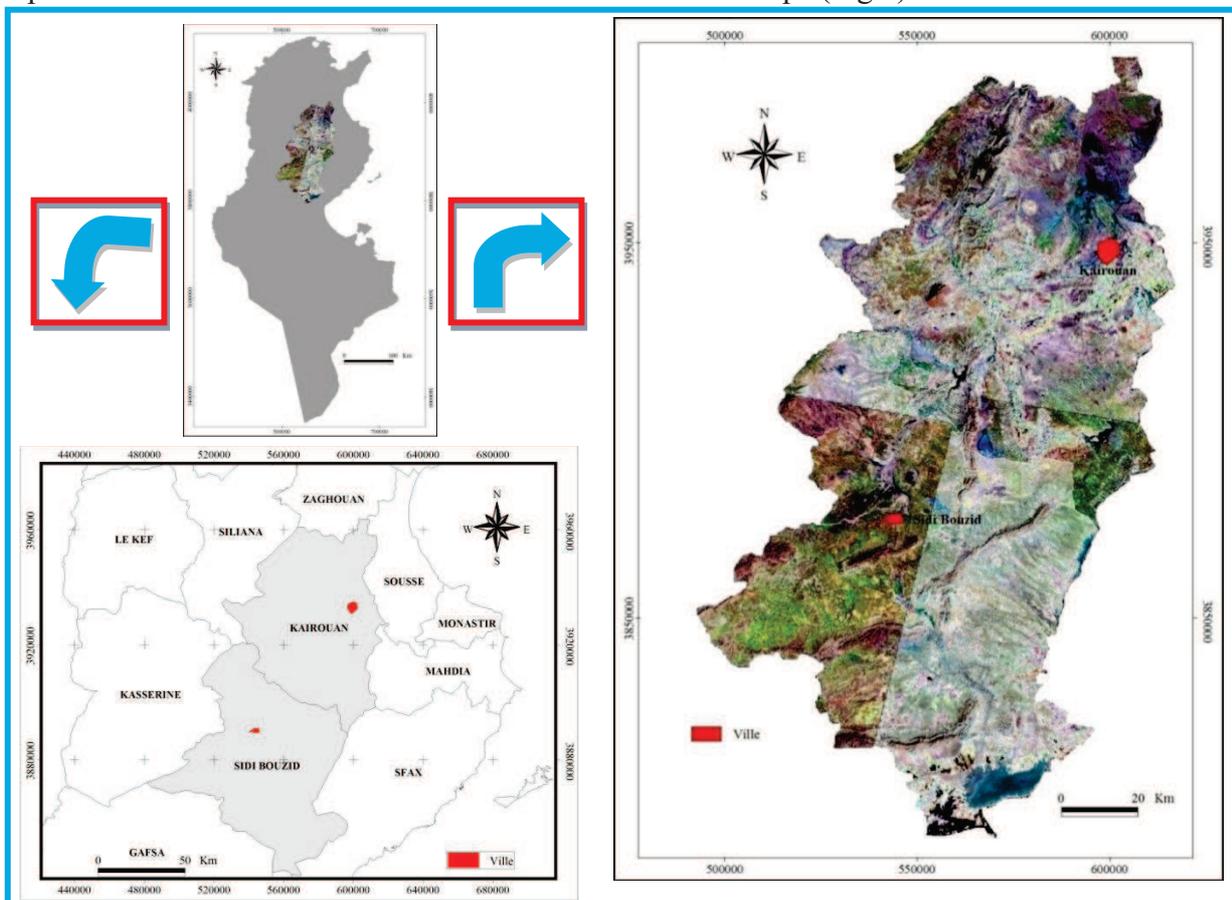
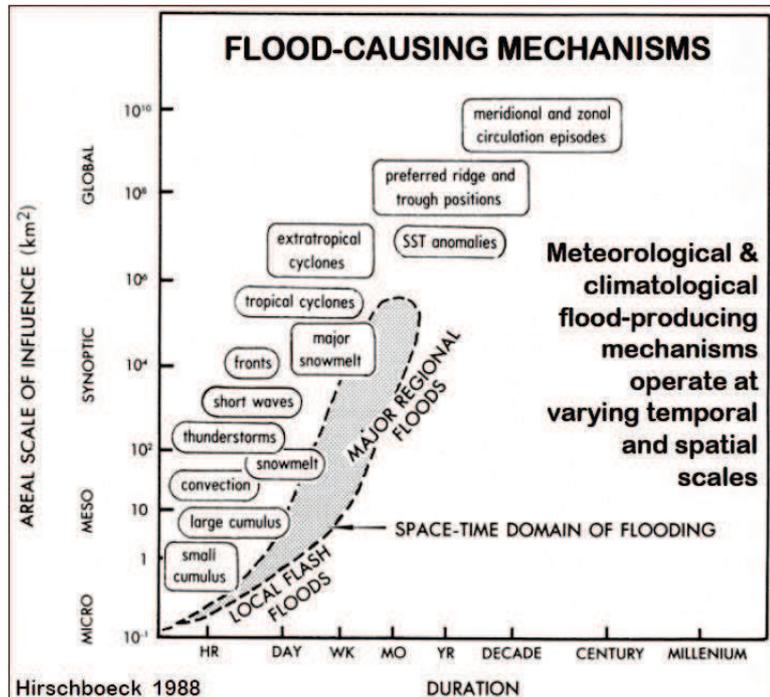


Figure 4 : Carte de localisation des villes de Kairouan et Sidi Bouzid

Dans ce travail, on s'intéressera à l'étude du phénomène inondation dans les principales villes intérieures de la Tunisie centrale. Il s'agit de Kairouan et Sidi Bouzid (Fig. 4), qui sont considérées d'après Hénia, (2008) comme étant des villes majoritairement inondables.

③ Choix de la zone d'étude

En fait, le choix de ces deux villes est dû essentiellement à l'originalité de leurs sites du point de vue topo-hydrographique, caractéristiques climatiques et urbaines.

Du point de vue **topo-hydrographique**, Kairouan et Sidi Bouzid sont deux agglomérations développées sur des plaines traversées par des cours d'eau faiblement encaissés, notamment, les oueds Zeroud et Marguellil. Ces derniers, font partie d'un système hydrographique caractérisé par son **endoréisme**, puisqu'ils trouvent leur exutoire dans Sebkhath El Kelbia (Fig.5).

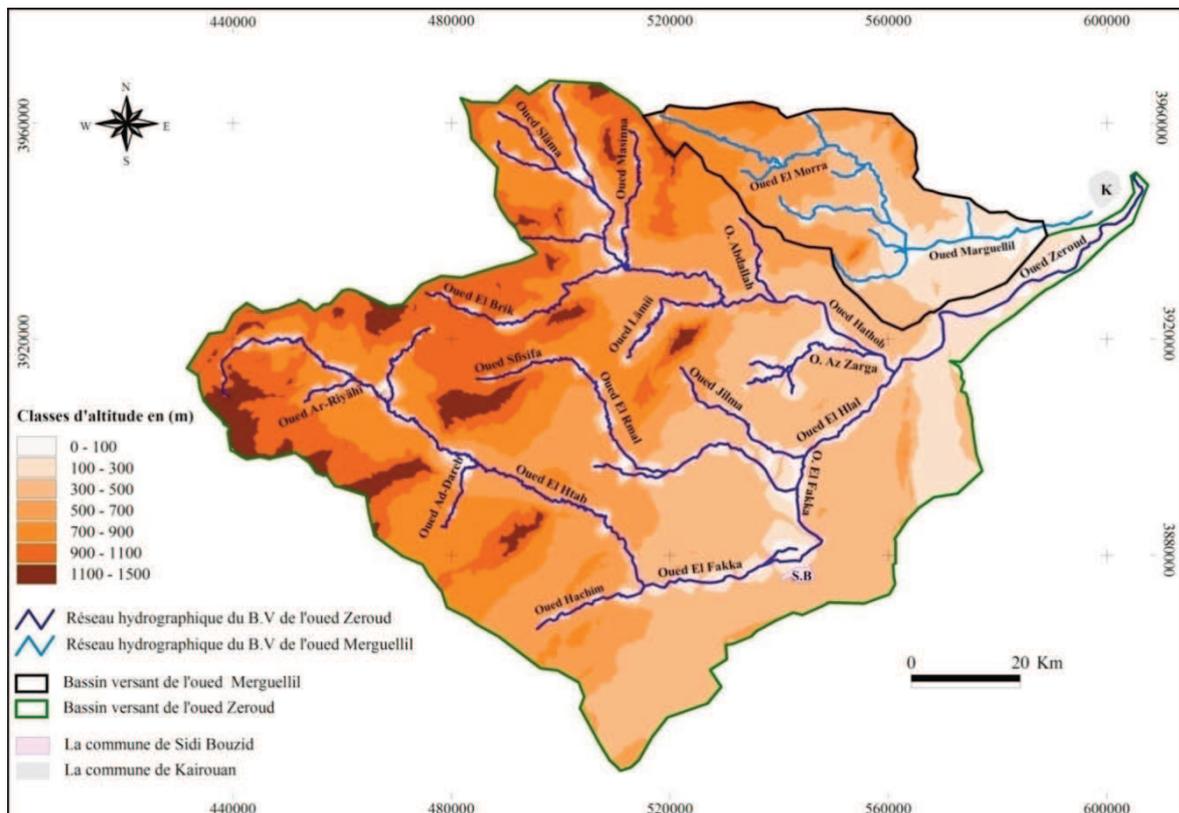


Figure 5 : Carte hydro-topographique des bassins versants des oueds Zeroud et Marguellil (**Source :** Feuilles topographiques (Sousa, Makthar, Al Gasrin, Gafsa et Al Maknasi) aux 1/200000)).

Mais, Despois, (1955) affirme qu' «*On pourrait aussi parler d'un **exoréisme accidentel** au sujet de l'immense bassin de 15.280 km² dont les crues arrivent au lac Kelbia par le Nebhana, le Marguellil, le Zeroud...il arrive, trois à quatre fois par siècle peut-être, qu'à la suite de pluies exceptionnelles le lac Kelbia déborde et que son déversoir, l'oued Mennfess, le mette en communication avec la mer pour quelques jours et quelques semaines...*», (Fig. 6).

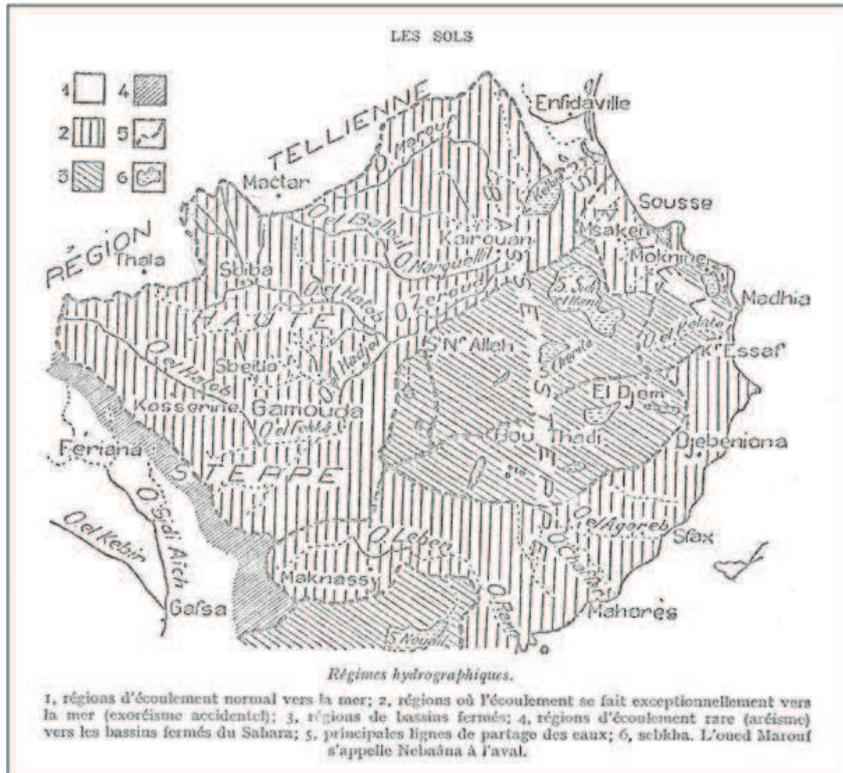


Figure 6 : Régimes hydrologiques des bassins versants des oueds de Zeroud et de Marguellil. **Source:** (Despois, 1955).

L'aspect commun à ces deux villes, c'est qu'elles appartiennent à **un climat continental**, typique de la Tunisie centrale.

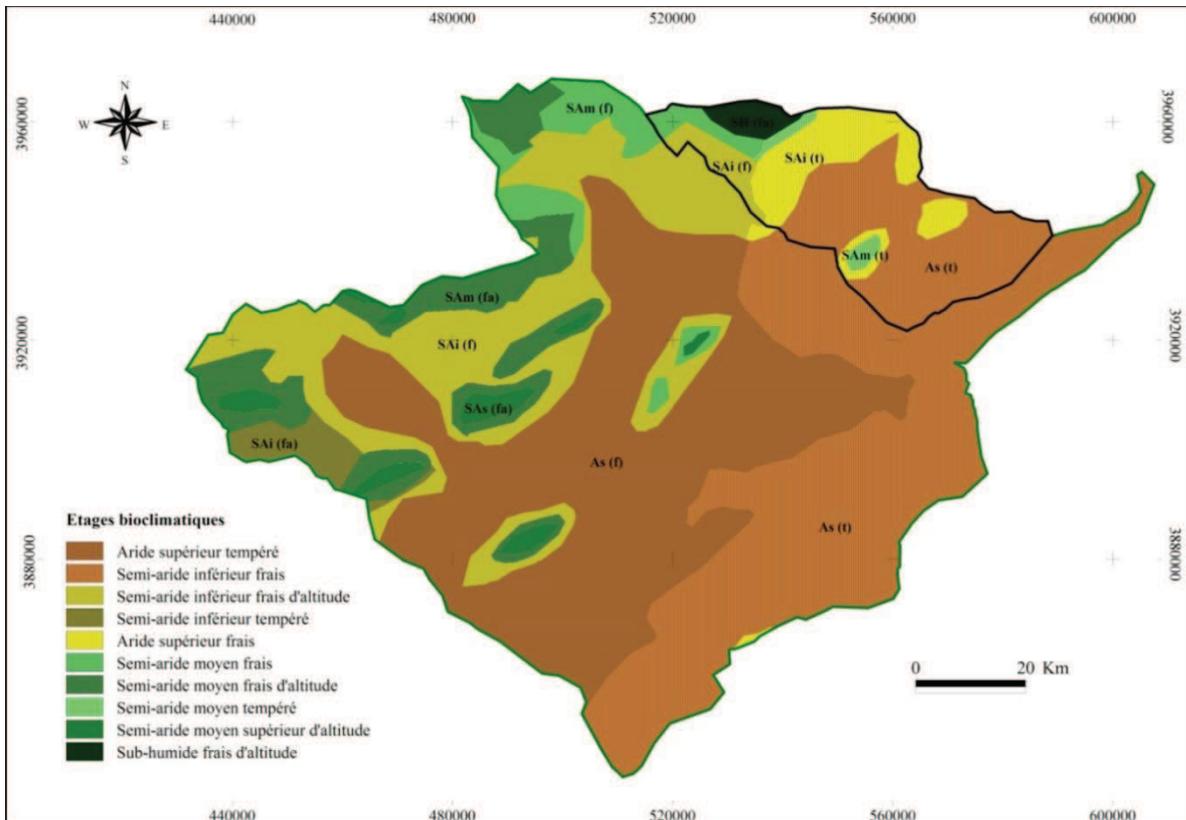


Figure 7 : Carte bioclimatique des bassins versants des oueds de Zeroud et de Marguellil (**Source :** Feuilles topographiques (Sousa, Makthar, Al Gasrin, Gafsa et Al Maknasi) aux 1/200000)).

En effet, cette dernière se caractérise par :

* Une nuance **semi-aride** (Fig. 7). Elle est limitée au nord par la Dorsale et au sud par la chaîne de Gafsa. Elle appartient à la région des Steppes (Hautes et Basses), qui « *marquent la transition entre les régions du Nord du pays, aux conditions quasiment telliennes et le Sud franchement désertique* », (Ben Boubaker, 2000).

*L'importance des pluies des intersaisons ainsi que des saisons chaudes (en dehors de l'hiver) et la fréquence des événements pluviométriques extrêmes, généralement liés à des situations du retour d'est.

En outre, ces averses déterminées par des « **Retours d'Est** » : Sont souvent très prolongées dans le temps et se caractérisent par des totaux pluviométriques quotidiens très élevés et une très forte intensité, (El Melki, 2008).

④ Etat de la question

Il est à signaler que nombreuses sont les études qui ont traité le problème des inondations en Tunisie : **Des études climatiques**, comme celles de :Kassab, (1979), Bousnina, (1981),Bousnina et Oueslati, (1990), Hénia, (1993), Jguirim, (1999), Ben Boubaker, (2000), Helaoui, (2005) et Dallel, (2009).

D'autres travaux se sont aussi intéressés à **l'étude des inondations en milieu urbain** comme celles de Fehri et al., (2007), Chouari (2009), Fehri et al., (2009), Mejebri, (2010), Fehri, (2011, 2012, 2013 et 2014), Nasrallah, (2013) et Hmercha, (2016). D'autres études ont été effectuées sur une partie de la zone d'étude comme celle de Hmercha, (2010) intitulée : « Les risques hydrologiques dans le bassin versant d'oued El Fakka : Essai de caractérisation et d'analyse pour une meilleure gestion », ou même sur la Tunisie centrale citant essentiellement l'étude de Ben Romdhane, (1993) qui a pour but la contribution à l'élaboration d'un schéma directeur de maîtrise des eaux des crues dans le Centre et le Sud Tunisien.

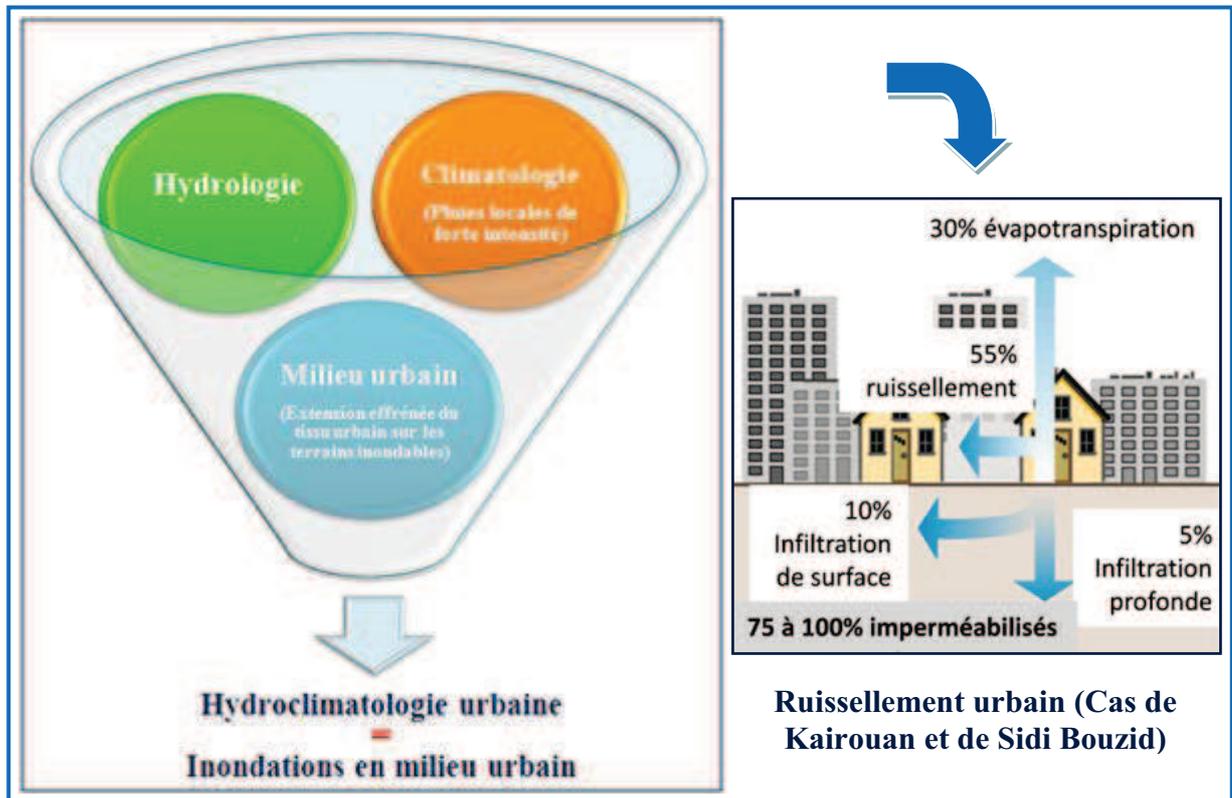
En réalité, rares sont les études qui prennent en compte les trois aspects (climatiques, hydrologiques et urbains) pour cartographier le risque inondation. Ceci donne une originalité à ce sujet. Mais d'un autre côté nous met face à un certain nombre de questions en particulier : Quels paramètres doit-on utiliser pour aboutir à une carte hydro-climatique des inondations pour les principales villes intérieures de la Tunisie centrale ? Et comment doit-on les gérer ?

⑤ Les objectifs de la recherche

L'objectif ultime de ce projet est la réalisation d'une carte de risque inondation, afin d'orienter les décideurs vers le bon choix des aménagements qui serviront à minimiser les dégâts de ce risque. Ceci en tenant compte des différents paramètres figurant dans le schéma ci-dessous, (Fig.8), et permettant la cartographie du risque d'inondation par **ruissellement**

urbain dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid. Cette cartographie intégrera à la fois les facteurs anthropiques et climatiques. En fait, pour assurer une bonne gestion de ce risque, sa cartographie se fera à plusieurs échelles : À l'échelle de toute la ville et même à l'échelle du quartier...

Figure 8: Schéma simplifié des paramètres intégrés pour la cartographie du risque inondation



⑥ Démarche méthodologique

La méthodologie de la thèse consiste à traiter la problématique des inondations dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid. Ceci, en se basant sur une gamme variée de données collectées auprès des institutions spécialisées (Cartes, données bibliographiques, documents d'archives...) ainsi qu'à partir des enquêtes de terrain.

L'intégration de la base de données fournie dans un système d'informations géographiques (S.I.G), nous permet de combiner divers types de facteurs et/ou indicateurs liés aux aléas, enjeux, vulnérabilité et capacité d'adaptation. Le résultat de la combinaison, facilite l'évaluation et la cartographie du risque inondation à différentes échelles (Fig.9).

⑦ Structuration de la thèse

Le plan du travail s'articulera donc autour de **trois grandes parties** :

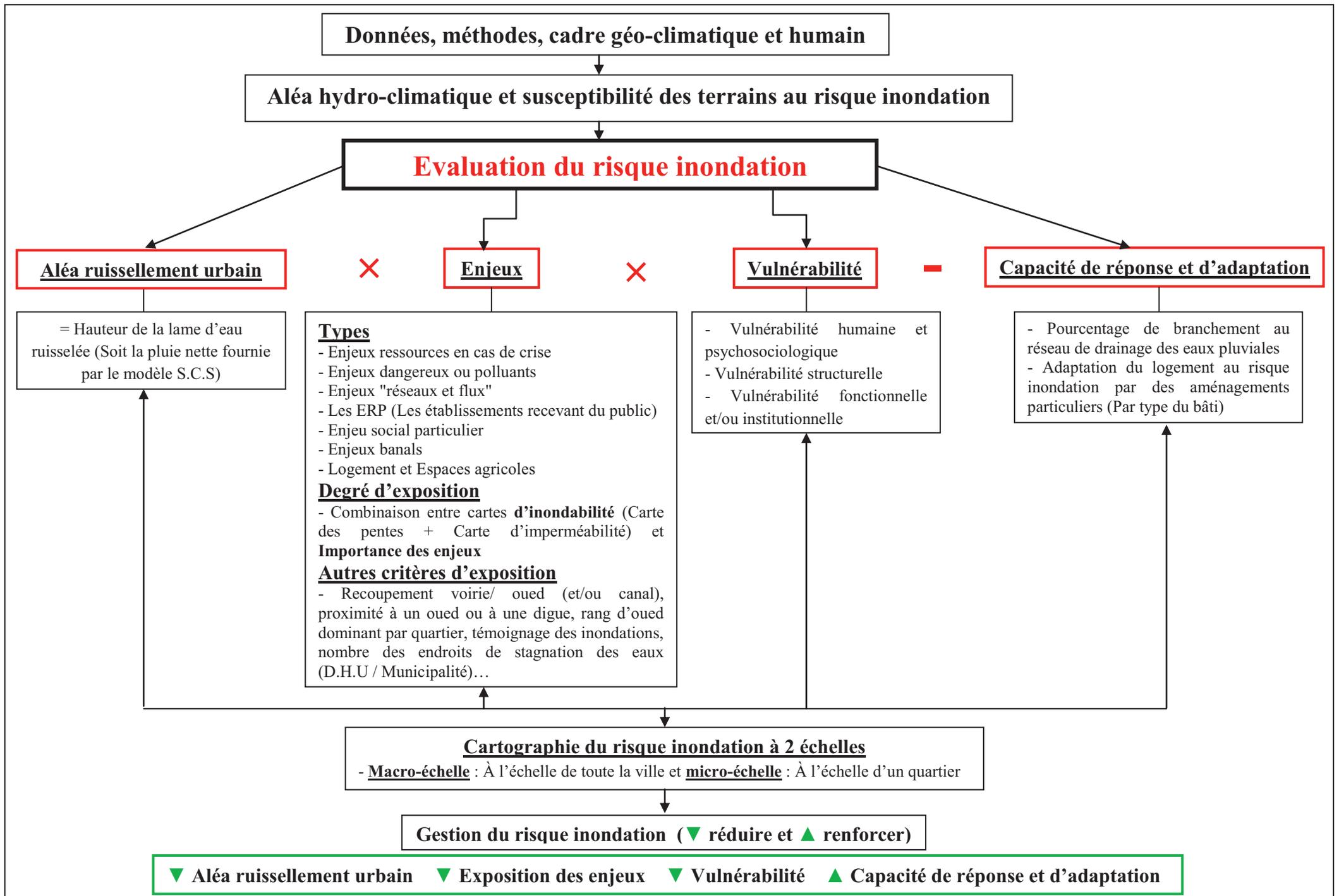


Figure 9:Diagramme méthodologique

La première partie de cette thèse est composée de quatre chapitres qui s'intéressent respectivement à : préciser les divers types et sources des données ainsi que les méthodes d'investigation utilisées, décrire le cadre géographique et hydrologique, déterminer les caractéristiques climatiques des deux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid et démontrer le rôle primordial de l'être humain dans l'aggravation du risque inondation.

La deuxième partie étudie l'aléa hydro-climatique et la susceptibilité des terrains étudiés au risque d'inondation. Elle est formée de trois chapitres qui étudient: les pluies extrêmes et le risque inondation dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid, les crues extrêmes et l'historique des inondations ainsi que la cartographie de la susceptibilité des terrains à l'inondation dans le bassin versant Septentrional de la plaine de Kairouan et le bassin versant de l'oued El Fekka.

La troisième partie est divisée en trois chapitres qui sont destinés à : Cartographier le risque à l'échelle des villes de Kairouan et de Sidi Bouzid, diagnostiquer le risque inondation à micro – échelle au niveau des quartiers Mansourah Nord à Kairouan et Ouled Chelbi à Sidi Bouzid et enfin à citer les différents moyens de gestion du risque inondation.

Première partie

Données, méthodes, cadre géo-climatique et humain

« Le climat est l'ensemble des éléments dynamiques soumis à des fluctuations naturelles et à des altérations d'origine anthropique qui donnent à un site donné son individualité ». (Sakiss, 1994).



Kairouan – Inondations 29 Septembre 2015 (Près des bassins aghlabides)

Source : <https://web.facebook.com/PageKAIROUAN/>

Introduction

Les inondations sont considérées parmi les risques hydroclimatiques, dont l'ampleur des dégâts ne cesse d'augmenter surtout en zone urbanisée. Les facteurs d'aggravation de ce fléau diffèrent d'une ville à l'autre. Ceci, est étroitement lié aux différences des caractéristiques climatiques, du cadre géographique et hydrologique ainsi qu'aux modes d'occupation humaine du territoire.

Situées au Centre de la Tunisie les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid, sont fortement concernées par ce risque. Historiquement, ces deux villes ont souffert des crues mémorables de l'automne 1969 et de janvier 1990 qui ont causé des dégâts humains et matériels considérables.

La première partie de cette thèse vise à fournir des éléments de contexte. Elle est composée de quatre chapitres à travers lesquels nous essaierons :

- De préciser les divers types et sources des données ainsi que les multiples méthodes d'investigation utilisées.

- De décrire le cadre géographique et hydrologique. Ceci, afin de:

- ↳ Connaître les différents paramètres topographiques favorables à l'expansion des terrains inondables en étudiant trois agents à savoir : le site (y compris l'historique des villes de Kairouan et de Sidi Bouzid), l'hypsométrie et la clinographie.

- ↳ Préciser les caractéristiques hydrologiques à travers une description minutieuse des oueds affectant le terrain étudié, une analyse de la variabilité, la répartition et la fréquence des débits...

- ↳ L'étude du potentiel d'écoulement superficiel ainsi que les différents types d'occupation des sols.

- De déterminer les caractéristiques climatiques favorisant l'amplification des risques inondations dans les deux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid. Il s'agit d'étudier les facteurs aérologiques et géographiques, la pluviométrie avec ses différents critères (variabilité, répartition, fréquence et intensité...). On mettra aussi le point sur autres agents météorologiques tels que: la température, le vent, l'évaporation, l'humidité relative et l'insolation.

- Et enfin, de démontrer le rôle primordial de l'être humain dans l'aggravation du risque inondation.

Chapitre 1

Données et méthodes d'investigation

1-1- Données

1-1-1- Données climatiques (pluviométriques): Sources et qualité

La Tunisie centrale se caractérise par la modestie de son relief. Ceci ne peut qu'engendrer une variation spatiale négligeable de la pluviométrie. De ce fait, même avec un réseau de postes de mesures de faible densité, on peut étudier la pluviométrie de cette région. Kairouan et Sidi Bouzid se caractérisent par des stations à la fois mal réparties, de nombre limité et qui donnent des séries de données non précis et lacunaires (Fig.1.1).

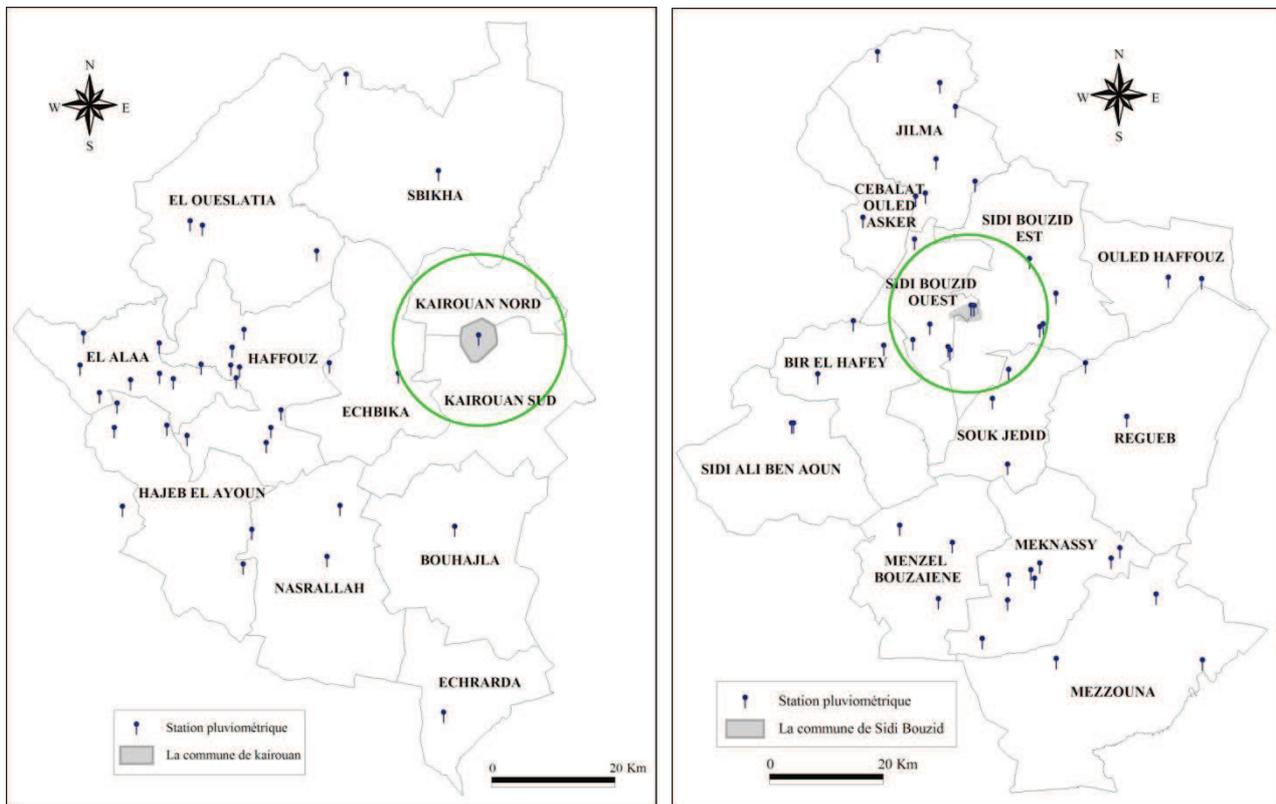


Figure 1.1 : Les stations pluviométriques dans les gouvernorats de Kairouan (à gauche) et de Sidi Bouzid (à droite). (Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, Source *des données brutes* : Cartes agricoles de Kairouan et Sidi Bouzid, Ministère de l'Agriculture, année 2000).

Pour l'étude de la pluviométrie dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid, nous sommes basés sur deux séries de pluies quotidiennes mesurées à la station synoptique de Kairouan (SM) entre 1959 et 2013 et à la station de Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971 et 2014 et qui ont été gracieusement mises à notre disposition par la Direction Générale des Ressources en Eau (D.G.R.E), (Tableau.1.1).

Tableau.1.1. Caractéristiques des stations et caractéristiques des séries des totaux annuels

Station	Coordonnées			Observations		Statistiques							
	Latit.	Long.	Alt. (m)	Période	Nbre. années	Moy	Max	Min	Ecart		CV (%)	95°	99°
						(mm)			Type	Absolu		p (mm)	
Kairouan (SM)	35°40'49 "	7°45'48"	55	1959-2013	54	301,7	634	152,4	106,1	481,6	35,17	27,23	50,19
Sidi Bouzid Ferme 20	34°59'53 "	7°4'34"	376	1971-2014	43	294,8	529,5	110,2	114,8	419,3	38,95	26,9	51,58

(Source des données brutes : D.G.R.E).

En fait, il s'agit des seules stations, représentatives des villes de Kairouan et de Sidi Bouzid, qui enregistrent des données pluviométriques continues, non lacunaires et avec des périodes d'observation importantes de 54 ans et 43 ans (en considérant l'année agricole).

Pour s'assurer que les données pluviométriques des stations de Kairouan SM et Sidi Bouzid Ferme 20 correspondent bien aux précipitations tombées sur les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid. On s'est basé sur les normes de l'Organisation Météorologique Mondiale (1981), cités dans l'ouvrage « **Hydrologie, cheminements de l'eau** » de Anctil, Rousselle, et Lauzon, (2012), qui montre que:

↳ La densité minimale des réseaux de stations pluviométriques en zone plane est comprise entre 600 et 900 km²/station.

↳ Le rayon des cercles dont le centre représente la station est donc de 14 à 17 km.

On remarque sur la figure 1.2 que les stations de Kairouan SM et Sidi Bouzid Ferme 20 sont situées dans les cercles (R=14 Km), on peut donc utiliser leurs données pluviométriques. Des données d'autres stations ne fourniront pas de meilleurs résultats.

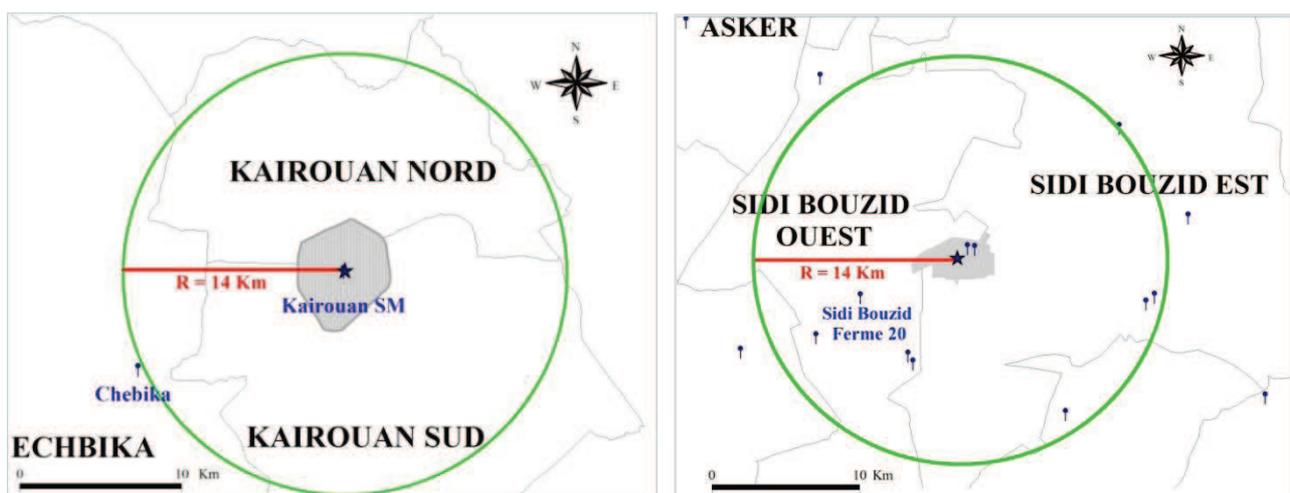


Figure 1.2 : Représentation schématique de la densité des pluviomètres. (Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, Source des données brutes : Cartes agricoles de Kairouan et Sidi Bouzid, Ministère de l'Agriculture, année 2000).

Nous avons eu recours à des données pluviométriques des stations environnantes, notamment celles qui se trouvent à l'amont des bassins versants auxquels appartiennent les deux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid : il s'agit précisément des stations de Haffouz et de

Khanguet Zazia. Ceci, en se basant sur les rapports d' « **Optimisation des réseaux de suivi des ressources en eau : Etude de la pluviographie** » réalisées par la Direction Générale des Ressources en Eau (D.G.R.E), ce qui nous permet d'avoir une idée sur les intensités, les durées et les fréquences des pluies en se référant aux données des courbes **IDF**. L'usage d'autres stations qui sont bien réparties sur l'ensemble du gouvernorat est également utile pour l'étude de la répartition spatiale de la pluviométrie pour un événement donné. Pour cette étude, nous avons utilisé les stations pluviométriques du gouvernorat de Kairouan essentiellement celles de : Barrage Nebhana, Sbikha, Ousseltia forêt, Ousseltia INRAT, Haffouz SM, Kairoaun SM, Barrage Sidi Saâd et Bouhajla, et ce pour représenter deux événements pluvieux récents ceux de : 05 au 07 octobre 2013 et de 29 au 30 septembre 2015. Les données pluviométriques utilisées pour la spatialisation de ces deux événements sont fournies par l'I.N.M (Institut National de la Météorologie) pour la station de Kairouan SM et par la D.G.R.E (Direction Générale des Ressources en Eau) pour le reste des stations.

1-1-2- Données hydrologiques : Sources et qualité

La Tunisie se caractérise par un nombre limité des stations hydrométriques qui sont mal réparties sur l'ensemble du pays. La majorité de ces stations sont localisées au Nord de la Tunisie couvrant l'oued Medjerda et ses affluents. Le Centre de la Tunisie, souffre d'une insuffisance de ce type de stations. L'Organisation Météorologique Mondiale (**O.M.M**), donne des indications détaillées sur la mise en place d'un réseau minimal qui sont bien présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1.2. Normes pour un réseau minimal d'enregistrement de précipitations et d'écoulement

Code et Région	Station pluviométrique		Station
	Pluviomètre km ² /station	Pluviographe km ² /station	hydrométrique km ² /station
A: Régions plates			
↳ Méditerranéennes :	600 - 900	9.000	1.000 - 2.500
↳ Dans des conditions difficiles :	900 - 3.000	5.075	3.000 - 10.000
B: Régions montagneuses			
↳ Méditerranéennes:	100 - 250	2.050	300 - 1.000
↳ Dans des conditions difficiles :	250 - 1.000	5.075	1.000 -5.000 jusqu'à : 10.000
C: Petites îles montagneuses avec réseau hydrographique étroit et précipitations très variables	25	250	140 - 300
D: Zones arides, sans compter les déserts	1.500 - 10.000	100.000	5.000 - 20.000

Sources: [OMM] in (S.T.U.D.I, G.I.Z et M.E.D.D, 2013)

La norme d'un réseau dans une région plate méditerranéenne est entre **1000 et 2500 Km²/station hydrométrique** : soit un rayon de cercle dont le centre représente la station qui varie entre **18 et 28 Km**.

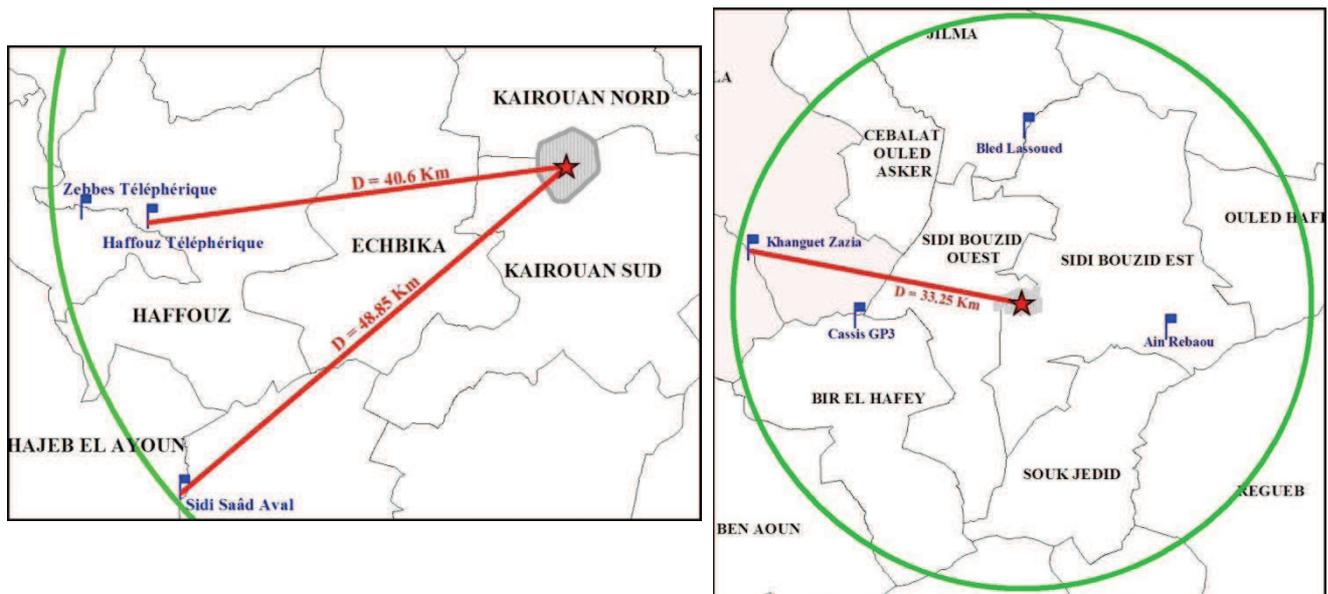


Figure 1.3 : Représentation schématique de la distance entre les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid et les stations hydrométriques. (Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, Source *des données brutes* : Cartes agricoles de Kairouan et Sidi Bouzid, Ministère de l’Agriculture, année 2000).

À Kairouan les stations hydrométriques utilisées dans cette étude, celles de Haffouz Téléphérique et Sidi Saâd Aval, sont respectivement distants de la ville de l’ordre de **40,6** et **48,85 Km**. Pour la ville de Sidi Bouzid, la station choisie est celle de Khanguet Zazia qui appartient géographiquement parlant au gouvernorat de Kasserine qui est loin du centre-ville de Sidi Bouzid d’environ **33,25 Km** (Fig.1.3).

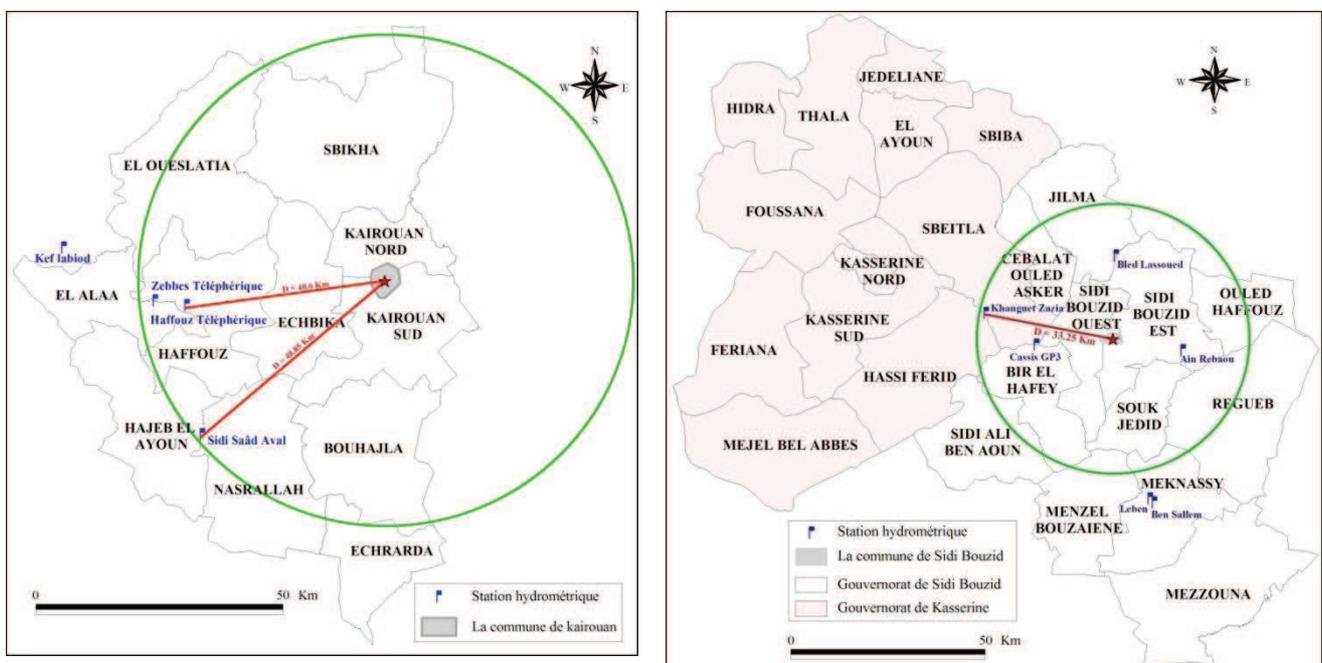


Figure 1.4 : Les stations hydrométriques dans les gouvernorats de Kairouan (à gauche) et de Sidi Bouzid (à droite). (Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, Source *des données brutes* : Cartes agricoles de Kairouan et Sidi Bouzid, Ministère de l’agriculture, année 2000)

Malgré le non représentativité spatiale de ces stations par rapport aux deux villes, on les a utilisées vu qu’elles sont les seules stations fonctionnelles les plus proches des villes de

Kairouan et de Sidi Bouzid et qui représentent des séries de données non lacunaires avec des durées d'observations assez longues. Ces stations sont situées sur l'oued Marguellil pour la station de Haffouz Téléphérique, l'oued Zeroud pour celle de Sidi Saâd Aval et sur l'oued El Hatab (dont le nom devient oued El Fekka lors de sa confluence avec l'oued El Hachim), pour la station de Khanguet Zazia.

Tableau 1.3. Situation des stations et caractéristiques des séries des totaux annuels

Station	Coordonnées			Observations			Statistiques							
	Latit.	Long.	Alt. (m)	Mise en service	Période	Nbre. années	Moy	Max	Min	Ecart		CV (%)	95°	99°
							(m ³ /s)			Type	Absolu		Débit (m ³ /s)	
Haffouz Téléphérique	35°37'48"	7°19'12"	270	1966	1991-2011	20	0,59	1,42	0,15	0,38	1,27	64,41	2,25	13,95
Sidi Saâd Aval	35°23'24"	7°21'11"	250	1949	1956-1978	22	6,91	85,31	1	17,6	84,31	254,7	8,3	55,4
Khanguet Zazia	35°05'24"	6°47'03"	502	1953	1957-2009	52	1,41	10,17	0,4	1,43	9,77	101,42	2,81	23,8

(Source des données brutes : D.G.R.E).

Les données hydrométriques utilisées, ont été gracieusement mises à notre disposition par la Direction Générale des Ressources en Eau (D.G.R.E), (Tableau.3). Il s'agit des séries de débits journaliers avec des périodes d'observation remarquables de 20, 22 et 52 ans (en considérant l'année agricole). Les données des débits maximums journaliers et instantanés sont extraites des annuaires Hydrologiques réalisés par le service d'hydrologie au sein de cette même direction. Un effort considérable a été également consacré au dépouillement des données d'archives de la D.G.R.E notamment les rapports descriptifs des caractéristiques des plus grandes crues de la Tunisie Centrale ainsi que les données de la Presse tirées de l'archive national pour extraire les principaux dégâts causés par ces crues.

1-1-3- Données socioéconomiques:

Ce type de données est indispensable dans cette étude. Il nous permet d'affiner la classification des enjeux en les hiérarchisant en fonction de leur importance stratégique ainsi que d'évaluer les principaux facteurs anthropiques menant à l'aggravation du risque inondation dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid. Ces données proviennent de deux sources :

- **Les rapports** de Recensement Général de la Population et de l'Habitat (R.G.P.H) réalisés par l'Institut National de la Statistique notamment celles des années : 1984-1994-2004-2014, les plans annuels d'investissement (P.A.I) et les règlements de l'urbanisme des communes de Kairouan et de Sidi Bouzid collectés auprès des municipalités.



Photo 1.1 : Entretien auprès d'un habitant du quartier « El Mansourah Nord » à Kairouan : le 27-03-2018.

- **Des observations directes sur terrain et des enquêtes qualitatives** : entretiens semi-directifs auprès des responsables (au sein des directions d'hydraulique urbaine et des municipalités) et des citoyens des quartiers qualifiés les plus vulnérables au risque inondation (quartier « Ouled Chelbi » à Sidi Bouzid et « El Mansourah Nord » à Kairouan).

1-1-4- Données cartographiques :

Dans ce travail, nous nous sommes basés sur une gamme variée de données cartographiques de divers types :

- **Analogiques** (Sous format raster), il s'agit:

* **Des plans d'aménagements urbains** de la commune de Sidi Bouzid à l'échelle 1/2000 et de celle de Kairouan à l'échelle 1/5000 datant respectivement de 2002 et 2010. Ceci, afin de déterminer d'une manière plus précise les différents types d'occupation, puisqu'ils possèdent une grande échelle et une légende assez détaillée. Ces plans, qui sont des documents prospectifs à long terme, ont subi une actualisation en se basant sur des extraits « **Google Earth** » à très haute résolution spatiale de 2014 pour la commune de Sidi Bouzid et 2015 pour la commune de Kairouan.

* **Des cartes topographiques**: aux 1/50000 et 1/200000. Ce type de documents cartographiques nous facilite la délimitation des bassins versants de la zone d'étude ainsi que la détermination des réseaux hydrographiques, des courbes de niveau et des types d'occupation des sols. Il s'agit, essentiellement de :

- Six coupures topographiques à l'échelle **1/50000** publiées par l'Office de la Topographie et de la Cartographie (O.T.C) en 1923, couvrant le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan. Il s'agit des feuilles topographiques de Sabkhet El Kalbia, Paviller, Oued Chrita, Kairouan, Sidi El Hani et Ain Djaloula.

- Le bassin versant de l'oued El Fekka est à cheval sur six coupures topographiques au **1/50000**, celles de : Sidi Bouzid, Sbitla, Jbal Bou Dinar, Jbal Al Kbar, Fayid et Bir Al Hfay. Dans cette étude on a utilisé la nouvelle version des feuilles topographiques au 1/50000. Elles ont été réalisées dans le cadre de la coopération technique entre les gouvernements tunisien et japonais et publiées par l'Office de la Topographie et de la Cartographie (O.T.C) en 1993.

- Cinq feuilles topographiques au **1/200000** couvrant les bassins versants des oueds de Zeroud et de Marguellil. Ce sont celles de : Sousa, Makthar, Al Gasrin, Gafsa et Al Maknasi. Ces cartes sont dressées à l'aide des itinéraires et des levés à vue et exécutés par le service géographique de l'armée de 1881 à 1887.

* **Des photographies aériennes** : Ces photos permettent : une étude de l'extension aussi bien à l'échelle spatiale que temporelle ainsi que cartographier la trajectoire de la partie sud de l'oued El Fekka, la plus proche de la ville de Sidi Bouzid, avant et après les inondations de 1990. Dans cette étude, nous disposons de trois couvertures aériennes:

- Les ortho-photos mission 2000 (I.G.N), couvrant la totalité de la ville de Kairouan, qui sont déjà traitées par le Centre National de la Télédétection « C.N.T » : Mosaïquage, géoréférencement et orthorectification.

- Les couvertures aériennes de 1986 et 1999 de l'Office de la Topographie et de la Cartographie (O.T.C) à l'échelle 1/50000 couvrant la totalité de la ville de Sidi Bouzid ainsi que la partie Sud de l'oued El Fekka. Ces couvertures aériennes, ont subi un stretching pour améliorer la qualité visuelle et ont été mosaïquées et géoréférencées.

* **Des images SRTM 1 Arc-Second Global (Shuttle Radar Topography Mission):** Ce sont des images à 30 m de résolution téléchargées via le site web : <https://earthexplorer.usgs.gov/> . Ces images nous facilitent la réalisation des modèles numériques de terrain ainsi que les cartes des pentes qui y sont dérivées.

* **Des plans des villes :** Il s'agit des anciens plans des villes qui sont extraites des schémas directeurs d'aménagement (S.D.A) des agglomérations de Kairouan datant de 1930 et de Sidi Bouzid datant des années 1934, 1955 et 1972. Ces plans servent à une étude diachronique de l'extension de la nappe urbaine dans les deux villes précédemment citées.

- **Numériques** (Sous format vecteur): Les données utilisées ont été recueillies à partir de différentes sources dont nous citons:

* **Les cartes agricoles (de Kairouan, Sidi Bouzid, Sousse et Kasserine):** Il s'agit d'une base des données cartographiques se rapportant aux fonds de cartes numérisées aux échelles 1/50000 et collectées auprès du Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques. Elles sont élaborées dans les années 2000 sur la base d'interprétation d'images satellites et des enquêtes de terrain. Les principales couches vectorielles extraites de ces cartes agricoles et qui peuvent servir dans cette étude sont celles de : l'occupation des sols (pour une analyse multi-dates), la pédologie (pour déterminer les différents groupes hydrologiques des sols), les travaux de conservation des eaux et des sols (C.E.S) ainsi que le réseau des stations pluviométriques et hydrométriques.

* **La base de données géographique libre du projet international « Open Street Map » (O.S.M) fondé en 2004:** Il s'agit des données cartographiques vectorielles variées sous format (.shp) librement accessibles et utilisables, téléchargées via le site web : <http://openstreetmap.org/>. Dans cette thèse nous avons utilisé seulement la couche vectorielle des routes. Cette dernière, nous permet de calculer le nombre des impasses par quartier. Ce facteur est considéré parmi les critères indispensables pour estimer la vulnérabilité et de l'exposition à l'échelle du quartier.

1-2- Méthodes d'investigation

1-2-1- Méthodes d'analyse climatique

Dans cette étude, nous avons opté pour cinq méthodes d'analyse et ce afin de déterminer les pluies intenses et extrêmes, les pluies génératrices des inondations, les types des événements pluvieux, les événements pluvieux extrêmes et l'analyse des situations météorologiques. Cette dernière méthode d'analyse est effectuée essentiellement pour l'étude des caractéristiques des événements pluvieux exceptionnels qui ont causé les inondations les plus mémorables dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid. Ceci, en se basant sur deux types de données :

✓ **Les images infrarouges du Meteo 60** (<http://archives.meteo60.fr/archives-bracknell.php>), qui servent à suivre la trajectoire des nuages et à savoir à quelle heure la masse nuageuse couvre la zone étudiée.

✓ **Les cartes des situations atmosphériques** en surface et en altitude, téléchargées à partir du site web : <http://www.meteociel.com>.

Les autres méthodes d'analyse climatique seront traitées en détails dans la deuxième partie de la thèse.

1-2-2- Méthodes d'analyse hydrologique

L'analyse hydrologique s'articule autour de deux principales méthodes, à savoir la détermination des crues intenses et extrêmes et la détermination des coefficients de ruissellement via le modèle S.C.S.

1-2-2-1- La détermination des crues intenses et extrêmes

Comme pour la détermination des pluies extrêmes, il s'agit de calculer successivement les jours dont le total des débits est supérieur aux 95^e et 99^e percentiles.

Tableau 1.4. Seuils des débits intenses et extrêmes pour les villes de Kairouan aux stations de Sidi Saâd Aval (1956-1978) et Haffouz Téléphérique (1991-2011) et Sidi Bouzid à la station de Khanguet Zazia (1957-2009)

Station	Coordonnées			Observations			Débit (m3/s)	
	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Mise en service	Période	Nombre années	Q. intense	Q. extrême
							95 ^e	99 ^e
Haffouz Téléphérique	35°37'48"	7°19'12"	270	1966	1991-2011	20	2,25	13,95
Sidi Saâd Aval	35°23'24"	7°21'11"	250	1949	1956-1978	22	8,3	55,4
Khanguet Zazia	35°05'24"	6°47'03"	502	1953	1957-2009	52	2,81	23,8

(Source des données brutes : D.G.R.E).

1-2-2-2- La détermination des coefficients de ruissellement via le modèle S.C.S : « Soil Conservation Service of U.S.A »

La méthodologie de la répartition spatiale des coefficients de ruissellement dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid, en utilisant le modèle « S.C.S » est bien traitée dans la troisième partie de la thèse.

1-2-3- Méthodes d'analyse cartographique

1-2-3-1- La cartographie des cartes thématiques et de synthèse

Dans ce travail, deux types de cartes sont réalisées:

* **Les cartes thématiques:** Il s'agit de la cartographie d'une thématique précise à travers :

- La reproduction des fonds repères : Comme les cartes topographiques, les plans d'aménagements urbains... L'exemple de la carte d'extension du tissu urbain.

- Le traitement des données tabulaires : Ceci, en utilisant notamment la variable valeur où chaque couleur représente une seule donnée. L'exemple de la carte d'occupation des sols.

* **Les cartes de synthèse:** Ce sont les résultats de combinaisons de diverses couches vectorielles intégrées dans un système d'informations géographiques (S.I.G), selon une méthodologie bien définie. Le but, est de mettre en valeur les traits dominants du phénomène étudié : L'exemple des cartes de degré de propagation des crues, de susceptibilité... Ce type de cartes est représenté souvent selon des classes d'égales amplitudes variant de très faible à très fort.

1-2-3-2- La cartographie du risque inondation

1-2-3-2-1-Problème de délimitation de la zone d'étude

L'étude du risque inondation se fait généralement dans un cadre géographique étendu qui est l'échelle du bassin versant. Dans cette étude, nous essayons d'affiner l'échelle en s'intéressant seulement aux « **zones urbaines dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid** », comme c'est indiqué dans l'intitulé de la thèse. Nous avons trouvé un vrai problème au début de ma recherche pour définir le concept ville et de délimiter son aire d'extension. Plusieurs questions se posent : **Qu'est ce qu'une ville ? Dois-je intégrer les habitations situées au-delà de la limite communale ?...** J'ai demandé l'avis de plusieurs spécialistes dans le domaine d'aménagement urbain mais les réponses ont été diversifiées. La définition du concept « **ville** » proposé par Belhedi, (2000), qui est un professeur Tunisien en géographie humaine et un grand spécialiste en la matière m'a beaucoup servi.

Selon Belhedi, (2000), « *La ville est une entité fort complexe qui répond à la fois à une réalité numérique, fonctionnelle, symbolique, socio-économique, culturelle et politique* ».

Il affirme que pour assurer une bonne définition du concept « **ville** » nombreux sont les critères à adopter. En effet, d'après Belhedi, (1993), une ville peut être définie comme étant :

- **Une entité politique :** Puisque « *en Tunisie, la ville découle d'un acte administratif pur, elle est créée par décret au même titre que la délimitation et l'extension de son périmètre, soumis par ailleurs à des modifications constantes* ».

- **Un centre fonctionnel :** En fait, la ville est à la fois un centre de services diversifiés, un lieu central qui se caractérise par la réduction de l'activité agricole et la dominance des activités modernes (l'industrie et les services).

- **Un seuil démographique :** On nomme ville tout espace abritant 25000 habitants et plus. Il a distingué les seuils primaires suivants :

↪ **70 - 80 hab :** *Correspond au passage douar – hameau.*

↪ **600 hab :** *Correspond au passage hameau – village.*

↪ **2500 hab :** *Correspond à la limite système urbain - rural.*

↪ **6000 hab :** *Correspond au niveau de base.*

↪ **10.000 hab :** *C'est la limite entre très petites et petites villes.*

- **Un espace symbolique** : « *La ville apparaît, ainsi, comme un lieu de concentration et de centralité, un centre de services et de rayonnement* ». La ville apparaît aussi comme une société, une vitrine de la modernité, un espace organisé, un centre et un symbole régional.

Dans cette thèse, on a délimité les périmètres des villes de Kairouan et de Sidi Bouzid en tenant compte des différents critères précédemment cités. Le choix de la limite communale et administrative pour l'étude du risque inondation dans ces deux villes est liée à deux arguments : **Le premier** est l'intérêt accordé dès l'intitulé à l'étude du risque inondation dans les zones urbaines et non pas les zones périurbaines situés à la périphérie de la ville. **Le deuxième** est étroitement lié à la disponibilité des données de base nécessaire à la cartographie de ce risque et qui sont plus abondantes à l'intérieur de la limite communale qu'ailleurs.

1-2-3-2-2- Les échelles de cartographie du risque inondation

Pour valoriser l'étude du risque inondation, on a essayé d'affiner les échelles de cartographie. Ceci, en tenant compte à la fois des facteurs anthropiques, d'aménagement ainsi que de l'aléa hydro-climatique. Deux niveaux d'échelles sont étudiés : La **macro – échelle** (à l'échelle de toute la ville) et la **micro – échelle** (à l'échelle d'un quartier).

L'idée est de découper la ville en quartiers et d'y estimer le degré de risque inondation en se basant sur un certain nombre de critères. Un quartier dans chaque ville est choisi pour faire l'objet d'une cartographie plus minutieuse. Il est à noter, que ces méthodes spécifiques à la cartographie du risque inondation à macro et à micro – échelles seront évoquées en détails dans leur propre contexte.

Conclusion

Le premier chapitre a été consacré à l'étude de différentes sources des données et leur qualité ainsi que les méthodes d'investigation utilisées dans cette thèse. Les données traitées sont de divers types : climatiques (notamment pluviométriques), hydrologiques, socioéconomiques et cartographiques. Les méthodes d'investigation sont aussi variées. Il s'agit essentiellement de mettre l'accent sur les méthodes d'analyse climatique, hydrologique et cartographique. Un intérêt particulier a été accordé également à prouver le choix de la délimitation de la zone d'étude.

Chapitre 2

Cadre géographique et hydrologique

2-1- Le site

2-1-1- La ville de Kairouan

La ville de Kairouan, est construite sur une plaine d'épandage vers laquelle convergent, notamment deux capricieux cours d'eau, Oued Zeroud et Oued Marguellil. En 1969, cette plaine fut très largement couverte par les eaux de ces deux oueds. Cette ville, fondée vers l'an 670 par le chef des troupes de la conquête arabe Okba Ibn Nafaâ, est située au centre de la Tunisie entre les latitudes 35°38' et 35°42' Nord et les longitudes 10°04' et 10°08' Est. Étymologiquement parlant son nom signifie « **Caravansérail** ».

En 1955, Jean DESPOIS a bien décrit le site de la ville de Kairouan dans son livre « **La Tunisie orientale : Sahel et Basses Steppes** ». (Cf. passage ci-dessous).

«Seule dans sa steppe nue et sèche souvent brûlée par le soleil, l'actuelle Kairouan, modèle cependant bien réduit de l'ancienne capitale, paraît être le résultat d'un caprice humain. Par quel paradoxe, en effet, une ville, et qui plus est une capitale, a-t-elle pu être créée dans une aussi médiocre région, sur un site aussi pauvre en eau potable, aussi dénué de matériaux de construction, alors qu'à proximité des chaînes de la Dorsale voisine, des sources, le bois et la pierre, des sites défensifs, des voies de passage s'offraient aux hommes, si favorable à la création d'une ville ? Tout au plus peut-on remarquer qu'elle est sur une très légère éminence au centre de la petite zone d'inondation des oueds Marguellil et Zeroud où les céréales poussent moins irrégulièrement qu'ailleurs ; mais ce n'est qu'un site de village : une capitale y est dépaysée. C'est pourtant là que, selon la tradition, le conquérant arabe Okba ben Nafi fonde le premier centre musulman, là que va se développer une des plus célèbres capitales du monde de l'Islam. Il faut en rechercher les raisons dans l'histoire». (Despois, 1955).

Outre, cet auteur a multiplié ses recherches dans l'histoire, afin de répondre à ses questionnements sur les raisons de fondation de la ville de Kairouan dans ce site médiocre.

«En Noweïri et El Maliki (cité par CAUDEL, Les premières invasions arabes en Afrique du Nord, P., 1900,p. 104) parlent d'un Qounya ou Qamounya à l'endroit où fut fondée Kairouan. Ce texte traduit par H. H. Abdul-Wahab (Sur l'emplacement de Kairouan, Rev. Tun., 1941, p. 51 – 52) ne laisse pas de doute sur l'existence d'un ancien fortin. « Il existait autrefois sur l'emplacement qu'occupe Al Qairawan un fortin appelé Qamûnia appartenant aux Byzantins. Ce fortin renfermait une basilique où se trouvaient les deux colonnes rougeâtres qui sont aujourd'hui à la Grande Mosquée... ». P.PENET (Kairouan, Sbeitla, Le Djerid, T., s. d., p.3) suppose qu'il avait sur l'emplacement de Kairouan « un lieu de caravanes » et des silos à grain ; ajoutons un puits, le bir Barouta... SOLIGNAC, installation hydrauliques, p. 15 et suiv.: Ce ne serait pas Okba ben Nafi, mais Moaouiya Ibn Hodeidj qui serait le vrai fondateur de la ville». (Despois, 1955).

Les résultats de ses recherches (Cf. passage ci-dessus), ont montré que la vraie raison de la fondation de la ville de Kairouan diffère d'un historien à un autre : l'existence d'un ancien fortin appelé « **Qamûnia** », il avait sur l'emplacement de Kairouan « **un lieu de caravanes** »... Parfois, il y avait même des doutes sur le vrai fondateur de la ville ...

2-1-2- La ville de Sidi Bouzid

A travers son histoire, la ville de Sidi Bouzid a porté plusieurs noms, dont le plus récent est celui de son célèbre saint « **Sidi Bouzid** ». Cette ville a eu naissance vers l'année 1901... « *Elle est née d'un petit centre colonial établi à la place d'un gros souk rural implanté aux carrefours des pistes à l'époque* » D.R.E.H et commune de Sidi Bouzid, (2002), peu à peu elle connut la construction de certains bâtiments tels que « **l'école franco-arabe d'El Hamma** » en 1909. Cette école est nommée aujourd'hui « **l'école primaire rue de la République** ». Quant au noyau de la ville, il s'agit du noyau villageois de **Saddaguia**, qui est devenu de nos jours un faubourg de la commune de Sidi Bouzid. Au lendemain de la deuxième guerre mondiale, la ville s'est développée et les constructions se sont multipliées et surtout après l'édification de l'hôpital local, le bureau de poste... (Ministère de l'Équipement, d'Habitat et d'Aménagement du Territoire - Direction Régionale de Sidi Bouzid., 2013). Cette ville, « *a hérité de la période coloniale un centre aux rues orthogonales et larges qui manifestent la rationalité urbaine de l'époque* » (D.R.E.H et commune de Sidi Bouzid., 2002).

Géographiquement parlant, cette ville est située au Centre de la Tunisie entre les latitudes 35°01' et 35°02' Nord et les longitudes 9°26' et 9°30' Est. Elle représente un chef-lieu du gouvernorat de Sidi Bouzid qui s'appelait « **Gamouda** » jusqu'en 1973. Hady Roger IDRIS en 1962 a bien décrit la région de « **Gamouda** » dans son livre « **La Berbérie orientale sous les Zirides X^e-XII^e siècles** ». (Cf. passage ci-dessous).

Le Gamouda

«La région du Gamouda (Qammûda, antique Thacamuda) comprise entre celles de Sebiba, Kairouan, Sfax et Gafsa, était prospère et parsemée de localités. Entre Gafsa et Madjen el-Fedj, Tarrâq (ou Tirâq), ville importante ayant une mosquée cathédrale et un marché prospère, exportait jusqu'en Egypte ses tissus de laine. Elle était entourée de vergers où les pistachiers abondaient. Madjen el-Fedj (Fagg al-Himâr ou Fagg al-Hamâm) possédait un fondouk et un grand réservoir d'eau ; elle était entourée de vergers- Vers le nord-ouest, on arrivait à al-Hûriya (ancienne Thélepte ?). Au nord d'el-Fedj, Madkûr (ou Madkûra) avait, sans doute depuis longtemps supplanté Sbeitla comme chef-lieu de la province. Elle était dotée d'un garni' et d'un grand nombre de mosquées, de bains, de fondouks, de souks et de points d'eau. Elle disparaissait au milieu des arbres fruitiers, surtout des figuiers dont les fruits séchés étaient expédiés à Kairouan et ailleurs. La succulence des figues de Madkûr était telle qu'elles se vendaient plus cher que toutes les autres variétés. L'énigmatique Qàsira qu'Ibn Hawqal présente comme une ville distincte, pourrait bien être une autre appellation de Madkûra, si l'on en croit al-Idrîsî, ou mieux le nom d'un des deux quartiers de cette dernière ville. Plus au nord, Gamûnis (souvent Gamûnis al-Sàbûn) qui semble correspondre à l'actuelle Bir al-Hafay, était l'un des plus gros centres du canton.

Gamûnis avait un garni', un souk florissant et un bain public. Un grand qasr servait d'entrepôt pour toute la population. La ville était entourée de nombreux hameaux florissants et de vergers complantés d'oliviers, de figuiers et d'amandiers. Naqàws (ou Naqàws), se trouvait à l'est de Qàsira. Al-Muqaddasî, est le seul à citer une grosse bourgade du Gamouda qu'il appelle Hawr al-Kàf qu'on est tenté d'identifier avec Magdûl qu'il ne cite pas. Magdûl était un gros village situé à peu près à égale distance entre Gamûnis et la côte, à proximité d'une petite sebkha du même nom. La région était habitée par des Zanâta. Enfin, au-delà, en direction de Kairouan, venait le bourg des Banû Da"âm, à localiser à Sidi Ali ben Naçrallah, ou mieux aux ruines de Pavillier. Toute la région du Gamouda et de Gafsa fut ruinée par les Hilâliens». (Idris, 1962).

En guise de conclusion, on peut dire qu'on a pu « reconnaître deux unités territoriales voisines : **la Gamonía au nord et la Gamûda au sud**. L'une et l'autre appartiennent au même bassin versant de l'oued Zeroud dont le Marguellil n'est que l'affluent le plus septentrional». (Lepelley et Dupuis, 1999).

2-2- La topographie locale et environnante

L'examen de la topographie des bassins versants étudiés est indispensable. Ceci, permet de connaître les différents paramètres topographiques favorables à l'expansion des terrains inondables et alors l'augmentation des dégâts causés par ce fléau. On s'intéressera donc à l'étude de deux agents à savoir : l'**hypsométrie** et la **clinographie**.

2-2-1- L'hypsométrie

Pour effectuer une étude minutieuse de la topographie de la zone (caractéristiques du relief, calcul et cartographie des pentes et des altitudes (Tableau 2.1), on s'est basé sur des courbes de niveau d'équidistance de 10 m traités par le logiciel **Global Mapper**. Ces courbes de niveau sont extraites à partir du Modèle Numérique d'Altitude **SRTM** (Shuttle Radar Topographic Mission) qui présente une résolution spatiale de 30 m.

Tableau 2.1 : Répartition surfacique des classes d'altitude dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan (**à gauche**) et dans le bassin versant de l'oued El Fekka (**à droite**)

Altitudes en (m)	Superficie en (Km ²)	Pourcentage	Altitudes en (m)	Superficie en (Km ²)	Pourcentage
20 - 50	225,37	31	290 - 360	362,12	41,9
50 - 100	302,36	41,58	360 - 430	364,65	42,19
100 - 150	191,26	26,3	430 - 500	102,65	11,88
150 - 200	7,02	0,97	500 - 570	22,81	2,64
200 - 250	0,98	0,13	570 - 640	8,06	0,93
250 - 310	0,17	0,02	640 - 710	3,33	0,38
Total	727,16	100	710 - 800	0,67	0,08
			Total	864,29	100

2-2-1-1- L'hypsométrie du bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan

Comme son nom l'indique, ce bassin versant auquel appartient la ville de Kairouan, couvre la partie septentrionale de la plaine de Kairouan sur une superficie d'environ 727,16 Km² (Fig.2.1). **La partie aval** de ce bassin, est dominée par des plaines dont les altitudes n'excèdent guère les 100 m et qui sont développées sur des sols « *constitués d'apports à texture fine, ce qui leur donne une bonne capacité de rétention. Ces sols sont affectés par l'halomorphie, qui a donné lieu à de grandes superficies steppiques avec des plantes halophiles dont la vocation est essentiellement pastorale* » (C.R.D.A de Kairouan, 2011). Ces plaines s'étalent sur plus de 527,73 Km² soit le ¾ de la superficie totale du bassin. La zone de transition entre les deux parties amont et aval du bassin est formée par **des piémonts** à une superficie réduite de 8 Km². **Dans la partie amont**, on observe des petits **jbels** modestes par leurs altitudes, dont on cite : Jbal Dkriela (307 m), jbal Er Ras El Ahmar (301 m) et jbal Kef El Krouabi (258 m). Ces massifs couvrent une superficie négligeable qui représente à peine 0,02 % de la superficie totale du bassin, soit environ 17 ha.

2-2-1-2- L'hypsométrie du bassin versant de l'oued El Fekka

La ville de Sidi Bouzid, est développée sur une plaine de fond de cuvette à pente très faible, qui constitue la zone d'épandage des eaux des oueds El-Fekka et Sareg Edhiba. Cette ville est encadrée par des reliefs qui sont modestes par leurs altitudes mais qui se caractérisent par des pentes fortes. En effet, le passage brutal des versants à pentes fortes aux plaines permet de diminuer le temps de concentration des eaux pluviales et par conséquence l'augmentation de la vitesse d'écoulement. En effet, on peut distinguer, pour le bassin versant de l'oued El Fekka, trois unités topographiques (Fig.2.2 et Tableau.2.2) :

↳ L'unité montagneuse

Elle est formée par une série des jbels dont les altitudes dépassent les 500 m, dont: Jbal Al Hfay (683m), jbal Ar-Rakmat (560 m), jbal Al Marfig (577 m), jbal Liswda (635 m), jbal Al Hamra (624 m), jbal Gärit Hdïd (619 m), jbal Gätrana (555 m). Le plus important est celui de jbal Al Kbar qui culmine à 794 m (Photo 2.1).

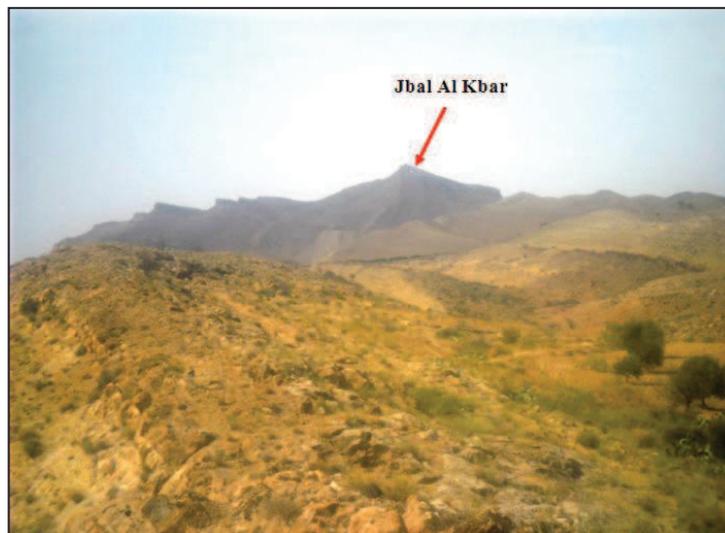


Photo 2.1: Jbal Al Kbar. Cliché Nasrallah Wafa (le 22 Septembre 2017)

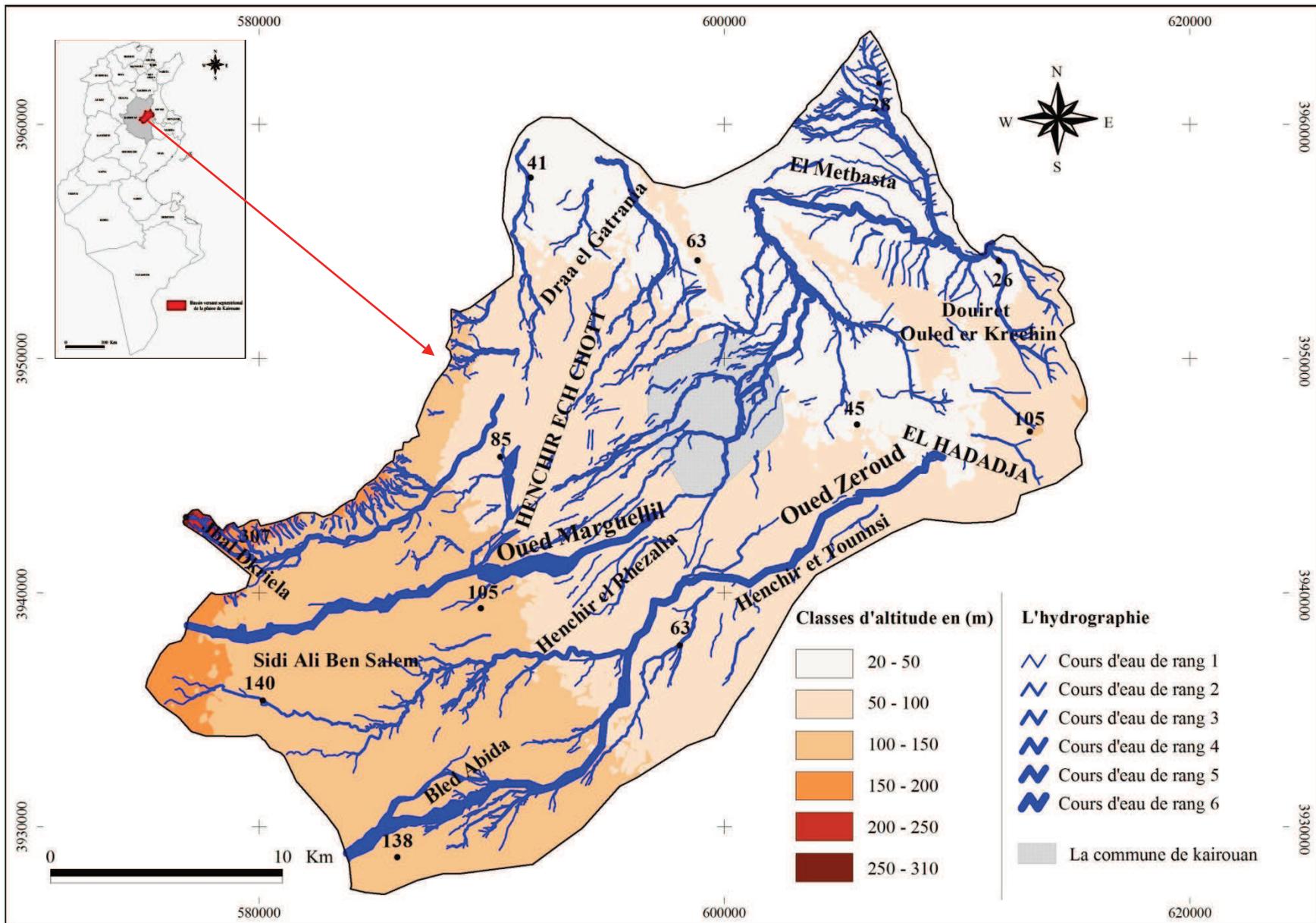


Figure 2.1: L'Hypsométrie et l'hydrographie dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, d'après les courbes de niveau extraites à partir de M.N.A : SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) à 90 m de résolution. Feuilles topographiques (Sabkhet El Kalbia, Paviller, Oued Chrita, Kairouan, Sidi El Hani et Ain Djaloula) au 1/50000)

Ces massifs, d'une direction générale SW-NE, sont développés sur des sols squelettiques et s'étalent sur environ 4,03 % de la superficie totale du bassin versant de l'oued El Fekka, soit 34,87 Km² (Tableau.2.2).

↳ **Les piémonts**

C'est la zone de transition entre les massifs montagnards et les plaines. Elle est formée par une série des plateaux dont les altitudes sont comprises entre 430 et 500 m. Ces piémonts s'étalent sur des aires couvrant 102,65 Km², soit 11,88 % de la superficie totale du bassin versant de l'oued El Fekka.

↳ **La plaine**

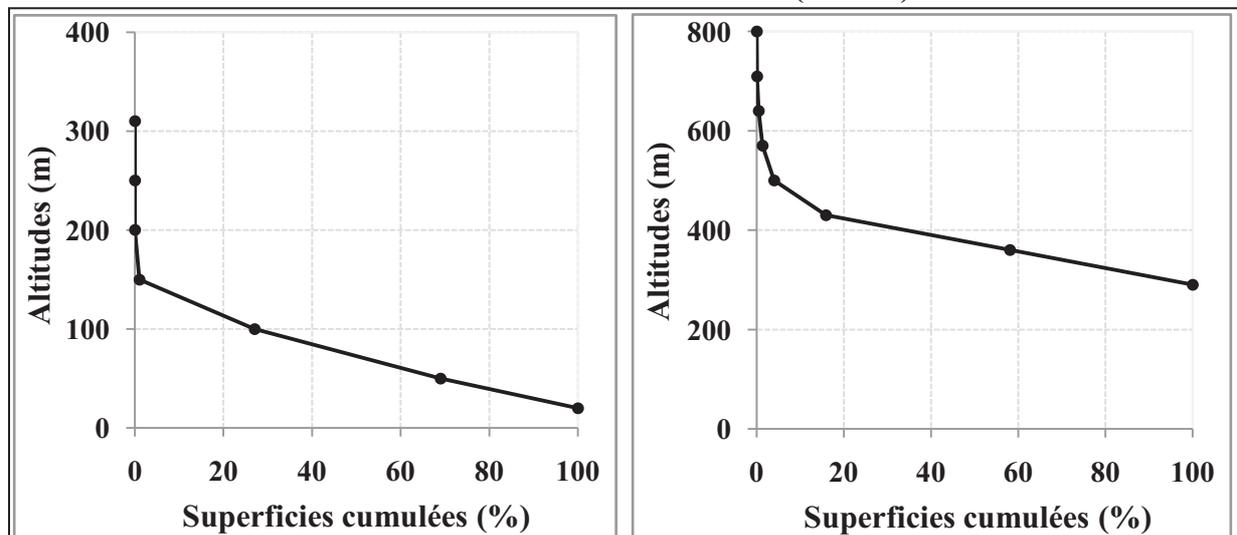
C'est la zone d'épandage des crues notamment des oueds El-Fekka et Sareg Edhiba. Son aire d'extension est de l'ordre de 726,77 Km², soit 84,09 % de la superficie totale du bassin.

Tableau.2.2 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et du bassin versant de l'oued El Fekka

	Surface A (Km ²)	Périmètre P (Km)	Indice de compacité K _C	Largeur l (Km)	Longueur L (Km)
Formule	-	-	$\frac{P}{2\sqrt{(\pi A)}}$	$\frac{P}{2} - L$	$\frac{K_C \sqrt{A}}{1,128} [1 + \sqrt{(1 - (1,128/K_C)^2)}]$
B.V septentrional de la plaine de Kairouan	727,16	136,11	1,42	13,49	54,57
B.V de l'oued El Fekka	864,29	145,65	1,4	14,73	58,1

Les superficies des bassins versants étudiés sont importantes, elles sont d'environ 727,16 Km² pour le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et de 864,29 Km² pour celui de l'oued El Fekka, avec des périmètres qui sont successivement de l'ordre de 136,11 Km et 145,65 Km. L'indice de compacité de Gravelius (Kc) qui permet de déterminer la forme du bassin, est presque le même pour les deux bassins versants. Cet indice est supérieur à 1,128, ce qui montre la forme allongée de ces bassins. Outre, on a pu calculer la largeur (l) et la longueur (L) des rectangles possédant les mêmes superficies, périmètres et indices de compacité que les bassins versants étudiés. L'allure des courbes hypsométriques ci-dessous (Fig.2.2), permet de constater que les altitudes sont plus importantes à l'amont.

Fig.2.2: Courbes hypsométriques du bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan (à gauche) et du bassin versant de l'oued El Fekka (à droite)



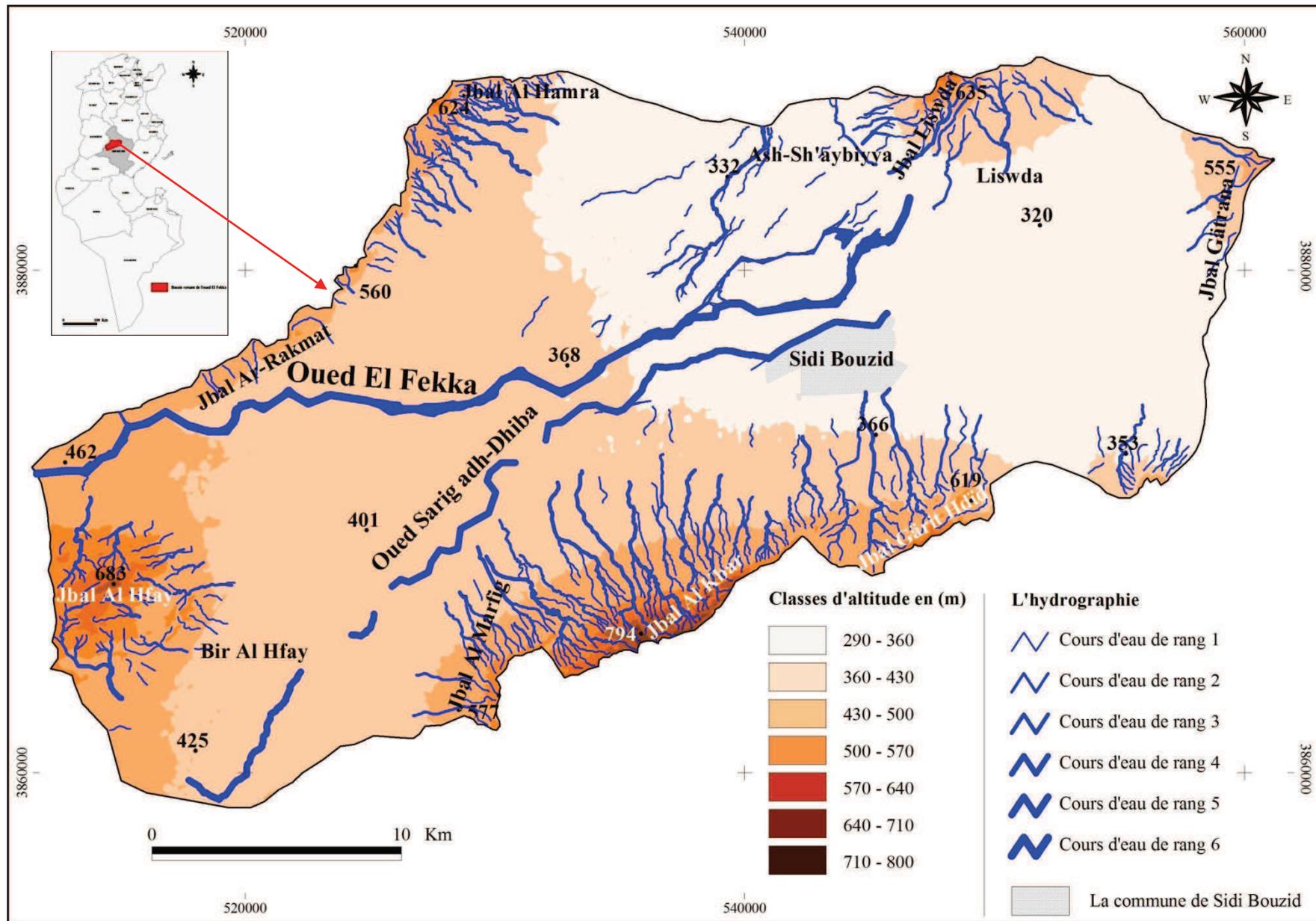


Figure 2.3: L'Hypsométrie dans le bassin versant de l'oued El Fekka (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, d'après feuilles topographiques (Sidi Bouzid, Sbitla, Jbal Bou Dinar, Jbal Al Kbar, Fayid et Bir Al Hfay) au 1/50000)

Les altitudes (Tableau 2.3), varient entre 20 et 307 m pour le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et de 290 et 794 m pour celui de l'oued El Fekka.

Tableau 2.3: Altitudes caractéristiques du bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et du bassin versant de l'oued El Fekka

	H max (m)	H min (m)	H 5%	H 50%	H 95%
B.V septentrional de la plaine de Kairouan	307	20	142,5 m	72,75 m	24,75 m
B.V de l'oued El Fekka	794	290	496 m	473,75 m	298 m

Le calcul de la dénivelée spécifique « D_s », nous a permis de définir le type de relief pour chaque bassin versant étudié. En fait, en se basant sur la classification des reliefs, Cherni, (2004) et Mejbri, (2010), on a pu constater que : le relief est modéré dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan ($50 < D_s < 100$ m). Pour le bassin versant de l'oued El Fekka, D_s est comprise entre 100 et 250 m, il s'agit donc d'un relief assez fort (Tableau 2.4).

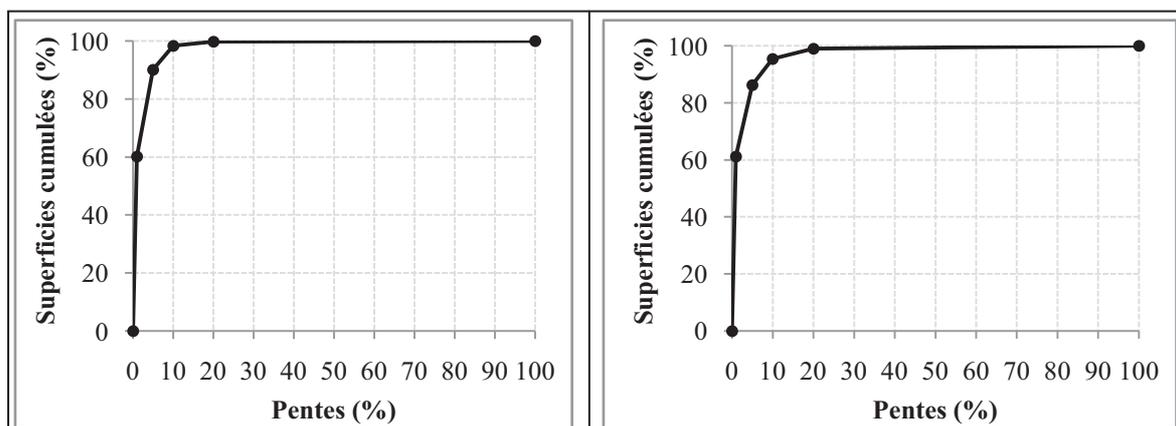
Tableau 2.4: Paramètres du relief du bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et du bassin versant de l'oued El Fekka

	Dénivelée D(m)	Indice de relief I_G	Dénivelée spécifique D_s	Classe de relief
Formule	H 5% - H 95%	$\frac{D}{L}$	$I_G \sqrt{A}$	-
B.V septentrional de la plaine de Kairouan	117,75	2,16	58,25	Relief modéré
B.V de l'oued El Fekka	198	3,41	100,25	Relief assez fort

2-2-2- Les pentes

L'étude des pentes ou « la clinographie » est une étape indispensable et complémentaire à l'hypsométrie afin d'avoir une idée plus détaillée sur la topographie de la zone d'étude. Lors des inondations, la pente peut jouer un double rôle : Soit par l'accroissement de la vitesse d'écoulement de l'eau lorsqu'elle est forte, soit elle favorise la stagnation des eaux lorsqu'il s'agit d'un terrain plat à pente faible. L'analyse de la répartition fréquentielle des classes de pentes (Fig 2.4), nous permet de dégager 3 grandes classes clinographiques avec des seuils identiques pour les deux bassins versants étudiés.

Fig 2.4: Répartition fréquentielle des classes de pentes dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan (à gauche) et dans le bassin versant de l'oued El Fekka (à droite)



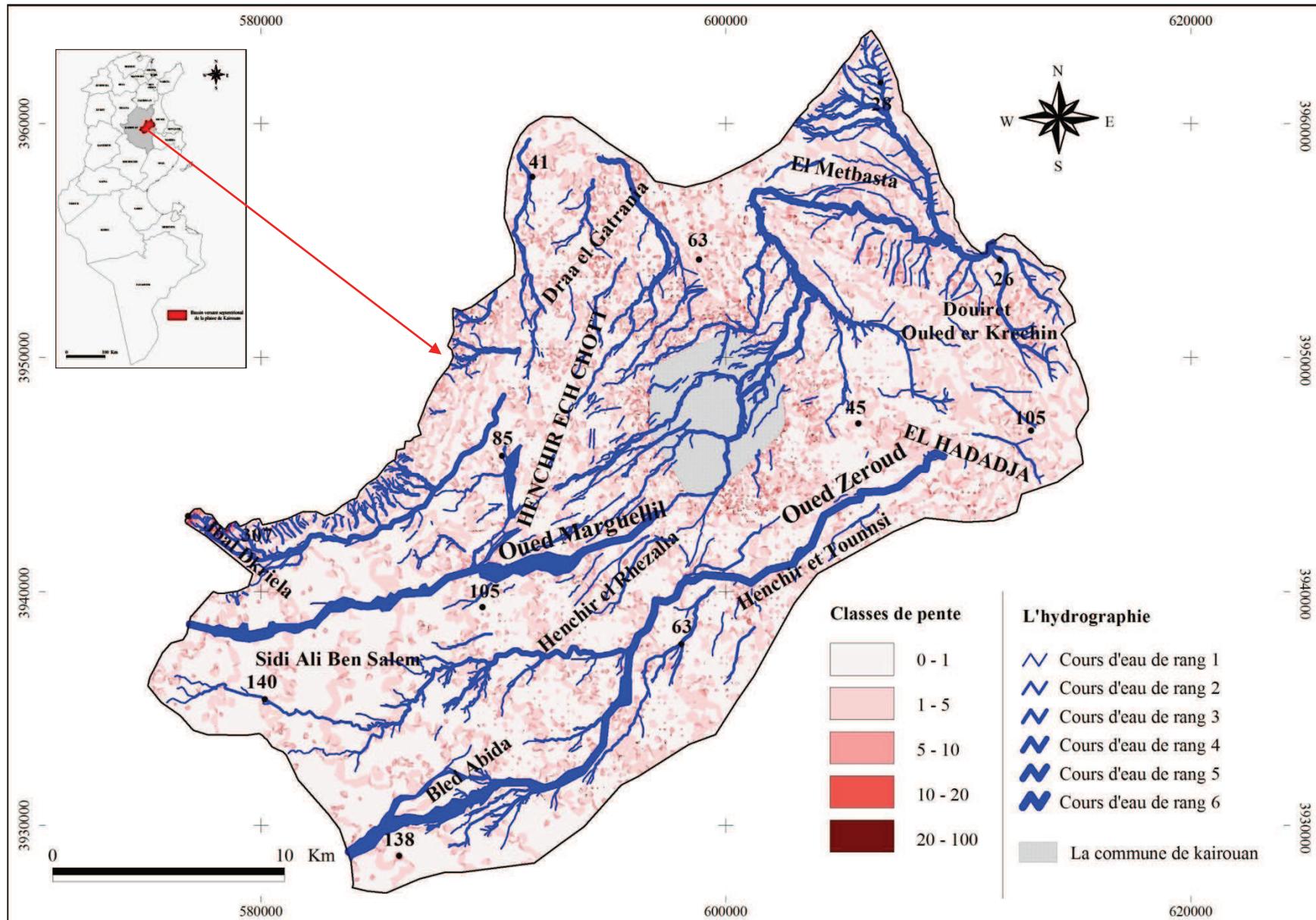


Figure 2.5: Les pentes dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, M.N.T d'après Feuilles topographiques (Sabkhet El Kalbia, Paviller, Oued Chrita, Kairouan, Sidi El Hani et Ain Djaloula) au 1/50000)

↳ **La première classe clinographique** est celle dont les pentes varient entre 0 et 1%, occupant 60,17% de la superficie totale du bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et 61,23% de celle de l'oued El Fekka. Cette catégorie des pentes concerne respectivement 437,55 Km² et 529,19 Km².

↳ **La deuxième classe clinographique** retienne les pentes qui varient entre 1 et 20%. Ces dernières, occupent 39,61% de la superficie totale du bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et 37,79% de celle de l'oued El Fekka. Elles couvrent respectivement 288,01 Km² et 326,6 Km².

↳ **La troisième et la dernière classe clinographique** concerne les pentes fortes supérieures à 20% qui s'étalent sur des aires limitées de l'ordre de 1,6 Km² pour le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et 8,5 Km² pour celui de l'oued El Fekka. Elles couvrent 0,22% et 0,98% des deux bassins versants.

Tableau. 2.5: Répartition surfacique des classes de pentes dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan (**à gauche**) et dans le bassin versant de l'oued El Fekka (**à droite**)

Pentes en (%)	Superficie en (Km ²)	Pourcentage	Pentes en (%)	Superficie en (Km ²)	Pourcentage
0 - 1	437,55	60,17	0 - 1	529,19	61,23
1 - 5	217,53	29,91	1 - 5	216,75	25,08
5 - 10	60,04	8,26	5 - 10	79,15	9,16
10 - 20	10,44	1,44	10 - 20	30,7	3,55
20 - 100	1,6	0,22	20 - 100	8,5	0,98
Total	727,16	100	Total	864,29	100

L'examen du tableau 2.5 et des figures 2.5 et 2.6, laisse voir que les deux bassins versants étudiés se distinguent par la dominance des terrains plats ou à pente faible dont les superficies dépassent largement la moitié des 2 bassins. Ces terrains à la fois aplatis et inondables sont traversés par les deux grands cours d'eau les plus dévastateurs de la Tunisie centrale, il s'agit de : Zeroud et Marguellil.

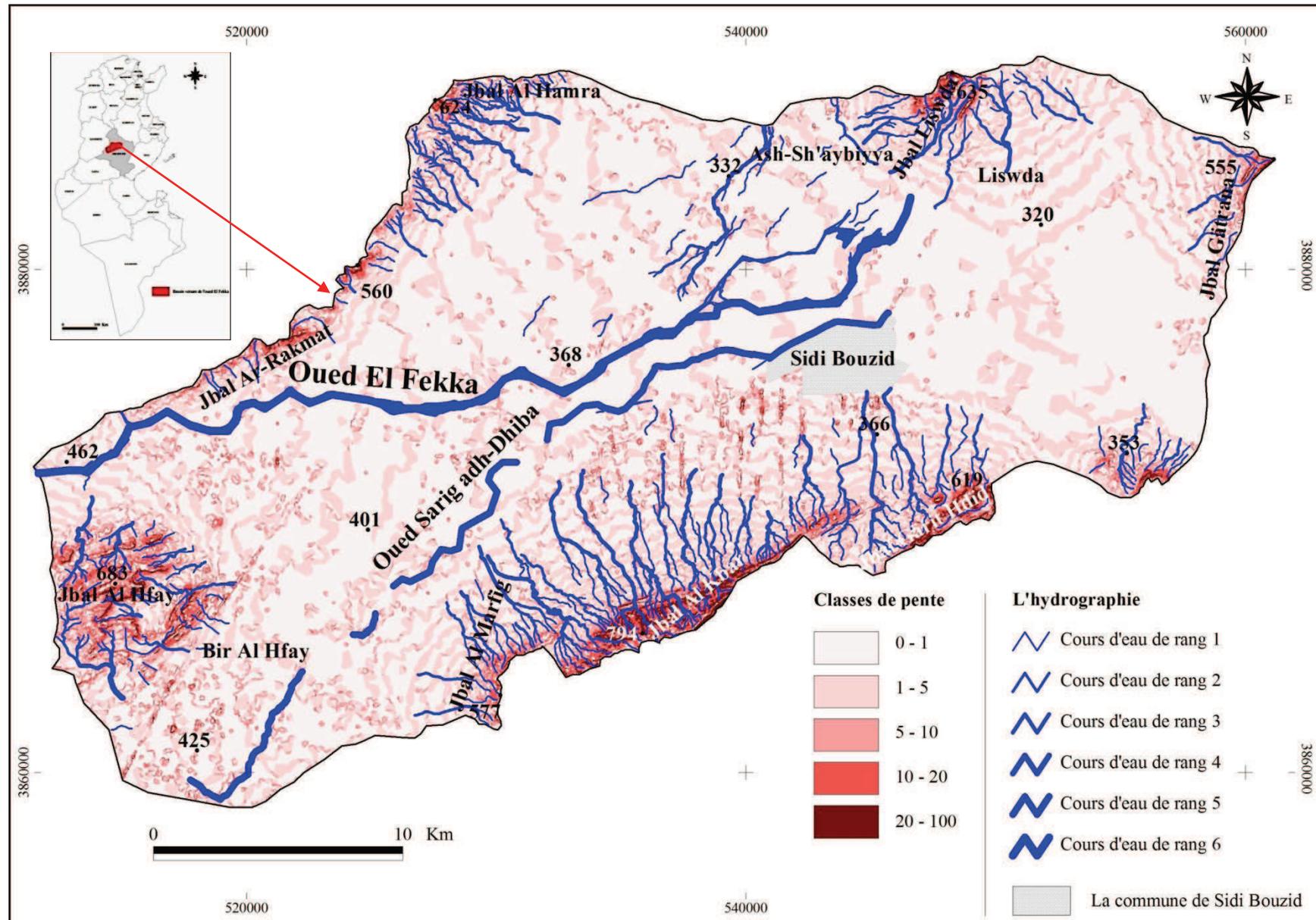


Figure 2.6: Les pentes dans le bassin versant de l'oued El Fekka (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, M.N.T d'après Feuilles topographiques (Sidi Bouzid, Sbitla, Jbal Bou Dinar, Jbal Al Kbar, Fayid et Bir Al Hfay) au 1/50000)

2-3- L'hydrographie et l'hydrologie

Le système hydrographique des oueds Zeroud et Merguellil est très particulier. Il se caractérise par son endoréisme. Ces oueds, qui sont souvent à l'origine des crues les plus copieuses de la Tunisie Centrale, trouvent leur exutoire dans Sabkhet El Kalbia. La crue la plus mémorable est celle de l'automne 1969, dont le nombre de décès est estimé de 542 morts (Fehri, 2014). La crue causée par l'oued El Fekka (affluent de l'oued Zeroud), en janvier 1990 est aussi d'une grande importance. L'ampleur des dégâts humains et matériels d'une crue majeure peut être considérable. Une étude hydrologique et hydrographique est donc indispensable pour déterminer les spécificités du bassin versant d'oued El Fekka et du bassin versant Septentrional de la plaine de Kairouan, auxquels appartiennent respectivement les villes de Sidi Bouzid et Kairouan.

2-3-1- L'hydrographie : Description des oueds

La Tunisie centrale est drainée par deux capricieux cours d'eau à savoir, les oueds de Zeroud et Marguellil (Fig 2.7). Ces derniers se caractérisent auparavant par l'abondance des crues souvent meurtrières, comme celles des années 1969 et 1990. Le Marguellil coule 4 à 5 fois par an, alors que le Zeroud peut couler 14 fois en une seule année l'exemple de 1908 (Despois, 1955). «*Un diction kairouanais plein de saveur fait allusion au pouvoir fécondant de l'eau sur le sol : l'oued Zeroud est un homme sans femme, l'oued Marguellil est une femme sans homme. Les crues du Zeroud sont, en effet, plus fréquentes, plus longues et plus abondantes que celles du Marguellil. Pourtant le périmètre inondable du premier n'est, par suite de disposition du terrain, que la moitié de son voisin*», (Penet, 1909). Faisant partie de la Tunisie centrale, les deux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid sont au cœur des événements hydro-climatiques extrêmes causés par ces deux oueds. Ci-dessous une description plus détaillée des cours d'eau menaçants la zone d'étude.

2-3-1-1- Les principaux cours d'eau menaçant la ville de Kairouan

La ville de Kairouan appartient au bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan qui s'étale sur une superficie de 727,16 Km² (Fig 2.8). Elle est menacée par:

a- Le Zeroud, qui est le plus grand cours d'eau de la Tunisie Centrale. Il prend sa source à la frontière algérienne, dans les hauteurs de la Grande Dorsale exactement à 1100 mètres à l'Aïn Loubira (Despois, 1955). Il est long d'environ 225 kilomètres et appartient à un immense bassin versant portant son nom « Bassin versant d'Oued Zeroud », qui couvre une superficie totale de l'ordre de 8650 Km² (Tableau.2.7). En outre, le Zeroud se caractérise par ses nombreux bras morts qui témoignent l'importance des phénomènes de défluviation et de débordement (Ouesleti, 1999). Ses affluents sont répartis en deux branches :

* **Une branche Nord**: Formée par oued **Hathob** et ses affluents, on cite essentiellement des oueds : Släma, El Brik, Masinna, Lämii, Abdallah, Az-Zarga.

* **Une branche Sud**: Où l'oued Zeroud prend le nom d'**Oued El Hlal** qui regroupe plusieurs affluents tels que les oueds: Ar-Riyähî, Ad-Dareb, El Htab, El Hachim, El Fekka, Sfisifa, El Rmal et Jilma. Oued El Hlal joint l'Oued Hathob pour former Oued Zeroud qui converge vers Kairouan (Fig 2.7), menaçant ainsi la ville surtout lors des crues dévastatrices.

La figure 2.9, montre le profil en long de l'Oued Marguellil ainsi que ses principaux affluents. Il s'agit notamment des oueds : Midina, Morra, Hajar, Zebbès et Hammam.

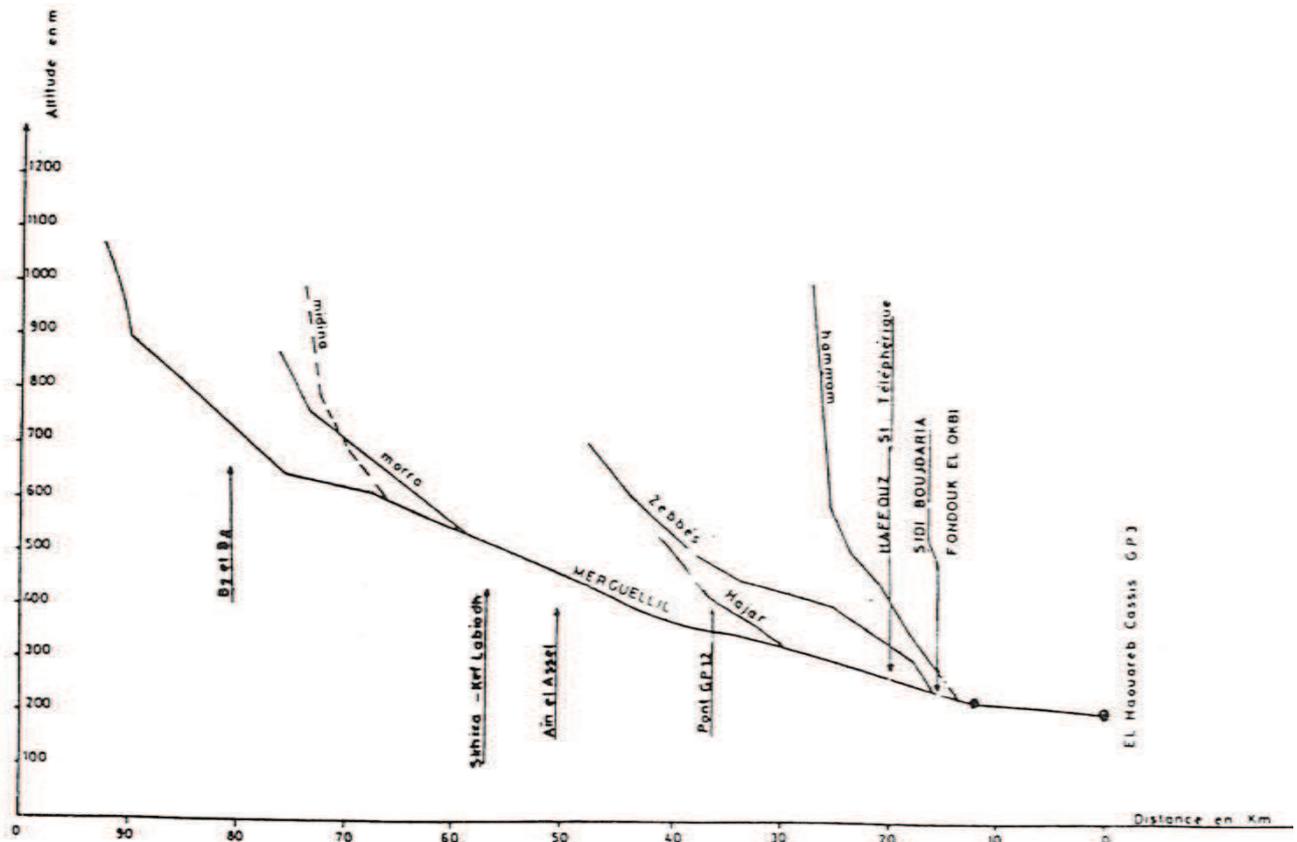


Figure 2.9 : Oued Merguellil : Profil en long de l'Oued principal et ses principaux affluents. (Source: Bouzaiane S. et al., 1986)

c- Oued El Malah, nommé auparavant « **Oued Sarawil** », est un affluent de Marguellil et le plus important oued encerclant la ville de Kairouan. Il est situé au sud de la médina et se déverse dans des sebkhas. Cet oued apporte une eau salée et se distingue comme un cours d'eau où l'on vendait les légumes (Mahfoudh, 2003). A un kilomètre des remparts de la ville de Kairouan, oued El Malah diverge en deux bras : « *Le premier continue sa progression vers le Nord et passe à 500 mètres à l'Est des remparts, créant aux alentours de la zawiya de Sîdi Sahnûn un terrain immergé. Le second contourne la médina pour rejoindre oued el Sarj et oued Merguellil à l'occident du grand cimetière de Quraysh.* » (Mahfoudh, 2003).

2-3-1-2-Les principaux cours d'eau menaçant la ville de Sidi Bouzid

La ville de Sidi Bouzid est située dans le bassin versant de l'oued El Fakka (Figure 2.10), couvrant une superficie de l'ordre de 864,29 Km² dans la région naturelle des Hautes Steppes orientales.

a- Oued El Fekka, affluent de la branche sud de l'oued Zeroud, est l'un des plus grands cours d'eau qui prend source dans des reliefs accidentés à la confluence des oueds El Hatab et El Hachim. Les crues de cet oued sont au nombre de 15 en moyenne par an. (Hmercha, 2010). Les crues de janvier 1990 ont été les plus catastrophiques de ces trente dernières années (Oueslati, 1999).

b- Oued Serg Dhiba ou oued El-Hallouf : Parallèlement à la digue, cet oued longe la ville de Sidi Bouzid dans sa partie Nord. Il se caractérise par un écoulement non permanent mais aussi par des crues brutales et destructrices lors des événements exceptionnels. Il draine les versants sud-est de djebel El Hafey et Sidi Ali Ben Aoun, ainsi que le versant Nord de djebel El Kbar (Hmercha, 2010). A l'aval, oued Serg Dhiba présente un lit assez large de 60 à 70 m au fond et relativement profond de 3 à 3,5 m. Plus à l'aval précisément au nord de la ville de Sidi Bouzid, le lit d'oued devient plus large mais peu profond d'environ 1 m (D.H.U, 1990).

c- La partie Sud de la ville de Sidi Bouzid est menacée par des petits cours d'eau, drainant jbal Gärit Hdïd qui culmine 619 m. Il s'agit des oueds **Al Mazzouz**, nommé par la communauté locale « **Oued Bou Fares** », et Al Bakakriya qui se transforment en des vrais torrents lors de très fortes pluies causant ainsi des dégâts majeurs. **Oued El Bkakriya** qui se perd au niveau du lycée du 2 Mars présente à l'amont un lit relativement large de 20 à 25 m et assez profond de 2 à 2,5 m environ. Cet oued, traverse quartier "**El Filahi**", qui est une zone à vocation agricole mais qui a connu un étalement de tissu urbain à la fois rapide et anarchique (D.H.U, 1990).

2-3-2- Hydrologie : Variabilité, répartition et fréquence des débits

Le régime hydrologique des oueds Zeroud et Merguellil se caractérise par une irrégularité très importante. Le Zeroud d'un volume annuel moyen écoulé de l'ordre de 19,6 millions de m³ (Tableau. 2.7), peut couler jusqu'à quinze fois (en 1908 il a coulé quatorze fois). Par ailleurs, il peut arriver qu'une année entière se passe sans crue (Penet, 1909). Le Merguellil, avec un volume annuel moyen écoulé d'environ 4 millions de m³ peut couler jusqu'à dix fois par ans. Ce cours d'eau se distingue par des crues moins fréquentes, moins longues et moins abondantes que celles du Zeroud (Penet, 1909). En période de crue, ces capricieux cours d'eau se transforment en un laps de temps très court en torrents immenses et rapides qui isolent les villes de Kairouan et Sidi Bouzid de tous les alentours. « *Le Zeroud en crue y roule facilement de 100 à 400 m³ à la seconde ; on aurait même mesuré ... 2000 et même 2300 m³/s ; du 1^{er} au 3 juin 1920, après de fortes pluies tout à fait exceptionnelles en cette saison, il serait passé à 85 millions de m³. On a peine à croire à ces chiffres quand on n'a pas vu le flot tourbillonnant et fougueux du Zeroud, de cette véritable mer couleur de terre qui s'étale sur plusieurs kilomètres.... Le Marguellil a des crues de même durée, mais un débit généralement moins fort ; on en aurait cependant observé une qui aurait atteint le chiffre peu vraisemblable de 5600 m³/s. Le Marguellil coule 4 à 5 fois par an, mais avec les mêmes variations que le Zeroud* » (Despois, 1955).

Tableau.2.7.Caractéristiques hydrologiques des bassins versants des oueds Zeroud et Marguellig

Caractéristiques hydrologiques du bassin versant d'oued Zeroud	
Nombre moyen de crues par an	13
Débit maximum observé à Sidi Saâd	17050 m ³ /s en 1969
Volumes annuels de ruissellement	
Volume annuel moyen	76 Mm ³
V10	147 Mm ³
V100	284 Mm ³
Vr (69-70)	2634 Mm ³
Apport moyen en sels	230000 tonnes par an
Caractéristiques hydrologiques du bassin versant d'oued Marguellig	
Volume de base à Haffouz	4 Mm ³
Apport moyen annuel à Haffouz (670 Km ² de BV)	16 Mm ³
Volume de base à Sidi Boujdaria	6 Mm ³
Apport moyen annuel à Sidi Boujdaria	32 Mm ³
Apport de l'année 69-70	187 Mm ³
Nombre moyen de crues par an à Haffouz	8
Débit maximum observé à Haffouz	2900 m ³ /s en 1969
Volumes annuels de ruissellement à Haffouz	
Volume annuel moyen	20,5 Mm ³
V10	38,5 Mm ³
V100	84,4 Mm ³
Vr (69-70)	169 Mm ³
Apport moyen en sels	1,03 g/l en moyenne à Haffouz et 2 fois plus à Sidi Boujdaria soit en année moyenne 78000 tonnes par an à Sidi Boujdaria

Source : (D.H.U, 1998)

2-3-2-1- Irrégularité interannuelle des débits

À Kairouan, les débits annuels moyens des oueds Merguellig et Zeroud enregistrées respectivement aux stations de Haffouz Téléphérique (1991-2011) et Sidi Saâd aval (1956-1978), montrent une très grande variabilité.

L'écart à la moyenne est très flagrant. À Sidi Saâd Aval, pour 22 ans d'observations, deux années seulement ont un débit annuel au-dessus de la moyenne estimée de 6,91 m³/s. Il s'agit des années agricoles (1964-1965) et (1969-1970). Cette dernière est l'année où on a enregistré le plus fort débit journalier moyen qui est de l'ordre de 85,31 m³/s (Soit plus que 12 fois la moyenne annuelle).

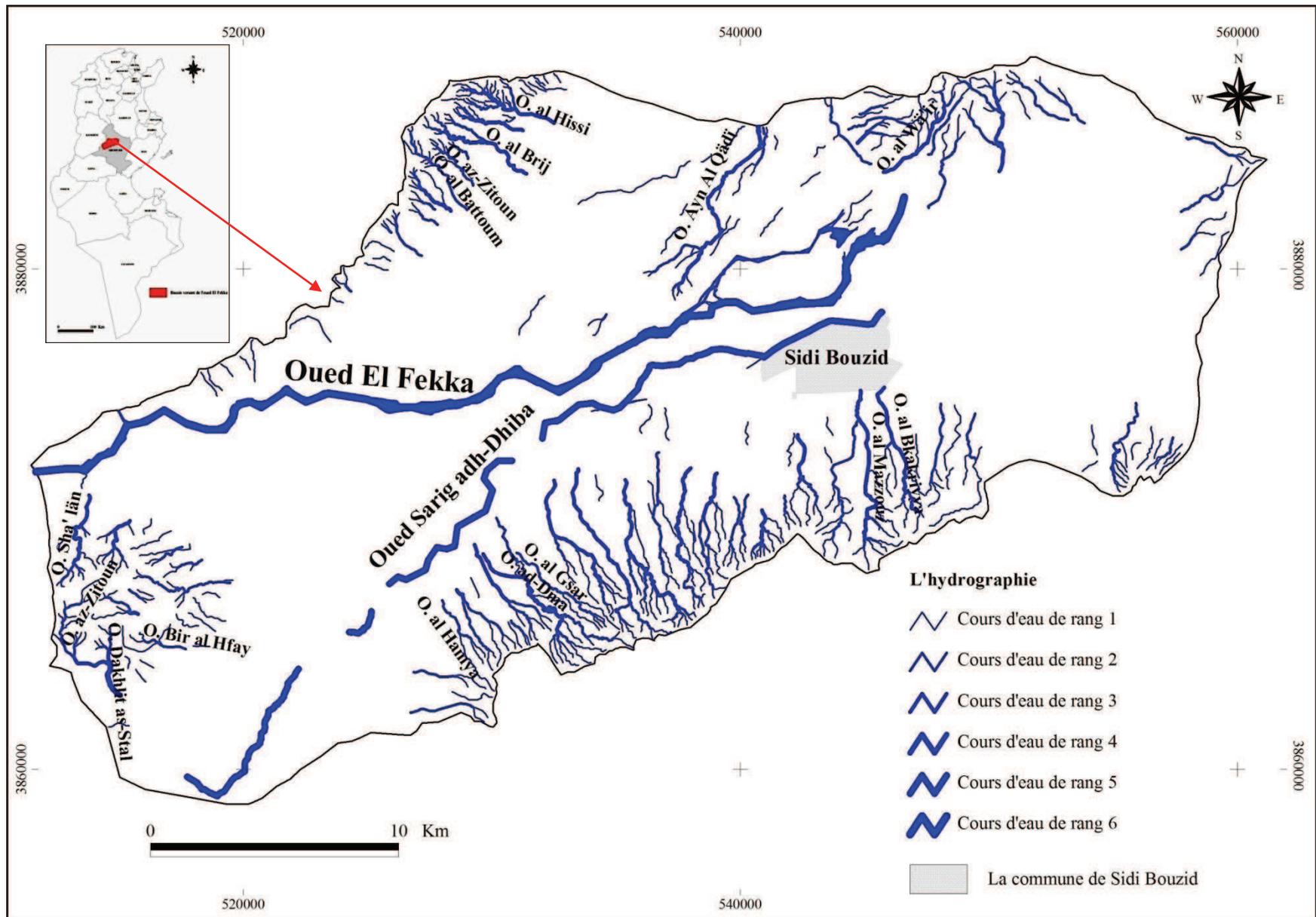


Figure 2.10: Le réseau hydrographique dans le bassin versant de l'oued El Fekka (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, d'après feuilles topographiques (Sidi Bouzid, Sbitla, Jbal Bou Dinar, Jbal Al Kbar, Fayid et Bir Al Hfay) au 1/50000)

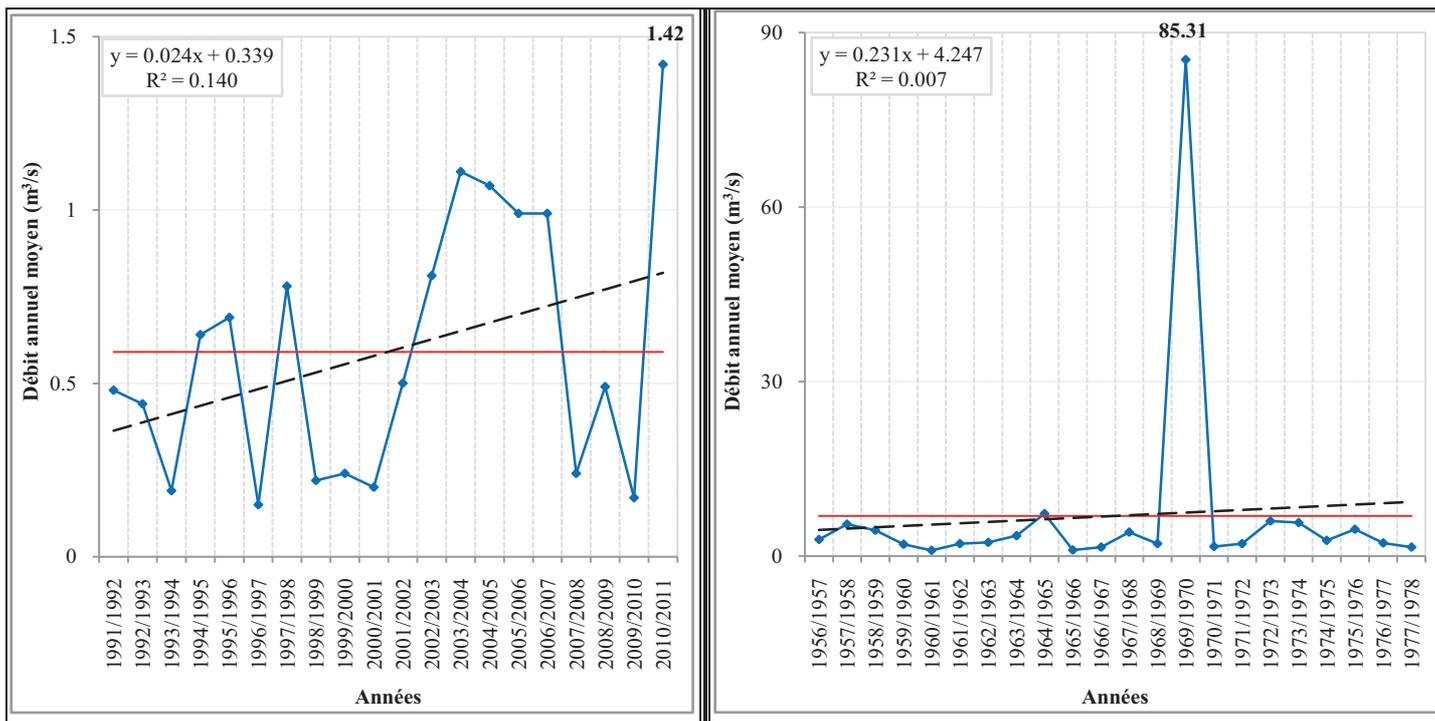


Figure 2.11: Les débits annuels moyens des oueds Merguellil à la station de Haffouz Téléphérique entre 1991 et 2011 (à gauche) et Zeroud à la station de Sidi Saâd Aval entre 1956 et 1978 (à droite). (Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, Source *des données brutes* : D.G.R.E).

Sur Merguellil et à la station de Haffouz Téléphérique (Fig 2.11), 11 années sur 20 présentent des débits annuels moyens au-dessus de la moyenne (Soit $0,59 \text{ m}^3/\text{s}$). Ceci, réaffirme la soudaineté des crues de ces capricieux cours d'eau qui sont à faibles débits pendant plusieurs années successives mais qui peuvent engendrer en quelques heures des crues dévastatrices qui s'étalent sur des aires immenses causant ainsi des dommages notables aux biens et aux personnes.

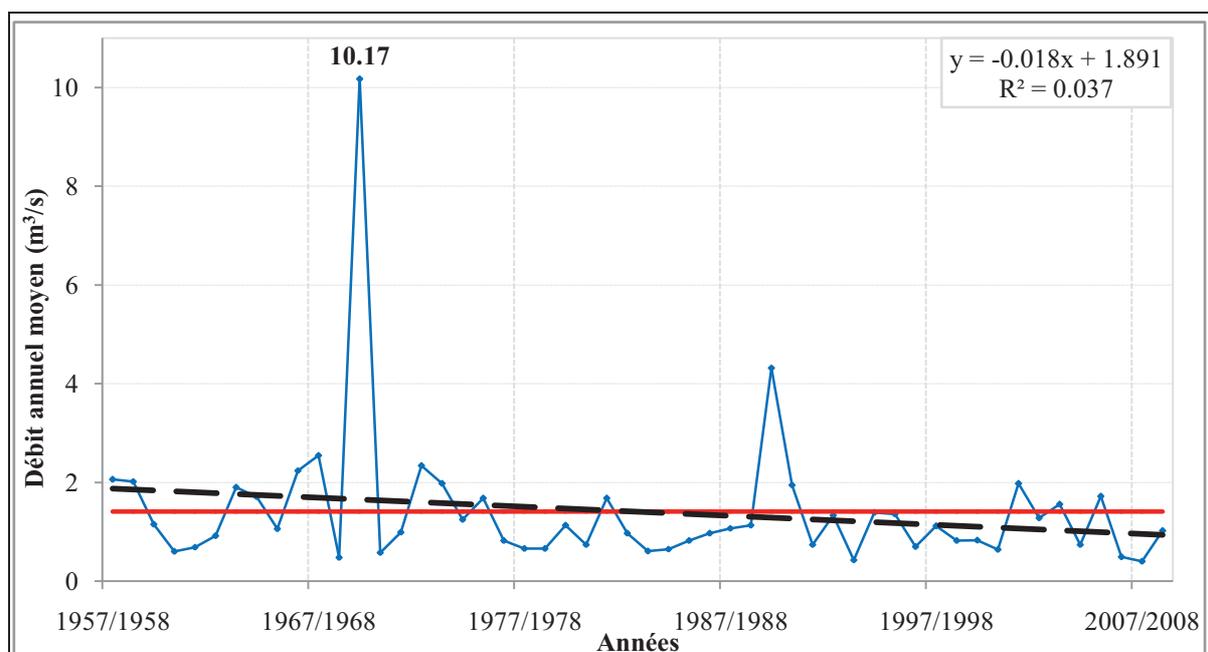


Figure 2.12: Les débits annuels moyens d'oued El Fekka à la station de Khanguet Zazia entre 1957 et 2009. (Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, Source *des données brutes* : D.G.R.E).

Pour Sidi Bouzid, on dispose d'une série de débits annuels moyens plus longue qui s'étale sur une période de 52 ans. Ces débits sont observés sur l'oued El Fekka à la station de Khanguet Zazia. L'analyse de la courbe (Fig 2.12), laisse voir que le 1/3 des années se caractérise par des débits annuels moyens au dessus de la moyenne avec deux pics marquant les années excédentaires avec des importants débits : Il s'agit des années agricoles (1969-1970) avec 10,17 m³/s et (1989-1990) avec 4,32 m³/s (Soit respectivement 7 et 3 fois la moyenne annuelle). Ces débits annuels moyens cachent une très grande variabilité à la fois saisonnière, mensuelle et même journalière. Ce sont les crues majeures qui déterminent l'abondance annuelle des oueds.

2-3-2-2- Répartition mensuelle et irrégularité saisonnière des débits

Différemment à la pluviométrie, ce sont plutôt l'automne et l'hiver qui cumulent les débits les plus élevés, (Tableau.2.8).A Haffouz Téléphérique ainsi qu'à Sidi Saâd Aval, les débits enregistrés en automne représentent successivement 1,69 et 2,97 fois la moyenne annuelle.

Tableau.2.8. Les débits mensuels et saisonniers moyens aux stations de Haffouz Téléphérique (1991-2011) et de Sidi Saâd Aval (1956-1978)

Mois Données	Station	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J ^t	A ^t	Moy. annuelle
Q. mensuel moyen (m ³ /s)	Haffouz Téléphérique	1,84	0,74	0,43	0,32	0,74	0,72	0,3	0,45	0,41	0,46	0,07	0,64	0,59
	Sidi Saâd Aval	26	32,68	2,99	3,92	1,23	2,03	2,65	1,68	1,91	3,62	1,27	2,89	6,91
Q. saisonnier moyen (m ³ /s)	Haffouz Téléphérique	Automne			Hiver			Printemps			Eté		0,59	
		1			0,59			0,39			0,39			
	Sidi Saâd Aval	20,56			2,39			2,08			2,6		6,91	

(Source des données brutes : D.G.R.E).

Le régime saisonnier des débits est le même pour les 2 stations, il est de type « **A.H.E.P** » : (Automne-Hiver-Eté-Printemps), qui sont classés par ordre décroissant selon l'importance des débits. A l'échelle mensuelle, c'est plutôt le mois de septembre à la station de Haffouz Téléphérique qui cumule les plus forts débits avec 1,84 m³/s (plus que 3 fois la moyenne annuelle), suivi des mois d'octobre, janvier puis février. Le régime mensuel, est donc de type « **S.O.J.F** ». À Sidi Saâd Aval, le mois d'octobre prend le premier rang avec 32,68 m³/s (environ 5 fois la moyenne annuelle), suivi des mois de septembre, décembre et janvier. Pour l'oued Zeroud, le régime mensuel des débits est de type « **O.S.D.J** ».

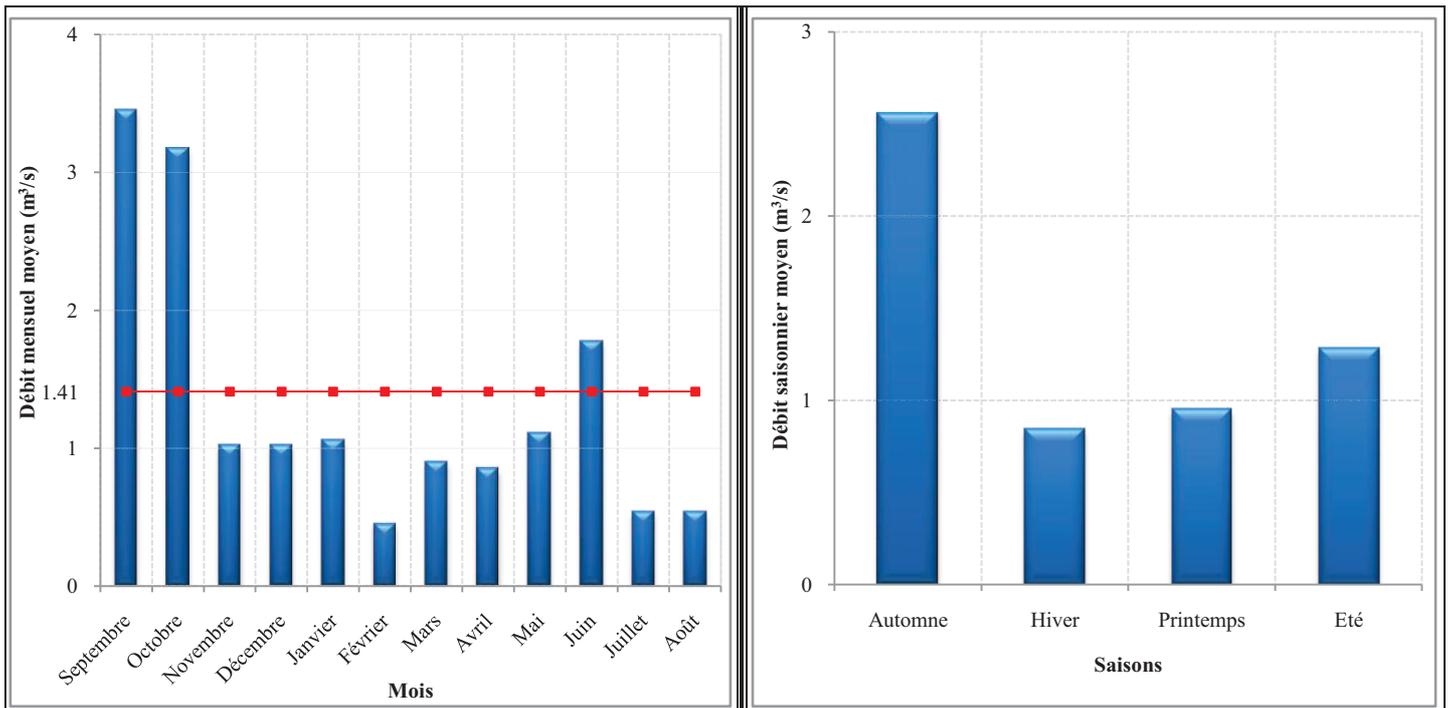


Figure 2.13: Les débits mensuels (à gauche) et saisonniers (à droite) moyens d'oued El Fekka à la station de Khanguet Zazia entre 1957 et 2009. (Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, Source des données brutes : D.G.R.E).

À la station de Khanguet Zazia, les débits saisonniers se caractérisent par un régime un peu particulier où l'été est classé au deuxième rang après l'automne. Trois mois seulement représentent un débit mensuel moyen supérieur à la moyenne annuelle. Il s'agit par ordre d'importance des mois de septembre, octobre et juin. Les mois de janvier et de décembre sont placés au cinquième et sixième rang alors que les plus fortes crues que la ville de Sidi Bouzid a vécues se sont produites lors de ces deux mois. Ceci, exige la nécessité d'affiner l'échelle et d'étudier la réparation des débits à l'échelle journalière (Cf. Partie 2).

2-3-3- Caractéristiques morphométriques du bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et du bassin versant de l'oued El Fekka

Ces bassins versants se caractérisent aussi par un réseau hydrographique dense qui atteint, selon la hiérarchisation de Stahlér 1957, le rang 4 pour le bassin versant de l'oued El Fekka (Les rangs 5 et 6 sont accordés respectivement aux oueds Serg Dhiba et El Fekka) et le rang 5 pour le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan (Le rang 6 est accordé aux oueds Zeroud et Merguellil). Les caractéristiques morphométriques de ces deux bassins (Tableau.2.9), permet de constater un nombre important des segments de cours d'eau d'ordres inférieurs. Le nombre des cours d'eau de rang 1 est de l'ordre de 938 pour le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et 432 pour celui de l'oued El Fekka. Ceci, « est cause d'une réponse rapide du réseau hydrographique aux pluies torrentielles, car ces bassins ont un fort caractère torrentiel » (Grecu et al., 2007).

Tableau. 2.9: Caractéristiques morphométriques du bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et du bassin versant de l'oued El Fekka¹

	A (km ²)	Rang 1				Rang 2				Rang 3				Rang 4				Rang 5				Rang 6			
		L ₁	N ₁	F ₁	D ₁	L ₂	N ₂	F ₂	D ₂	L ₃	N ₃	F ₃	D ₃	L ₄	N ₄	F ₄	D ₄	L ₅	N ₅	F ₅	D ₅	L ₆	N ₆	F ₆	D ₆
B.V septentrional de la plaine de Kairouan	727,16	428,23	938	1,29	0,59	219,01	207	0,28	0,3	98,14	30,06	0,13	54,21	12	0,03	0,07	18,5	1	0,001	0,03	57,54	2	0,003	0,08	
B.V de l'oued El Fekka	864,29	348	432	0,5	0,4	159,42	129	0,15	0,18	86,23	33	0,04	0,1	1,41	1	0,001	0,002	34,2	1	0,001	0,04	42,1	1	0,001	0,05

La densité du drainage, définie par (Horton, 1945), comme le rapport de la longueur totale du réseau hydrographique sur la surface du bassin versant, est très faible pour ces deux bassins versants. Elle ne dépasse guère le 1,2 Km/Km² pour le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et 0,78 Km/Km² pour celui de l'oued El Fekka (Tableau.2.10).

Tableau.2.10: La densité du drainage

	Superficie (Km ²)	Longueur totale des cours d'eau (Km)	Densité de drainage (Km/Km ²)
B.V septentrional de la plaine de Kairouan	727,16	875,63	1,2
B.V de l'oued El Fekka	864,29	671,31	0,78

La faiblesse de la densité de drainage est étroitement liée aux caractéristiques topographiques, des conditions climatologiques, anthropiques et essentiellement de la géologie (structure et lithologie) des bassins versants. En ce qui suit, on essayera d'étudier la lithologie des bassins versants étudiés, et ce en déterminant les différents groupes hydrologiques des sols, entre autres leur potentiel d'écoulement superficiel.

2-4- Les groupes hydrologiques des sols : Le potentiel de ruissellement superficiel

Le potentiel d'écoulement superficiel est proportionnel au potentiel d'infiltration. Plus ce dernier est faible plus le potentiel de ruissellement est élevé. Le NRCS (Natural Resources Conservation Service), autrefois appelé SCS (Soil Conservation Service) a classé les sols en quatre catégories de par leur potentiel de ruissellement (Tableau.2.11):

Tableau.2.11 : Description des groupes des sols

Groupe	Description
A	Faible potentiel de ruissellement. Sols présentant des taux élevés d'infiltration même lorsque saturés et étant principalement constitués en profondeur de sable ou gravier bien drainés ou excessivement bien drainés. Ces sols possèdent un haut taux de transmission de l'eau infiltrée.
B	Sols avec des taux d'infiltration moyen lorsque saturés, composés essentiellement de sable ou gravier modérément drainés à bien drainés sur des profondeurs modérées à importantes, avec des textures modérément fines à modérément grossières. Ces sols possèdent un taux modéré de transmission de l'eau.

¹ A = Superficie (en km²); L_(n) = Longueur du réseau hydrographique total et de rang n (en km) ; D = Densité de drainage ; N_n = Nombre de canaux de rang n ; F = Densité hydrographique calculée pour un rang n.

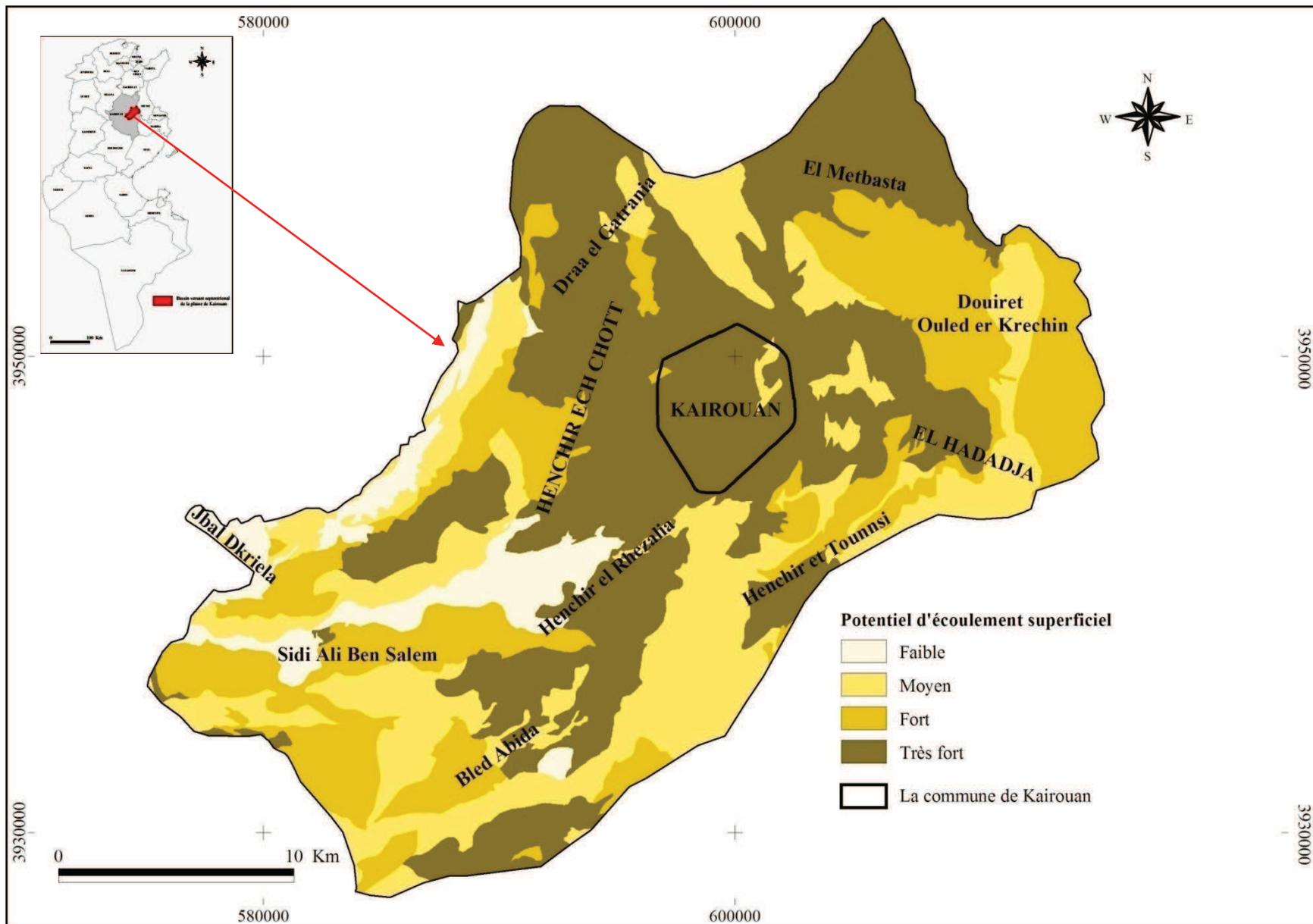


Figure 2.14: Potentiel d'écoulement superficiel dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, d'après cartes agricoles de Sousse et Kairouan au 1/50000, Année : 2000)

C	Sols présentant des taux d'infiltration lents lorsque saturés, composés principalement de sols avec une couche qui retarde le mouvement vertical de l'eau ou de sols avec une texture modérément fine à fine. Ces sols ont un taux de transmission de l'eau qu'on peut qualifier de faible.
D	Potentiel élevé de ruissellement. Sols avec de très faibles taux d'infiltration lorsque saturés, constitués principalement d'argile en surface ou à une faible profondeur ou de sols avec une nappe phréatique haute en permanence. Ces sols présentent un très faible taux de transmission de l'eau.

Source : (NRCS (Natural Resources Conservation Service., 1986) in M.D.D.E.F.P et M.A.M.R.O.T (Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs et Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (Québec)., 2011)

Pour la cartographie de potentiel d'écoulement superficiel, on s'est inspiré du modèle « PAP/CAR »², qui nous permet de distinguer les différents groupes hydrologiques des sols en déterminant leurs caractéristiques physico-chimiques. Ceci, en se basant sur trois paramètres fondamentaux à savoir : La roche mère, la texture et la profondeur, et ce selon la formule suivante (Fig. 2.15):

Potentiel d'écoulement superficiel= Roche mère × Texture + Profondeur					
					
×	Roche mère				+
Texture	Roches très dures (RM_val = 2)	Roches dures (RM_val = 4)	Roches friables (RM_val = 6)	Roches très friables (RM_val = 8)	Profondeur
Texture grossière (TXT_val = 1)	2	4	6	8	Sols profonds (PR_val = 0)
	3	5	7	9	Sols moyennement profonds (PR_val = 1)
	4	6	8	10	Sols subtiles (PR_val = 2)
Texture moyenne (TXT_val = 2)	4	8	12	16	Sols profonds (PR_val = 0)
	5	9	13	17	Sols moyennement profonds (PR_val = 1)
	6	10	14	18	Sols subtiles (PR_val = 2)
Texture fine (TXT_val = 3)	6	12	18	24	Sols profonds (PR_val = 0)
	7	13	19	25	Sols moyennement profonds (PR_val = 1)
	8	14	20	26	Sols subtiles (PR_val = 2)

Figure.2.15: Méthodologie de calcul du potentiel d'écoulement superficiel

² C'est un modèle adoptée par les services cartographie la sensibilité à l'érosion de la D.G.A.C.T.A (Direction Générale d'Aménagement et de Conservation des Terres Agricoles), relevant du Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques.

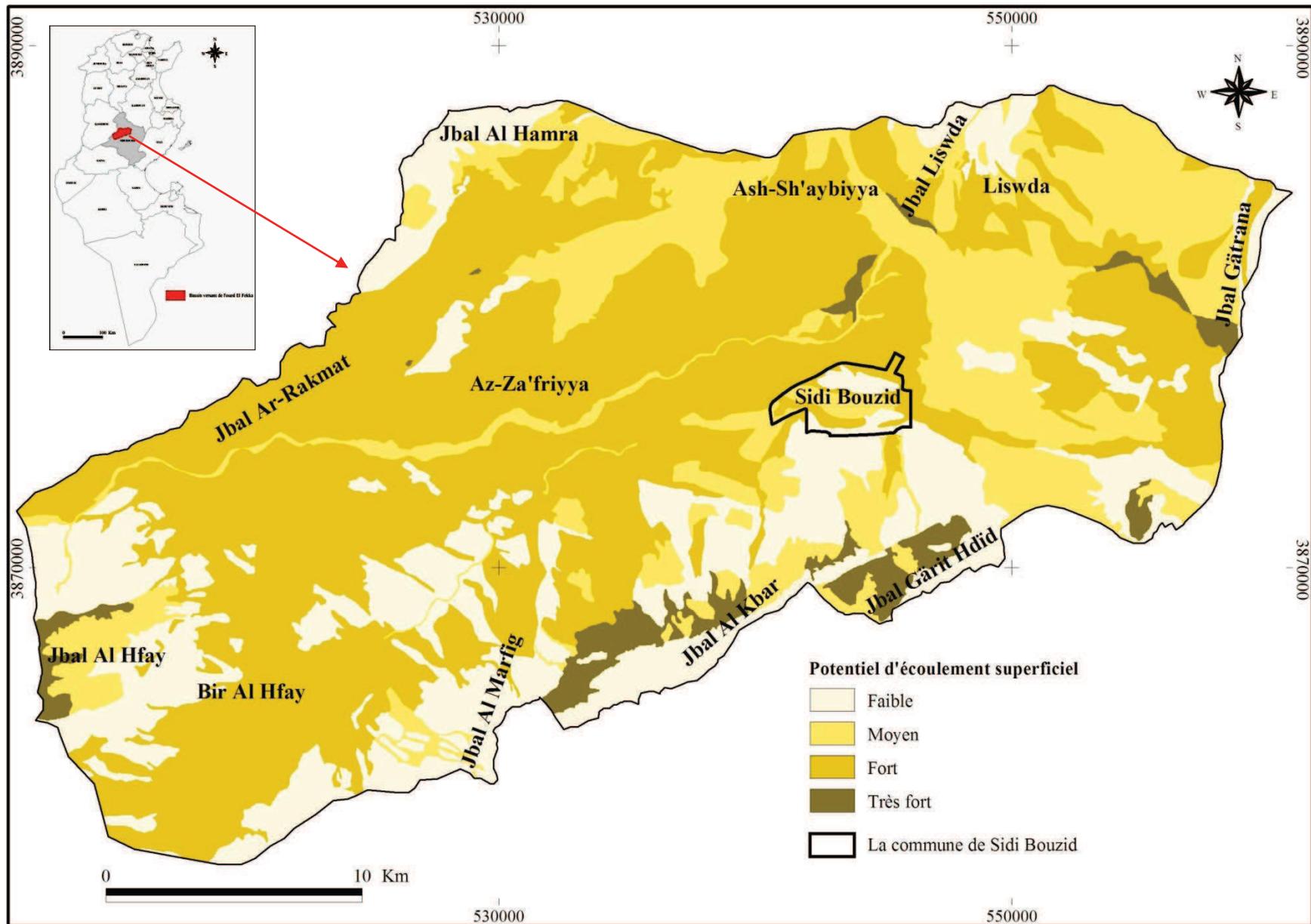


Figure 2.16: Potentiel d'écoulement superficiel dans le bassin versant de l'oued El Fekka (**Source :** Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, d'après cartes agricoles de Sidi Bouzid et Kasserine au 1/50000, Année : 2000)

Les résultats, mentionnés dans le (Tableau.2.12) et qui sont bien illustrés dans les figures 2.14 et 2.16, montrent une prédominance du groupe des sols D a très fort potentiel d'écoulement superficiel pour le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan. Ce dernier, couvre 43,08 % de la superficie totale du bassin versant soit 313,24 Km². Le bassin versant de l'oued El Fekka, est dominé par le groupe des sols C qui se caractérise par un fort potentiel d'écoulement superficiel qui s'étale sur plus que la moitié de sa superficie totale. La dominance remarquable des groupes des sols C et D, augmentent sans doute les aires de propagation des crues pour les bassins versants étudiés. Il est à noter qu'une étude minutieuse du potentiel de ruissellement à l'échelle des deux villes sera présentée dans la troisième partie.

Tableau.2.12: Répartition surfacique du potentiel d'écoulement superficiel dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan (1) et le bassin versant de l'oued El Fekka (2) *

	Potentiel d'écoulement superficiel	Intervalles	Groupes de sols	Superficie 1 en (Km ²)	(%)	Superficie 2 en (Km ²)	(%)
	Faible	2 - 7	A	45,94	6,32	198,83	23,01
	Moyen	8 - 13	B	188,34	25,9	198,78	23
	Fort	14 - 19	C	179,64	24,7	437,45	50,61
	Très fort	20 - 26	D	313,24	43,08	29,23	3,38

*Les intervalles choisis sont tous des classes d'égale amplitude.

2-5- Les types d'occupation des sols

2-5-1- Les types d'occupation des sols dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et le bassin versant de l'oued El Fekka

Les activités humaines et leurs modes d'occupation des sols influencent différemment sur la susceptibilité des terrains au risque inondation : Un terrain entièrement bâti accentue le ruissellement alors qu'un terrain bien couvert de végétation minimise la vitesse d'écoulement et favorise l'infiltration. Pour l'étude de l'occupation des sols du bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et celui de l'oued El Fekka, on s'est basé sur les couches vectorielles d'occupation des sols datant des années 2000 et qui sont extraites des cartes agricoles de : Sousse, Kairouan, Sidi Bouzid et Kasserine à l'échelle 1/50000.

L'examen du tableau 2.13 et des figures 2.17 et 2.18, laisse voir que la majorité de la superficie des bassins versants étudiés est dominée par les parcours, les céréales et les oliviers. Ces types d'occupation des sols, s'étalent sur environ 516,38 Km² pour le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et sur 658,94 Km² pour le bassin versant de l'oued El Fekka (Soit plus que 70% de la superficie totale des deux bassins versants). Pour la forêt qui a un rôle protecteur des sols vis-à-vis du risque inondation, ne présente qu'une superficie minimale d'environ 3,4 Km² pour le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et elle est même négligeable pour le bassin versant de l'oued El Fekka. Elle couvre seulement 0,06 ha de sa superficie.

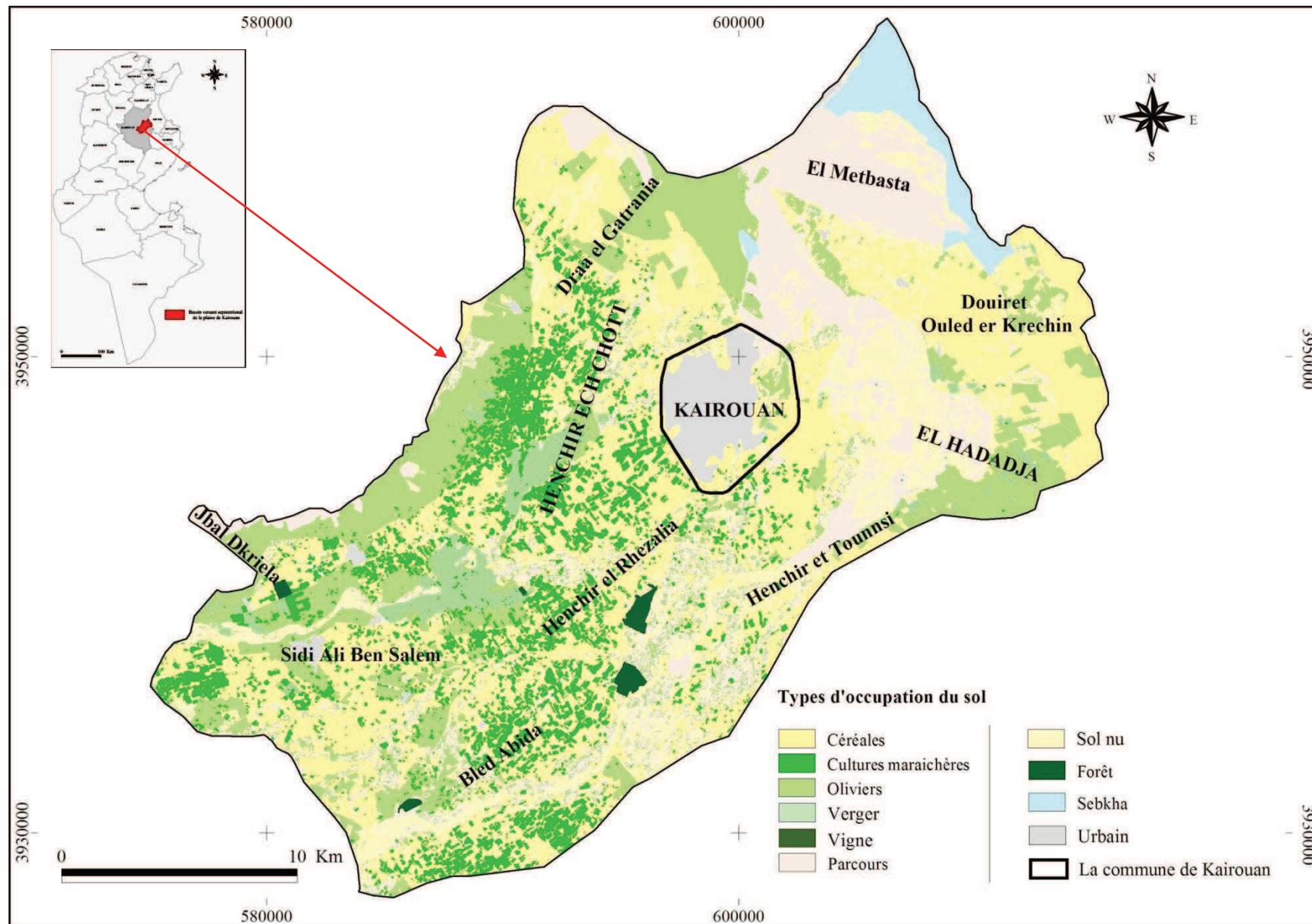


Figure 2.17: Types d'occupation du sol dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, d'après cartes agricoles de Sousse et Kairouan au 1/50000, Année : 2000)

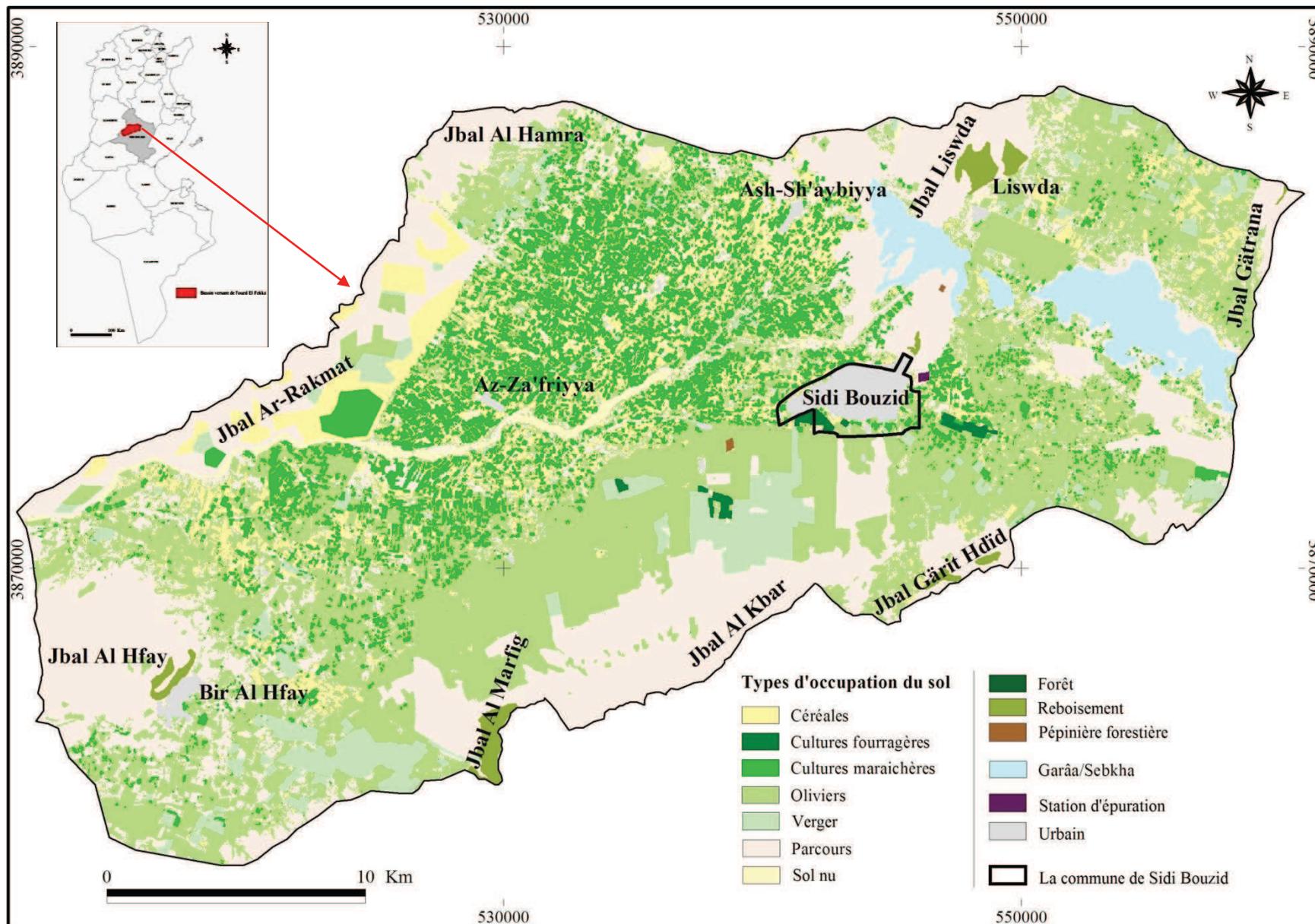


Figure 2.18: Types d'occupation du sol dans le bassin versant de l'oued El Fekka (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, d'après cartes agricoles de Sidi Bouzid et Kasserine au 1/50000, Année : 2000)

Tableau.2.13: Répartition surfacique des types d'occupation dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan (à gauche) et dans le bassin versant de l'oued El Fekka (à droite)

N°	Types d'occupation	Superficie en (Km ²)	N°	Types d'occupation	Superficie en (Ha)
1	Parcours	122,94	1	Parcours	25783,47
2	Céréale	260,2	2	Céréale	9078,5
3	Sol nu	81,77	3	Sol nu	1148,13
4	Urbain	19,59	4	Urbain	1106,44
5	Sebkha	16,8	5	Sebkha/Chott/Garaa	2583,12
6	Olivier	133,24	6	Olivier	31033,13
7	Culture maraichère	71,59	7	Culture maraichère	10489,32
8	Verger	17,62	8	Verger	4200,19
9	Vigne	0,01	9	Culture fourragère	243,44
10	Forêt	3,4	10	Forêt	0,06
Total		727,16	11	Forêt artificielle	732,63
			12	Pépinière forestière	16,94
			13	Station d'épuration	13,63
			Total		86429

2-5-2- Evolution de l'occupation des sols dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid

Une étude de l'évolution de l'occupation des sols à une échelle plus fine a été réalisée pour les villes de Kairouan (entre 1950 et 2015) et Sidi Bouzid (entre 1950 et 2014). Cette analyse multi-dates de l'occupation des sols (Figures 2.19, 2.20 et Tableau.2.14), permet d'avoir une idée sur les différentes étapes de leur évolution spatio-temporelle.

En 1950, les cultures annuelles dominent le paysage agricole autour de la commune de **Kairouan** en s'étalant sur environ 88,46 % de sa superficie. Ce type de cultures a connu une nette régression entre 1950 et 2015. Il a perdu environ 1809 ha de sa superficie. Ceci, au profit des espaces bâtis qui ont connu une extension notable notamment dans la partie ouest de la ville. Leur superficie est passée de 152,79 en 1950 à 1485,15 en 2015.

À **Sidi Bouzid**, ce sont les terrains arboricoles qui dominent la superficie de la ville actuelle en 1950. Ils couvrent 483,46 ha, (soit 42,43% de surface totale). Au bout de 64 ans (1950-2014), leur superficie a connu un net recul de 339 ha contre une évolution remarquable de tissu urbain. Les surfaces bâties qui n'occupaient qu'environ 3% de la superficie communale en 1950, s'étaient en 2014 sur presque la moitié de la superficie. Dans cette commune, l'étalement de la tache urbaine est plutôt remarquable dans sa partie est.

Ce phénomène d'imperméabilisation intensif des surfaces et terrains cultivables, accroît la vitesse des ruissellements et favorise entre autres la stagnation des eaux pluviales dans les bas-fonds. Ceci ne peut qu'amplifier les dégâts du risque inondation dans ces deux villes.

Tableau.2.14: Évolution surfacique des différents types d'occupation du sol dans les villes de Kairouan (1950-2015) et de Sidi Bouzid (1950-2014)

Ville	Kairouan						Sidi Bouzid					
	1950		2000		2015		1950		1993		2014	
Années	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%						
Types d'occupation	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%						
Oliveraie	18,62	0,63	26,18	0,88	-	-	71,63	6,26	160,72	14,1	-	-
Vergers	-	-	1,65	0,06	-	-	191,33	16,79	18,37	1,61	-	-
Vignobles	3,23	0,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cactus	161,57	5,43	-	-	-	-	201,24	17,66	-	-	-	-
Palmiers	2,38	0,08	-	-	-	-	19,26	1,69	-	-	-	-
Σ des superficies arboricoles	185,81	6,25	27,83	0,94	17,65	0,59	483,46	42,43	179,09	15,71	144,4	12,67
Bois	4,75	0,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Parcours	-	-	205,84	6,92	-	-	-	-	-	-	-	-
Cultures annuelles, friches et/ou pistes	2631,37	88,46	1416,05	47,6	821,52	27,62	624,78	54,83	497,49	43,66	196,54	17,25
Zones vertes	-	-	34,04	1,14	21,40	0,72	-	-	-	-	12,74	1,12
Fonciers non bâtis	-	-	-	-	543,67	18,28	-	-	-	-	204,25	17,92
Espaces bâtis + routes	152,79	5,14	1290,95	43,4	1485,15	49,93	31,32	2,75	462,98	40,63	556,13	48,8
Canal Fellet Galla	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25,5	2,24
Emprises et servitudes du Domaine Publique Hydraulique (Oued El Maleh)	-	-	-	-	85,31	2,87	-	-	-	-	-	-
Total	2974,71	100	2974,71	100	2974,71	100	1139,56	100	1139,56	100	1139,56	100

Conclusion

Les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid se situent sur des terrains plats à pente faible qui se caractérisent par la prédominance des sols à fort et très fort potentiel de ruissellement superficiel. Ces terrains sont traversés par les deux grands cours d'eau de la Tunisie centrale à savoir le Zeroud et Merguellil. Le régime hydrologique de ces deux cours d'eau se caractérise par sa grande irrégularité. En effet, ils sont secs pendant des années mais en période de crues, ils se transforment en des vrais torrents causant des dommages souvent graves. L'étude de l'évolution de l'occupation des sols de ces deux villes, permet de distinguer une extension sans précédent de l'espace bâti sur des terrains fortement inondables. L'empiètement des cours d'eau ne peut qu'aggraver la situation lors des événements pluvieux extrêmes.



Figure 2.19: Évolution de l'occupation du sol dans la ville de Kairouan entre 1950 à 2015 (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, d'après feuille topographique de Kairouan au 1/50000 ; carte agricole de Kairouan au 1/50000, Année : 2000 ; ortho-photos mission 2000 (I.G.N), couvrant la totalité de la ville de Kairouan ; plan d'aménagement urbains de la commune de Kairouan à l'échelle 1/5000 de 2010 (Mise à jour : Extraits « Google Earth » de 2015))



Figure 2.20: Évolution de l'occupation du sol dans la ville de Sidi Bouzid entre 1950 à 2014 (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, d'après feuilles topographiques de Sidi Bouzid au 1/50000, 1950 et 1993 ; plan d'aménagement urbains de la commune de Sidi Bouzid à l'échelle 1/2000 de 2002 (Mise à jour : Extraits « Google Earth » de 2014))

Chapitre 3

Caractéristiques climatiques

3-1- Les facteurs géographiques et aérologiques

Les fortes précipitations sont considérées souvent à l'origine des inondations les plus mémorables. Selon (Roux, 1996), trois grands mécanismes sont générateurs de précipitations : Les précipitations liées au passage d'une perturbation frontale, à une convection locale ou celles orographiques. Ces mécanismes peuvent survenir ensemble et se compléter.

Kairouan et Sidi Bouzid appartiennent à un étage bioclimatique semi-aride et connaissent souvent un régime pluviométrique particulier qui se caractérise par sa variabilité spatio-temporelle et son irrégularité. Ceci, est lié essentiellement à deux facteurs fondamentaux. Il s'agit : Des caractères de la circulation atmosphérique ainsi que des facteurs géographiques.

3-1-1-Les facteurs géographiques

La Tunisie centrale apparaît comme une zone intermédiaire entre le bassin occidental de la méditerranée au nord et le plein désert du sud (Hénia, 1993). Sa position en altitude associée à sa topographie moins accidentée donne une certaine régularité de la distribution des éléments du climat.

Cette région, se caractérise aussi par une large atténuation des effets d'abri et une pénétration assez profonde des flux de secteur est. Ceci est dû à l'ouverture face aux golfes de Hammamet et de Gabès et à l'allure péninsulaire du Sahel. (Hénia et El Melki, 2015).

L'effet rafraîchissant de la mer n'est pas senti dans cette région. La distance des stations de Kairouan et de Sidi Bouzid par rapport à la mer est assez importante. Ben Boubaker, (2000), a calculé la distance minimale, à vol d'oiseau, qui sépare chacune des stations du rivage le plus proche parallèlement à 4 directions : Nord-ouest, nord, nord-est et est (Tableau.3.1).

Tableau.3.1: Distance minimale par rapport à la mer pour les deux stations de Kairouan et de Sidi Bouzid

Stations	Distance (Km)			
	N-O	N	N-E	E
Kairouan	220	174	54	80
Sidi Bouzid	320	238	140	140

Source: (Ben Boubaker, 2000)

L'examen du tableau n°3.1, laisse voir que le rivage le plus proche est du côté N-E. Il est distant respectivement de 54 et 140 Km des stations de Kairouan et de Sidi Bouzid. Ceci explique le régime continental du climat, qui caractérise la Tunisie Centrale.

3-1-2- Les facteurs aérologiques

Kassab F., (1979), affirme que « l'orientation des perturbations génératrices de pluie est la donnée essentielle nécessaire à la compréhension de la répartition géographique des pluies ».

Pour la Tunisie centrale, ce sont essentiellement les situations de « **Retour d'Est** » qui sont responsables des précipitations pluvieuses diluviennes. (Hénia et El Melki, 2000).

Les circulations de retour d'est qui fournissent entre 51 et 60 % de la pluviométrie annuelle de la Tunisie centrale (Fig.3.1), « s'établissent lorsque une dorsale anticyclonique prolonge au sol l'anticyclone des Açores vers l'est de l'Europe, elle couvre la quasi-totalité de la Méditerranée occidentale et déborde sur le Maroc, l'Algérie et le nord de la Tunisie, une petite cellule de basses pressions se localise au large des côtes orientales de la Tunisie, entre les golfes de Hammamet et Syrte. Le Golfe de Gabès notamment, avec ses eaux relativement chaudes en hiver, constitue un domaine très favorable à l'apparition de ce type de dépressions ». (Hénia et El Melki, 2015).

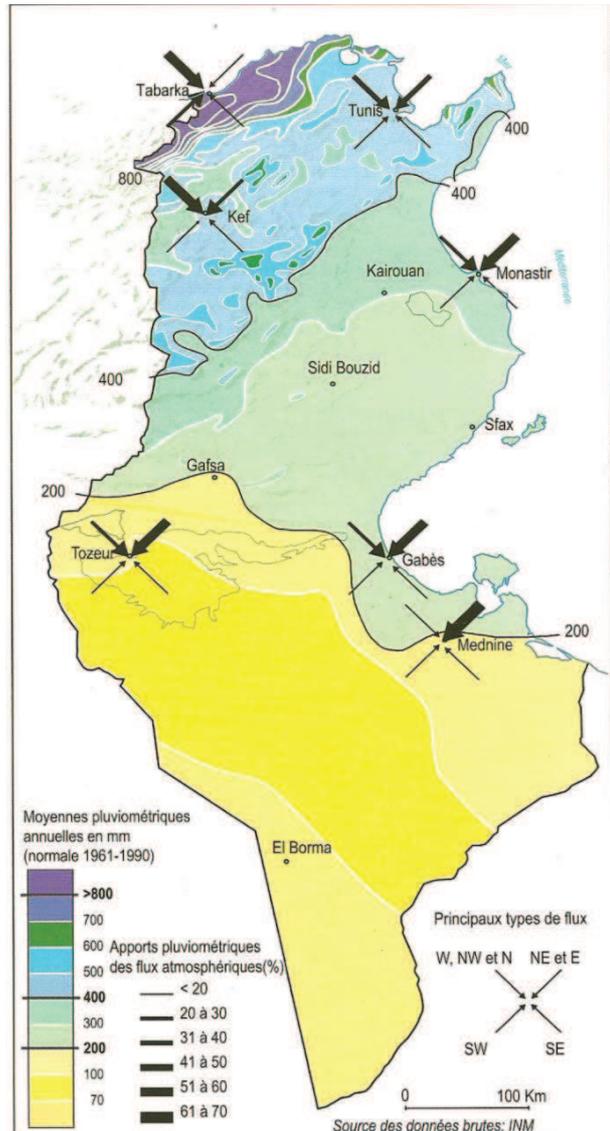
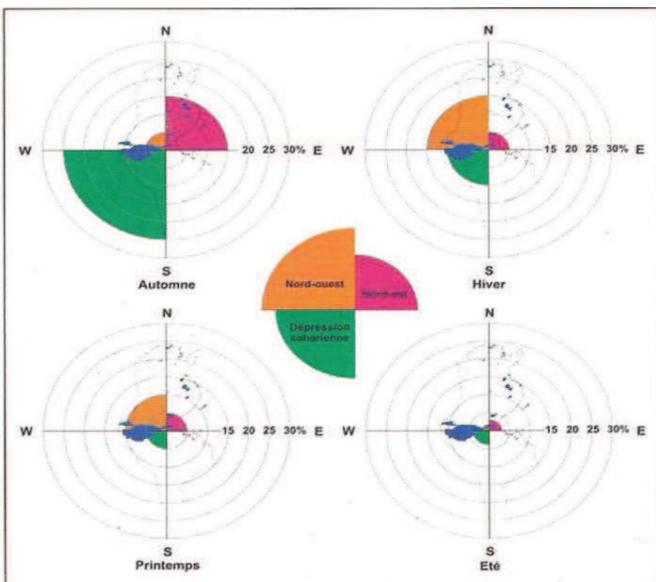


Figure 3.1 : Pluie annuelle et apports des flux atmosphériques. **Source :** (El Melki, 2015)



En hiver, comme en automne les courants perturbés de Nord-est sont à l'origine des pluies à risque en Tunisie centrale (Fig.3.2). Ces pluies torrentielles, sont celles définies par Kassab, (1979), comme des pluies qui fournissent des quantités pluviométriques journalières supérieures ou égales à 30 mm.

Figure 3.2:Fréquences saisonnières des circulations atmosphériques génératrices des pluies à risque en Tunisie entre 1969 et 2008. **Source :** (Dallel, 2015)

3-2-Caractéristiques pluviométriques moyennes

3-2-1- Irrégularité interannuelle de la pluviométrie

Les moyennes pluviométriques annuelles aux stations de Kairouan SM (1959 – 2013) et Sidi Bouzid Ferme 20 (1971 – 2014) sont respectivement, de l'ordre de 301,7 mm et 294,8mm. Ces moyennes annuelles cachent une grande variabilité des pluies. Les courbes suivantes (Fig.3.3), montrent une variabilité des totaux pluviométriques interannuels. L'année agricole la plus arrosée est différente entre les 2 stations. Il s'agit de l'année agricole (1969 - 1970) à la station de Kairouan SM, avec une moyenne pluviométrique de l'ordre de 634 mm et de l'année agricole (1989 - 1990) à la station de Sidi Bouzid Ferme 20, avec une moyenne pluviométrique de l'ordre de 529,5 mm. Ces maxima pluviométriques annuels dépassent successivement 2,1 et 1,8 fois la moyenne annuelle et environ 6 et 4,6 fois l'écart type des 2 stations. Les minima, sont enregistrés à l'année agricole (2000 - 2001) pour la station de Kairouan SM, avec un total pluviométrique de l'ordre de 152,4 mm (la moitié de la moyenne annuelle pour une période de 54 ans) et à l'année agricole (1987 - 1988) pour la station de Sidi Bouzid Ferme 20, avec une moyenne pluviométrique de l'ordre de 110,2 mm (0,37 fois la moyenne annuelle pour une période de 43 ans).

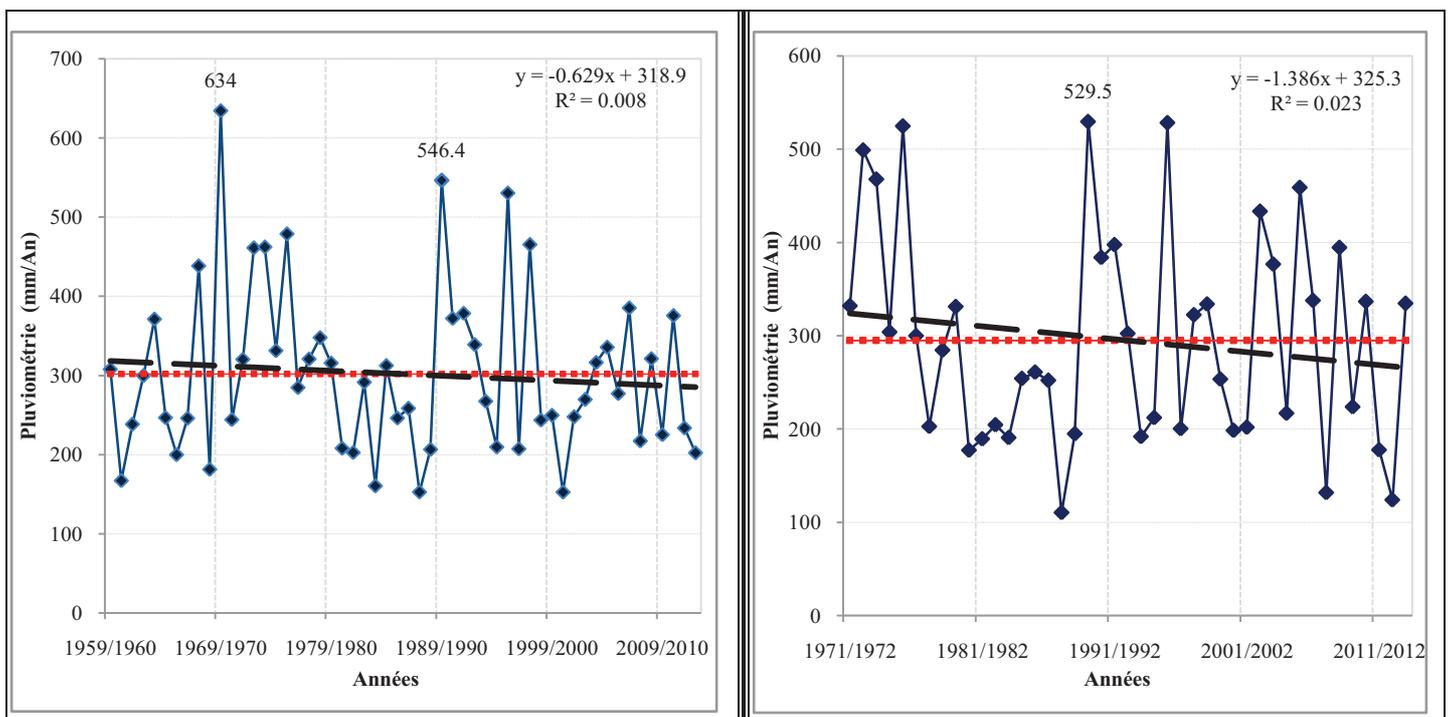


Figure 3.3: Variabilité des totaux pluviométriques interannuels à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 (à gauche) et Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971 et 2014 (à droite). (Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, Source des données brutes : D.G.R.E)

La Tunisie centrale, est la zone la plus touchée par la variabilité du climat, essentiellement des pluies. En effet, cette région se caractérise par une grande irrégularité interannuelle des précipitations. Elle balance, de par ses totaux pluviométriques et selon les années, dans deux domaines climatiques opposés, saharien ou méditerranéen. (Hénia, 1993). Pour calculer le nombre des années excédentaires et déficitaires pour chaque série pluviométrique, nous avons opté pour la méthode de « L'écart à la moyenne ». Il ressort de l'analyse de la figure ci-dessus, qu'à la station de Kairouan SM et pour une période de 54 ans

entre 1959 et 2013 on a pu compter 30 années excédentaires et 24 déficitaires. A la station de Sidi Bouzid Ferme 20 et pour une période de 43 ans entre 1971 et 2014, on a pu remarquer une égalité dans la répartition des années. Il s'agit précisément de 22 ans déficitaires et de 21 excédentaires.

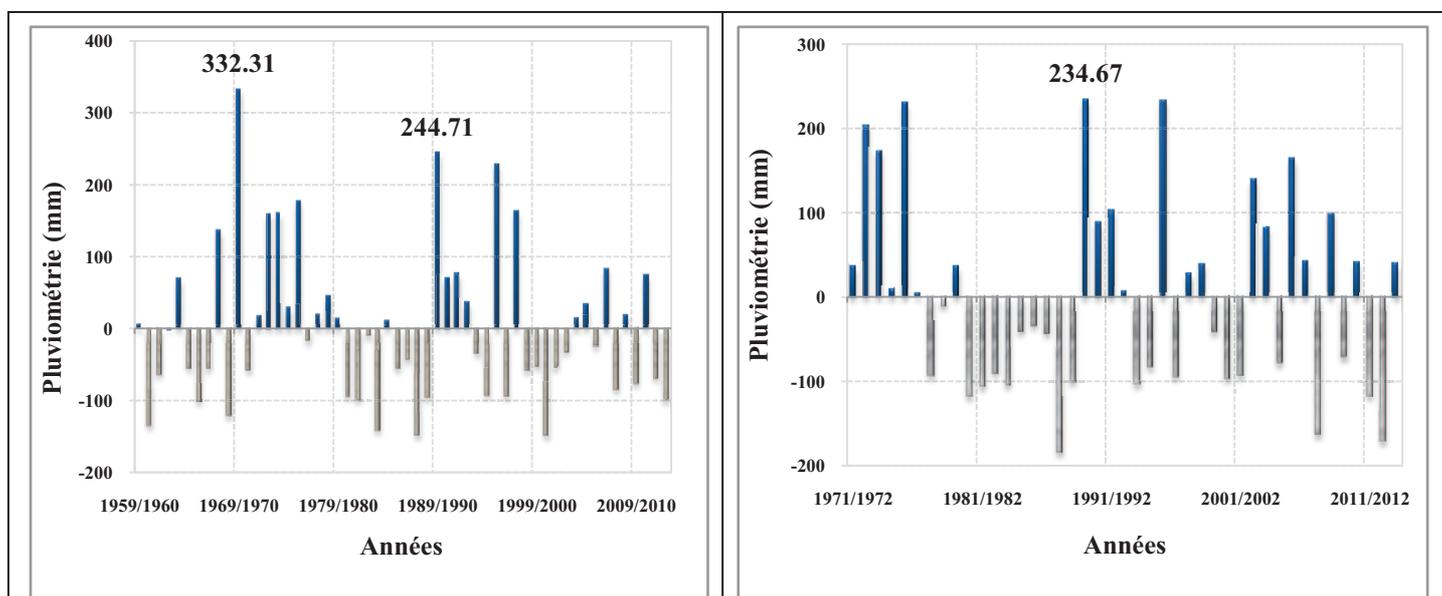


Figure 3.4: L'écart à la moyenne annuelle de la pluviométrie à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 (à gauche) et Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971 et 2014 (à droite). (Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, Source *des données brutes* : D.G.R.E)

En se basant sur l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI), qui met en relation le cumul de la pluie pour une année i (X_i), la moyenne (X_m) et l'écart-type (S_i) des pluies annuelles selon la formule suivante, Faye, (2015) : $SPI = (X_i - X_m) / S_i$, on a pu constater que :

Pour 43 ans d'observations à la station de Sidi Bouzid Ferme 20, il n'y a eu que deux années très humides [$1,5 \leq SPI < 2$] (les années agricoles : 1972/1973 et 1973/1974) et trois années extrêmement humides [$SPI \geq 2$] (les années agricoles : 1975/1976 ; 1989/1990 et 1995/1996). Ces années humides, se distinguent par un caractère méditerranéen où on peut enregistrer un surplus d'eau important qui peut être à l'origine d'un ruissellement fort et parfois des inondations et des crues d'oueds catastrophiques. (Hénia, 1993). A partir de cette année agricole 1995/1996, on remarque une très grande variabilité interannuelle des pluies. On constate à la fois une égalité et une alternance entre les années humides et celles déficitaires (9 ans pour chacune).

À la station de Kairouan et pour une série d'observations qui s'étend entre 1959 et 2013, il n'y a eu que quatre années très humides [$1,5 \leq SPI < 2$] (les années agricoles : 1972/1973 ; 1973/1974 ; 1975/1976 et 1997/1998) et trois années extrêmement humides [$SPI \geq 2$] (les années agricoles : 1969/1970 ; 1989/1990 et 1995/1996). A partir de 1998/1999, la majorité des années (10 années sur 15) sont déficitaires, (Nasrallah et al., 2017).

3-2-2- Répartition mensuelle et irrégularité saisonnière de la pluviométrie

L'analyse du tableau ci-dessous, laisse voir que ce sont les saisons intermédiaires (l'automne et le printemps), qui accumulent les maximums pluviométriques. Ce sont des saisons agitées qui se caractérisent par un temps incertain et changeant et des pluies catastrophiques qui totalisent des abats d'eau importantes. (Kassab, 1979).

Tableau.3.2.Répartition mensuelle et saisonnière des précipitations pluvieuses aux stations de Kairouan SM (1959-2013) et de Sidi Bouzid Ferme 20 (1971-2014)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J ^t	A ^t	Moy. annuelle
P. mensuelle à Kairouan (mm)	42,31	44,47	26,94	30,35	26,21	22,46	31,49	29,01	22,06	9,67	4,09	12,63	301,69
P. mensuelle à Sidi Bouzid (mm)	38,65	31,38	23,72	25,14	30,4	19,32	32,02	29,01	25,67	14,12	8,46	16,94	294,83
P. saisonnière à Kairouan (mm)	Automne			Hiver			Printemps			Eté			301,69
	113,72			79,02			82,56			26,39			
P. saisonnière à Sidi Bouzid (mm)	93,75			74,86			86,7			39,52			294,83

(Source des données brutes : D.G.R.E)

À la station de Kairouan SM, la moyenne les pluies enregistrées en automne et au printemps pour une période de 54 ans, sont de l'ordre de 113,72 mm et 82,56 mm (plus de 65% des quantités pluviométriques annuelles). Quant à la station de Sidi Bouzid Ferme 20 (1971-2014), les quantités pluviométriques moyennes sont successivement 93,75 mm et 86,7 mm, soit un total de 61,21 % de la pluviométrie annuelle moyenne. En fait, le calcul de la répartition mensuelle de la pluviométrie en (%) aux stations de Kairouan SM et Sidi Bouzid Ferme 20 (Fig.3.5), permet de constater que la classification des mois qui détiennent les maxima pluviométriques les plus élevés, se diffère d'une station à une autre. A Kairouan c'est le mois d'octobre qui participe avec le plus grand pourcentage de la pluviométrie annuelle avec 14,73%, suivi des mois de septembre (14,03 %), mars(10,44 %) et décembre (10,06 %). A Sidi Bouzid, le premier rang est attribué au mois de septembre avec (13,11 %), puis octobre (10,64 %), mars (10,86 %) et janvier (10,31 %). Le régime pluviométrique mensuel par ordre décroissant est donc **O.S.M.D** à Kairouan et **S.O.M.J** à Sidi Bouzid.

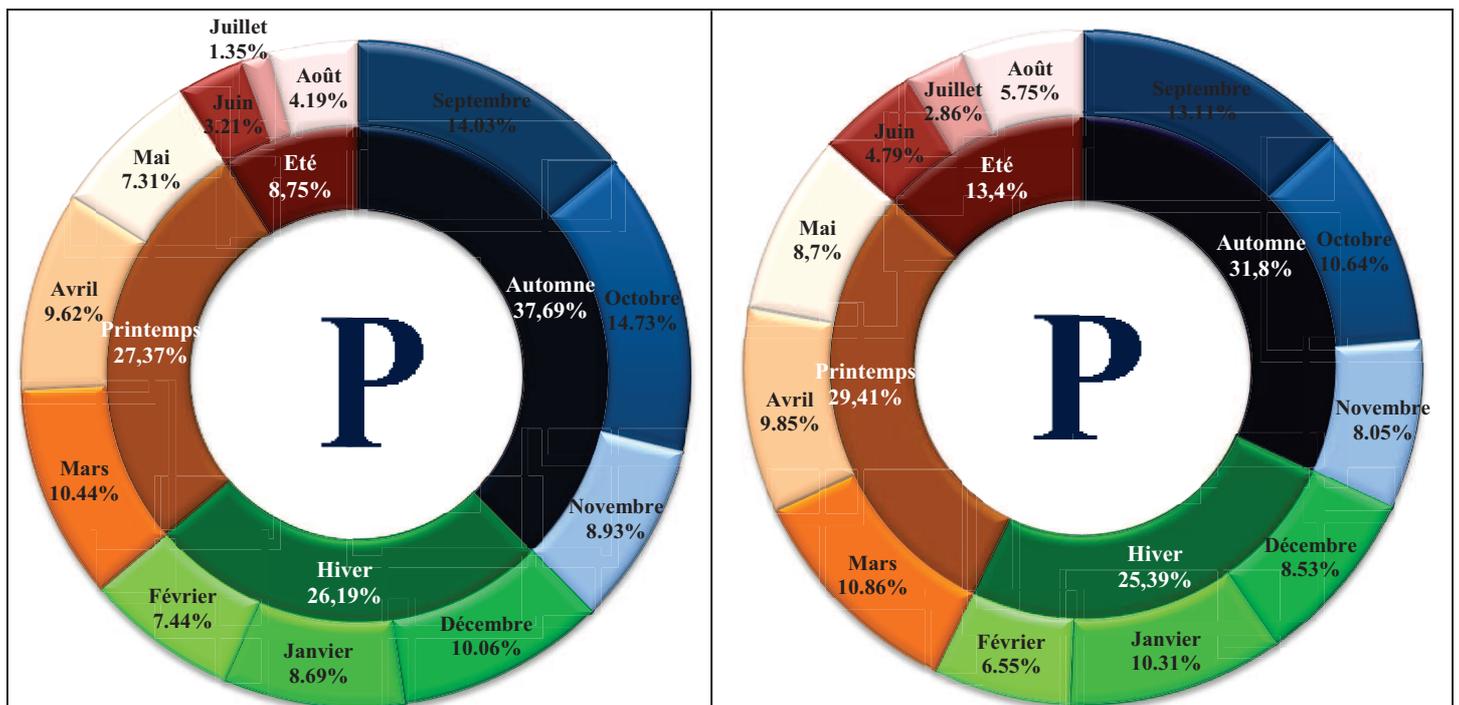


Figure 3.5: Répartition mensuelle et saisonnière de la pluviométrie en (%) à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 (à gauche) et Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971 et 2014 (à droite). (Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, Source des données brutes : D.G.R.E)

A l'instar du régime mensuel, le régime saisonnier de pluies des villes de Kairouan et de Sidi Bouzid est similaire de type **A.P.H.E.** Ceci, signifie que l'apport pluviométrique est plus important en automne, puis au printemps, en hiver et moins important en été.

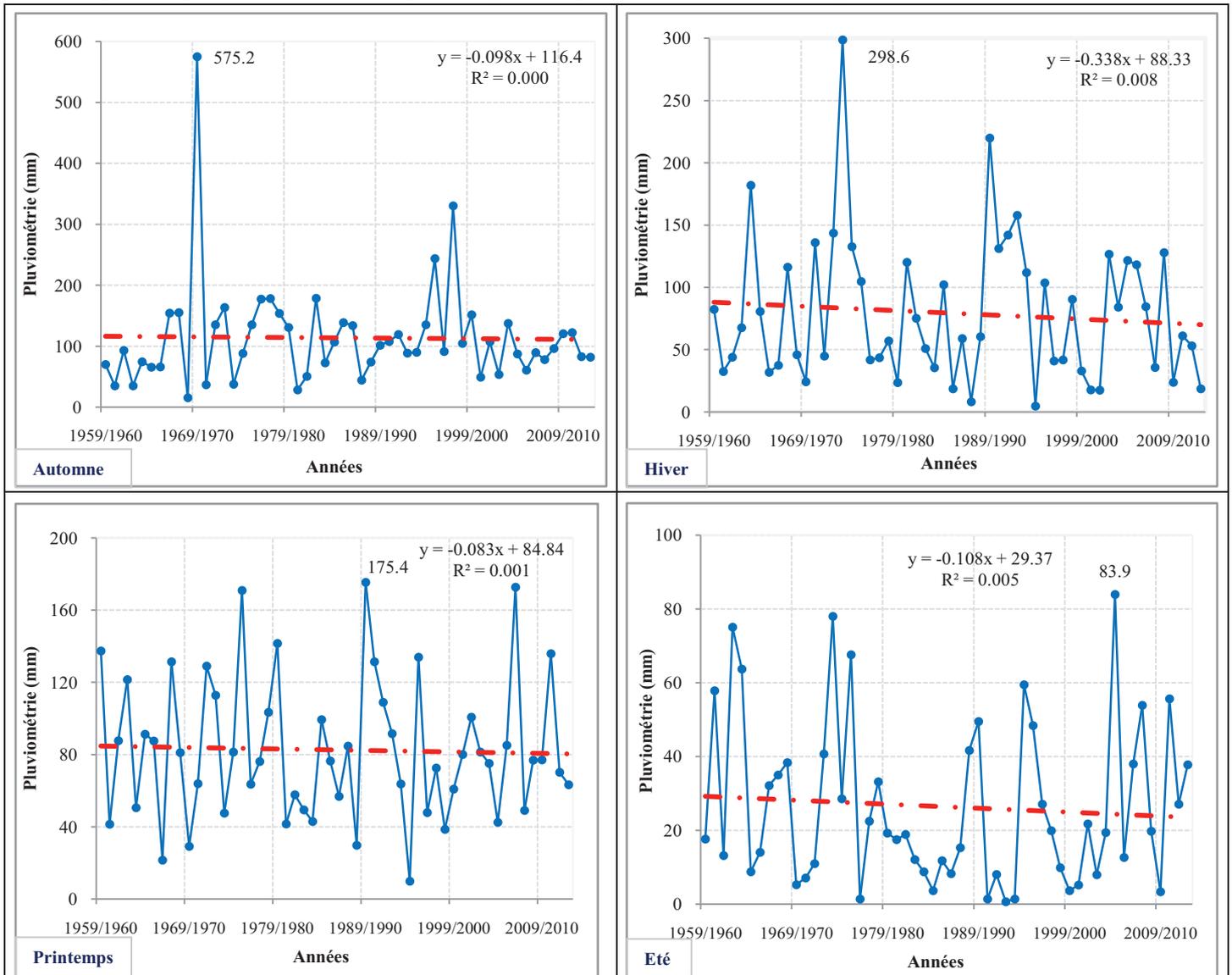
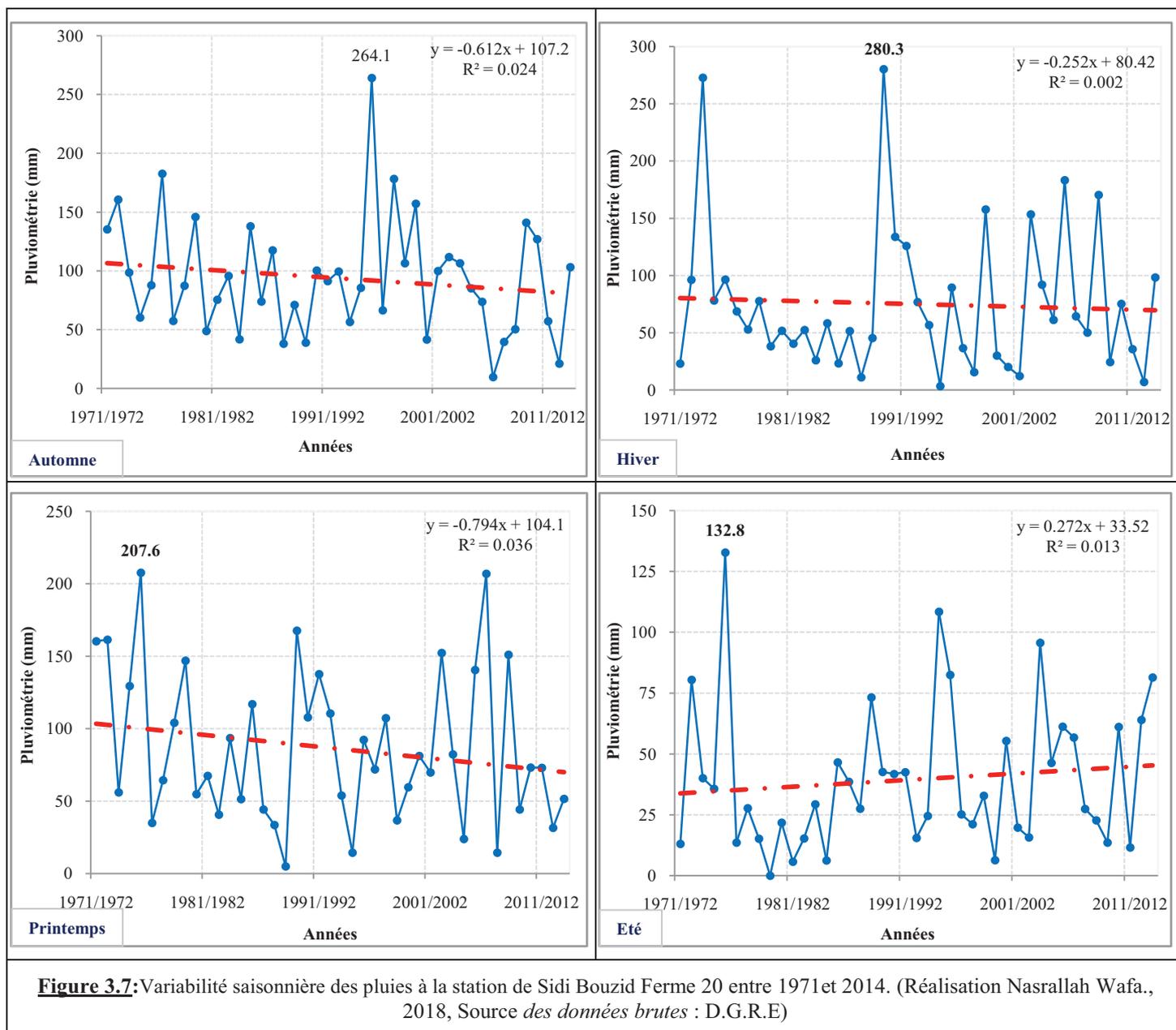


Figure 3.6: Variabilité saisonnière des pluies à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013. (Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, Source des données brutes : D.G.R.E)

Les quantités pluviométriques saisonnières sont marquées par une très grande variabilité interannuelle (Fig. 3.6 et 3.7). On observe des tendances non significatives vers la baisse et la hausse et parfois une stabilité des quantités des pluies saisonnières.

A la station de Kairouan SM, c'est pendant la saison d'automne de l'année agricole (1969-1970) qu'on a pu observer les quantités pluviométriques les plus élevées soit 575,2 mm (1,9 fois la moyenne annuelle).

Pour la station de Sidi Bouzid Ferme 20, les quantités des pluies les plus importantes sont enregistrées plutôt à la saison d'hiver de l'année agricole (1989-1990) avec à peu près 0,95 fois la moyenne annuelle soit 280,3 mm.



3-3- Les intensités journalières des pluies

Les pluies agissent par leur intensité plutôt que par leur total pluviométrique. Mais comme l'affirme Hénia, (1993), le problème reste de déterminer la part qu'occupent les séquences de fortes intensités dans l'ensemble des durées pluvieuses. Ceci nécessite la présence d'un réseau important des pluviomètres enregistreurs. Cependant, ces derniers sont soit ils fonctionnent d'une façon discontinue, soit ils donnent des résultats non précis.

Afin de résoudre ce problème, nous avons opté pour la méthode de Hénia, (1993), qui consiste à déterminer les intensités des pluies à travers une étude fréquentielle des totaux journaliers. Pour ce faire, nous avons choisi 4 seuils pluviométriques à égales intervalles:

- ↪ $0 < P < 10 \text{ mm}$: Des pluies journalières de très faibles intensités.
- ↪ $10 \geq P < 20 \text{ mm}$: Des pluies journalières de faibles intensités.

- ↺ **20 ≥ P < 30 mm** : Des pluies journalières de moyennes intensités.
- ↺ **P ≥ 30 mm** : Des pluies journalières de fortes intensités.

Il est à signaler, que les pluies journalières à fortes intensités sont eux-mêmes les pluies torrentielles qui sont d'après Kassab, (1979) ceux « *donnant des tranches quotidiennes supérieures ou égales à 30 mm/24h* » et qui sont dû à des chutes intenses et orageuses plus qu'à des fines et répétées (Hénia, 1993). En effet, les pluies intenses imposent le ruissellement, par contre, les pluies fines favorisent plutôt l'infiltration.

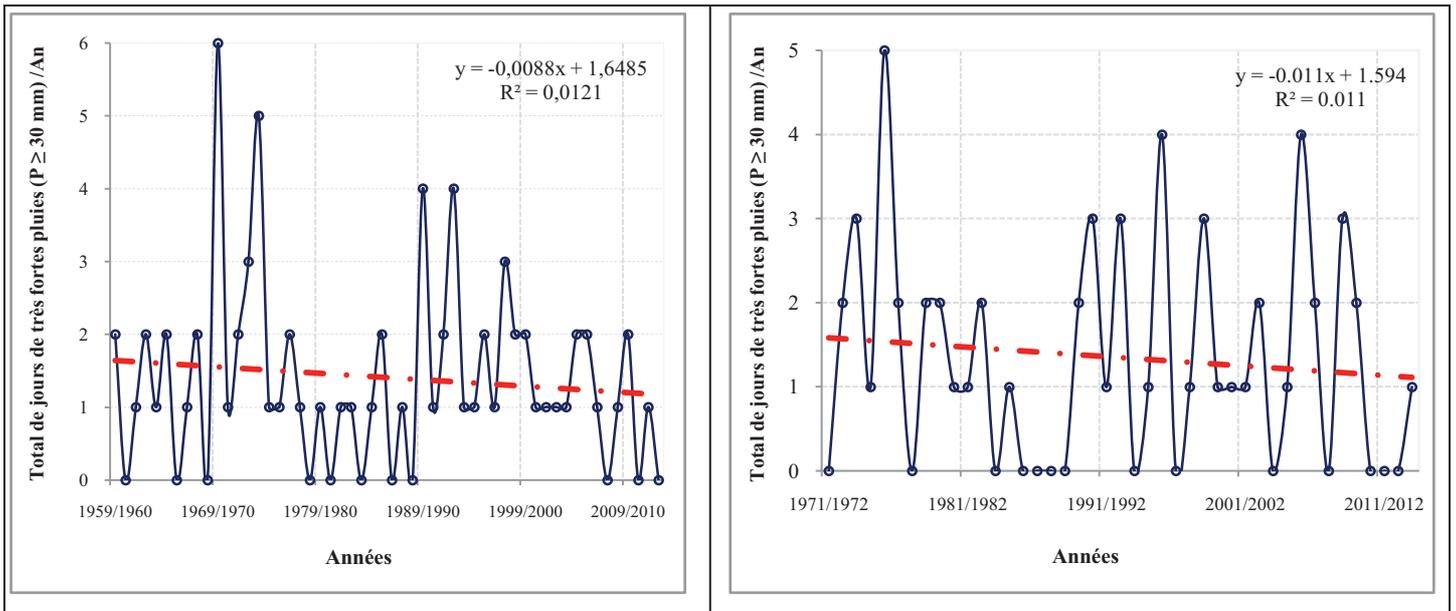


Figure 3.8: Fréquence interannuelle de jours de pluies torrentielles à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 (à gauche) et Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971 et 2014 (à droite). (Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, Source *des données brutes* : D.G.R.E)

Il ressort de l'analyse de la figure 3.8 une tendance non significative vers la baisse de nombre de jours de pluies torrentielles pour les deux stations de Kairouan SM et de Sidi Bouzid Ferme 20. En outre, on remarque une très grande variabilité interannuelle du nombre de jours de très fortes pluies telle que **P ≥ 30 mm**.

L'année agricole qui cumule le nombre de jours de pluies torrentielles le plus élevé n'est pas la même pour les deux stations. Il s'agit de l'année (1969-1970) pour la station de Kairouan SM avec 6 jours et de l'année (1975-1976) pour celle de Sidi Bouzid Ferme 20 avec 5 jours.

En passant de l'échelle annuelle à d'autres échelles plus fines, saisonnières et mensuelles (Fig. 3.9), on a pu distinguer que :

L'analyse des données pluviométriques à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013, montre que les jours de pluies sont en moyenne 59,69 jours contre 305,31 jours de non pluies. La répartition des jours de pluies est comme suit :

✓ 50,85 jours de pluies journalières à très faibles intensités avec $0 < P < 10$ mm dont le mois de mars cumule le maximum des jours avec 5,98 jours/an.

✓ 5,44 jours de pluies journalières à faibles intensités avec $10 \geq P < 20$ mm dont le mois de Septembre cumule le maximum des jours avec 0,74 jours/an.

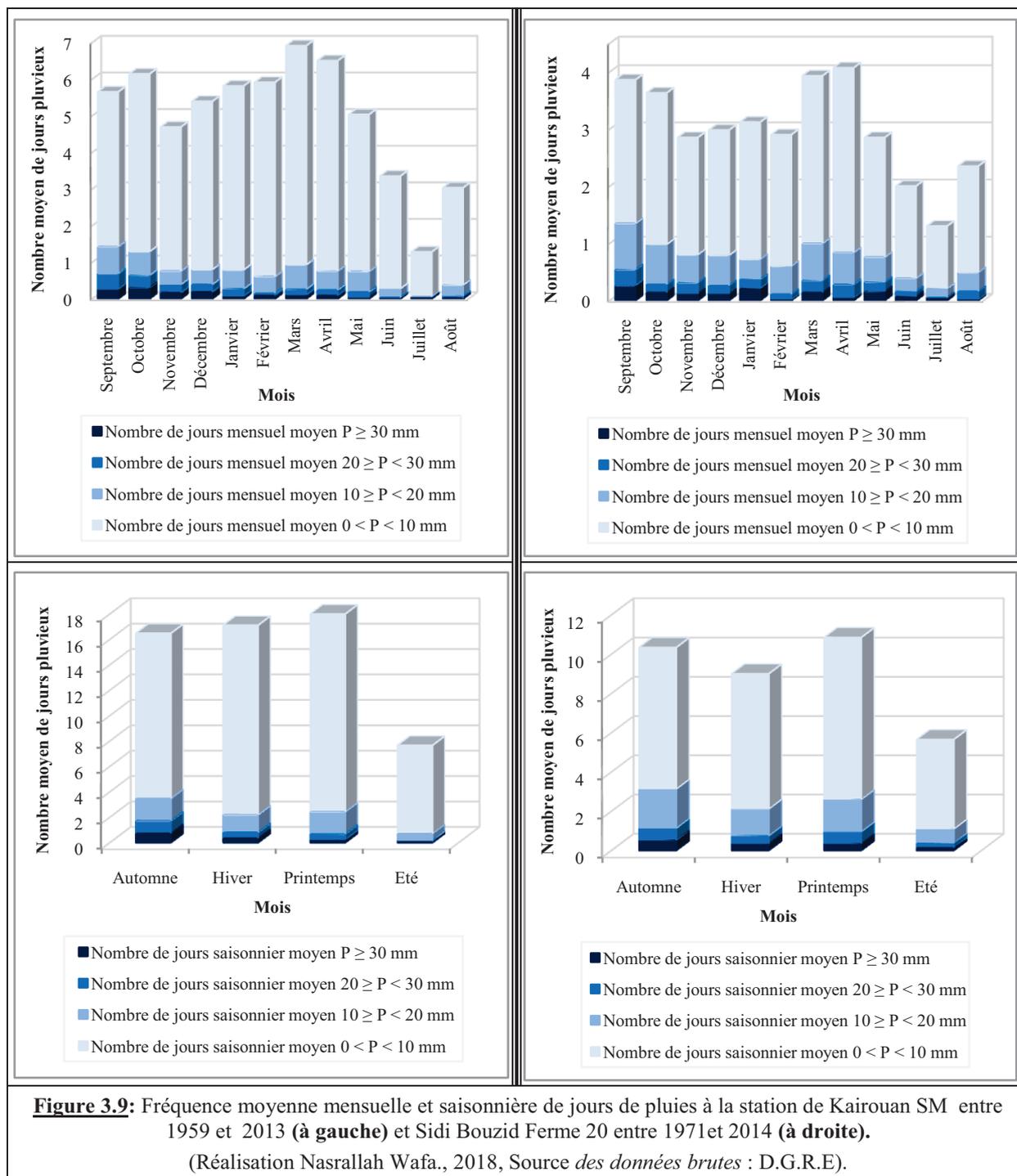


Figure 3.9: Fréquence moyenne mensuelle et saisonnière de jours de pluies à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 (à gauche) et Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971 et 2014 (à droite).
(Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, Source des données brutes : D.G.R.E).

✓ 1,99 jour pour les pluies journalières à moyennes intensités avec $20 \geq P < 30$ mm dont le mois de Septembre cumule le maximum des jours avec 0,43 jours/an.

✓ 1,41 jour pour les pluies journalières à fortes intensités avec $P \geq 30$ mm dont le mois d'Octobre cumule le maximum des jours avec 0,31 jours/an.

À la station de Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971 et 2014, le nombre moyen de jours de pluies est inférieur à celui de Kairouan, il est de l'ordre de 35,84 jours de pluies contre 329,16 jours de non pluies. La répartition des jours de pluies est comme suit :

✓ 26,91 jours de pluies journalières à très faibles intensités avec $0 < P < 10$ mm dont le mois d'Avril cumule le maximum des jours avec 3,23 jours/an.

✓ 5,74 jours de pluies journalières à faibles intensités avec $10 \geq P < 20$ mm dont le mois de Septembre cumule le maximum des jours avec 0,81 jours/an.

✓ 1,83 jour pour les pluies journalières à moyennes intensités avec $20 \geq P < 30$ mm dont le mois de Septembre cumule le maximum des jours avec 0,28 jours/an.

✓ 1,36 jour pour les pluies journalières à fortes intensités avec $P \geq 30$ mm dont le mois de Septembre cumule le maximum des jours avec 0,26 jours/an.

La répartition saisonnière et mensuelle moyenne de la pluviométrie à Kairouan (Fig. 3.10), montre que c'est pendant la saison d'automne et surtout en mois d'octobre que les pluies diluviennes ont le plus de chance de se produire et de contribuer avec environ 5,41 % à la moyenne pluviométrique annuelle (soit 16,33 mm).

Alors qu'à Sidi Bouzid, bien que la station connaisse un maximum de jours de pluies journalières à fortes intensités en automne et plus précisément au mois de Septembre, c'est plutôt en hiver et en mois de janvier que ce genre de pluies participe avec son maximum à la pluviométrie moyenne annuelle avec 11,88 mm, soit 4,03 %.

Quant à la répartition annuelle moyenne de la pluviométrie, elle est identique pour les deux stations. Elle permet de constater la prépondérance des averses à très faible intensité ($0 < P < 10$ mm). Ces averses contribuent successivement avec environ 37,32 % et 36,83 % de l'apport pluviométrique annuel moyen des stations de Kairouan SM et Sidi Bouzid Ferme 20, soit des totaux pluviométriques de 112,56 mm et 108,59 mm.

En revanche, les averses à fortes intensités avec $P \geq 30$ mm et qui sont souvent à l'origine des forts écoulements, contribuent avec un peu plus que 21% de l'apport annuel moyen des deux stations. Avec une moyenne de 66,16 mm à Kairouan et 62,3 mm à Sidi Bouzid.

3-4- La pluviographie

Afin d'étudier la hauteur des précipitations et son rapport avec la durée de l'averse pour différentes périodes de retour, on a besoin des données pluviographiques de bonne qualité et couvrant une période considérable. Pour les stations de Kairouan et de Sidi Bouzid les données d'observations pluviographiques sont insuffisantes puisque les pluviographes ne sont pas fonctionnels pour une longue période. Pour cela, on s'est basé sur l'analyse des enregistrements pluviographiques des stations amont les plus proches des villes de Kairouan et de Sidi Bouzid : Il s'agit respectivement des stations de Haffouz pour la période (1980-2002) et de Khanguet Zazia pour la période (1962 – 1985). Ceci, en se référant aux données des courbes **IDF** « Intensités, Durées, Fréquences » réalisées par la Direction Générale des Ressources en Eau (D.G.R.E).

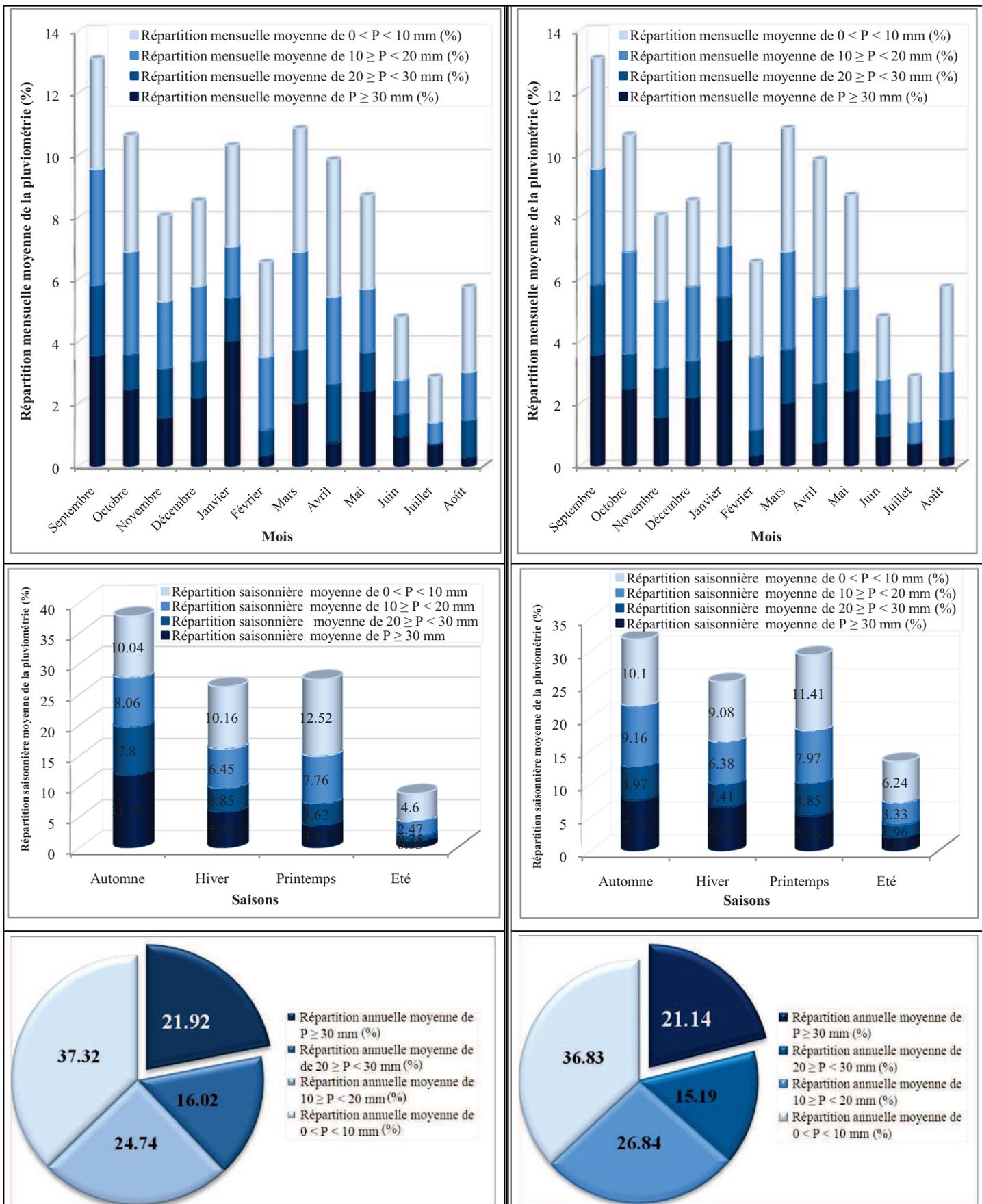


Figure 3.10: Répartition mensuelle, saisonnière et annuelle moyenne de la pluviométrie à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 (à gauche) et Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971 et 2014 (à droite). (Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, Source *des données brutes* : D.G.R.E)

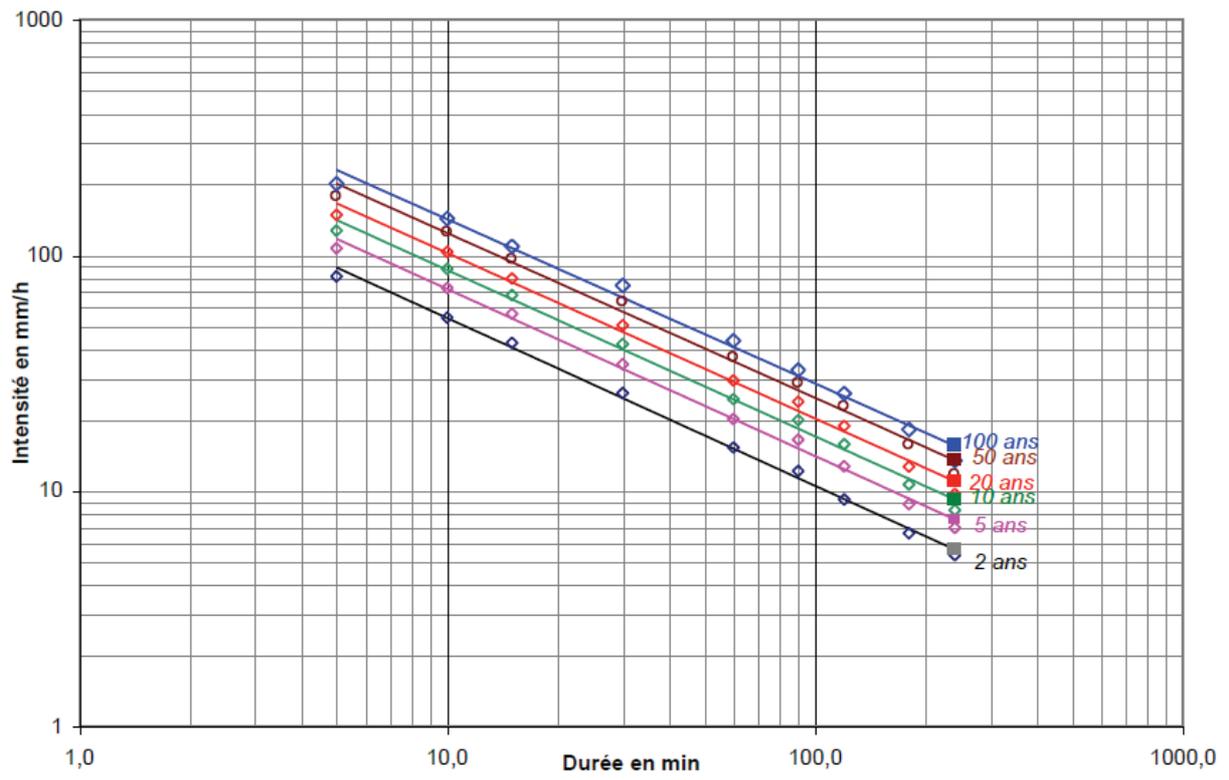


Figure 3.11 : Courbes IDF KHANGUET ZAZIA - Formules de Montana (Source : D.G.R.E)

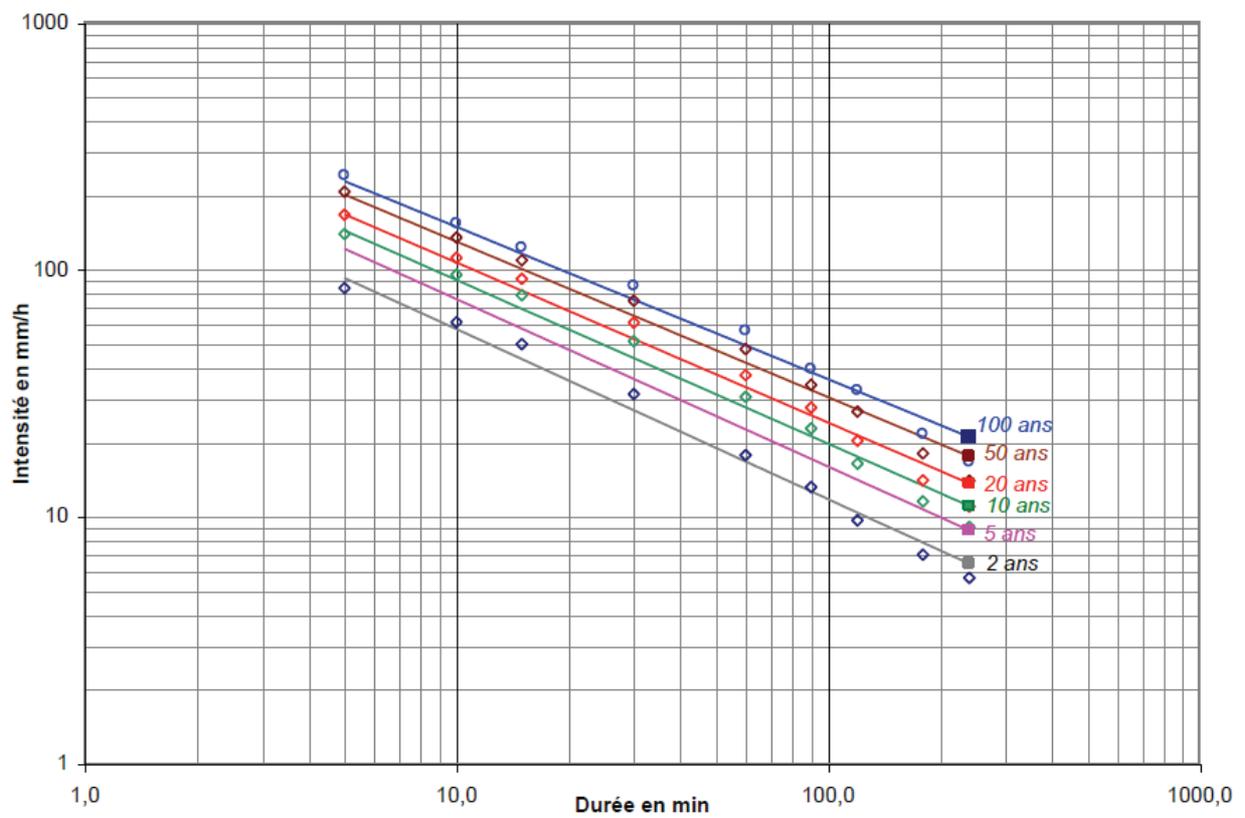


Figure 3.12 : Courbes IDF HAFFOUZ - Formules de Montana (Source : D.G.R.E)

L'analyse statistique est effectuée sur les différentes séries de valeurs d'intensités maximales obtenues pour les différentes durées considérées : 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 60 min, 90 min, 120 min, 180 min et 240 min. La formule de **Montana** traduit parfaitement la variation des intensités maximales de différentes durées en fonction de la période de retour :

$$I = a \times t^b$$

Avec :

I : Intensité de la pluie en mm/h

a : Coefficient fonction de la période de retour

b : Coefficient fonction du régime des intensités de pluie dans la zone

t : Durée d'une averse en minutes

Ceci, en se basant sur deux modes d'échantillonnage différents : Le premier mode l'échantillonnage est constitué par les N plus fortes valeurs observées en N années (le cas de la courbe IDF de Khanguet Zazia), et le deuxième mode consiste à considérer des séries à seuils (le cas de la courbe IDF de Haffouz). Les résultats de l'application de la formule sont bien illustrés dans le tableau ci-dessous (Tableau.3.3).

Tableau.3.3 : Résultats de l'application de la formule de Montana

Station t (min) T (ans)	Haffouz									Khanguet Zazia								
	5	10	15	30	60	90	120	180	240	5	10	15	30	60	90	120	180	240
2	93	57	43	27	17	13	10	8	6	89	54	41	25	15	11	9	7	6
5	122	76	58	36	23	17	14	11	9	118	72	54	33	20	15	12	9	8
10	144	91	70	44	28	21	18	13	11	141	87	65	40	24	18	15	11	9
20	168	107	82	52	33	26	21	16	14	166	102	77	47	29	22	18	13	11
50	201	130	101	65	42	33	27	21	18	202	124	94	58	36	27	22	16	13
100	228	149	116	76	49	39	32	25	21	231	142	107	66	41	31	25	19	16

(Source : D.G.R.E)

3-5- Autres aspects du climat

3-5-1- La température

L'analyse de la figure 3.13, laisse voir une importante variation de la température mensuelle moyenne à la station de Kairouan SM entre 1985 et 2010. Elle oscille entre 11 et 30 °C, marquant le mois le plus froid ainsi que le plus chaud, il s'agit respectivement des mois de janvier (avec une température moyenne inférieure à 15°C) et d'août (avec une température moyenne supérieure à 25°C).

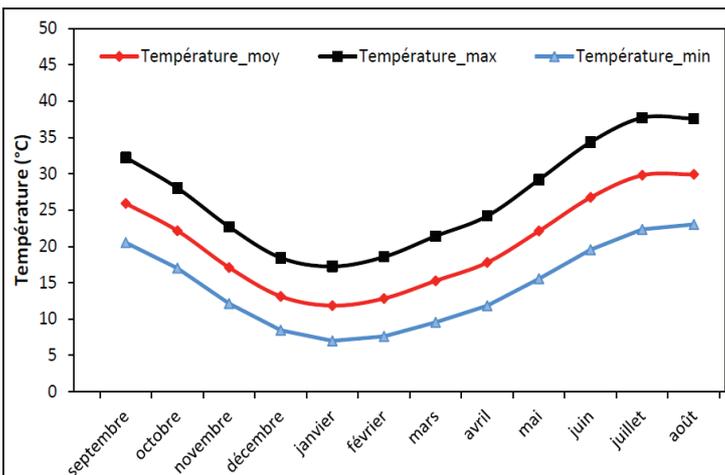


Figure 3.13: Variabilité mensuelle moyenne de la température à la station de Kairouan SM entre 1985 et 2010. **Source:** I.N.M in (Amri, 2013).

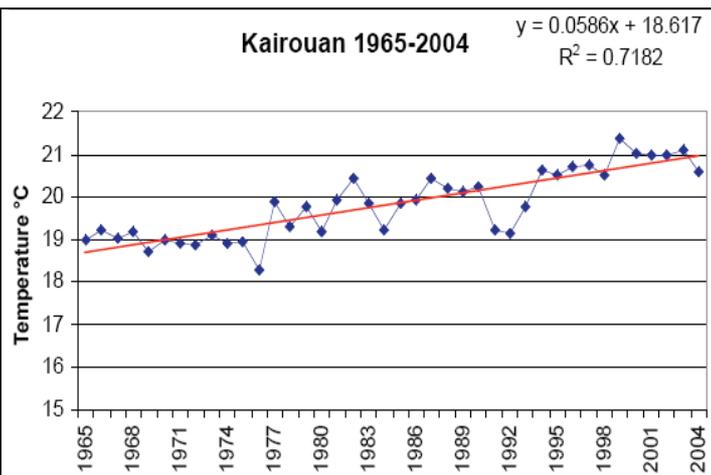


Figure 3.14: Tendence apparente des températures moyennes annuelles à la station de Kairouan SM entre 1965 et 2004. **Source:** I.N.M in (STUDI, GIZ et MEDD., 2013).

Les amplitudes thermiques sont plus élevées en été qu'en hiver (à cause des variations diurnes). Les températures extrêmes sont négatives pour les minimales de novembre à avril, elles dépassent 40 à 45°C pour les maximales de juin à septembre, (STUDI, GIZ et MEDD, 2013). Les valeurs très élevées de la température peuvent être observées en été (la température a dépassé respectivement les 19 et 21 jours 40°C durant les mois de juillet 1912 et d'août 1909), en automne (Au mois de septembre les 40°C ont été atteints ou dépassés 20 jours en 1924 et 10 jours en 1913 avec 45° pendant 3 jours) et même au printemps (comme les 40° enregistrés à Kairouan le 13 avril 1901). (Despois, 1955). L'allure de la courbe des températures moyennes annuelles à la station de Kairouan SM entre 1965 et 2004 (Fig. 3.14), montre une tendance significative vers la hausse de la température.

Tableau.3.4. Température mensuelle moyenne à la station de Sidi Bouzid (1974-2005)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J ^t	A ^t
T°C	25,04	20,01	15,7	10,8	10,8	11,7	14,1	16,8	21,2	25,7	28,5	28,7

Source: I.N.M in (Hmercha, 2010)

L'examen des données de la température mensuelle moyenne de la station de Sidi Bouzid calculées pour une période de 31 ans (1974-2005), (Tableau.3.4), permet de remarquer qu'elle varie entre 10,8 et 28,7 °C (soit une amplitude thermique annuelle d'environ 17,9°C). Généralement les mois les plus froids sont décembre et janvier avec des températures moyennes mensuelles au alentour de 10°C. Les mois les plus chauds sont les mois de juillet et août avec une température moyenne qui dépasse les 28°C. Ces données moyennes mensuelles cachent de grandes irrégularités de la température à Sidi Bouzid. Les extrêmes thermiques se caractérisent par des minimas dont les valeurs sont inférieures à 0°C surtout durant les mois de janvier et février. Quant aux maximas thermiques, elles sont enregistrées pendant les mois de juillet et août avec des valeurs dépassant même les 40°C, (Hmercha, 2010). Cette variation de la température justifie l'aridité du climat des deux villes. A Sidi Bouzid l'aridité est de 9 mois sur 12, alors qu'à Kairouan elle est estimée de 5 mois d'aridité par an, (STUDI, GIZ et MEDD, 2013).

3-5-2- Le vent

La région de Sidi Bouzid se caractérise par la prédominance d'un vent très chaud et très sec nommé le Sirocco ou « **Chéhili** ». C'est un vent moyen à fort, soufflant de SW pendant les saisons d'été et du printemps avec une vitesse qui varie entre 3 et 14 m/s. Les vents très forts, porteuses des pluies orageuses sont moins importants. Ils dominent essentiellement en automne et en hiver.

La dorsale influence énormément sur le climat de la région de Sidi Bouzid. Sa position constitue d'une part une barrière qui diminue les actions des masses d'air atlantiques (en hiver) et saharienne (en été) et d'autre part, elle est favorable aux précipitations apportées par les vents d'Est provenant de la méditerranée orientale. Les vents dominants dans cette région sont du Nord-Ouest en hiver et d'Est ou Sud-Est en été. (DHU, 1990).

À Kairouan les vents violents soufflent surtout, comme dans le Tell, à la saison froide. Ce sont des vents du nord-ouest et portent dans la steppe le nom de **djebeli**, « **Montagnard** », « *ils sont d'origine marine, mais qui ont traversé une plus au moins grande épaisseur de terres montagneuses ; aussi se sont-ils déchargés de leur humidité. Le djebeli est souvent fort, parfois même violent en hiver et encore en mars.* ». (Despois, 1955).

Le printemps est dominé plutôt par les vents de NE appelé « **Chergui** ». Le chergui est dans l'ensemble un vent modéré, souvent très faible, exceptionnellement violent. Les pluies du chergui sont fines et durables au printemps. (Despois, 1955). L'été est caractérisé par les vents de Sud nommés « **Chéhili** ». Ce dernier est assez fréquent avec en moyenne 33 jours/ans. (Hajri, 1994).

3-5-3- L'humidité relative

L'humidité relative de l'air (Hr), s'exprime en pourcentage (%) et désigne le rapport entre la quantité de vapeur d'eau dans l'air et sa quantité de saturation. Pour les deux villes la période humide s'étend sur sept mois de l'année (du septembre à avril). À Kairouan, l'humidité relative moyenne mensuelle est faible. Elle oscille entre 55% et 70% pendant la saison froide, et entre 40% et 55% pour la saison chaude. (Amri, 2013). À Sidi Bouzid, l'humidité relative moyenne mensuelle varie entre 48,64 % pour le mois de juillet et 65,7 % pour le mois de novembre. L'année la plus humide est celle de 1990 avec un taux de 63%. (Hmercha, 2010).

3-5-4- L'insolation

La durée d'apparition du soleil ou l'insolation varie d'un mois à un autre. À la station de Sidi Bouzid (1974-2005), elle atteint son maximum au mois de juillet avec 340,5 heures (Tableau.3.5).

Tableau.3.5. Insolation mensuelles moyenne à la station de Sidi Bouzid (1974-2005)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J ^t	A ^t
Insolation (h/mois)	255,4	223,2	192,3	191,4	194,1	198,1	226,9	246,2	287,2	304,1	340,5	313

Source: I.N.M in (Hmercha, 2010)

Quant à Kairouan, la variabilité mensuelle de la durée d'insolation estimée pour une période de 11 ans entre 1990 et 2001 (Fig.3.15), permet de constater est plus importante en été avec un maximum observé au mois de juillet avec environ 350 heures.

La durée d'insolation est à son minimum en hiver, précisément vers le mois de janvier avec moins de 200 heures.

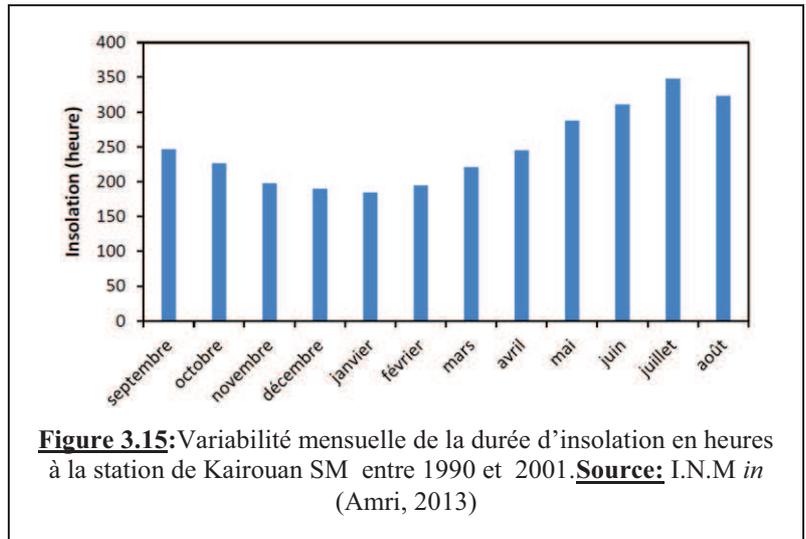


Figure 3.15: Variabilité mensuelle de la durée d'insolation en heures à la station de Kairouan SM entre 1990 et 2001. **Source:** I.N.M in (Amri, 2013)

3-5-5- L'évaporation

Le bilan hydrique climatique est largement déficitaire à Sidi Bouzid. L'évaporation potentielle mensuelle (E.T.P) mesurée au Piche à la station de Sidi Bouzid (Tableau.3.6) pendant une période de 31 ans (1974-2005) est largement supérieure aux précipitations mensuelles. Le total annuel évaporé est important, de l'ordre de 2282,1 mm.

Tableau.3.6.Évaporation mensuelle moyenne à la station de Sidi Bouzid (1974-2005)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J ^t	A ^t
Evaporation (mm)	175,8	135,4	104,1	95	93,9	104,6	139,6	220,6	264,9	318,6	318,6	311

Source: I.N.M in (Hmercha, 2010)

À Kairouan aussi, la perte d'eau au niveau du sol dû essentiellement à l'évaporation, est remarquable avec une moyenne annuelle assez élevée d'environ 2071 mm. (STUDI, GIZ et MEDD, 2013).

Conclusion

Kairouan et Sidi Bouzid appartiennent à un étage bioclimatique semi-aride. Leur climat se caractérise par un régime continental typique de la Tunisie Centrale. Ils connaissent souvent un régime pluviométrique particulier qui se caractérise par sa variabilité spatio-temporelle et son irrégularité. En effet, ce sont les saisons intermédiaires (l'automne et le printemps), qui accumulent les maximums pluviométriques. Les situations de « Retour d'Est » y sont les responsables des précipitations pluvieuses diluviennes. Ce genre de précipitations a le plus de chance de se produire, à Kairouan, pendant la saison d'automne et surtout en mois d'octobre. À Sidi Bouzid, c'est plutôt en hiver et en mois de janvier.

Chapitre 4

Caractéristiques anthropiques : Une hydrologie fortement affectée par l'Homme

4-1- Une démographie galopante

Kairouan est parmi les communes les plus anciennes de la Tunisie centrale. Elle est créée le 02 juin 1887 et a connu, ces dernières années, une importante croissance démographique. Le nombre de la population y a presque doublé entre 1984 et 2014, avec un taux de croissance annuel moyen de l'ordre de 2,2 % (Tableau.4.1).

Tableau. 4.1: Evolution de la population dans les communes de Kairouan (1984-2014) et de Sidi Bouzid (1966-2014)

Délégation	Date de création	Population						
		1966	1975	1984	1994	2004	2010	2014
Kairouan	02/06/1887	-	-	72254	102 634	117903	-	138947
Sidi Bouzid	04/11/1958	4800	10800	19218	34315	39915	44317	48284

Sources : INS – RGPL 1984-1994-2004-2010-2014, (<http://www.commune-kairouan.gov.tn/>), (D.R.E.H et commune de Sidi Bouzid, 2002) et (M.T.E et D.G.A.T, 2011))

Le 04 novembre 1958, la commune de Sidi Bouzid a vu le jour. « *Sa promotion au rang de chef-lieu de gouvernorat en 1974 a été décisive sur le plan démographique, en quelques années l'appel engendré par les emplois administratifs créés et équipements publics réalisés a transformé Sidi-Bouzid d'un village rural en une véritable ville* » (D.R.E.H et commune de Sidi Bouzid, 2002). En conséquence, la population de la commune est passée de 4800 habitants en 1966 à 19218 habitants en 1984, enregistrant ainsi un taux d'accroissement annuel moyen important de 8,01 %. Entre 1984 et 2014, la ville de Sidi Bouzid a connu une évolution modérée du nombre de la population, qui a augmenté de 29066 habitants, soit un taux de croissance annuel moyen de l'ordre de 3,12 %. « *Ce ralentissement de la croissance de la population s'explique par l'atténuation des flux migratoires et la tendance à la stabilisation de la population* » (D.R.E.H et commune de Sidi Bouzid, 2002). Cette explosion démographique a influencé énormément le paysage des deux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid, qui se distingue par un étalement urbain anarchique et parfois même illicite.

4-2- L'extension du tissu urbain

Depuis les années 75, la commune de Kairouan a connu un étalement sans précédent de la nappe urbaine (Fig.4.3). Cette extension a gagné la partie Ouest de la ville, supposée protégée par la digue. Ceci est dû à « *l'achat massif de terrains – essentiellement par les Jlass issus de l'exode rural qui suivit la crise des campagnes entourant Kairouan* ». (Rebhi, 2007). En effet, au bout de dix ans (1975-1985), les terrains bâtis ont doublé de superficie (L'évolution est estimée d'environ 322,71 ha).

En outre, le taux de croissance annuel moyen de l'urbanisation calculé pour une période de 85 ans (entre 1930 et 2015) est de l'ordre de 2,84 %. Avec un tel rythme d'urbanisation, la ville de Kairouan sera totalement urbanisée en 2053 (Fig.4.1).

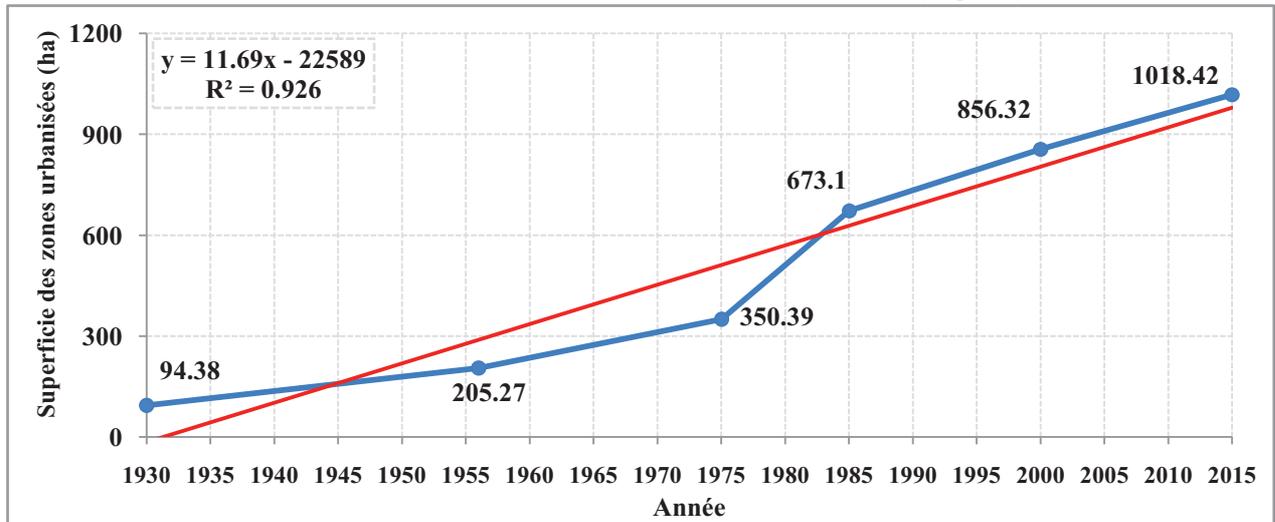


Figure 4.1. Evolution des surfaces urbanisées dans la commune de Kairouan entre 1930 et 2015 (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, d'après (Rebhi A., 2007), Mission d'ortho-photos IGN datant de 2000 à l'échelle 1/10000, Extraits Google Earth 2015).

A Sidi Bouzid, c'est suite à sa promotion comme chef-lieu de gouvernorat en 1974 que la ville a connu une forte extension urbaine due essentiellement à un intense mouvement d'exode rural, (Ben Jelloul, 2014). En fait, les surfaces urbanisées ont évolué d'environ 5 fois entre 1972 et 1986 (Fig.4.2). L'examen du graphique ci-dessous, laisse voir une tendance positive vers la hausse avec $R^2 = 0.866$. La superficie urbanisée a évolué entre 1934 et 2014, avec un taux de croissance annuel moyen de l'ordre de 5,04 %. Cela veut dire que d'ici 15 ans (vers 2029), l'étalement urbain dépassera du loin la limite communale pour occuper des terrains fortement menacés par le risque inondation.

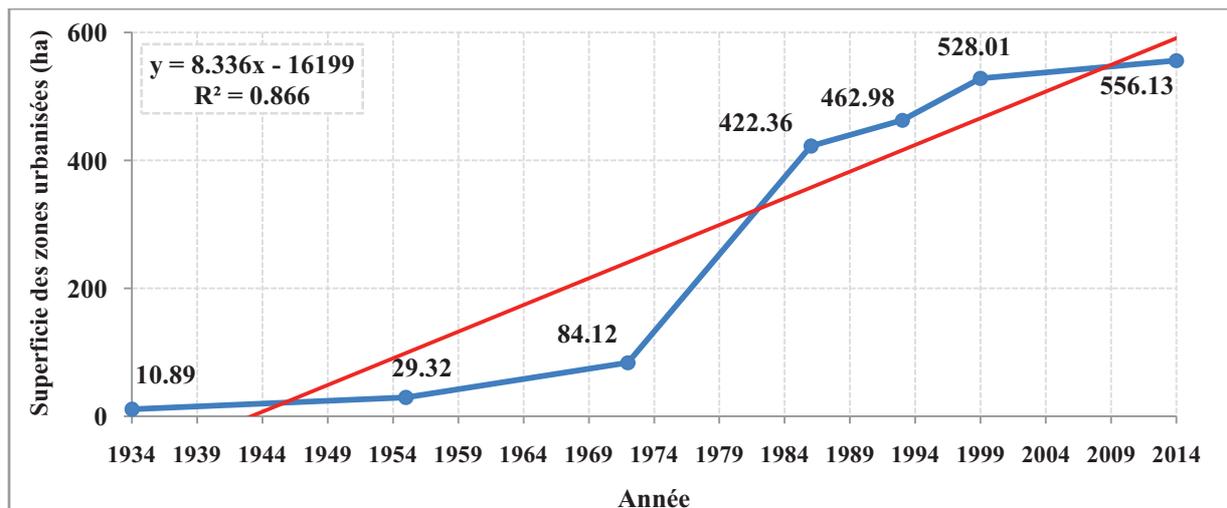


Figure 4.2. Evolution des surfaces urbanisées dans la commune de Sidi Bouzid entre 1934 et 2014 (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, d'après feuilles topographiques (Sidi Bouzid au 1/50000), Années : 1950 et 1993 ; couvertures aériennes de 1986 et 1999 de l'O.T.C à l'échelle 1/50000 ; plans des villes extraites des schémas directeurs d'aménagement (S.D.A) de l'agglomération de Sidi Bouzid datant des années 1934, 1955 et 1972, Extraits Google Earth 2014).

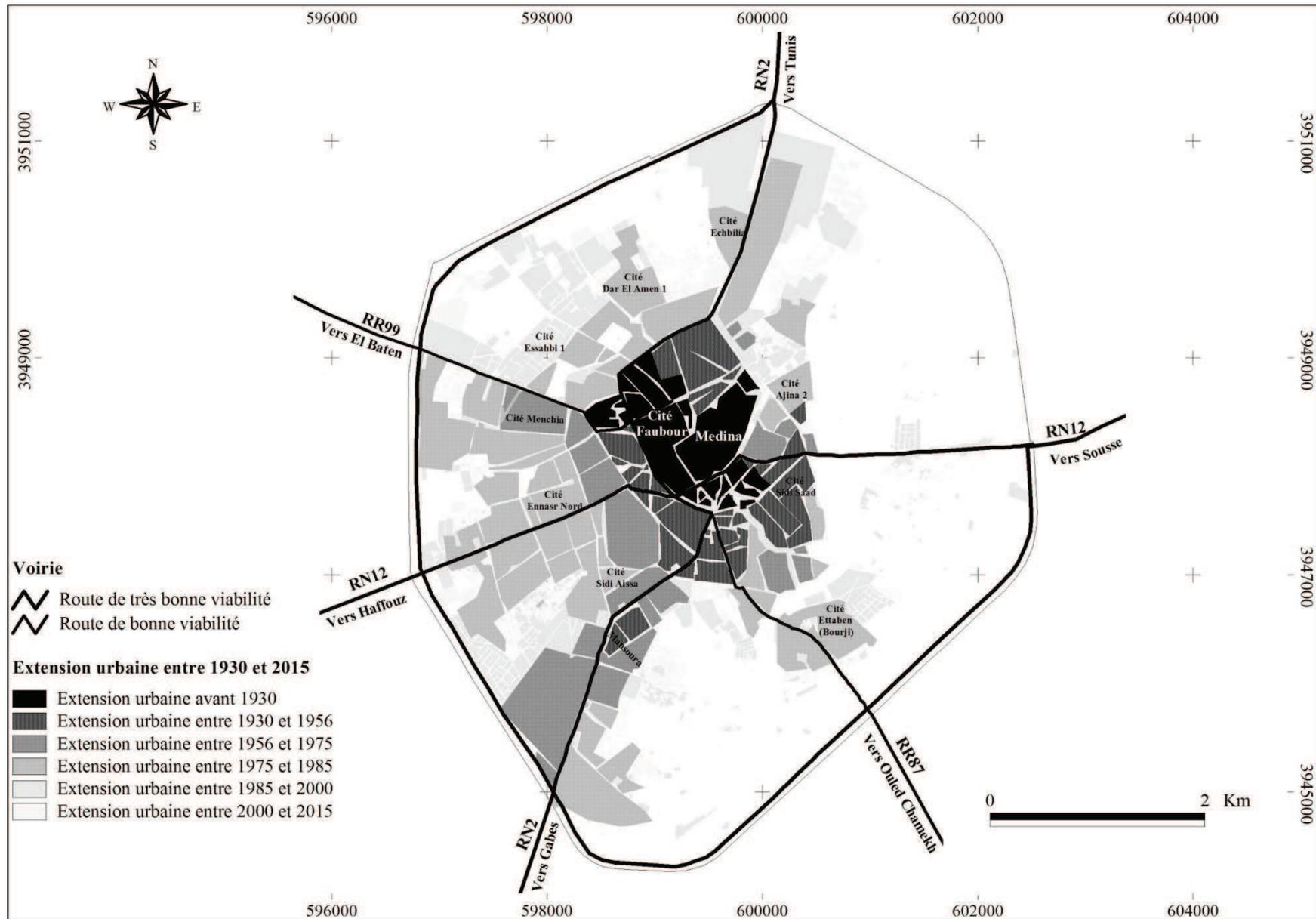


Figure 4.3 : Extension du tissu urbain entre 1930 et 2015 dans la ville de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, d'après (Rebhi, 2007), Mission d'ortho-photos IGN datant de 2000 à l'échelle 1/10000, Extraits Google Earth 2015).

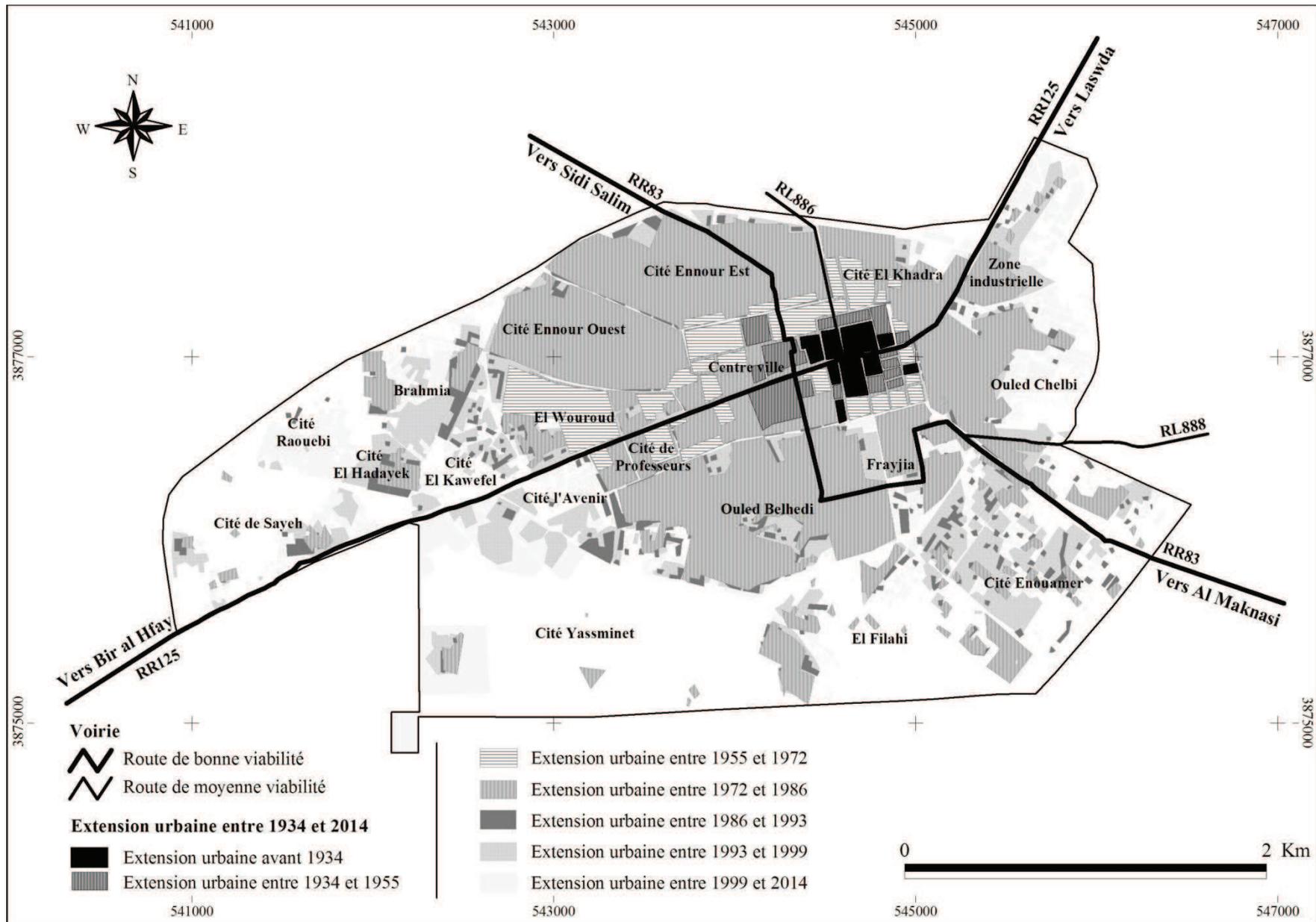


Figure 4.4 : Extension du tissu urbain entre 1934 et 2014 dans la ville de Sidi Bouzid (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, d'après feuilles topographiques (Sidi Bouzid au 1/50000), Années : 1950 et 1993 ; couvertures aériennes de 1986 et 1999 de l'O.T.C à l'échelle 1/50000 ; plans des villes extraites des schémas directeurs d'aménagement (S.D.A) de l'agglomération de Sidi Bouzid datant des années 1934, 1955 et 1972, Extraits Google Earth 2014).

4-3- Les quartiers d'habitat non réglementaire

* À Kairouan

L'étalement excessif du tissu urbain dans les deux villes a donné naissance à des quartiers d'habitat non réglementaire. À **Kairouan**, « ce type d'habitat en dur est apparu, au début des années 1970, autour de la médina et de ses faubourgs et connaît un essor rapide durant les années 1980. Ceci, est dû à un exode rural de forte intensité à cause de la situation économique dégradante des campagnes kairouanaises à la suite de plusieurs années de sécheresse...*En effet, c'est dans les années 1980, la part de la filière non-réglementaire dans la production de l'habitat est évaluée à 77 %, alors que la contribution de cette même filière à l'urbanisation de Tunis ne dépasse pas 44 %. Les premières "poches" d'habitat spontané, localisées à l'ouest et au sud-ouest, sont aussi les plus importantes : en 1985, Menchia, Ali Bey et Bourgi (Ettaben) comptent respectivement 14 000, 4 000 et 3 500 habitants. Leur croissance se poursuit à un rythme soutenu les années suivantes, de sorte que ces poches se transforment en vastes quartiers, tel Menchia qui abrite 40 000 habitants en 2004... Les pouvoirs publics ont toléré cette urbanisation en suivant une stratégie de laisser-faire.* » (Rebhi, 2007).

Ces habitats non-réglementaires sont regroupés essentiellement tout au long des principes voies de communications tels que: le quartier de Ali Bey (sur la RN 12 reliant Kairouan à Haffouz), Menchia qui s'allonge sur la route régionale n°99 reliant Kairouan à El Baten et quartier Bourji qui représente une agglomérations routière développée de part et d'autre de la route régionale n° 87 reliant Kairouan à Ouled Chamekh (Figure 4.5).

* À Sidi Bouzid

Selon, (Ben Jelloul, 2014), «*Les manifestations de l'urbanisation à la périphérie de Sidi Bouzid ne prirent une dimension notable qu'après les catastrophiques inondations de 1969, lesquelles favorisèrent un intense mouvement d'exode rural qui porta des familles entières depuis des steppes fortement affectées par les destructions des troupeaux et des plantations vers la petite ville. La deuxième phase de forte croissance fit suite à sa promotion comme chef-lieu de gouvernorat en décembre 1973... En effet, La population urbaine passa ainsi d'un peu moins de 5 000 habitants en 1966 à plus de 10 000 en 1975* ». Outre, il affirme que « *les constructions qu'ils y ont érigées ne respectaient aucune règle d'urbanisme, mais, pour autant, tant les autorités régionales que municipales n'ont exercé, pendant des années, aucun contrôle sérieux et, d'une certaine manière, on peut dire qu'elles « ont laissé faire » sans se préoccuper le moins du monde des conséquences ultérieures de ce mode d'occupation de l'espace et de production de la ville.* ».

Sept quartiers non-réglementaires sont apparus au alentour de la ville de Sidi Bouzid dans ses parties nord (Cités Ennour Ouest et Est et cité El Khadra), est (Ouled Chelbi) et sud (Enouamer, Frayjia et Ouled Belhedi), (Figure 4.6). Ces quartiers, occupent des terrains qui ont été pris aux dépens des propriétés de l'État ou de la municipalité. « *Cette modalité d'occupation, dont les débuts remontent aux années 1960, s'est accélérée dans le courant des années 1980 et 1990 et elle a logiquement atteint des sommets après le 17 décembre 2010, lorsque la puissance publique a pratiquement disparu du paysage* » (Ben Jelloul, 2014).

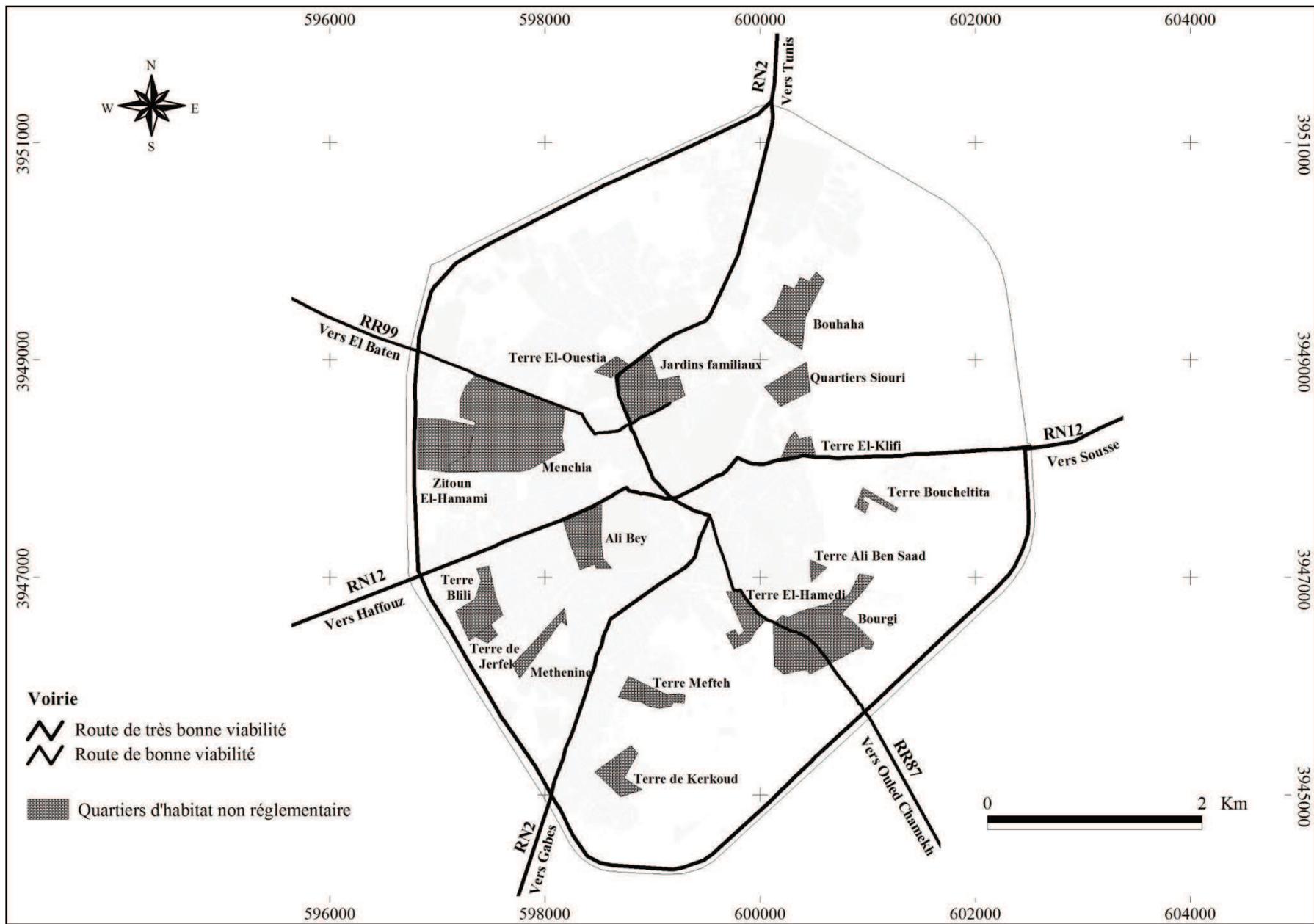


Figure 4.5 : Les quartiers d'habitat non réglementaire dans la ville de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, d'après (Rebhi, 2007))

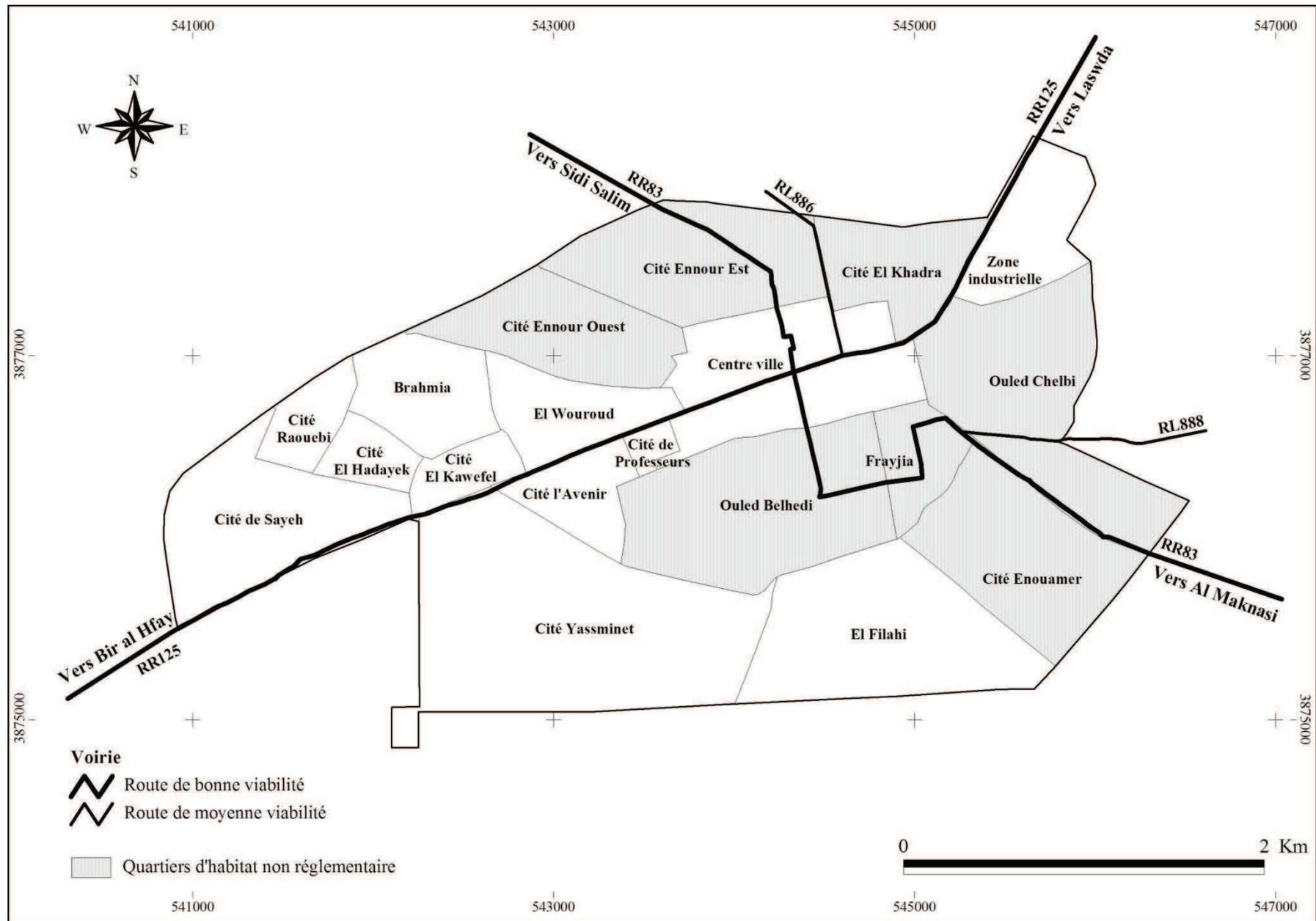


Figure 4.6 : Les quartiers d'habitat non réglementaire dans la ville de Sidi Bouzid (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, d'après (Ben Jelloul, 2014))

4-4- L'étalement du bâti au-delà des digues de protection

Malgré son endroit propice aux inondations, la ville de **Kairouan** ne cesse de s'étendre sur les terrains situés au-delà de la digue implantée en 1968 et qui l'avait en partie protégé en 1969 (Figure 4.7). L'étalement s'est fait, de part et d'autre de principales voiries: RR 99 vers El Baten, RN 12 vers Sousse et surtout la RN2 vers Gabès... Nombreuses institutions (Faculté des lettres, I.S.E.T...) et agglomérations (Rakkada...), occupent des terrains déjà inondés en 1969. Ceci, peut être expliqué par la confiance, que les citoyens l'accordent aux aménagements hydrauliques notamment les deux barrages de Sidi Sâad et El Houareb.

Certes les digues et les barrages ont un rôle protecteur important mais en contrepartie ils font oublier les habitants le risque inondation. À **Sidi Bouzid**, la succession des années sèches sans pluies font oublier les citoyens les dégâts occasionnés par les inondations catastrophiques de 1990 et favorise ainsi l'étalement d'habitat spontané sur des terrains inondables. L'extension de ces habitats périurbains spontanés est observée de part et d'autre de la limite communale (Figure 4.8). Dans la partie est de la ville, on constate une extension remarquable du quartier Ouled chelbi qui est à l'origine un quartier d'habitat non-réglementaire. La station d'épuration installée à proximité de ce quartier représente une source de nuisances environnementales et des risques sanitaires. Dans la partie sud-est et sud des habitations sont installées tout au long de la route régionale n° 83 (reliant Kairouan à Al Maknasi). Ces habitations ainsi que la faculté des Sciences et Techniques de Sidi Bouzid se trouvent au dessous de la digue canal réalisée vers l'an 2000 pour la protection de la partie sud de la ville vis-à-vis le risque inondation. Les bâtis de côté ouest et nord de la ville sont plus exposés au risque inondation. Ils sont installés au-delà de la digue nord, qui « fut réalisée après l'inondation de 1969 et réhabilitée (une surélévation) après l'inondation de 1990 » (Hmercha, 2010). A l'ouest deux petites agglomérations sont développées: Maljit Ishrin de part et d'autre de la route régionale n° 125 (reliant Kairouan à Bir El Hfay) et Bir Bouzid à proximité de l'oued Serg adh-Dhiba. Au nord, l'étalement périurbain occupe des terrains d'expansion des crues des oueds El Fekka et Darig adh-Dhiba.

4-5- La voirie : Facteur aggravant le risque inondation

Les voies de communication jouent un rôle important dans l'aggravation du risque inondation surtout en milieu urbain. En effet, elles peuvent avoir deux effets :

* **Un effet d'obstacle (barrage):** Lorsqu'elles sont perpendiculaires à l'écoulement. Dans ce cas, elles favorisent l'accumulation d'eau. Des cas multiples de recoupement « voirie-oued », sont illustrées à la commune de **Kairouan**, essentiellement au niveau des principaux voies de communication (Figure 4.10). Ces intersections constituent souvent des « points noirs » à chaque évènement pluvieux exceptionnel gênant la circulation routière et causant des dégâts souvent matériels. Ceci est plus important ces dernières années vu l'augmentation du débit journalier moyen de la circulation motorisée des véhicules à deux essieux ou plus, qui représente en somme 218912 véhicules/jour circulant à la ville de Kairouan (Figure 4.9).

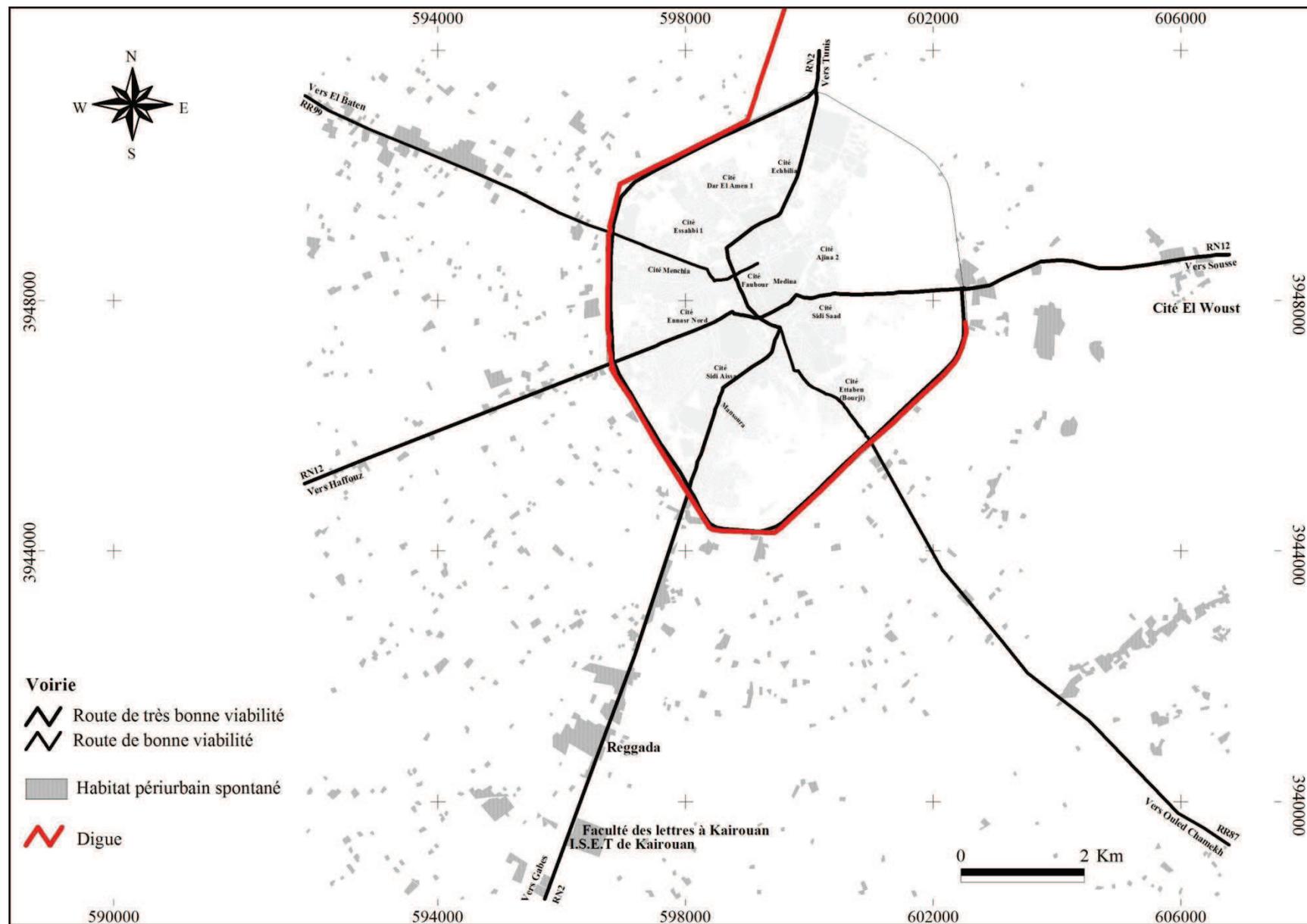


Figure 4.7 : Extension du bâti au-delà de la digue dans la ville de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, d'après extraits Google Earth 2015)

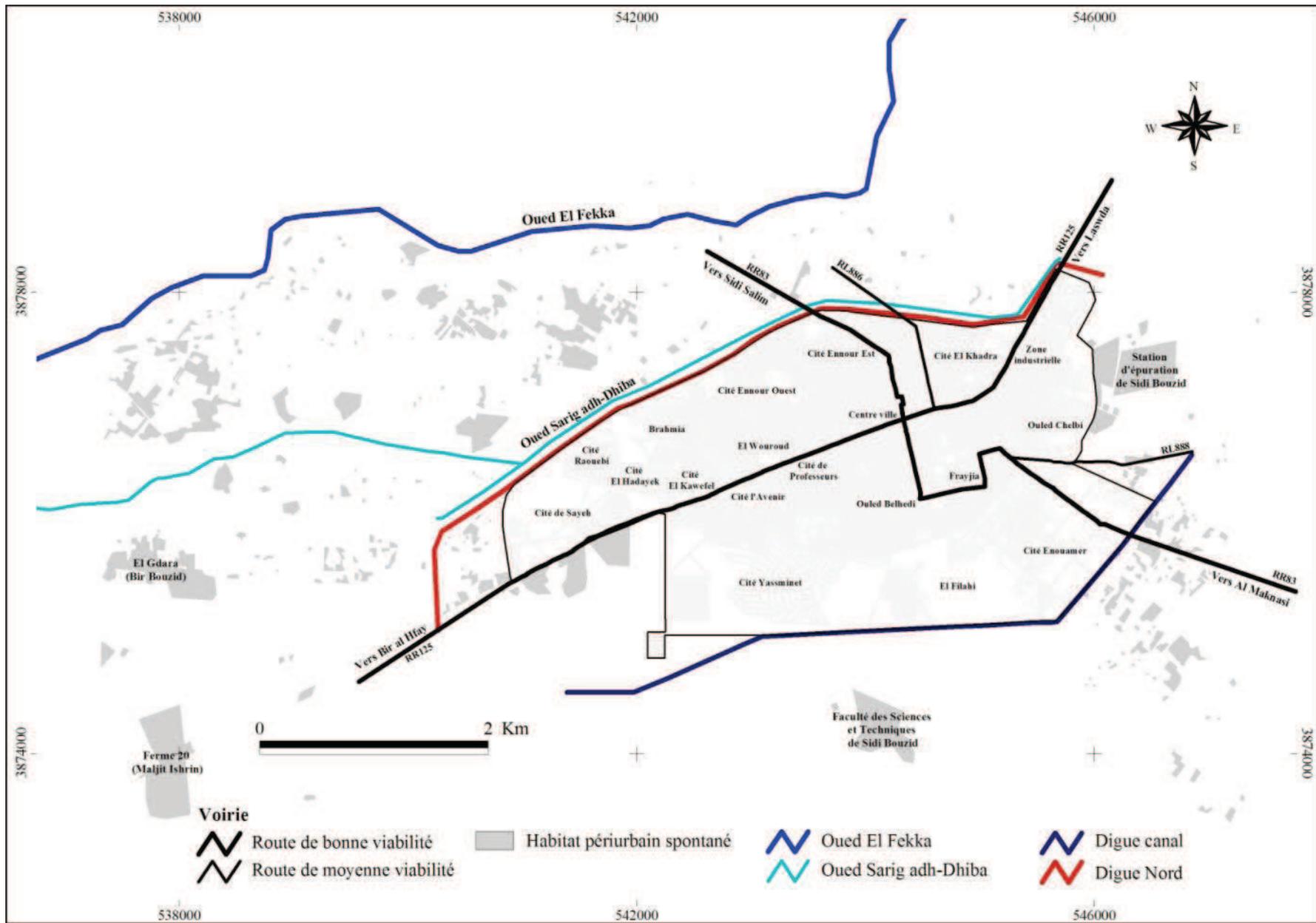


Figure 4.8 : Extension du bâti au-delà du périmètre communal de Sidi Bouzid (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, d'après extraits Google Earth 2018)

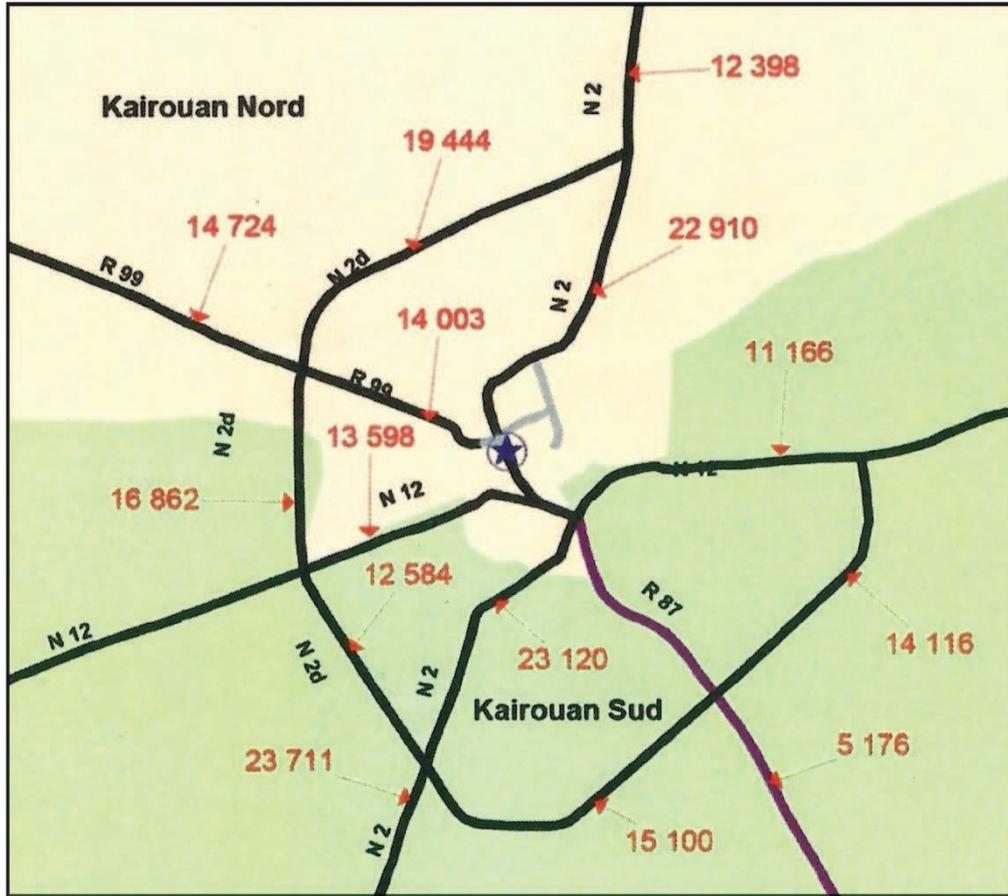


Figure 4.9: Débit journalier moyen de la circulation motorisée des véhicules à deux essieux ou plus à la ville de Kairouan. **Source :** Direction Générale des Ponts et Chaussées, Direction de l'Exploitation et de l'Entretien Routier (Recensement général de la circulation 2012)

À la ville de **Sidi Bouzid** et d'après le Recensement Général de la Circulation de 2012, le trafic journalier moyen de la circulation motorisée des véhicules à deux essieux ou plus est estimé de 5056 véhicules/jour pour la route régionale n°125 (Embt N13 à Sidi-Bouzid), de 4498 véhicules/jour pour la route régionale n°125 (Sidi-Bouzid à Embt N3) et de 7911 véhicules/jour pour la route régionale n°83 (Meknassy Sidi Bouzid à Embt L 887), (D.G.P.C, 2012). En 20 ans (1992-2012), le trafic journalier moyen a dépassé en moyenne les 4 % à Sidi Bouzid (Tableau.4.2). Ceci indique l'augmentation du nombre des véhicules et des enjeux humains exposés au risque inondation en cas de fortes pluies.

Tableau.4.2: Evolution du débit journalier moyen de la circulation motorisée des véhicules à deux essieux ou plus à la ville de Sidi Bouzid entre 1992 et 2012

Désignation	Total de la circulation motorisée			
	1992	1997	2012	Taux d'accroissement annuel moyen entre 1992 et 2012 (%)
RR 125 (Sidi-Bouzid-Bir Lahfey) Embt N13 à Sidi-Bouzid	2867	3373	5056	2,88
RR 125 (Sidi-Bouzid à Embt N3)	1505	2395	4498	5,63
RR 83 Meknassy Sidi Bouzid à Embt L 887	3607	4857	7911	4,01

Source: MEH-DCPL-RGC 1992-1997 et 2012 in (D.R.E.H et commune de Sidi Bouzid, 2002)

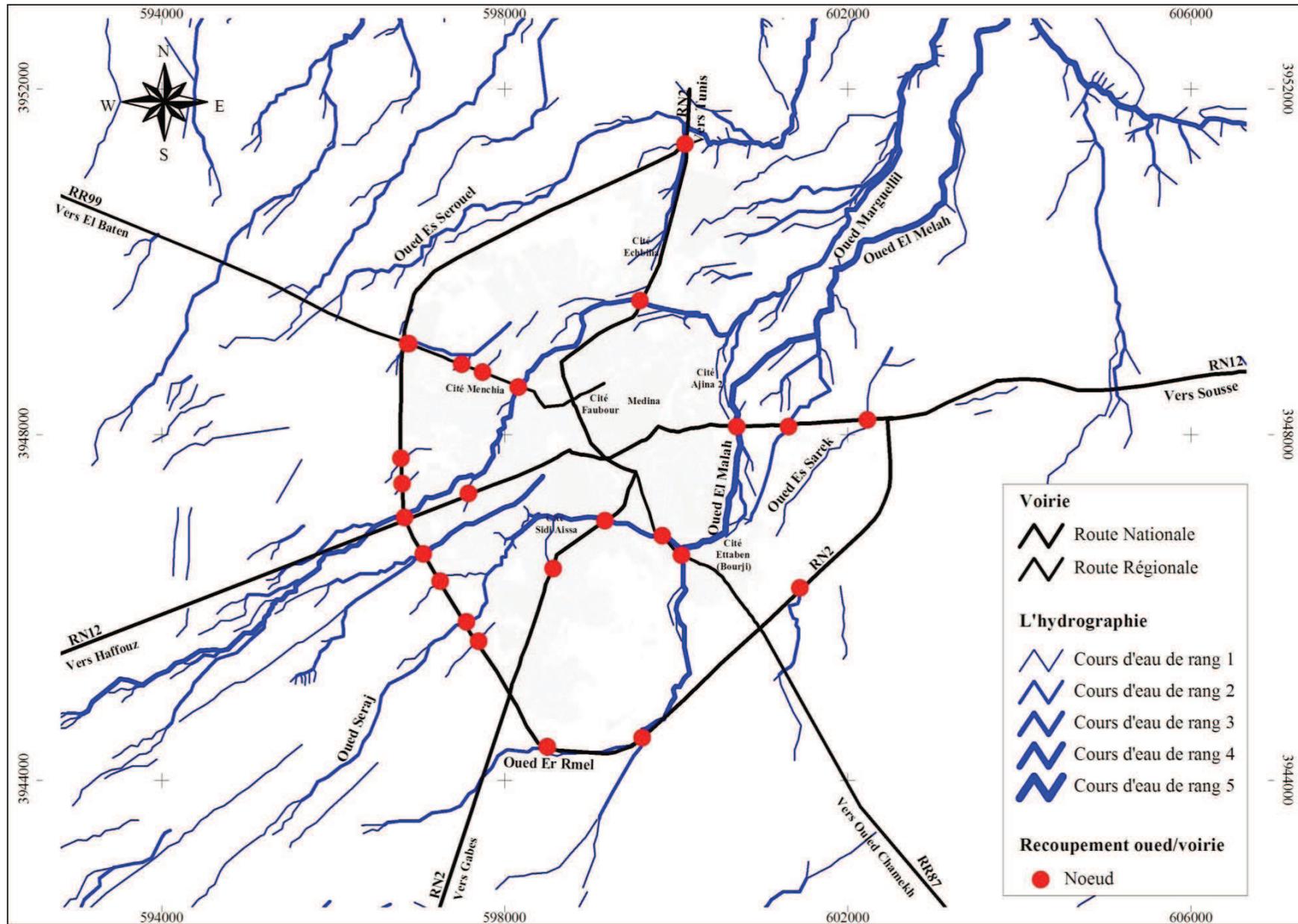


Figure 4.10 : Les cas de recoupement entre réseau hydrographique et voirie dans la ville de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2018, d'après feuille topographique Kairouan au 1/50000)

* **Un effet de canalisation:** Lorsqu'elles sont parallèles à l'écoulement. L'exemple de la route nationale n° 12 vers Haffouz à Kairouan qui est construite sur un oued. Les citoyens nous ont affirmé, lors d'un entretien (le 24 avril 2017), que lors des pluies exceptionnelles ce cours d'eau reprend son chemin naturel avec une vitesse d'écoulement importante. Les eaux de pluies pénètrent dans les maisons causant souvent des dégâts matériels.

* **L'état de la voirie :** est considéré aussi comme un facteur de vulnérabilité structurelle. Une route non aménagée (Photo 4.1), favorise sans doute la stagnation des eaux pluviales. Ceci, permet de bloquer la circulation et isole certaines maisons parfois même pendant des jours. Ce facteur, est traité en détails dans la troisième partie comme un critère de cartographie du risque inondation à l'échelle de la ville.



Photo 4.1 : Une route non aménagée au quartier d'Ouled Chelbi à la ville de Sidi Bouzid. Cliché NASRALLAH Wafa (le 20 Avril 2018)

4-6- Autres facteurs de responsabilité anthropique

* **Des travaux d'aménagements hydrauliques mal entretenus:** L'exemple du canal Fellet Galla qui traverse la ville de Sidi Bouzid. Il s'est transformé en un dépotoir des ordures ménagères à cause du mauvais entretien (Photo 4.2).



Photo 4.2 : Canal Fellet Galla (Cité Ouled Chelbi dans la ville de Sidi Bouzid). Accumulation de déchets plastiques dans le canal pouvant causer des phénomènes d'embâcle lors des inondations. Cliché NASRALLAH Wafa (20 Avril 2018).

* **La faible densité, le sous dimensionnement et le mal entretien du réseau d'évacuation des eaux pluviales** : est considérée, comme étant le vrai problème qui aggrave le risque d'inondation dans les deux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid. À **Kairouan** et jusqu'au 2008, il n'y avait pas un réseau d'évacuation des eaux pluviales dans la commune et même les projets réalisés ultérieurement se sont limités aux principaux axes routiers (RR 99, RN 2 et RN 12). À **Sidi Bouzid**, « *la mise en place d'un réseau d'assainissement des eaux pluviales est intervenue après les inondations de 1990* » (D.R.E.H et commune de Sidi Bouzid, 2002). L'étalement de ce réseau est limité aux principaux voies de communication et certaines quartiers localisées essentiellement dans la partie ouest de la ville. Les cités El Khadra, Ennour Ouest, Ouled Chelbi et El Filahi ne sont pas branchés jusqu'à nos jours à un réseau d'évacuation des eaux pluviales.

* **La canalisation des cours d'eau** : Ceci minimise sans aire d'expansion naturelle et augmente leur vitesse d'écoulement (Photo 4.3).



Photo 4.3 : Un cours d'eau canalisé à quartier El Mansourah à la ville de Kairouan. Cliché NASRALLAH Wafa (le 27 Mars 2018)

Conclusion

Depuis les années 75, les communes de Kairouan et de Sidi Bouzid ont connu un étalement sans précédent du tissu urbain. Cet étalement excessif de la nappe urbaine, sous l'effet de l'exode rural dans ces deux villes, a donné naissance à des quartiers d'habitat non réglementaire. Ces quartiers sont regroupés essentiellement tout au long de principales voies de communications sur les terrains inondables situés même au-delà de la digue, ce qui permet d'aggraver le risque d'inondation. D'autres facteurs humains sont responsables d'accentuer le risque dans les deux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid, à savoir : Le non aménagement de la voirie, le mauvais entretien des travaux d'aménagements hydrauliques, le sous dimensionnement des réseaux d'évacuation des eaux pluviales et la canalisation des cours d'eau...

Conclusion

Les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid sont au cœur des événements hydro-climatiques extrêmes que la Tunisie Centrale a vécus ces dernières décennies. Les fameuses crues, notamment des oueds Merguellil et Zeroud sont à l'origine des inondations les plus catastrophiques. Le régime hydrologique de ces deux capricieux cours d'eau se caractérise par sa grande irrégularité : Ils sont secs pendant des années mais en période de crues, ils se transforment en des vrais torrents causant des dommages souvent graves. Ces cours d'eau, s'étalent sur des terrains plats à pente faible qui se caractérisent par la prédominance des groupes de sols C et D à fort et très fort potentiel de ruissellement superficiel. Les faibles pentes et la fragilité des formations superficielles favorisent la divagation des cours d'eau qui ont changé de cours plusieurs fois au cours du siècle et sont susceptibles d'en changer de nouveau. Le climat se caractérise par un régime continental spécifique de la Tunisie Centrale. Les situations de « retour d'Est », y sont les responsables des précipitations pluvieuses diluviennes. Ce sont les saisons intermédiaires de l'automne et de printemps qui accumulent les maximums pluviométriques. À l'échelle mensuelle, les mois d'octobre et de septembre participent avec le plus grand pourcentage de la pluviométrie annuelle respectivement pour les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid. L'automne est la saison qui cumule les débits les plus élevés. En fait, les crues les plus dévastatrices, qualifiées de très exceptionnelles, sont produites généralement en mois de septembre et d'octobre, comme en 1969.

L'étude de l'évolution de leur occupation des sols, permet de distinguer un net recul des terrains arboricoles et des cultures annuelles au profit des espaces bâtis. En effet, malgré leur exposition aux inondations ces deux villes ne cessent de s'étendre, tout au long de principales voies de communication, sur des terrains inondables au-delà des digues de protection. Malgré les catastrophiques inondations de 1969, la rapidité de la croissance urbaine sous l'effet de l'exode rural a engendré la prolifération de l'habitat populaire spontané avec une trame irrégulière en périphérie du centre. L'étalement excessif du tissu urbain, l'état de la voirie, le mauvais entretien des travaux d'aménagements hydrauliques ainsi que l'empiètement sur le lit des oueds aggravent de plus en plus le risque d'inondation. A ce propos, Pagney, (1994) rappelle : « *Que le risque bascule dans la tragédie ne peut étonner que ceux qui ne savent pas ou ne veulent pas savoir. On discutera de l'évènement, on reconstruira, on répètera les mêmes erreurs... et de nouvelles pluies torrentielles, et de nouvelles inondations provoquent, là ou ailleurs d'autres morts et d'autres disparitions* ». Sur une longue échelle de temps, le développement des villes de Kairouan et Sidi Bouzid fut marqué par des crues majeures qui sont la traduction de l'aléa hydro-climatique analysé précédemment.

Deuxième partie

Aléa hydro-climatique et susceptibilité des terrains au risque inondation

« Au-delà des estimations statistiques de la fréquence des crues, rien ne remplace le bon sens et une bonne explication des caractéristiques climatiques et hydrologiques... ».(Zahar, 1991).



Kairouan – Inondations 05 Octobre 2013

Source : http://www.huffpostmaghreb.com/2013/10/06/pluies-kairouan-inondations_n_4052594.html

Introduction

Les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid sont situées à la plaine d'épandage des principaux oueds de la Tunisie Centrale. C'est ce qui renforce la susceptibilité de ces terrains au risque d'inondation et les met souvent au cœur des événements hydro-climatiques les plus extrêmes, tel que l'exemple de l'automne 1969 et de janvier 1990.

La deuxième partie de la thèse étudie l'aléa hydro-climatique (Pluies et crues extrêmes) ainsi que la susceptibilité des terrains étudiés au risque inondation. Elle est composée de trois chapitres:

Un premier chapitre s'intitule « Pluies extrêmes et risque inondation dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid ». Il s'agit essentiellement de proposer une typologie des événements pluviométriques à risque d'inondation, de définir les événements pluvieux extrêmes et d'étudier leur répartition annuelle, saisonnière et mensuelle ainsi que la durée et l'apport pluviométrique de ces événements.

Le deuxième chapitre s'intéresse à l'étude des crues extrêmes et de l'historique des inondations dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid. Nous y mettons l'accent sur la répartition spatio-temporelle des crues extrêmes et leurs conséquences et étudions les caractéristiques des grandes inondations historiques et récentes en nous appuyant sur des analyses de la situation météorologique et des dégâts occasionnés.

Le troisième chapitre a pour objectif de cartographier la susceptibilité des terrains à l'inondation dans le bassin versant Septentrional de la plaine de Kairouan et le bassin versant de l'oued El Fekka. Nous nous y basons sur une méthodologie qui consiste à combiner divers facteurs d'explication, notamment: la pente, le potentiel d'écoulement superficiel, le degré de propagation des crues et la protection des sols.

Chapitre 5

Pluies extrêmes et risque d'inondation dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid

Introduction

Les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid ont connu ces dernières décennies des inondations catastrophiques qui ont causé d'énormes dégâts. Les inondations les plus dévastatrices et les plus mémorables sont celles qui sont produites essentiellement suite à des pluies d'extrême violence. Dans ce chapitre, nous cherchons à étudier pour ces deux villes :

- ↪ Les maximas pluviométriques journaliers;
- ↪ L'évolution des jours de pluie ;
- ↪ La typologie des événements pluviométriques à risque d'inondation ;
- ↪ La définition des événements pluvieux extrêmes et leur répartition annuelle, saisonnière et mensuelle ainsi que la durée et l'apport pluviométrique de ces événements.

5-1- Les maximas pluviométriques journaliers : fréquence et variabilité

Les maximas journaliers de la pluviométrie montrent une très grande variabilité interannuelle (Fig. 5.1). À la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013, le maximum pluviométrique est de l'ordre de 82,7 mm enregistré lors de l'hiver de l'année agricole (1973-1974) précisément le 05/12/1973. À Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971 et 2014, c'est aussi en hiver mais plutôt lors de l'année agricole (1989-1990), exactement le 22/01/1990 que cette station a enregistré son maximum pluviométrique qui est d'environ 118,9 mm.

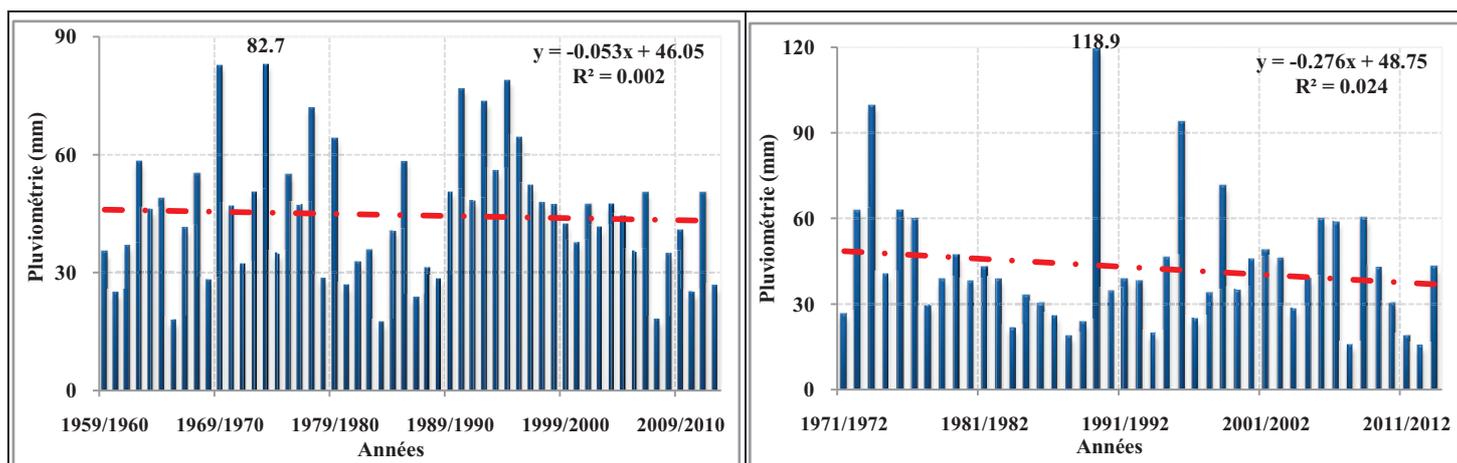


Figure n° 5.1: Les maximas journaliers de la pluviométrie à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 (à gauche) et à Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971 et 2014 (à droite). (Source des données brutes : D.G.R.E).

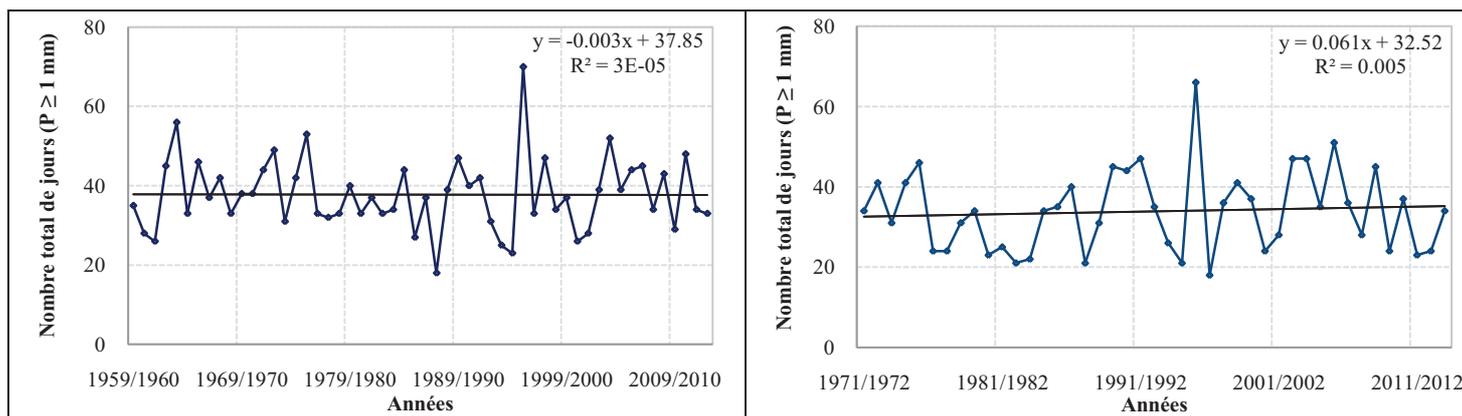


Figure n° 5.2: Evolution du nombre de jours de pluie ($P \geq 1$ mm) à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 (à gauche) et Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971 et 2014 (à droite). (Sources: D.G.R.E et Nasrallah et al., 2017).

Le nombre moyen annuel de ces jours est d'environ 38 jours à Kairouan et 34 jours à Sidi Bouzid. Mais, l'évolution des jours de pluie ($P \geq 1$ mm) dans les deux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid affiche une très grande variabilité interannuelle. Cependant, les tendances de jours de pluie (≥ 1 mm) sont stables pour les 2 stations (Fig. 5.2). Les événements pluvieux peuvent être qualifiés d'intenses ou d'extrêmes selon une méthode d'analyse couramment utilisée (Sahani et al., (2012); Ozer et al., (2014); Hangnon et al., (2015) et Nasrallah et al., (2017)). Les épisodes de pluies intenses sont ceux dont le total journalier est supérieur aux 95^e. En revanche, ceux qualifiés d'extrêmes dépassent le 99^e percentile (Tab. 5.1).

Tableau.5.1. Seuils des pluies intenses et extrêmes pour les stations de Kairouan SM (1959-2013) et Sidi Bouzid Ferme 20 (1971-2014)

Station	Coordonnées			Observations		P (mm)	
	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Période	Nombre des années	P. intense 95 ^e	P. extrême 99 ^e
Kairouan (SM)	35°40'49 "	7°45'48"	55	1959-2013	54	27,23	50,19
Sidi Bouzid Ferme 20	34°59'53 "	7°4'34"	376	1971-2014	43	26,9	51,58

(Source des données brutes : D.G.R.E).

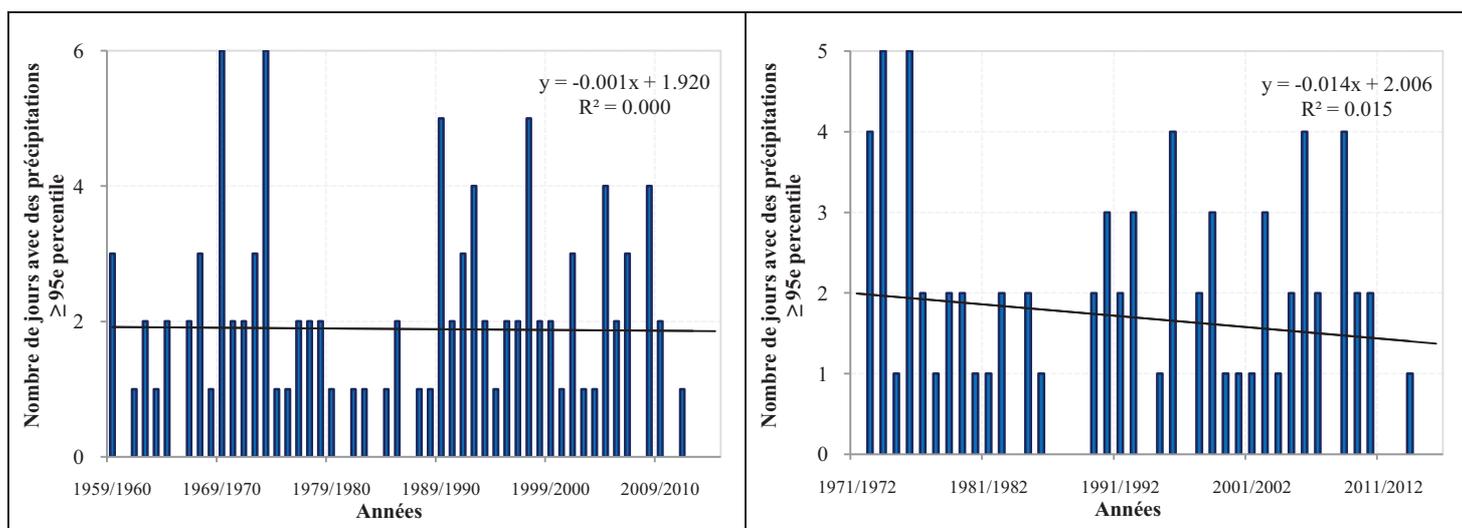


Figure 5.3: Fréquence de jours de pluie dont le total est supérieur au 95^e percentile à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 (à gauche) et Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971 et 2014 (à droite). (Sources: D.G.R.E et Nasrallah et al., 2017).

Le nombre annuel moyen de jours de pluies extrêmes et intenses à est estimé respectivement de 1,89 et 1,7 jour à Kairouan SM (1959 - 2013) et de 0,39 et 0,35 jour à Sidi Bouzid Ferme 20 entre (1971 - 2014).

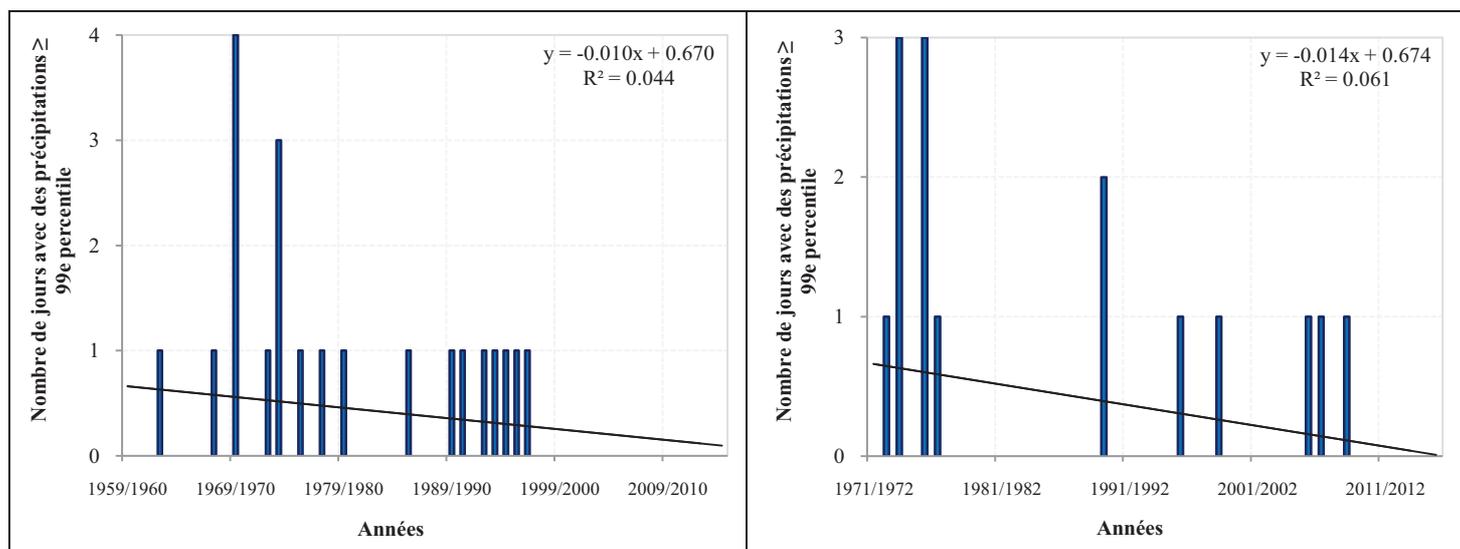


Figure. 5.4:Fréquence de jours de pluie dont le total est supérieur au 99^e percentile à Kairouan SM entre 1959 et 2013 (**à gauche**) et à Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971 et 2014 (**à droite**). (Source: D.G.R.E et Nasrallah et al., 2017).

L'analyse de tendance de ces 2 paramètres pluviométriques révèle une tendance non significative vers la baisse pour les événements pluvieux extrêmes (P 99p : définis à partir des seuils 50,19 mm pour Kairouan et 51,58 mm pour Sidi Bouzid). Quant aux événements pluviométriques intenses (P ≥ 95p) définis à partir du seuil de 27,23 mm à Kairouan et 26,9 mm à Sidi Bouzid, ils affichent une tendance non significative vers la baisse (Fig. 5.3 et 5.4). L'analyse de la figure 5.4 permet de constater qu'à partir de l'année agricole 1998/1999 à Kairouan SM et 2009/2010 à Sidi Bouzid Ferme 20, ces 2 stations n'ont enregistré aucun jour de pluie extrême.

5-2- Les événements pluviométriques à risque d'inondations : Typologie

Pour considérer une pluie comme génératrice de risque d'inondation, le cumul journalier doit être supérieur ou égal à 30mm. Ce seuil choisi est couramment utilisé en Tunisie. En l'occurrence, il a été adopté pour les pluies torrentielles par Kassab, (1979), ainsi que pour les pluies à risque en Tunisie par (Dallel, 2015). Ces pluies torrentielles, se présentent souvent sous forme des jours isolés. Les séquences de fortes pluies de plusieurs jours successifs font exception, (Hlaoui, 2008).

Tableau.5.2. Nombre de séquences de jours à très forte pluie (total ≥ 30) à Kairouan SM (1959-2013) et à Sidi Bouzid Ferme 20 (1971-2014)

Station	NS	
	Pj1	Pj2
Kairouan	1,24	0,09
Sidi Bouzid	1,12	0,12

(Source des données brutes : D.G.R.E)

NS : Nombre annuel moyen de séquences de jours à très forte pluie

Pj1 : Période de 1 jour ; Pj2 : Période de 2 jours consécutifs

L'analyse du tableau 5.2 laisse voir que pour 54 ans d'observations à Kairouan il y a eu 5 séquences de fortes pluies de 2 jours consécutifs (soit un nombre moyen annuel de l'ordre de 0,09 jour) et 67 jours de pluies torrentielles isolés. Quant à Sidi Bouzid sur 43 ans d'observation, il y a eu 5 séquences de fortes pluies de 2 jours consécutifs et 48 jours de pluies torrentielles isolés.

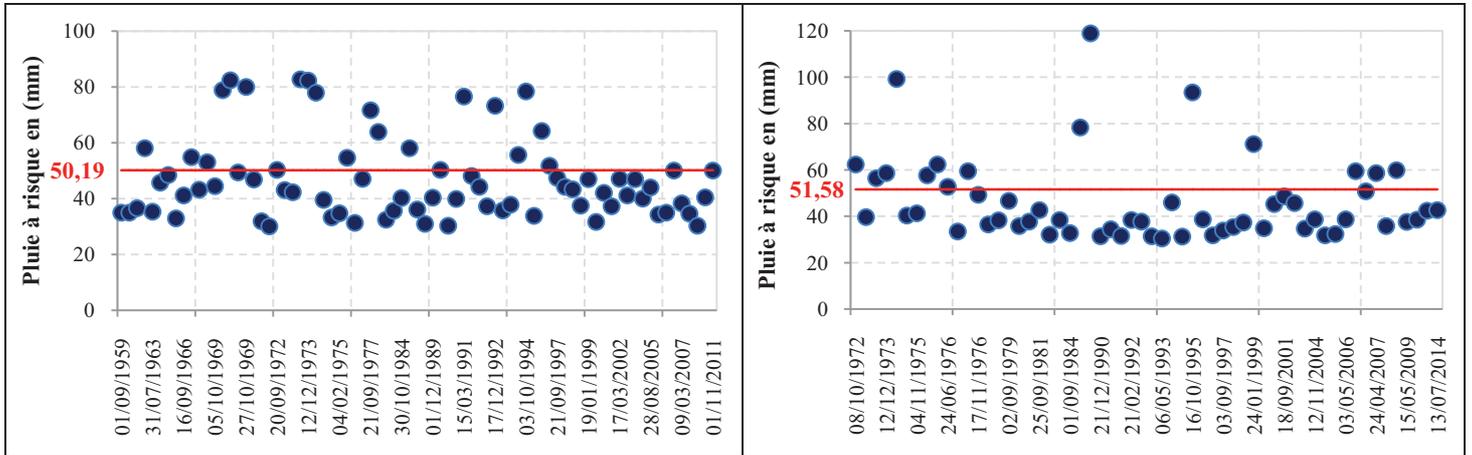


Figure 5.5: Les jours des pluies à risque à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 (à gauche) et Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971 et 2014 (à droite). (Sources: D.G.R.E ; Nasrallah et al., 2017).

Les jours de pluies à risque sont estimés d'environ 77 jours à Kairouan et 58 jours à Sidi Bouzid (Fig. 5.5). Ceux qualifiés d'extrêmes sont respectivement de 21 et 15 jours.

Afin de déterminer les types d'événements pluviométriques à risque d'inondations, on a eu recours à la loi d'ajustement de Gumbel (1958), couramment utilisée pour l'étude des valeurs extrêmes (Fig.5.6). Le choix de ce modèle statistique est fondé sur une comparaison avec le modèle GEV (Distribution Valeur-Extrême Généralisée, en se basant sur deux critères : Critère d'Information d'Akaike (AIC) et le BIC (Bayésien Information Criterion) ; (Hebal et Remini., 2011).

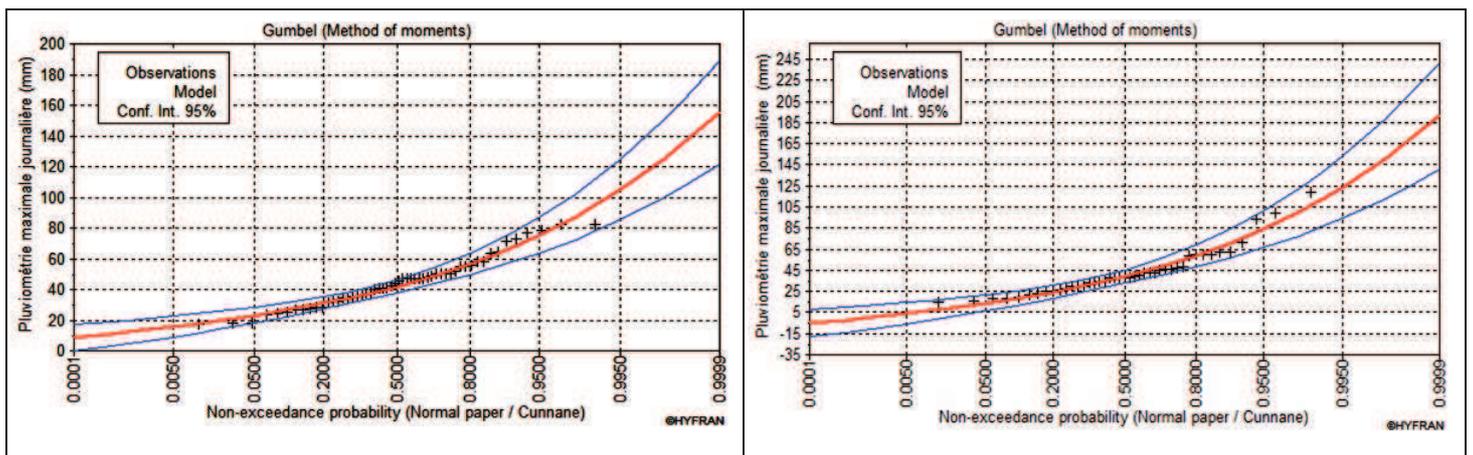


Figure n° 5.6: Ajustement statistique de la pluviométrie maximale journalière selon la « Loi Gumbel » à la station de Kairouan SM (1959- 2013) (à gauche) et Sidi Bouzid Ferme 20 (1971-2014) (à droite). (Sources: D.G.R.E ; Nasrallah et al., 2017).

L'utilisation du logiciel « HYFRAN », nous a permis de calculer ces deux critères, (Tableau.5.3). En fait, un modèle est qualifié plus adéquat qu'un autre s'il a un AIC (ou BIC) plus réduit.

Tableau.5.3. Les deux critères (BIC) et (AIC) calculés pour les modèles GUMBEL et GEV

Ville	Modèle	BIC	AIC
Sidi Bouzid	Gumbel (Méthode des moments)	380,785	377,263
	GEV (Méthode des moments)	382,423	377,139
Kairouan	Gumbel (Méthode des moments)	460,317	456,340
	GEV (Méthode des moments)	462,953	456,986

Selon la classification des événements extrêmes de Vandiepenbeeck, (1997), fréquemment utilisée, on a pu dégager 5 types d'évènements pluvieux en fonction de la période de retour:

- **Normal** : $PR < \text{à } 6 \text{ ans}$.
- **Anormal** : $6 < PR < 10 \text{ ans}$.
- **Très anormal** : $10 < PR < 30 \text{ ans}$.
- **Exceptionnel** : $30 < PR < 100 \text{ ans}$.
- **Très exceptionnel** : $PR > \text{à } 100 \text{ ans}$.

L'analyse du tableau ci-dessous, met en évidence la rareté des évènements pluvieux exceptionnels avec une période de retour : $30 < PR < 100 \text{ ans}$. La ville de Kairouan, sur une période de 54 ans (1959-2013), n'a connu que 3 évènements pluvieux exceptionnels avec un seuil pluviométrique ($80,6 < P < 96,2 \text{ mm}$). Quant à Sidi Bouzid sur une période de 43 ans (1971-2014), elle n'a connu que 2 évènements pluvieux exceptionnels et un seul évènement pluvieux qualifié de très exceptionnel avec un seuil pluviométrique ($P > \text{à } 111,9 \text{ mm}$) avec une période de retour supérieure à 100 ans. Il s'agit de l'évènement pluvieux du 22 janvier 1990, qui a fourni un apport pluviométrique journalier de l'ordre de 118,9 mm.

Tableau.5.4. Types des évènements pluvieux aux villes de Kairouan (1959-2013) et Sidi Bouzid (1971-2014)

Type d'évènement pluvieux	Période de retour	Seuil pluviométrique		Nombre d'évènements pluvieux	
		Kairouan	Sidi Bouzid	Kairouan	Sidi Bouzid
Normal	$PR < \text{à } 6 \text{ ans}$	$P < \text{à } 59,01 \text{ mm}$	$P < \text{à } 62,03 \text{ mm}$	65	51
Anormal	$6 < PR < 10 \text{ ans}$	$59,01 < P < 66,1 \text{ mm}$	$62,03 < P < 71,5 \text{ mm}$	0	3
Très anormal	$10 < PR < 30 \text{ ans}$	$66,1 < P < 80,6 \text{ mm}$	$71,5 < P < 91 \text{ mm}$	9	1
Exceptionnel	$30 < PR < 100 \text{ ans}$	$80,6 < P < 96,2 \text{ mm}$	$91 < P < 111,9 \text{ mm}$	3	2
Très exceptionnel	$PR > \text{à } 100 \text{ ans}$	$P > \text{à } 96,2 \text{ mm}$	$P > \text{à } 111,9 \text{ mm}$	0	1

(Source des données brutes : D.G.R.E).

Les dégâts occasionnés par ces pluies extrêmes exceptionnelles, abattues sur les communes de Kairouan et de Sidi Bouzid, seront traités dans le sixième chapitre. Mais comme le souligne Kassab, (1994), ce n'est pas uniquement lors d'un ou de plusieurs épisodes intensément pluvieux qu'on peut avoir des inondations catastrophiques. Ces derniers, peuvent être le résultat soit « *de très gros volumes d'eau dus à la succession de types de temps pluvieux ou moyennement pluvieux ou d'un épisode pluvieux qui vient accroître fortement les quantités d'eau que des types de temps plus ou moins humides ont déjà permis de recueillir* ». Pour cela, il a été nécessaire de développer davantage de critères afin de définir

convenablement un évènement pluvieux extrême capable de générer des inondations catastrophiques.

5-3- Les évènements pluvieux extrêmes

5-3-1- Fréquence annuelle des évènements pluvieux extrêmes

La définition d'un évènement pluvieux varie d'un spécialiste à un autre. En l'occurrence, le météorologue l'associe à une perturbation atmosphérique localisée dans le temps et dans l'espace. Pour un hydrologue, il définit plutôt à partir de sa trace au sol, matérialisée par une quantité d'eau mesurée (D'Amato, 1998). Dans ce travail, nous optons pour la deuxième approche, tout en l'améliorant par l'ajout de quatre critères pour la détermination d'un évènement pluvieux extrême « **EPEX** », à savoir :

↳ Un total pluviométrique de l'épisode pluvieux \geq au 99^e percentile (évènement pluvieux extrême).

↳ Une quantité minimale de pluie précipitée au-dessous de laquelle la pluviométrie est considérée comme nulle : 1 mm.

↳ Une durée de non pluie, permettant de séparer entre deux évènements successifs : Deux jours.

↳ Au moins une journée de l'épisode pluvieux ayant un total pluviométrique P mm/24h \geq 50,19 mm à Kairouan et 51,18 mm à Sidi Bouzid. Ces valeurs correspondent au 99^e percentile de la série pluviométrique de chaque station, seuil que nous considérons pertinent pour déterminer l'évènement pluvieux extrême.

La répartition annuelle des évènements pluvieux extrêmes (Fig. 5.7), permet d'inventorier une fréquence maximale annuelle d'évènements pour les deux stations. Ils sont enregistrés en 1976 à Sidi Bouzid et en 1969 à Kairouan, avec des cumuls pluviométriques annuels respectifs de 245,9 mm et de 490,4 mm (apport pluviométrique annuel maximal). A Sidi Bouzid le cumul pluviométrique annuel maximum produit par les évènements pluvieux extrêmes est d'environ 263,5 mm. Cet apport pluviométrique est le cumul de 2 évènements du mois de décembre 1973.

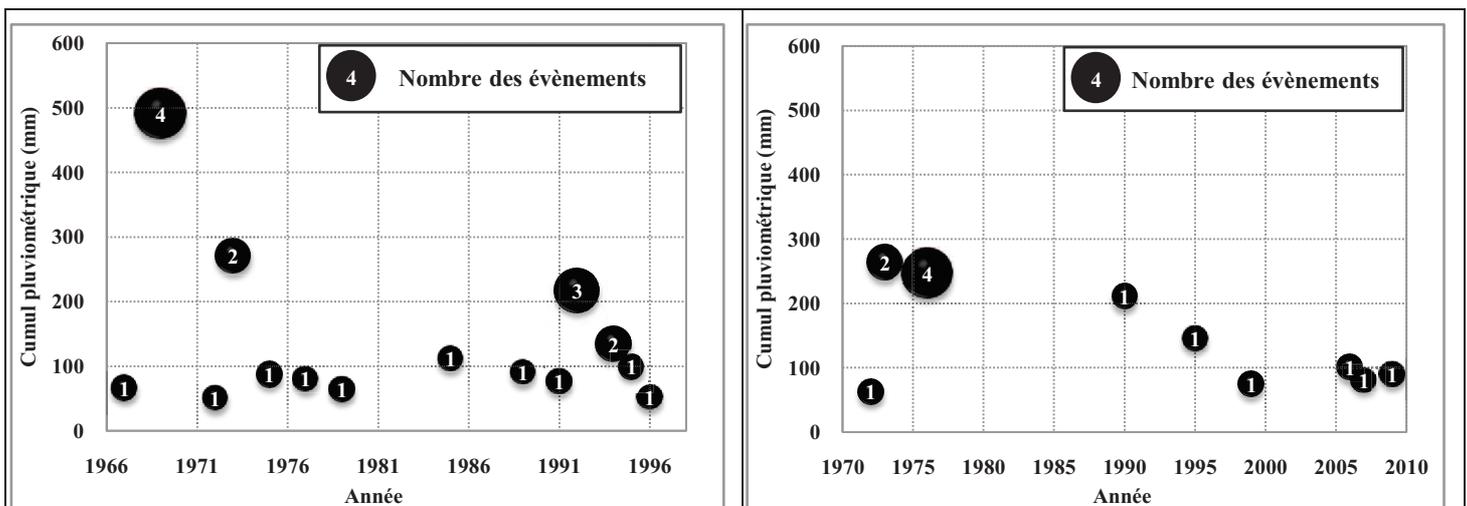


Figure 5.7: Répartition annuelle des évènements pluvieux extrêmes (Nombre et total pluviométrique) à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 (à gauche) et Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971 et 2014 (à droite). (Source des données brutes : D.G.R.E).

5-3-2- Répartition saisonnière de la fréquence d'évènements pluvieux extrêmes

À l'échelle saisonnière (Fig. 5.8), la fréquence la plus importante des évènements pluvieux extrêmes est enregistrée en automne à la station de Kairouan SM pendant la période de 1959 et 2013 avec un maxima au mois de septembre avec 6 évènements.

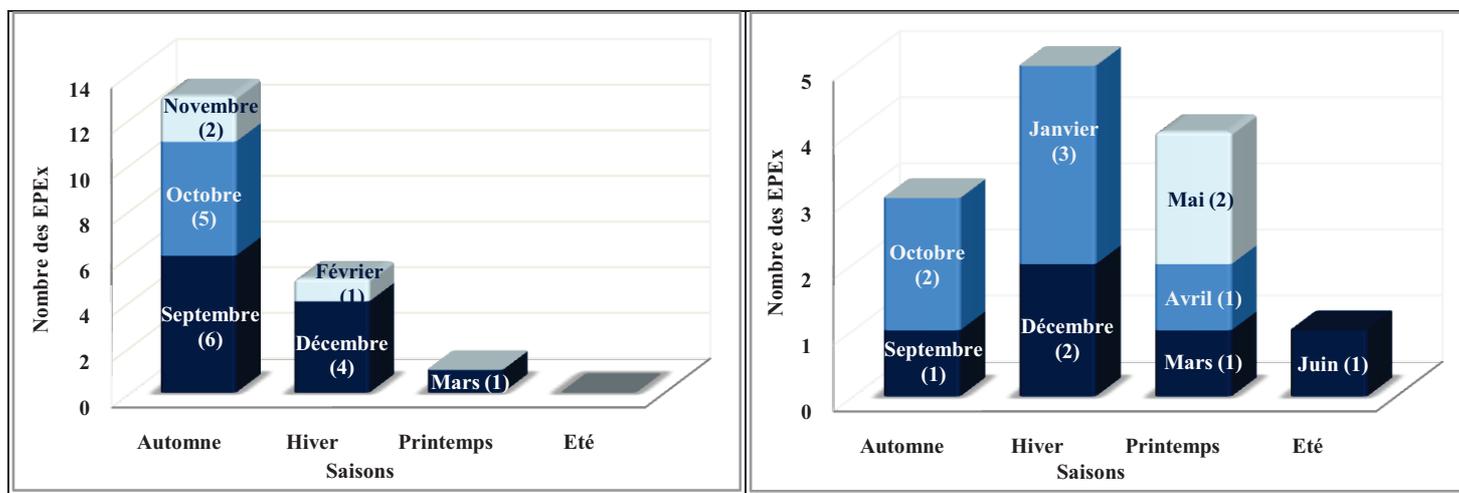


Figure 5.8: Répartition saisonnière du nombre d'évènements pluvieux extrêmes à Kairouan SM (1959- 2013) (à gauche) et à Sidi Bouzid Ferme 20 (1971- 2014) (à droite). (Source des données brutes : D.G.R.E).

À Sidi Bouzid Ferme 20 c'est plutôt en hiver qu'on remarque la prédominance des évènements pluvieux extrêmes avec un total de 5 évènements. Le mois de janvier cumule le maxima avec 3 évènements enregistrés entre 1971 et 2014.

5-3-3- Répartition mensuelle selon la pluviosité et le nombre d'évènements pluvieux extrêmes

L'étude de la répartition des mois, est faite selon deux critères :

↳ La pluviosité, définie par Larousse comme étant: « l'abondance de pluie observée en un lieu donné pendant une période de temps ». Dans notre cas, il s'agit de la quantité de pluie mensuelle.

↳ Le nombre mensuel des évènements pluvieux extrêmes.

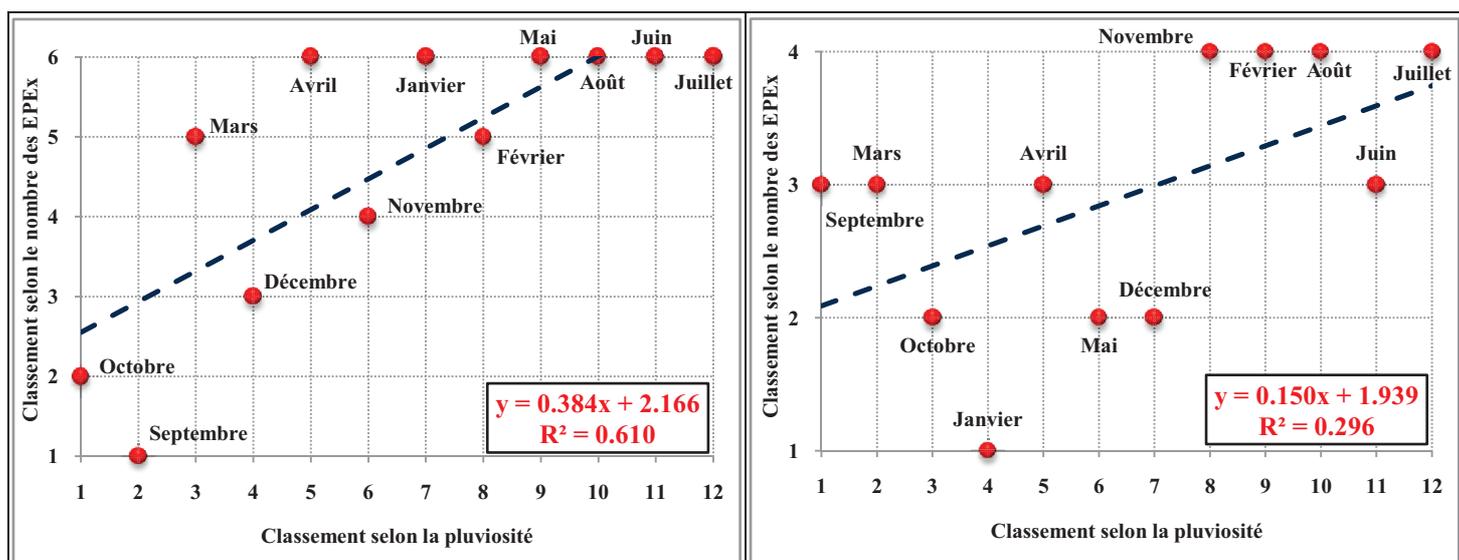


Figure 5.9: Répartition des mois selon la pluviosité et le nombre des évènements pluvieux extrêmes à Kairouan SM entre 1959 et 2013 (à gauche) et à Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971 et 2014 (à droite). (Source des données brutes : D.G.R.E).

Il ressort de l'analyse de la figure ci-dessus, que les mois ayant l'effectif le plus important d'évènements pluvieux extrêmes ne sont pas eux-mêmes qui détiennent les cumuls pluviométriques les plus élevés. A Kairouan qu'à Sidi Bouzid, ce sont respectivement les mois de septembre et de janvier qui cumulent le maximum d'évènements pluvieux extrêmes, alors que la pluviosité est plus remarquable aux mois d'octobre et de septembre.

5-3-4- Caractérisation des évènements pluviométriques extrêmes : Durée et apport pluviométrique

La saison des pluies en Tunisie se caractérise par sa courte durée effective, sa grande irrégularité, le faible groupement des jours pluvieux et l'importance des intervalles secs (Hénia, 1993).

Tableau 5.5. Durée et apport pluviométrique des évènements extrêmes à Kairouan SM entre 1959 et 2013

Année	Date de l'évènement pluvieux extrême	Cumul pluviométrique (mm)	Durée de l'évènement (Nombre de jours)
1967	20 et 21/11/1967	65,5	2
1969	24, 25 et 26/09/1969	96,1	3
	05, 06 et 07/10/1969	138,9	3
	21 et 22/10/1969	131,8	2
	26, 27 et 28/10/1969	123,6	3
1972	20/09/1972	50,3	1
1973	04 et 05/12/1973	110,4	2
	12 et 13/12/1973	160,2	2
1975	03, 04 et 05/11/1975	86,7	3
1977	21 et 22/09/1977	80,2	2
1979	01/09/1979	63,9	1
1985	15, 16 et 18/09/1985	111,3	3
1989	01 et 02/12/1989	90,6	2
1991	15/03/1991	76,6	1
1992	17 et 18/12/1992	90,9	2
1994	17/02/1994	55,6	1
	03/10/1994	78,4	1
1995	17, 18 et 19/10/1995	99,1	3
1996	09/09/1996	51,8	1

(Source des données brutes : D.G.R.E).

Les évènements pluvieux extrêmes se caractérisent aussi par le faible groupement des jours pluvieux (Tableaux 5.5 et 5.6). La durée maximale est de 3 jours successifs à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 et de 4 jours successifs à la station de Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971 et 2014. L'apport pluviométrique maximal d'un seul évènement est de 160,2 mm à Kairouan enregistré les 12 et 13 décembre 1973. Quant à Sidi Bouzid, c'est l'évènement pluvieux des 21, 22 et 23 janvier 1990 qui est considéré le plus important avec un total de 209,6 mm.

Tableau 5.6.Durée et apport pluviométrique des évènements pluvieux à Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971et 2014

Année	Date de l'évènement pluvieux extrême	Cumul pluviométrique (mm)	Durée de l'évènement (Nombre de jours)
1972	08/10/1972	62,4	1
1973	04 et 05/12/1973	84,7	2
	12, 13 et 14/12/1973	178,8	3
1976	27 et 29/03/1976	67,8	2
	06/05/1976	62,4	1
	22 et 24/06/1976	56,3	2
	07/09/1976	59,4	1
1990	21, 22 et 23/01/1990	209,6	3
1995	16, 17,18 et 19/10/1995	144,9	4
1999	24 et 25/01/1999	73,8	2
2006	02, 03 et 04/05/2006	99,5	3
2007	24, 25 et 26/04/2007	80,7	3
2009	19, 20 et 21/01/2009	89,1	3

(Source des données brutes : D.G.R.E).

Conclusion

Kairouan et Sidi Bouzid sont deux villes de la Tunisie Centrale qui se caractérisent par la rareté des évènements pluvieux intenses. Le nombre annuel moyen de jours de pluie est de 38 jours à Kairouan et 34 jours à Sidi Bouzid, alors que celui des pluies extrêmes ne dépasse pas le $1/100^{\text{ème}}$ de ce dernier soit respectivement 0,39 et 0,35 jour. Durant la période (1959-2013), la ville de Kairouan a connu trois évènements pluvieux exceptionnels à savoir ceux du : 21 octobre 1969 avec 82,4 mm ; du 05 décembre 1973 avec 82,7 mm et du 12 décembre 1973 avec 82,3 mm. Quant à la ville de Sidi Bouzid, elle a connu entre 1971 et 2014 deux évènements exceptionnels, celui du 13 décembre 1973 avec 99,2 mm et celui du 16 octobre 1995 avec 93,4 mm. Le 22 janvier 1990, cette ville a connu un évènement qualifié de très exceptionnel avec un cumul pluviométrique journalier d'environ 118,9 mm. On constate donc que l'année 1973 a été exceptionnelle pour ces deux villes. Ces pluies extrêmes ont causé des inondations parmi les plus mémorables, ce qui nécessite une étude détaillée de l'historique des inondations dans les deux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid ainsi que des dégâts qui y ont été occasionnés.

Chapitre 6

Historique des crues extrêmes et des inondations dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid

Introduction

Au cours des dernières décennies, la Tunisie Centrale a connu des crues extrêmes provoquées notamment des deux capricieux oueds de Merguellil et de Zeroud. L'ampleur des dégâts occasionnés par ces deux cours d'eau a été souvent importante. Penet, (1909) a cherché à détailler les crues très abondantes du Merguellil et du Zeroud durant la période comprise entre 1887 et 1907 (Tab.6.1). La plus violente crue de cette période a été celle de mi-décembre 1903. Son bilan a été très lourd avec dix morts, 800 brebis, 50 chameaux, 5 ânes et tout un douar ont été emportés...

Tableau.6.1: Les crues très abondantes du Merguellil et Zeroud jusqu'en 1907 (Penet, 1909)

Date de la crue	Ampleur de l'événement / Dégâts
21 août 1887	Cinq victimes dans les Kaoub.
6 octobre et 19 décembre 1888	-
14 janvier et 26 mars 1890	-
20 décembre 1892	-
Premiers jours d'avril 1893	-
28 et 29 novembre 1893	40 heures de pluie diluvienne, chemin de fer Decauville emporté sur 400 mètres.
21 mars et 3 octobre 1896	-
26 novembre 1899 et novembre 1900	Crue désastreuse pour les voies de communication, chemins de fer et routes endommagés.
2 octobre 1901	Chemin de fer coupé en plusieurs points, un train bloqué entre deux coupures.
14 novembre 1902	Un douar enlevé, sept personnes noyées.
Mi-décembre 1903	La plus violente de toutes, un douar des Remadhnias emporté, périssément de dix personnes, 800 brebis, 50 chameaux, 5 ânes, etc.
^{er} 1 mars 1904	-
18 août 1905	-
27 septembre 1906	Chemin de fer submergé, communications interrompues, débordement du Zeroud emportant un talus de la voie d'Aïn-Moularès en construction, trois victimes chez les Soualem.
17 septembre 1907	Circulation du train suspendue deux jours.

Tableau.6.2 : Principales inondations et dégâts associés au Centre de la Tunisie à Kairouan jusqu'au XX^{ème} siècle (Fehri, 2014 ; Modifié).

Année	Principales Villes/régions touchées	Ampleur de l'événement / Dégâts
861	Kairouan	Destruction du pont de Kairouan.
920	Kairouan et sa plaine, Rakkada	Constructions détruites, propriétés endommagées.
953	Kairouan	-
988	Mansoura	-
1932	Tunisie centrale	Débordement de Sabkhet Kalbia et coupure de la GP1 à la hauteur de Sidi Bouali (Oueslati, 1999).
Janvier 1946	Kairouan	Les communications par routes et par voie ferrée ont été interrompues et la ville de Kairouan s'est trouvée sur une île (Direction des travaux publics, 1946).
1953	Kairouan	-
1959	Sahel, Kairouan, Gabès	4000 sans abri et des dégâts matériels estimés à plus de deux millions de dinars (Oueslati, 1999).
Automne 1969	L'ensemble du pays en particulier la Tunisie centrale	300 000 personnes sinistrées et plus de 542 morts et d'énormes dégâts matériels estimés à l'époque entre 30 et 35 millions de dinars (Poncet, 1970).
Décembre 1973	Kairouan	Coupure des routes, des ponts endommagés, effondrement d'un bon nombre des gourbis et un nombre indéterminé des maisons ont subi des dommages. (La presse de Tunisie/ les 07, 14 et 15 Décembre 1973).
Janvier 1990	Tunisie centrale et méridionale	60 morts, perte de 7800 têtes de bétail rien qu'à Sidi Bouzid. Dégâts matériels très lourds estimés à plus de 90 millions de dinars : 58% des puits de surfaces endommagés, 14000 logements détruits... (Hamza, 1993 ; Hmercha, 2010).

De sa part Fehri, (2014) a regroupé les principales inondations de la Tunisie et les dégâts associés jusqu'au XX^{ème} siècle. Dans le tableau ci-dessus, j'ai essayé de sélectionner et d'ajouter les principales inondations de la Tunisie Centrale et notamment de la ville de Kairouan. Les plus importantes inondations qui ont touché les deux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid sont celles de l'automne 1969, décembre 1973 et janvier 1990. Ces événements pluvieux extrêmes ainsi que la répartition spatio-temporelle des crues extrêmes sont détaillés ici.

6-1- Répartition spatio-temporelle des crues extrêmes

6-1-1- Répartition temporelle des crues extrêmes

Une crue est qualifiée d'extrême si elle est capable de fournir un débit journalier supérieur ou égale à 99^{ème} percentile d'une série des débits journaliers pour une période donnée. Ici, nous intéresserons à l'étude des crues extrêmes à la fois exceptionnelles (avec une période de retour comprise entre 30 et 100 ans) et très exceptionnelles (dont la période de retour dépasse les 100 ans).

Pour le faire, la série de données de référence s'étale entre (1956-1978) pour la station de Sidi Saâd Aval sur l'oued Zeroud, entre (1991-2011) pour la station de Haffouz Téléphérique sur l'oued Merguellil et entre (1957-2009) pour la station de Khanguet Zazia sur oued El Htab (affluent d'oued Zeroud). Ces séries, nous ont permis de calculer les **seuils des crues extrêmes** pour chaque station qui s'élèvent à **13,95m³/s** à Haffouz Téléphérique, **55,4 m³/s** pour Sidi Saâd Aval et **23,8 m³/s** pour Khanguet Zazia.

Tableau.6.3.Types de crues aux villes de Kairouan aux stations de Sidi Saâd Aval (1956-1978) et Haffouz Téléphérique (1991-2011) et Sidi Bouzid à la station de Khanguet Zazia (1957-2009)

Type de crue	Période de retour	Seuil du débit journalier			Nombre des crues		
		Kairouan		Sidi Bouzid	Kairouan		Sidi Bouzid
		Oued Zeroud à Sidi Saâd Aval	Oued Merguellil à Haffouz Téléphérique	Oued El Htab à Khanguet Zazia	Oued Zeroud	Oued Merguellil	Oued El Htab
Normale	PR < à 6 ans	Q < à 1850 m ³ /s	Q < à 65,8 m ³ /s	Q < à 182m ³ /s	75	64	178
Anormale	6 < PR < 10 ans	1850 < Q < 2690 m ³ /s	65,8 < Q < 79 m ³ /s	182 < Q < 238m ³ /s	2	1	1
Très anormale	10 < PR < 30 ans	2690 < Q < 4790 m ³ /s	79 < Q < 106 m ³ /s	238 < Q < 376m ³ /s	3	0	5
Exceptionnelle	30 < PR < 100 ans	4790 < Q < 7740 m ³ /s	106 < Q < 135 m ³ /s	376 < Q < 559 m ³ /s	0	0	4
Très exceptionnelle	PR > à 100 ans	Q > à 7740 m³/s	Q > à 135 m³/s	Q > à 559 m³/s	1	1	2

(Source des données brutes : D.G.R.E).

Le calcul des seuils des débits journaliers, à partir desquels sont déduits les types de crues, ont été effectués par le logiciel « **Hyfran** ». Les modèles choisis sont ceux de « **G.E.V** » pour Sidi Saâd Aval et Khanguet Zazia et « **Gumbel** » pour la station de Haffouz Téléphérique. Le choix du modèle est basé sur un ensemble de critères définis au préalable (Cf. Chapitre 5). Les résultats regroupés dans le tableau ci-dessus (Tab.6.3), montrent que

pour des périodes d'observation de 22 et 20 ans, les oueds Zeroud et Merguellil n'ont connu qu'une seule crue très exceptionnelle avec des débits journaliers qui sont respectivement supérieurs à 7740 m³/s et 135 m³/s. A Sidi Bouzid sur une durée d'observation de 52 ans, la ville a connu 4 crues exceptionnelles dont 2 qualifiées de très exceptionnelles.

L'analyse du tableau.6.4, montre que les crues dévastatrices ayant touché les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid sont celles produites aux mois de septembre et d'octobre 1969, de décembre 1973 et de janvier 1990. Pour la station de Haffouz Téléphérique, la série des débits utilisée ne comprend pas les dates précédemment cités, puisqu'elle s'étale uniquement sur la période 1991-2011. La date de la crue très exceptionnelle fournie par cette série est le 09/02/2005, avec un débit journalier égal à 143 m³/s (soit un débit instantané égal à 500 m³/s). En outre, il est à signaler que selon les données collectées auprès de Direction Générale des Ressources en Eau « **D.G.R.E** », les très fortes crues de Merguellil enregistrées à la station de Haffouz Téléphérique ont engendré des débits de l'ordre de 448 m³/s le 27/09/1969 et 350 m³/s le 06/10/1969 (soit un débit instantané identique égal à 2900m³/s).

Tableau.6.4. Dates et débits des crues exceptionnelles et très exceptionnelles à Kairouan (stations de Sidi Saâd Aval (1956-1978) et Haffouz Téléphérique (1991-2011)) et à Sidi Bouzid (station de Khanguet Zazia, 1957-2009)

Type de crue	Période de retour	Seuil du débit journalier			Nombre des crues		
		Kairouan		Sidi Bouzid	Kairouan		Sidi Bouzid
		Oued Zeroud à Sidi Saâd Aval	Oued Merguellil à Haffouz Téléphérique	Oued El Htab à Khanguet Zazia	Oued Zeroud	Oued Merguellil	Oued El Htab
Exceptionnelle	30 < PR < 100 ans	4790 < D < 7740 m ³ /s	106 < D < 135 m ³ /s	376 < D < 559 m ³ /s	0	0	4
Date et débit				Débit (m ³ /s)			Date
				497 m ³ /s			27/10/1969
				482 m ³ /s			23/01/1990
				446 m ³ /s			13/12/1973
				379 m ³ /s			26/09/1969
Très exceptionnelle	PR > à 100 ans	D > à 7740 m ³ /s	D > à 135 m ³ /s	D > à 559 m ³ /s	1	1	2
Débit et date		Débit (m ³ /s)			Date		
		9080 m ³ /s	143 m ³ /s	690 m ³ /s	27/09/1969	09/02/2005	27/09/1969
		-	-	623 m ³ /s	-	-	29/10/1969

(Source des données brutes : D.G.R.E).

Pour la station de Sidi Saâd Aval sur l'oued Zeroud, c'est lors de l'année agricole (1969-1970) que cet oued a enregistré son débit maximum journalier (Fig. 6.1). C'était plus précisément en automne, le 27 septembre 1969, avec un débit de 9080 m³/s (soit un débit instantané qui équivaut 17050 m³/s).

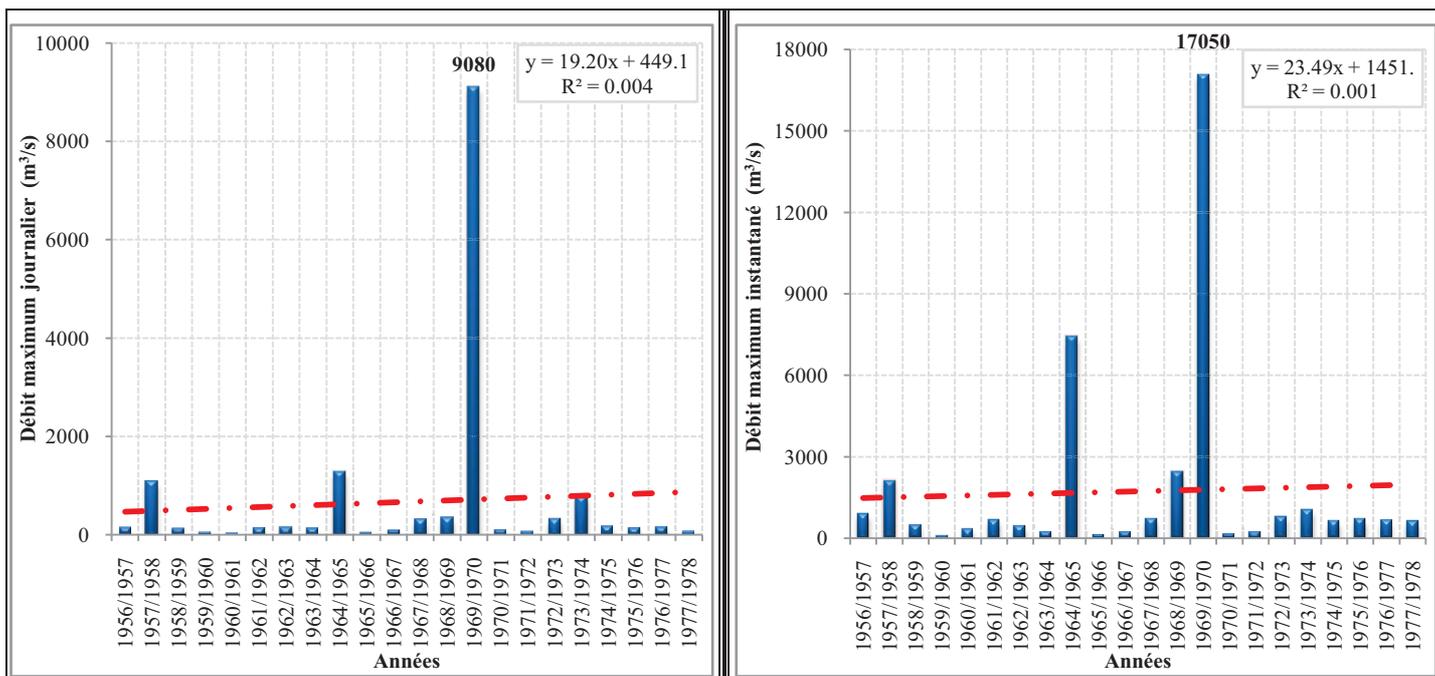


Figure n° 6.1: Les débits maximums journaliers (à gauche) et instantanés (à droite) d’oued Zeroud à la station de Sidi Saâd Aval entre 1956 et 1978. (Source des données brutes : D.G.R.E).

À la station de Khanguet Zazia, l’oued El Fekka (Affluent de l’oued El Htab), a connu 2 crues exceptionnelles, produites les 27/09/1969 et 29/10/1969. La crue du mois de septembre est la plus importante avec un débit journalier, qualifié le plus élevé pour une série d’observations de 52 ans (Fig. 6.2). Ce débit est de l’ordre de 690 m³/s (soit un débit instantané remarquable de 1530 m³/s).

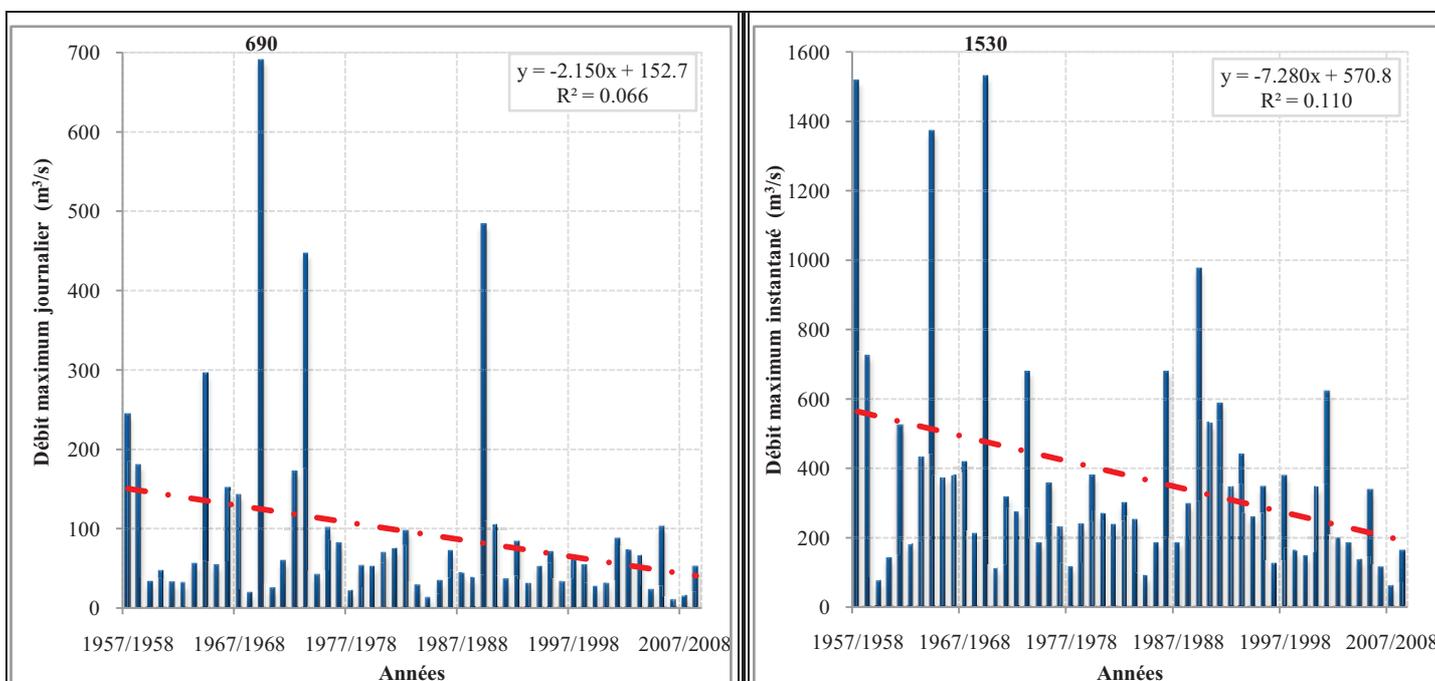


Figure 6.2 : Les débits maximums journaliers (à gauche) et instantanés (à droite) d’oued El Fekka à la station de Khanguet Zazia entre 1957 et 2009. (Source des données brutes : D.G.R.E).

Afin d'affiner nos résultats, nous sommes passés à une échelle plus fine ce qui nous a permis d'avoir une idée plus claire sur les principales caractéristiques des plus grandes crues affectant les oueds de Merguellil et Zeroud. Ceci, en se basant sur des tableaux qui sont extraits de la monographie hydrologique des oueds Zeroud et Merguellil datant de 1986.

Tableau.6.5. Caractéristiques des plus grandes crues de à l'Oued Zeroud à la station de Sidi Saâd

Début de la crue	Débit maximal en m ³ /s	Date	Volume total en Mm ³	Durée en heures
21/10/1953 à 24h00	2180	21/10/1953 à 3h00	57	24h00 – 1 pointe
4/10/1957 à 8h00	2090	6/10/1957 à 0h00	108	72h00 – 37h00 (corps principal)
30/10/1964 à 24h00	7410	30/10/1964 à 18h00	195	48h00 – 1 pointe
25/9/1969 à 22h00	17050	27/9/1969 à 13h40	1172	58h00 – 1 pointe
6/10/1969 à 12h00	11400	6/10/1969 à 19h00	405	48h00 – 2 pointes
22/10/1969 à 12h00	7800	22/10/1969 à 20h00	196	40h00 – 1 pointe
27/10/1969 à 8h00	6800	27/10/1969 à 13h30	813	80h00 – 3 pointes
7/10/1972 à 18h00	790	8/10/1969 à 7h45	40	48h00 – 3 pointes
12/12/1973 à 16h00	1050	13/12/1973 à 9h00	99	56h00

Source : (Bouzaiane et al., 1986).

Pour une période de 20 ans, entre 1953 et 1973, l'oued Zeroud a débordé 9 fois (Tableau.6.5). La plus grande crue se caractérise par un volume total qui équivaut à 1172 Millions de m³. Cette crue a débuté le 25/09/1969 à 22h00 et a duré 58 heures. Le débit de pointe a été enregistré le 27/09/1969 à 13h40 min. Il est de l'ordre de 17050 m³/s.

Tableau.6.6.Caractéristiques des principales crues à la station de Haffouz

CRUE A LA STATION DE HAFFOUZ							
Date et heure	V (10 ⁶ m ³)	H (mm)	tm	tb	Qx (m ³ /s)	Qx(m ³ /s/km ²)	Nat.
7/4/69 – 14h30	4,6	7,1	1h00	10h00	448	0,69	S
26/9/69 – 27/9/69	69,0	101,5	1h00	5h00	2900	4,45	Doublé
6/10/69 – 14h00	31,6	46,5	3h45	11h00	2900	4,45	S
22/10/69 – 17h00	16,8	24,8	3h30	8h00	1550	2,38	S
9/2/71 – 20h30	3,83	5,9	3h00	22h00	125	0,19	S
16/9/71 – 21h30	3,29	5,1	5h30	16h00	120	0,18	2p
8/9/72 – 23h15	2,46	3,8	0h45	11h00	142	0,22	S
7/10/72 – 22h00	6,36	9,8	2h00	15h00	255	0,39	S
27/3/73 – 28/3/73	9,91	15,2	1h45	-	148	0,23	C
13/12/73 – 6h00	5,06	7,8	2h45	14h00	171	0,26	2p
27/5/76 – 17h00	2,87	4,3	2h00	13h00	172	0,25	S
29/6/76 – 19h30	2,87	4,3	1h20	10h00	350	0,52	S
22/7/76 – 19h30	0,26	0,4	2h45	6h00	36	0,06	S
5/10/76 – 11h50	0,48	0,7	0h30	8h00	50	0,07	S
18/11/76 – 5h45	1,20	1,8	2h00	8h00	95	0,14	S
11/4/79 – 16h00	2,45	3,6	2h00	13h00	97	0,14	S
15/4/79 – 11h00	3,48	5,2	1h00	15h00	140	0,21	S
16/8/79 – 20h20	4,63	6,9	2h20	12h00	212	0,31	S

5/9/80 – 23h10	0,13	0,2	0h45	5h00	20	0,03	S
30/9/80 – 15h45	0,61	0,9	2h00	5h00	57	0,08	S
25/9/81 – 20h00	1,01	1,5	1h20	6h00	178	0,26	S

Source : (Bouzaiane et al., 1986)

L'analyse du tableau 6.6 laisse voir qu'entre 1969 et 1981, l'oued Merguellil a connu 21 crues. La plus importante est celle de septembre 1969. Il s'agit d'une crue double produite à cheval entre le 26 et le 27/09/1969. Elle a duré 5 heures et avec un volume d'eau écoulé de l'ordre de 69 millions de m³ et une hauteur de lame d'eau qui a dépassé le 1 mètre.

À la station de Khanguet Zazia sur l'oued El Htab, c'est la crue du 25 septembre 1969 qui a été qualifiée la plus fatale. Elle s'est déclenchée à 18h00 et a duré 78h00, avec un volume total de 94,8 millions de m³. Son débit de pointe a été enregistré le 27/09/1969 à 11h30 d'une valeur de 1530m³/s(Tableau.6.7). Ces durées des crues qui dépassent les 2 jours voire même les 3 jours favorisent l'expansion des zones inondables, menaçant ainsi des terrains plus vastes.

Tableau.6.7. Caractéristiques des plus fortes crues observées à la station de Khanguet Zazia

Début de la crue	Débit max. en m ³ /s	Date	Volume total en Mm ³	Durée heures
4/10/1957 à 20h00	1516	5/10/1957 à 18h05	27,8	58h00
5/9/1957 à 4h20	726	7/6/1959 à 13h00	16,1	56h00
29/10/1964 à 16h00	1370	30/10/1964 à 22h30	30,2	56h00
25/9/1969 à 18h00	1530	27/9/1969 à 11h30	94,8	78h00
6/10/1969 à 5h20	347	7/10/1969 à 8h00	16,4	67h00
21/10/1963 à 19h20	1203	23/10/1969 à 1h00	49,8	59h00
27/10/1969 à 1h00	950	27/10/1969 à 13h00	47,0	23h00
28/10/1969 à 17h20	1530	29/10/1969 à 3h00	70,2	48h00
26/3/1973 à 17h20	274	28/3/1973 à 2h00	32,3	96h00
12/12/1973 à 4h20	679	13/12/1973 à 5h00	49,3	80h00

Source : (Bouzaiane et al., 1986).

6-1-2- Répartition spatiale des crues extrêmes

Le dépouillement des données bibliographiques, nous a permis de collecter une gamme variée de cartes représentant les zones d'extension des terrains inondables des oueds El Fekka et Serg Dhiba (Affluents de l'oued El Hatab) pour la ville de Sidi Bouzid et Merguellil et Zeroud pour la ville de Kairouan (Tableau.6.8). Pour Sidi Bouzid, on n'a pu collecter que 3 cartes :

↳ La carte n°1, présente l'étalement de la plaine d'inondation suite aux inondations de janvier 1990. Elle est réalisée par la Direction d'Hydraulique Urbaine (D.H.U) et montre que seulement la partie nord-ouest de la ville a été fortement touchée par l'aléa inondation. Ceci explique le rôle important des travaux hydrauliques qui ont été construits suite aux inondations de 1969 (notamment la digue) à réduire les dégâts.

↳ La carte n°2, est élaborée par le Bureau de l'Inventaire et des Ressources Hydrauliques (B.I.R.H) suite aux inondations de 1969. Cette carte montre que la ville est

totallement envahie par les crues de l'oued El Hatab. Suite à ces inondations cet oued, a eu un nouvel itinéraire de direction Sabkhet El Majdoub.

↳ Une troisième carte (carte n°3), est une carte synthétique réalisée par la Direction Générale de l'Aménagement du Territoire (D.G.A.T) en 2004. Elle représente différents types de zones inondables, non inondables et de stagnation dans la plaine de Sidi Bouzid. Quant à la ville, entourée par un cercle rouge sur la carte, elle représente une zone entièrement inondable et menacée par le risque inondation.

D'autres cartes à différentes échelles et dates illustrent les zones de submersion des crues des oueds Merguellil et Zeroud :

↳ La première (carte n°4) date de l'année 1909 a été réalisée par PENET Pierre. Elle montre que les périmètres d'inondation s'étalent de part et d'autre de la médina de Kairouan (le noyau central de la ville), censé être à l'abri du risque.

↳ La deuxième carte (carte n°5) a été établie par la direction des travaux publics, suite aux crues des oueds Zeroud et Merguellil du 26 au 30 janvier 1946. Elle illustre deux types de zones inondées :

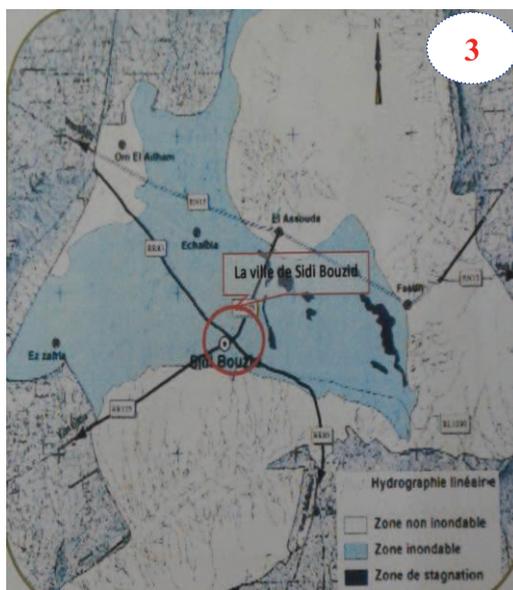
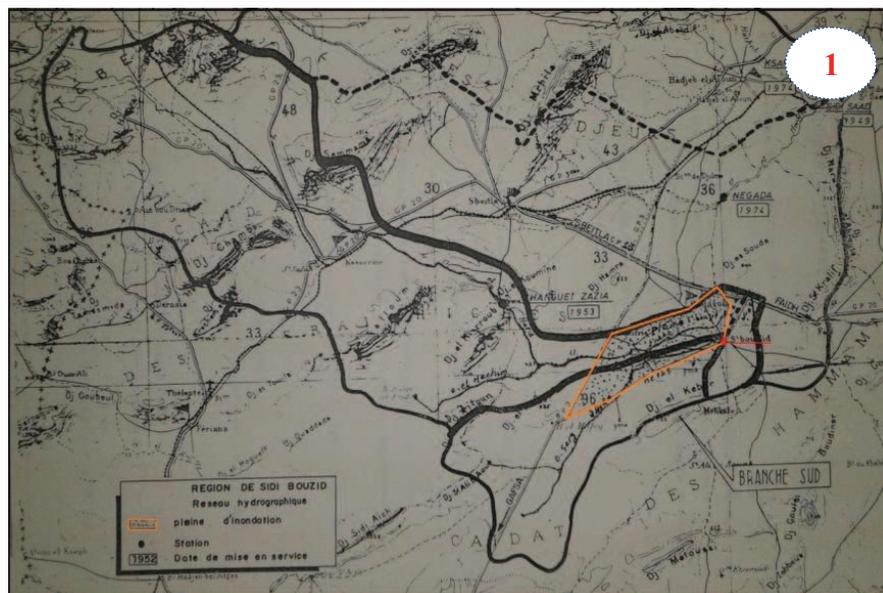
✓ **Des zones inondées par les crues des oueds** (et peuvent même être inondées par beau temps). Despois, (1955), affirme que « *Le temps peut être resté parfaitement beau au-dessus de la plaine tandis que le Haut Tell et la Haute Steppe ont eu de violents orages : c'est alors, sous un ciel bleu, que la crue arrive brutalement, avec un bruit de tonnerre, emportant tout sur son passage* ». Elles sont représentées sur la carte par une couleur gris foncée. Ces zones entourent la médina de Kairouan qui est protégée par les remparts et s'étalent sur une bonne partie de la plaine.

✓ **Des zones inondées par les pluies locales.** Il s'agit essentiellement de la médina de Kairouan colorée sur la carte en gris claire. La médina est donc fortement menacée par les pluies locales mais elle est toujours à l'abri des inondations causées par les crues des oueds. Ceci, confirme que le noyau de la ville est fondé dans un endroit stratégique, non inondable. **(Cf. Site de la ville de Kairouan).**

↳ Les trois dernières cartes illustrent différemment les zones inondées par les crues de 1969. Ceci peut être expliqué par la variation des échelles. La carte n°8, à petite échelle montre que la ville de Kairouan a été entièrement inondée, avec une déviation de l'oued Zeroud vers Sabkhet Sidi El Hani située au nord-est de la ville. En affinant l'échelle (cartes n°6 et 7), on a pu constater que même lors des inondations de 1969 la médina a été protégée. En effet, « *Les grandes crues d'Oued Zeroud suivaient la même direction générale. Elles s'étendaient largement dans la plaine de Kairouan, mais les plus grosses eaux suivaient approximativement les tracés des oueds Er Rmel, el Malah et Es Sarek* ». (Direction des travaux publics, 1946).

Tableau.6.8.Les zones d'inondation des oueds Merguellil et Zeroud à Kairouan et des oueds El Fekka et Serg Dhiba à Sidi Bouzid

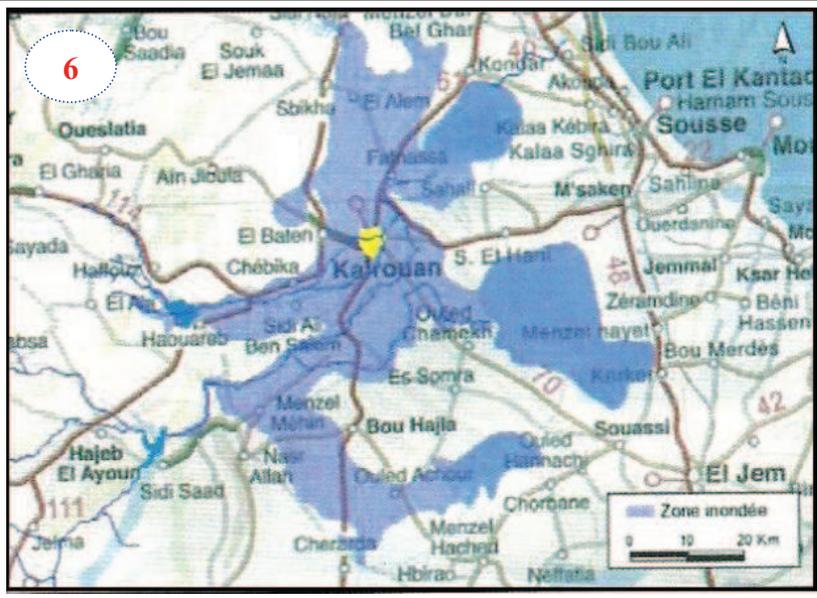
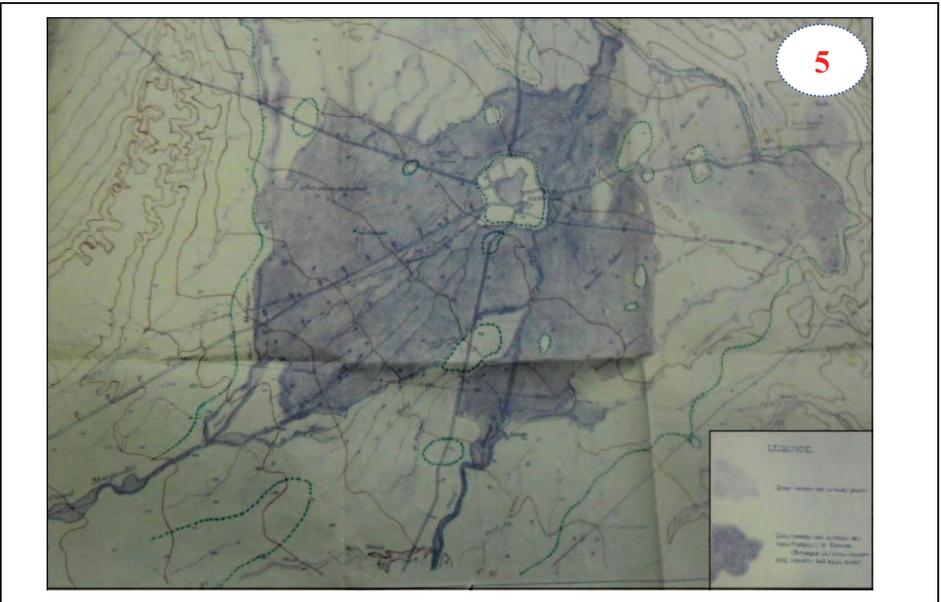
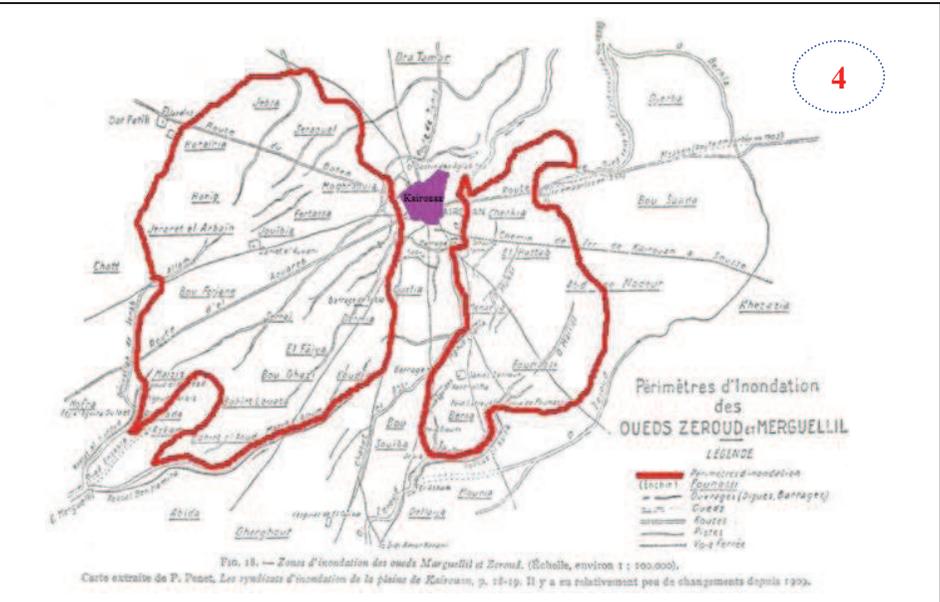
Sidi
Bouzid



Sources

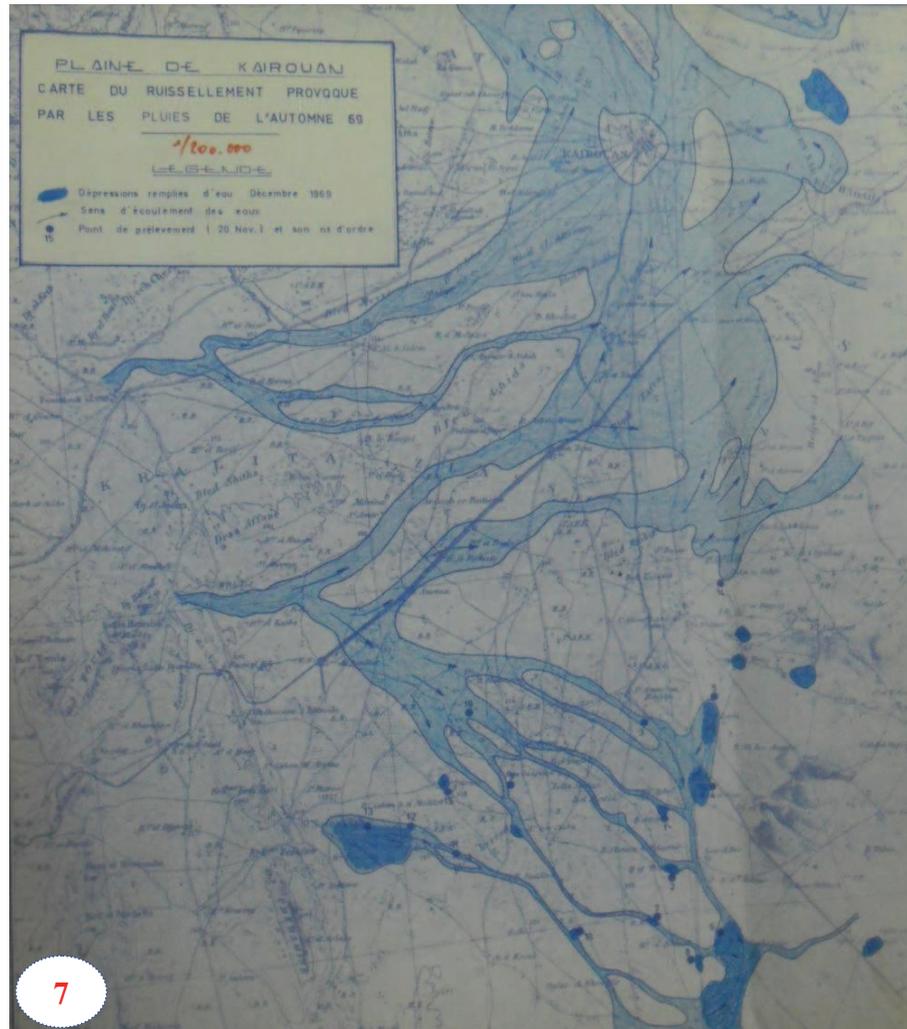
- 1- Direction d'Hydraulique Urbaine (D.H.U), (1990). –*Protections des villes contre les inondations. Lot 2 : Ville de Sidi Bouzid (Avant projet détaillé)*, 129 p.
- 2- Bureau de l'Inventaire et des Recherches Hydrauliques (B.I.R.H), (1969). –*Note sommaire sur les crues de 1969*, 20 p + Carte.
- 3- Direction Générale de l'aménagement de Territoire (D.G.A.T.), (2004) – *Schéma directeur de l'aménagement de l'agglomération de Sidi Bouzid*, In, Ministère de L'équipement, d'habitat et d'Aménagement du territoire - Direction régionale de Sidi Bouzid., (2013) –*Révision du Plan d'Aménagement Urbain de la commune de Sidi Bouzid. Première phase : Rapport provisoire*, 45 p.

Kairouan

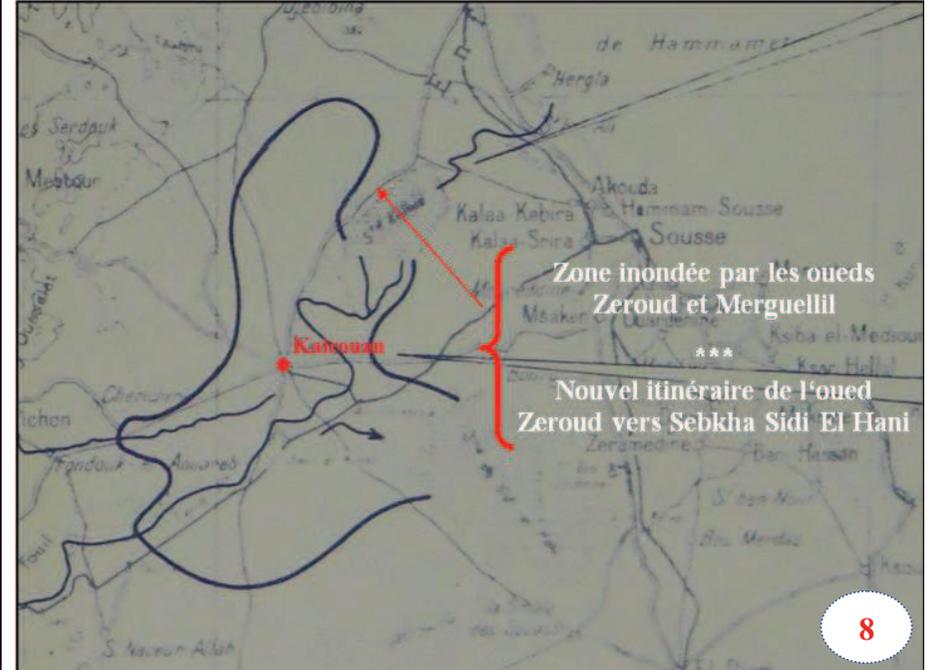


Sources

- 4-Penet, (1909). - *Les syndicats d'inondation de la plaine de kairouan Zeroud et Merguellil : Contribution à l'étude de l'Hydraulique Agricole en Tunisie catastrophes*, 36 p. In, Despois, (1955). - *La Tunisie orientale, Sahel et basses Steppes*, Editions Armand Colin, Paris, 554 p.
- 5-Direction des travaux publics, (1946). – *Compte rendu sur les dégâts causés par les crues des Oueds Merguellil et Zeroud du 26 au 30 Janvier 1946*, Collection B.I.R.H, 7 p + Carte.
- 6-Dallel, (2015). - *Les pluies à risques en Tunisie. Contribution à l'étude des aléas et risques climatiques en Tunisie*, Publications de l'Université de Tunis I, F.S.H.S, U.R « GREVACHOT », pp. 33-59.



7



8

Sources

- 7-Bureau de l'Inventaire et des Recherches Hydrauliques (B.I.R.H), (1969). – *Crues de Septembre et Octobre 1969 : Propagation des crues*, 7 p + Carte.
- 8-Bureau de l'Inventaire et des Recherches Hydrauliques (B.I.R.H), (1969). – *Note sommaire sur les crues de 1969*, 20 p + Carte.

6-2- Conséquences environnementales des crues extrêmes

6-2-1- Dérivation et changements des lits d'oueds suite aux crues

Le régime des oueds typique de la Tunisie Centrale, se caractérise par des crues brutales et rapides ainsi que par l'instabilité des lits sur les cônes. *Cette instabilité est la résultante de plusieurs facteurs notamment l'alluvionnement, la forme des cônes alluviaux ainsi que le peu de consistance des limons* (Despois, 1955). À l'occasion des crues violentes, « le plus petit filet d'eau formé à la faveur de moindre fossé artificiel peut devenir un oued » (Despois, 1955). Penet, (1909), affirme qu'à la suite de la crue dévastatrice de l'oued Zeroud en novembre 1899, un véritable oued de 3 mètres de profondeur sur 20 à 30 mètres de largeur s'est formé en une nuit le long de la route de Kairouan à Msaken. Il assure aussi, que lors de la crue de 1904, une dérivation du Merguellil est devenue un oued de 40 mètres de large sur 2 mètres de profondeur. Il est à noter aussi que suite à la fameuse crue de 1969, l'oued Zeroud a suivi un nouvel itinéraire et a coulé vers Sabkhet Sidi El Hani, par l'oued El Moktaâ. (Bureau de l'Inventaire et des Ressources Hydrauliques (B.I.R.H), 1969). Pour l'étude des différentes variations de l'Oued El Fekka dans sa partie aval (la plus proche de la ville) et de l'Oued Serg Dhiba, suite aux crues de janvier 1990, on s'est basé sur l'étude de Bousnina et Oueslati, (1990), qui affirme que « La dynamique des eaux, lors des inondations, a été étroitement influencée par les variations du tracé et de la morphologie de l'oued, mais aussi par différents aménagements humains ». Ceci, afin de réaliser le tableau récapitulatif ci-dessous (Tableau.6.10).

6-2-2- Un volume important des sédiments charriés

Le transport solide ou le transit sédimentaire est le transport des sédiments par un cours d'eau. Les matériaux transportés sont à l'origine d'une érosion du fond du lit d'oued, des berges ou des terres du bassin versant. L'apport du transport solide est proportionnel à l'importance de la crue. Plus la crue est importante plus l'apport est élevé.

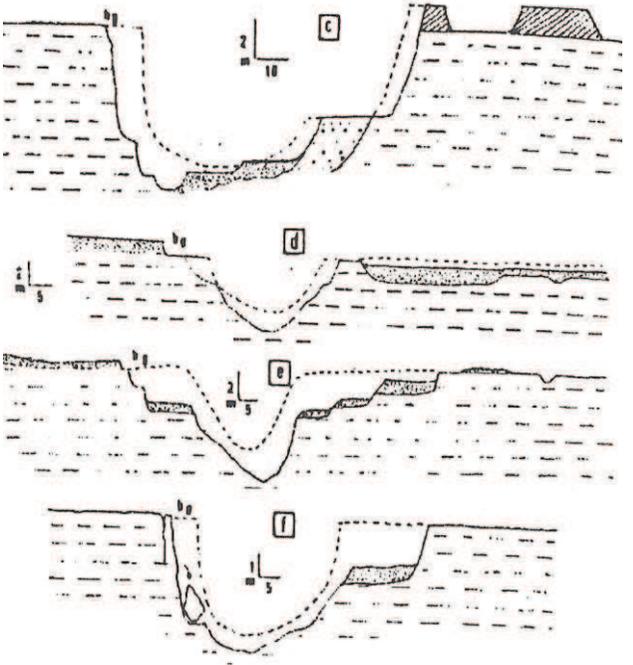
Tableau.6.9.Transport solide des bassins versants des oueds Zeroud et Merguellil

Transport solide du bassin versant d'oued Zeroud	
Année moyenne	6 millions de tonnes
Fréquence centennale	24 millions de tonnes
Année 1969-70	174 millions de tonnes
Transport solide du bassin versant d'oued Marguellil	
Année moyenne	0,8 millions de tonnes à Haffouz et 1,46 millions de tonnes à Sidi Boujdaria
Fréquence cinquantennale	2,65 millions de tonnes
Année 1969-70	6,7 millions de tonnes

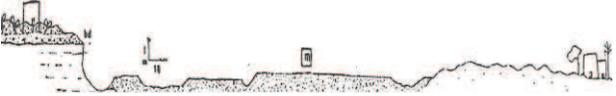
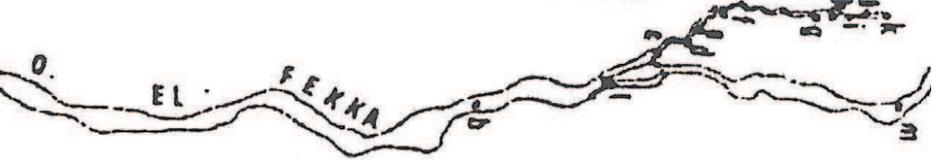
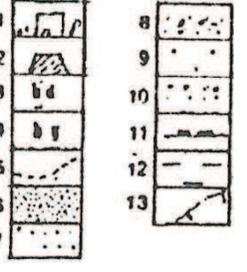
Source : (D.H.U, 1998).

L'année agricole 1969-1970, qui s'est caractérisée par des crues destructives produites essentiellement aux mois de septembre et d'octobre 1969 s'est distinguée par des quantités importantes des matériaux transportés (Tableau. 6.9).

Tableau.6.10. Les différentes variations de l'Oued El Fekka dans sa partie aval et de l'Oued Serg Dhiba, suite aux crues de janvier 1990 d'après (Bousnina et Oueslati, 1990)

	Avant les inondations de 1990	Après les inondations de 1990	Profils
La branche Nord de l'Oued El Fekka	<p>L'amont : - Un tracé rectiligne.</p> <p>- Une section relativement large (50 à 120 m) et encaissée (3 à 5 m).</p>	<p>- Un recul des berges de 7 à 25 m sur la rive gauche et 5 à 10 m sur la rive droite.</p> <p>- Un remblaiement épais de 1 à 2,5 m.</p>	
	<p>La partie moyenne : - Elle dessine un coude vers le Nord et montre plusieurs sinuosités.</p> <p>- Une section moins large (20 à 40 m) et plus encaissée (4 à 7 m) que la partie amont.</p>	<p>- Une partie de l'écoulement a évité le coude que dessine l'oued et suit un itinéraire plus direct.</p> <p>- Les eaux ont emprunté d'anciens bras de l'oued endommageant plusieurs aménagements.</p> <p>- La formation d'une couche alluviale au sommet des berges (figures c, d, e et f).</p> <p>- La formation aux dépens de berges convexes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Des banquettes d'érosion : larges de quelques décamètres et perchées de 1 à 3 m au dessus du talweg. - Des banquettes d'accumulation : de taille parfois comparable à la terrasse holocène de certains petits oueds. <p>- Recul important des berges concaves (Un recul de 10 m à la hauteur de Sidi Mansour).</p> <p>- Les laisses de fin de crue dans le fond d'oued sont minces (0,5 à 0,9 m).</p>	

	<p>Vers l'aval :- Un tracé rectiligne avec quelques sinuosités.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Une section encaissée de 2 à 2,5 m et large de 10 à 15 m. 	<ul style="list-style-type: none"> - Remblaiement des formes préexistantes (figures g, h, i, j et k). - A certains endroits la section de l'oued est à peine reconnaissable (à la hauteur des Ns'ibia). - Vers l'amont il y'a à la fois une apparition et un recul des berges (figure g). <p>→ La branche Nord passe à un bras mort.</p>	
<p>La branche Sud de l'Oued El Fekka ('Oued El Meit' ou l'oued mort)</p>	<p>A l'amont :- Une digue en terre qui barrait la branche Sud construite après les inondations de 1969 dans le but de protéger la ville de Sidi Bouzid.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Une banquette d'accumulation formée contre la digue depuis sa construction d'une épaisseur de 1 à 1,5 m occupée par des jeunes plantations. 	<ul style="list-style-type: none"> - Rupture de la digue permettant un envahissement brutal de grandes surfaces occupées par des cultures et des habitations. - Destruction totale ou presque de la banquette d'accumulation. - Encaissement de la section de l'oued (de 1 à 2 m) accompagné d'un sapement des berges sur une distance de 50 à 100 m. - Les laisses de fin de crue ont : 	

	<p>En aval : - Une section de l'oued qui n'a pas fonctionné depuis la construction de la digue.</p>	<p>* Comblé certaines irrégularités. * Permis la construction d'un modèle de larges banquettes d'accumulation (figure l).</p> <p>- Rafrâchissement de la section de l'oued avec un léger encaissement et un recul surtout de la berge droite (alors que lors des inondations de 1969 les débordements ont intéressé surtout la berge gauche).</p> <p>- Un important remblaiement dans la section de l'oued ainsi que sommet des berges permettant l'apparition d'une couche alluviale récente datant des inondations de 1969 (figure m).</p> <p>→ La branche Sud 'l'Oued El Meit' retrouve la vie.</p>		
		 <p>1- maisons et cultures (sans échelle) ; 2- digue; 3- berge droite ; 4- berge gauche ; 5- profil approximatif de la section de l'oued à la veille des inondations ; 6- alluvions des inondations de janvier 1990 ; 7- alluvions formées en arrière d'un radier en béton; 8- couche alluviale formée lors des inondations de 1969; 9- dunes, 10-banquette d'accumulation antérieure aux inondations de 1990; 11- ruines romaines dégagées à l'occasion des inondations; 12- dépôts holocènes; 13-croûte calcaire.</p>		
<p>Oued Serg ed Diba</p>	<p>- Le lit de cet oued qui est bien marqué dans la partie amont, s'estompe fortement et devient peu marqué en aval. (Hmercha, 2010).</p>	<p>Amont</p>	<p>- Oued Serg ed Diba a enregistré un encaissement de valeur métrique, un recul des berges plurimétrique et une érosion régressive pluridécamétrique.</p>	
		<p>Aval</p>	<p>- La formation d'une nappe alluviale sableuse ou sablo-limoneuse et de couleur clair atteignant une épaisseur qui varie de 0,5 à 0,9 m.</p>	

Pour le bassin versant de l’oued Zeroud, les matériaux transportés sont de l’ordre de 174 millions de tonnes (soit 7,25 fois la fréquence centennale et 29 fois la moyenne annuelle). Quant au bassin versant de l’oued Merguellil, les quantités des matériaux transportés sont de 6,7 millions de tonnes (équivalent à 2,5 fois la fréquence cinquantennale, 8,4 et 4,6 fois la moyenne annuelle mesurée respectivement aux stations de Haffouz et de Sidi Boujdaria).

Tableau.6.11. Apports des sédiments et turbidité moyenne des crues observées sur l’Oued Zeroud à la station de Sidi Saâd (Septembre et octobre 1969)

Date de la crue	Volume de la crue en 10 ⁶ m ³	Apport de sédiments en 10 ⁶ kg	Turbidité moyenne en g/l
25 au 28/9/69	1183,24	42480	35,9
27 au 30/10/69	760,95	44310	58,23

Source : (Bouzaiane et al., 1986).

L’analyse du tableau n°6.11, permet de constater que d’une durée de 3 jours seulement (du 25 au 28 septembre 1969), la crue de l’oued Zeroud avec un volume de 183,24 millions de m³ et une turbidité moyenne de 35,9 g/l a produit un apport sédimentaire de 42480 millions de kilogrammes. Quelques jours plus tard du 27 au 30 octobre 1969, la crue générée par l’oued Zeroud est d’un volume moins important de l’ordre de 790,95 millions de m³ mais d’un apport sédimentaire et une teneur en matière de suspension plus élevés. Ceci, peut être expliqué par la vitesse de l’écoulement qui a été plus importante.

Une autre étude réalisée par STUDI, GIZ et MEDD, (2013), a montré que la quantité des transports solides de l’oued Zeroud, lors des crues de septembre et octobre 1969 est estimée de 275 millions de m³. Si le barrage de Sidi Saâd mis en service en 1981 existait au moment de ces crues, il aurait subi un comblement total, puisque sa capacité est d’environ 209 millions de m³.

6-3- Caractéristiques des grandes inondations dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid

6-3-1- Caractéristiques des inondations de l’automne 1969

Les pluies de l’automne 1969, qui se sont produites après une longue période sèche, ont été caractérisées par la persistance, l’intensité ainsi que par leur extension à l’ensemble du pays. L’indice pluviométrique le plus élevé a été enregistré dans les zones habituellement arides ou subarides et les quantités d’eau impressionnantes ont été recueillies en septembre et principalement en octobre (Kassab, 1979). Ces inondations catastrophiques, sont le résultat de trois facteurs principaux: « *La succession de plusieurs épisodes fortement pluvieux favorisant la saturation des terres en eaux, les grandes intensités pluviométriques et la contribution des différents oueds dans le volume total des eaux enregistrées* » (Dallel, 2015). L’ensemble du pays en particulier la Tunisie centrale a connu pendant cette période environ 300 000 personnes sinistrées, plus de 542 morts et d’énormes dégâts matériels estimés à l’époque entre 30 et 35 millions de dinars (Poncet, 1970). Un article de la Presse de Tunisie (mercredi, 1^{er} octobre 1969), affirme que les dégâts ont été énormes « *parce que la Tunisie n'a ni les moyens, ni l'expérience, ni l'infrastructure nécessaires pour déjouer les coups bas de l'eau et les rendre inoffensifs, sinon bénéfiques. Il existe aussi une autre cause: la soudaineté de*

l'épreuve et les masses impressionnantes d'eau déversée en très peu de temps... Les oueds d'habitude inoffensifs, allaient se remplir d'eau en 48 heures, se gonfler et quitter leurs lits pour aller se déverser très loin dans les champs... Le lac d'El Kelbia a reçu en une nuit une quantité d'eau qui équivaut celle reçue durant les cinq dernières années... ». Durant les mois de septembre et d'octobre 1969, les totaux pluviométriques enregistrés dans les villes de Kairouan (station Kairouan SM) et de Sidi Bouzid (station Sidi Bouzid Ferme 13) ont été exceptionnels, atteignant respectivement les 572,7 mm et 690,2 mm. Précisons que c'est au cours de la troisième décennie de septembre (du 24 au 26) et de la première et troisième décennie d'octobre (du 5 au 7, du 21 au 23 et du 26 au 28), que ces inondations se sont produites.

Tab.6.12 : Caractéristiques des pluies exceptionnelles des mois de septembre et octobre 1969 aux stations de Kairouan SM et Sidi Bouzid Ferme 13

Station	Mois	Date de la pluie	Cumul pluviométrique de 24h (mm)	Cumul pluviométrique de l'épisode (mm)	Cumul de la décennie	Cumul du mois
Kairouan (SM)	Septembre 1969	25/09/1969	25,1	78,7	126,3	144,9
		26/09/1969	53			
		27/09/1969	0,6			
	Octobre 1969	05/10/1969	44,4	138,9	153,2	427,8
		06/10/1969	15,7			
		07/10/1969	78,8			
		21/10/1969	82,4	133,9	257,9	
		22/10/1969	49,4			
		23/10/1969	2,1	123,6		
		26/10/1969	21,6			
27/10/1969		80				
28/10/1969	22					
Sidi Bouzid Ferme 13	Septembre 1969	25/09/1969	21,9	251,7	266	269,4
		26/09/1969	121			
		27/09/1969	108,8			
	Octobre 1969	05/10/1969	11	153,6	156,6	420,8
		06/10/1969	17,4			
		07/10/1969	125,2			
		21/10/1969	0	61,2	264,2	
		22/10/1969	58,2			
		23/10/1969	3	138		
		26/10/1969	0			
27/10/1969		80				
28/10/1969	58					

(Source des données brutes : D.G.R.E)

Le caractère exceptionnel de cet événement hydro-pluviométrique suscite des questionnements quant à ses origines atmosphériques.

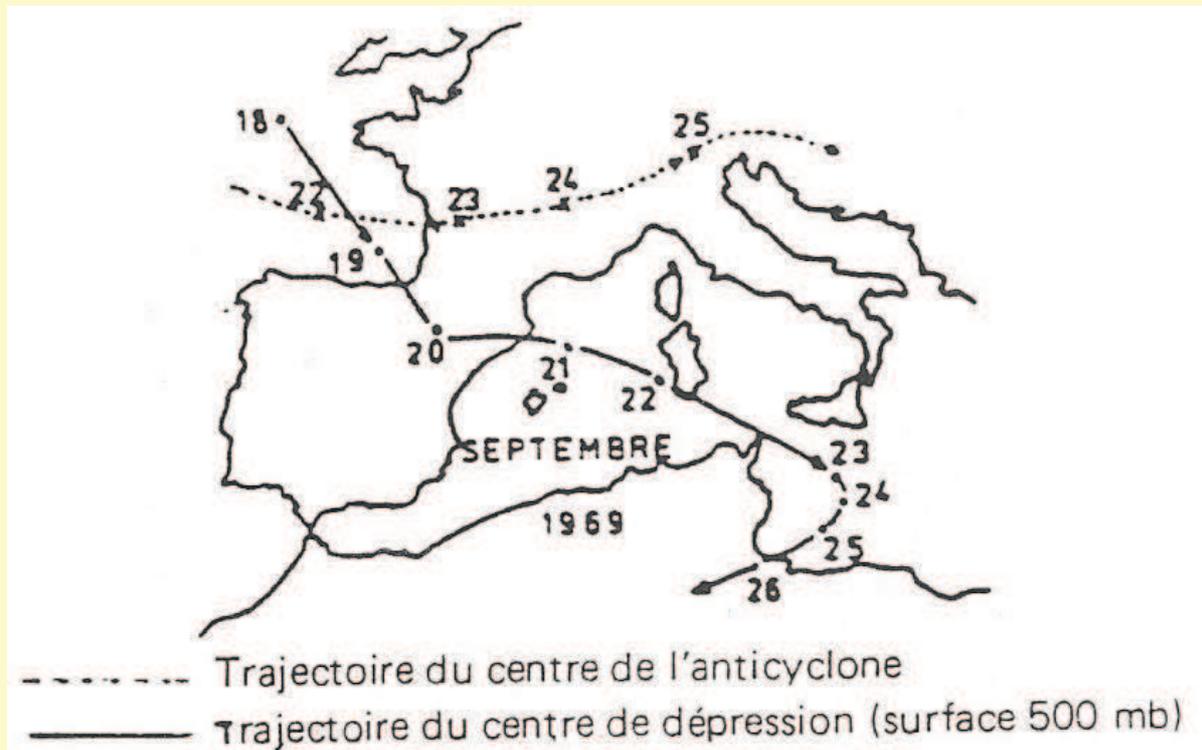
6-3-1-1- Analyse de la situation météorologique de l'automne 1969

La situation atmosphérique diluvienne de l'automne 1969 a fait couler beaucoup d'encre. Plusieurs études ont cherché à analyser leur caractère exceptionnel et ses origines

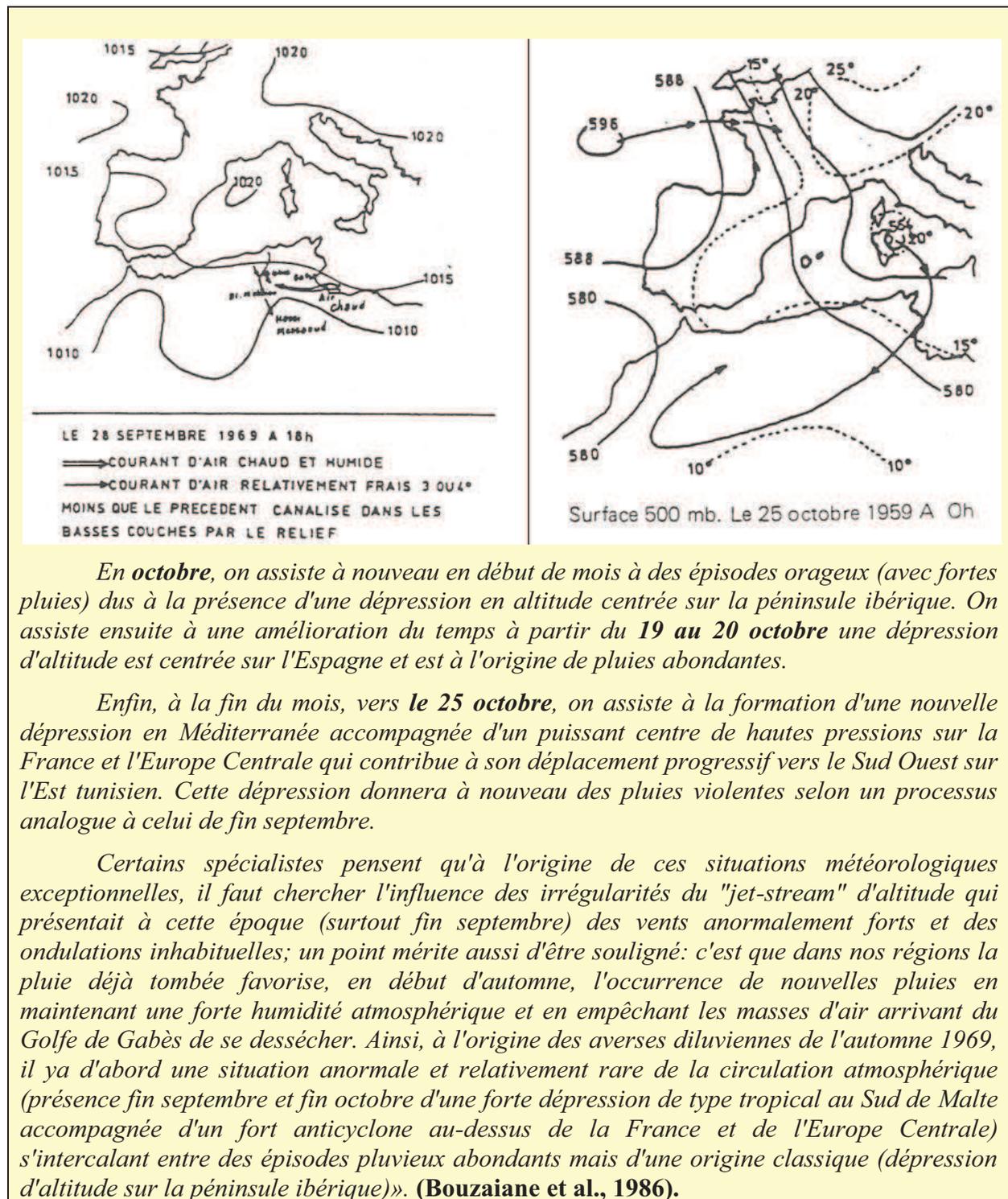
atmosphériques. Afin de bien décrire la situation météorologique de l'automne 1969 on a eu recours à l'analyse de (Bouzaiane et al., 1986).

« Fin août, début **septembre**, on a pu noter l'apparition sur la péninsule ibérique, d'une dépression barométrique d'altitude génératrice, suivant un schéma classique, d'averses violentes avec orages et grêle sur la bordure Nord du Sahara et donc de la Tunisie. Puis après une période d'accalmie, on a observé **fin septembre, à partir du 20**, l'apparition d'une dépression en altitude en provenance du Golfe de Gascogne.

Après avoir longé les Pyrénées, elle s'est déplacée lentement vers l'Est en Méditerranée. Une zone de hautes pressions de forte densité apparaissant alors sur la France puis l'Europe Centrale contribue à accélérer ce mouvement et à infléchir sa course vers le Sud, puis vers le Sud-ouest jusqu'au Sud de Malte où elle restera presque stationnaire pendant un certain temps. La température élevée de la mer à cette époque de l'année a favorisé par effet convectif le développement de la dépression en petit cyclone de type tropical à centre chaud... Ce petit cyclone, qui donne naissance à des vents de tempête mais cependant pas tellement rapides, va se déplacer vers l'Ouest; **le 26**, il sera centré au Sud de Gafsa et commencera à se désagréger, n'étant plus alimenté par l'air chaud et humide de la Méditerranée.



Il provoque des pluies diluviennes qui ont intéressé de vastes superficies. Un courant de retour d'air saharien qui s'humidifiera rapidement au contact de la mer au large de la côte Libyenne et dans le Golfe de Gabès donnera naissance à un important système nuageux qui contribuera à maintenir un temps orageux et pluvieux jusqu'au **28 septembre**, date à partir de laquelle le temps commence à s'améliorer. Une infiltration d'air relativement frais provenant de la Méditerranée au Nord de l'Algérie et s'écoulant vers le Sahara a sans doute contribué au relèvement des masses d'air chaud et humide en provenance du Golfe de Gabès, le relief de la Tunisie jouant aussi un rôle important dans ce relèvement.



En **octobre**, on assiste à nouveau en début de mois à des épisodes orageux (avec fortes pluies) dus à la présence d'une dépression en altitude centrée sur la péninsule ibérique. On assiste ensuite à une amélioration du temps à partir du **19 au 20 octobre** une dépression d'altitude est centrée sur l'Espagne et est à l'origine de pluies abondantes.

Enfin, à la fin du mois, vers le **25 octobre**, on assiste à la formation d'une nouvelle dépression en Méditerranée accompagnée d'un puissant centre de hautes pressions sur la France et l'Europe Centrale qui contribue à son déplacement progressif vers le Sud Ouest sur l'Est tunisien. Cette dépression donnera à nouveau des pluies violentes selon un processus analogue à celui de fin septembre.

Certains spécialistes pensent qu'à l'origine de ces situations météorologiques exceptionnelles, il faut chercher l'influence des irrégularités du "jet-stream" d'altitude qui présentait à cette époque (surtout fin septembre) des vents anormalement forts et des ondulations inhabituelles; un point mérite aussi d'être souligné: c'est que dans nos régions la pluie déjà tombée favorise, en début d'automne, l'occurrence de nouvelles pluies en maintenant une forte humidité atmosphérique et en empêchant les masses d'air arrivant du Golfe de Gabès de se dessécher. Ainsi, à l'origine des averses diluviennes de l'automne 1969, il ya d'abord une situation anormale et relativement rare de la circulation atmosphérique (présence fin septembre et fin octobre d'une forte dépression de type tropical au Sud de Malte accompagnée d'un fort anticyclone au-dessus de la France et de l'Europe Centrale) s'intercalant entre des épisodes pluvieux abondants mais d'une origine classique (dépression d'altitude sur la péninsule ibérique)». (Bouzaiane et al., 1986).

Kassab, (1979), a pu distinguer 2 types des circulations atmosphériques qui sont à l'origine des pluies diluviennes de l'automne 1969 en Tunisie centrale. Il s'agit :

- Des **courants perturbés de Nord-est** qui ont caractérisé les événements pluvieux exceptionnels de 25 au 27 septembre 1969 et de 26 au 28 octobre 1969.

- Des **perturbations sahariennes** qui ont engendré, à deux reprises, des averses copieuses pendant le mois d'octobre : de 5 au 7 et de 21 au 23 octobre 1969.

6-3-1-2- Les dégâts occasionnés par les inondations de l'automne 1969

Les dégâts occasionnés suite aux inondations de l'automne 1969 ont été importantes du point de vue humain et matériel. À Kairouan, le bilan de ces inondations est élevé à 60 morts et 2200 personnes sans abri. La ville a été complètement isolée, 20 habitations se sont effondrées, des routes sont coupées et la voie ferrée est arrachée et déportée loin de son tracé normal. La ville de Sidi Bouzid, a été également complètement isolée et les habitants ont été évacués vers un lieu élevé (Tab. 6.13).

Tableau 6.13: Dégâts associés aux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid lors des inondations du mois d'octobre 1969

Date	Pluie (mm)	Dégâts
05/10/1969	44,4	« Des pluies diluviennes d'une violence exceptionnelle se sont déversées sur la ville de Kairouan Les oueds Zeroud et Marguellil sont en crue. Le lac El Kelbia qui a retrouvé la mer pour aller s'y déverser à peu de distance de Hergla, s'étend sur des surfaces de plus en plus importantes. Les oueds quittent leurs lits pour aller se déverser à leur tour dans le lac, gonflant le volume de ses eaux ». La Presse de Tunisie/ Lundi et mardi, 6 et 7 Octobre 1969.
07/10/1969	78,8	« Les dernières inondations ont fait depuis 48 heures 60 morts à Kairouan où 2200 personnes sont sans abri ». La Presse de Tunisie/ Jeudi le 9 Octobre 1969. « Tout le Kairouanais n'était plus qu'une mer de boue, des traînées de limons au milieu desquelles, miroitait l'eau, qui çà et là stagnait au milieu de mares et de lagunes... la voie ferrée complètement arrachée, déportée loin de son tracé normal...Le lac Kelbia inonde la plaine a arraché la voie ferrée et recouvert la route reliant Sousse et Tunis... ». La Presse de Tunisie/ Samedi le 11 Octobre 1969.
21/10/1969	82,4	« La ville de Kairouan est complètement isolée, toutes les routes conduisant à la ville sont coupées, 20 habitations se sont effondrées à Kairouan où les communications téléphoniques sont interrompues sauf avec Sousse ». La Presse de Tunisie/ Jeudi le 23 Octobre 1969.
27/10/1969	80	« Toutes les routes sont coupées et les eaux de l'oued Zeroud ont atteint le niveau de 6m70 ». La Presse de Tunisie/ Lundi et mardi, 27 et 28 Octobre 1969.
27/10/1969	80	« Le village de Gamouda est complètement isolé. Tous ses habitants ont été évacués et les internes du centre des "enfants de Bourguiba" ont été transportés aux ateliers du lycée de la région, qui se trouvent dans un lieu élevé... ». La Presse de Tunisie/ Lundi et mardi, 27 et 28 Octobre 1969.

6-3-2- Caractéristiques des inondations de décembre 1973

La Tunisie centrale, en particulier les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid ont connu au cours de la première moitié du mois de décembre 1973 des inondations catastrophiques. Elles se sont produites suite à des pluies intenses enregistrées; les 05, 12 et 13 décembre 1973.

Dans les stations de Kairouan SM et de Sidi Bouzid Ferme 20 ont été de l'ordre de 242,9 mm et 186,1 mm (soit respectivement 8 et 7,4 fois la pluviométrie moyenne du mois décembre), (Tab.6.14).

Tab.6.14 : Caractéristiques des pluies exceptionnelles de décembre 1973 aux stations de Kairouan SM et de Sidi Bouzid Ferme 20

Station	Mois	Date de la pluie	Cumul pluviométrique de 24h (mm)	Cumul pluviométrique de l'épisode (mm)	Cumul du mois	Pluviométrie moyenne mensuelle*
Kairouan (SM)	Décembre 1973	05/12/1973	82,7	242,9	276,1	30,35
		12/12/1973	82,3			
		13/12/1973	77,9			
Sidi Bouzid Ferme 20	Décembre 1973	05/12/1973	28,3	186,1	272,8	25,14
		12/12/1973	58,6			
		13/12/1973	99,2			

(Source des données brutes : D.G.R.E)

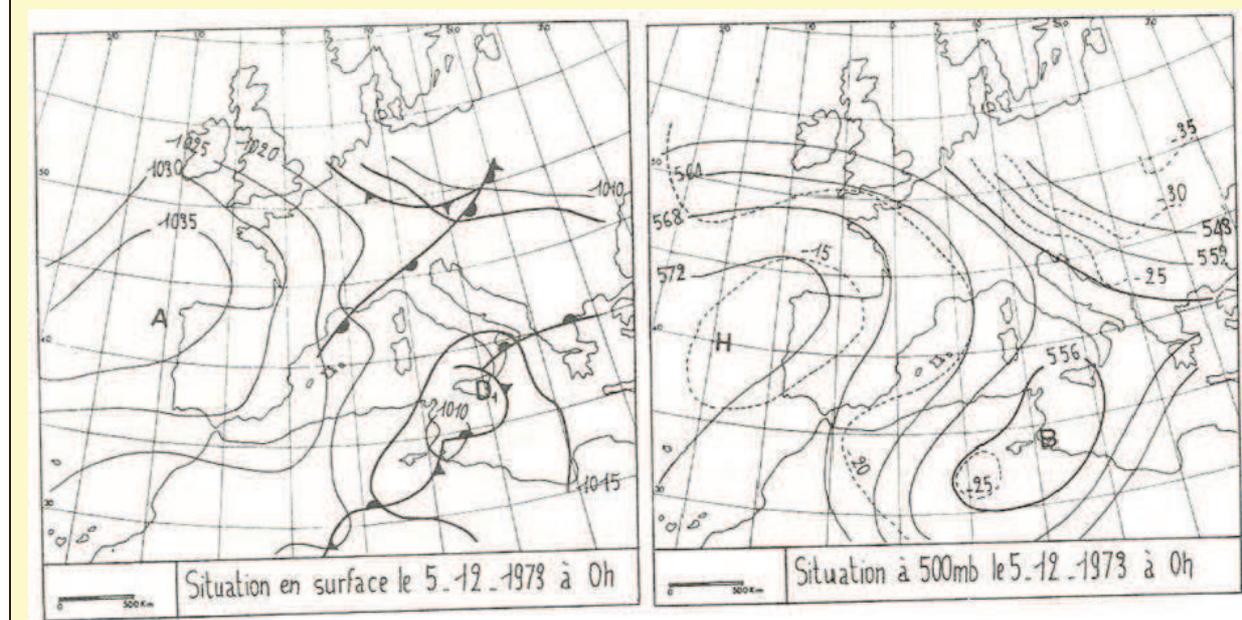
* Pluviométrie moyenne mensuelle de la période (1959-2013) pour la station de Kairouan SM et (1971-2014) pour la station de Sidi Bouzid Ferme 20.

6-3-2-1- Analyse de la situation météorologique du mois de décembre 1973

Ces pluies diluviennes ont été produites par 2 types de perturbations, (Kassab, 1979). **Des courants perturbés de Nord-est** ont été responsables des pluies violentes de 5 décembre 1973. En revanche, **les perturbations sahariennes** ont généré les plus fortes pluies de ce mois, celles des 12 et 13 décembre 1973. Kassab, (1979), a bien décrit la situation météorologique du mois de décembre 1973 :

* Le 5 décembre 1973

« L'anticyclone Atlantique centré au large de la péninsule Ibérique, dirige en courant perturbé sur ses faces septentrionale et orientale. En Méditerranée D1 stationnaire continue à diriger un courant perturbé humide sur la Tunisie. Le front froid de la perturbation associée à D1 ondule du Sahara au Golfe de Gabès où se creuse une dépression ».



*** Les 12 et 13 décembre 1973**

« L'importante masse d'air froide qui s'écoule sur le flanc oriental de l'anticyclone Atlantique parvient le 9 Décembre sur les côtes nord-africaines. **L'air froid assez actif pénètre sur le Sahara où il entre en contact avec l'air chaud préexistant.** Un minimum se creuse alors sur le Sahara algérien et la perturbation associée, en se déplaçant vers le Nord-Est, intéressera la Tunisie. C'est à cette perturbation que l'on doit les pluies diluviennes qui se sont abattues sur notre pays les 12 et 13 Décembre». **Kassab, (1979).**

6-3-2-2- Les dégâts occasionnés par les inondations du mois de décembre 1973

Le centre de la Tunisie, a connu en décembre 1973 des inondations copieuses. Kairouan et Sidi Bouzid ont été parmi les régions les plus affectées. Les dégâts y sont essentiellement matériels : Coupure de routes, des ponts endommagés, effondrement d'un bon nombre des gourbis et un grand nombre de maisons ont subi des dommages (Tab. 6.15).

Tableau 6.15: Dégâts enregistrés dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid lors des inondations de décembre 1973

Date	Dégâts
Décembre 1973	<p>Coupure de la GP2 : « La direction des ponts et chaussées du Ministère de l'Équipement communique: La circulation est encore coupée sur la route principale N. 2 Enfida-Kairouan. La circulation à destination Kairouan est possible par Sbikha, et entre Kairouan et Sidi Amor Bou Hajla au P.K. 71,000 ». La Presse de Tunisie/ Vendredi le 07 Décembre 1973.</p>
	<p>« Des sérieux dégâts ont affecté un certain nombre de ponts notamment dans la région de Kairouan où les pluies continuent de tomber en abondance et, d'après les services compétents, les eaux de l'Oued Sidi Saâd dont le niveau atteint 4 mètres menacent la capitale des Aghlabides. Les eaux ont également entraîné bon nombre de gourbis dans la région de Kairouan...La banlieue de Kairouan et Sidi Bouzid sont parmi les régions les plus menacées... ». La Presse de Tunisie/ Vendredi le 14 Décembre 1973.</p>
	<p>« Les pluies ont cessé, mais les routes sont encore coupées. La ville de Kairouan est encore coupée de certaines délégations du gouvernorat. Un nombre indéterminé de maisons ont subi des dommages ». La Presse de Tunisie/ Samedi le 15 Décembre 1973.</p>

6-3-3- Caractéristiques des inondations du mois de janvier 1990

Les inondations dévastatrices et meurtrières de janvier 1990 sont produites à l'issue d'une succession d'années sèches, provoquant en un court laps de temps des dégâts majeurs à la fois matériels et immatériels (Bousnina et Oueslati, 1990). Le mois de janvier 1990 a été excessivement pluvieux, avec un cumul mensuel de 249.4 mm à la station de Sidi Bouzid Ferme 20, soit plus de 8 fois la moyenne du mois (30,4 mm) calculée pour la période 1971 à 2014.

Climatologiquement parlant, ces inondations diluviennes sont exceptionnelles. Elles se caractérisent par un renversement du régime pluviométrique. En effet, les inondations catastrophiques au cours du XX^{ème} siècle ayant touché la Tunisie centrale, sont survenues essentiellement en automne, particulièrement aux mois de septembre et octobre. C'est l'exemple des années 1934-1935, 1958-1959, 1969-1970, 1975-1976 et 1982-1983 (Bousnina

et Oueslati, 1990). Quant aux inondations de 1990 qualifiées comme étant « *une anomalie climatique majeure* » elles se sont produites en hiver, précisément au mois de janvier (Bousnina et Oueslati, 1990). A Sidi Bouzid (SM), on a enregistré 184,9 mm en mois de janvier 1990 (Soit 2 fois l'ancien record de 1946, estimé de 83 mm). Trois propriétés clés de l'évènement pluvieux de janvier 1990 peuvent être dégagées : « *Les champs pluviométriques associés à cet évènement sont tout à fait particuliers, l'intensité des abats pluviométriques est particulièrement forte et les volumes pluviométriques reçus, en quelques jours, voire en quelques heures, sont énormes* ». Il a précisé qu'en « *janvier 1990 Sidi Bouzid a connu une averse prolongée pendant 19 heures et 45 mn de suite, du 22 à 09h25mn au 23 à 05h10mn. Cette averse a cumulé 90mm de pluie* » (El Melki, 2015).

Les quantités pluviométriques les plus importantes dans le gouvernorat de Sidi Bouzid, ont été enregistrées du 21 au 23 janvier 1990 aux stations de Meknassy (G.R), Mezzouna (Délégation) et Ouled Mhamed E.P avec respectivement : 395 mm, 315 mm et 305 mm. A Sidi Bouzid (SM) et à Sidi Bouzid Ferme 20 les totaux pluviométriques enregistrés ont été de l'ordre de : 155,9 mm et 209,6 mm (Fig.6.3).

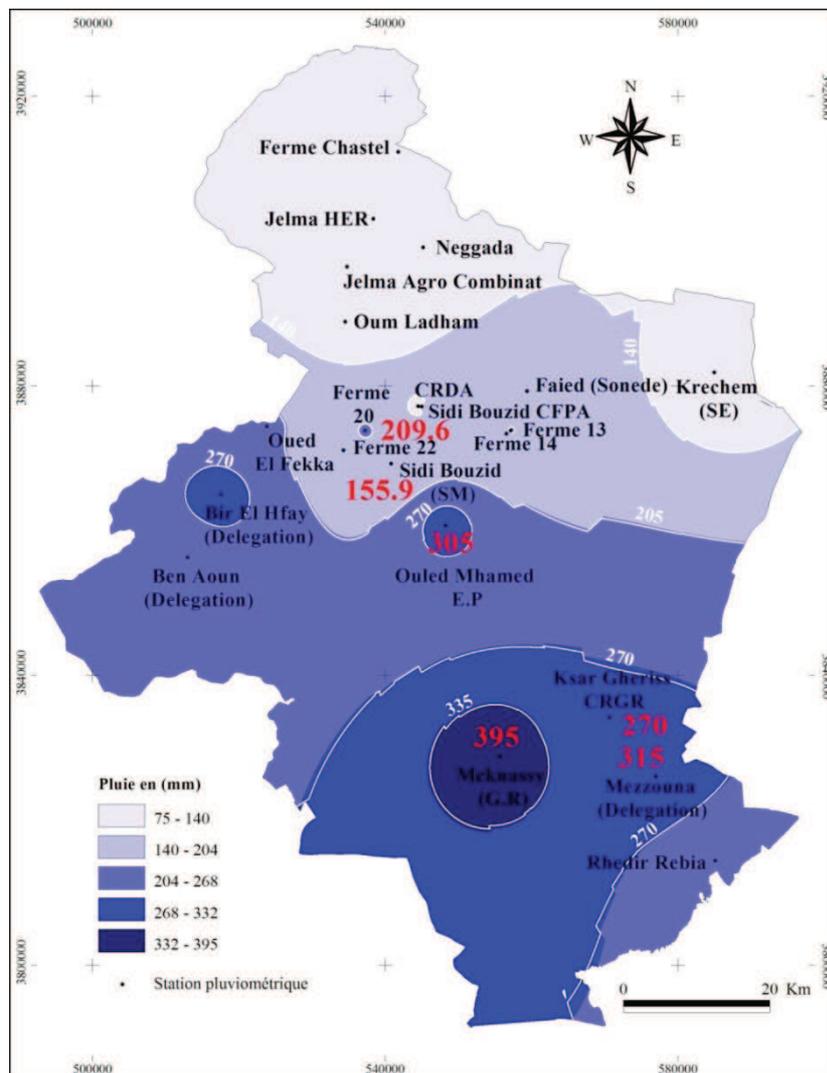
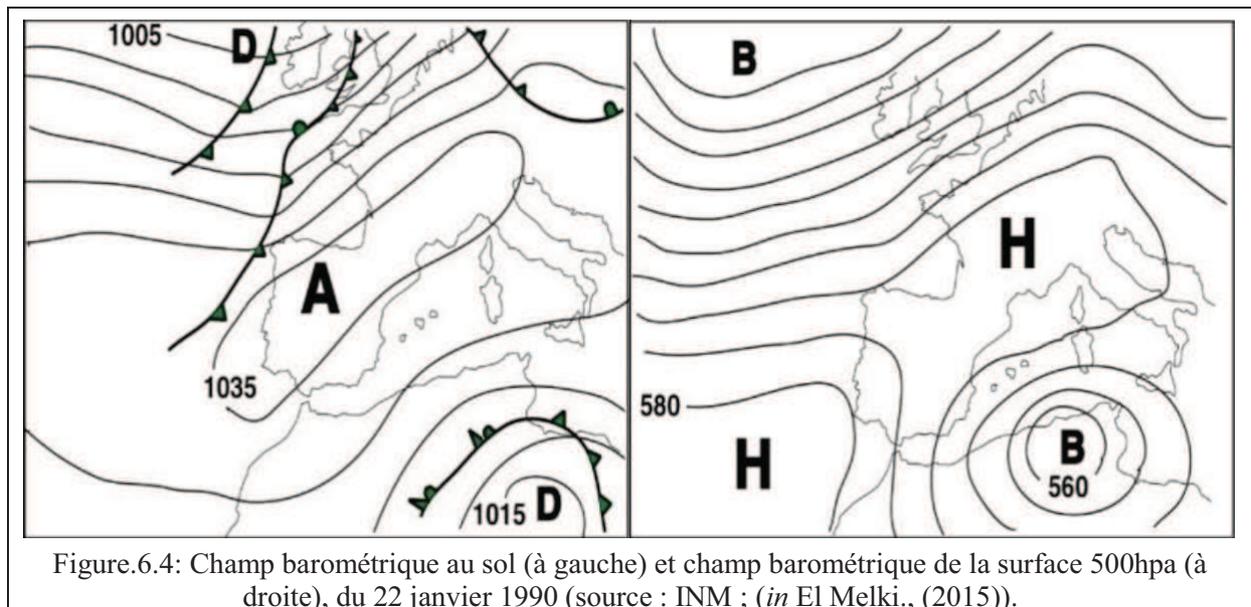


Figure 6.3: Répartition spatiale des pluies du 21 au 23 janvier 1990 dans le gouvernorat de Sidi Bouzid (Réalisation Nasrallah Wafa., 2018. Source *des données brutes* : Direction Générale des Ressources en Eau (D.G.R.E)).

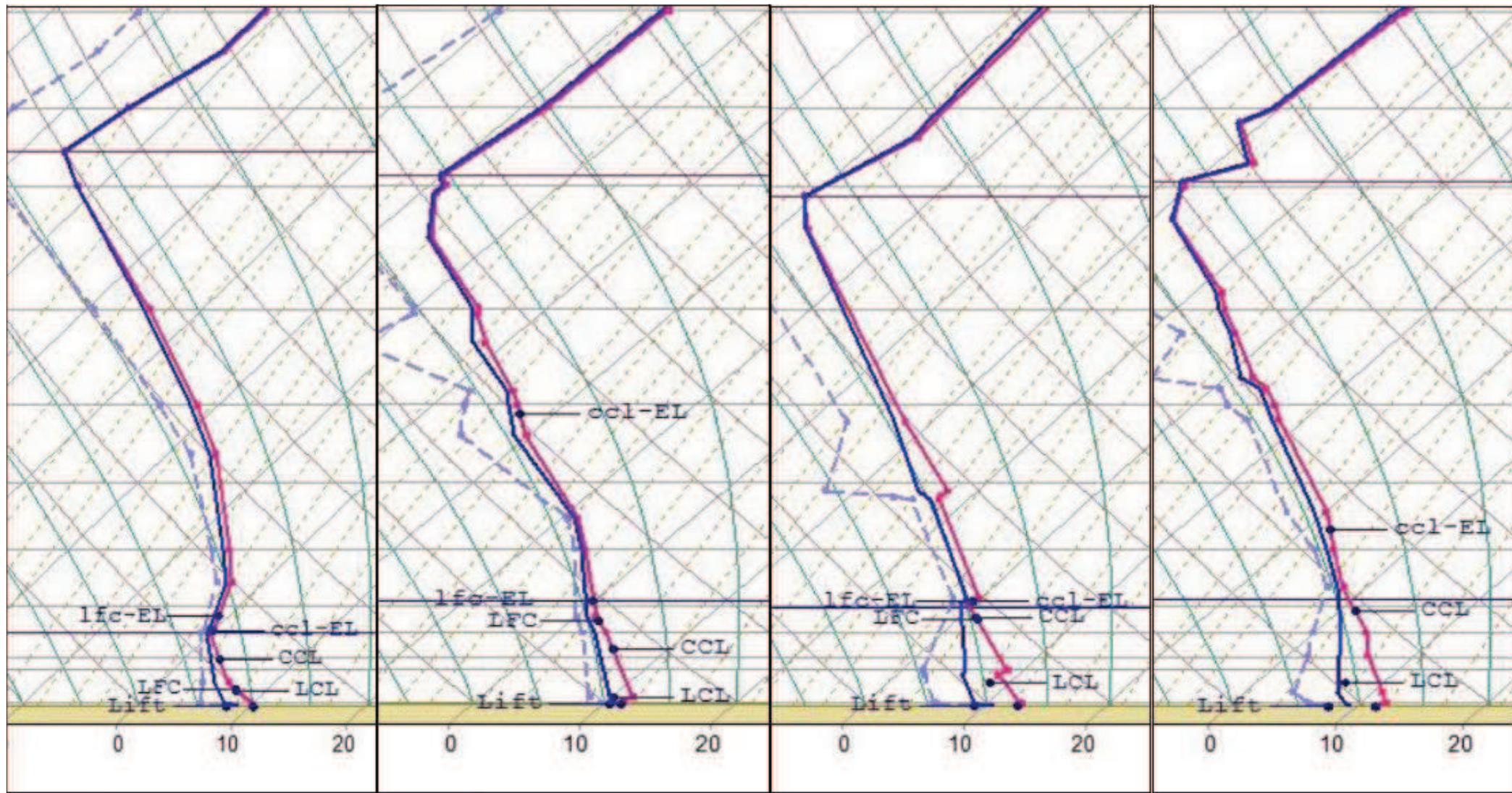
6-3-3-1- Analyse de la situation météorologique du mois de janvier 1990

Les pluies de janvier 1990 révèlent une répartition spatiale fortement contrastée et fondamentalement polynucléaire engendrant des gradients pluviométriques horizontaux très élevés (Bousnina et Oueslati, 1990). Cette variabilité spatiale des pluies est due aux 2 facteurs principaux : **Les conditions topographiques** (Conditions géographiques) et **le dynamisme des masses d'air**, pourvoyeuses des grandes pluies (Bousnina et Oueslati, 1990).

Pour l'Institut National de la Météorologie, ces pluies diluviennes, semblables à celles de l'automne 1969, ont pour origine une **basse pression creuse** qui s'est formée sur le Sud tunisien. Elle est due à une **confrontation de deux masses d'air d'origines différentes** : l'infiltration d'un courant **d'air polaire** sur le Sahara tuniso-algéro-libyen et la remontée **d'air chaud tropical**, (Fig.6.4). *Ces masses nuageuses, roulées autour de cette dépression, ont été bloquées sur le Centre et le Sud tunisien par la persistance d'une zone de haute pression sur l'Europe* (La Presse de Tunisie/ Mercredi le 24 Janvier 1990).



L'analyse des radiosondages de Tozeur (sud Saharien de la Tunisie), (Fig.6.5), montrent que l'évènement exceptionnel du 21 au 23 janvier, «*qui est déterminée par un type particulier de circulation atmosphérique, azonale, de secteur Est, est associée à des structures aérologiques peu fréquentes en Tunisie, de type Ccm (Convectif, convergent, maritime). Celles-ci se caractérisent par une très forte humidité (Courbes rouges des températures et courbes bleues de condensation sont très rapprochées, et parfois confondues pour les niveaux saturés) et une très forte instabilité verticale (Les deux courbes rouges et bleues du sondage sont bien inclinées du bas-droit vers le haut-gauche du diagramme)* » (El Melki, 2015).



Figures 6.5. Radiosondages de Tozeur du 21 (gauche) au 24 (droite) janvier 1990 à 12h00mn. Source des données brutes : <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (in El Melki., (2015)).

6-3-3-2- Les dégâts occasionnés par les inondations du mois de janvier 1990

L'évènement pluvieux de janvier 1990 est classé parmi les inondations les plus importantes et catastrophiques qui ont touché la Tunisie Centrale. Les dégâts enregistrés ne sont plus négligeables. À la ville de Kairouan, un millier de caprins et d'ovins ont été emportés par les eaux et des maisons se sont effondrés... À la ville de Sidi Bouzid, le bilan est plus lourd : Treize morts, sept personnes portées disparues, des dizaines de familles sans abri, des établissements scolaires fermés et la ville a été complètement isolée (Tab. 6.16).

Tableau 6.16: Dégâts enregistrés dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid suite aux inondations des 22, 23 et 24/01/1990

Date	Ville touchée	Ampleur de l'événement / Dégâts
22, 23 et 24/01/1990	Kairouan	« Les dégâts enregistrés dans la capitale aghlabite ne sont pas négligeables. Une bonne partie des pistes agricoles sont devenues impraticables; un millier de caprins et d'ovins sont succombé au froid ou ont été emportés par les eaux; des dizaines de gourbis et de maisons se sont effondrés ou ont été lézardés par pans entiers ». La Presse de Tunisie/ Jeudi le 25 Janvier 1990.
	Sidi Bouzid	« Des personnes victimes ou disparues dont certains sont emportées par les flots des oueds en crue, des logements totalement ou partiellement détruits et des dégâts importants occasionnés à l'infrastructure de base...la ville est isolée , les moyens de communication téléphoniques coupés, ainsi que l'électricité en certains endroits... Un grand nombre de familles ont ainsi été hébergées dans des établissements publics, des établissements secondaires, des maisons de jeunes...La ville est isolée et la circulation routière est perturbée... ». La Presse de Tunisie/ Mercredi le 24 Janvier 1990. « Il y a trois jours seulement, la ville de Sidi Bouzid ressemblait à une vaste étendue insulaire devenue inaccessible pour tous: les principaux axes routiers qui la reliaient à Sfax, Gafsa et à Meknassy ont été rendus impraticables du fait d'une très importante quantité de pluie ». La Presse de Tunisie/ Samedi le 27 Janvier 1990. « On a recensé jusqu'à hier treize morts, sept personnes portées disparues, des dizaines de familles sans abri et des milliers de puits d'irrigation ensevelis ». La Presse de Tunisie/ Samedi le 27 Janvier 1990. « Les cours ont été interrompus dans tous les lycées et écoles primaires depuis lundi dernier, en raison des pluies diluviennes qui s'étalent abattues sur la ville de Sidi Bouzid... ». La Presse de Tunisie/ Dimanche le 28 Janvier 1990.

Les données informations recueillies à partir des articles de presse (Passage ci-dessous et Tab. 6.17) reflètent l'ampleur des dégâts occasionnés par les inondations catastrophiques de janvier 1990.

Que c'est-il passé à Sidi Bouzid lors des crues de 1990 ? Comment les responsables ont pu éviter une catastrophe plus dramatique que celle des inondations de 1969 menaçant la ville ? « Région mal lotie par sa topographie et par son relief naturel, cette ville est frappée de plein fouet par les vagues déchaînées de deux grands oueds : "El Fakka" et "Serg Dhiba" qui ont littéralement tout emporté sur leur passage, soumettant des centaines d'habitants à de rudes épreuves. Le problème névralgique est que ces deux cours d'eau, dès lors qu'ils sont en crue, opèrent des jonctions fortes menaçantes pour les habitants. Certes, une digue de sable de deux mètres environ est édiflée autour du chef-lieu du gouvernorat mais se trouve aujourd'hui exposée, nécessitant une consolidation urgente. D'ailleurs, responsables et riverains sont unanimes sur un seul point: la digue était sur le point de s'effondrer, exposant à un danger immédiat le centre-ville, n'eut été la présence d'esprit d'un entrepreneur de la région. **Suite à des concertations avec les responsables régionaux, celui-ci est allé canaliser les eaux de l'autre côté de la ville, en ouvrant deux grandes brèches au niveau de la route de Fayed.** "C'était salutaire pour le centre-ville qui a évité une catastrophe autrement plus dramatique que celle des inondations de 1969", nous a affirmé un rescapé des flots. La ville étant littéralement prise en étau serré par deux versants des oueds, le chef-lieu s'est transformé du jour au lendemain, en une véritable enclave aquatique. Tout le monde semble avoir été pris de court par les vagues et des centaines d'habitants des hameaux qui parsèment les confins de zones à haut risque, ont été assaillis par l'eau. Un mouvement de panique s'est emparé de la population qui a amorcé une retraite de l'autre côté de la digue et est allée chercher refuge vers le centre-ville. ». **La Presse de Tunisie/ Samedi le 27 Janvier 1990.**

Le tableau ci-dessous regroupe les principaux dégâts occasionnés par les crues des grands oueds de la Tunisie Centrale en janvier 1990.

Tableau 6.17: Les dégâts occasionnés par les crues des oueds El Fekka et Serg Dhiba (gouvernorat de Sidi Bouzid) et des oueds Merguellil et Zeroud (gouvernorat de Kairouan) en janvier 1990

Gouvernorat	Ampleur de l'événement / Dégâts
Sidi Bouzid	<p>« Des crues des oueds El Fekka et Serg Dhiba ont pris en tenaille des zones entières à vocation agricole mais habitées. Le résultat en fut l'effondrement de près de cinq mille puits, la perte d'une importante partie du cheptel non encore recensée et la destruction de plusieurs habitations ». La Presse de Tunisie/ Dimanche, 28 Janvier 1990.</p> <p>« Une opération de secours a causé la mort par noyade (avec les eaux tourbillonnantes de l'oued "Serg Dhiba" culminaient à quelques mètres de hauteur) de huit personnes dont trois agents de la Protection civile... ». La Presse de Tunisie/ Dimanche, 28 Janvier 1990.</p> <p>« Au niveau de la borne kilométrique 15 sur la route reliant Sidi Bouzid à Sbeitla ... L'oued El Fekka a élu domicile à ce niveau de la route et a rendu le passage vers la ville de Sidi Bouzid impossible ». La Presse de Tunisie/ Dimanche, 28 Janvier 1990.</p>
Kairouan	<p>« Des nouvelles pluies fines sont enregistrées, depuis hier matin à l'aube, dans le gouvernorat de kairouan où la zone de Zeroud (délégation de Kairouan-Sud) demeure isolée par les eaux ». La Presse de Tunisie/ Mardi, 30 Janvier 1990.</p> <p>« Kairouan: Dhraâ Zeroud où vivent 1000 familles complètement isolées du monde extérieur à cause des crues de l'oued Zeroud et des accès devenus impraticables... Salem Chriti et Ali Khechini nous confient: "Cela fait plus d'une semaine que nos enfants ne sont pas allés à l'école et que nous ne sommes pas allés travailler. L'essentiel n'est pas seulement de nous fournir des aides substantielles, mais aussi de protéger, une fois pour toutes, notre zones des fréquentes crues qui nous emprisonnent pendant plusieurs jours"... ». La Presse de Tunisie/ Mercredi, 31 Janvier 1990.</p>

6-4- Les évènements pluvieux récents de 2013 et 2015

Pour l'étude des évènements pluvieux plus récents, on a eu recours à 2 études de cas concernant essentiellement la ville de Kairouan. Il s'agit des épisodes pluvieux du 05 au 07 octobre 2013 et du 29 au 30 septembre 2015. Quant à Sidi Bouzid, au cours de la dernière décennie, elle n'a pas connu d'évènements de grande ampleur avec des dégâts considérables.

6-4-1- Quantité pluviométrique des évènements pluvieux du 05 au 07 octobre 2013 et du 29 au 30 septembre 2015

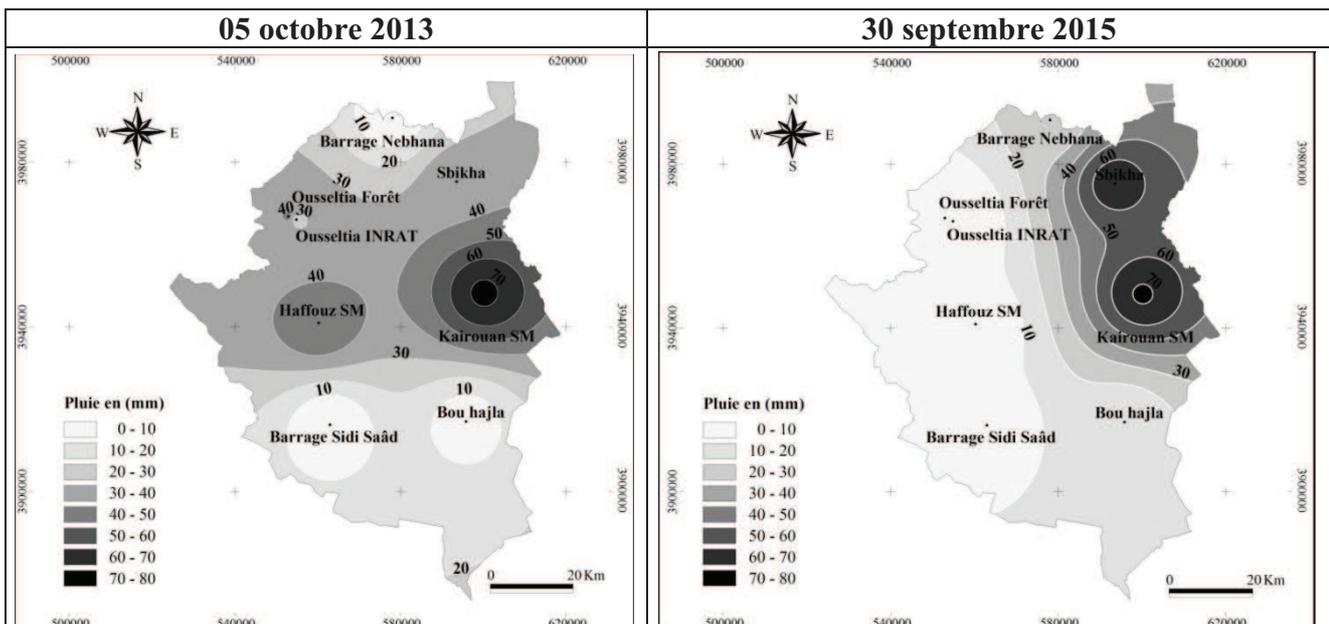
La ville de Kairouan a été marquée à deux reprises par des évènements pluviométriques excessifs de forte intensité. Du 05 au 07 octobre 2013 les cumuls pluviométriques enregistrés ont atteint 90,6 mm. En septembre 2015 et pendant deux jours (les 29 et 30), la ville de Kairouan a cumulé environ 96 mm. Il est à préciser que ces quantités pluviométriques, enregistrées en période automnale ont largement dépassé la pluviométrie moyenne des mois de septembre et octobre, calculée sur une période de 54 ans (1959-2013), (Tab. 6.18).

Tableau 6.18: Caractéristiques des pluies exceptionnelles à la station de Kairouan SM (Octobre 2013 et Septembre 2015)

Station	Mois	Date de la pluie	Cumul pluviométrique de 24 h (mm)	Cumul pluviométrique de l'épisode (mm)	Pluviométrie moyenne mensuelle (1959-2013)
Kairouan (SM)	Octobre 2013	05/10/2013	72,2	90,6	44,47
		06/10/2013	13,2		
		07/10/2013	5,2		
	Septembre 2015	29/09/2015	24,8	96	42,31
		30/09/2015	71,2		

Source des données brutes : Institut National de Météorologie (I.N.M)

Les jours du 05 octobre 2013 et du 30 septembre 2015, ont été les plus marqués. Ils ont cumulé les maximums pluviométriques avec des quantités supérieures à 70 mm (Figures 6.6 et 6.7). Cette situation mérite donc une étude plus détaillée de la situation météorologique afin de comprendre l'origine de ces forts abats d'eau.



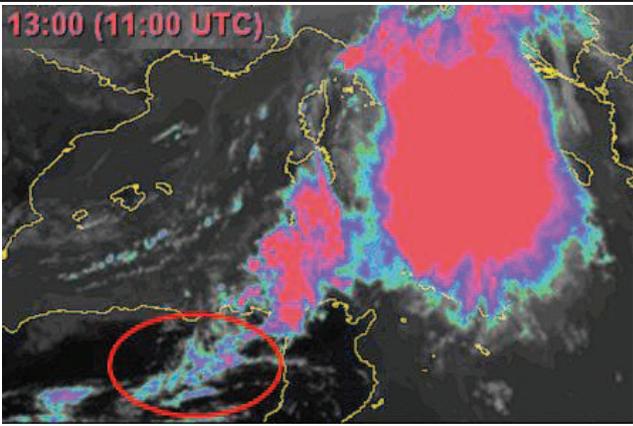
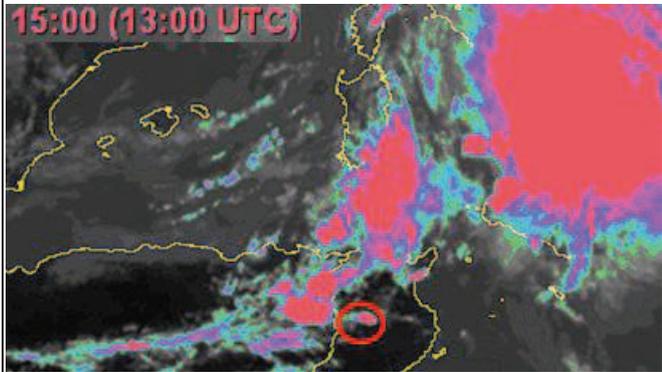
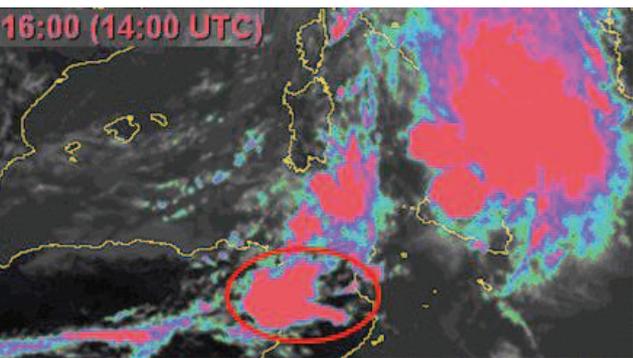
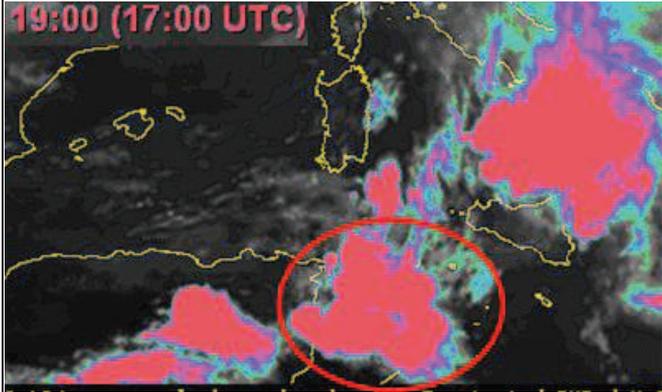
Figures 6.6 et 6.7 : Répartition spatiale des pluies du 05 octobre 2013 et du 30 septembre 2015 dans le gouvernorat de Kairouan (Source des données brutes : Institut National de Météorologie (I.N.M)).

6-4-2- Situations météorologiques des évènements pluvieux du 05 octobre 2013 et du 30 septembre 2015

Pour une étude minutieuse de la situation météorologique caractéristique des deux évènements du 05 octobre 2013 et du 30 septembre 2015, on s'est basé sur :

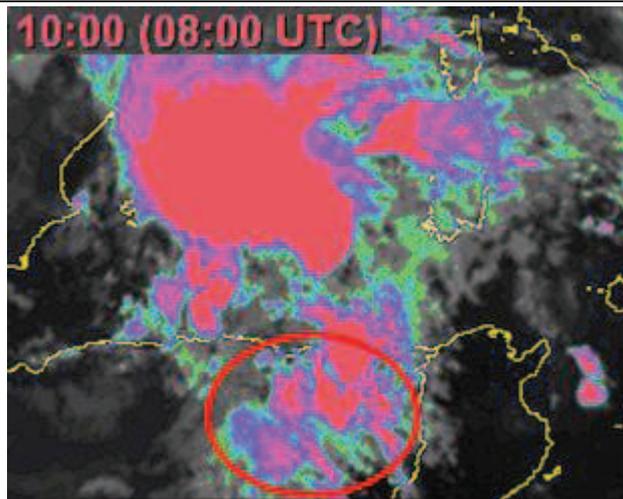
- des images infrarouges du Météo 60,
- des cartes synoptiques,
- des données de radiosondages.

L'analyse des images infrarouges du Meteo 60, permettent de déterminer la trajectoire de la masse nuageuse vers Kairouan. Le 05 octobre 2013 (Tab.6.19), c'est à partir de 14h00 que la première cellule très proche de Kairouan commence à se développer.

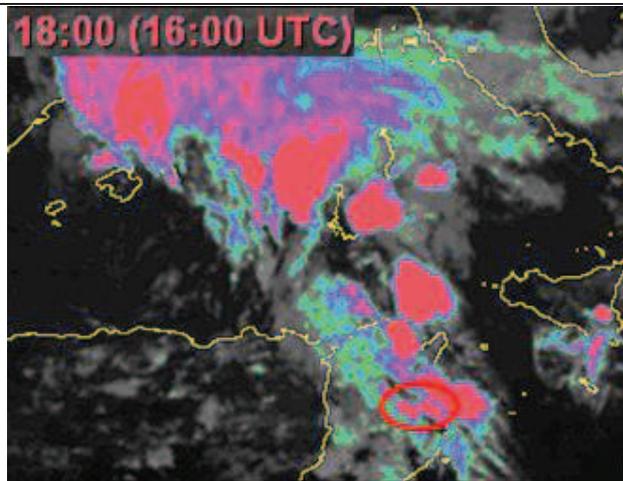
Tab.6.19 : Trajectoire de la masse nuageuse vers Kairouan le 05 octobre 2013	
 <p>13:00 (11:00 UTC)</p>	 <p>15:00 (13:00 UTC)</p>
<p>12h :00 ↪ Apparition des petites premières cellules au Nord-est de l'Algérie.</p>	<p>14h :00 ↪ Développement d'une première cellule très proche de Kairouan.</p>
 <p>16:00 (14:00 UTC)</p>	 <p>19:00 (17:00 UTC)</p>
<p>15h :00 ↪ La cellule est devenue attachée au grand ensemble nuageux.</p>	<p>18h :00 ↪ L'ensemble nuageux couvre Kairouan et presque tout le Centre et le Nord de la Tunisie.</p>
<p>Source: http://archives.meteo60.fr/archives-bracknell.php</p>	

Le 30 septembre 2015 (Tab.6.20), c'est plutôt à partir de 17h00 qu'on remarque la formation de la première cellule nuageuse couvrant Kairouan.

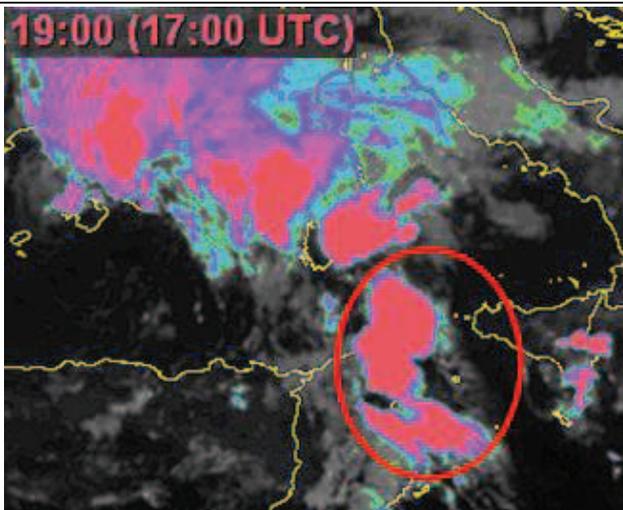
Tab.6.20 : Trajectoire de la masse nuageuse vers Kairouan le 30 septembre 2015



09h :00
 ↪ Apparition d'une masse nuageuse au Nord-est de l'Algérie (au niveau de la frontière Tuniso-algérienne).



17h :00
 ↪ Formation de la première cellule nuageuse couvrant Kairouan.



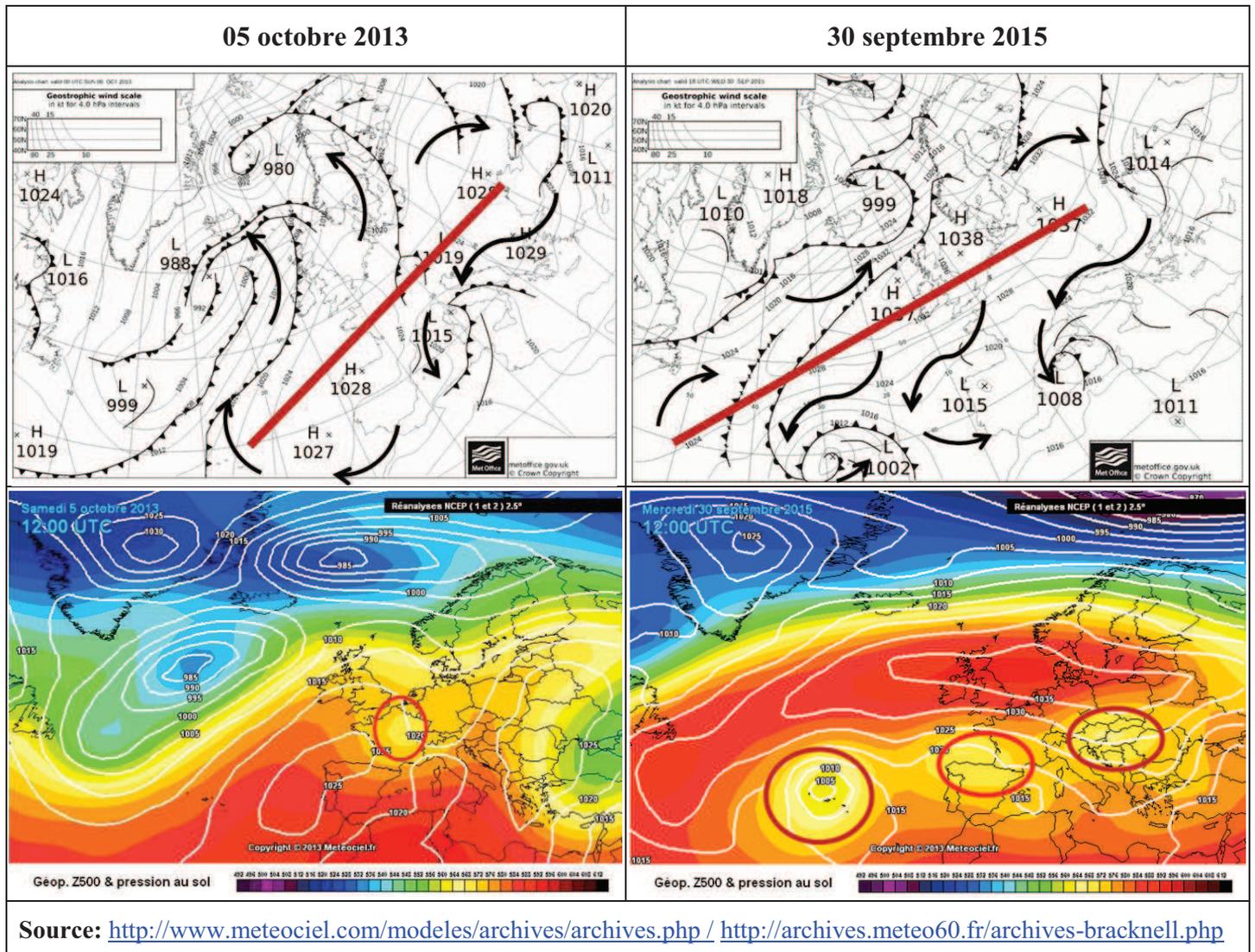
18h :00
 ↪ L'ensemble nuageux couvre Kairouan et le Nord-est de la Tunisie.

Source: <http://archives.meteo60.fr/archives-bracknell.php>

Pour les 2 dates (05 octobre 2013 et 30 septembre 2015), c'est à 18H00 que la masse nuageuse se concentre sur Kairouan.

L'étude des cartes synoptiques des deux événements pluvieux précédemment cités, laisse voir en surface (Fig. 6.8 et 6.9), la présence d'une dorsale barométrique de la forme allongée qui s'étend de l'atlantique tropicale jusqu'aux îles scandinaves. Cette barrière bloque les flux

polaires de Nord-Ouest et assurent une circulation du secteur Est. En altitude (Fig. 6.10 et 6.11), on remarque une invasion des gouttes d'air froid de la forme allongée. Ces situations sont associées à une circulation du type azonal. Les flux intéressent le territoire Tunisien du secteur Nord-Est. Ces flux de Nord-Est sont qualifiés d'azonaux "parce qu'ils représentent des déplacements de masses d'air qui s'effectuent de l'est vers l'ouest, dans le sens opposé aux flux dominants, d'ouest en est, de la zone tempérée" (El Melki, 2014).



Le recours aux données de radiosondages, qui nous facilitent l'étude des propriétés thermodynamiques de la troposphère pendant les deux dates, permettent clairement de souligner un état d'instabilité atmosphérique sur toute l'épaisseur de la troposphère ainsi que des températures en surface sont importantes comprises entre 25 et 30°C. En outre, on remarque un forçage synoptique assuré par le front froid et un vent de direction W-SW en surface. La « CIN », le niveau de condensation et qui est le palier à franchir pour que la masse d'air puisse s'élever librement, représentée par une surface colorée en bleu foncé dans les figures 6.12 et 6.13, est petite. Ceci, facilite le passage de la bulle d'air en convection libre. A partir de 2,5 Km la particule d'air devient plus chaude que l'air ambiant (LFC).

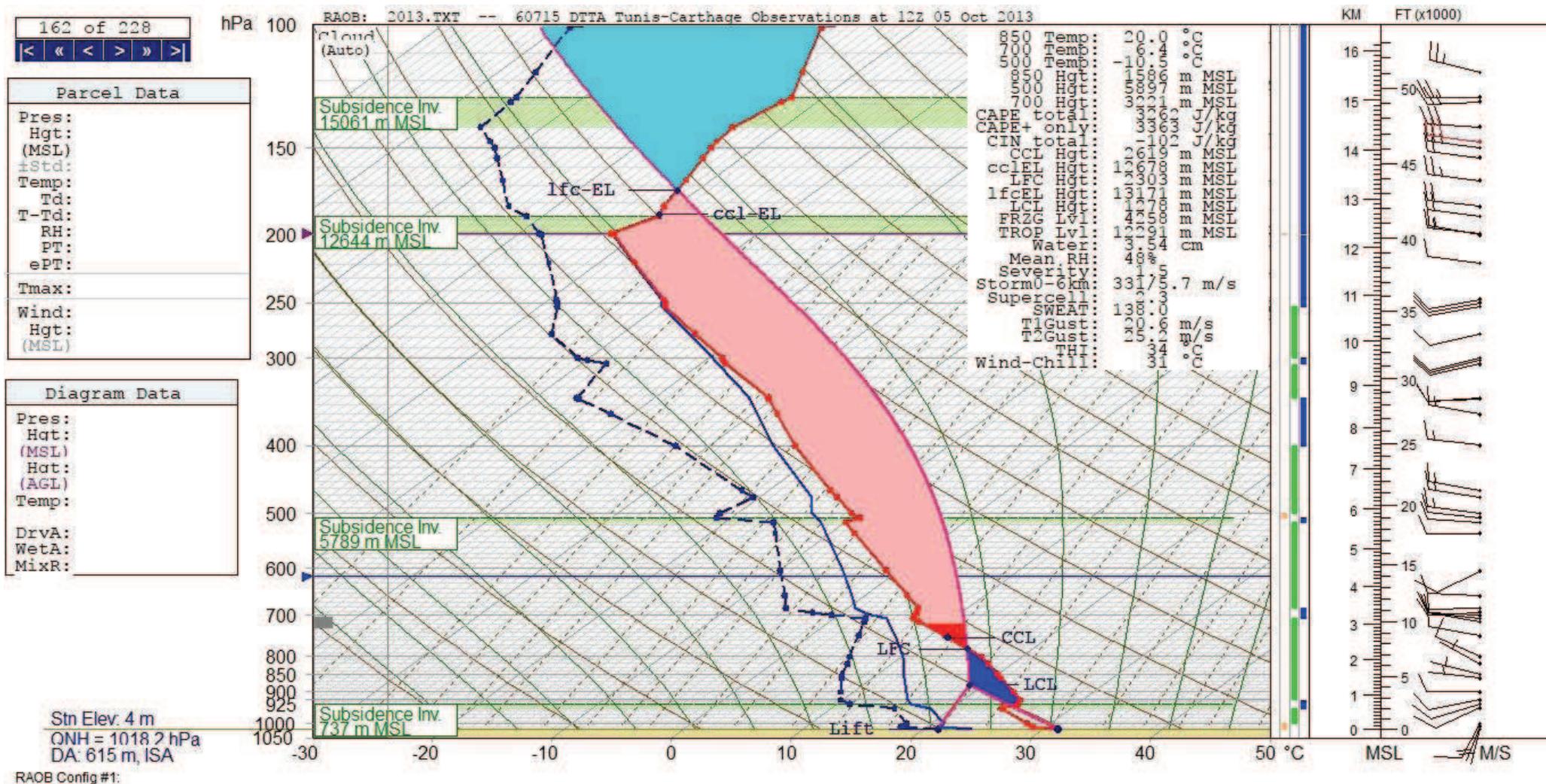


Figure 6.12. Radiosondages de Tunis-Carthage du 05 octobre 2013 à 12h00mn. (Réalisés par El Melki, (2019) ; *Source des données brutes :* <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).

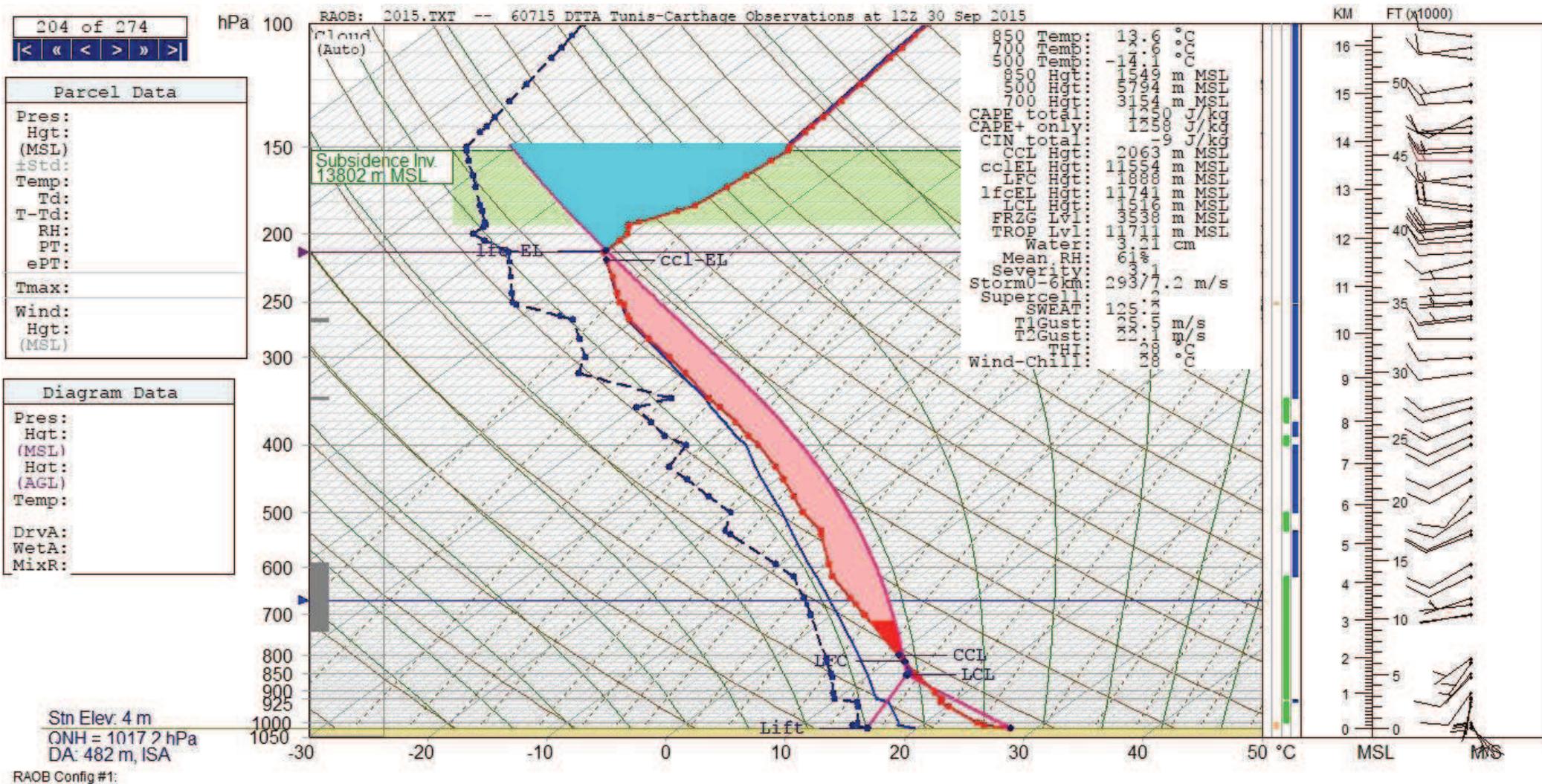


Figure 6.13. Radiosondages de Tunis-Carthage du 30 septembre 2015 à 12h00mn. (Réalisés par El Melki, (2019) ; Source des données brutes : <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).

La CAPE (indice indiquant l'instabilité de l'air), représentée en surface rose et rouge, est grande. Elle se situe entre LFC et EL (le niveau de convention libre et le niveau de l'équilibre thermique) à une altitude dépassant les 12 km dans les deux cas. En effet, plus que la CAPE est plus grande que le CIN plus que l'énergie est facile à libérer d'où une forte probabilité d'orage, le cas typique des deux événements pluvieux étudiés. La CAPE, est en relation avec la convection est indispensable à la pluviogenèse, indique que la particule en accession est plus chaude que l'air ambiant. Cette couche d'instabilité s'étend sur presque toute la troposphère surtout le 30 septembre 2015.

6-4-3- Dégâts associés aux des événements pluvieux du 05 octobre 2013 et du 30 septembre 2015

Le dépouillement des articles de presse permet d'avoir un aperçu sur les dégâts occasionnés par les deux événements précédemment cités, qui sont essentiellement matériels (Tab.6.21).

Tab.6.21: Dégâts associés à la ville de Kairouan lors des inondations du 05/10/2013 et 30/09/2015

Date	Ville sinistrée	Ampleur de l'événement / Dégâts
05/10/2013	Kairouan	La mosquée Okba Ibn Nafaa a subit d'importants dégâts matériels (les eaux ont couvert les tapis et endommagé des livres du saint Coran et une grande partie du mobilier a été perdue). (http://www.tuniscope.com/article/32684). Des habitations et des commerces inondés (dégâts, surtout dans l'infrastructure de la vieille ville) et plusieurs routes coupées à la circulation automobile un niveau d'eau qui a atteint 1 mètre de haut par endroits. (http://www.kapitalis.com/societe/18525-tunisie-inondations-et-degats-dans-la-medina-de-kairouan.html).
29 et 30/09/2015	Kairouan	Des maisons se sont effondrées et un troupeau de moutons a été emporté par les eaux au quartier Jalta (route de Sousse). Une maison est tombée en ruine au quartier El Bourgi. (http://www.turess.com/fr/lapresse/104638). Plusieurs équipements de la mosquée Okba ont été endommagés (notamment les tapis de prière). Les dégâts sont estimés à environ 60.000 D.T. (http://www.tunisienumerique.com/tunisie-photo-du-jour-la-mosquee-okba-ibn-nafaa-envahie-par-les-eaux/267991).

Une maison est tombée en ruine au quartier El Bourgi suite aux fortes pluies du 5 octobre 2013. Les eaux de pluies sont pénétrer dans les maisons situées au niveau de la route nationale n° 2 vers Haffouz, (Photo.6.1).



Photo.6.1 : Habitations inondées à la ville de Kairouan au niveau de la route nationale n° 2 vers Haffouz le 30-09-2015.



Photo.6.2 : Stagnation des eaux pluviales près des bassins aghlabides à la ville de Kairouan le 29-09-2015 gêne la circulation.

Source: <https://web.facebook.com/PageKAIROUAN/>

En outre, la stagnation de l'eau dans les quartiers les plus bas, gêne la circulation (Photo.6.2) et engendre parfois des coupures de routes (Photo.6.3), avec une hauteur d'eau atteignant 1 m par endroits. Quant à la mosquée Okba, elle a été envahie à maintes reprises par les eaux de pluies (Octobre 2013 et Septembre 2015). Plusieurs équipements y ont été endommagés (tapis de prière, livres du saint Coran,...), (Photo.6.4) et les dégâts sont estimés à environ 60000 D.T le 30 septembre 2015.



Photo.6.3 : Route coupée à la circulation automobile au niveau de Cité Mohamed Ali à la ville de Kairouan suite aux inondations du 05-10-2013.



Photo.6.4 : La mosquée Okba à la ville de Kairouan envahie par les eaux pluviales du 05-10-2013.

Source: http://www.huffpostmaghreb.com/2013/10/06/pluies-kairouan inondations_n_4052594.html

6-5- Autres évènements pluvieux récents

Les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid, ont connu en cette seconde décennie de 21^{ème} siècle d'autres évènements pluvieux, dont les dégâts varient entre humains et matériels. Les données pluviométriques de ces évènements sont extraites du portail de l'Observatoire National de l'Agriculture (<http://www.onagri.tn/pluviometrie>), relevant du Ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques et de la Pêche. Parmi ces évènements pluvieux récents, on cite essentiellement:

6-5-1- Evènement pluvieux excessif marqué de 2014

Le 19 mai 2014, la ville de Kairouan a connu des pluies d'intensité moyenne d'environ 15 mm enregistrée à la station de Kairouan (SM). Ces pluies ont été accompagnées par des rafales de vents et d'une chute de grêle durant près d'une demi-heure... Les dégâts sont à la fois humains (5 morts et 6 blessés) et matériels (l'effondrement des poteaux électriques et de deux murs : l'un du cimetière de « Sidi Arfa » et l'autre d'une ancienne usine...), (Tab. 6.22).

Tableau 6.22: Dégâts associés à la ville de Kairouan lors des inondations du 19/05/2014

Date	Ville touchée	Ampleur de l'évènement / Dégâts
19/05/2014	Kairouan	5 morts et 6 blessés suite aux rafales de vents qui ont secoué la ville et qui, conjuguées aux fortes pluies, ont provoqué l'effondrement de deux murs en cours de construction et la chute d'un arbre sur des poteaux électriques. (http://www.webdo.tn/2014/05/19/les-fortes-intemperies-font-5-morts-kairouan/).

6-5-2-Evènement pluvieux de 2015

Photo.6.5 : L'évènement pluvieux du 26 mars 2015 (Au centre ville de Sidi Bouzid)



Source : <https://web.facebook.com/News.SidiBouzid.Live/photos/>

Le 26 mars 2015, la ville de Sidi Bouzid en une courte durée une quantité pluviométrique d'environ 22,9 mm. Ceci, a engendré la stagnation des eaux dans les rues (Cf. Photo.6.5), ce qui gêne la circulation. Tout cela peut être expliqué par le sous dimensionnement voire l'absence des réseaux d'évacuation des eaux pluviales qui sont capables de collecter cette lame d'eau ruisselée.

6-5-3- Événements pluvieux excessif de 2016

Photo.6.6 : L'évènement pluvieux du 11 mai 2016 (Café des princes à quartier « El Khadhra » - La ville de Sidi Bouzid)



Même avec des faibles quantités de pluie, on remarque souvent une stagnation des eaux pluviales à la ville de Sidi Bouzid. L'exemple de l'évènement pluvieux de **11 mai 2016** dont la quantité de pluie enregistrée à la station de Sidi Bouzid (SM) est d'environ 5,9 mm, ce qui explique le mauvais état de l'infrastructure routière. Ces pluies ont été accompagnées par des vents forts causant ainsi la chute des arbres et de certains poteaux électriques, notamment à quartier « El Khadhra », (Cf. **Photo.6.6**).

Source : <https://web.facebook.com/News.SidiBouzid.Live/photos/>

Le **17 décembre 2016**, la station de Sidi Bouzid (SM) a enregistré un cumul journalier de la pluviométrie de l'ordre de 27,6 mm. Les routes non aménagées notamment au niveau du quartier d'« Ouled Chelbi » à la ville de Sidi Bouzid sont devenues boueuses avec des zones de stagnation des eaux pluviales (Cf. **Photo.6.7**).

Photo.6.7 : L'évènement pluvieux du 17 décembre 2016 (Quartier « Ouled Chelbi » - Ville de Sidi Bouzid)



Source : <https://web.facebook.com/News.SidiBouzid.Live/photos/>

La ville de Kairouan, a reçu le **16 décembre 2016** d'importants abats d'eau d'environ 98,5 mm enregistrés à la station de Kairouan (SM). Ces pluies diluviennes ont mis à nu les fragilités de l'infrastructure routière. Une grande fosse s'est formé à l'une des routes du quartier « El Hajjam », des véhicules se sont bloqués et la station de voitures de louage a été inondée (Cf. **Photo.6.8**).

Photo.6.8 : L'évènement pluvieux du 16 décembre 2016 (Quartier « El Hajjam » - Ville de Kairouan)



Source : <https://web.facebook.com/KairouanNewsKN/photos/>



Source : <https://web.facebook.com/KairouanNewsKN/photos/>

6-5-4- Evènement pluvieux de 2017

Photo.6.9 : L'évènement pluvieux du 05 octobre 2017 (Lycée Chedli Atallah- Rue de Fès- Ville de Kairouan)



Source : <https://web.facebook.com/KairouanNewsKN/photos/>

Le 05 octobre 2017, des pluies de fortes intensités se sont abattues sur la ville de Kairouan. La quantité pluviométrique enregistrée à la station de Kairouan (SM) été de l'ordre de 45 mm. **La photo ci-contre** montre que la cour du lycée « Chedli Atallah » situé à la rue de Fès été complètement inondée.

6-5-5- Evènements pluvieux de 2018

Les évènements pluvieux de 2018 sont multiples :

Photo.6.10 : L'évènement pluvieux du 19 juin 2018 (Rue d'« Ouled Farhane » - Ville de Kairouan)



Le 19 juin 2018, la rue d'« Ouled Farhane », au centre ville de Kairouan a été remplie d'eau (**Photo.6.10**). La quantité pluviométrique journalière enregistrée ce jour là à la station de Kairouan (SM) été de l'ordre de 20 mm.

Source : <https://web.facebook.com/KairouanNewsKN/photos/>

La ville de Kairouan a connu, l'après-midi du mardi 7 août 2018, des pluies diluviennes avec un cumul journalier enregistré à la station de Kairouan (SM), d'environ 62,5 mm. Ces pluies intenses et de courte durée ont engendré une stagnation des eaux pluviales dans nombreuses routes de la ville de Kairouan. Plusieurs quartiers ont été inondés, notamment quartier « El Menchia ». En effet, la situation de ce quartier dans une zone basse (à pente faible et au dessous de niveau de la route) associée à l'obstruction des réseaux d'assainissement suite à l'accumulation des déchets (qui a causé un phénomène d'embâcle) ont provoqué la pénétration des eaux de ruissellement à l'intérieur des habitations. Les dégâts sont essentiellement matériels : Des biens endommagés (appareils, meubles...), (**Cf. Photos ci-dessous**).

Les pompiers sont intervenus pour déboucher les avaloirs, pomper l'eau et enlever les véhicules bloqués par la pluie surtout au niveau du quartier « Echbelia ». La grande cour du mausolée d'Abou Zamaâ al-Balawi a été inondée, ce qui a nécessité l'intervention des agents de la protection civile pour pomper l'eau. La station des voitures de louage d' «El Hajjam » a été inondée ce qui gêne la circulation et nécessite l'intervention de la municipalité... Le problème s'est aggravé à cause de l'interruption de plusieurs travaux de branchement et de réglage des canaux d'évacuation des eaux pluviales suite à des problèmes techniques : L'exemple de l'endommagement des canaux de drainage des eaux pluviales à « Sidi Sahbi 4 ».

Photo.6.11 : L'évènement pluvieux du 07 août 2018 - Ville de Kairouan

Quartier « El Menchia »



Station des voitures de louage d'« El Hajjam »

La grande cour d'« Abou Zamâa al-Balawi »



Source : <https://www.nessma.tv/article/>

Plus récemment, le 18 août 2018, la ville de Sidi Bouzid a reçu une quantité pluviométrique remarquable, enregistrée à la station de Sidi Bouzid (SM), de l'ordre de 51

mm. Plusieurs quartiers ont été inondés notamment ceux : d'«Ennour Ouest », «Ennour Est », « Ouled Chelbi » et « Avenue Habib Bourguiba ». Ceci, a nécessité l'intervention des agents de la municipalité et de l'Office National de l'Assainissement « O.N.A.S » pour déboucher les avaloirs et pomper l'eau... (Cf. Photos ci-dessous).

Photo.6.12 : L'évènement pluvieux du 18 août 2018 - La ville de Sidi Bouzid

Quartier « Ennour Ouest »



Quartier « Ouled Chelbi »



Quartier « Ennour Est »



Quartier « Ennour Ouest »



Avenue « Habib Bourguiba »



Sources :

<https://web.facebook.com/News.SidiBouzid.Live/posts/https://web.facebook.com/CommuneSidiBouzid/>

Photo.6.13 : L'évènement pluvieux du 19 août 2018 (Quartier El Mansourah - Ville de Kairouan)



Source : Cliché Wafa NASRALLAH (Le 19-08-2018)

Le lendemain à la ville de Kairouan, précisément le **19 août 2018**, on a enregistré 32 mm à la station de Kairouan (SM). Ceci, a causé la stagnation des eaux pluviales dans plusieurs routes de la ville, essentiellement dans les bas endroits. L'exemple du quartier « El Mansourah », **(Photos ci-contre).**



Source : Cliché Wafa NASRALLAH (Le 19-08-2018)



Source : Cliché Wafa NASRALLAH (Le 19-08-2018)

Photo.6.14 : L'évènement pluvieux du 20 septembre 2018 (Rue d'« Ouled Farhane » - Ville de Kairouan)



Source : <https://web.facebook.com/KairouanNewsKN/photos/>

Le 20 septembre 2018, avec une pluie journalière de 26,5 mm enregistrée à la station de Kairouan (SM), la rue d'«Ouled Farhane » est de nouveau inondée. Ceci se justifie par le fait que cette rue soit située dans une zone basse et qu'aucune mesure d'atténuation du niveau d'eau ruisselée n'a été prise, **(Photo.6.14).**

Conclusion

Depuis plusieurs décennies, les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid se trouvent au cœur des événements hydro-climatiques extrêmes ayant touché la Tunisie centrale. Les inondations les plus catastrophiques sont celles produites : en automne 1969 (précisément aux mois de septembre et d'octobre avec un cumul pluviométrique de l'épisode de 572,7 mm à Kairouan et 620,2 mm à Sidi Bouzid). Au mois de décembre 1973 (dont le cumul du mois a dépassé largement 9 fois sa moyenne, soit plus que de 270 mm pour les deux villes) et au mois de janvier 1990 (ces inondations ont touché en particulier Sidi Bouzid). Les dommages y sont souvent graves : Perte de vies humaines, dégâts matériels... Récemment, suite à l'extension urbaine sans précédent de ces deux villes, elles ont connu une multiplicité des inondations dues essentiellement à un ruissellement urbain mal géré. En effet, même avec des pluies de faible intensité (< à 10mm) on observe une stagnation des eaux pluviales. L'ampleur des dégâts varie d'un événement pluvieux à un autre, mais il s'agit généralement de dégâts matériels. On cite en particulier les deux événements récents d'octobre 2013 et de septembre 2015 à la ville de Kairouan qui sont liées à une situation de retour d'est.

Les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid se caractérisent aussi par leurs crues historiques, notamment des oueds Merguellil et Zeroud, qui sont à l'origine des inondations les plus catastrophiques et qui sont produites généralement aux mois de septembre et d'octobre, comme celle de 1969. Ces crues dévastatrices se caractérisent par une longue durée, dépassant même les 2 jours, et par un débit instantané remarquable, atteignant 17050 m³/s le 27 septembre 1969. L'étude de la répartition des crues extrêmes en se basant sur les cartes d'archives, révèle que les deux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid sont situées dans les zones d'inondation des oueds Zeroud et Merguellil. La superficie de la plaine d'inondation de Sidi Bouzid est rétrécie en 1990. Ceci peut être expliqué par l'effet de la digue qui a joué un rôle important pour limiter les aires d'expansion des zones inondables. Pour la ville de Kairouan, la médina a été toujours à l'abri du risque. Parmi les autres conséquences de ces grandes crues, on peut citer les conséquences morpho-hydrologiques, dont notamment : la dérivation et le changement des lits des oueds ainsi que l'apparition des nouveaux affluents. Les apports sédimentaires, ont eu également des volumes très remarquables, de sorte à réduire la durée de vie du barrage Sidi Saâd et même contribuer à un arrêt total de son fonctionnement. Ces caractéristiques hydrologiques typiques de la Tunisie Centrale, ne peuvent pas à elles seules causer des dégâts aussi flagrants. La susceptibilité de la zone d'étude est, sans doute, l'un des facteurs primordiaux qui permet une redéfinition du risque inondation.

Chapitre 7

Cartographie de la susceptibilité des terrains à l'inondation dans le bassin versant Septentrional de la plaine de Kairouan et le bassin versant de l'oued El Fekka

Introduction

Etymologiquement parlant, la susceptibilité est « *la tendance à se vexer facilement* » (Larousse, 1995). Un terrain est donc susceptible au risque inondation s'il est capable de subir une telle modification. Plusieurs spécialistes en géographie ont intégré le terme susceptibilité dans l'équation du risque inondation. Pour, Carrega, (2016) : « *Les risques dits naturels auxquels appartiennent les inondations peuvent être décomposés en aléa, **susceptibilité** et vulnérabilité* ». Cardona, (2003), définit la susceptibilité comme étant: « *le potentiel d'un système à être affecté négativement par un aléa causé par un certain degré de fragilité, des faiblesses sociales ou économiques relatives ou des conditions défavorables* ». D'autres auteurs, ont relié la susceptibilité à l'exposition. Selon Balica, et al., (2012), la **susceptibilité** d'un système aux inondations est due à son exposition au risque et sa capacité / incapacité à être résilient, à se rétablir ou à s'adapter.

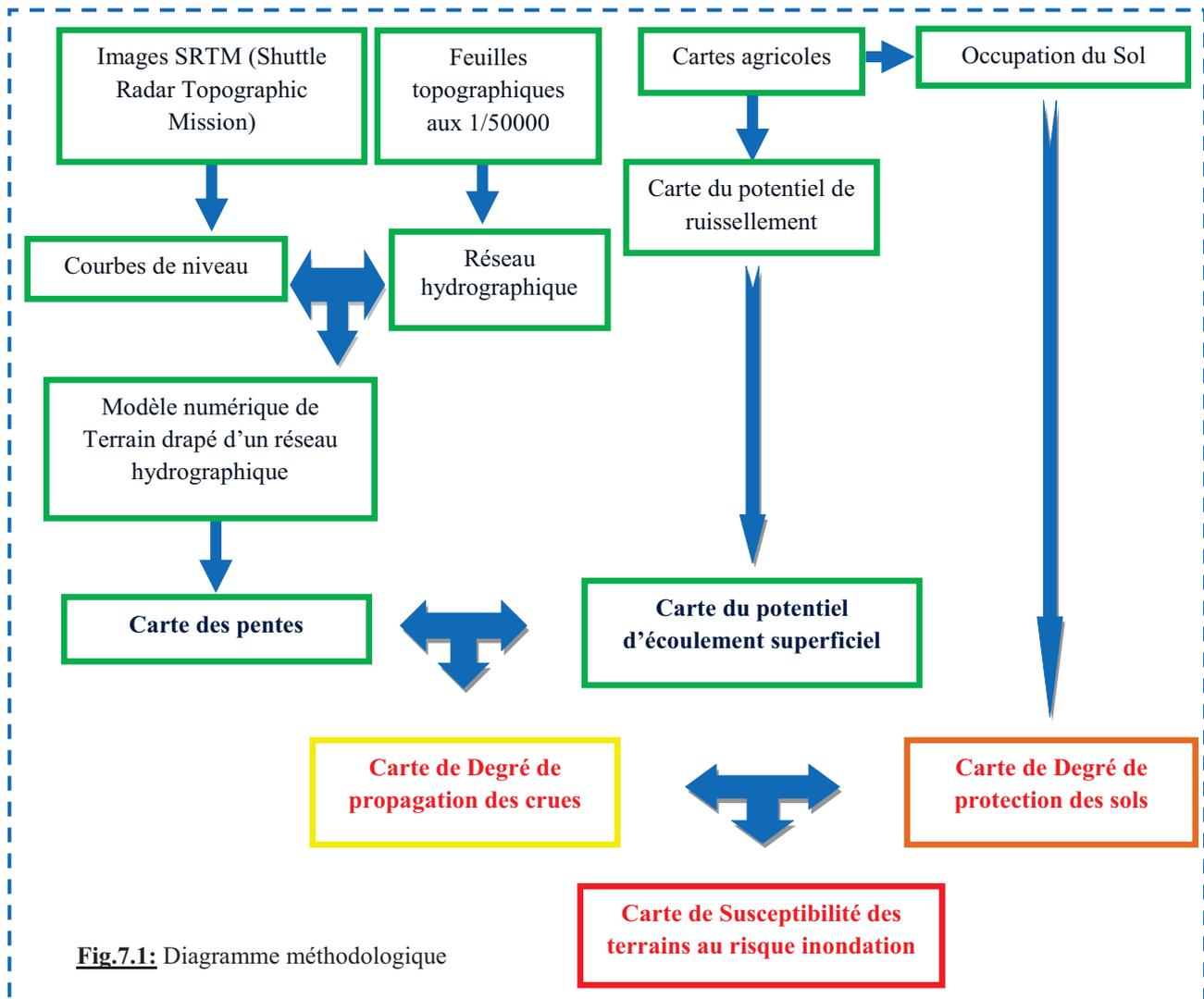
Dans ce **chapitre** nous cherchons à déterminer la susceptibilité des terrains au risque inondation dans les deux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid. Nous nous sommes basés sur un certain nombre de critères, notamment : la topographie (les pentes), la lithologie (potentiel d'écoulement superficiel) ainsi que le type d'occupation du sol... Comme l'affirme, Leone, et al., (2010), « *Pour accroître l'information sur les événements historiques et valoriser la démarche d'expertise, il est important d'analyser les phénomènes à risque dans l'unité physique homogène concernée par leur manifestation* ». C'est la raison pour laquelle nous avons opté pour l'étude de la susceptibilité des terrains à l'échelle des bassins versants : le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et le bassin versant de l'oued El Fekka, dominant respectivement les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid.

7-1- Approche méthodologique de la cartographie de la susceptibilité des terrains à l'inondation dans le bassin versant Septentrional de la plaine de Kairouan et le bassin versant de l'oued El Fekka: Données et méthodes

Pour la cartographie de la susceptibilité des terrains au risque inondation, quelques facteurs principaux influençant le degré de la susceptibilité ont été pris en compte. Ces facteurs, prédéfinis par Carrega, (2016), sont résumés dans cette définition : « *La **susceptibilité** du milieu environnant conditionne la prise en charge des gouttes d'eau tombées au sol : plus ce dernier est imperméable, plus le ruissellement en surface augmente, ce qui accroît le volume d'eau à écouler. Ce **potentiel d'écoulement superficiel** dépend de nombreux facteurs comme la **pente** qui accélère sa vitesse; **la nature géologique du sol et son mode d'occupation** : la texture et la structure de la terre végétale et de la roche favorisant*

l'infiltration (calcaire, sable) ou non (argiles, béton, goudron); la végétation du sol qui exerce un effet de rétention de l'eau et freine l'écoulement, d'autant plus qu'elle est dense, etc ».

La méthodologie consiste ici donc à spatialiser la susceptibilité des terrains au risque inondation pour les deux bassins versants étudiés. Nous avons combiné divers facteurs intégrés dans un Système d'Informations Géographiques (S.I.G). Il s'agit notamment, des classes de pente, du potentiel d'écoulement superficiel et du degré de propagation des crues et de protection des sols (Fig.7.1). Il est à noter que les intervalles choisis pour les différentes classes (variant de très faible à très fort), sont tous d'égale amplitude.



Les données utilisées sont extraites des source variées : des images SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) à 90 m de résolution, des cartes topographiques et agricoles à l'échelle 1/50000.

Le tableau ci-dessous (Tab.7.1), regroupe les différentes sources d'informations qui sont à la fois : géoréférencées, analysées et combinées, et ce en se basant sur les logiciels ENVI 4.5, Global Mapper 13 et Arcview 3.1.

Tab.7.1: Les données de base utilisées pour la création de la banque des données

Données de base	Mode d'acquisition	Source	Echelle
Modèle numérique du terrain (MNT) drapé d'un réseau hydrographique	Courbes de niveau d'équidistance de 10 m traités par le logiciel Global Mapper	Images SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission)	Résolution de 90 m
	Vectorisation du réseau hydrographique	Feuilles topographiques	1/50000
Carte des pentes	-	MNT drapé d'un réseau hydrographique	-
Carte d'occupation du sol	-	Carte agricoles (Année 2000)	1/50000
Carte de degré de protection des sols	-	Carte d'occupation du sol	-
Potentiel d'écoulement superficiel	Combinaison (fig.39)	Carte agricoles (Année 2000)	-
Carte de degré de propagation des crues	Combinaison (fig.39)	-	-
Carte de susceptibilité des terrains au risque inondation	Combinaison (fig.39)	-	-

7-2- Carte du degré de protection des sols

La réalisation de la carte du degré de protection des sols est basée sur une méthodologie qui consiste à accorder à chaque type d'occupation du sol un code, allant de 1 (Très élevé) à 5 (Très faible), selon sa capacité à protéger le sol. Il s'agit ici, entre autres, de sa capacité à atténuer le potentiel de ruissellement et de minimiser l'ampleur des dégâts du risque inondation. Pour ce faire, les différents types d'occupation du sol des bassins versants étudiés (datant des années 2000 et qui sont extraits des cartes agricoles à l'échelle 1/50000), ont été regroupés selon 5 catégories (Tab.7.2):

Tab.7.2: Répartition des types d'occupation selon leur degré de protection des sols dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan (**à gauche**) et dans le bassin versant de l'oued El Fekka (**à droite**)

N°	Types d'occupation du sol	Degré de protection des sols
1	Parcours	5
2	Céréales	5
3	Sol nu	5
4	Urbain	5
5	Sebkha	3
6	Oliviers	2
7	Cultures maraichères	4
8	Vergers	3
9	Vignes	4
10	Forêt	1

N°	Types d'occupation du sol	Degré de protection des sols
1	Parcours	5
2	Céréales	5
3	Sol nu	5
4	Urbain	5
5	Sebkha/Chott/Garaa	3
6	Oliviers	2
7	Cultures maraichères	4
8	Vergers	3
9	Cultures fourragères	5
10	Forêt	1
11	Forêt artificielle	2
12	Pépinière forestière	2
13	Station d'épuration	4

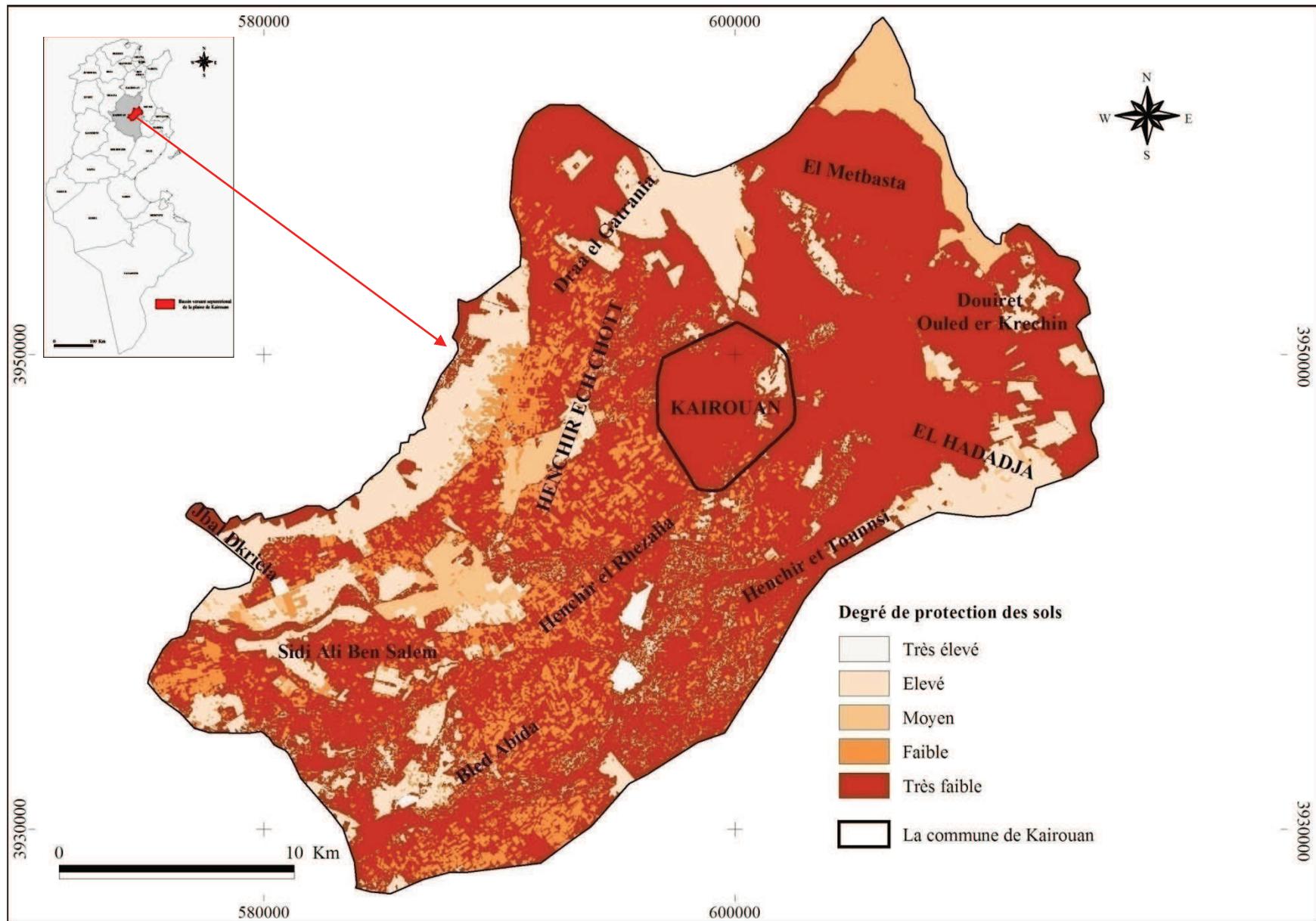


Figure 7.2: Degré de protection des sols dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan (Source : Nasrallah., 2018 ; d'après la carte de types d'occupation du sol dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan)

La première catégorie : Elle regroupe les types d'occupation ayant un très faible degré de protection. Ces types d'occupation, ont une faible capacité de retenir les eaux pluviales. Il s'agit notamment : des parcours, des terrains de céréales, des sols nus, du tissu urbain et des terrains à cultures fourragères.

La deuxième catégorie : Elle regroupe les types d'occupation à faible degré de protection, précisément : les vignes, les cultures maraichères et la station d'épuration (formée d'une succession des bassins d'épuration à ciel ouvert capable d'emmagasiner et d'atténuer le volume des eaux ruisselées).

La troisième catégorie : Elle comprend les vergers (caractérisés par leur moyenne capacité de retenir les eaux) ainsi que les sebkhas ou les lacs (compte tenu de leur double rôle de protection et d'aggravation du risque inondation). En effet, les sebkhas situées dans la Tunisie centrale sont souvent à sec. Elles peuvent jouer donc un rôle préventif direct face aux inondations en retenant une grande quantité d'eau. En l'occurrence, c'est l'exemple du lac El Kalbia à Kairouan, dans laquelle déversent les grands oueds Kairouanais. Ce lac « *a un fond en pente douce qui descend de 22 mètres à 15.5 m ... et représente une pellicule d'eau dont l'épaisseur maximale n'atteint guère 4 mètres* » (Despois, 1955). Mais, en cas des crues exceptionnelles, le voisinage des villes de Kairouan et de Sidi Bouzid par rapport aux sebkhas, peut accentuer le risque : D'une part le volume de sebkha augmente « *en 1969 sebkhet El Kalbia s'est transformée en un plan d'eau contenant presque un milliard de m³ d'eau* ». (Oueslati, 1999). D'autre part, son aire d'expansion devient plus importante : « *le plan d'eau d'El Kalbia, a pu s'étendre sur environ 250 km² à l'occasion des pluies de 1969 alors que la superficie de la sebkha n'est que de 120 km² en temps normal* ». (Oueslati, 1999).

La quatrième catégorie : Elle concerne les terrains d'oliviers, les forêts artificielles et les pépinières forestières. Ces types d'occupation se caractérisent par une forte capacité de rétention d'eau.

La cinquième catégorie : Elle regroupe les forêts qui se distinguent par la densité de leur couvert végétal ainsi que leur très grande capacité d'infiltration de l'eau dans le sol, ce qui favorise l'augmentation du temps de concentration et limite en conséquence l'écoulement de surface.

Tab.7.3: Répartition surfacique du degré de protection des sols dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan (1) et dans le bassin versant de l'oued El Fekka (2)

Classes		Superficie 1 en (Km ²)	%	Superficie 2 en (ha)	%
5	Très Faible	484,5	66,63	37360	43,22623
4	Faible	71,6	9,85	10502,94	12,15210
3	Moyen	34,42	4,73	6783,31	7,84842
2	Elevé	133,24	18,32	31782,69	36,77318
1	Très élevé	3,4	0,47	0,06	0,00007
Total		727,16	100	86429	100

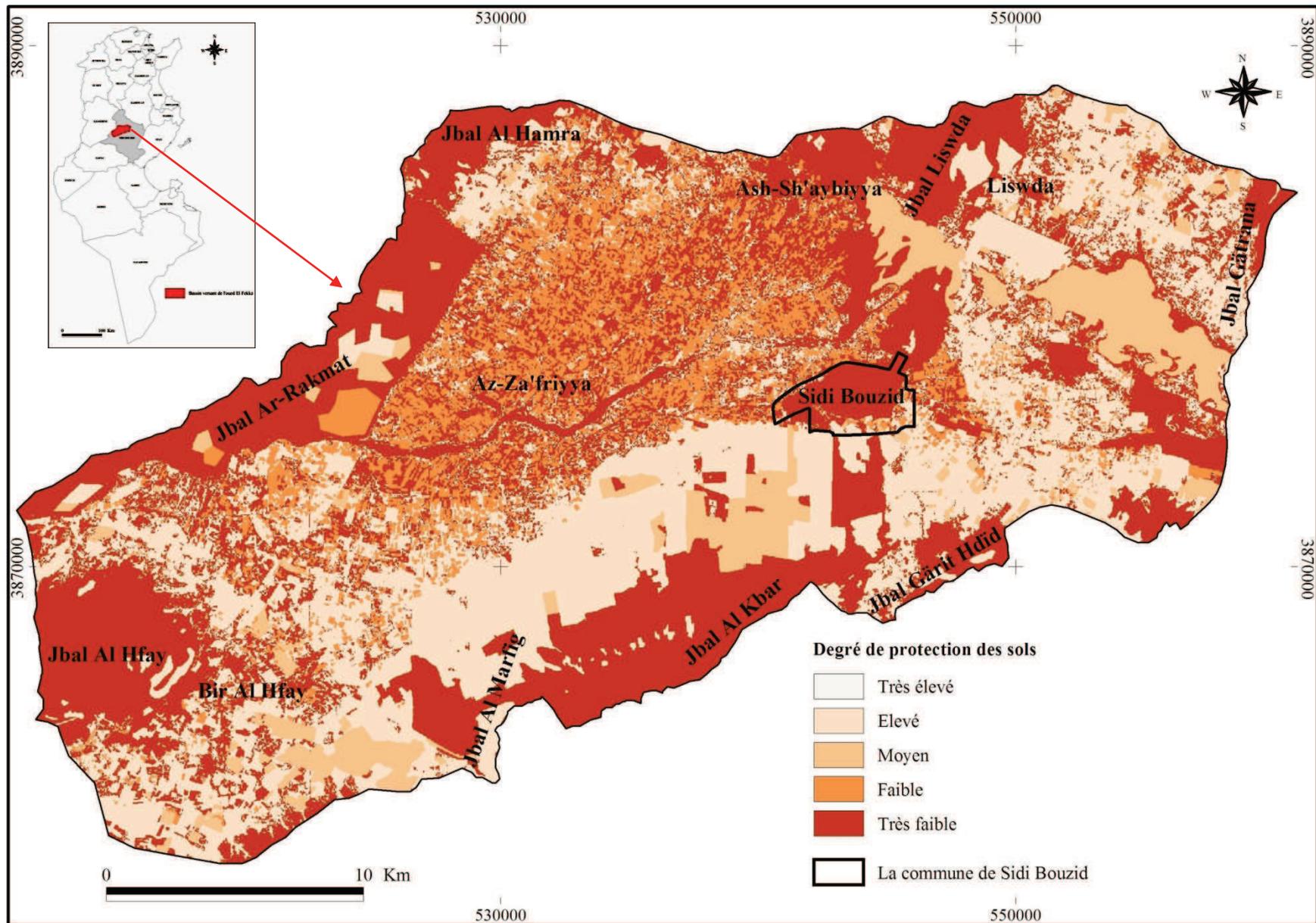


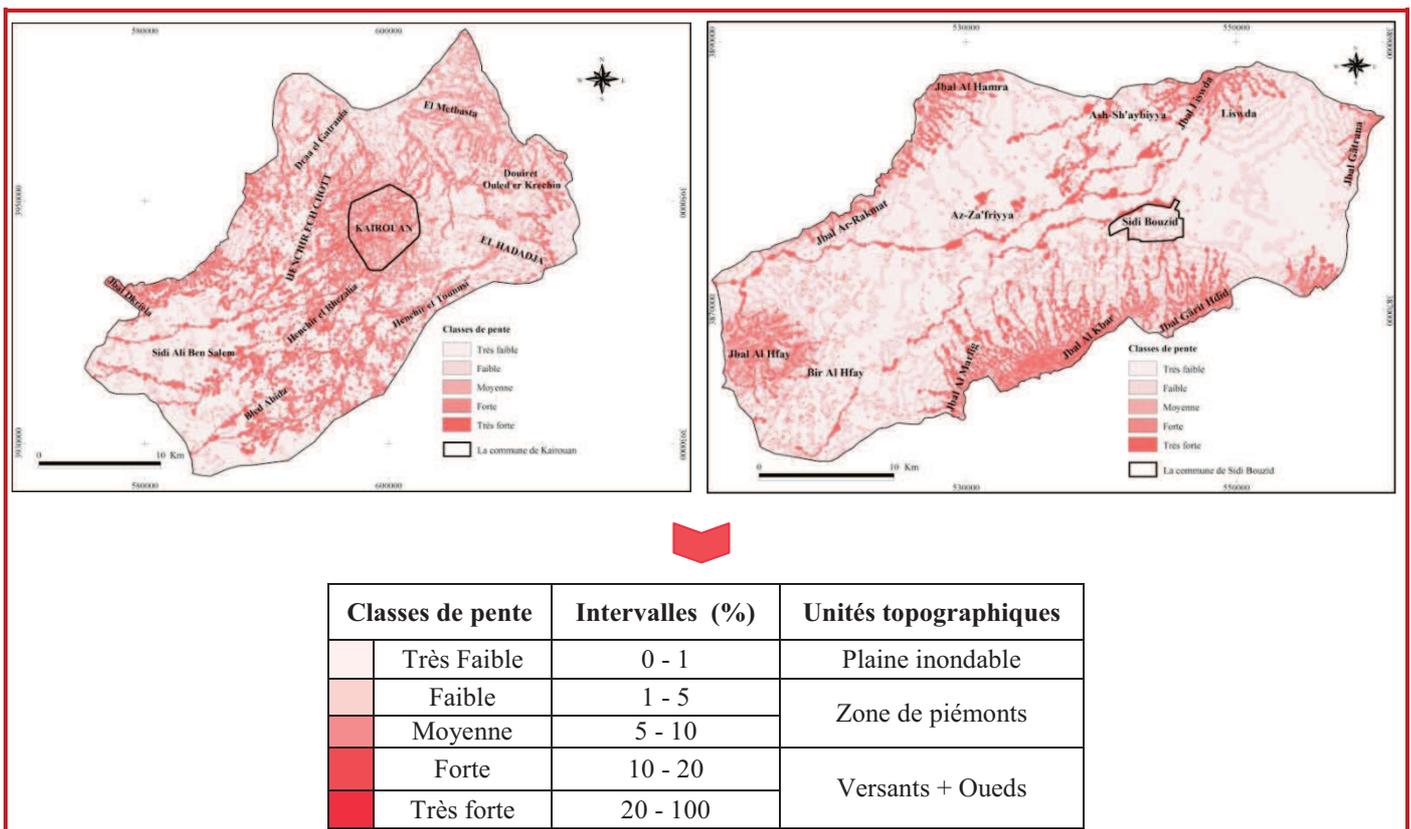
Figure 7.3: Niveaux de protection des sols dans le bassin versant de l'oued El Fekka (Source : Nasrallah, 2018 ; d'après la carte de types d'occupation du sol dans le bassin versant de l'oued El Fekka)

L'examen des cartes (Fig. 7.2 et 7.3) et du tableau 7.3, permet de constater la prédominance des types d'occupation du sol à très faible degré de protection qui s'étalent respectivement sur environ : 66,3 % et 43,23 % de la superficie totale du bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et de celui de l'oued El Fekka.

7-3- Carte de degré de propagation des crues

La propagation des crues se fait de part et d'autre des oueds. L'étendue des aires d'expansion des crues dépend de 2 critères : D'abord, le potentiel d'écoulement superficiel (dont la méthodologie de sa spatialisation est précédemment expliquée, (Cf. Chapitre 2)). Ensuite, la pente. Il est à noter que la carte de pentes présentées ici (Fig.7.4) est réalisée à partir d'un modèle numérique de terrain drapé d'un réseau hydrographique. Il s'agit, d'intégrer les oueds dans la cartographie de degré de propagation des crues. Les intervalles des classes de pentes choisis ont pour but de démontrer les différentes unités topographiques des deux bassins versants étudiés, à savoir : la plaine inondable, les piémonts et les versants.

Fig.7.4: Les classes de pente dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et dans le bassin versant de l'oued El Fekka



La carte de degré de propagation des crues, est donc le résultat de la combinaison des deux cartes précédemment citées. Nous nous sommes basés sur « une logique, qui consiste à dégager le rôle primordial de la pente qui dirige les eaux de pluies soit, par un écoulement lorsqu'il s'agit d'une pente forte à très forte, ou tout simplement vers un lieu de stagnation lorsqu'il s'agit d'un terrain plat » (Nasrallah et Fehri, 2017).

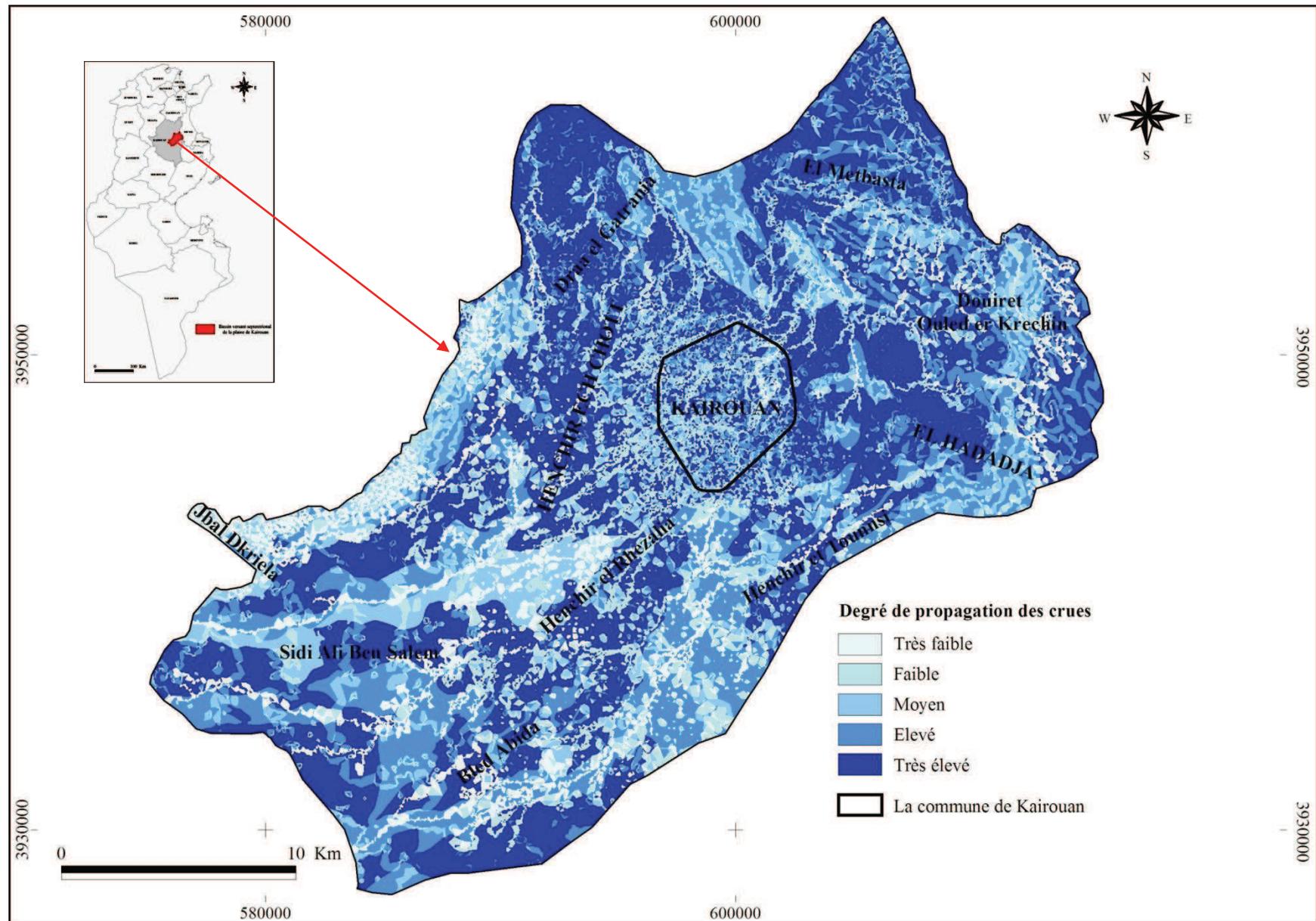


Figure 7.5: Degré de propagation des crues dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan (Source : Nasrallah., 2018 ; d'après la carte du potentiel d'écoulement superficiel et celle des pentes dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan)

En effet, un terrain est à très fort degré de propagation des crues s'il se caractérise par une pente très faible et un potentiel d'écoulement superficiel très fort (Tab. 7.4).

Tab.7.4: Matrice Potentiel d'écoulement superficiel en fonction de la Pente

Classes de P.E.S		Classes de pentes				
		1	2	3	4	5
		Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
1	Très faible	Moyenne	Faible	Faible	Très faible	Très faible
2	Faible	Forte	Moyenne	Faible	Faible	Très faible
3	Moyen	Très forte	Forte	Moyenne	Faible	Très faible
4	Fort	Très forte	Très forte	Forte	Moyenne	Faible

La répartition surfacique des degrés de propagation des crues (Figures 7.5, 7.6 et tableau 7.5), laisse voir la prédominance des terrains à fort et très fort degré de propagation. Ces terrains couvrent plus que la moitié de la superficie totale des deux bassins étudiés.

Tab.7.5: Répartition surfacique du degré de protection des sols dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan (1) et dans le bassin versant de l'oued El Fekka (2)

Classes	Superficie 1 en (Km ²)	%	Superficie 2 en (Km ²)	%
Très Faible	69,54	9,56	113,31	13,11
Faible	105,08	14,45	94,91	10,98
Moyen	107,35	14,76	159,63	18,47
Fort	166,53	22,9	201,98	23,37
Très fort	278,66	38,33	294,46	34,07
Total	727,16	100	864,29	100

7-4- Carte de susceptibilité des terrains au risque inondation(S.T.I)

La susceptibilité des terrains au risque inondation est une multiplication entre le degré de propagation des crues (D.P.C) et le degré de protection des sols (D.P.S). Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$\mathbf{S.T.I = D.P.C \times D.P.S}$$

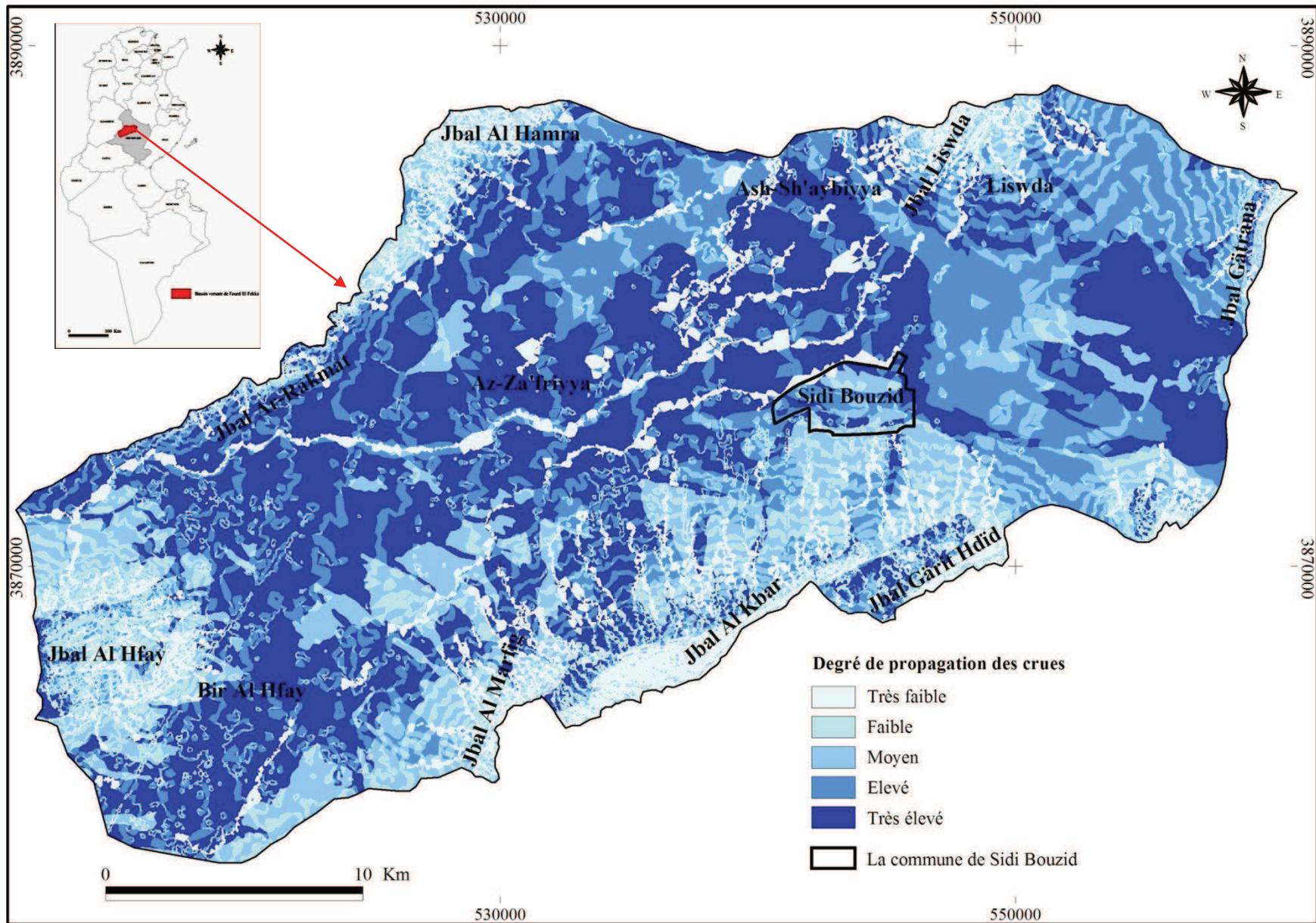


Figure 7.6: Degré de propagation des crues dans le bassin versant de l'oued El Fekka (Source : Nasrallah., 2018 ; d'après la carte du potentiel d'écoulement superficiel et celle des pentes dans le bassin versant de l'oued El Fekka)

Classes de D.P.C

- 1- Très faible
- 2- Faible
- 3- Moyen
- 4- Fort
- 5- Très fort



Classes de D.P.S

- 5- Très faible
- 4- Faible
- 3- Moyenne
- 2- Forte
- 1- Très forte

Tab.7.6: Matrice S.T.I = D.P.C × D.P

Classes de degré de protection des sols	Classes de degré de propagation des crues				
	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	5
2	2	4	6	8	10
3	3	6	9	12	15
4	4	8	12	16	20
5	5	10	15	20	25



Classes de D.P.S	Classes de degré de propagation des crues				
	1	2	3	4	5
1	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible
2	Très faible	Très faible	Faible	Faible	Faible
3	Très faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne
4	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Forte
5	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte

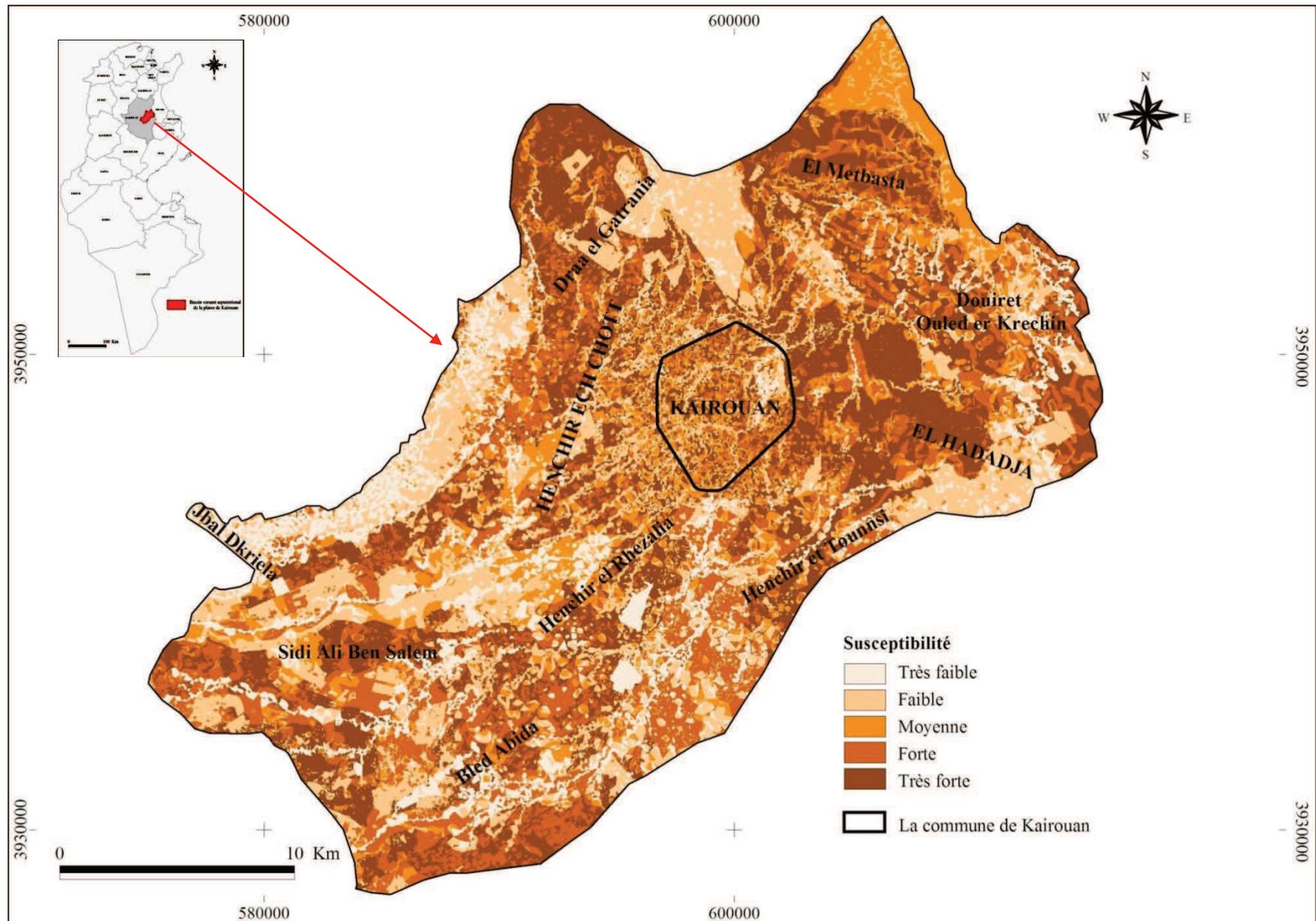


Figure 7.7: Susceptibilité des terrains au risque inondation dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan (Source : Nasrallah., 2018 ; d'après la carte degré de propagation des crues et celle du degré de protection des sols dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan)

Tab.7.7: Répartition surfacique de la susceptibilité des terrains au risque inondation dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan (1) et dans le bassin versant de l’oued El Fekka (2)

Classes	Intervalles	Superficie 1 en (Km ²)	%	Superficie 2 en (Km ²)	%
Très Faible	0 – 5	91,68	12,61	148,4	17,17
Faible	6 – 10	189,84	26,11	326,27	37,75
Moyen	11 –15	93,23	12,82	111,67	12,92
Fort	16 – 20	151,05	20,77	158,17	18,3
Très fort	21 – 25	201,36	27,69	119,78	13,86
Total	-	727,16	100	864,29	100

La spatialisation des classes de la susceptibilité des terrains au risque inondation (Tab.7.7), montre que le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan est plus susceptible aux inondations que celui de l’oued El Fekka. Les terrains à très forte susceptibilité s’étalent respectivement sur 27,69% et 13,86 % de la totalité de surface. L’examen des cartes (Figures 7.7 et 7.8), affirme la forte susceptibilité des deux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid face à ce risque.

Conclusion

« L’évaluation de la susceptibilité des terrains est la probabilité d’occurrence spatiale d’un phénomène pour plusieurs facteurs de prédisposition environnementaux » (Thiery., 2007). Les facteurs de la susceptibilité des terrains au risque inondation sont multiples pour les villes de Kairouan et Sidi Bouzid. Ces deux villes appartiennent respectivement au bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et au celui de l’oued El Fekka, leur site est donc propice aux inondations. En effet, ces deux bassins versants se caractérisent d’une part par la prédominance des plaines à pente faible, qui n’excède guère les 1%, et qui sont traversées par les plus grands cours d’eau de la Tunisie Centrale, précisément les oueds Zeroud et Marguellil. D’autre part, ces deux bassins versants se caractérisent par la dominance remarquable des groupes des sols C et D à fort et très fort potentiel d’écoulement superficiel. Les types d’occupation à un degré de protection très élevé y ont une superficie négligeable. La cartographie de la susceptibilité des terrains aux inondations est basée sur une logique qui consiste à intégrer les différents facteurs de susceptibilité. La carte de synthèse de la susceptibilité est le produit de deux cartes, à savoir :

- la carte de degré de propagation des crues (le résultat de la combinaison des cartes de pentes et de potentiel d’écoulement superficiel)

- et la carte de degré de protection des sols (en se basant particulièrement sur les types d’occupation du sol).

Il est à noter que les ouvrages de protection sont considérés comme transparents dans l’évaluation de la susceptibilité, notamment les digues qui entourent les deux villes, les travaux de conservations des eaux et des sols ainsi que les travaux de la direction d’hydraulique urbaine... La répartition spatiale des classes de susceptibilité ont montré que les deux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid sont fortement menacées par le risque inondation.

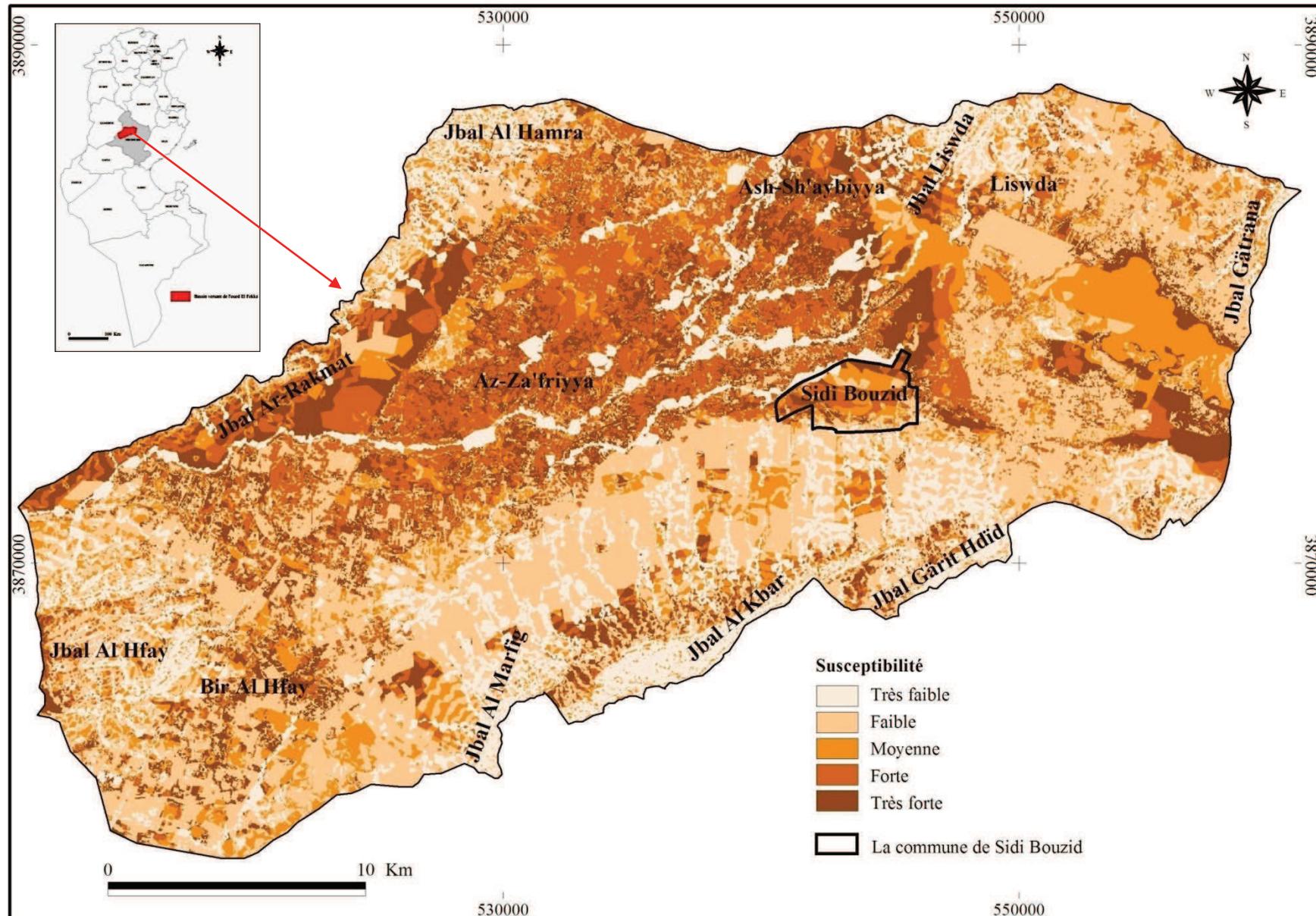


Figure 7.8: Susceptibilité des terrains au risque inondation dans le bassin versant de l'oued El Fekka (Source : Nasrallah., 2018 ; d'après la carte degré de propagation des crues et celle du degré de protection des sols dans le bassin versant de l'oued El Fekka)

Conclusion

Les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid sont fortement menacées par le risque inondation. Leur forte susceptibilité à ce fléau est étroitement liée à leur site propice aux inondations qui se caractérise par : la dominance des terrains à pente faible, des groupes des sols à fort et très fort potentiel d'écoulement superficiel ainsi que par des types d'occupation à un degré de protection très faible. En outre, ces deux villes appartiennent respectivement au bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et au celui de l'oued El Fekka qui sont des sous-bassins versants de Zeroud et Marguellil qualifiés les plus grands cours d'eau de la Tunisie Centrale. Les crues causées par ces deux capricieux cours d'eau ont été dévastatrices. Ces crues, qui sont à l'origine des inondations les plus catastrophiques, sont produites généralement en automne et en hiver, l'exemple de celles de 1969 et 1990. Leurs conséquences sont divers : des conséquences morpho-hydrologiques (dérivation et changement des lits des oueds, apparition des nouveaux affluents...), pertes en vie humaine et des dégâts matériels. Ces grandes crues sont, généralement, produites suite à des événements pluvieux extrêmes qui se caractérisent par le faible groupement des jours pluvieux (la durée maximale est de 3 jours successifs à Kairouan et de 4 jours successifs à Sidi Bouzid) et par un apport pluviométrique maximal modéré d'un seul événement (de l'ordre de 160,2 mm à Kairouan et de 209,6 mm à Sidi Bouzid). Mais suite à la construction des digues et des barrages, les citadins se sentent à l'abri de ce risque et les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid ne cessent de s'étendre sur des terrains inondables. L'empiètement des cours d'eau favorise le ruissellement urbain. En effet, même avec des faibles quantités de pluie on observe souvent une stagnation des eaux pluviales. Ceci, est le résultat de plusieurs facteurs notamment le sous dimensionnement voire l'absence des réseaux d'évacuation des eaux pluviales. La cartographie du risque inondation à des échelles fines (ville et quartier) est devenue une nécessité pour préciser les zones à risque fort et qui nécessitent une intervention rapide lors des inondations.

Troisième partie

Le risque inondation dans les villes de Kairouan et Sidi Bouzid : Cartographie, gestion et moyens de lutte

« Qui dit risque dit zone à risque. Sans spatialisation, pas de conscience des risques et pas d'action possible pour les réduire ». (Leone et al., 2010).

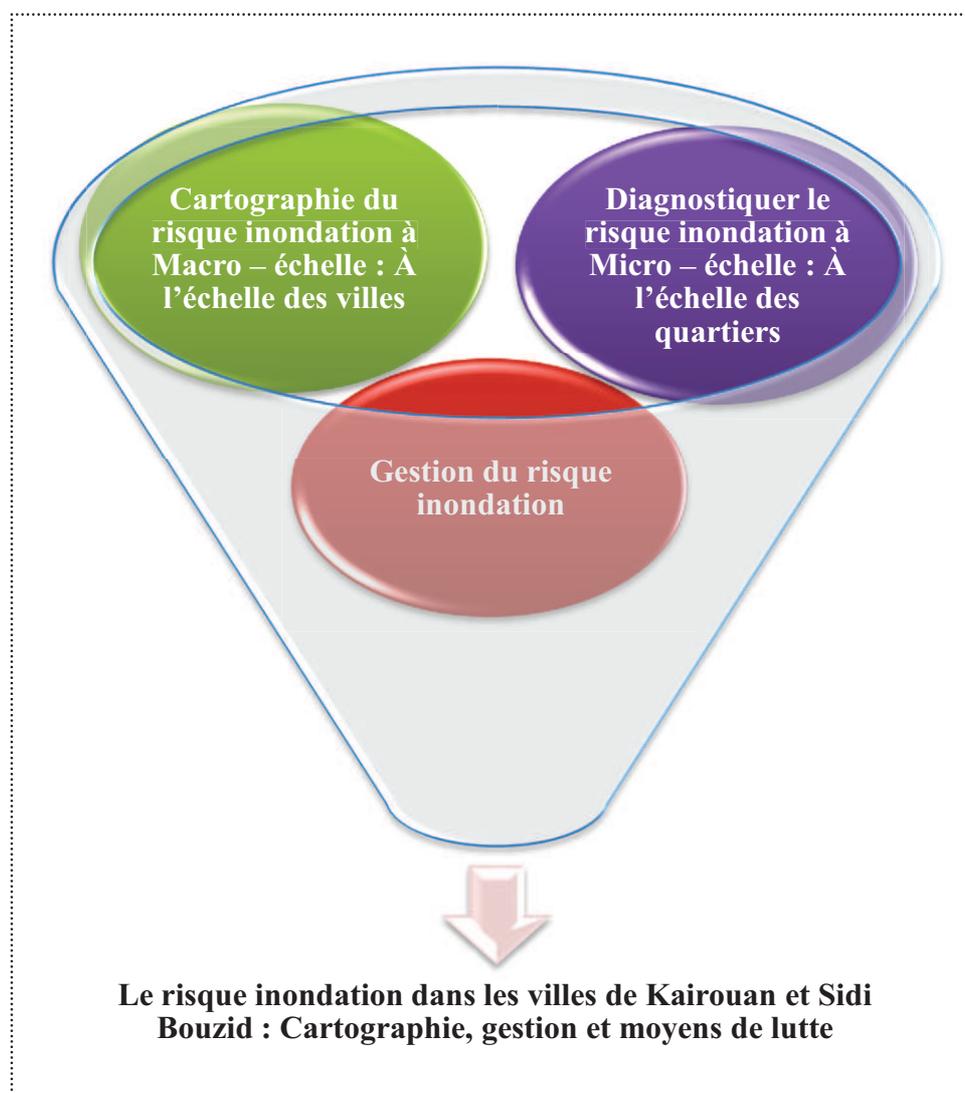
Kairouan – Quartier « El Menchia » - Inondations 07 Août 2018

Source : <https://www.nessma.tv/article/>

Introduction

La cartographie est indispensable pour toute étude du risque. Elle permet la spatialisation du phénomène dans un cadre géographique donné, ce qui facilite l'interprétation des résultats. Ces derniers sont de plus en plus fins tout en agrandissant l'échelle d'étude du risque. Dans cette partie de thèse nous essayons de :

- ↳ Cartographier le risque à l'échelle des villes de Kairouan et de Sidi Bouzid.
- ↳ Diagnostiquer le risque inondation à Micro – échelle : Application sur les quartiers Mansourah Nord à Kairouan et Ouled Chelbi à Sidi Bouzid.
- ↳ Citer les différents moyens de gestion du risque inondation.

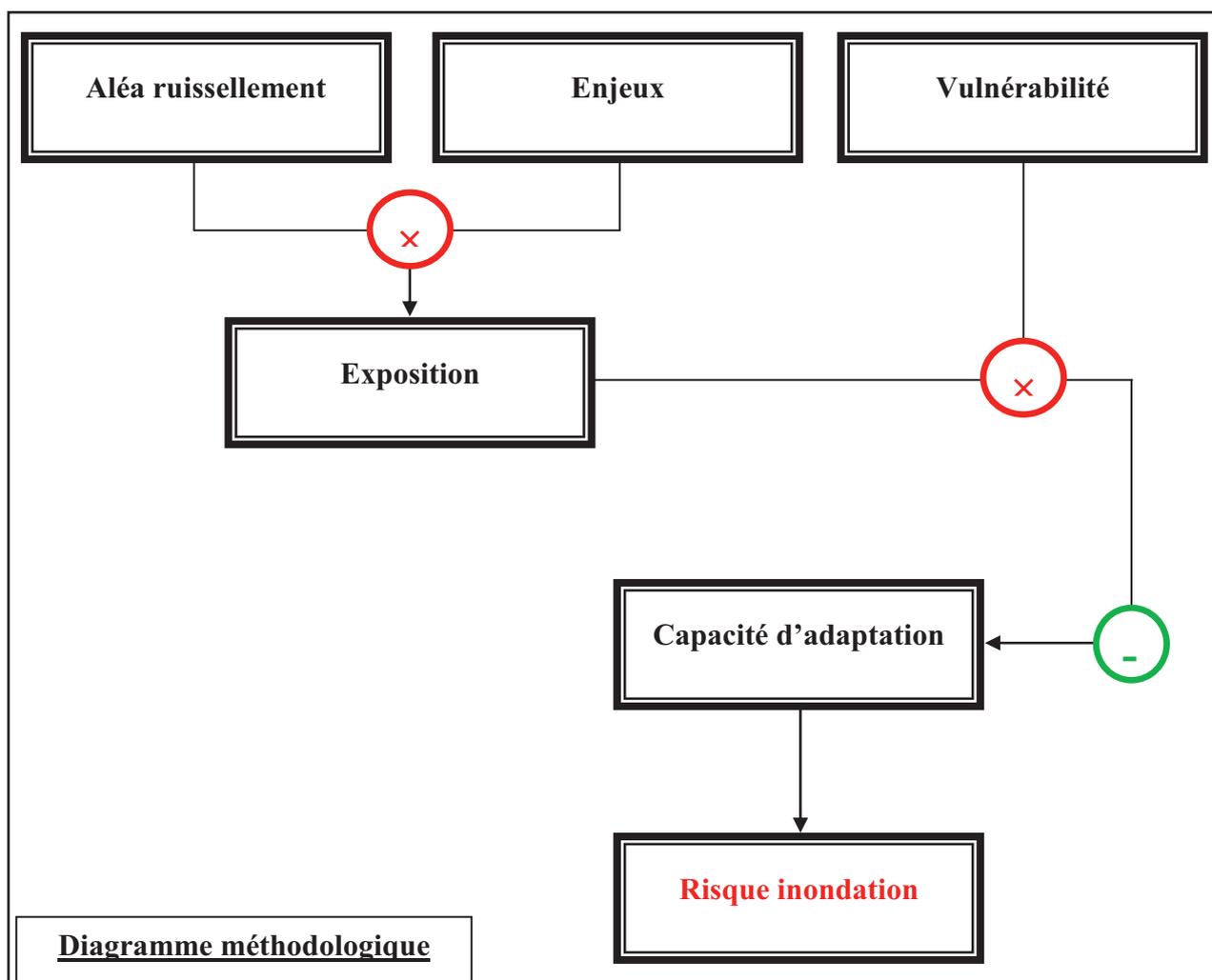


Chapitre 8

Cartographie du risque inondation à Macro – échelle : À l'échelle des villes de Kairouan et Sidi Bouzid

Introduction

La spatialisation du risque d'inondation c'est sa représentation sous forme d'une carte qui permet de repérer facilement les endroits menacés. À travers ce chapitre nous essayons de mettre en valeur les données disponibles pour aboutir à une cartographie fine du risque à l'échelle des villes de Kairouan et de Sidi Bouzid.



8-1- Définitions des concepts de base

Pour bien étudier le risque inondation dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid, il est judicieux de commencer par définir quelques notions de base en se référant à des spécialistes en la matière.

8-1-1- Risque

La définition du risque est différente d'un auteur à l'autre. D'après Auly et al., (2012), le risque peut se définir de la façon suivante :

$$\text{Risque} = f(\text{aléa} \times \text{vulnérabilité des enjeux})$$

Pour Leone et Vinet, (2006), « **Le risque** est une propension à l'endommagement ou au dysfonctionnement des différents éléments exposés (biens, personnes, activités, fonctions, systèmes) constitutifs d'un territoire et d'une société donnés ». Il est défini autrement comme « la combinaison d'aléas d'origine naturelle et d'enjeux socio-économiques et culturels caractérisés par une vulnérabilité » (Leone et al., 2010). Selon Crichton, (1999), **le risque** est la probabilité d'une perte, qui dépend de trois éléments: l'aléa, la vulnérabilité et l'exposition. Si l'un ou l'autre de ces trois éléments de risque augmente ou diminue, le risque augmente ou diminue respectivement. Birkmann, (2006), le définit comme étant la somme des mesures d'aléa, d'exposition, de vulnérabilité et de capacité.

8-1-2- Aléa

En latin, *alea* signifiait « dé » et « chance ». On retrouve ce mot dans l'expression *alea jacta* et qui signifie « les dés sont jetés » (Larousse, 1995). « **L'aléa** est défini comme la probabilité d'occurrence d'un phénomène » (Leone et al., 2010). C'est, la probabilité d'occurrence, dans une période donnée et dans une zone donnée, d'un phénomène naturel potentiellement dommageable (Cardona, 2003). Burton et Kates, (1964), définissent **les aléas naturels** comme des éléments de l'environnement physique nocifs pour l'homme et causés par des forces étrangères à lui. D'après Auly et al., (2012), l'aléa est « un événement potentiellement dangereux d'origine naturelle. Il est défini par une probabilité d'occurrence **spatiale** (caractérise la susceptibilité des territoires à être impactés par un aléa donné) ; **temporelle** (dépend de la combinaison de facteurs déclenchant naturels ou anthropiques) et **une intensité** (qui marque l'importance du phénomène, autrement dit sa puissance ou sa force, qui conditionne les conséquences sur les enjeux) ».

8-1-3- Enjeux

La notion d'**enjeux** « désigne tout ce qui est exposé à un aléa susceptible d'entraîner des dommages : les hommes, leurs biens mais aussi l'environnement dans lequel ils vivent » (Auly et al., 2012). D'après Leone et al., (2010) les **enjeux** sont définis par: « les biens et les personnes exposés directement ou indirectement aux aléas ». Pour **évaluer un risque**, « **les enjeux** doivent être recensés, localisés et hiérarchisés. Leur recensement se fait généralement à partir des cartes d'occupation du sol, de différentes bases de données et de relevés de terrain » (Leone et al., 2010).

8-1-4- Exposition

L'exposition d'une communauté ou d'une entreprise dans une zone donnée à un risque d'inondation est considérée comme une combinaison de deux facteurs, l'aléa et les enjeux. L'exposition peut être mesurée simplement par l'équation suivante :

$$\text{Exposition} = \text{Aléa} \times \text{Enjeux}$$

D'après Leone et al., (2010) : « *La notion d'exposition renvoie à la valeur des pertes potentielles* ». En effet, « *l'exposition du bâti est variable dépendamment de sa proximité à la source de l'aléa ou de sa situation dans une zone basse* » (Creach, 2015).

8-1-5- Vulnérabilité

Etymologiquement parlant, la vulnérabilité du latin « *vulnerare* » est le caractère de ce qui est vulnérable « *Que l'on peut facilement peiner, blesser* » (Larousse, 1995). En sciences humaines et sociales c'est dans les années 1980 et 1990, que la vulnérabilité est mise au cœur de leur étude des risques. D'après Leone et al., (2010), « *les sociétés ne subissent pas les aléas ; elles participent plus ou moins consciemment à la construction des vulnérabilités* ». Ils affirment que la **vulnérabilité** : « *reflète la fragilité des biens, des personnes, des systèmes sociaux, des territoires face aux aléas, et leur éventuelle capacité à se restaurer, s'améliorer après un dommage (résilience)* ». Ils définissent la **vulnérabilité** « *comme la propension d'un individu, un groupe social, un territoire à subir des dommages ou des dysfonctionnements* ». Le terme **vulnérabilité** est défini de différentes manières. Par exemple, De stage et al., (2002) la définissent comme « *les caractéristiques qui limitent la capacité d'un individu, d'un ménage, d'une communauté, d'une ville, d'un pays ou même d'un écosystème à anticiper, gérer, résister ou récupérer d'un impact de menace naturelle ou autre (souvent appelé "aléa" ou "déclencheur" naturel)* ». Le UNDP, (1992) définit la vulnérabilité comme « *le degré de perte (par exemple de 0 à 100%) résultant d'un phénomène potentiellement dommageable* ». Pour Vinchon., (2007), « *la vulnérabilité est spécifique à chaque enjeu, en fonction de leurs caractéristiques propres et de leur niveau d'exposition* ». Alors que pour Adger, (2006), la vulnérabilité regroupe trois composantes : **l'exposition** (*qui caractérise l'intensité de l'impact de l'aléa sur l'enjeu*), **la résistance** (*la capacité à absorber l'impact en limitant les dommages*) et **la sensibilité** (*l'endommagement potentiel que peuvent subir les enjeux*). La vulnérabilité est définie par Creach, (2015), comme « *la prédisposition d'un enjeu à être plus ou moins impacté par un aléa* ». Pour lui, elle s'agit d'« **une variable sociétale**... *En effet, la manière dont une société va subir l'évènement dépendra de son degré de préparation et d'adaptation* ». L'une des définitions les plus connues a été formulée par la Stratégie internationale de prévention des catastrophes (UN / ISDR), qui définit la **vulnérabilité** comme, les: Conditions déterminées par des facteurs ou des processus physiques, sociaux, économiques et environnementaux qui augmentent la vulnérabilité d'une communauté à l'impact des risques (UN / ISDR., 2004). En revanche, le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) définit la **vulnérabilité** comme: Une condition humaine ou un processus résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques et environnementaux, qui détermine la probabilité et l'ampleur des dommages résultant de l'impact d'un danger donné (UNDP, 2004). En outre, d'autres auteurs, tels que Vogel et O'Brien, (2004) soulignent le fait que la **vulnérabilité** est: Multidimensionnelle et différentielle ; dépend de l'échelle (en termes de temps, d'espace et d'unités d'analyse) et dynamique. Pour Leone et Vinet., (2006), la vulnérabilité est « *la propension à l'endommagement ou au dysfonctionnement de différents éléments exposés (biens, personnes, activités, fonctions, systèmes) constitutifs d'un territoire et d'une société* ». Elle exprime la gravité de l'échec en termes de conséquences. La préoccupation n'est pas la durée de l'échec, mais son coût (Correia, Santos et Rodrigues,

1987). **La vulnérabilité** indique l'exposition au risque et une incapacité à éviter ou à absorber des dommages potentiels (Pelling., 2003). C'est « *un état permanent (qui ne disparaît pas entre deux phénomènes) et dynamique (en constante évolution)* » (Sirven, 2007). Il s'avère qu'il ya **trois écoles de pensée** sur les définitions de la vulnérabilité qui peuvent être différenciées. La première porte sur l'exposition aux risques biophysiques. La deuxième se penche sur le contexte social et aux réactions des communautés, y compris la résistance de la société et la résilience aux aléas. La troisième école combine les deux approches et définit la vulnérabilité comme un risque de lieu englobant les risques biophysiques ainsi que la réaction et l'action sociales (Schanze, Zeman, et Marsalek, 2006). Plusieurs **types de vulnérabilité** sont cités par Creach, (2015), telles que :

* **La vulnérabilité physique** qui « *fait directement référence au degré d'exposition et donc à l'endommagement potentiel de l'enjeu* » (Dauphiné et Provitolo., 2013).

* **La vulnérabilité sociale** qui « *renvoie à la capacité de la société à faire face et donc à la notion de résilience* » (Reghezza, 2006). Cette approche combine la susceptibilité des personnes et des communautés exposées à leurs capacités sociales, économiques et culturelles pour faire face aux dommages qui pourraient survenir (Hilhorst et Bankoff, 2004).

* **La vulnérabilité interne et la vulnérabilité externe** : Selon Chambers, (1989) et Bohle, (2001), la dimension **interne** de la vulnérabilité fait référence à l'absence de défense et à l'insécurité, ou inversement à la capacité d'anticiper, de gérer, de résister et de récupérer des impacts d'un danger. La dimension **externe** implique une exposition aux risques et aux chocs. Comme cette dernière dépend principalement de la géolocalisation (ou exposition) de la population, nous la séparons explicitement de la première, qui concerne la vulnérabilité de la personne ou du groupe.

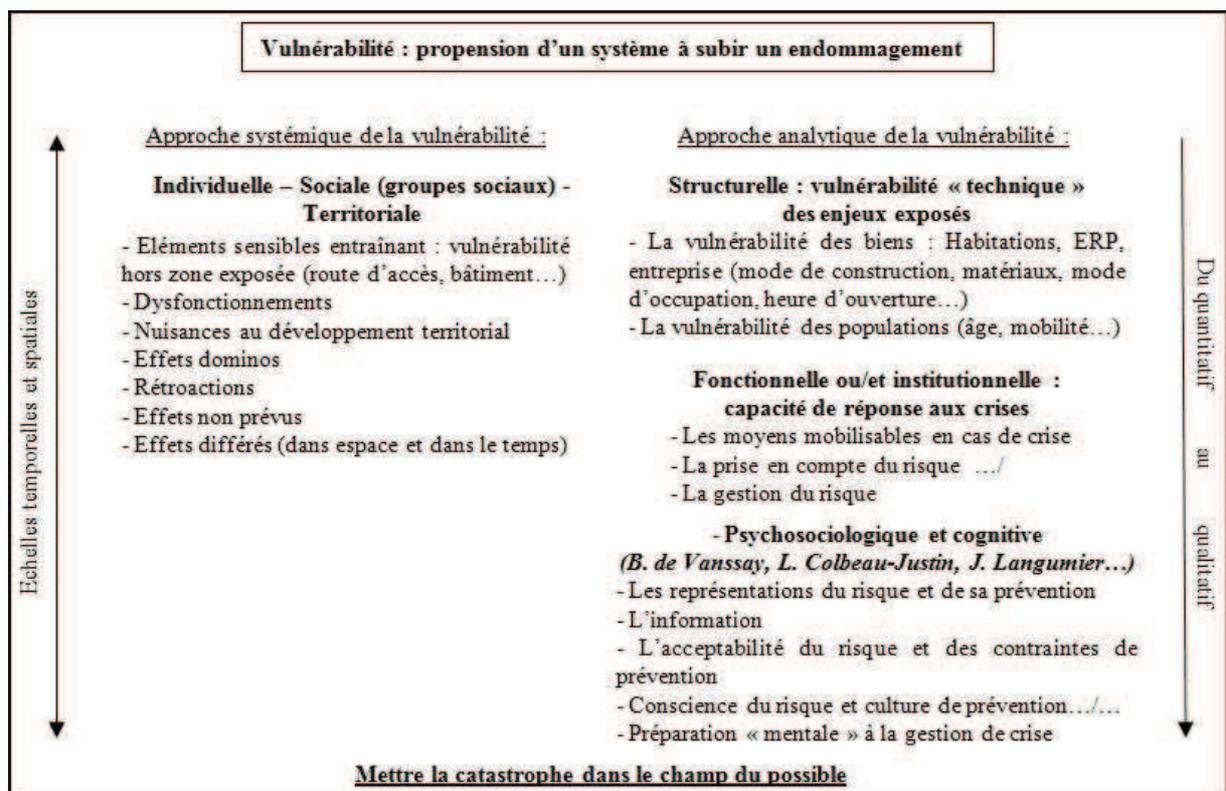
* **La vulnérabilité passive** qui « *fait référence au niveau de dommage que peuvent subir des enjeux* » (Veyret, 2004). Elle est liée à une absence de conscience du risque qui pousse à bâtir dans des zones inondables, sans adapter les habitations à ce risque (Creach, 2015).

* **La vulnérabilité active** est « *la capacité de réponse des sociétés à des crises potentielles* » (D'Ercole, 1994).

On cite aussi **la vulnérabilité biophysique** qui est un concept largement utilisé pour décrire dans quelle mesure un système est vulnérable aux effets néfastes du changement climatique et dans quelle mesure il est (in) capable de s'adapter à de tels impacts (WBGU, 2005). D'autres **types de vulnérabilités** sont cités par Leone et al., (2010) : **Vulnérabilité humaine; organisationnelle ou institutionnelle** (pour les actions menées par des organismes privés ou publics) ; **environnementale** (pour les composantes du milieu naturel) et **fonctionnelle** (pour les fonctions et activités). Ils distinguent **deux approches** pour évaluer la vulnérabilité : « *La première est sociogéographique qui repose sur une approche qualitative à travers l'analyse des facteurs de prédisposition aux dommages et la deuxième est une approche technique qui repose sur une approche quantitative de la vulnérabilité... C'est une mesure de l'endommagement potentiel* » (Creach, 2015). Leone et al., (2010) signalent deux conditions essentielles à la validité d'un indice de vulnérabilité : « *La traçabilité des données à inclure dans l'indice et la garantie que la méthode est bien reproductible* ». Defossez et al., (2018), définissent la vulnérabilité comme « *la propension d'un système à subir un endommagement* », (Fig.8.1). Ils mentionnent deux approches de la vulnérabilité, l'une **systémique** qui regroupe les vulnérabilités : **individuelle, sociale et territoriale**. L'autre est

une approche **analytique** qui tient compte de : l'**aspect structurel** de la vulnérabilité voire la vulnérabilité « technique » des enjeux exposés, l'**aspect fonctionnel et/ou institutionnel** qui détermine la capacité de réponse aux crises ainsi que l'**aspect psychosociologique et cognitive** de la vulnérabilité. **La vulnérabilité** est donc «*un système dynamique et complexe, aux causes multiples et articulé autour d'une multitude de facteurs directs et indirects en interaction... Ces multiples facteurs peuvent être appréhendés au moyen de divers critères. L'identification de ces facteurs et critères est une étape essentielle du diagnostic de vulnérabilité*» (Leone et al., 2010).

Figure.8.1. Les différentes approches de la vulnérabilité



(Defossez et al., 2018)

Dans cette thèse, on s'intéresse à l'étude de la vulnérabilité dans ses différents aspects. Il s'agit des vulnérabilités : humaine et psychologique, structurelle, institutionnelle et/ou fonctionnelle, (Tab.8.1). Pour cela on a préparé le tableau ci-dessous pour déterminer les degrés de la vulnérabilité synthétique qui regroupe les différents types de vulnérabilité précédemment cités. Mais faute du manque des données on s'est basé pour la cartographie et l'étude de la vulnérabilité dans les deux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid essentiellement sur le type de la vulnérabilité structurelle. « *Techniquement, la vulnérabilité se mesure par un taux d'endommagement ou de dysfonctionnement potentiel ou déclaré d'un élément exposé ou d'un ensemble d'éléments (un individu ou un système urbain par exemple). Ce taux est un indicateur de vulnérabilité. Il est souvent exprimé entre 0 et 100%...* » (Leone et al., 2010). Dans ce travail, l'indicateur de vulnérabilité se traduit par un degré variant de 1 (vulnérabilité très faible) à 5 (vulnérabilité très forte), ce qui facilite sa cartographie.

Tab.8.1. Étude de la vulnérabilité à Micro échelle

Critère		Code
<u>Vulnérabilité humaine et psychosociologique</u>		
<u>Vulnérabilité propre aux individus</u>	Nombre d'individus par logement	1 (1) / 2 (2) / 3 (3) / 4 (4) / >5 (5)
	Présence des personnes qui seraient vulnérables en cas d'inondation	Oui (5) / Non (1)
<u>Evacuation</u>	Existence d'un sous-sol / une cave dans le logement	Oui (5) / Non (1)
	Situation du rez-de-chaussée par rapport au niveau de la route	Sous le niveau de la route (5) / Au même niveau (3) / Au-dessus du niveau de la route (1)
	Nombre de chambres à coucher situées au rez-de-chaussée	Aucune (1) / une ou plusieurs (5)
	Type des personnes qui occupent les chambres à coucher	Enfants moins de 10 ans, personnes âgées et individus à mobilité réduite (5) / Adolescents et adultes (3) / Inoccupées (1)
	Existence d'un moyen d'évacuer par les airs depuis l'intérieur de l'habitation	Oui (1) / Non (5)
<u>Sentiment de menace</u>	Présence du bâti dans un point inondable en cas de forte pluie	Oui (5) / Non (1)
<u>Culture de prévention</u>	Adaptation du logement au risque inondation par des aménagements particuliers	Oui (5) / Non (1)
<u>Vulnérabilité structurelle</u>		
<u>Vulnérabilité structurelle interne</u>	Âge du logement	0-10 (1) / 11-20 (2) / 21-30 (3) / 31-40 (4) / plus que 40 (5)

	Nature et état des murs extérieurs	<table border="1"> <tr> <th>Etat \ Nature</th> <th>Bon</th> <th>Plutôt bon</th> <th>Plutôt mauvais</th> <th>Mauvais</th> </tr> <tr> <td>Dur (Pierre, béton, brique...)</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Bois</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Autre</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> </table>	Etat \ Nature	Bon	Plutôt bon	Plutôt mauvais	Mauvais	Dur (Pierre, béton, brique...)	1	2	3	4	Bois	2	3	4	5	Autre	3	4	5	5
		Etat \ Nature	Bon	Plutôt bon	Plutôt mauvais	Mauvais																
		Dur (Pierre, béton, brique...)	1	2	3	4																
		Bois	2	3	4	5																
Autre	3	4	5	5																		
Nombre d'ouvertures pour chaque étage	Pas d'ouverture (5) / < 2 (3) / > 2 (1)																					
Existence d'un mur de clôture extérieur	Non (5) Oui :																					
	<table border="1"> <tr> <th>Etat \ Nature</th> <th>Bon</th> <th>Plutôt bon</th> <th>Plutôt mauvais</th> <th>Mauvais</th> </tr> <tr> <td>Dur (Pierre, béton, brique...)</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Bois</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Autre</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> </table>	Etat \ Nature	Bon	Plutôt bon	Plutôt mauvais	Mauvais	Dur (Pierre, béton, brique...)	1	2	3	4	Bois	2	3	4	5	Autre	3	4	5	5	
	Etat \ Nature	Bon	Plutôt bon	Plutôt mauvais	Mauvais																	
	Dur (Pierre, béton, brique...)	1	2	3	4																	
Bois	2	3	4	5																		
Autre	3	4	5	5																		
Hauteur : < 2 m (5) / > 2m (1)																						
<u>Les réseaux</u>	Branchement du logement à un réseau d'assainissement	Oui (1) / Non (5)																				

	Branchement du logement à un réseau d'eau potable	Oui (1) / Non (5)
	Branchement du logement à un réseau d'électricité	Oui (1) / Non (5)
	Branchement du logement à un réseau d'évacuation des eaux pluviales	Oui (1) / Non (5)
	Hauteur des les prises, du compteur électrique et du disjoncteur au rez-de-chaussée	Moins de 50 cm (5) / 50 à 100 cm (3) / > 100 cm (2)
<u>Vulnérabilité fonctionnelle et/ou institutionnelle</u>		
	Proximité du logement des points de faiblesse au niveau de la digue et des canalisations (Zones d'affaissement, surplomb par rapport à la voirie, accumulation des déchets plastiques ou de produits polluants...)	Oui (5) / Non (1)

Min : 21 / Max : 100 / Intervalles : (16) 21- 36 (1)/ 37- 52 (2)/ 53-68 (3)/ 69-84 (4)/ 85-100 (5)

8-1-6- Capacité d'adaptation

C'est le niveau de ressources et la manière dont les personnes ou les organisations utilisent ces ressources et capacités pour faire face aux conséquences néfastes des catastrophes (UN-ISDR., 2004).

8-2- L'aléa ruissellement

8-2-1- La détermination des coefficients de ruissellement via le modèle S.C.S : « Soil Conservation Service of U.S.A »

8-2-1-1- Présentation du modèle S.C.S

Dans ce travail, nous essayons de déterminer et de spatialiser les coefficients de ruissellement via le modèle de production « S.C.S ». C'est un modèle largement utilisé en hydrologie urbaine, il est développé par le service de conservation des sols des États-Unis et relie la pluie nette (R) à la pluie brute (P), par l'équation :

$$R = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P + 0.8 S}$$

↳ Avec

R = Hauteur de pluie ruisselée (mm)

P = Hauteur de précipitation (mm)

↳ Les paramètres d'ajustement du modèle

I_a = Les pertes intervenant en début d'évènement (par interception), elle est égale à 0.2 S.

S = La capacité maximale de rétention en eau du réservoir sol. Elle est exprimée en (mm) et peut être estimée en appliquant la formule suivante :

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

↳ Où

CN = Le Curve Number du modèle S.C.S. Il peut être déterminé à partir d'un tableau intitulé : « Curve Number » pour plusieurs types de sols et de couvertures végétales. Ce Curve Number (CN) est inversement proportionnel à S (Plus la valeur du CN tend vers 100, plus le sol est imperméable).

↳ Le coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement est défini comme étant le rapport entre la hauteur d'eau ruisselée à la sortie d'une surface considérée, dite « pluie nette (R) », et la hauteur d'eau précipitée, dite « pluie brute (P) ». Ce coefficient s'écrit :

$$Kr(\%) = \frac{R}{P} \times 100$$

8-2-1-2- Les types d'occupation des sols

Nous nous sommes basés sur les règlements de l'urbanisme des communes de Kairouan et de Sidi Bouzid, collectés auprès des municipalités, pour définir les différents types d'occupation des sols et déterminer leurs coefficients de ruissellement.

8-2-1-2-1- Les types d'occupation des sols à la commune de Kairouan

Tab.8.2. Taux moyen d'imperméabilisation pour chaque type d'occupation des sols à la commune de Kairouan

Types d'occupation des sols		Coefficient d'occupation du sol moyen	Superficie (ha)
Zones d'habitat individuel (Médina)		0,7	69,61
Zones d'habitat individuel groupé		0,75	278,39
Zones d'habitat individuel en bande continue		0,6	79,59
Zones d'habitat individuel isolé et jumelé		0,5	76,65
Zones d'habitat collectif isolé		0,4	3,35
Zones polyfonctionnelles continues denses		0,75	44,60
Zones polyfonctionnelles groupées denses		0,7	117,44
Zones polyfonctionnelles groupées assez denses		0,65	43,67
Zones touristiques		0,6	3,75
Zones d'activités industrielles non polluantes		0,5	83,61
Zones d'activités artisanales et de petits métiers		0,5	14,93
Equipements publics		0,4	145,83
Zones vertes équipées		0,05	20,08
Zones vertes aménagées		0,03	1,32
Zones militaires		-	5,45
Cimetières		-	30,09
Emprises et servitudes du D,P,H (Oued El Maleh)		-	85,31
Fonciers non bâtis		-	543,65
Cultures annuelles, friches et/ou pistes		-	821,54
Terres arboricoles		-	17,65
Voirie	Route nationale	-	488,20
	Route régionale	-	
	Route locale	-	

Zones d'habitat individuel (Médina)

Il s'agit du centre ville historique (Médina et ses faubourgs), inscrit sur la liste du patrimoine mondial depuis 1988 à vocation principalement résidentielle sous forme des maisons à patio, des commerces de proximité permettant aux habitants de s'approvisionner. Elle comprend également des ateliers d'artisanat traditionnel, des magasins de commerce et des locaux de services. Elle couvre une superficie de 69,61 ha. Le coefficient d'occupation du sol maximum est fixé à 0,70 et la hauteur maximale est fixée à 8 m, soit R+1, y compris cage d'escaliers.

A l'intérieur des **remparts (I)** qui entourent la médina de Kairouan, on observe différents catégories d'habitats :

- ↳ Des habitats anciens **(II)** datant des débuts de XXème siècle.

- ↪ Des habitats récents (III) dont l'âge ne dépasse pas quelques décennies.
- ↪ Des habitats menacés par l'effondrement (IV).

La catégorie dominante est celle des habitats anciens et des monuments historiques tels que la Grande Mosquée qui date de l'année 836.

La médina de Kairouan	
 <p style="text-align: center;">I</p>	 <p style="text-align: center;">II</p>
 <p style="text-align: center;">III</p>	 <p style="text-align: center;">IV</p> <p style="text-align: center;">Clichés Nasrallah W, le 27/03/2018</p>

Zones d'habitat individuel isolé et jumelé

Il s'agit des zones résidentielles, d'habitat individuel de faible densité, de type généralement isolé ou jumelé et où pourront être autorisés des opérations d'ensemble et des équipements socio collectifs de proximité. Ces zones d'habitat couvrent une superficie de 76,65 ha et sont observables essentiellement au niveau de cité Echbilia, cité Dar El Amen, cités Essahbi 1 et 2 et El Mansourah Sud. Le coefficient d'occupation du sol maximum est fixé à 0,5 et la hauteur maximale des constructions est fixée à 12 m, soit R+2.

Zones d'habitat individuel en bande continue

Il s'agit des zones résidentielles, d'habitat individuel de moyenne densité de 30 à 40 logements à l'hectare, de type généralement en bande continue, avec quelques constructions de type individuel isolé ou jumelé et où pourront être également autorisés des équipements socio collectifs de proximité et des opérations d'ensemble. Ce type d'habitat s'étend sur environ 79,59 ha et il est observable à cité Ennasr 2, cité Wassila Hammami et cité Essahbi 1. Le coefficient d'occupation du sol maximum est fixé à 0,6 et la hauteur maximale des constructions est fixée à 12 m, soit R+2.

Zones d'habitat individuel groupé

Il s'agit des zones résidentielles, d'habitat individuel d'assez forte densité de 40 à 60 logements à l'hectare, obéissant généralement à l'ordre groupé avec quelques constructions de type isolé, jumelé ou en bande continue et où pourront être également autorisés des équipements socio collectifs de proximité et des opérations d'ensemble. Ces zones d'habitat individuel groupé s'étalent sur une superficie de 278,39 ha. Elles sont observables un peu partout dans la ville de Kairouan, essentiellement au niveau de cité El Menchia, cités Ennasr 1 et 2, cité Okba, cité Ettaamir et El Mansourah Nord. Le coefficient d'occupation du sol maximum est fixé à 0,75 et la hauteur maximale des constructions est fixée à 12 m, soit R+2. Pour les opérations d'ensemble, la hauteur maximale mesurée au point le plus haut de l'acrotère pourrait atteindre 18 m, soit R+4.

Zones d'habitat collectif isolé

Ce type d'habitat est caractéristique de cité Ennasr 2 et cité Ettaamir. Il s'agit d'une zone urbaine de 50 logements à l'hectare, d'habitat collectif du type isolé, intégrant quelques équipements socio collectifs. Le coefficient d'occupation du sol maximum est fixé à 0,4 et la hauteur maximale des constructions est fixée à 18 m, soit R+4. Sa superficie est d'environ 3,35 ha.

Zones polyfonctionnelles

Il s'agit des zones constituées d'habitat, de commerces et de services. Le coefficient d'occupation du sol maximum est fixé à 0,75.

*** Zones polyfonctionnelles groupées assez denses**

Il s'agit de zones assez denses où le tissu urbain correspondant est de type traditionnel d'ordre groupé dont la hauteur ne doit pas dépasser 15 m, soit R+3. Ce type des zones polyfonctionnelles se situe essentiellement au nord de la Médina au niveau de cité Ajinna couvrant une superficie de 43,67 ha.

*** Zones polyfonctionnelles groupées denses**

Il s'agit de zones historiques denses où le tissu urbain correspondant est de type traditionnel d'ordre groupé dont la hauteur ne doit pas dépasser 18 m, soit R+4. Couvrant une superficie de 117,44 ha ces zones se situent au centre de la commune de Kairouan au niveau de cité Sidi Aissa, cité Kebliia Sud, cité Sidi Saad et cité Ejabalia.

*** Zones polyfonctionnelles continues denses**

Il s'agit de zones polyfonctionnelles assez denses qui comprennent les axes structurants situés essentiellement à l'Est de la ville de Kairouan comme Avenue Beit El Hekma à El Mansourah Nord. Sa superficie est d'environ 44,60 ha.

Zones d'activités artisanales et de petits métiers

Il s'agit de zones réservées exclusivement aux activités artisanales et de petits métiers non polluants qui s'étalent sur une superficie de 14,93 ha au niveau du quartier Jardin. Le coefficient d'occupation du sol maximum est fixé à 0,5 et la hauteur maximale des constructions est fixée à 12 m, soit R+2.

Zones d'activités industrielles non polluantes

Il s'agit de zones réservées aux activités industrielles non polluantes ainsi qu'aux activités artisanales et aux petits métiers. À la commune de Kairouan, ces zones couvrent une superficie de 83,61 ha. Elles se localisent essentiellement au niveau de la zone industrielle et à quartier d'El Mansourah. Le coefficient d'occupation du sol maximum est fixé à 0,5 et la hauteur maximale des constructions est fixée à 12 m, soit R+2.

Zones touristiques

Il s'agit d'une zone touristique destinée à recevoir de l'hébergement hôtelier et des aires d'animation qui s'étale sur une superficie de 3,75 ha au niveau du quartier Jardin. Le coefficient d'occupation du sol maximum est fixé à 0,6 et la hauteur maximale des constructions est fixée à 12 m, soit R+2.

Equipements publics

Il s'agit des emplacements réservés aux équipements à caractère administratif, culturel, éducatif, sanitaire... Couvrant une superficie de 145,83 ha ces équipements publics se situent à la partie ouest de la ville de Kairouan au niveau de quartier Dar El Amen, quartier Ennasr Sud et quartier El Mansourah Nord. Le coefficient d'occupation du sol maximum est fixé à 0,4.

Les zones vertes aménagées

Les zones vertes aménagées sont essentiellement réservées à des espaces libres aménagés en verdure, et ouverts en permanence ou périodiquement au public. Elles regroupent les zones d'espaces verts publics qui s'étalent sur environ 1,32 ha et les cimetières qui couvrent une superficie de 30,09 ha... Le coefficient d'occupation du sol ne peut en aucun cas dépasser 0,03 et pour toute nouvelle construction, la hauteur ne doit pas dépasser 4 m et exceptionnellement 5m.

Les zones vertes équipées

Couvrant une superficie de 20,08 ha ces zones vertes naturelles sont destinées à être aménagées en parc urbain et zone verte équipée qui peuvent recevoir des équipements sportifs, d'animation de loisirs. Le coefficient d'occupation du sol maximum est de à 0,05. La hauteur maximale des constructions ne doit pas excéder 5m.

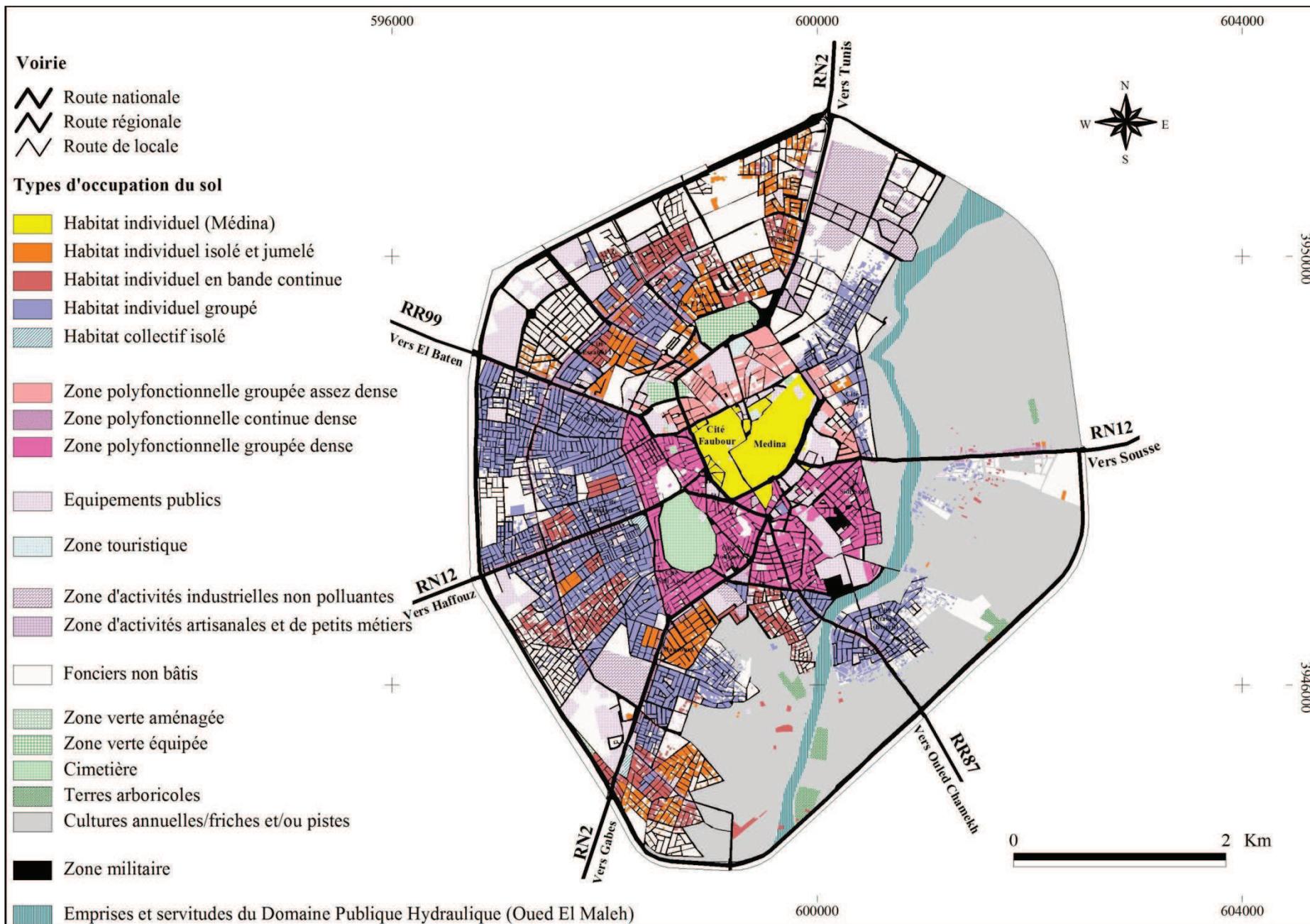


Figure 8.2: Typologie d'occupation du sol dans la ville de Kairouan : Situation 2015 (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019 ; d'après plan d'aménagement urbain de la commune de Kairouan à l'échelle 1/5000 datant de 2010 (Mise à jour : Extraits « Google Earth » de 2015)).

Les zones militaires

Il s'agit des zones réservées aux bâtiments et installations militaires s'étalant sur environ 5,45 ha.

8-2-1-2-2- Les types d'occupation des sols à la commune de Sidi Bouzid

Tab.8.3. Taux moyen d'imperméabilisation pour chaque type d'occupation des sols à la commune de Sidi Bouzid

Types d'occupation des sols		Coefficient d'occupation du sol moyen	Superficie (ha)
Zone de centralité : la partie la plus ancienne de la ville		0,75	27,62
Zones d'habitat populaire (S.N.I.T)	Zones d'habitat individuel groupé	0,75	30,67
Zones d'habitat planifié (A.F.H)	Zones d'habitat individuel isolé	0,33	53,94
Quartiers périphériques	Zones d'habitat individuel en bande continue	0,6	301,96
	Zones d'habitat individuel en bande isolée dense	0,5	
	Zones d'habitat individuel groupé	0,75	
	Zones d'habitat collectif isolé	0,45	
	Zones d'habitat collectif continu	1	
Zones d'activités	Industrie manufacturière	0,5	34,13
	Zones d'activités artisanales et de petits métiers	1	
Zones civiques	Equipements publics	0,4	95,27
Zones vertes	Zones vertes équipées	0,03	10,70
	Zones vertes aménagées	0,03	
		Cimetière	0,03
Canal Fellet Gualla		-	24,32
Fonciers non bâtis		-	197,42
Cultures annuelles, friches et/ou pistes		-	122,02
Zone agricole (Zone agricole d'interdiction, Zone agricole de sauvegarde, autre zone agricole...)		-	141,93
Voirie	Route régionale	-	96,55
	Route locale	-	

Zone de centralité

Il s'agit d'une zone urbaine à caractère central d'habitats anciens et d'activités où les bâtiments sont construits en ordre continu. Elle correspond à la partie la plus ancienne de la

ville couvrant une superficie de 27,62 ha. Le coefficient d'occupation du sol ne doit pas dépasser 0,75 et la hauteur maximale des constructions est fixée à 11 m, soit R+2.

Zones d'habitat populaire (S.N.I.T) : Zones d'habitat individuel groupé

Il s'agit d'une zone d'habitat groupé, correspond essentiellement à 2 formes d'habitat: habitat désorganisé et habitat organisé. Ces zones d'habitat s'étalent sur environ 30,67 ha et elles sont observables au niveau de cité El Hadayek et quartier El Filahi. Le coefficient d'occupation du sol ne doit pas dépasser 0,75 et la hauteur maximale des constructions est fixée à 8 m, soit R+1.

Zones d'habitat planifié (A.F.H) : Zones d'habitat individuel isolé

Il s'agit d'une zone urbaine de faible densité, fixée à 20 logements à l'hectare minimum, comprenant des logements en habitat individuel du type villas isolées et jumelées. Ce type d'habitat se situe à la partie ouest de la ville de Sidi Bouzid sur une superficie de l'ordre de 53,94 ha, au niveau de cité Raouebi, Brahmia, cité El Kawefel et cité l'Avenir. Le coefficient d'occupation du sol est fixé à 0,33 et la hauteur maximale des constructions est fixée à 8 m, soit R+1.

Quartiers périphériques :

Ils se localisent à la périphérie de centre ville de Sidi Bouzid couvrant une superficie de 301,96 ha et regroupant plusieurs types d'habitat, tels que :

*** Zones d'habitat individuel**

Il s'agit des zones d'habitat individuel édifié en: habitations en bandes continues et habitations individuelles isolées denses, présentant un retrait sur les 3 limites de voisins et ne présentant pas de retrait par rapport à la voirie. La densité résidentielle est de 50 logements à l'hectare. Pour les constructions de la bande continue, l'occupation au sol varie entre 50 et 70% alors qu'il est de l'ordre de 50% pour les constructions individuelles du type dense. La hauteur maximale des constructions est fixée à 11 m, soit R+2.

*** Zones d'habitat individuel groupé**

*** Zones d'habitat collectif isolé**

Il s'agit d'une zone à caractère d'habitat collectif, de service où les constructions sont formées d'immeubles isolés comportant plusieurs niveaux. Le coefficient d'occupation du sol ne pourra excéder 0,45 et la hauteur maximale des constructions est fixée à 17 m, soit R+4.

*** Zones d'habitat collectif continu**

Il s'agit d'une zone à caractère d'habitat collectif qui intègre des activités et des équipements, constituée: Des constructions de plusieurs niveaux, accolées les unes aux autres sur les limites séparatives latérales. Le rez-de-chaussée étant réservé aux activités commerciales et services. Ces zones sont localisées principalement le long de l'axe de la ville RR125. Le coefficient d'occupation du sol pourra atteindre 1 et la hauteur maximale des constructions est fixée à 17 m, soit R+4.

Zones d'activités :

Ce type regroupe les zones d'activités industrielles, artisanales et de petits métiers. Ces zones d'activités s'étalent sur une superficie de 34,13 ha essentiellement au niveau de la zone industrielle et cité El Khadra :

*** Industrie manufacturière**

Il s'agit d'une zone urbaine, destinée à recevoir des établissements industriels techniques à l'exclusion de l'habitat. Le coefficient d'occupation du sol est fixé à 0,4 et pourra atteindre 0,5. La hauteur maximale des constructions n'excède pas les 15 m.

*** Zones d'activités artisanales et de petits métiers**

Il s'agit d'une zone urbaine d'activité, destinée à recevoir les petits métiers et des activités du type artisanal. Le coefficient d'occupation du sol pourra atteindre 1 et la hauteur maximale des constructions est fixée à R+1.

Zones civiques : Equipements publics

Il s'agit des zones réservées à l'implantation des équipements publics de toutes natures: équipements d'enseignements, de santé, de loisir, administratif, de culture, de culte, sportifs, de jeunesse, de commerce, rendus nécessaires pour la vie en collectivité. Ces équipements relèvent en général d'une autorité administrative. Elles sont observables un peu par tout dans la commune de Sidi Bouzid, essentiellement au niveau de cité Yassminet, El Wouroud et le centre ville. Ces équipements publics s'étalent sur environ 95,27 ha.

Zones vertes :

L'appellation de la zone verte regroupe les zones vertes autres qu'agricoles réservées à des espaces libres et ouverts en permanence ou périodiquement au public. La superficie globale de ces zones vertes est de l'ordre de 13,73 ha. Le coefficient d'occupation du sol est fixé à 0,03 et la hauteur maximale est d'environ 3,5 m. Ces zones se différencient selon les affectations particulières en:

* **Zones vertes équipées** : terrains de jeux

* **Zones vertes aménagées** : parc, jardins publics, square

* **Cimetières musulmanes**

8-2-1-3- Le calcul des coefficients de ruissellement

Pour calculer les coefficients de ruissellement il faut tout d'abord déterminer les « Curve Number » proportionnels à chaque type d'occupation du sol. Nous nous sommes basés donc sur les coefficients d'occupation du sol extraits des règlements de l'urbanisme pour attribuer à chaque type d'occupation du sol le « Curve Number » convenable, (**Tab.8.4**). Il est à noter que selon le modèle S.C.S la valeur de « Curve Number » est modifiable ce qui permet de diminuer ou d'augmenter le coefficient de ruissellement.

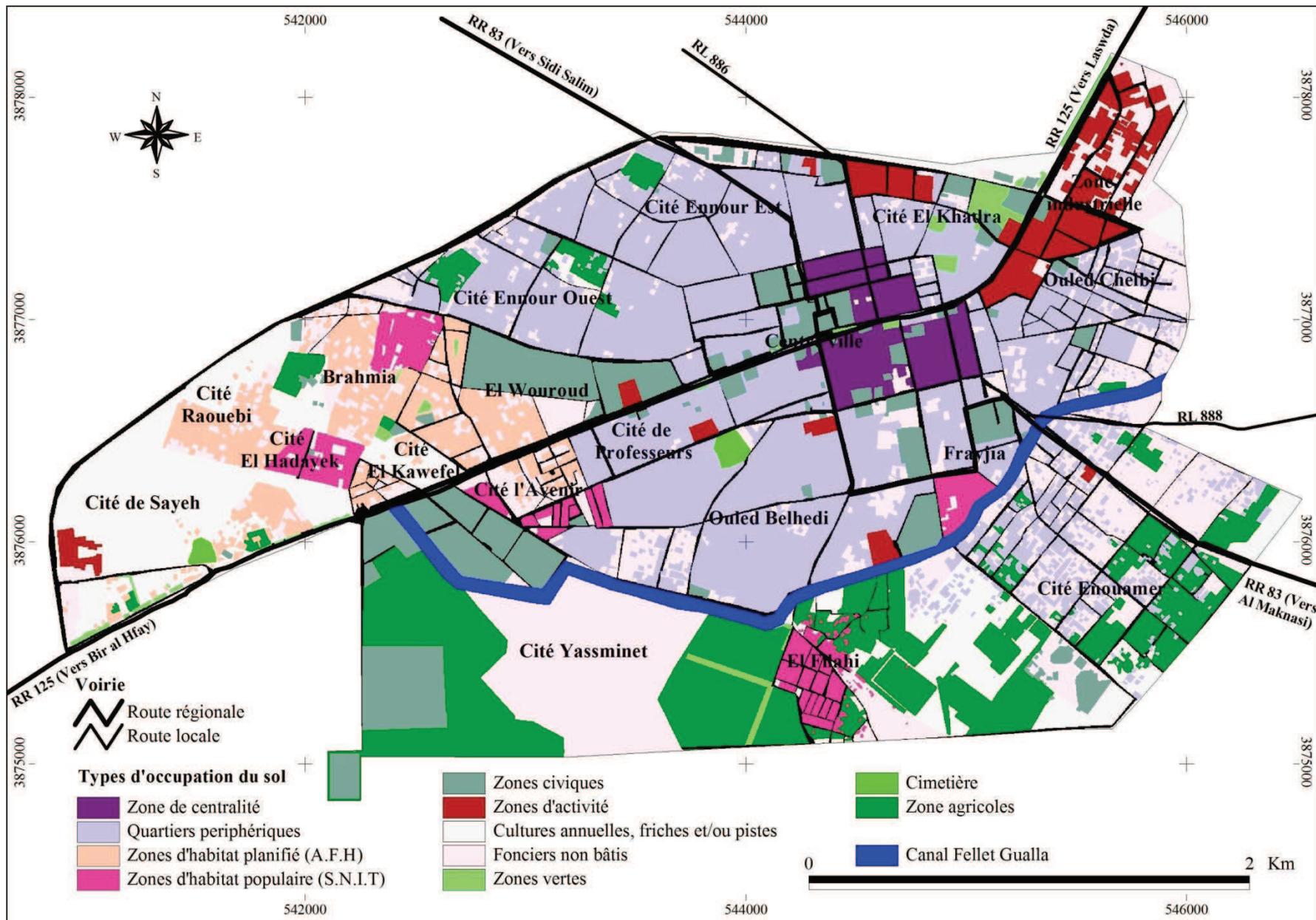


Figure 8.3: Typologie d'occupation du sol dans la ville de Sidi Bouzid : Situation 2014 (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019 ; d'après plan d'aménagement urbain de la commune de Sidi Bouzid à l'échelle 1/2000 datant de 2002 (Mise à jour : Extraits « Google Earth » de 2014)).

Tab.8.4. « Curve Number » pour plusieurs types des sols et couvertures végétales « AMC II »

(Mejebri., 2010 ; Modifié)

Description de l'occupation du sol		Types d'occupation des sols ayant le même « Curve Number »	Types de sols hydrologiques			
			A	B	C	D
❖ <u>Sol cultivé</u>	• Sans traitements de CES.	• Emprises et servitudes du Domaine Public Hydraulique (Oued El Maleh).	72	81	88	91
		• Zone de servitude : Domaine Hydraulique (Canal Fellet Gualla).				
❖ <u>Pâturage ou parcours</u>	• Dans les bonnes conditions.	• Zones vertes aménagées. • Zones vertes équipées.	39	61	74	80
❖ <u>Forêts</u>	• Bonne couverture.	• Fonciers non bâtis.	25	55	70	77
	• Mauvaise couverture.	• Terres arboricoles. • Zone agricoles.	45	66	77	83
❖ <u>Espaces ouverts</u> : Parcs, cimetières, etc...	• Bonnes conditions : Couverture de 75% ou plus de la surface.	• Cimetière.	39	61	74	80
❖ <u>Zones industrielles</u> (72% imperméables).		• Zones polyfonctionnelles continues denses. • Zones polyfonctionnelles groupées denses. • Zones militaires.	81	88	91	93
❖ <u>Résidentielle</u> : Imperméabilité moyenne :	65%	• Zones polyfonctionnelles groupées assez denses. • Zones d'activités industrielles non polluantes. • Zones d'activités artisanales et de petits métiers. • Zones d'activité: Activités artisanales et petits métiers, industriels manufacturières, stockage et dépôts).	77	85	90	92
	33%	• Zones d'habitat collectif isolé. • Equipements publics. • Zones d'habitat planifié (A.F.H) : Habitat individuel isolé. • Zones civiques : Education, santé, administration, commerce, culte, culture, divers, formation professionnelle, jeunesse et enfance, justice, sécurité, social, sport.	61	75	83	87
❖ <u>Pistes et routes</u>	• Goudronnées avec réseau d'assainissement.	• Route nationale. • Route régionale. • Route locale.	98	98	98	98
	• Poussiéreuses.	• Cultures annuelles, friches et/ou pistes.	72	82	87	89
❖ <u>Surfaces urbanisées</u>	• Forte densité (50 à 75% de surfaces imperméables).	• Zones d'habitat individuel (Médina). • Zones d'habitat individuel isolé et jumelé. • Zones d'habitat individuel en bande continue. • Zones d'habitat individuel groupé. • Zones touristiques. • Quartiers périphériques: Habitat collectif isolé, habitat collectif continu, habitat individuel en bande, habitat individuel groupé. • Zone de centralité. • Zones d'habitat populaire (S.N.I.T) : Habitat individuel groupé.	75	82	88	90

En effet la méthodologie consiste à calculer le cumul pluviométrique des 5 jours précédents l'évènement pluvieux le plus extrême. Il s'agit de l'évènement de 05/12/1973 à Kairouan et de 22/01/1990 à Sidi Bouzid.

* Si le cumul pluviométrique est inférieur à $P5j_précéd < 95^{ème}$ percentile (valeur de la pluie intense), on doit diminuer la valeur du Curve Number en utilisant la formule suivante :

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)}$$

* Si le cumul pluviométrique est compris entre les valeurs de la pluie intense et la pluie extrême : $95^{ème}$ percentile $< P5j_précéd < 99^{ème}$ percentile, on utilise les valeurs standards du Curve Number (CN2) extraits du tableau ci-dessous.

* Si le cumul pluviométrique est supérieur à $P5j_précéd > 99^{ème}$ percentile (valeur de la pluie extrême), on doit augmenter la valeur du Curve Number et par conséquent une augmentation du coefficient du ruissellement. La formule utilisée est la suivante :

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)}$$

Les évènements pluvieux choisis sont produits en hiver. Pour cela, nous avons calculé les valeurs des pluies intenses et extrêmes (en 24 h) pendant la saison d'hiver pour les deux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid, (**Tab.8.5**). Les résultats ont montré que les valeurs des pluies intenses sont d'environ 19,3 et 28,21 mm pour les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid alors que celles des pluies extrêmes sont respectivement de l'ordre de 43,97 et 61,4 mm.

Tab.8.5. Détermination du type de conditions antécédentes de précipitation en hiver

Type	Description en hiver	Précipitation les 5 jours précédents (mm)		
		Seuils	Kairouan	Sidi Bouzid
AMCI	Conditions optimales du sol	$< 95^{\circ}$	$< 19,30$	$< 28,21$
AMC II	Conditions moyenne de la crue annuelle	$95^{\circ} < P < 99^{\circ}$	$19,30 < P < 43,97$	$28,21 < P < 61,40$
AMC III	Pluie abondant ou faible pluie et faible température les 5 jours précédents	$> 99^{\circ}$	$> 43,97$	$> 61,40$

95° percentile = Pluie intense

99° percentile = Pluie extrême

L'analyse de (**Tab.8.6**), laisse voir que le cumul pluviométrique des 5 jours précédents l'évènement pluvieux de 05 décembre 1973 à Kairouan est d'environ 27,8 mm. Cette valeur est comprise entre les valeurs de la pluie intense et la pluie extrême soit $19,30 < P < 43,97$ mm. Dans ce cas on utilise donc les valeurs standards du Curve Number (CN2). À Sidi Bouzid, le cumul pluviométrique des 5 jours précédents l'évènement pluvieux de 22 janvier 1990 est supérieur à la valeur de pluie extrême. On doit donc augmenter le coefficient du ruissellement en utilisant les valeurs de Curve Number (CN3).

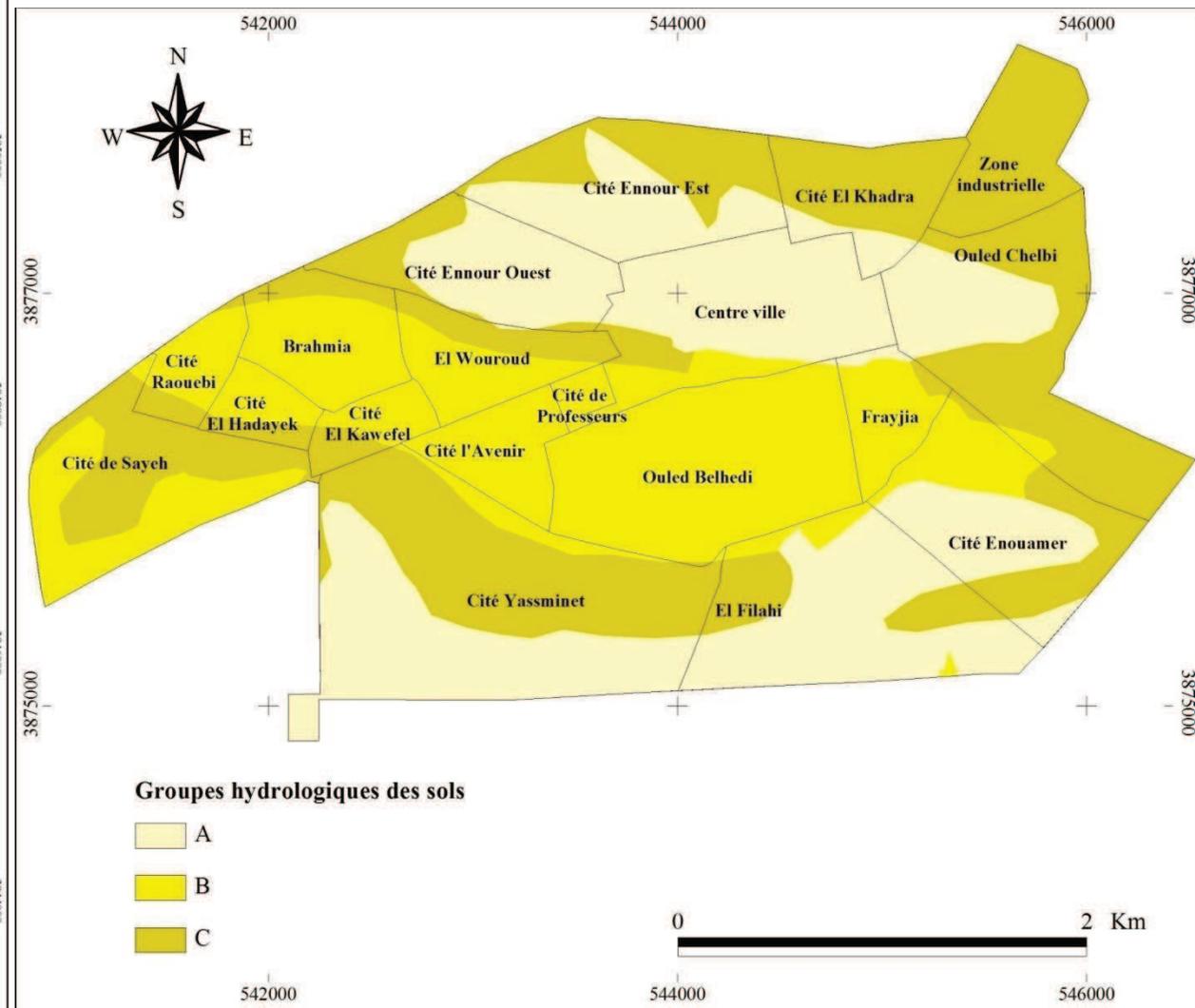
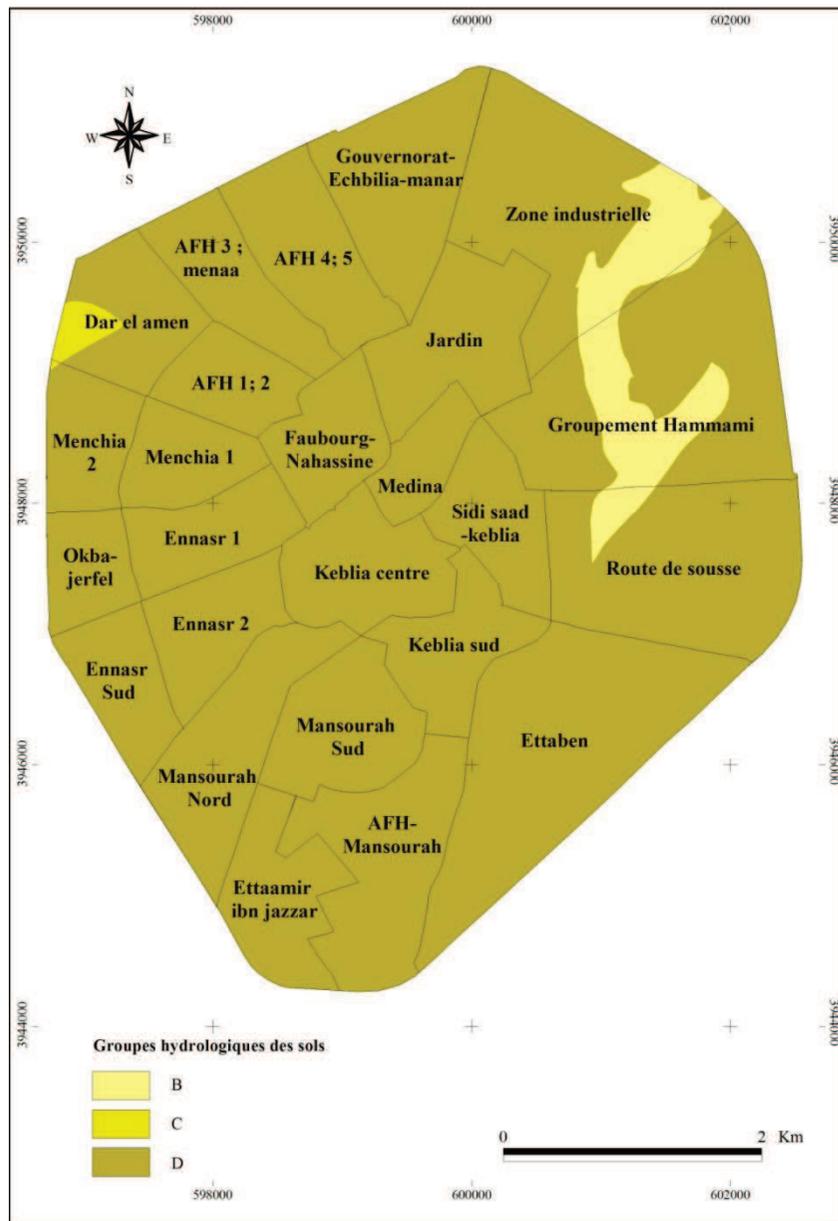


Figure 8.4: Groupes hydrologiques des sols dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019 ; d'après cartes agricoles de Kairouan et de Sidi Bouzid).

Tab.8.6. Le cumul pluviométrique des 5 jours précédents l'évènement pluvieux le plus extrême à Kairouan et à Sidi Bouzid

Saison d'hiver			
Kairouan		Sidi Bouzid	
Date	Pluie brute (mm)	Date	Pluie brute (mm)
05-12-1973	82,7	22-01-1990	118,9
Date	P (mm)	Date	P (mm)
30-11-1973	0	17-01-1990	1,8
01-12-1973	0	18-01-1990	0
02-12-1973	0	19-01-1990	0
03-12-1973	0,1	20-01-1990	0
04-12-1973	27,7	21-01-1990	78,3
P5j_précéd	27,8	P5j_précéd	80,1
Groupe	AMC II	Groupe	AMC III

P5j_précéd = Précipitation des 5 jours précédents

AMC = Antecedent Moisture classes (Les classes de l'humidité antérieure des sols)

Il est à noter que la méthodologie suivie pour déterminer les groupes hydrologiques des sols est la même utilisée pour définir les différents niveaux du potentiel de ruissellement superficiel présenté dans la première partie de la thèse. L'examen des cartes (**Fig.8.4**) et du tableau ci-dessous permet de constater la prédominance du groupe hydrologique du sol, de forte imperméabilité, D pour Kairouan couvrant 94,62 % de la superficie totale de la ville. À Sidi Bouzid, on remarque une répartition quasi égale de la superficie de la ville entre les trois types hydrologiques des sols qui y existent à savoir le A, le B et le C.

Tab.8.7. Répartition surfacique des groupes hydrologiques des sols dans les villes de Kairouan (1) et de Sidi Bouzid (2)

	Potentiel de ruissellement superficiel	Groupes de sols	Superficie 1 en (Km²)	(%)	Superficie 2 en (Km²)	(%)
	Faible	A	-	-	390,51	34,27
	Moyen	B	145,30	4,88	340,46	29,88
	Fort	C	14,88	0,5	408,59	35,85
	Très fort	D	2814,53	94,62	-	-

Tab.8.8. Les coefficients de ruissellements pour chaque type d'occupation selon les groupes hydrologiques du sol à la ville de Kairouan

Types d'occupation	CN II			R2 (mm)			Kr2 (%)		
	B	C	D	B	C	D	B	C	D
Zones d'habitat individuel (Médina)	-	-	90	-	-	56,4	-	-	68,2
Zones d'habitat individuel groupé	82	-	90	40,21	-	56,4	48,62	-	68,2
Zones d'habitat individuel en bande continue	82	-	90	40,21	-	56,4	48,62	-	68,2
Zones d'habitat individuel isolé et jumelé	-	-	90	-	-	56,4	-	-	68,2
Zones d'habitat collectif isolé	-	-	87	-	-	49,9	-	-	60,34
Zones polyfonctionnelles continues denses	88	-	93	52	-	63,49	62,88	-	76,77
Zones polyfonctionnelles groupées denses	-	-	93	-	-	63,49	-	-	76,77
Zones polyfonctionnelles groupées assez denses	-	-	92	-	-	61,05	-	-	73,82
Zones touristiques	-	-	90	-	-	56,4	-	-	68,2
Zones d'activités industrielles non polluantes	-	-	92	-	-	61,05	-	-	73,82
Zones d'activités artisanales et de petits métiers	85	-	92	45,86	-	61,05	55,45	-	73,82
Equipements publics	75	83	87	28,75	42,04	49,9	34,76	50,83	60,34
Zones vertes équipées	-	-	80	-	-	36,7	-	-	44,38
Zones vertes aménagées	-	-	80	-	-	36,7	-	-	44,38
Zones militaires	-	-	93	-	-	63,49	-	-	76,77
Cimetières	-	-	80	-	-	36,7	-	-	44,38
Emprises et servitudes du D.P.H (Oued El Maleh)	81	-	91	38,43	-	58,69	46,47	-	70,97
Fonciers non bâtis	55	70	77	6,8	21,86	31,8	8,22	26,43	38,45
Cultures annuelles, friches et/ou pistes	82	-	89	40,21	-	54,17	48,62	-	65,5
Terres arboricoles	-	-	83	-	-	42,04	-	-	50,83
Route nationale	98	98	98	76,79	76,79	76,79	92,85	92,85	92,85
Route régionale	98	98	98	76,79	76,79	76,79	92,85	92,85	92,85
Route locale	98	98	98	76,79	76,79	76,79	92,85	92,85	92,85

R (mm) = Lamme d'eau écoulee selon le groupe hydrologique du sol

Kr (%) = Coefficient du ruissellement selon le groupe hydrologique du sol

Le calcul des « Curve Number » et la détermination des groupes hydrologiques des sols nous a facilité le calcul des coefficients de ruissellement et des hauteurs de l'eau ruisselée proportionnels à chaque type d'occupation des sols, (**Tab. 8.8 et 8.9**).

Tab.8.9. Les coefficients de ruissellements pour chaque type d'occupation selon les groupes hydrologiques du sol à la ville de Sidi Bouzid

Types d'occupation	CNIII			R3 (mm)			Kr3 (%)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Zones de centralité	87	91	-	83,01	93,3	-	69,81	78,47	-
Zones d'habitat planifié (A.F.H)	-	87	92	-	83,01	95,96	-	69,81	80,71
Zones d'habitat populaire (S.N.I.T)	87	91	94	83,01	93,3	101,44	69,81	78,47	85,32
Quartiers périphériques	87	91	94	83,01	93,3	101,44	69,81	78,47	85,32
Zones civiques	78	87	92	62,06	83,01	95,96	52,2	69,81	80,71
Zones d'activité	89	93	95	88,07	98,68	104,24	74,07	82,99	87,67
Fonciers non bâtis	43	74	84	6,85	53,66	75,7	5,76	45,13	63,67
Zones vertes	60	78	87	28,43	62,06	83,01	23,91	52,2	69,81
Cimetières	-	78	-	-	62,06	-	-	52,2	-
Zone agricoles	65	82	89	36,71	71	88,07	30,87	59,71	74,04
Cultures annuelles, friches et/ou pistes	86	91	94	80,53	93,3	101,44	67,73	78,47	85,32
Zone de servitude : Domaine Hydraulique (Canal Fellet Gualla)	86	91	94	80,53	93,3	101,44	67,73	78,47	85,32
Route nationale	99	99	99	115,87	115,87	115,87	97,45	97,45	97,45
Route régionale	99	99	99	115,87	115,87	115,87	97,45	97,45	97,45
Route locale	99	99	99	115,87	115,87	115,87	97,45	97,45	97,45

R (mm) = Lame d'eau écoulée selon le groupe hydrologique du sol

Kr (%) = Coefficient du ruissellement selon le groupe hydrologique du sol

Le coefficient de ruissellement est proportionnel au coefficient d'occupation des sols et à l'imperméabilité des surfaces. En effet, à chaque fois que ces derniers sont élevés le coefficient de ruissellement est important. L'analyse de la répartition spatiale des coefficients de ruissellement (**Fig.8.5 et 8.6**) et du (**Tab.8.10**), laisse voir la prédominance du potentiel de ruissellement fort qui couvre plus que la moitié de la surface des villes de Kairouan et de Sidi Bouzid. Les coefficients très forts variant de 80% à 100% caractérisent les routes et sont

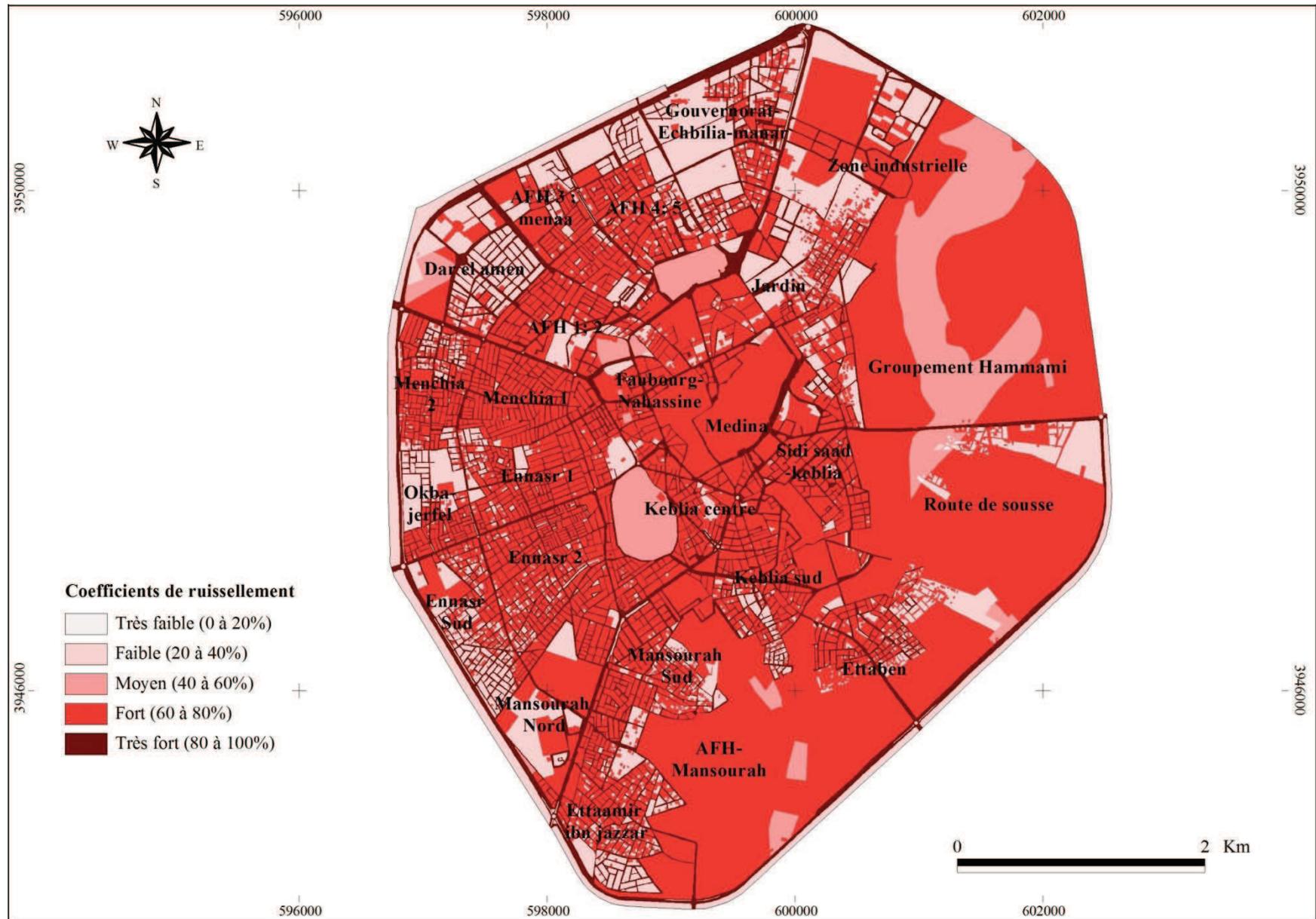


Figure 8.5: Les coefficients du ruissellement dans la ville de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019 ; d’après plan d’aménagement urbain de la commune de Kairouan à l’échelle 1/5000 datant de 2010 (Mise à jour : Extraits « Google Earth » de 2015)).

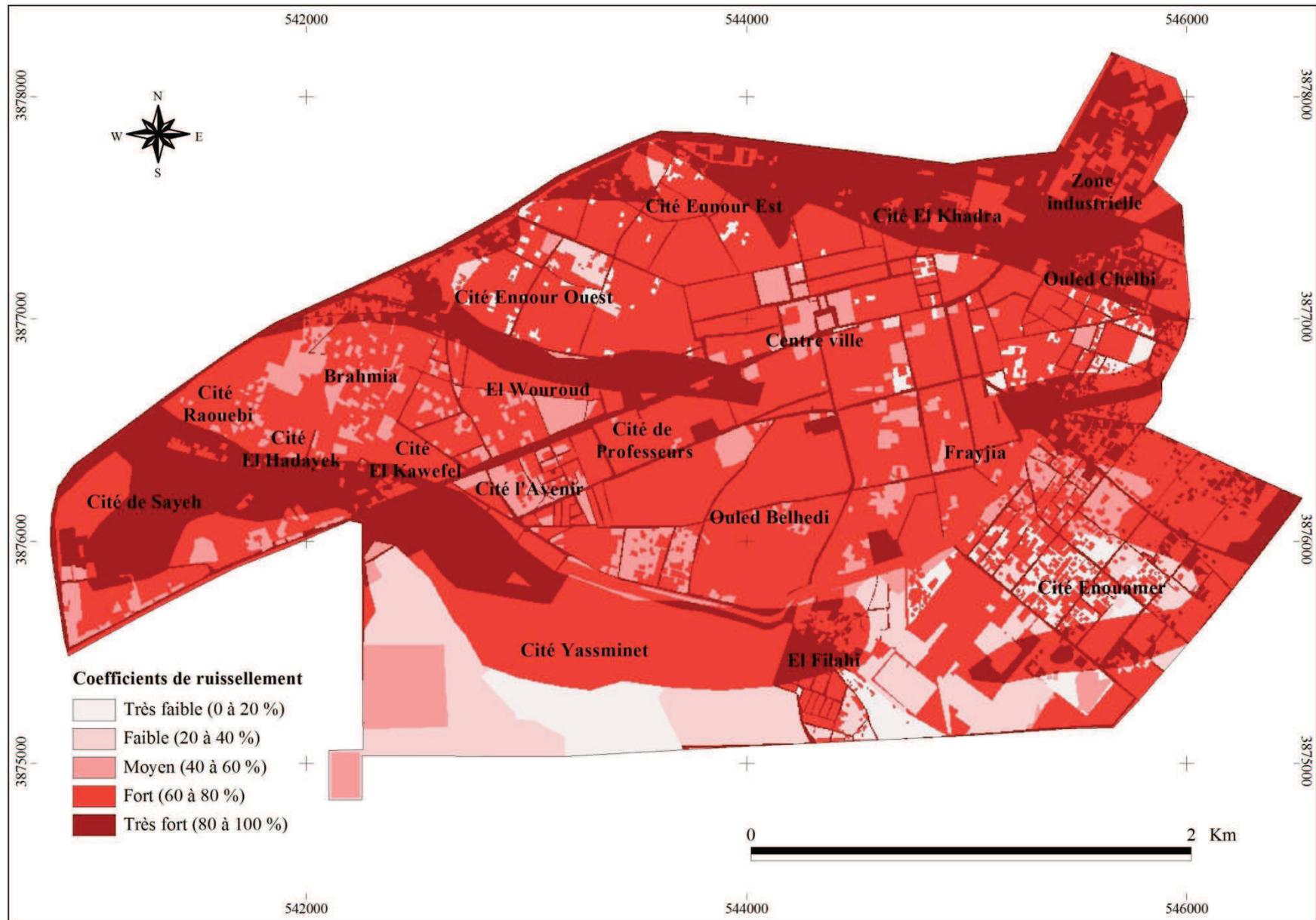


Figure 8.6: Les coefficients du ruissellement dans la ville de Sidi Bouzid (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019 ; d'après plan d'aménagement urbain de la commune de Sidi Bouzid à l'échelle 1/2000 datant de 2002 (Mise à jour : Extraits « Google Earth » de 2014)).

observables aussi au niveau de cité El Khadra, la zone industrielle, Ouled Chelbi, cité de Sayeh et El Filahi à la commune de Sidi Bouzid.

Tab.8.10. Répartition surfacique des coefficients du ruissellement dans les villes de Kairouan (1) et de Sidi Bouzid (2)

Classes	Intervalles (%)	Superficie 1 en (ha)	%	Superficie 2 en (ha)	%
Très Faible	0 - 20	0,65	0,02	49,84	4,37
Faible	20 - 40	543,35	18,27	89,07	7,82
Moyen	40 - 60	220,22	7,4	94,07	8,26
Fort	60 - 80	1722,34	57,9	591,26	51,88
Très fort	80 - 100	488,15	16,41	315,32	27,67
Total	-	2974,71	100	1139,56	100

8-2-2- La spatialisation de l'inondabilité des surfaces

8-2-2-1- La lame d'eau ruisselée

L'hauteur de l'eau ruisselée (R) est un facteur important pour déterminer l'inondabilité des surfaces. À ce stade, sa valeur varie uniquement en fonction de l'imperméabilité des surfaces. Pour le calcul de (R) nous nous sommes basés sur le cumul pluviométrique maximum journalier enregistré le 05/12/1973 à Kairouan et le 22/01/1990 à Sidi Bouzid. Il est respectivement de l'ordre de 82,7 et 118,9 mm. Les hauteurs les plus élevées sont observables au niveau des quartiers Keblia centre, Keblia sud et Sidi saâd keblia à Kairouan et au niveau des quartiers d'El Khadra, la zone industrielle, Ouled Chelbi, cité de Sayeh et El Filahi à Sidi Bouzid, (Fig.8.8 et 8.9).

8-2-2-2- Les pentes

La méthodologie consiste à utiliser les points cotés (Fig.8.7 et 8.10) extraits du Google Earth via le logiciel « GPS Visualizer ». Ce logiciel permet de transformer un fichier

Fig.8.7. Les points cotés couvrant la commune de Kairouan

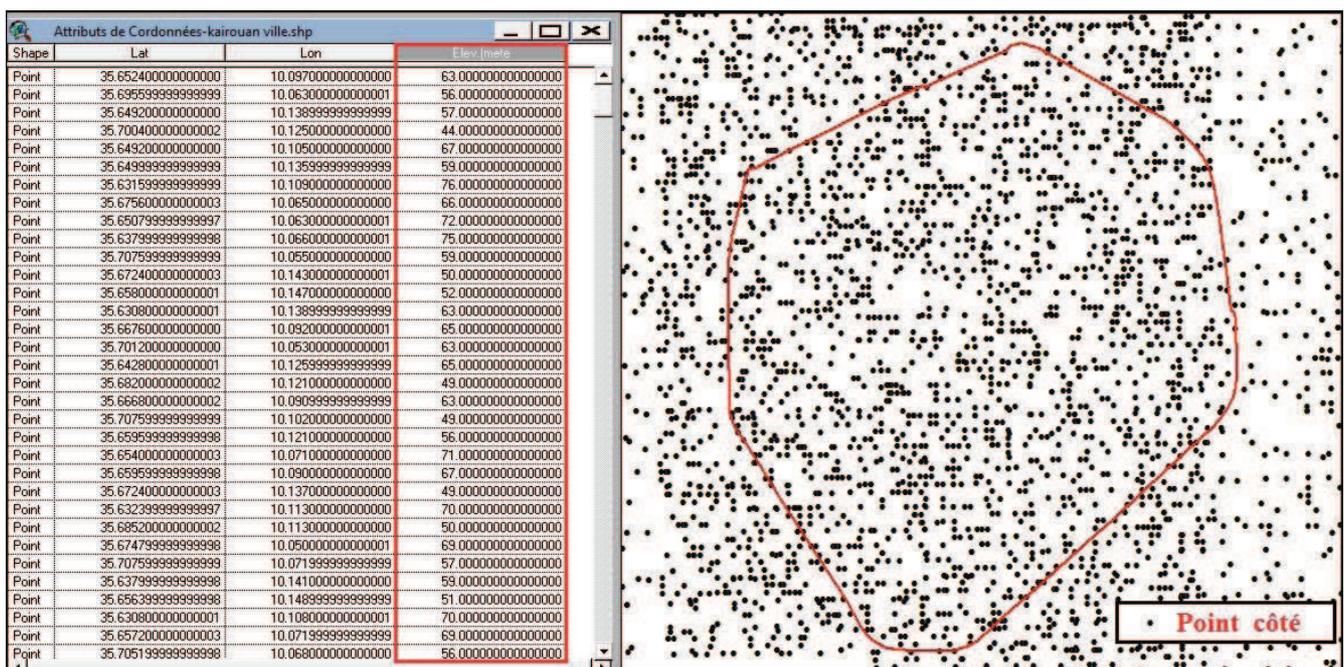




Figure 8.8: Hauteur de l'eau ruisselée dans la ville de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019 ; d'après la carte des coefficients du ruissellement dans la ville de Kairouan).

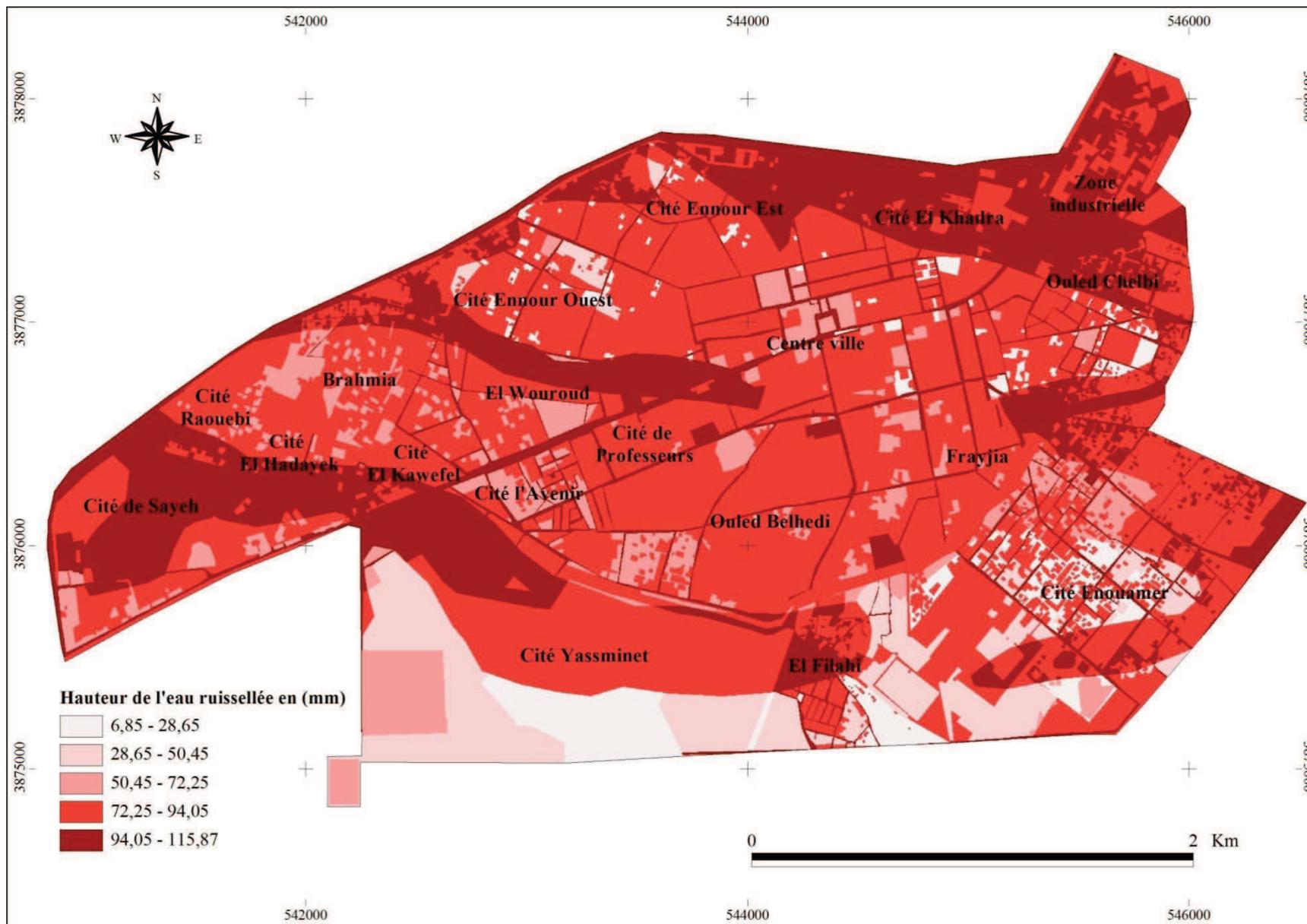
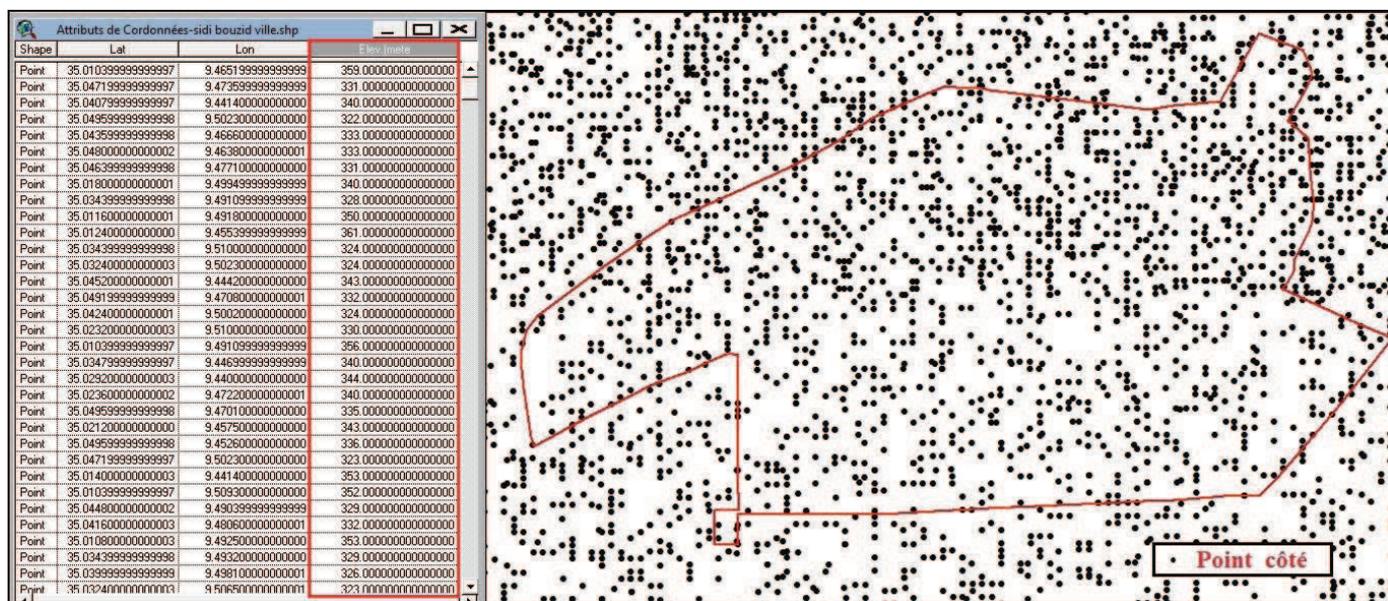


Figure 8.9: Hauteur de l'eau ruissellée dans la ville de Sidi Bouzid (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019 ; d'après la carte des coefficients du ruissellement dans la ville de Sidi Bouzid).

« Kmz. » à un fichier Excel indiquant les colonnes de latitude, longitude et altitude. Ces données sont facilement modifiables en vecteur format « shp. » sous le logiciel ArcGIS 10. Cette méthodologie a été testée et a donné des résultats conformes à la réalité terrain.

Fig.8.10. Les points côtés couvrant la commune de Sidi Bouzid



Les points côtés obtenus nous ont permis de réaliser les modèles numériques de terrain (M.N.T) pour les deux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid, (Fig.8.11 et 8.13). À partir de ces M.N.T nous avons réalisé les cartes des pentes, (Fig.8.12 et 8.14). L'examen du tableau ci-dessous laisse voir la dominance de la classe des pentes très faibles qui sont inférieures à 1%. Cette classe des pentes couvre environ 62,01 % de la superficie totale de la commune de Kairouan et 54,07 % de la superficie totale de la ville de Sidi Bouzid. La faiblesse de la pente est donc un signe qui indique la multiplicité des zones de stagnation des eaux pluviales dans ces deux communes.

Tab.8.11. Répartition surfacique des classes de pente dans les villes de Kairouan (1) et de Sidi Bouzid (2)

Classes	Intervalles (%)	Superficie 1 en (ha)	%	Superficie 2 en (ha)	%
Très faible	0 - 1	1844,56	62,01	616,20	54,07
Faible (1)	1 - 2	906,54	30,47	419,02	36,77
Faible (2)	2 - 4	203,68	6,85	96,64	8,48
Moyenne	> 4	19,93	0,67	7,70	0,68
Total	-	2974,71	100	1139,56	100

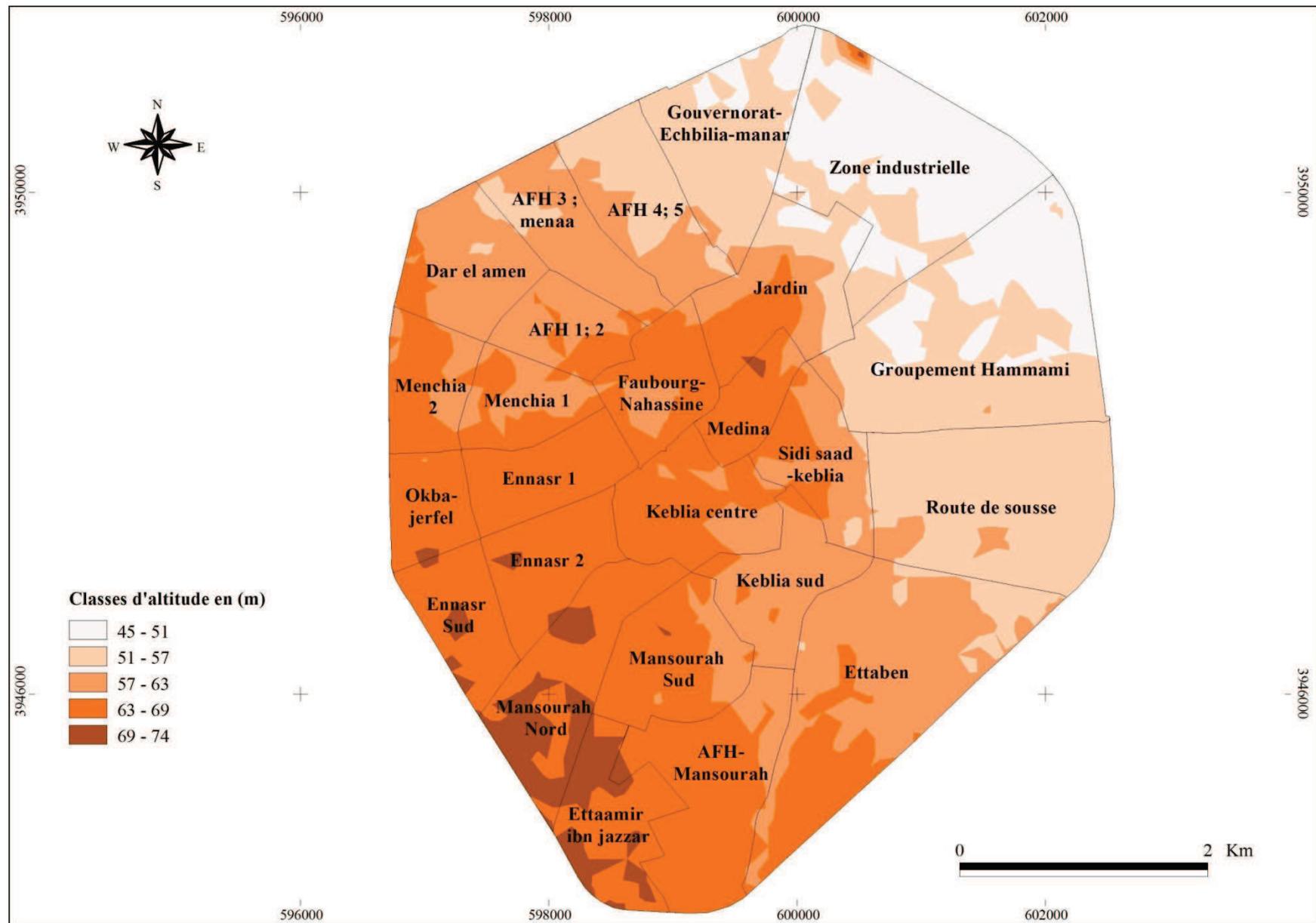


Figure 8.11: L'hypsométrie dans la ville de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019 ; d'après les points côtés extraits du Google Earth via le logiciel « GPS Visualizer »).

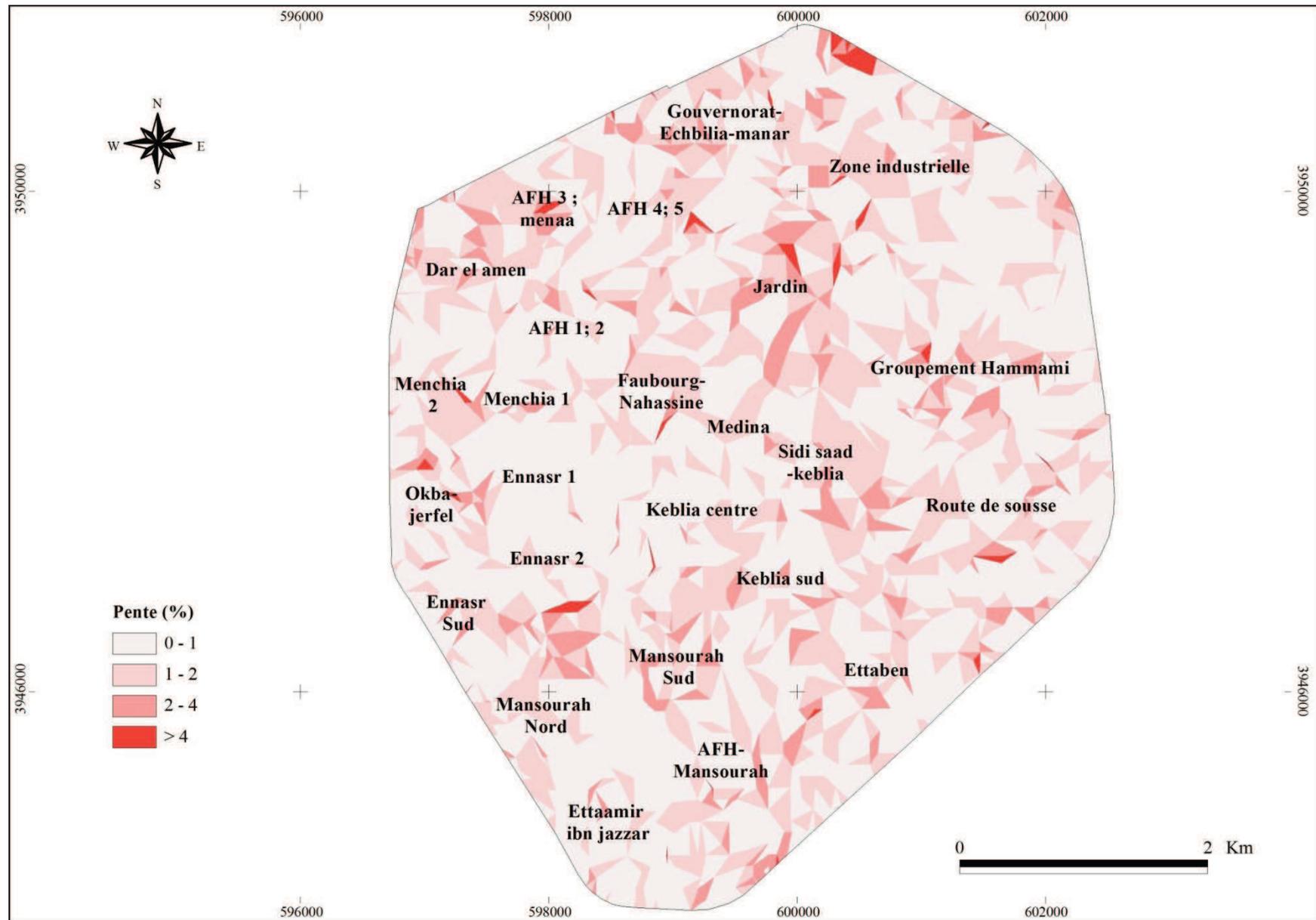


Figure 8.12: Les pentes dans la ville de Kairouan (**Source** : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019 ; d’après le modèle numérique du terrain (M.N.T) de la ville de Kairouan).

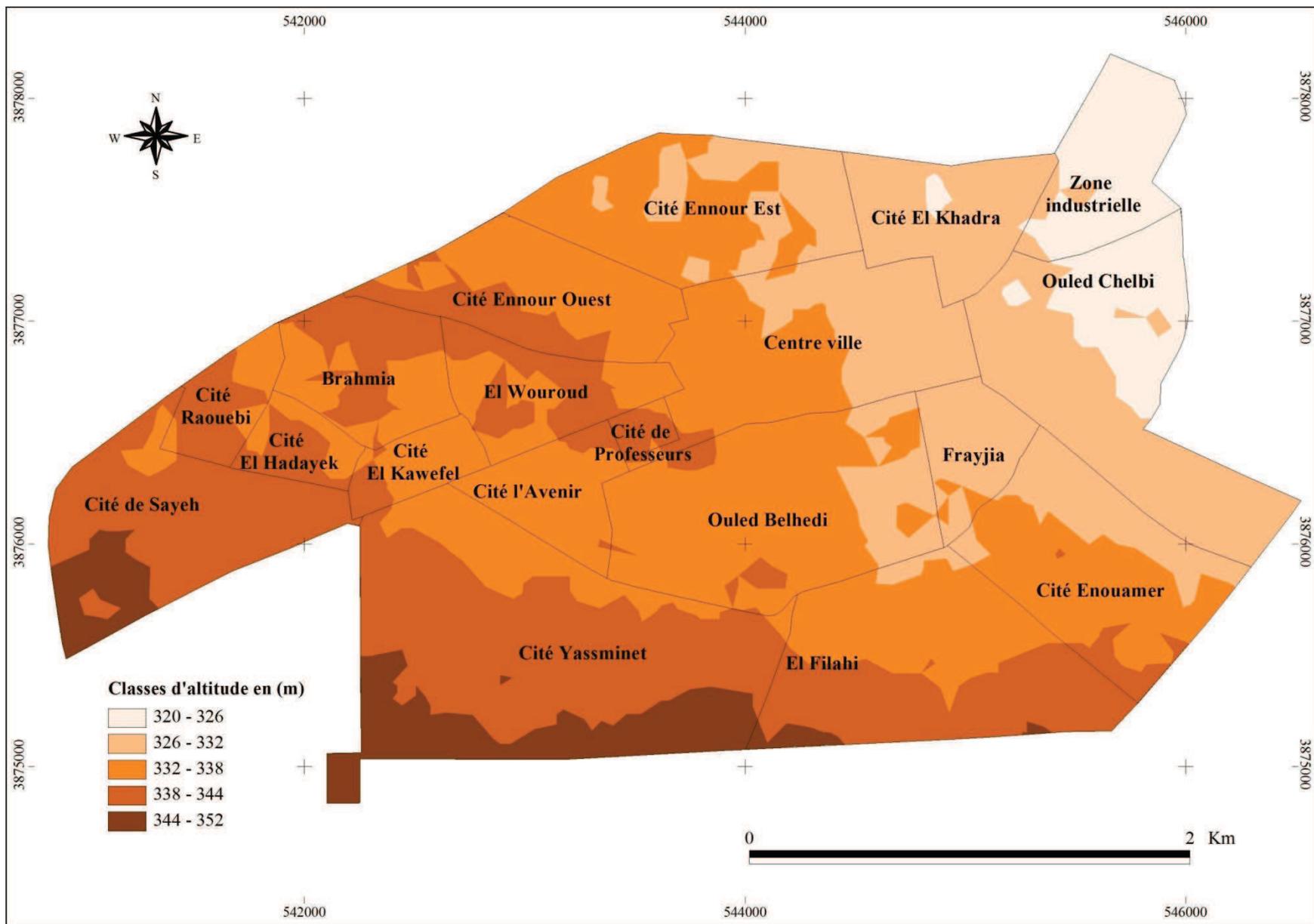


Figure 8.13: L'hypsométrie dans la ville de Sidi Bouzid (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019 ; d'après les points côtés extraits du Google Earth via le logiciel « GPS Visualizer »).

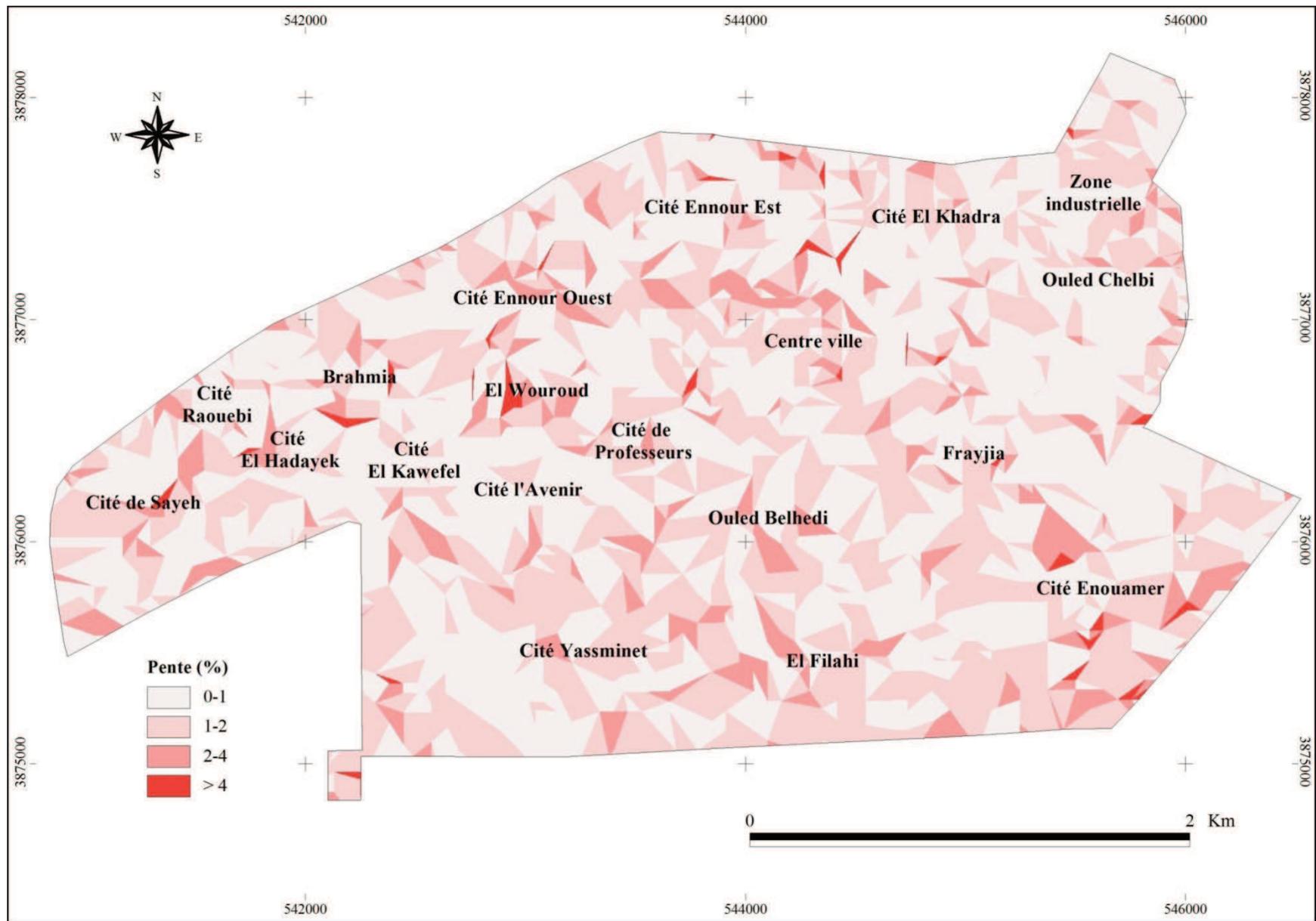


Figure 8.14: Les pentes dans la ville de Sidi Bouzid (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019 ; d'après le modèle numérique du terrain (M.N.T) de la ville de Sidi Bouzid).

8-2-2-3- La carte d'inondabilité

La carte d'inondabilité est le résultat de combinaison de deux facteurs à savoir l'hauteur de la lame d'eau ruisselée et la pente. À travers cette matrice (**Tab.8.12**), nous essayons de dégager le rôle important de la pente qui permet d'augmenter l'inondabilité des surfaces tant qu'elle est très faible et la hauteur de la lame d'eau ruisselée est importante.

Tab.8.12. Matrice de la hauteur de la lame d'eau ruisselée en fonction de la pente

Pente \ Hauteur de la lame d'eau ruisselée	Pente			
	Très faible	Faible (1)	Faible (2)	Moyenne
Très faible	2	1	1	1
Faible	2	2	1	1
Moyenne	3	3	2	2
Forte	4	4	3	3
Très Forte	5	4	4	3

Inondabilité des surfaces

Pente \ Hauteur de la lame d'eau ruisselée	Pente			
	Très faible	Faible (1)	Faible (2)	Moyenne
Très faible	Faible	Très faible	Très faible	Très faible
Faible	Faible	Faible	Très faible	Très faible
Moyenne	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible
Forte	Forte	Forte	Moyenne	Moyenne
Très Forte	Très Forte	Forte	Forte	Moyenne

L'examen du tableau ci-dessous et des cartes **8.15** et **8.16** permet de constater l'importance des terrains de forte inondabilité qui s'étalent sur plus que la moitié de la superficie totale des deux villes. Les surfaces de très forte inondabilité sont situées essentiellement au niveau des quartiers Kebliia centre à Kairouan et celles d'Ouled Chelbi, la zone industrielle, cité El Khadra, cité Ennour Est et cité de Sayeh.

Tab.8.13. Répartition surfacique de l'inondabilité des surfaces dans les villes de Kairouan (1) et de Sidi Bouzid (2)

Classes	Superficie 1 en (ha)	%	Superficie 2 en (ha)	%
Très faible	52,47	1,76	28,56	2,51
Faible	507,11	17,05	122,27	10,73
Moyenne	320,89	10,79	141,82	12,45
Forte	1682,76	56,57	668,30	58,64
Très forte	411,48	13,83	178,61	15,67
Total	2974,71	100	1139,56	100

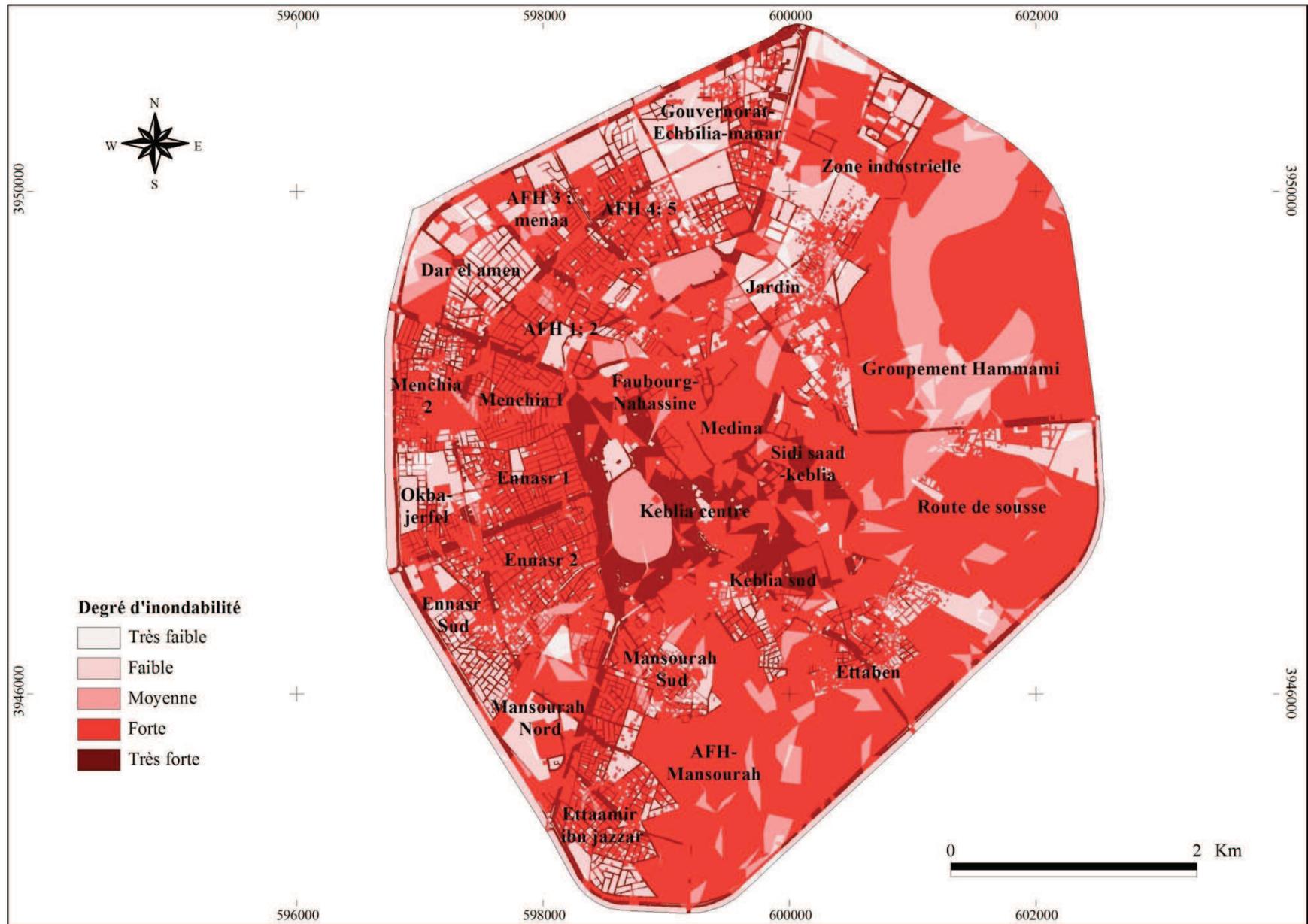


Figure 8.15: L'inondabilité dans la ville de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

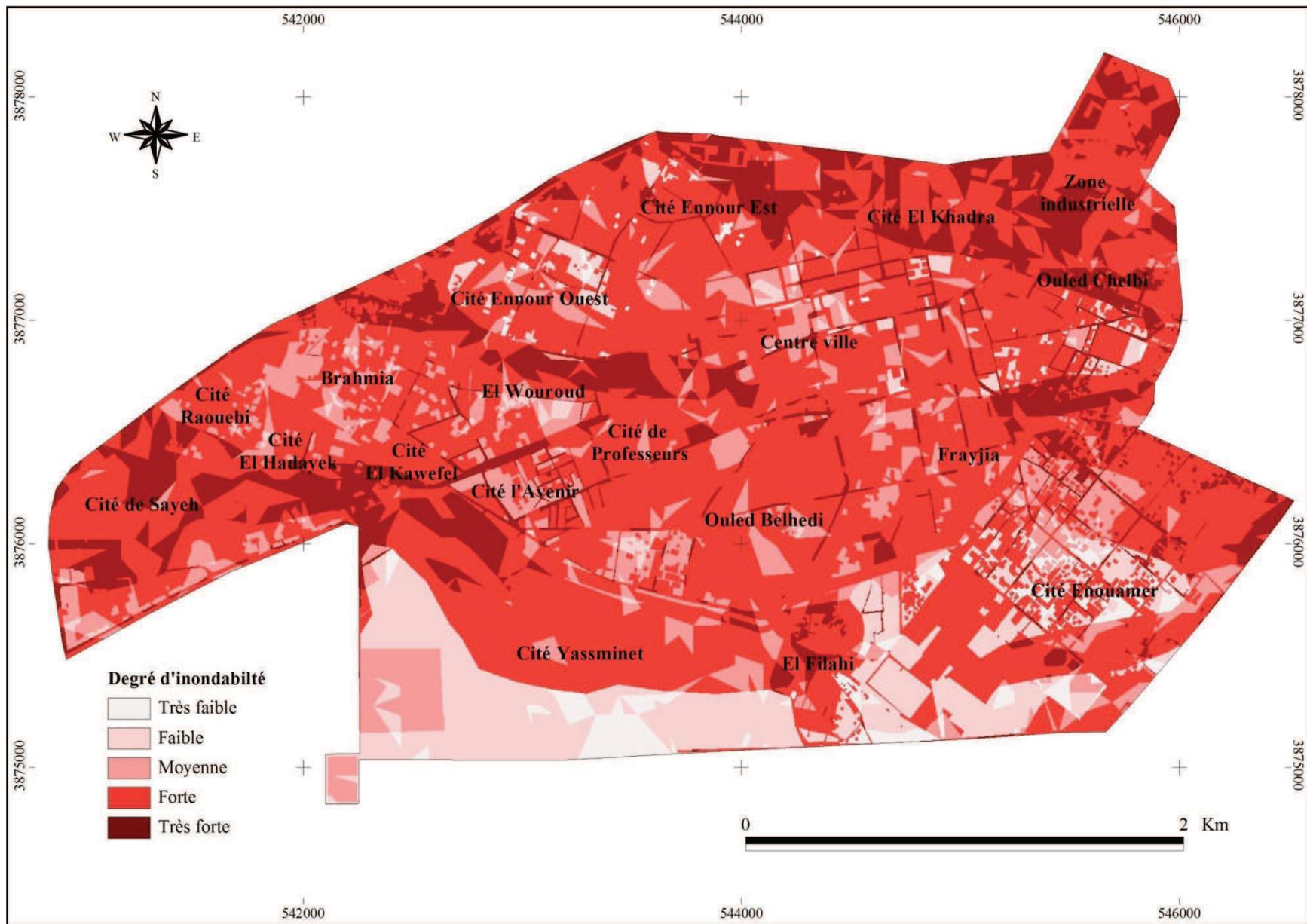


Figure 8.16: L'inondabilité dans la ville de Sidi Bouzid (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

8-2-3- Facteurs locaux d'aggravation de l'aléa

On ne peut pas se fonder uniquement sur le facteur de l'inondabilité des surfaces pour établir une carte d'aléa synthétique. En effet, il existe d'autres critères d'aléa spécifiques à chaque commune. Les critères d'aléa utilisés pour la commune de Kairouan sont les suivants :

* **Nombre des endroits de stagnation des eaux (D.H.U) :** Ce critère a été recensé auprès des agents de la direction d'hydraulique urbaine (D.H.U) qui nous ont aidés à repérer sur le plan d'aménagement urbain les différents endroits de stagnation des eaux pluviales, (Fig.8.17).

* **Existence de crue ancienne (source : témoignage des inondations):** Il s'agit de recenser auprès des citadins les noms des quartiers les plus concernés par le risque inondation. On accorde après à chaque quartier sinistré la valeur 5 et la valeur 1 pour le reste des quartiers.

* **Recoupement voirie/oued :** On compte pour chaque quartier le nombre de fois de recoupement entre voirie et oued. La codification de l'aléa varie de 1 à 5 en rapport avec le nombre de recoupement.

* **Présence d'un oued :** La présence d'un oued est caractérisée par son rang dans la hiérarchie hydrographique. Après avoir attribué un rang à chaque oued selon la hiérarchisation de Stahler 1957, nous accordons à chaque quartier le rang de l'oued le plus important.

Tab.8.14. Les autres critères d'aléa par quartier dans la commune de Kairouan

N°	Zones de la ville	Autres critères d'aléa								Σ	Classes d'aléa
		Nombre des endroits de stagnation des eaux (D.H.U)		Témoignage inondations		Voirie/Oued		Rang Oued			
1	Medina	0	1	1	5	0	1	0	1	8	3
2	Jardin	0	1	0	1	25	2	3	4	8	3
3	Zone industrielle	0	1	0	1	13	2	3	4	8	3
4	Groupeement Hammami	0	1	0	1	5	1	4	5	8	3
5	Faubourg-Nahassine	2	4	0	1	0	1	0	1	7	2
6	AFH 1; 2	0	1	0	1	25	2	3	4	8	3
7	Dar el amen	0	1	0	1	11	1	2	3	6	2
8	AFH 3 ; menaa	0	1	1	5	12	1	3	4	11	3
9	AFH 4; 5	0	1	0	1	15	2	3	4	8	3
10	Gouvernorat-Echbilia-manar	1	3	1	5	45	4	3	4	16	5
11	Menchia 1	2	4	0	1	19	2	3	4	11	3
12	Menchia 2	0	1	0	1	5	1	2	3	6	2
13	Ennasr 1	2	4	1	5	25	2	3	4	15	4
14	Okba-jerfel	0	1	0	1	23	2	3	4	8	3
15	Ennasr 2	0	1	1	5	65	5	3	4	15	4
16	Ennasr Sud	0	1	0	1	15	2	3	4	8	3
17	Mansourah Nord	1	3	1	5	32	3	3	4	15	4
18	Mansourah Sud	0	1	0	1	3	1	1	2	5	2
19	Ettaamir ibn jazzar	0	1	0	1	1	1	2	3	6	2
20	AFH-Mansourah	0	1	0	1	4	1	2	3	6	2
21	Keblia centre	6	5	1	5	4	1	3	4	15	4
22	Sidi saad-keblia	0	1	0	1	0	1	4	5	8	3
23	Keblia sud	0	1	1	5	19	2	4	5	13	4
24	Route de sousse	0	1	1	5	14	2	4	5	13	4
25	Ettaben	1	3	0	1	21	2	4	5	11	3
Min		0		0		0		0		4	
Max		6		1		65		4		20	
≠ Intervalles		logique		1		13		1		4	

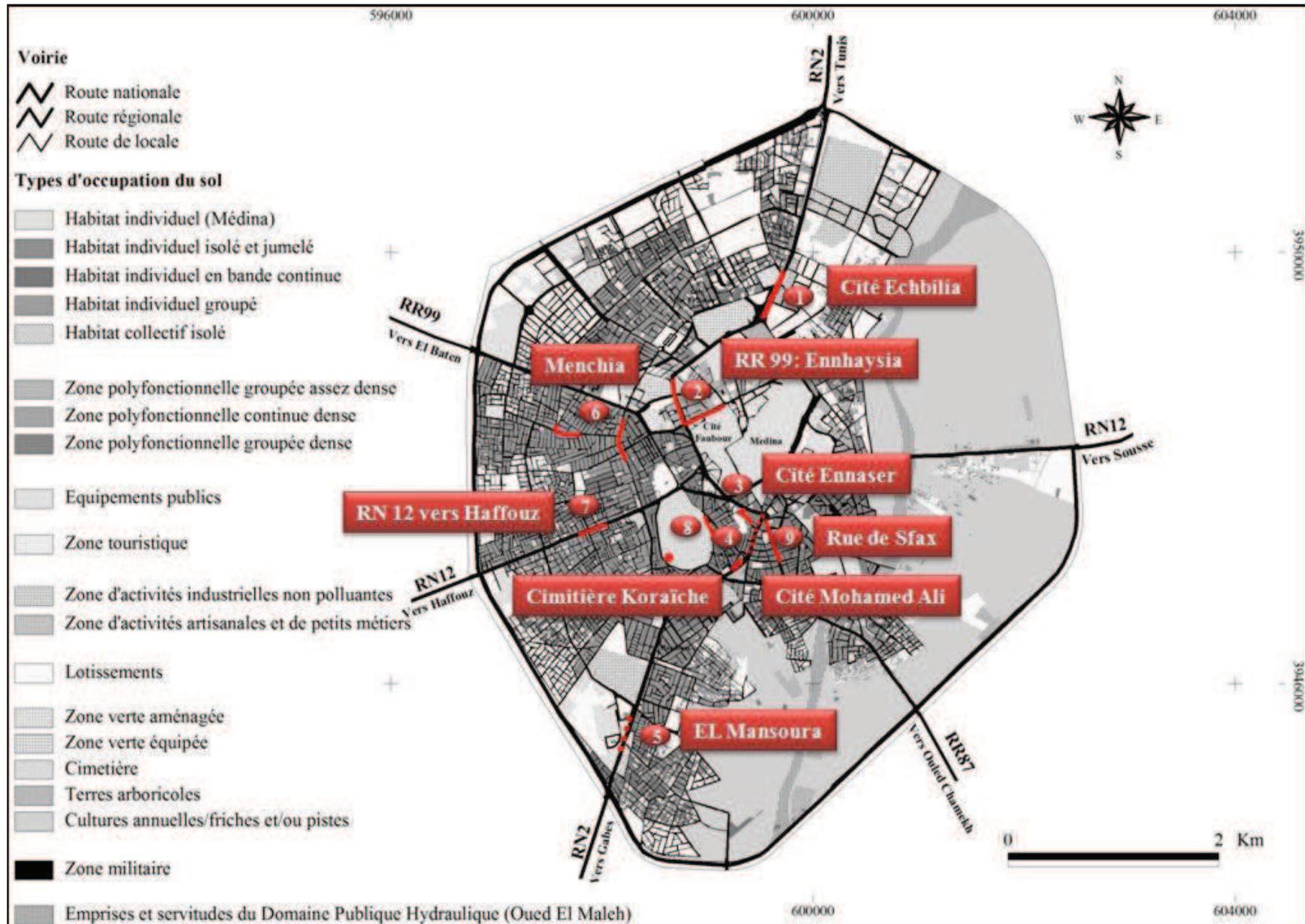


Figure 8.17: Les zones de stagnation des eaux pluviales (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

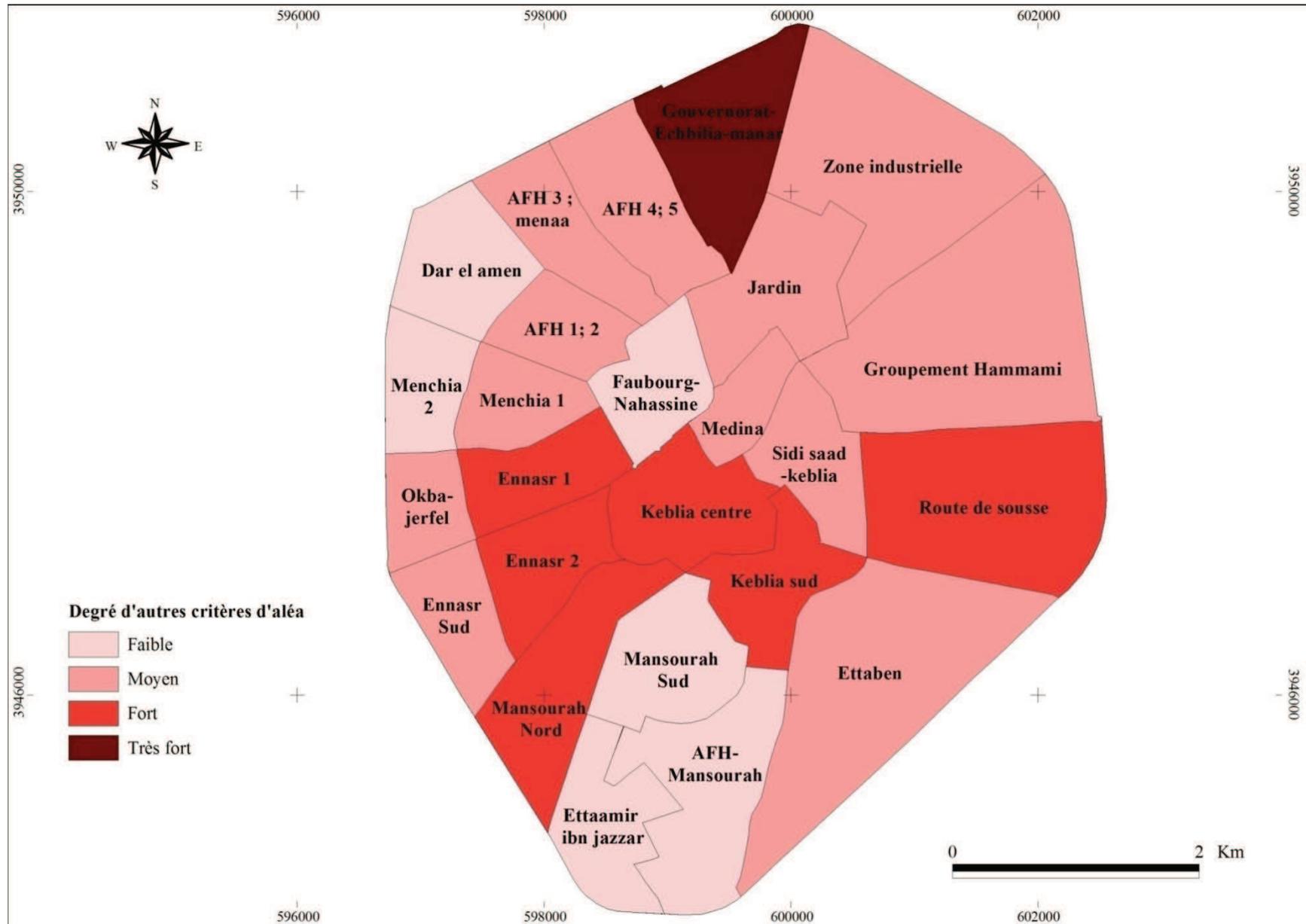


Figure 8.18: Les autres critères d'aléa dans la ville de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

Pour la ville de Sidi Bouzid les autres critères d'aléa choisis sont :

* **Existence de crue ancienne (source : Témoignage des inondations)** : Il s'agit de repérer les quartiers concernés par le risque inondation auprès des citoyens de la commune de Sidi Bouzid.

* **Recoupement voirie/canal** : Il s'agit de compter à chaque quartier le nombre des intersections entre voirie et le canal Fallet Gualla.

* **Proximité à un oued** : Il s'agit de distinguer les quartiers les proches d'oued Serg Ed-Dhiba au nord et oued Al Mazzouz au sud.

* **Point de faiblesse au niveau de la digue**: Lors d'une sortie sur terrain on a observé une brèche au niveau de la digue à quartier El Filahi. D'ailleurs cet endroit est devenu un lieu d'accumulation du reste de chantier de construction.

* **Proximité à la station d'épuration** : Les quartiers d'ouled Chelbi et de la zone industrielle sont très proches de la station d'épuration qui représente un facteur aggravant le risque d'inondation.

Tab.8.15. Les autres critères d'aléa par quartier dans la commune de Sidi Bouzid

N°	Zones de la ville	Autres critères d'aléa								Σ	Classes d'aléa
		Témoignage inondations		Recoupement Voirie/Canal		Proximité à un Oued		Point de faiblesse au niveau de la digue / proximité à la station d'épuration			
1	Brahmia	1	5	0	1	1	5	0	1	12	4
2	Centre ville	1	5	0	1	0	1	0	1	8	3
3	Cité de Professeurs	0	1	0	1	0	1	0	1	4	2
4	Cité de Sayeh	1	5	0	1	1	5	0	1	12	4
5	Cité El Hadayek	0	1	0	1	0	1	0	1	4	2
6	Cité El Kawefel	1	5	0	1	0	1	0	1	8	3
7	Cité El Khadra	1	5	0	1	1	5	0	1	12	4
8	Cité Ennour Est	1	5	0	1	1	5	0	1	12	4
9	Cité Ennour Ouest	1	5	0	1	1	5	0	1	12	4
10	Cité Enouamer	0	1	4	1	1	5	0	1	8	3
11	Cité l'Avenir	0	1	2	1	0	1	0	1	4	2
12	Cité Raouebi	0	1	0	1	1	5	0	1	8	3
13	Cité Yassminet	0	1	23	5	0	1	0	1	8	3
14	El Filahi	1	5	3	1	1	5	1	5	16	5
15	El Wouroud	1	5	0	1	0	1	0	1	8	3
16	Frayjia	0	1	8	2	0	1	0	1	5	2
17	Ouled Belhedi	1	5	18	4	0	1	0	1	11	3
18	Ouled Chelbi	1	5	9	2	0	1	1	5	13	4
19	Zone industrielle	1	5	0	1	1	5	1	5	16	5
Min		0		0		0		0		4	
Max		1		23		1		1		20	
≠ Intervalles		1		5		1		1		4	

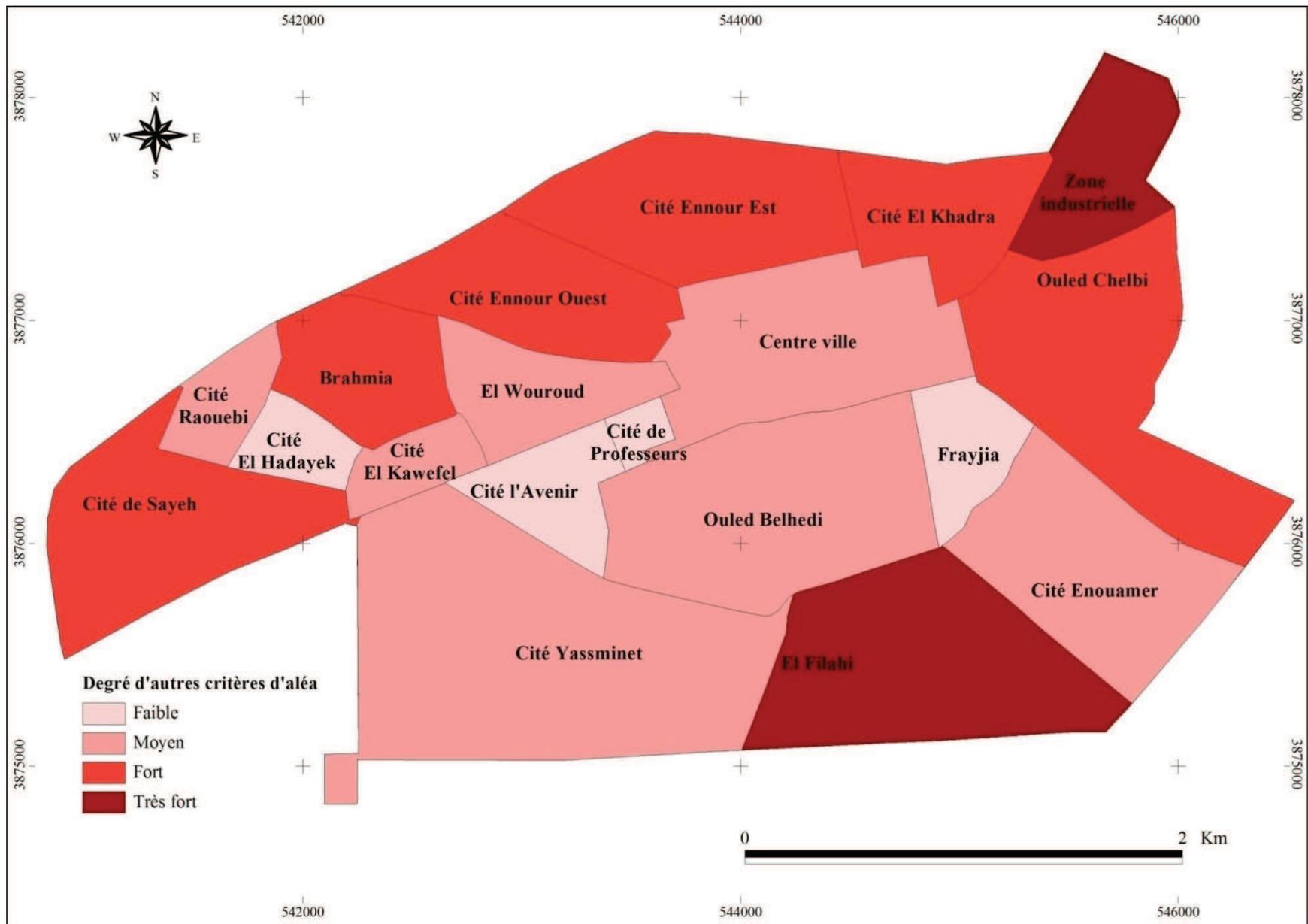


Figure 8.19: Les autres critères d'aléa dans la ville de Sidi Bouzid (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

Les quartiers qui ont un degré d'aléa très fort sont ceux de Gouvernot-Echbilia-manar à Kairouan et la zone industrielle et El Filahi à Sidi Bouzid, (Fig.8.18 et 8.19).

8-2-4- La carte d'aléa de synthèse

L'aléa est le produit de deux facteurs à savoir : l'inondabilité des surfaces et d'autres critères d'aléa précédemment cités, (Tab.8.16).

Tab.8.16. Matrice d'aléa

Inondabilité des surfaces		Autres critères d'aléa				
		Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très Forte
		1	2	3	4	5
Très faible	1	1	2	3	4	5
Faible	2	2	4	6	8	10
Moyen	3	3	6	9	12	15
Fort	4	4	8	12	16	20
Très Fort	5	5	10	15	20	25

Aléa= Inondabilité des surfaces × Critères aggravants

Inondabilité des surfaces		Autres critères d'aléa				
		Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très Forte
		1	2	3	4	5
Très faible	1	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible	Faible
Faible	2	Très faible	Très faible	Faible	Faible	Moyen
Moyen	3	Très faible	Faible	Faible	Moyen	Fort
Fort	4	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très Fort
Très Fort	5	Faible	Moyen	Fort	Très Fort	Très Fort

L'analyse des cartes 8.20 et 8.21, laisse voir la répartition spatiale de la classe d'aléa très fort au niveau des quartiers de Gouvernorat-Echbilia-manar, Kebliia centre et Kebliia sud à Kairouan et essentiellement quartiers El Filahi et la zone industrielle à la ville de Sidi Bouzid. Cette classe d'aléa couvre respectivement 7,31 % et 16,82 % de la superficie totale des deux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid, (Tab.8.17).

Tab.8.17. Répartition surfacique de l'aléa dans les villes de Kairouan (1) et de Sidi Bouzid (2)

Classes	Intervalles	Superficie 1 en (ha)	%	Superficie 2 en (ha)	%
Très faible	0 - 5	199,14	6,69	21,76	1,91
Faible	5 - 10	1018,77	34,25	243,94	21,41
Moyen	10 - 15	1000,11	33,62	372,35	32,67
Fort	15 -20	539,39	18,13	309,82	27,19
Très fort	20 - 25	217,30	7,31	191,69	16,82
Total	-	2974,71	100	1139,56	100

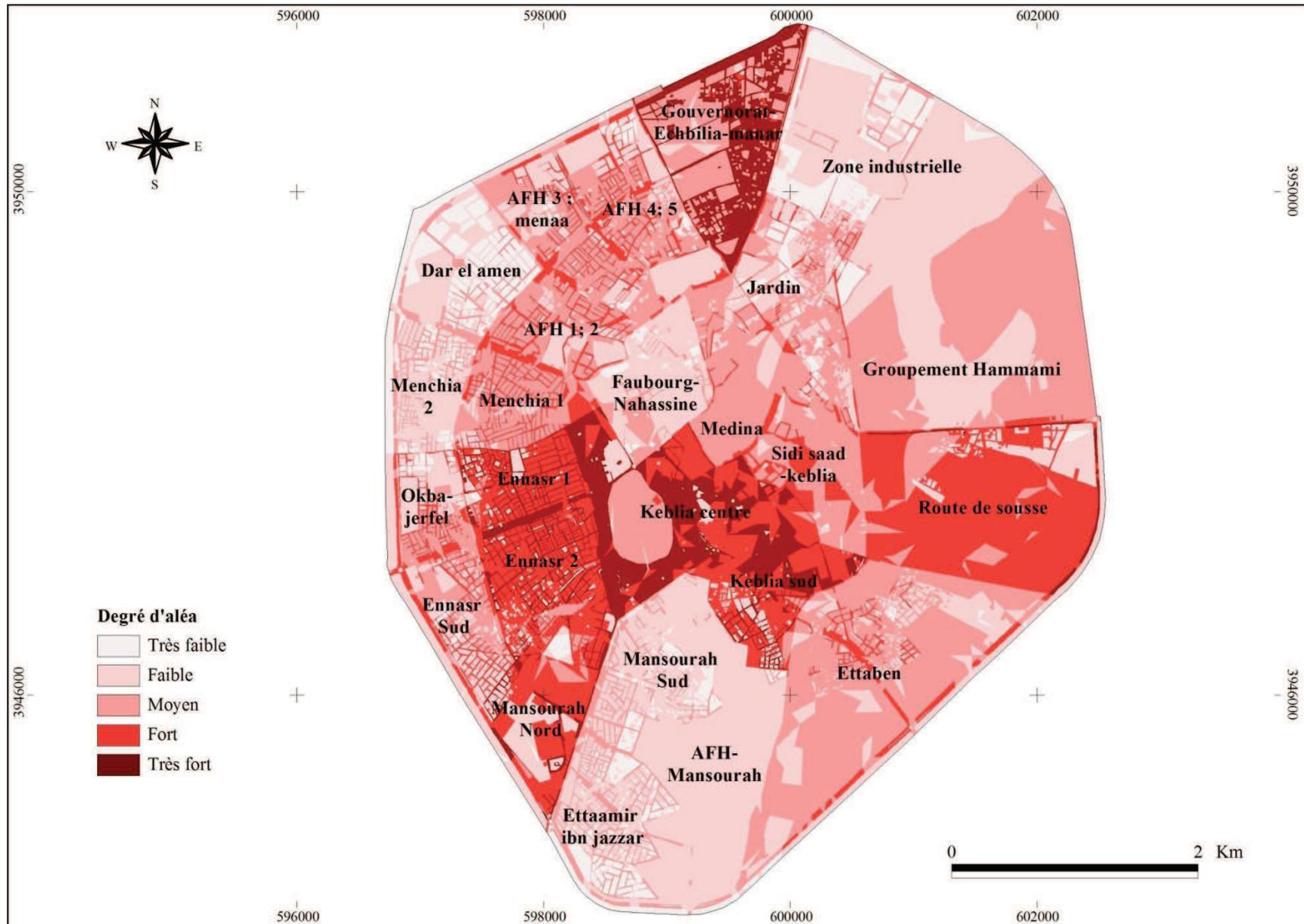


Figure 8.20: L'aléa dans la ville de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

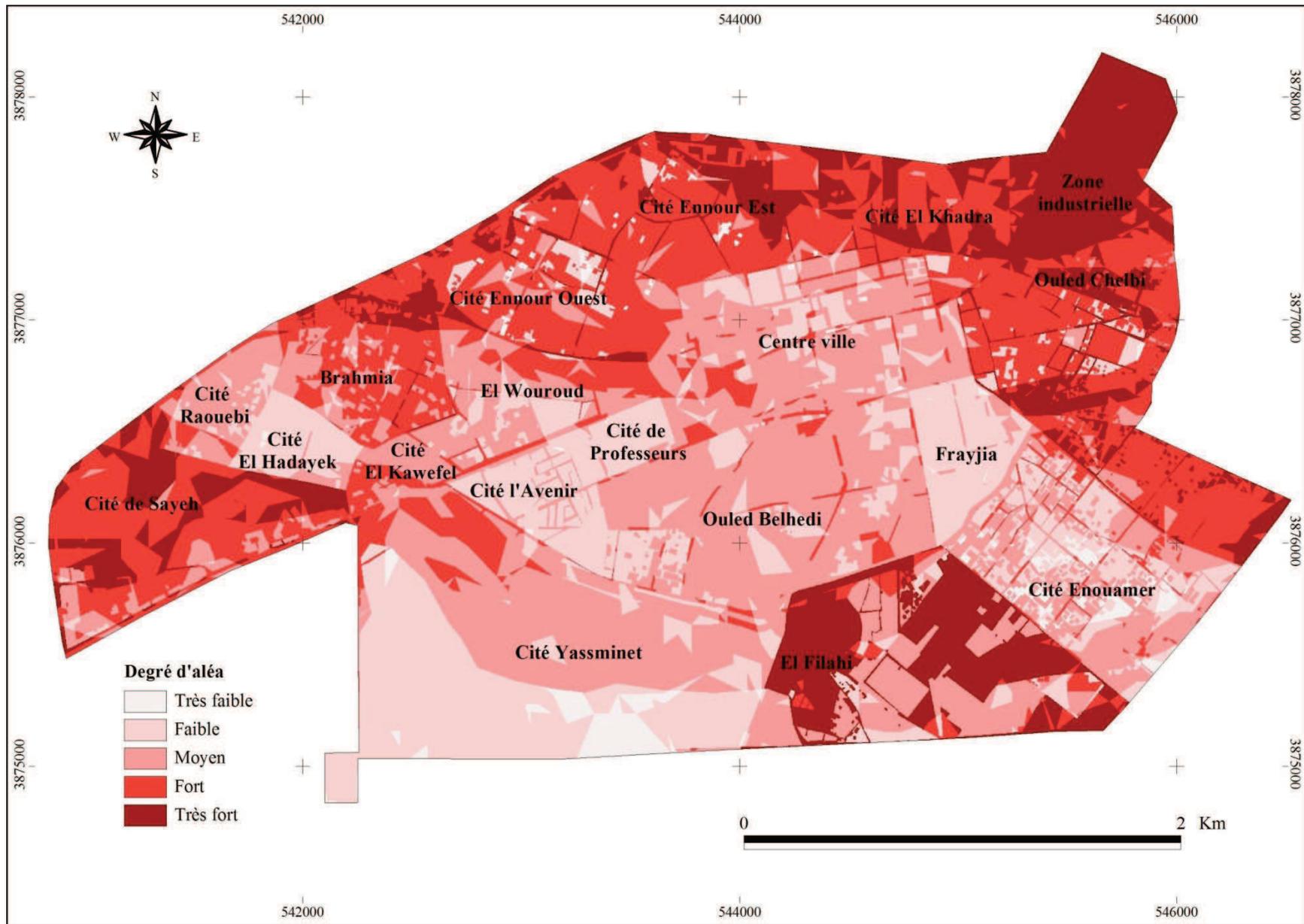


Figure 8.21: L'aléa dans la ville de Sidi Bouzid (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

8-3- Les enjeux

Les enjeux sont les biens humains et/ou matériels qu'on risque de perdre à causes des évènements extrêmes y compris les inondations. L'idée est d'attribuer à chaque type d'occupation du sol un degré qui varie de 1 à 5 selon l'importance d'enjeu. Cette importance est évaluée en se basant sur deux critères à savoir : La densité de population et la densité d'habitat, (**Tab.8.18**).

Tab.8.18. Répartition des types d'occupation selon leur degré d'enjeux dans la ville de Kairouan

N°	Types d'occupation des sols	Enjeux
1	Zones d'habitat individuel (Médina)	4
2	Zones d'habitat individuel groupé	3
3	Zones d'habitat individuel en bande continue	4
4	Zones d'habitat individuel isolé et jumelé	4
5	Zones d'habitat collectif isolé	4
6	Zones polyfonctionnelles continues denses	5
7	Zones polyfonctionnelles groupées denses	5
8	Zones polyfonctionnelles groupées assez denses	4
9	Zones touristiques	5
10	Zones d'activités industrielles non polluantes	5
11	Zones d'activités artisanales et de petits métiers	5
12	Equipements publics	5
13	Zones vertes équipées	2
14	Zones vertes aménagées	2
15	Zones militaires	5
16	Cimetières	1
17	Emprises et servitudes du D,P,H (Oued El Maleh)	1
18	Lotissements	1
19	Cultures annuelles, friches et/ou pistes	1
21	Terres arboricoles	2
22	Route nationale	5
23	Route régionale	5
24	Route locale	5

La répartition spatiale des enjeux est hétérogène, (**Fig.8.22**). Les enjeux les très importants sont situés essentiellement au centre de la ville de Kairouan au niveau des quartiers Keblia centre, Keblia sud et aussi au niveau de la zone industrielle et Dar el amen. Ce type d'enjeux s'étale sur une superficie de 903,8 ha, couvrant environ 30,38% de la superficie totale de la ville de Kairouan.

Tab.8.19: Répartition surfacique des enjeux dans les villes de Kairouan (1) et de Sidi Bouzid (2)

Classes	Superficie 1 en (ha)	%	Superficie 2 en (ha)	%
Très Faible	1480,65	49,78	346,79	30,43
Faible	39,07	1,31	152,63	13,93
Moyen	278,32	9,36	332,63	29,19
Fort	272,87	9,17	81,56	7,16
Très fort	903,8	30,38	225,95	19,83
Total	2974,71	100	1139,56	100



Figure 8.22: Les enjeux dans la ville de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

Pour la ville de Sidi Bouzid, les enjeux sont classés selon différentes catégories. Il est à noter qu'on peut accorder pour la même classe des valeurs d'enjeux différents. Par exemple pour la classe d'enjeux « réseaux et flux », on a attribué la valeur 1 (Enjeu de très faible degré) au canal de Fellet Gualla et la valeur 5 (Enjeu de très fort degré) aux rues et surfaces bitumées, (Tab.8.20). Les enjeux de degré très fort sont observables au niveau des quartiers El Wouroud, le centre ville et la zone industrielle.

Tab.8.20. Répartition des types d'occupation selon leur degré d'enjeux dans la ville de Sidi Bouzid

Classe	Type d'occupation du sol à Sidi Bouzid	Code
1-Enjeux ressources en cas de crise	Administration	5
	Santé	5
	Sécurité	5
	Justice	5
	Enseignement	5
	Social	5
2- Enjeux dangereux ou polluants	Zones de production	5
3- Enjeux "réseaux et flux"	Rues et surfaces bitumées	5
	Canal Fellet Gualla	1
4- Les ERP (Les établissements recevant du public)	Commerce	5
	Culture	5
	Sport	5
	Jeunesse et enfance	5
	Formation professionnelle	5
5- Enjeu social particulier	Culte	5
6- Enjeux banals	Fonciers non bâtis	1
	Cimetière Musulman	1
	Cultures annuelles, friches et/ou pistes	1
	Zones vertes (Espaces verts et loisirs)	2
	Divers	5
7- Logement	Quartiers périphériques	3
	Zone centrale	4
	Zone d'habitat planifié (AFH)	4
	Zones d'habitat populaire (SNIT)	3
8- Espaces agricoles	Terres arboricoles	2

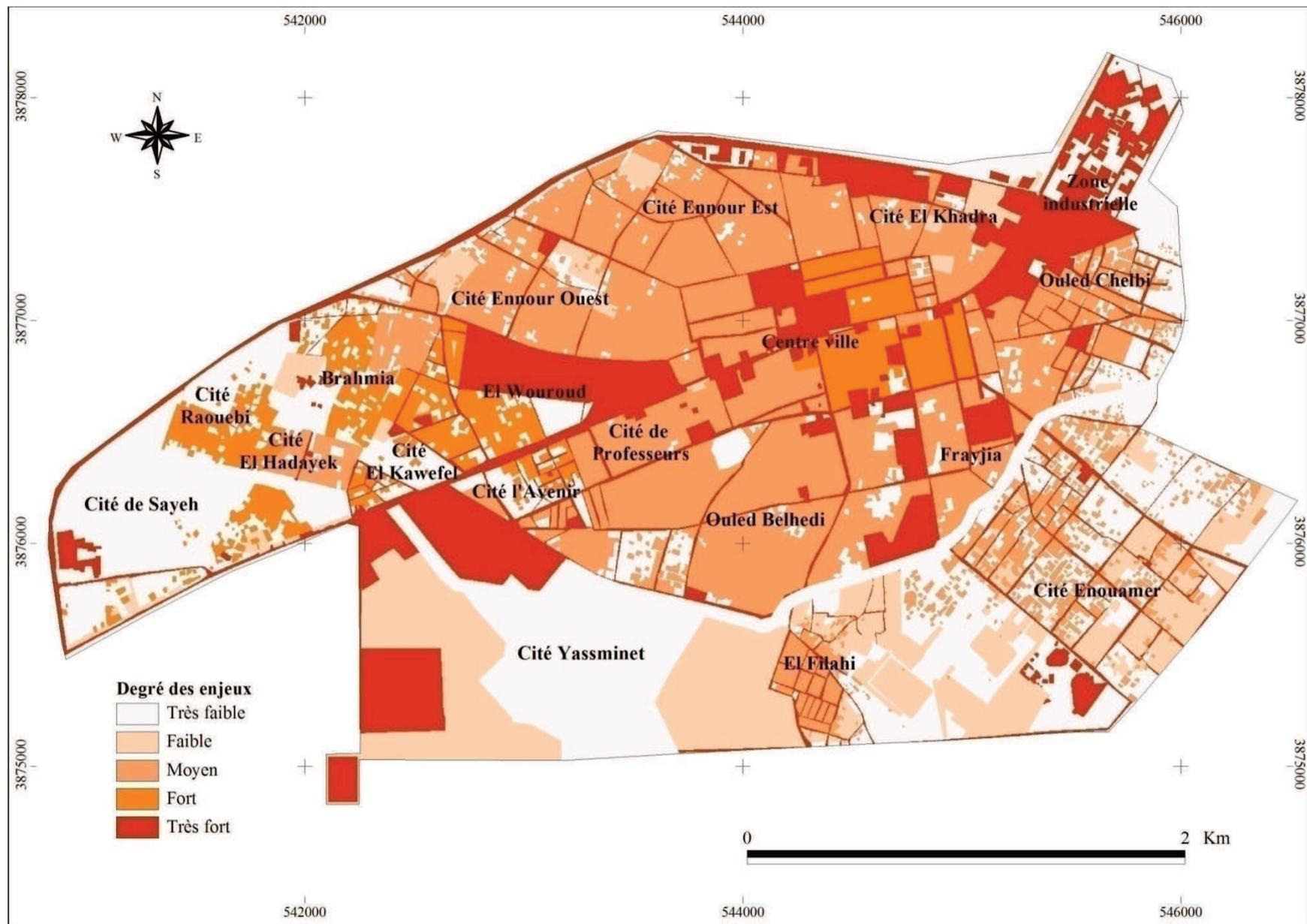


Figure 8.23: Les enjeux dans la ville de Sidi Bouzid (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

8-4- L'exposition des enjeux

C'est le résultat du croisement entre la présence d'enjeu et l'aléa (**Tab.8.21**). Les quartiers les plus exposés sont ceux ayant un degré d'enjeu très élevé et un aléa très fort, (**Fig. 8.24 et 8.25**). Il s'agit des quartiers Keblia centre, Keblia sud et Mansourah Nord à la ville de Kairouan et essentiellement la zone industrielle à la ville de Sidi Bouzid.

Tab.8.21. Matrice des enjeux en fonction d'aléa

Enjeux		Aléa				
		Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très Fort
		1	2	3	4	5
Très faible	1	1	2	3	4	5
Faible	2	2	4	6	8	10
Moyen	3	3	6	9	12	15
Fort	4	4	8	12	16	20
Très Fort	5	5	10	15	20	25

Exposition des enjeux = Aléa × Enjeux

Enjeux		Aléa				
		Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très Fort
		1	2	3	4	5
Très faible	1	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible	Faible
Faible	2	Très faible	Très faible	Faible	Faible	Moyen
Moyen	3	Très faible	Faible	Faible	Moyen	Fort
Fort	4	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très Fort
Très Fort	5	Faible	Moyen	Fort	Très Fort	Très Fort

Les terrains de très forte exposition couvrent une superficie de 472,17 ha et 133,95 ha soit respectivement 15,87 % et 11,76% de la superficie totale des villes de Kairouan et de Sidi Bouzid.

Tab.8.22. Répartition surfacique de degré d'exposition des enjeux dans les villes de Kairouan (1) et de Sidi Bouzid (2)

Classes	Intervalles	Superficie 1 en (ha)	%	Superficie 2 en (ha)	%
Très Faible	0 - 5	1519,01	51,06	339,51	29,79
Faible	5 -10	297,25	9,99	338,66	29,72
Moyen	10 - 15	366,06	12,31	201,94	17,72
Fort	15 -20	320,22	10,77	125,50	11,01
Très fort	20 - 25	472,17	15,87	133,95	11,76
Total	-	2974,71	100	1139,56	100

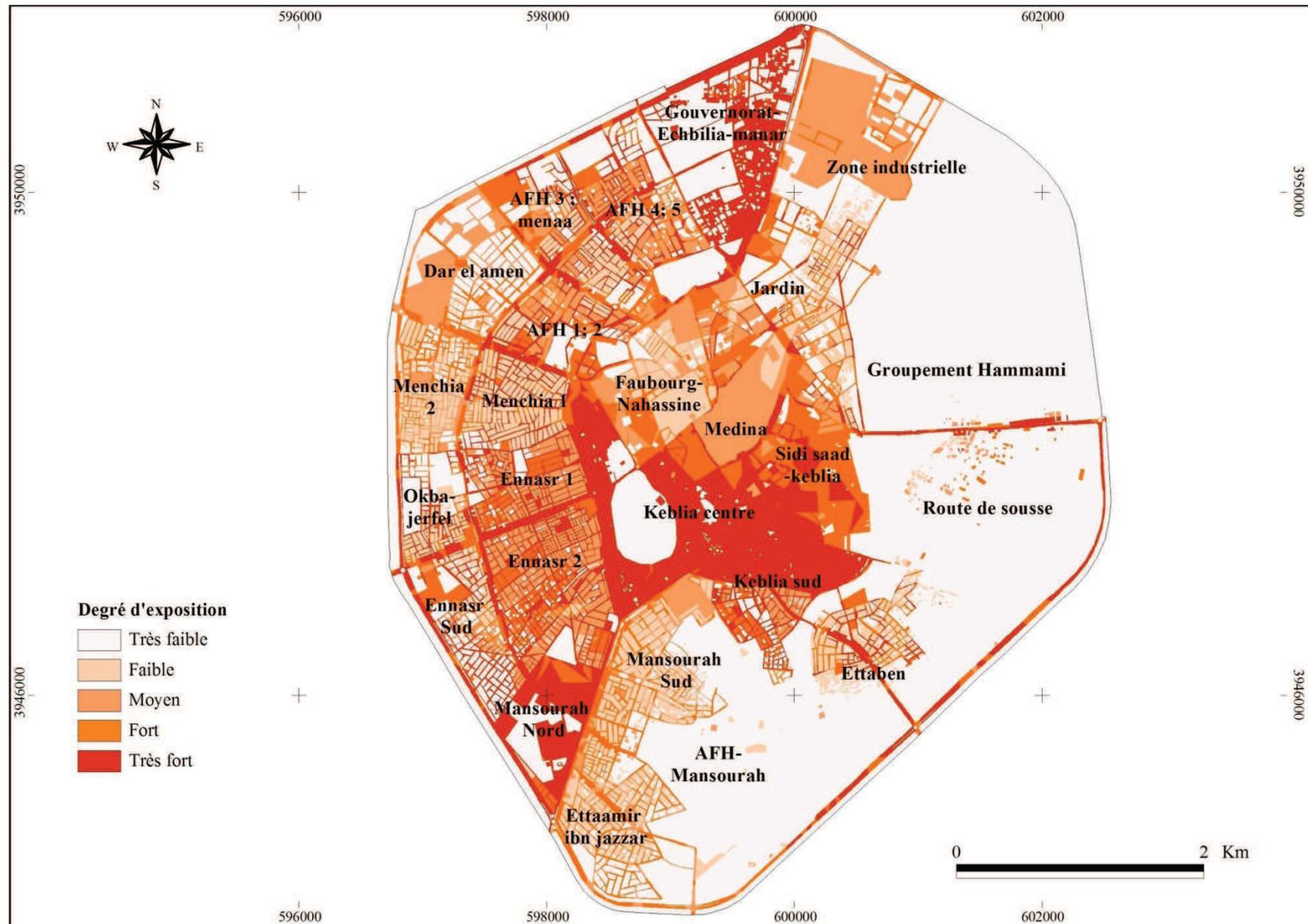


Figure 8.24: L'exposition dans la ville de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

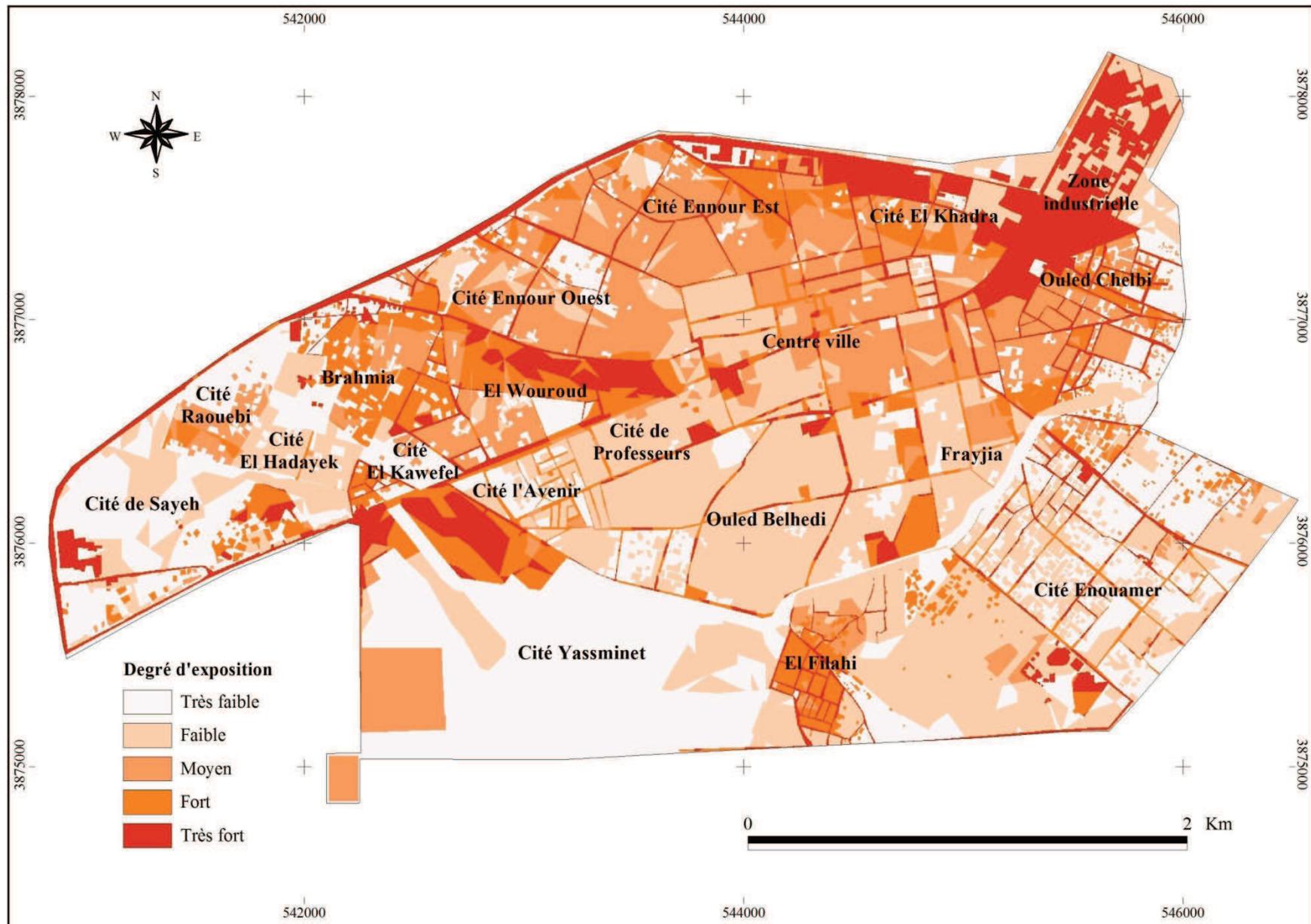


Figure 8.25: L'exposition dans la ville de Sidi Bouzid (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

8-5- La vulnérabilité

Pour l'étude de la vulnérabilité à l'échelle de la ville nous nous sommes fondés sur une méthodologie qui consiste à calculer pour chaque quartier et selon les données disponibles deux types de vulnérabilité :

8-5-1- La vulnérabilité liée au bâti/population

Elle est mesurée en combinant trois facteurs, à savoir :

* **Pourcentage de la surface urbanisée** : Il s'agit de calculer pour chaque quartier le pourcentage de la surface urbanisée par rapport à la superficie totale du quartier.

Tab.8.23. Etude de la vulnérabilité liée au bâti/population par quartier à la ville de Kairouan

N°	Zones de la ville	Urbanisation/Population						Σ	Vulnérabilité liée au bâti / population
		% Surface urbanisée		Ancienneté du bâti		Densité (Population/ Logement)			
1	Medina	99,51	5	Avant 1930	5	4,89	5	15	5
2	Jardin	70,07	4	1975-1985	2	3,57	3	9	4
3	Zone industrielle	30,79	2	1985-2000	1	3,8	3	6	3
4	Groupement Hammami	5,08	1	1975-1985	2	3,68	3	6	3
5	Faubourg-Nahassine	89,69	5	Avant 1930	5	4,12	4	14	5
6	AFH 1; 2	71,93	4	1975-1985	2	3,54	3	9	4
7	Dar el amen	25,38	2	1985-2000	1	3,12	2	5	2
8	AFH 3 ; menaa	53,88	3	1985-2000	1	3,94	3	7	3
9	AFH 4; 5	52,34	3	1975-1985	2	3,13	2	7	3
10	Gouvernorat-Echbilia-manar	27,73	2	1975-1985	2	2,94	1	5	2
11	Menchia 1	88,98	5	1975-1985	2	3,47	2	9	4
12	Menchia 2	68,00	4	1975-1985	2	3,57	3	9	4
13	Ennasr 1	85,62	5	1975-1985	2	3,59	3	10	4
14	Okba-jerfèl	29,54	2	1975-1985	2	2,61	1	5	2
15	Ennasr 2	81,93	5	1975-1985	2	3,02	1	8	3
16	Ennasr Sud	46,32	3	1975-1985	2	2,81	1	6	3
17	Mansourah Nord	77,35	4	1956-1975	3	2,81	1	8	3
18	Mansourah Sud	53,71	3	1956-1975	3	2,61	1	7	3
19	Ettaamir ibn jazzar	62,00	4	1975-1985	2	2,91	1	7	3
20	AFH-Mansourah	4,52	1	2000-2015	1	2,81	1	3	2
21	Keblia centre	92,04	5	1930-1950	4	2,61	1	10	4
22	Sidi saad-keblia	79,60	4	1950-1956	4	3,4	2	10	4
23	Keblia sud	71,45	4	1975-1985	2	2,88	1	7	3
24	Route de sousse	4,50	1	1985-2000	1	2,81	1	3	2
25	Ettaben	17,66	1	1975-1985	2	3,74	3	6	3
Min		0		1930		2,61			3
Max		100		2015		4,89			15
≠ Intervalles		20		17		0,46			3

* **Ancienneté du bâti** : Il s'agit d'accorder à chaque quartier la date de construction du bâti qui domine sa superficie.

* **Densité (population/logement)**: Le calcul de la densité permet d'estimer le nombre moyen des habitants par logement.

Tab.8.24. Etude de la vulnérabilité liée au bâti par quartier à la ville de Sidi Bouzid

N°	Zones de la ville	Urbanisation				Σ	Vulnérabilité liée au bâti
		% Surface urbanisée		Ancienneté du bâti			
1	Brahmia	81,21	5	1993-1999	1	6	4
2	Centre ville	99,93	5	1972-1986	2	7	4
3	Cité de Professeurs	99,67	5	1972-1986	2	7	4
4	Cité de Sayeh	29,18	2	1999-2014	1	3	2
5	Cité El Hadayek	80,77	5	1999-2014	1	6	4
6	Cité El Kawefel	52,05	3	1993-1999	1	4	3
7	Cité El Khadra	84,99	5	1972-1986	2	7	4
8	Cité Ennour Est	97,30	5	1972-1986	2	7	4
9	Cité Ennour Ouest	91,65	5	1972-1986	2	7	4
10	Cité Enouamer	68,39	4	1993-1999	1	5	3
11	Cité l'Avenir	78,83	4	1993-1999	1	5	3
12	Cité Raouebi	48,31	3	1999-2014	1	4	3
13	Cité Yassminet	32,68	2	1999-2014	1	3	2
14	El Filahi	34,54	2	1972-1986	2	4	3
15	El Wouroud	94,84	5	1955-1972	3	8	5
16	Frayjia	98,05	5	1972-1986	2	7	4
17	Ouled Belhedi	97,18	5	1972-1986	2	7	4
18	Ouled Chelbi	69,06	4	1972-1986	2	6	4
19	Zone industrielle	67,66	4	1999-2014	1	5	3
Min		0		1934		2	
Max		100		2014		10	
≠ Intervalles		20		16		2	

8-5-2- La vulnérabilité liée à la voirie/réseau

Pour l'étude de ce type de vulnérabilité on s'est basé sur trois critères :

* **Pourcentage d'aménagement de la voirie** : C'est un indicateur important de l'état des routes. En effet, des routes non aménagées augmentent la vulnérabilité des surfaces vis-à-vis le risque inondation.

* **Pourcentage de branchement aux différents types de réseaux (Electricité, eau potable et gaz naturel) :** C'est un indice de richesse. En fait, un quartier bien équipé par les différents types de réseaux est un quartier non vulnérable.

Tab.8.25. Etude de la vulnérabilité liée au voirie/réseau par quartier à la ville de Kairouan

N°	Zones de la ville	Voirie/Réseau										Σ	Vulnérabilité liée à la voirie / réseau
		% d'aménagement de la voirie		% de branchement au réseau d'Electricité		% de branchement au réseau d'Eau potable		% de branchement au réseau du Gaz Naturel		Nombre impasses par quartier			
1	Medina	80	2	100	1	100	1	0	5	4	1	10	3
2	Jardin	45	3	85	1	60	2	45	3	29	5	14	3
3	Zone industrielle	30	4	100	1	100	1	100	1	10	2	9	2
4	Groupeement Hammami	0	5	80	1	100	1	0	5	3	1	13	3
5	Faubourg-Nahassine	70	2	100	1	100	1	100	1	15	3	8	2
6	AFH 1; 2	20	5	100	1	100	1	100	1	7	2	10	3
7	Dar el amen	35	4	100	1	80	1	100	1	4	1	8	3
8	AFH 3 ; menaa	30	4	100	1	70	2	100	1	15	3	11	3
9	AFH 4; 5	75	2	100	1	80	1	100	1	12	2	7	2
10	Gouvernorat-Echbiliana-manar	45	3	85	1	60	2	100	1	6	1	8	2
11	Menchia 1	75	2	100	1	85	1	0	5	2	1	10	3
12	Menchia 2	20	5	100	1	70	2	0	5	4	1	14	3
13	Ennasr 1	55	3	100	1	100	1	100	1	9	2	8	2
14	Okba-jerfel	45	3	100	1	70	2	100	1	6	1	8	2
15	Ennasr 2	55	3	100	1	100	1	100	1	4	1	7	2
16	Ennasr Sud	20	5	100	1	80	1	0	5	15	2	14	3
17	Mansourah Nord	65	2	100	1	100	1	35	4	11	2	10	3
18	Mansourah Sud	25	4	100	1	60	2	0	5	11	2	14	3
19	Ëttaamir ibn jazzar	70	2	100	1	65	2	50	3	4	1	9	2
20	AFH-Mansourah	0	5	100	1	100	1	0	5	4	1	13	3
21	Keblia centre	50	3	100	1	100	1	40	3	14	3	11	3
22	Sidi saad-keblia	35	4	100	1	100	1	45	3	3	1	10	3
23	Keblia sud	35	4	100	1	90	1	0	5	9	2	13	3
24	Route de sousse	0	5	100	1	60	2	0	5	0	1	14	3
25	Ettaben	80	2	100	1	90	1	0	5	9	2	11	3
Min		0		0		0		0		0			5
Max		100		100		100		100		29			25
≠ Intervalles		20		20		20		20		6			5

* **Nombre d'impasses par quartier :** C'est un facteur d'accessibilité. Plus le nombre d'impasses est important plus la vulnérabilité est forte.

Tab.8.26. Etude de la vulnérabilité liée au voirie/réseau par quartier à la ville de Sidi Bouzid

N°	Zones de la ville	Voirie/Réseau								Σ	Vulnérabilité liée à la voirie / réseau
		Nombre d'impasses par quartier		% d'aménagement de la voirie		% de branchement au réseau d'Electricité		% de branchement au réseau d'Eau potable			
1	Brahmia	3	2	40	3	40	3	95	1	9	3
2	Centre ville	11	4	100	1	95	1	95	1	7	2
3	Cité de Professeurs	0	1	100	1	90	1	95	1	4	2
4	Cité de Sayeh	9	4	100	1	90	1	95	1	7	2
5	Cité El Hadayek	1	1	100	1	90	1	95	1	4	2
6	Cité El Kawefel	0	1	100	1	90	1	95	1	4	2
7	Cité El Khadra	7	3	100	1	90	1	95	1	6	2
8	Cité Ennour Est	12	5	50	3	60	2	95	1	11	3
9	Cité Ennour Ouest	2	1	90	1	100	1	95	1	4	2
10	Cité Enouamer	12	4	80	1	80	1	95	1	7	2
11	Cité l'Avenir	4	2	100	1	90	1	95	1	5	2
12	Cité Raouebi	3	2	100	1	90	1	95	1	5	2
13	Cité Yassminet	8	3	100	1	100	1	95	1	6	2
14	El Filahi	7	3	40	3	60	2	95	1	9	3
15	El Wouroud	6	3	40	3	60	2	95	1	9	3
16	Frayjia	1	1	50	3	95	1	95	1	6	2
17	Ouled Belhedi	16	5	80	1	95	1	95	1	8	3
18	Ouled Chelbi	12	5	70	2	70	2	95	1	10	3
19	Zone industrielle	2	1	100	1	95	1	95	1	4	2
Min		0		0		0		0			4
Max		16		100		100		100			20
≠ Intervalles		3		20		20		20			4

Le croisement entre les deux types de vulnérabilité précédemment cités permet de dégager pour chaque ville quatre classes de vulnérabilité : très faible, faible, moyenne et forte. Les quartiers les plus vulnérables sont celles de la Médina et la zone industrielle à Kairouan et de quartier El Wouroud à Sidi Bouzid.

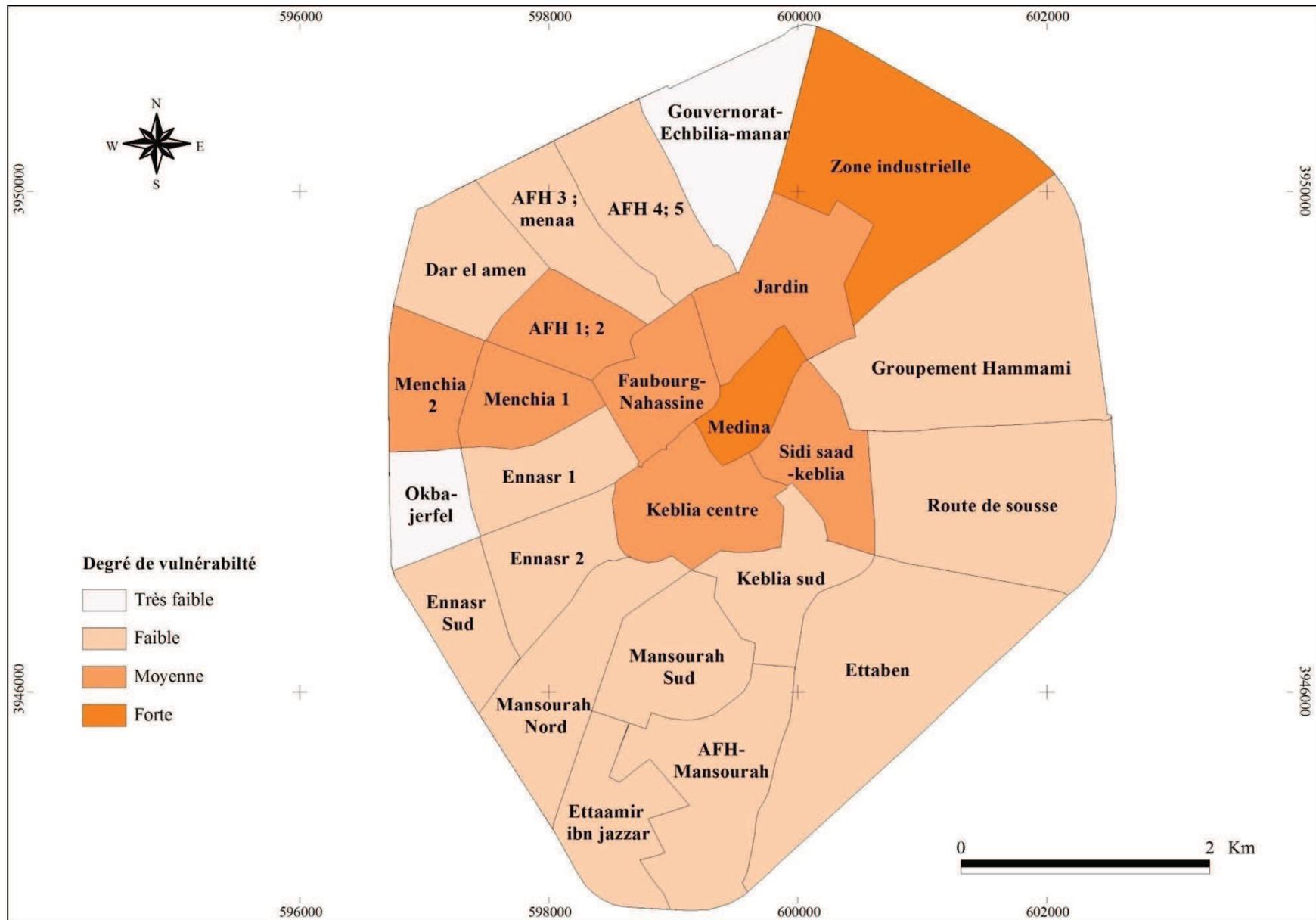


Figure 8.26: La vulnérabilité dans la ville de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

Tab.8.27. Matrice de la vulnérabilité

V. Bâti		Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très Fort
		1	2	3	4	5
V. Voirie/Réseau						
Très faible	1	1	2	3	4	5
Faible	2	2	4	6	8	10
Moyen	3	3	6	9	12	15
Fort	4	4	8	12	16	20
Très Fort	5	5	10	15	20	25

Vulnérabilité = Vulnérabilité liée au bâti × Vulnérabilité liée à la voirie / réseau

V. Bâti		Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très Fort
		1	2	3	4	5
V. Voirie/Réseau						
Très faible	1	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible	Faible
Faible	2	Très faible	Très faible	Faible	Faible	Moyen
Moyen	3	Très faible	Faible	Faible	Moyen	Fort
Fort	4	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très Fort
Très Fort	5	Faible	Moyen	Fort	Très Fort	Très Fort

L'analyse du tableau ci-dessous permet de constater la dominance de la classe de vulnérabilité faible pour les deux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid couvrant respectivement 63,84 % et 45,51%. On peut expliquer cela par le fort pourcentage de branchement aux différents types de réseaux qui permet de diminuer la vulnérabilité.

Tab.8.28. Répartition surfacique des classes de vulnérabilité dans les villes de Kairouan (1) et de Sidi Bouzid (2)

Classes	Intervalles	Superficie 1 en (ha)	%	Superficie 2 en (ha)	%
Très Faible	0 -5	193,58	6,51	255,8	22,45
Faible	5 - 10	1899,13	63,84	518,68	45,51
Moyenne	10 - 15	584,36	19,64	328,08	28,79
Forte	15 -20	297,64	10,01	37	3,25
Total	-	2974,71	100	1139,56	100

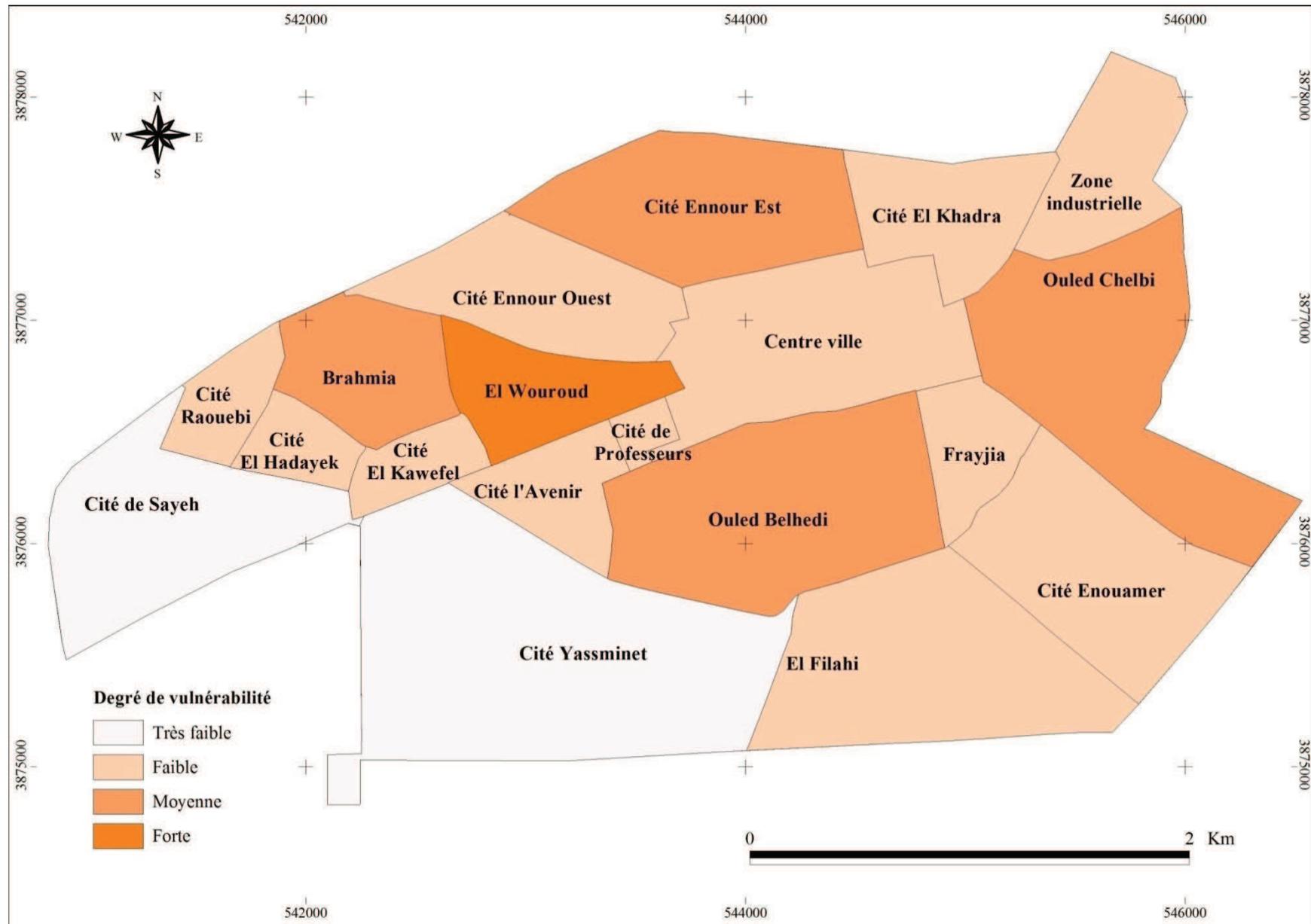


Figure 8.27: La vulnérabilité dans la ville de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

8-6- La capacité d'adaptation

Afin d'évaluer la capacité d'adaptation à l'échelle des villes de Kairouan et de Sidi Bouzid nous nous sommes basés sur deux facteurs :

Tab.8.29. Etude de la capacité d'adaptation par quartier à la ville de Kairouan

N°	Zones de la ville	% de branchement au réseau de drainage des eaux pluviales		% de branchement au réseau d'assainissement des eaux usées		Σ	Capacité d'adaptation
1	Medina	25	2	100	5	10	3
2	Jardin	75	4	90	5	20	5
3	Zone industrielle	25	2	100	5	10	3
4	Groupement Hammami	0	1	35	2	2	1
5	Faubourg-Nahassine	50	3	100	5	15	4
6	AFH 1; 2	50	3	100	5	15	4
7	Dar el amen	25	2	100	5	10	3
8	AFH 3 ; menaa	25	2	100	5	10	3
9	AFH 4; 5	50	3	100	5	15	4
10	Gouvernorat-Echbilia-manar	85	5	100	5	25	5
11	Menchia 1	50	3	95	5	15	4
12	Menchia 2	25	2	100	5	10	3
13	Ennasr 1	45	3	95	5	15	4
14	Okba-jerfel	25	2	100	5	10	3
15	Ennasr 2	45	3	100	5	15	4
16	Ennasr Sud	25	2	100	5	10	3
17	Mansourah Nord	50	3	100	5	15	4
18	Mansourah Sud	25	2	80	5	10	3
19	Ettaamir ibn jazzar	25	2	90	5	10	3
20	AFH-Mansourah	0	1	0	1	1	1
21	Keblia centre	50	3	100	5	15	4
22	Sidi saad-keblia	0	1	100	5	5	2
23	Keblia sud	70	4	100	5	20	5
24	Route de sousse	0	1	50	3	3	1
25	Ettaben	25	2	95	5	10	3
Min		0		0		2	
Max		100		100		25	
≠ Intervalles		20		20		5	

* **Pourcentage de branchement ou l'état de réseau d'évacuation des eaux pluviales** : C'est un facteur primordial pour évaluer la capacité d'adaptation d'une ville vis-à-vis le risque d'inondation.

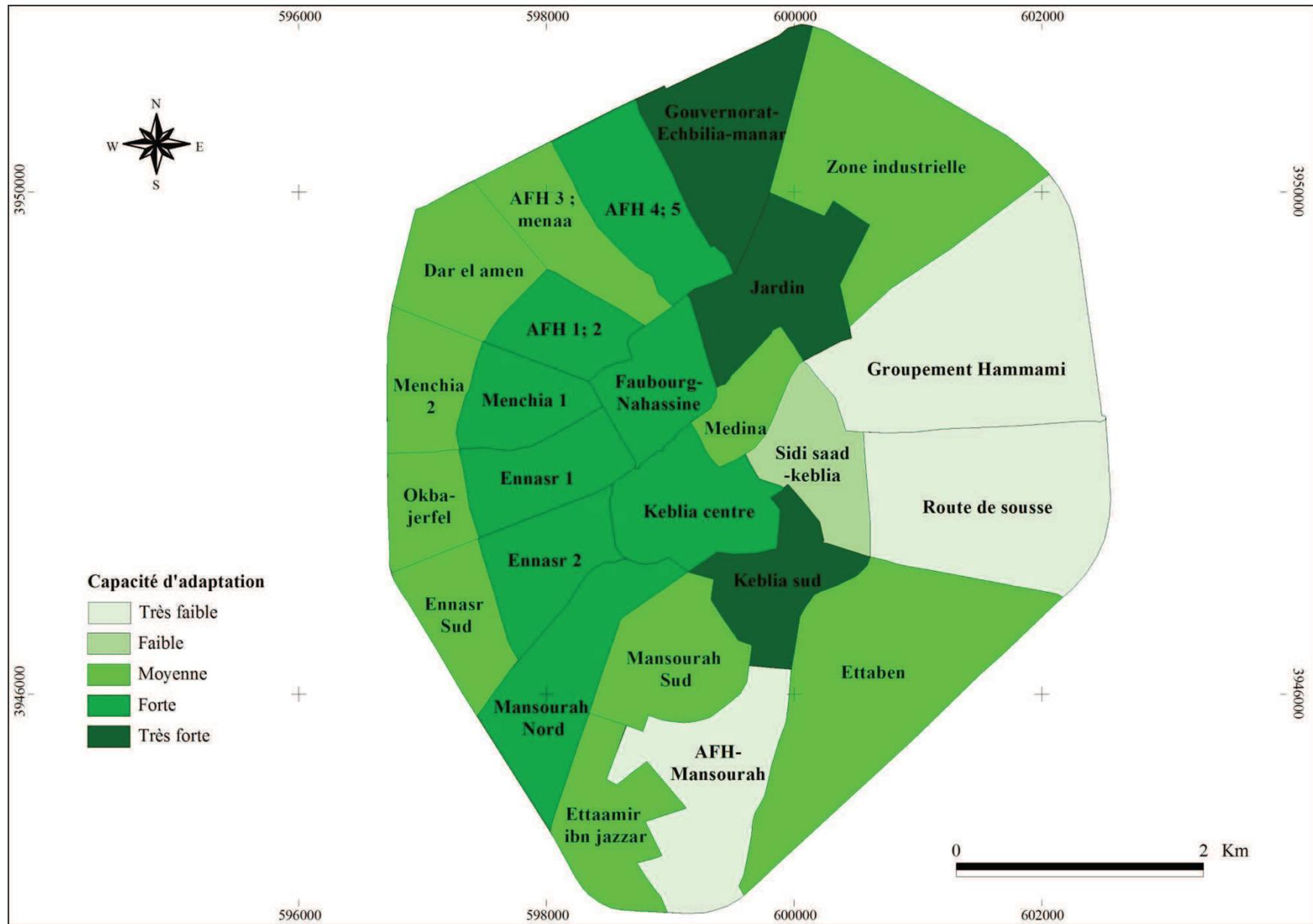


Figure 8.28: La capacité d'adaptation dans la ville de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

* **Pourcentage de branchement au réseau d'assainissement des eaux usées:** On a ajouté ce facteur car à l'absence d'un réseau d'évacuation des eaux pluviales, les eaux de pluies sont évacuées via un réseau d'assainissement.

Tab.8.30. Etude de la capacité d'adaptation par quartier à la ville de Sidi Bouzid

N°	Zones de la ville	Etat du réseau d'évacuation des eaux pluviales					% de branchement au réseau d'assainissement des eaux usées		Σ	Capacité d'adaptation
		Bon	Moyen	Mauvais	Inexistant	Code	%	Code		
1	Brahmia			X		2	90	5	10	3
2	Centre ville		X			3	95	5	15	4
3	Cité de Professeurs	X				4	90	5	20	5
4	Cité de Sayeh	X				4	95	5	20	5
5	Cité El Hadayek				X	1	95	5	5	2
6	Cité El Kawefel				X	1	95	5	5	2
7	Cité El Khadra				X	1	90	5	5	2
8	Cité Ennour Est				X	1	90	5	5	2
9	Cité Ennour Ouest				X	1	90	5	5	2
10	Cité Enouamer	X				4	95	5	20	5
11	Cité l'Avenir	X				4	90	5	20	5
12	Cité Raouebi				X	1	95	5	5	2
13	Cité Yassminet	X				4	90	5	20	5
14	El Filahi				X	1	95	5	5	2
15	El Wouroud			X		2	90	5	10	3
16	Frayjia		X			3	95	5	15	4
17	Ouled Belhedi		X			3	95	5	15	4
18	Ouled Chelbi				X	1	95	5	5	2
19	Zone industrielle		X			3	95	5	15	4
Min			-			1	0	1		5
Max			-			4	100	5		25
≠ Intervalles			-			1	20	1		5

Les quartiers ayant une capacité d'adaptation très forte sont ceux de Gouvernorat-Echbilia-manar, Jardin et Keblia sud à la ville de Kairouan et cités de professeurs, l'avenir, Sayeh, Yassminet et Enouamer à la ville de Sidi Bouzid.

Tab.8.31. Répartition surfacique de la capacité d'adaptation au risque inondation dans les villes de Kairouan (1) et de Sidi Bouzid (2)

Classes	Intervalles	Superficie 1 en (ha)	%	Superficie 2 en (ha)	%
Très Faible	0 -5	684,11	23	-	-
Faible	5 - 10	82,51	2,78	433,84	38,07
Moyenne	10 - 15	1151,28	38,7	78,18	6,86
Forte	15 -20	708,36	23,81	259,39	22,76
Très forte	20 - 25	348,45	11,71	368,15	32,31
Total	-	2974,71	100	1139,56	100

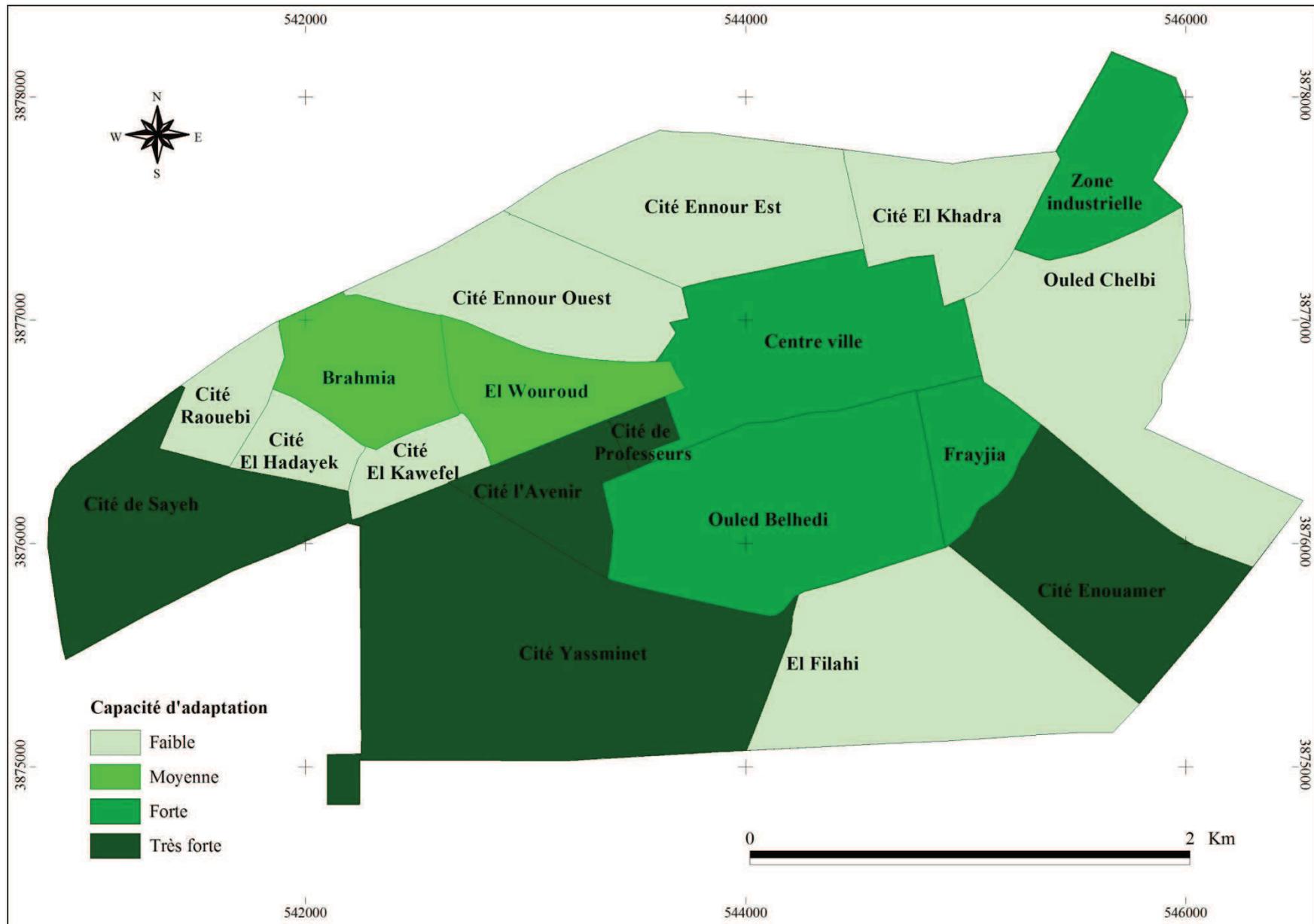


Figure 8.29: La capacité d'adaptation dans la ville de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

8-7- Cartographie de risque d'inondation à l'échelle de la ville

La méthodologie consiste à adapter l'équation de Defossez et al., (2018) pour le calcul du risque :

$$\text{Risque} = (\text{Vulnérabilité} \times \text{Enjeux} \times \text{Aléa}) / \text{Capacité d'adaptation}$$

En effet, nous avons essayé de modifier l'équation afin de calculer plutôt le risque résiduel, et ce pour 2 raisons majeures :

$$\text{Risque}_{(\text{Résiduel})} = (\text{Vulnérabilité} \times (\text{Enjeux} \times \text{Aléa})) - \text{Capacité d'adaptation}$$

=

$$\text{Risque}_{(\text{Résiduel})} = (\text{Vulnérabilité} \times \text{Exposition}) - \text{Capacité d'adaptation}$$

* Si la capacité de réponse et d'adaptation est nulle, l'équation n'aura pas de sens.

* La deuxième raison est étroitement liée à la qualité du produit final qui est la carte de risque. L'équation du risque résiduel donne des résultats meilleurs et très proches de la réalité terrain.

L'examen des cartes (Fig.8.30 et 8.31), laisse voir que le risque d'inondation est fort à très fort au niveau des quartiers Menchia 1 et2, Kebliia centre, la Medina, Sidi Saad Kebliia et la zone industrielle à la ville de Kairouan et les quartiers d'El Wouroud, d'Ouled Chelbi et cité Ennour Est à la ville de Sidi Bouzid. Ces niveaux de risque ne représentent qu'environ 10% de la superficie totale des deux villes, (Tab.8.32).

Tab.8.32. Répartition surfacique du risque inondation dans les villes de Kairouan (1) et de Sidi Bouzid (2)

Classes	Superficie 1 en (ha)	%	Superficie 2 en (ha)	%
Très Faible	792,60	26,64	501,85	44,04
Faible	1342,47	45,13	348,85	30,61
Moyen	522,39	17,56	182,44	16,01
Fort	283,14	9,52	58,19	5,11
Très fort	34,11	1,15	48,23	4,23
Total	2974,71	100	1139,56	100

Conclusion

En guise de conclusion on peut dire que pour aboutir à une cartographie fiable du risque d'inondation à macro-échelle il nous faut une gamme variée de données. Dans ce chapitre nous nous sommes basés sur divers types de données afin de cartographier les différents paramètres nécessaires à établir une carte de risque synthétique, à savoir : La vulnérabilité, les enjeux, l'aléa et la capacité d'adaptation. Les résultats obtenus sont acceptables par rapport à la réalité terrain. En ce qui suit nous essaierons d'affiner l'échelle de la cartographie du risque en passant de la ville au quartier.



Figure 8.30: Risque d'inondation dans la ville de Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

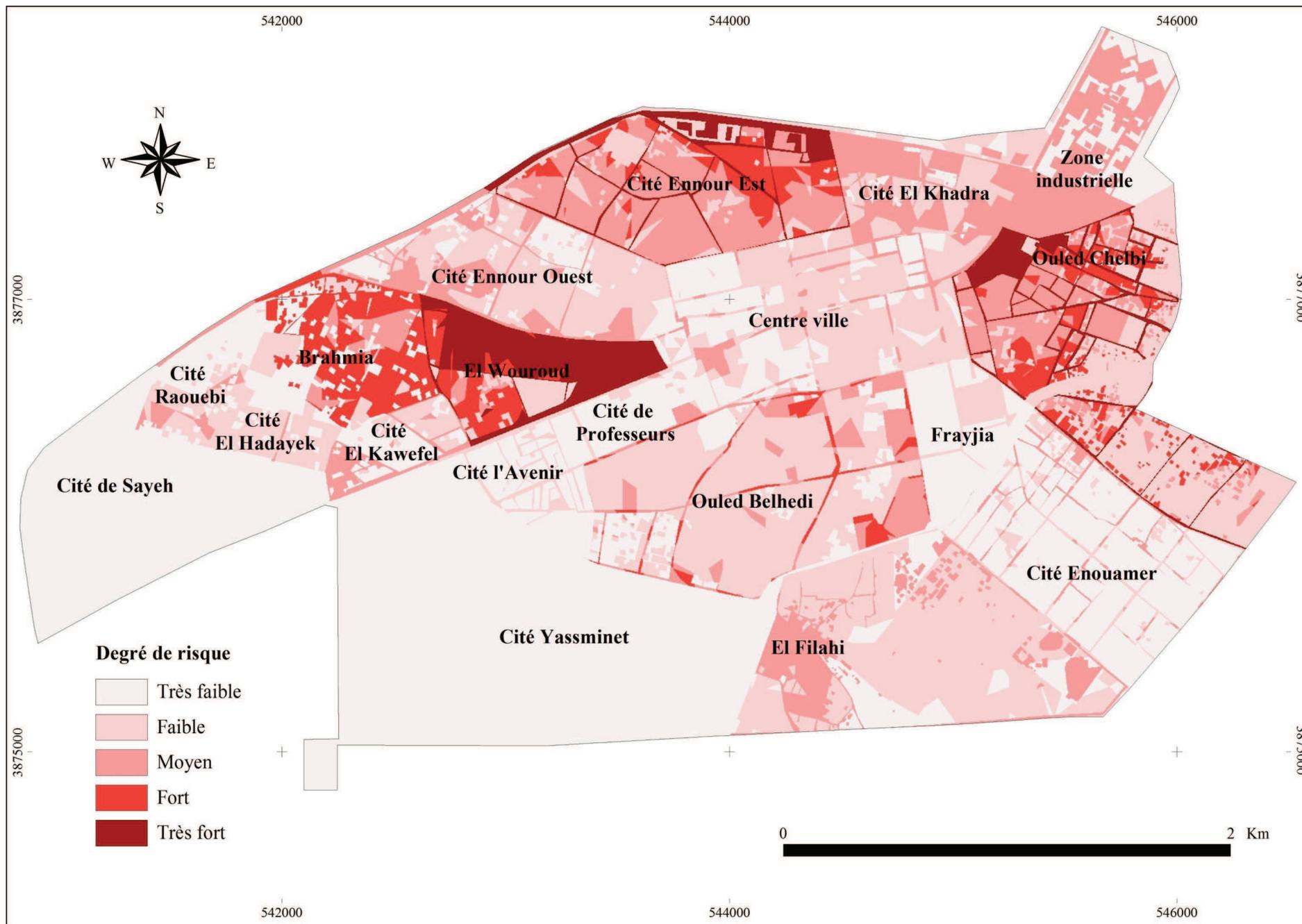


Figure 8.31: Risque d'inondation dans la ville de Sidi Bouzid (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

Chapitre 9

Diagnostic du risque inondation à Micro – échelle : Application sur les quartiers Mansourah Nord à Kairouan et Ouled Chelbi à Sidi Bouzid

Introduction

Cartographier le risque d'inondation à l'échelle du quartier est une étape importante. Elle vise à affiner le résultat final en multipliant les observations de terrain pour réaliser essentiellement les cartes de la vulnérabilité et de la capacité d'adaptation. Dans ce chapitre, il s'agit de cartographier le risque d'inondation dans deux quartiers types, celui de Mansourah Nord à Kairouan et d'Ouled Chelbi à Sidi Bouzid.

9-1- Cartographie du risque d'inondation au quartier de Mansourah Nord (ville de Kairouan)

La cartographie du risque d'inondation à l'échelle du quartier nécessite la combinaison de plusieurs facteurs, à savoir :

9-1-1- la pente et l'aléa induit

Le quartier de Mansourah Nord se caractérise par la dominance des pentes très faibles qui favorisent la stagnation des eaux pluviales. Ces pentes n'excèdent guère le 1% et couvrent environ 55,9 % de la superficie totale du quartier, (Tab.9.1).

Tab.9.1: Répartition surfacique des classes de pente dans le quartier de Mansourah Nord à la commune Kairouan

Classes de pente	Intervalles de pente (%)	Superficie en (ha)	%
Très faible	0 - 1	71,60	55,93
Faible (1)	1 - 2	44,06	34,42
Faible (2)	2 - 4	10,85	8,48
Moyenne	> 4	1,50	1,17
Total	-	128,01	100

L'examen de la carte des pentes et de l'aléa induit laisse voir la prédominance de la classe d'aléa fort qui s'étale sur environ la moitié de la superficie du quartier, couvrant près de 60,53 ha, (Tab.9.2).

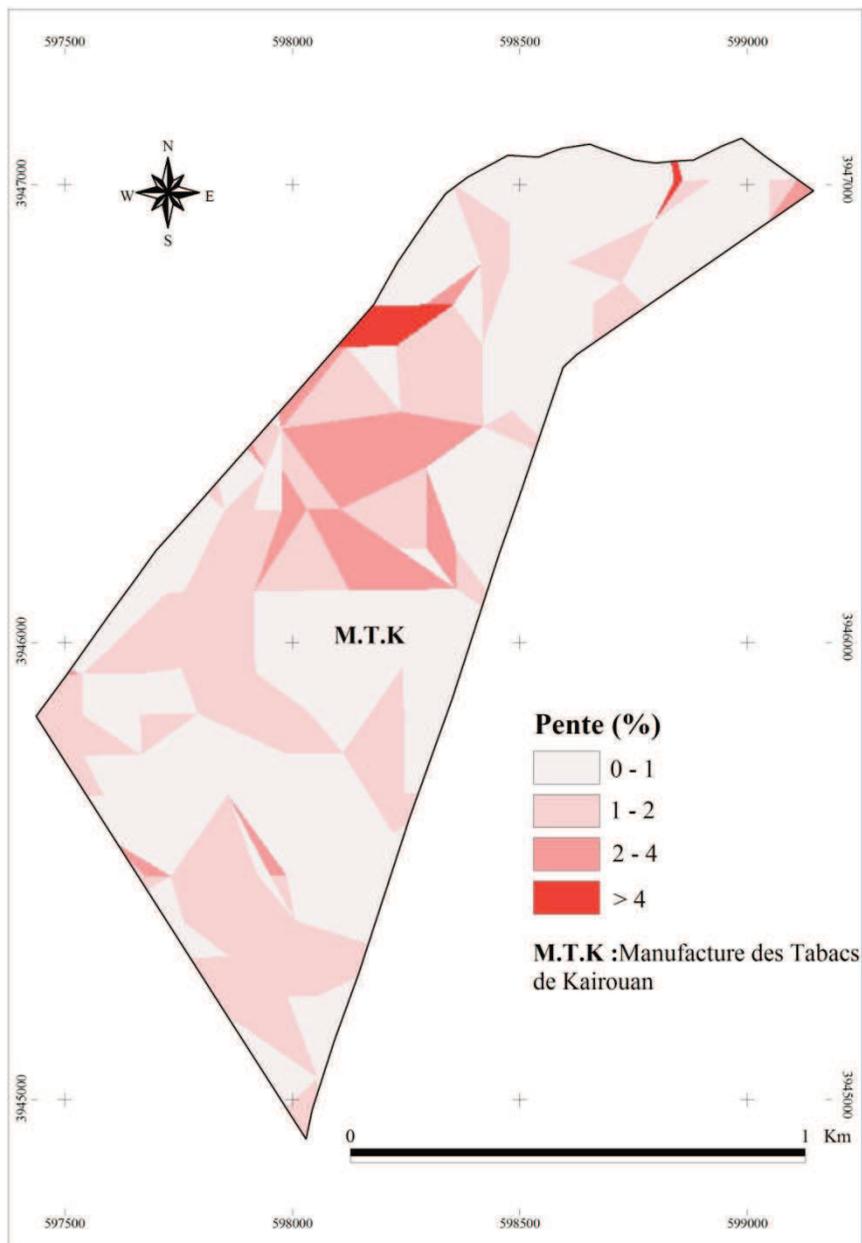


Figure. 9.1: Les classes de pente dans le quartier Mansourah Nord à Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019 ; d'après la carte des pentes de la ville de Kairouan).

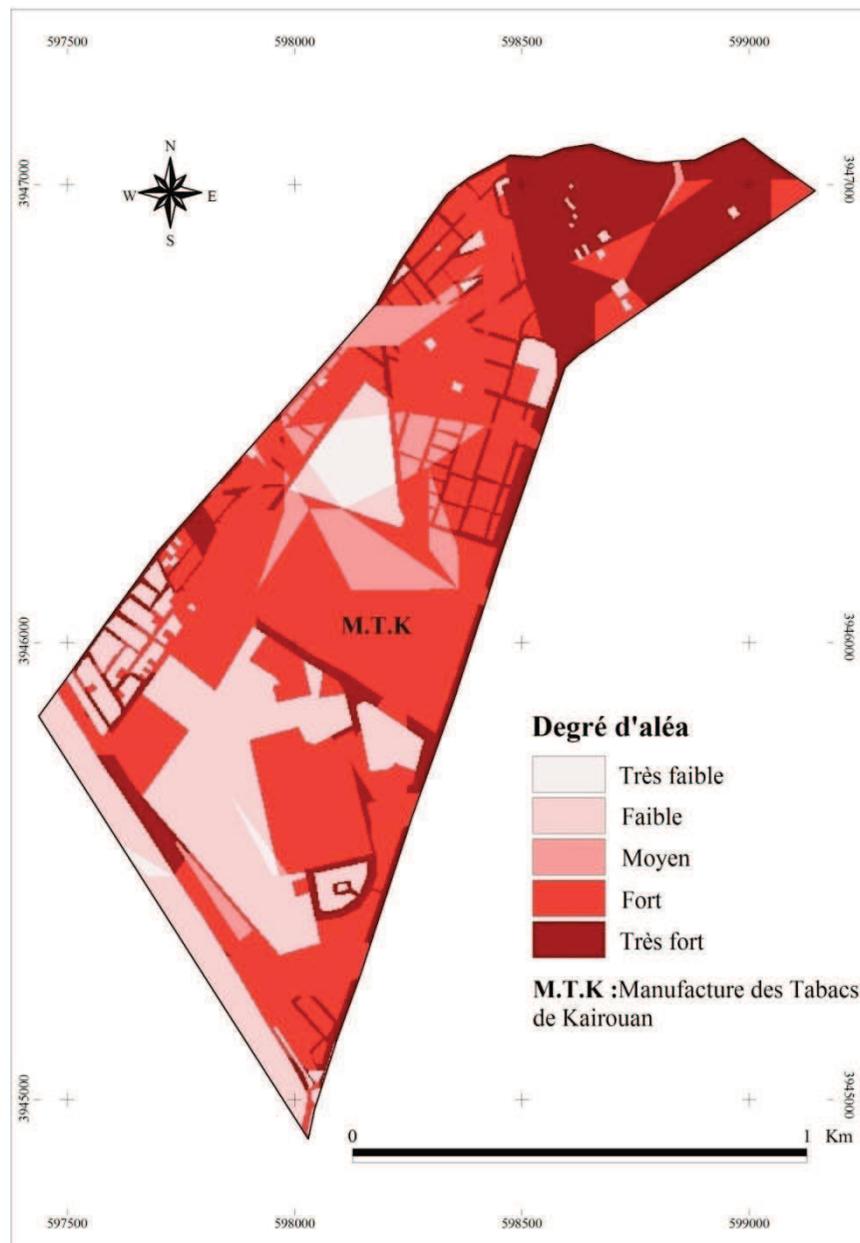


Figure. 9.2: L'aléa dans quartier Mansourah Nord à Kairouan (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

Tab.9.2: Répartition surfacique du degré d'aléa dans le quartier de Mansourah Nord à la commune Kairouan

Classes de l'aléa	Intervalles de l'aléa	Superficie en (ha)	%
Très faible	0 - 5	3,31	2,59
Faible	5 - 10	29,02	22,67
Moyen	10 - 15	8,22	6,42
Fort	15 -20	60,53	47,28
Très fort	20 - 25	26,93	21,04
Total	-	128,01	100

9-1-2-Carte des enjeux

À partir du plan d'aménagement urbain de Kairouan les types d'occupation du sol au quartier de Mansourah Nord ont été déduits. À chaque type d'occupation, une valeur a été attribuée, variant de 1 à 5, afin de faciliter la représentation spatiale des enjeux, (Fig.9.3).

Tab.9.3. Répartition des types d'occupation selon leur place dans la hiérarchie des enjeux dans le quartier de Mansourah Nord (ville de Kairouan)

Type d'occupation du sol au quartier Mansourah Nord	Enjeux
Equipements publics	5
Zones d'activités industrielles non polluantes	5
Zones d'habitat individuel en bande continue	3
Zones d'habitat individuel groupé	3
Zones d'habitat individuel isolé et jumelé	4
Zones polyfonctionnelles continues denses	4
Zones polyfonctionnelles groupées denses	5
Fonciers non bâtis	1
Zones vertes aménagées	2
Rues et voies urbaines	5
Min	1
Max	5
≠ Intervalles	1

La classe des espaces à enjeux très forts est dominante dans le quartier de Mansourah Nord, (Tab.9.4). Elle couvre une superficie de 71,6 ha.

Tab.9.4: Répartition surfacique des classes d'enjeux dans le quartier de Mansourah Nord à la commune Kairouan

Classes	Superficie en (ha)	%
Très Faible	32,32	25,25
Faible	0,57	0,45
Moyen	19,68	15,37
Fort	3,85	3,01
Très fort	71,59	55,92
Total	128,01	100

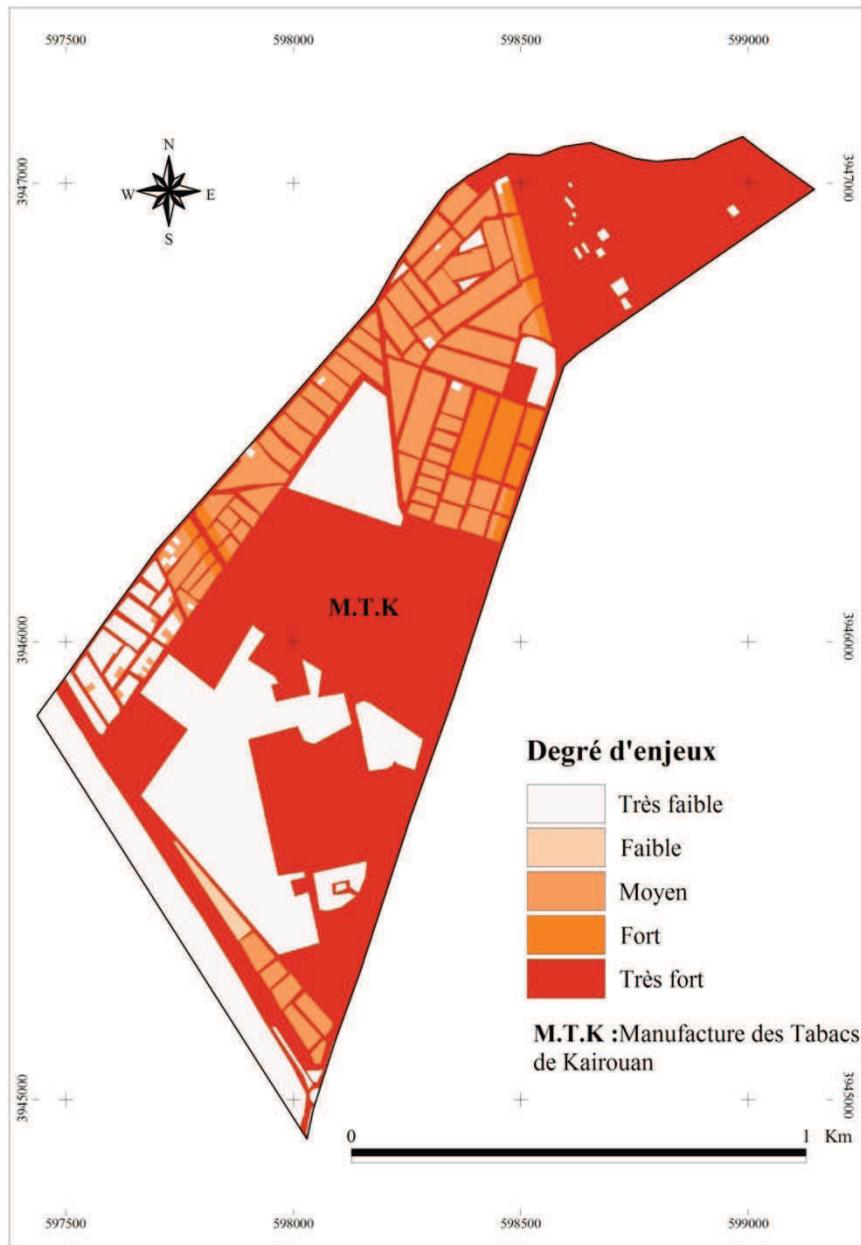


Figure. 9.3: Les classes d'enjeux dans le quartier Mansourah Nord dans la ville de Kairouan (**Source** : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

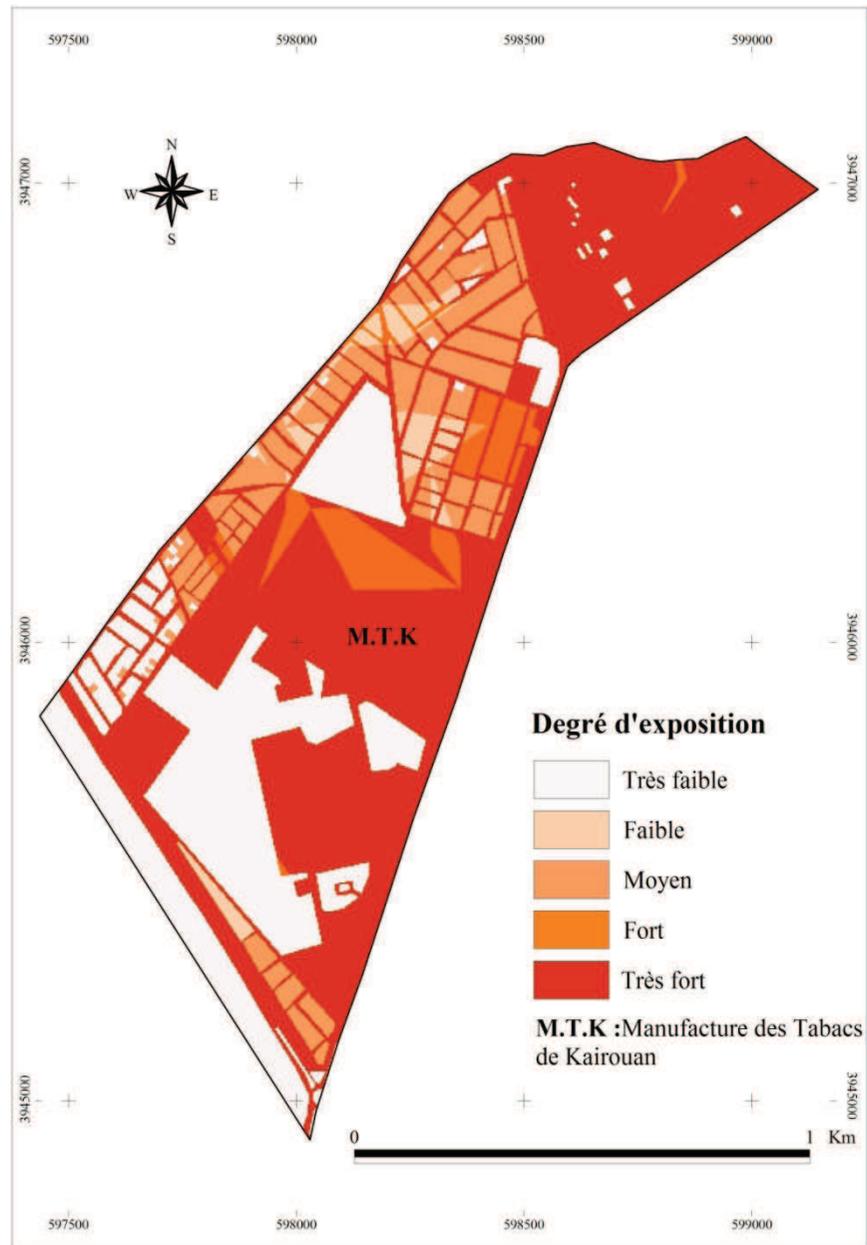


Figure. 9.4: L'exposition dans le quartier Mansourah Nord dans la ville de Kairouan (**Source** : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

9-1-3-Carte d'exposition

L'analyse de la carte d'exposition du quartier Mansourah Nord permet de déduire 5 classes d'exposition. La classe dominante est celle d'exposition très forte qui s'étale sur environ 68,4 % de la superficie totale du quartier.

Tab.9.5: Répartition surfacique de degré d'exposition des enjeux dans le quartier de Mansourah Nord à la commune Kairouan

Classes	Intervalles	Superficie en (ha)	%
Très Faible	0 - 5	32,29	25,22
Faible	5 -10	3,65	2,85
Moyen	10 - 15	16,78	13,11
Fort	15 -20	6,88	5,38
Très fort	20 - 25	68,41	53,44
Total	-	128,01	100

9-1-4-Carte de vulnérabilité au risque d'inondation à l'échelle du quartier Mansourah Nord

Une combinaison d'un nombre de critères a été utilisée afin de cartographier la vulnérabilité au risque d'inondation à l'échelle du quartier Mansourah. Ces critères sont le résultat des observations sur terrain à la recherche de la réalité la plus concrète. La figure 9.6 et le tableau 9.6 indiquent les secteurs visités. Au total, six critères ont été pris en considération, à savoir :

* **La situation du rez-de-chaussée par rapport au niveau de la route d'en face:** trois situations de rez-de-chaussée ont été répertoriées:

- **Un rez-de-chaussée au dessus du niveau de la route :** La maison est à l'abri du risque d'inondation.

- **Un rez-de-chaussée au même niveau de la route :** Une vulnérabilité moyenne vis-à-vis le risque d'inondation.

- **Un rez-de-chaussée au dessous du niveau de la route :** Engendre la pénétration des eaux pluviales à l'intérieur des maisons ce qui augmente leur vulnérabilité.

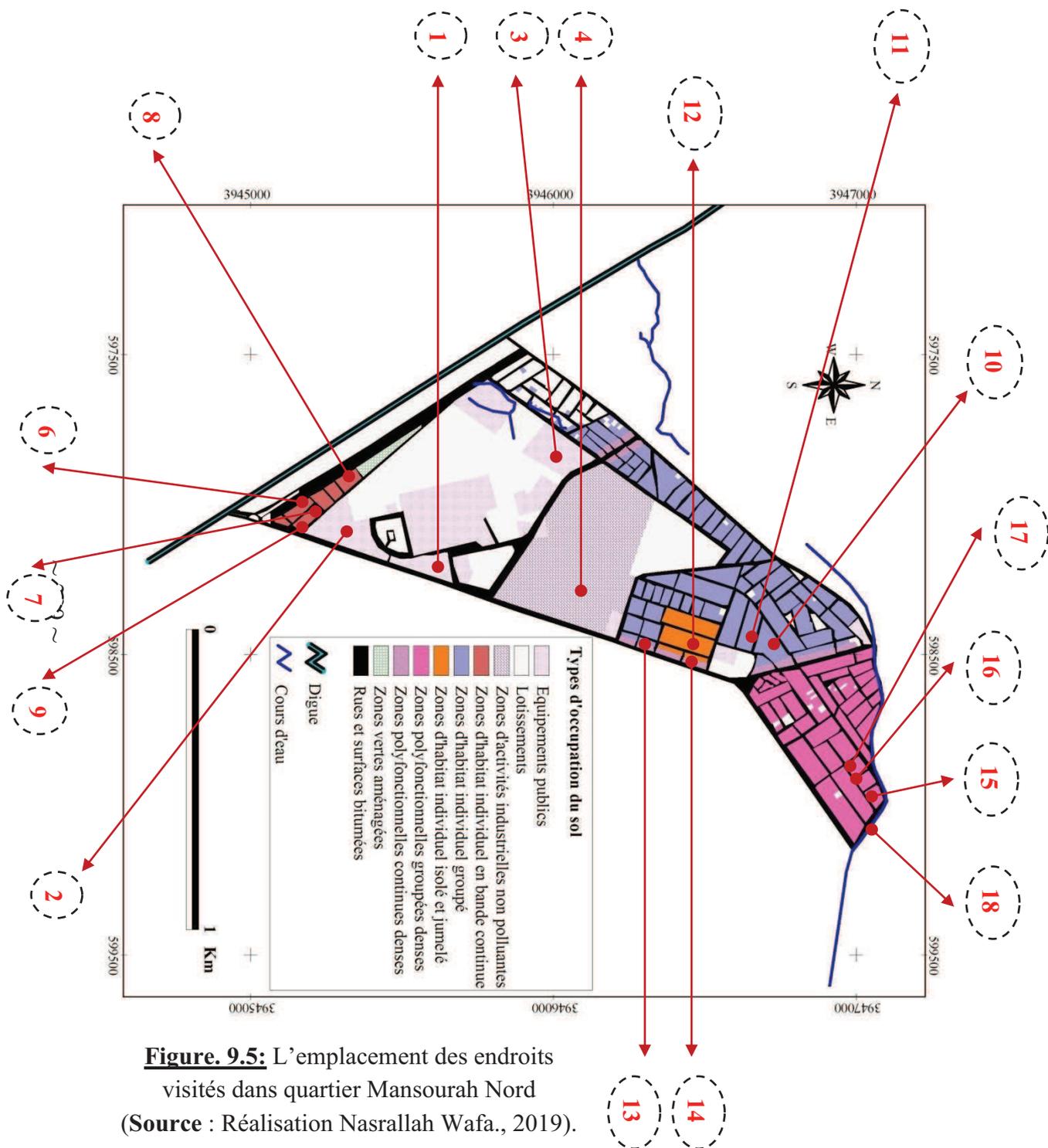
* **Existence ou absence d'un moyen d'évacuation par les airs :** C'est un indice qui permet de diminuer la vulnérabilité du bâti.

* **Nature et état des murs extérieurs :** La vulnérabilité est inversement proportionnelle à l'état des murs. Les murs en bon état permettent de diminuer la vulnérabilité du bâti.

* **Existence d'un mur de clôture extérieur :** Son existence permet de renforcer la protection du bâti.

* **Nombre d'ouvertures d'accès pour chaque étage :** Reflète la possibilité d'évacuer les habitants lors des inondations. Un nombre important d'ouvertures permet de diminuer la vulnérabilité face au risque d'inondation.

* **Branchement du logement aux réseaux (Eau potable et électricité) :** Comme il a été déjà précisé dans le chapitre antérieur, ce critère représente un indicateur de richesse du bâti. La vulnérabilité du bâti est importante si le taux de branchement est réduit.



Tab.9.6.Étude de la vulnérabilité du quartier Mansourah Nord vis-à-vis du risque d'inondation

Type d'occupation du sol	Description P,A,U et observations sur terrain	Clichés	Vue panoramique (Extrait Google Earth)
<p>Equipements publics</p>	<p>Ce sont des équipements à caractère administratif, culturel, éducatif... Leur coefficient d'occupation du sol (C.O.S) pourra atteindre 0,5 (soit la moitié de la superficie est urbanisée). Les clôtures en maçonnerie pleine avec des hauteurs variant entre 2 à 3 mètres. Ces clôtures intègrent un porche d'entrée généralement en métal.</p> <p>Ces équipements sont situés au même niveau (Photos : 1 et 2) et parfois au-dessus du niveau de la route (Photo : 3). Ils peuvent contenir plusieurs étages avec des nombreuses ouvertures.</p> <p>Ils sont branchés aux différents types de réseaux (Assainissement, eau potable, électricité...). La majorité de ces équipements public, au quartier El Mansourah, sont installés tout le long de l'Avenue de Beit El Hikma qui est équipé d'un réseau d'évacuation des eaux pluviales.</p> <p>Les murs extérieurs sont en très bon état.</p> <p><u>C'est un enjeu de très grande importance (Niveau</u></p>	 <p><u>Lycée Okba Ibn Nafaâ</u></p>	
	 <p><u>Centre des Etudes Islamiques de Kairouan</u></p>		

	<p><u>5).</u></p>	 <p><u>Collège Beit El Hikma</u></p>	
<p>Zones d'activités industrielles non polluantes</p>	<p>Ce sont des zones dont l'éloignement des habitations n'est pas rigoureusement nécessaire et qui ne présentent pas des inconvénients graves ni pour la santé publique, ni pour le voisinage...</p> <p>Elles sont raccordées aux différents réseaux publics : d'électricité, d'eau potable, d'assainissement et d'eaux pluviales... La hauteur maximale est fixée à 12 mètres, soit R+2 avec une clôture de façade d'une</p>	 <p><u>Manufacture des Tabacs de Kairouan</u></p>	

hauteur de **1,8 mètre (Photo : 5)**. Le coefficient d'occupation du sol est de **0,4** (Parmi les 60% des parties non construites 20% au moins sont des espaces plantés et gazonnés.

À Kairouan, il s'agit de la Manufacture des Tabacs de Kairouan (MTK), crée le 2 Mars 1981. Il couvre une superficie de 22 Hectares et emploie 689 salariés.

Le portail principal est situé au même niveau de la route (**Photo : 4**). Les murs extérieurs sont en **très bon état**.

C'est un enjeu de très grande importance (Niveau 5).



Zones d'habitat individuel en bande continue

C'est **une zone résidentielle** d'habitat individuel en bande continue. Le coefficient d'occupation du sol est fixé à **0,6** par le règlement de l'urbanisme mais sur la réalité terrain il est de l'ordre de **1**.

L'hauteur maximale est de **R+2, soit 12 mètres**. Ce genre d'habitat contient plusieurs ouvertures. Les murs extérieurs sont en **très bon état**. Elles sont raccordées **aux différents réseaux publics**.

En revanche, on observe une absence d'un mur de clôture extérieur et de réseau d'évacuation des eaux pluviales.

La majorité des habitats sont situés au-dessus du niveau de la route, on observe **des travaux de rehaussement** sous forme des escaliers devant les portes principales (**Photo : 6 et 8**), ainsi que des canaux d'évacuation des eaux de toiture (**Photo : 7**). Ces aménagements particuliers pour l'adaptation du logement au risque inondation reflète la conscience des citoyens.

C'est une zone d'habitat de moyenne densité de **30 à 40 logements** à l'hectare.



C'est un enjeu de moyenne importance (Niveau 3).



Zones d'habitat individuel groupé

C'est une **zone résidentielle** d'habitat individuel généralement à l'ordre groupé. Le coefficient d'occupation du sol est fixé à **0,75** par le règlement de l'urbanisme mais il peut atteindre **1** sur la réalité terrain.

L'hauteur maximale est de **R+2, soit 12 mètres**. Ce genre d'habitat contient plusieurs ouvertures. Les murs extérieurs sont en **très bon état**. Elles sont raccordées **aux différents réseaux publics**.

En outre, on observe une



	<p>absence d'un mur de clôture extérieur et de réseau d'évacuation des eaux pluviales.</p> <p>La majorité des habitats sont situés au-dessus du niveau de la route, on observe des travaux de rehaussement sous forme des escaliers devant les portes principales (Photo : 10).</p> <p>C'est une zone d'habitat d'assez forte densité de 40 à 60 logements à l'hectare.</p> <p><u>C'est un enjeu de moyenne importance (Niveau3).</u></p>		
<p>Zones d'habitat individuel isolé et jumelé</p>	<p>C'est une zone résidentielle d'habitat individuel de faible densité, de type généralement isolé ou jumelé. L'habitat isolé s'étend sur une superficie minimale de 400 m² avec un C.O.S est de 0,3 alors que pour l'habitat jumelé, la superficie est de l'ordre de 300 m² et le C.O.S est de 0,4.</p> <p>L'hauteur maximale est de R+2, soit 12 mètres. Ce genre d'habitat contient plusieurs ouvertures. Les murs extérieurs sont en très bon état. Elles sont raccordées aux différents réseaux publics.</p> <p>Le porte principale d'entrée sur la rue de 1,8 mètre de hauteur est située au-dessus de niveau de la route (Photo : 12).</p>		

	<p>On observe l'existence d'un mur de clôture extérieur en maçonnerie pleine, en très bon état ainsi que l'absence de réseaux d'évacuation des eaux pluviales.</p> <p><u>C'est un enjeu de grande importance (Niveau 4).</u></p>		
<p>Zones polyfonctionnelles continues denses</p>	<p>Ce sont des zones polyfonctionnelles assez denses constituées d'habitat, de commerces et de services.</p> <p>Le coefficient d'occupation du sol est fixé à 0,75 par le règlement de l'urbanisme mais sur la réalité terrain il est de l'ordre de 1.</p> <p>L'hauteur maximale est de R+3, soit 15 mètres. Ces zones contiennent plusieurs ouvertures. Les murs extérieurs sont en très bon état. Elles sont raccordées aux</p>		

	<p>différents réseaux publics.</p> <p>Elles comprennent les axes structurants, Pour le quartier d'El Mansourah, elles sont situées tout le long de l'Avenue de Beit El Hikma.</p> <p><u>C'est un enjeu de grande importance (Niveau 4).</u></p>		
<p>Zones polyfonctionnelles groupées denses</p>	<p>Ce sont des zones polyfonctionnelles denses. Le tissu urbain correspondant est de type traditionnel d'ordre groupé dont la hauteur maximale ne doit pas dépasser R+4, soit 18 mètres.</p> <p>Le coefficient d'occupation du sol est fixé à 0,75 par le règlement de l'urbanisme mais sur la réalité terrain il peut atteindre 1 (Photo : 17).</p> <p>La majorité des habitats sont situés au-dessus du niveau de la route, on observe des travaux de rehaussement sous forme des escaliers devant les portes</p>		

principales ainsi que des canaux d'évacuation des eaux de toiture (**Photo : 16**).

On observe aussi l'existence des maisons avec **un mur de clôture extérieur** en maçonnerie pleine, en très bon état (**Photo : 15 et 17**).

Outre, il faut signaler l'absence de réseaux d'évacuation des eaux pluviales ainsi que **la proximité de ces zones à un oued** en partie canalisé et l'autre partie est enterrée.

C'est un enjeu de très grande importance (Niveau 5).



Section d'oued aménagée

Tab.9.7. Etude de la vulnérabilité au risque d'inondation au quartier Mansourah Nord à la ville de Kairouan

Type d'occupation du sol à quartier Mansourah Nord	Situation du rez-de-chaussée par rapport au niveau de la route	Existence d'un moyen d'évacuer par les airs	Nature et état des murs extérieurs	Existence d'un mur de clôture extérieur	Nombre d'ouvertures pour chaque étage	Branchement du logement aux réseaux (eau potable et électricité)	Σ	Vulnérabilité
Equipements publics	2	1	1	1	1	1	7	2
Zones d'activités industrielles non polluantes	3	1	1	1	1	1	8	2
Zones d'habitat individuel en bande continue	1	1	1	5	1	1	10	2
Zones d'habitat individuel groupé	1	1	1	5	1	1	10	2
Zones d'habitat individuel isolé et jumelé	1	1	1	1	1	1	6	2
Zones polyfonctionnelles continues denses	1	1	1	5	1	1	10	2
Zones polyfonctionnelles groupées denses	1	1	1	3	1	1	8	2
Fonciers non bâtis	-	-	-	-	-	-	-	1
Zones vertes aménagées	-	-	-	-	-	-	-	1
Rues	-	-	-	-	-	-	-	3
Min	1	1	1	1	1	1	6	
Max	5	5	5	5	5	5	30	
≠ Intervalles	1	1	1	1	1	1	6	

L'analyse de la répartition surfacique des classes de vulnérabilité dans le quartier de Mansourah Nord (Tab.9.8), permet de dégager trois classes de vulnérabilité : Très faible, faible et moyenne. La classe dominante est celle de la vulnérabilité faible qui couvre plus de la moitié de la superficie totale du quartier.

Tab.9.8: Répartition surfacique des classes de vulnérabilité dans le quartier de Mansourah Nord à la commune Kairouan

Classes	Intervalles	Superficie en (ha)	%
Très Faible	0 -5	32,9	25,7
Faible	5 - 10	69,35	54,18
Moyenne	10 - 15	25,76	20,12
Total	-	128,01	100

9-1-5-Carte de capacité d'adaptation

Pour l'étude de la capacité d'adaptation à l'échelle du quartier Mansourah Nord, un nouveau critère a été ajouté. Il est exprimé par le degré d'adaptation du logement au risque d'inondation par des aménagements particuliers ou non.

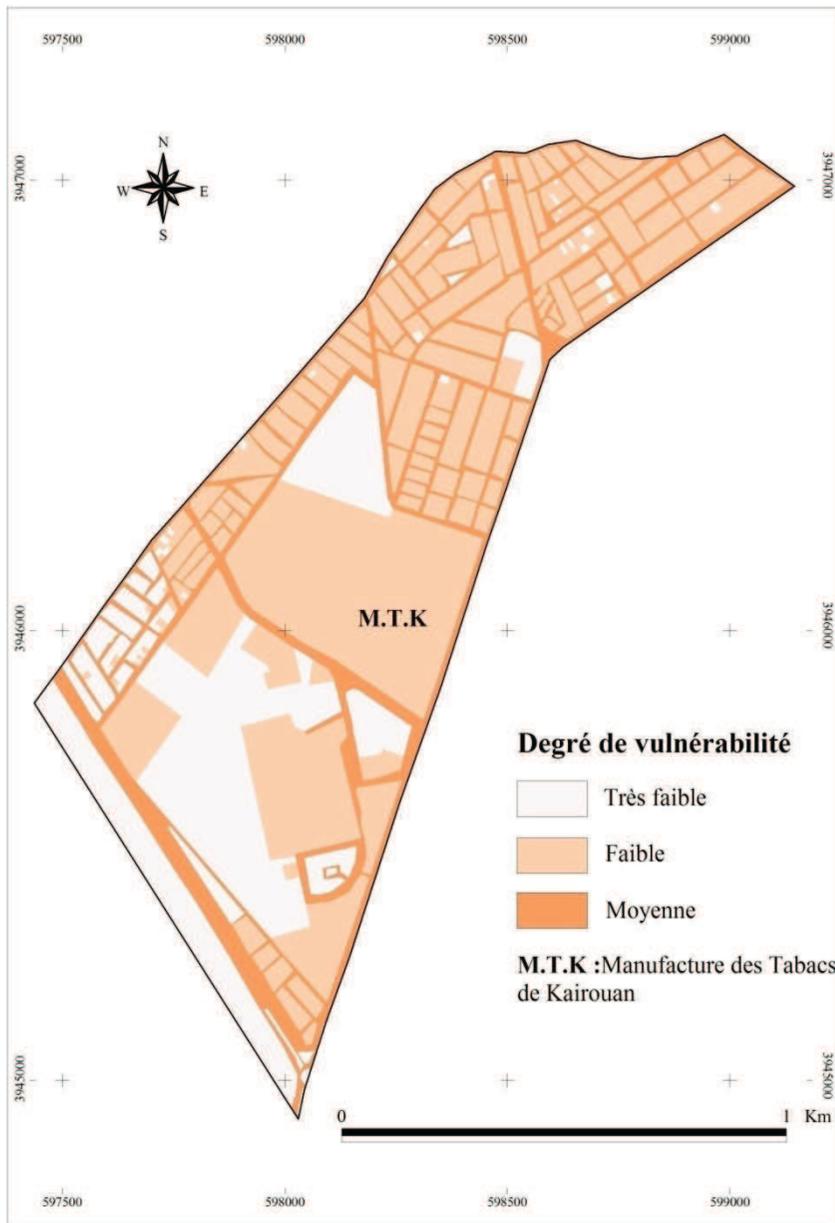


Figure. 9.6: La vulnérabilité au risque d’inondation dans le quartier Mansourah Nord (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

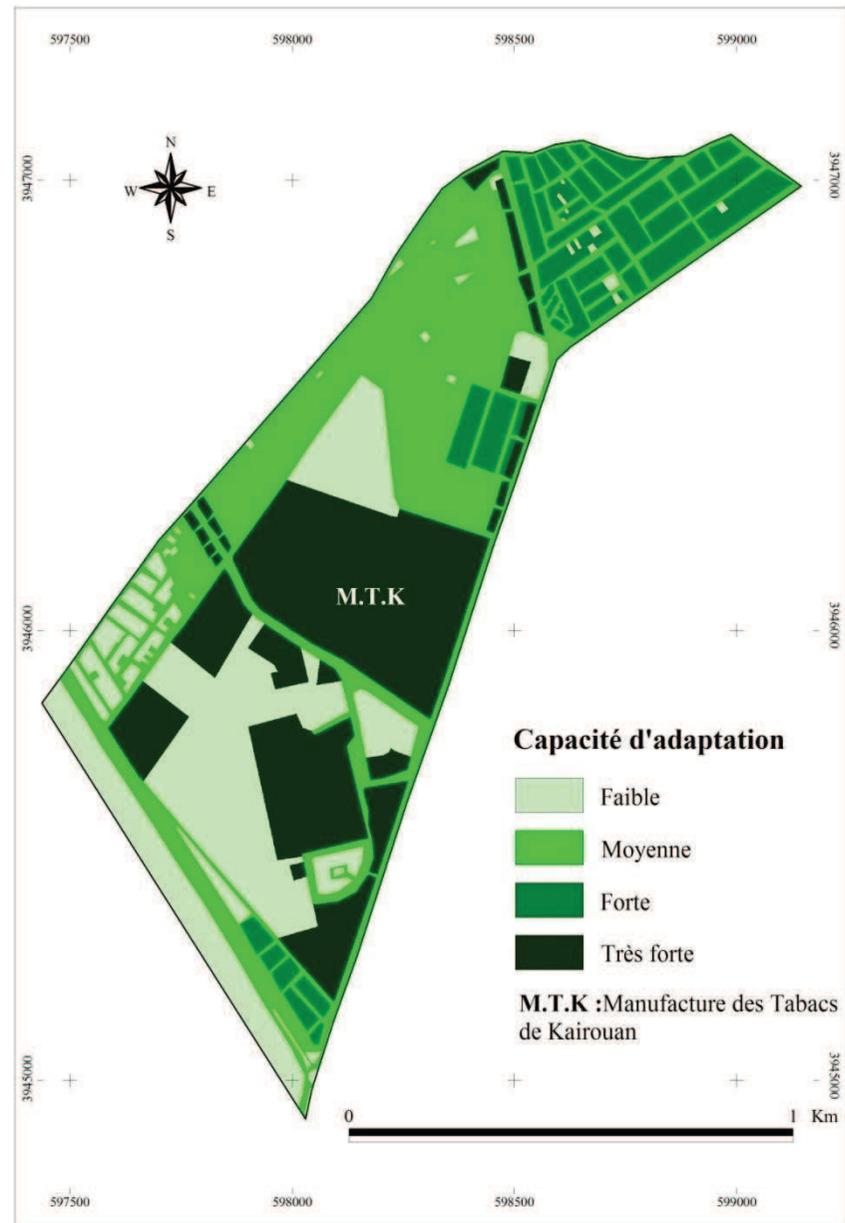


Figure. 9.7: La capacité d’adaptation dans le quartier Mansourah Nord au risque d’inondation (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

Tab.9.9. Etude de la capacité d'adaptation au quartier Mansourah Nord dans la ville de Kairouan

Type d'occupation du sol à quartier Mansourah Nord	Adaptation du logement au risque inondation par des aménagements particuliers	Branchement ou proximité du logement à un réseau d'évacuation des eaux pluviales	Branchement au réseau d'assainissement des eaux usées	Σ	Capacité d'adaptation
Equipements publics	5	2	5	12	5
Zones d'activités industrielles non polluantes	5	3	5	13	5
Zones d'habitat individuel en bande continue	1	3	5	9	4
Zones d'habitat individuel groupé	1	1	5	7	3
Zones d'habitat individuel isolé et jumelé	1	3	5	9	4
Zones polyfonctionnelles continues denses	5	2	5	12	5
Zones polyfonctionnelles groupées denses	3	3	5	11	4
Fonciers non bâtis	-	-	-	-	2
Zones vertes aménagées	-	-	-	-	2
Rues	-	-	-	-	3
Min	1	1	1		3
Max	5	5	5		15
≠ Intervalles	1	1	1		3

Les types d'occupation du sol à très forte capacité d'adaptation au quartier Mansourah Nord sont essentiellement : Les équipements publics, les zones d'activités industrielles non polluantes et les zones polyfonctionnelles continues denses. Cette catégorie couvre environ 35,51 ha soit 27,74 % de la superficie totale du quartier, (Tab.9.10).

Tab.9.10: Répartition surfacique de la capacité d'adaptation au risque inondation dans le quartier de Mansourah Nord à la commune de Kairouan

Classes de la capacité d'adaptation	Intervalles de la capacité d'adaptation	Superficie en (ha)	%
Faible	5 - 10	32,9	25,7
Moyenne	10 - 15	43,92	34,31
Forte	15 -20	15,68	12,25
Très forte	20 - 25	35,51	27,74
Total	-	128,01	100

9-1-6-Carte du risque d'inondation

L'examen de la carte du risque d'inondation au quartier Mansourah Nord et du tableau ci-dessous laisse voir que le degré du risque y est très fort notamment au niveau des routes. Cette classe de risque s'étale sur 19,67 % de la superficie totale du quartier, soit environ 25,2 ha, (Tab.9.11).

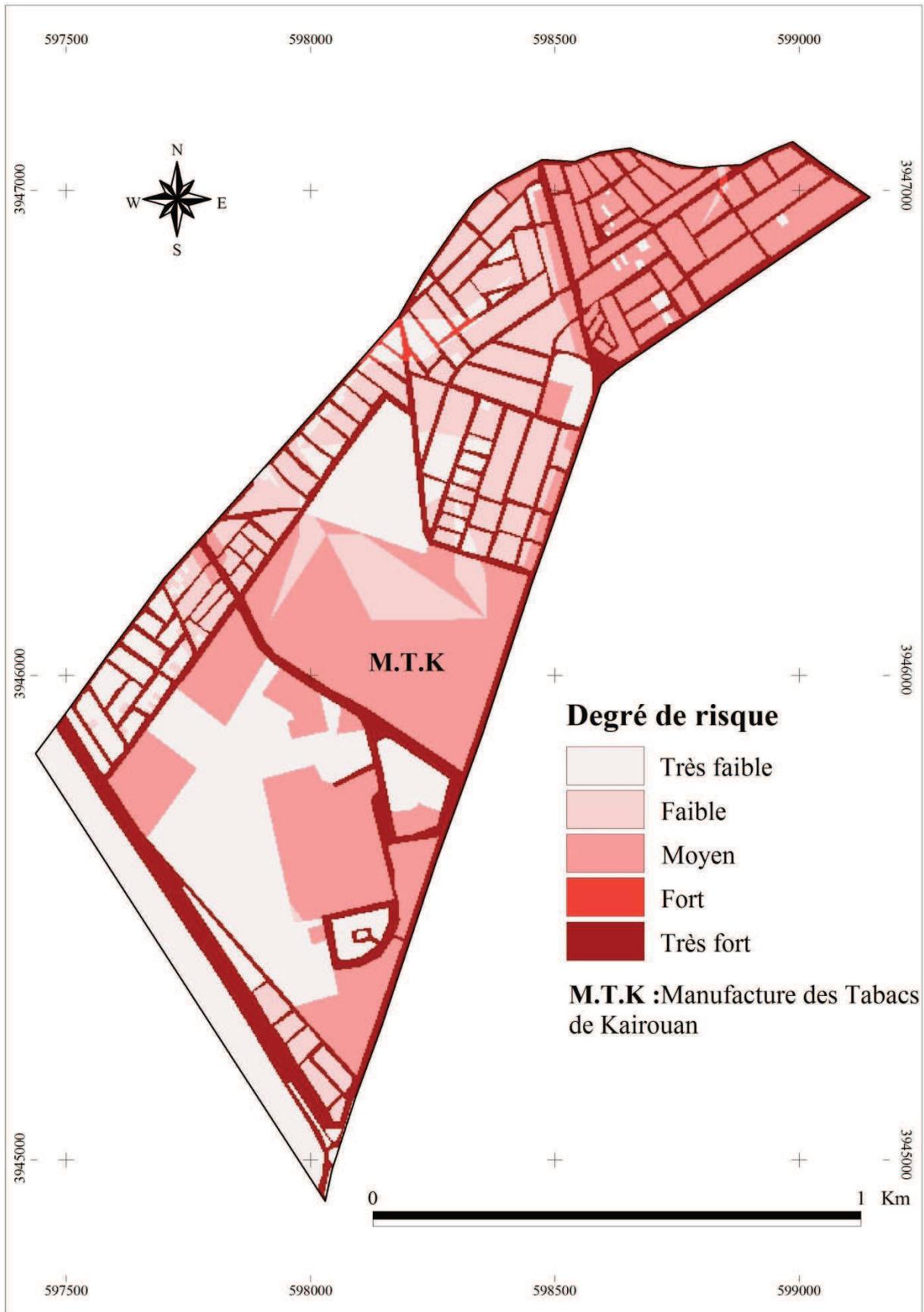


Figure. 9.8: Risque d'inondation dans le quartier Mansourah Nord (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

Tab.9.11: Répartition surfacique du risque d'inondation dans le quartier de Mansourah Nord à la commune de Kairouan

Classes	Superficie en (ha)	%
Très Faible	35,94	28,08
Faible	23,02	17,98
Moyen	43,35	33,86
Fort	0,52	0,41
Très fort	25,18	19,67
Total	128,01	100

9-2- Cartographie du risque d'inondation au quartier d'Ouled Chelbi (ville de Sidi Bouzid)

Pour cartographier le risque d'inondation à l'échelle du quartier d'Ouled Chelbi, situé à la ville de Sidi Bouzid, plusieurs facteurs ont été pris en compte, à savoir :

9-2-1-La pente et l'aléa induit

Le quartier d'Ouled Chelbi s'étale sur des terrains à pente très faible, qui ne dépassant pas généralement le 1%. Ils couvrent la quasi-totalité du quartier, soit environ 69,58% de sa superficie totale, (Tab.9.12).

Tab.9.12: Répartition surfacique des classes de pente dans le quartier d'Ouled Chelbi à la commune de Sidi Bouzid

Classes de pente	Intervalles de pente (%)	Superficie en (ha)	%
Très faible	0 - 1	72,02	69,58
Faible (1)	1 - 2	26,56	25,66
Faible (2)	2 - 4	4,67	4,51
Moyenne	> 4	0,26	0,25
Total	-	103,51	100

L'analyse de la carte d'aléa du quartier d'Ouled Chelbi et du tableau ci-dessous permet de constater que la classe dominante est celle d'aléa fort. Cette classe couvre environ 65% de la superficie totale du quartier.

Tab.9.13: Répartition surfacique de l'aléa inondation dans le quartier d'Ouled Chelbi à la commune de Sidi Bouzid

Classes de l'aléa	Intervalles de l'aléa	Superficie en (ha)	%
Très faible	0 - 5	0,26	0,25
Faible	5 - 10	4,55	4,40
Moyen	10 - 15	4,83	4,66
Fort	15 -20	67,23	64,95
Très fort	20 - 25	26,64	25,74
Total	-	103,51	100

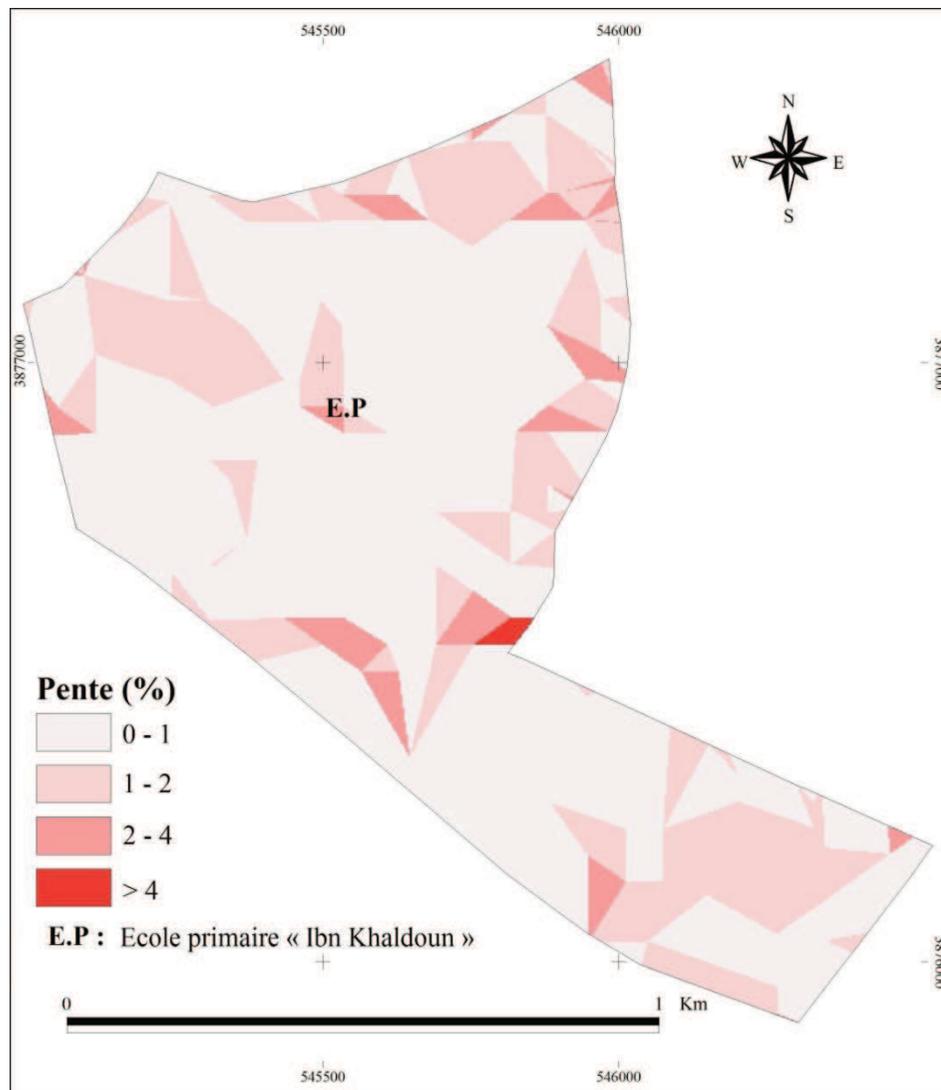


Figure. 9.9: Les pentes dans quartier Ouled Chelbi à la ville de Sidi Bouzid (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019 ; d'après la carte des pentes de la ville de Sidi Bouzid).

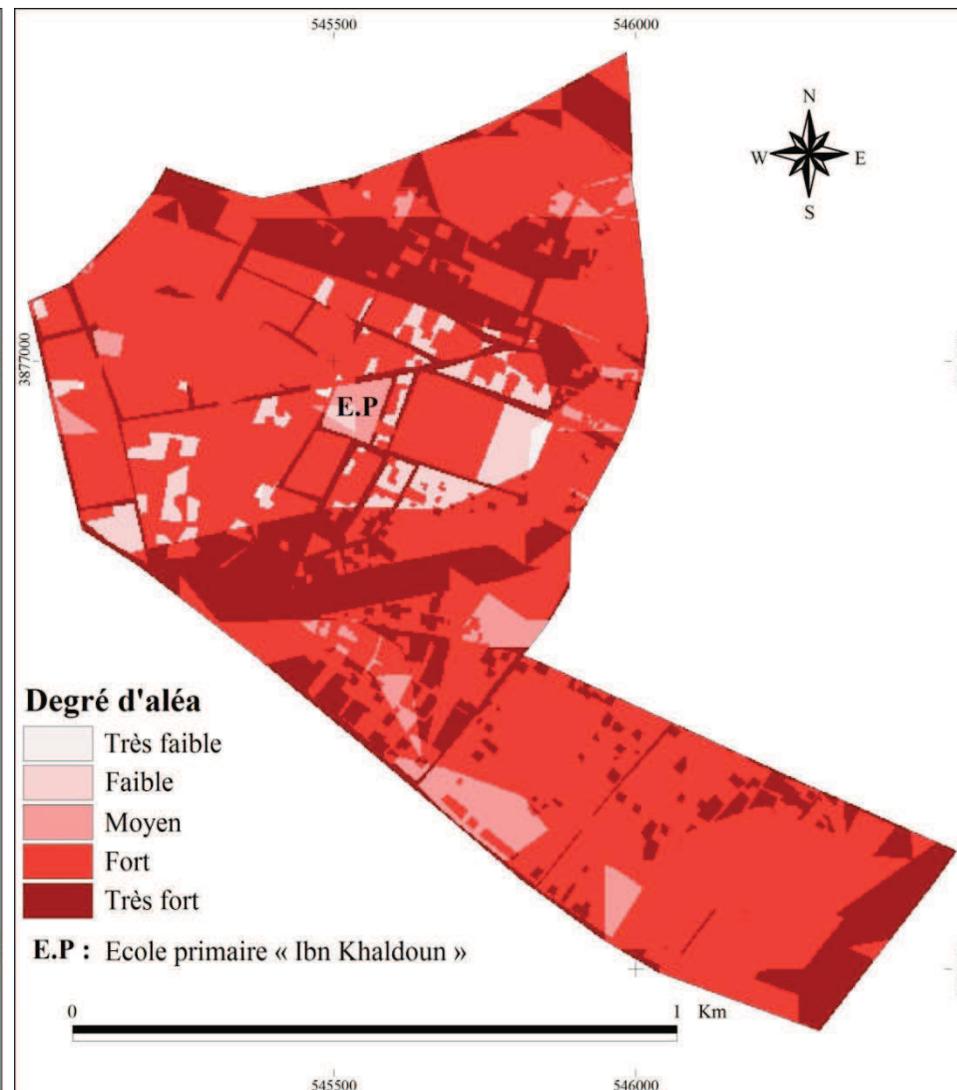


Figure. 9.10: L'aléa dans quartier Ouled Chelbi à la ville de Sidi Bouzid (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

9-2-2-Carte des enjeux

Afin d'affiner la cartographie des enjeux, nous nous sommes référés au plan d'aménagement urbain de Sidi Bouzid. Ce dernier permet d'extraire les types d'occupation du sol du quartier d'Ouled Chelbi. À chaque type d'occupation, un code a été attribué, allant de 1 (très faible) à 5 (très fort), (Tab.9.14), tout en tenant compte de son importance au niveau de l'occupation humaine et matérielle.

Tab.9.14. Répartition des types d'occupation selon leur degré d'enjeux dans le quartier de Mansourah Nord

Type d'occupation du sol à quartier Ouled Chelbi		Niveau d'enjeu
Quartiers périphériques	Habitat individuel isolé	3
	Habitat individuel en bande	3
	Habitat individuel groupé organisé	4
	Habitat individuel groupé désorganisé	3
Zone de production	Industrie Manufacturière	5
Zones civiques	Enseignement	5
	Sécurité	5
	Culte	5
	Divers	4
Cultures annuelles et/ou friches		1
Fonciers non bâtis		1
Terres arboricoles		2
Canal Fellet Gualla		1
Rues		5
Min		1
Max		5
≠ Intervalles		1

La classe des enjeux très forts regroupe la zone de production et les zones civiques, notamment d'enseignement, de sécurité et de culte. Cette classe s'étale sur environ 14,74 % de la superficie totale du quartier.

Tab.9.15: Répartition surfacique des niveaux d'enjeux dans le quartier d'Ouled Chelbi à la commune de Sidi Bouzid

Classes	Superficie en (ha)	%
Très Faible	43,14	41,68
Faible	6,46	6,24
Moyen	13,11	12,67
Fort	25,54	24,67
Très fort	15,26	14,74
Total	103,51	100

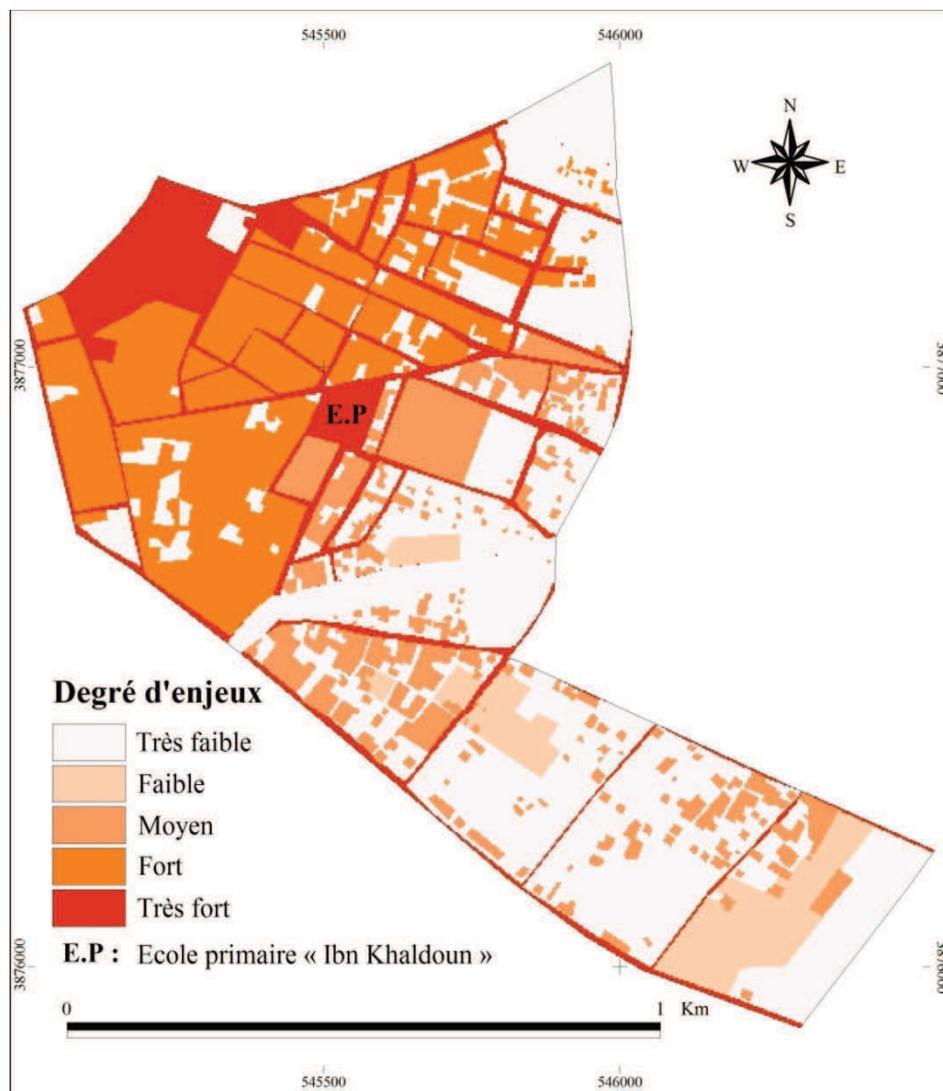


Figure. 9.11: Les niveaux d'enjeux dans le quartier Ouled Chelbi (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

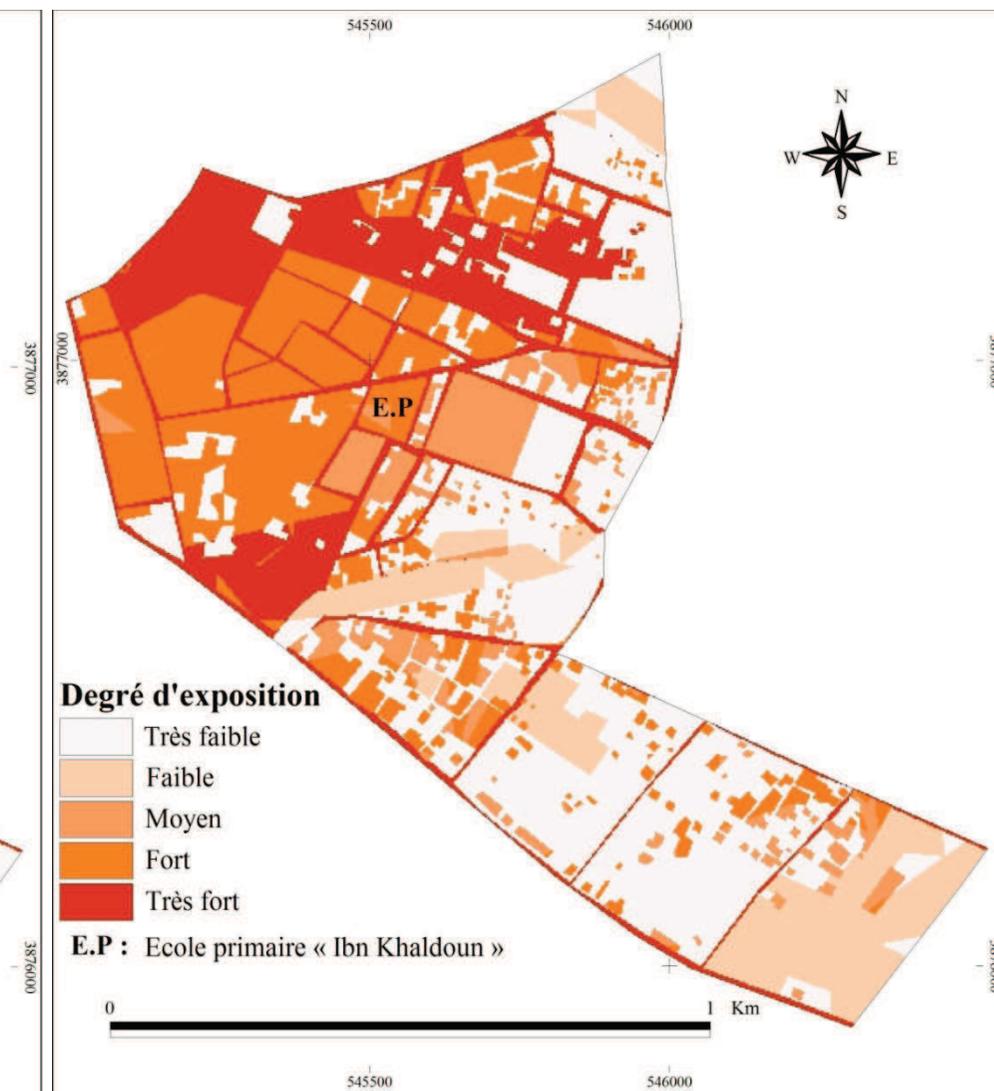


Figure. 9.12: Les niveaux d'exposition au risque d'inondation urbaine dans le quartier Ouled Chelbi (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

9-2-3-Carte d'exposition au risque d'inondation dans le quartier Ouled Chelbi

Le croisement des cartes des enjeux et d'aléa permet de produire une carte d'exposition du quartier d'Ouled Chelbi. Les terrains à degré d'exposition très fort s'étalent sur environ 20,39 % de la superficie totale du quartier, soit environ 21,10 ha.

Tab.9.16: Répartition surfacique du degré d'exposition des enjeux dans le quartier d'Ouled Chelbi à la commune de Sidi Bouzid

Classes	Intervalles	Superficie en (ha)	%
Très Faible	0 - 5	36,63	35,39
Faible	5 -10	12,88	12,44
Moyen	10 - 15	8,42	8,13
Fort	15 -20	24,48	23,65
Très fort	20 - 25	21,10	20,39
Total	-	103,51	100

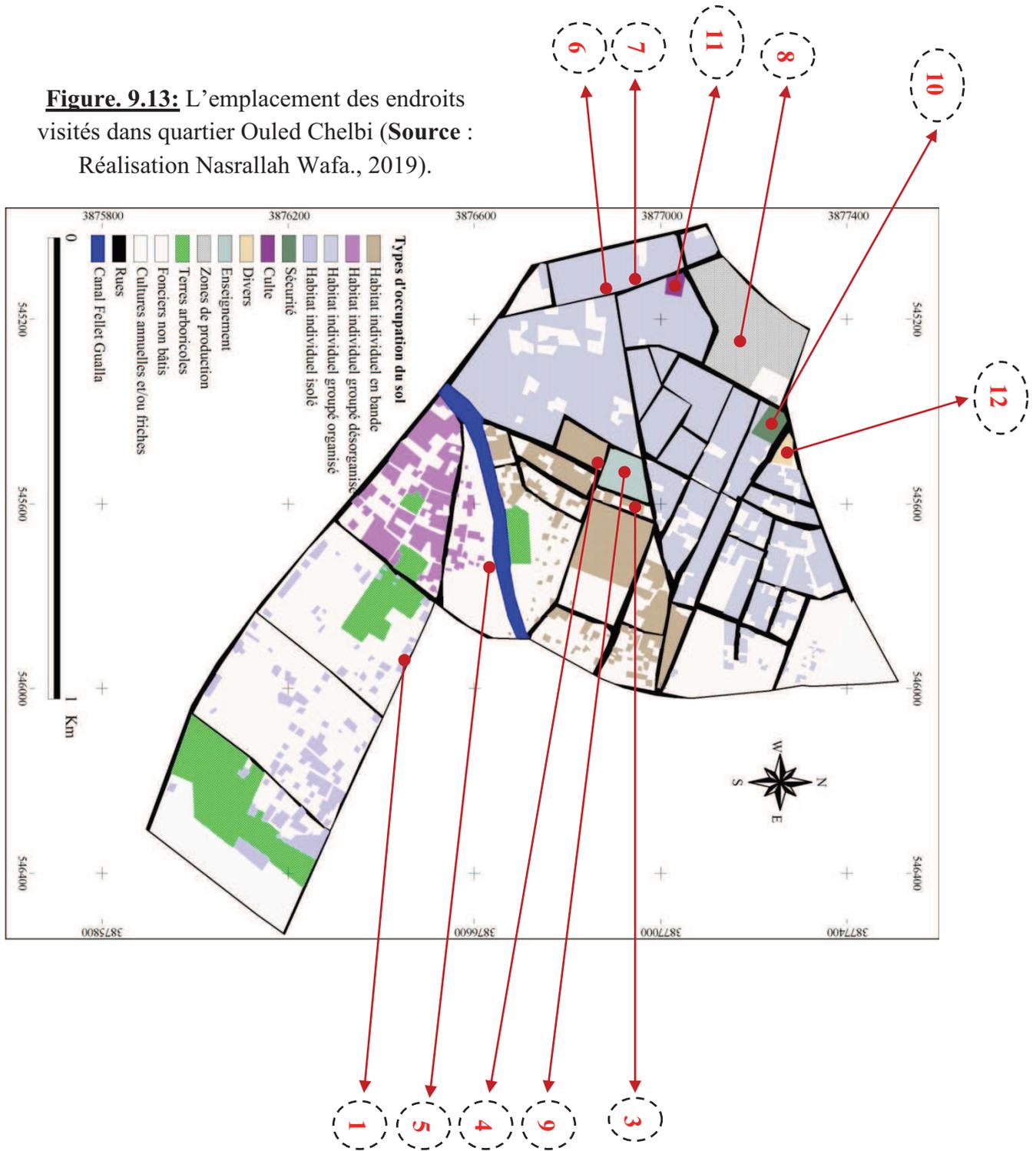
9-2-4-Carte de vulnérabilité

Cette carte est le produit de la combinaison de plusieurs critères relevés suite à des missions de terrain. Ces critères sont les même utilisés pour cartographier la vulnérabilité au risque d'inondation du quartier Mansourah Nord, à savoir : La situation du rez-de-chaussée par rapport au niveau de la route d'en face, l'existence d'un moyen d'évacuer par les airs, la nature et l'état des murs extérieurs, l'existence d'un mur de clôture extérieur et le nombre d'ouvertures pour chaque étage.

Tab.9.17. Etude de la vulnérabilité au risque d'inondation au quartier Ouled Chelbi dans la ville de Sidi Bouzid

Type d'occupation du sol à quartier Ouled Chelbi		Situation du rez-de-chaussée par rapport au niveau de la route	Existence d'un moyen d'évacuer par les airs	Nature et état des murs extérieurs	Existence d'un mur de clôture extérieur	Nombre d'ouvertures pour chaque étage	Branchement du logement aux réseaux	Σ	Vulnérabilité
Quartiers périphériques	Habitat individuel isolé	5	5	3	5	1	1	20	4
	Habitat individuel en bande	3	1	2	3	1	1	11	2
	Habitat individuel groupé organisé	1	1	1	5	1	1	10	2
	Habitat individuel groupé désorganisé	3	5	3	5	1	1	18	4
Zone de production	Industrie Manufacturière	1	1	1	5	1	1	10	2
Zones civiques	Enseignement	3	1	1	1	1	1	8	2
	Sécurité	3	1	1	1	1	1	8	2
	Culte	5	1	1	5	1	1	14	3
	Divers	3	5	2	5	1	1	17	3
Cultures annuelles et/ou friches		-	-	-	-	-	-	-	1
Fonciers non bâtis		-	-	-	-	-	-	-	1
Terres arboricoles		-	-	-	-	-	-	-	2
Canal Fellet Gualla		-	-	-	-	-	-	-	2
Rues		-	-	-	-	-	-	-	3
Min		1	1	1	1	1	1	6	
Max		5	5	5	5	5	5	30	
≠ Intervalles		1	1	1	1	1	1	6	

Figure. 9.13: L'emplacement des endroits visités dans quartier Ouled Chelbi (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).



Tab.9.18.Étude de la vulnérabilité du quartier Ouled Chelbi vis-à-vis le risque inondation

Type d'occupation du sol	Description P,A,U et observations sur terrain	Clichés	Vue panoramique (Extrait Google Earth)
<p style="text-align: center;">Quartiers périphériques</p>	<p>1- Habitat individuel isolé</p> <p>C'est une zone résidentielle d'habitat individuel isolé. Le coefficient d'occupation du sol est fixé à 0,33 par le règlement de l'urbanisme et il est convenable à la réalité terrain.</p> <p>L'hauteur maximale est de R+1, soit 8 mètres. Généralement, il s'agit des habitats en brique crue, en cours de construction (Photos : 1 et 2) et contiennent plusieurs ouvertures. Les murs extérieurs sont en moyen état. Ils sont raccordés aux différents réseaux publics.</p> <p>En revanche, on observe une absence d'un mur de clôture extérieur et de réseau d'évacuation des eaux pluviales.</p> <p>La majorité des habitats sont situés au-dessous du niveau des routes qui sont en grande partie non aménagées (Photos : 1 et 2). Ces habitations sont situées à proximité de l'embouchure du canal «Fellet Gualla» et elles ne sont pas équipées par des</p>	<div style="text-align: right; margin-bottom: 10px;">  1 </div> <div style="text-align: right;">  2 </div> <p style="text-align: center;">Habitat individuel isolé</p>	<div style="text-align: right; margin-bottom: 10px;">  </div> <div style="text-align: right;">  <p style="font-size: small; text-align: right;">Embouchure du canal "Fellet Gualla"</p> </div>

aménagements particuliers pour l'adaptation du logement au risque inondation.

C'est une zone d'habitat de faible densité de **20 logements** à l'hectare.

C'est un enjeu de moyenne importance (Niveau 3).

2- Habitat individuel en bande

C'est une **zone résidentielle** d'habitat individuel en bandes continues. Le coefficient d'occupation du sol est fixé à **0,6** par le règlement de l'urbanisme.

L'hauteur maximale est de **R+2, soit 11 mètres**. Ce genre d'habitat contient plusieurs ouvertures. Les murs extérieurs sont en **bon état**. Ils sont raccordés **aux différents réseaux publics**.

En outre, on observe parfois la présence d'un mur de clôture extérieur (**Photo : 4**) et une absence totale de réseau d'évacuation des eaux pluviales.

La majorité des habitats sont



Habitat individuel en bande



situés au même niveau de la route, on observe parfois **des travaux de rehaussement** sous forme des escaliers devant les portes principales ainsi que l'existence d'un moyen d'évacuer par les airs (**Photo : 3**).

C'est une zone d'habitat d'assez forte densité de **50 logements** à l'hectare.

C'est un enjeu de moyenne importance (Niveau 3).

3- Habitat individuel groupé

C'est une **zone résidentielle** d'habitat individuel groupé, correspond généralement à deux formes : **Désorganisé** situé au-dessous du canal **«Fellet Gualla»** (**Photo : 5**), et **organisé** situé au-dessus du canal (**Photos : 6 et 7**). Le coefficient d'occupation du sol est fixé à **0,75** par le règlement de l'urbanisme mais il peut atteindre **1** sur la réalité terrain. L'hauteur maximale est de **R+1, soit 8 mètres**.

Le genre d'habitat individuel groupé **organisé** peut contenir plusieurs étages avec des nombreuses ouvertures. Les murs extérieurs sont en **très bon état** (**Photos : 6 et 7**). L'habitat



individuel groupé **désorganisé** est généralement en brique crue, en cours de construction (**Photo : 5**) et contiennent plusieurs ouvertures. Les murs extérieurs sont en **moyen état**.

Ils sont tous raccordés **aux différents réseaux publics**. Par contre, on observe une absence d'un mur de clôture extérieur et de réseau d'évacuation des eaux pluviales. Ces habitations sont situés au même niveau (**Photo : 5**) et parfois au-dessus du niveau de la route (**Photos : 6 et 7**).

L'habitat individuel organisé est un enjeu de grande importance (Niveau 4).

L'habitat individuel désorganisé est un enjeu de moyenne importance (Niveau 3).



Habitat individuel groupé

Zone de production

Il s'agit d'une **zone urbaine**, destinée à recevoir des établissements industriels techniques à l'exclusion de l'habitat.

Ces industries sont raccordées **aux différents réseaux publics** : d'électricité, d'eau potable, d'assainissement et d'eaux pluviales... L'hauteur maximale des constructions est fixée à **15 mètres**. Le coefficient d'occupation du sol est de **0,4 à 0,5**. Par ailleurs, on observe une absence d'un mur de clôture extérieur.

Elles sont situées au-dessus du niveau de la route (**Photo : 8**) et les murs extérieurs sont en **très bon état**.

C'est un enjeu de très grande importance (Niveau 5).



Industrie Manufacturière



Zones civiques

Ces zones sont réservées à l'implantation des équipements publics de toutes natures:

1- Enseignement

Il s'agit de l'école primaire « Ibn Khaldoun » à quartier « Ouled Chelbi ». Son coefficient d'occupation du sol (C.O.S) est d'environ **0,5**. Les clôtures en maçonnerie pleine avec des hauteurs de **2 mètres**. Ces clôtures intègrent un porche d'entrée en métal.

L'école est située au même niveau de la route (**Photo : 9**). Elle contient plusieurs étages avec des nombreuses ouvertures. Elle est branchée **aux différents types de réseaux** (Assainissement, eau potable, électricité...). Les murs extérieurs sont en **très bon état**.

C'est un enjeu de très grande importance



Enseignement : Ecole primaire



(Niveau 5).

2- Sécurité

Il s'agit d'une prison à quartier « **Ouled Chelbi** ». Son coefficient d'occupation du sol (**C.O.S**) est d'environ **0,8**. Les clôtures en maçonnerie pleine avec des hauteurs plus de **3 mètres**. Ces clôtures intègrent un porche d'entrée en métal.

La prison est située au même niveau de la route (**Photo : 10**). Elle contient plusieurs étages avec des nombreuses ouvertures. Elle est branchée **aux différents types de réseaux publics**. Les murs extérieurs sont en **très bon état**.

C'est un enjeu de très grande importance (Niveau 5).

3- Culte

Il s'agit de la mosquée de quartier « **Ouled Chelbi** ». Son coefficient d'occupation du sol (**C.O.S**) est presque **1**.

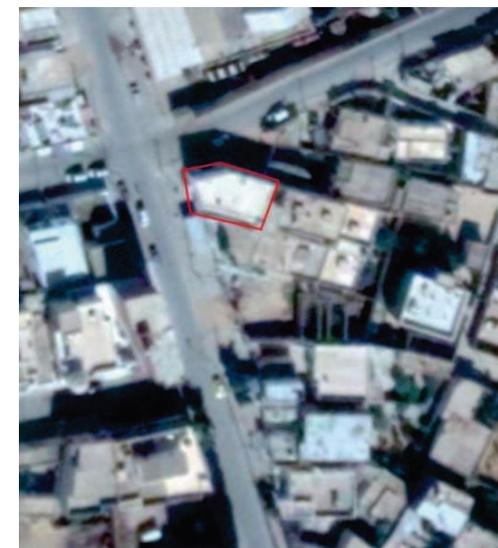
La mosquée est située au-dessus niveau de la route (**Photo : 11**). Elle contient plusieurs étages avec des nombreuses ouvertures. Elle est branchée **aux différents types de réseaux publics**. Les murs



Sécurité : Prison



Culte : Mosquée



extérieurs sont en **très bon état**.

Par contre, on observe une absence d'un mur de clôture extérieur et de réseau d'évacuation des eaux pluviales.

C'est un enjeu de très grande importance (Niveau 5).

4- Divers

Il s'agit de l'abattoir de quartier « **Ouled Chelbi** ». Son coefficient d'occupation du sol (**C.O.S**) est presque **0,5**. L'abattoir est récemment en sa phase d'extension au même endroit (**Photo : 12**), ce qui aggrave le risque d'inondation selon un entretien avec les citadins du quartier. Il contient plusieurs ouvertures. Les murs extérieurs sont en **bon état**. Il est raccordé **aux différents réseaux publics** et situé au même niveau de la route.

En revanche, on observe une absence d'un mur de clôture extérieur et de réseau d'évacuation des eaux pluviales.

C'est un enjeu de grande importance (Niveau 4).



Divers : Abattoir



Les classes de vulnérabilité faible à très faible couvrent environ les $\frac{3}{4}$ de la superficie totale du quartier Ouled Chelbi, (Tab.9.19).

Tab.9.19: Répartition surfacique des classes de vulnérabilité dans le quartier d'Ouled Chelbi à la commune de Sidi Bouzid

Classes	Intervalles	Superficie en (ha)	%
Très Faible	0 -5	41,32	39,92
Faible	5 - 10	44,88	43,36
Moyenne	10 - 15	10,46	10,1
Forte	15 -20	6,85	6,62
Total	-	103,51	100

9-2-5-Cartographie de la capacité d'adaptation

Pour cartographier la capacité d'adaptation au risque d'inondation au niveau du quartier Ouled Chelbi dans la commune de Sidi Bouzid, les mêmes critères précédemment utilisés pour le quartier de Mansourah Nord ont été repris. Il s'agit spécialement de trois critères, à savoir : L'adaptation du logement au risque d'inondation par des aménagements particuliers, le branchement ou proximité du logement à un réseau d'évacuation des eaux pluviales et le branchement au réseau d'assainissement des eaux usées, (Tab.9.20).

Tab.9.20. Etude de la capacité d'adaptation au risque d'inondation au quartier Ouled Chelbi à la ville de Sidi Bouzid

Type d'occupation du sol à quartier Ouled Chelbi		Adaptation du logement au risque inondation par des aménagements particuliers	Branchement ou proximité du logement à un réseau d'évacuation des eaux pluviales	Branchement au réseau d'assainissement des eaux usées	Σ	Capacité d'adaptation
Quartiers périphériques	Habitat individuel isolé	1	1	5	7	3
	Habitat individuel en bande	3	1	5	9	4
	Habitat individuel groupé organisé	5	1	5	11	4
	Habitat individuel groupé désorganisé	2	1	5	8	3
Zone de production	Industrie Manufacturière	5	1	5	11	4
Zones civiques	Enseignement	5	1	5	11	4
	Sécurité	5	1	5	11	4
	Culte	5	1	5	11	4
	Divers	3	1	5	9	4
Cultures annuelles et/ou friches		-	-	-	-	2
Fonciers non bâtis		-	-	-	-	2
Terres arboricoles		-	-	-	-	2
Canal Fellet Gualla		-	-	-	-	3
Rues		-	-	-	-	3
Min		1	1	1		3
Max		5	5	5		15
≠ Intervalles		1	1	1		3

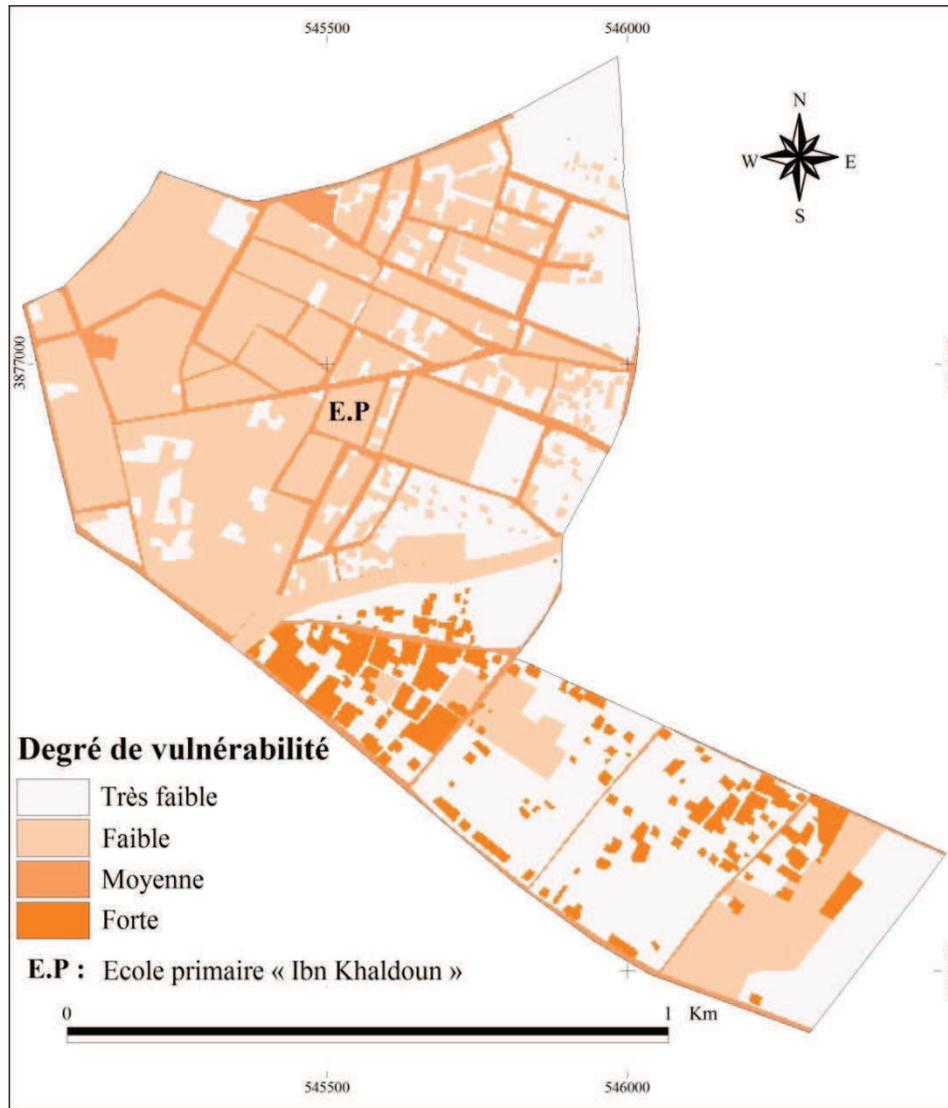


Figure. 9.14: La vulnérabilité dans quartier le Ouled Chelbi à la ville de Sidi Bouzid (**Source :** Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

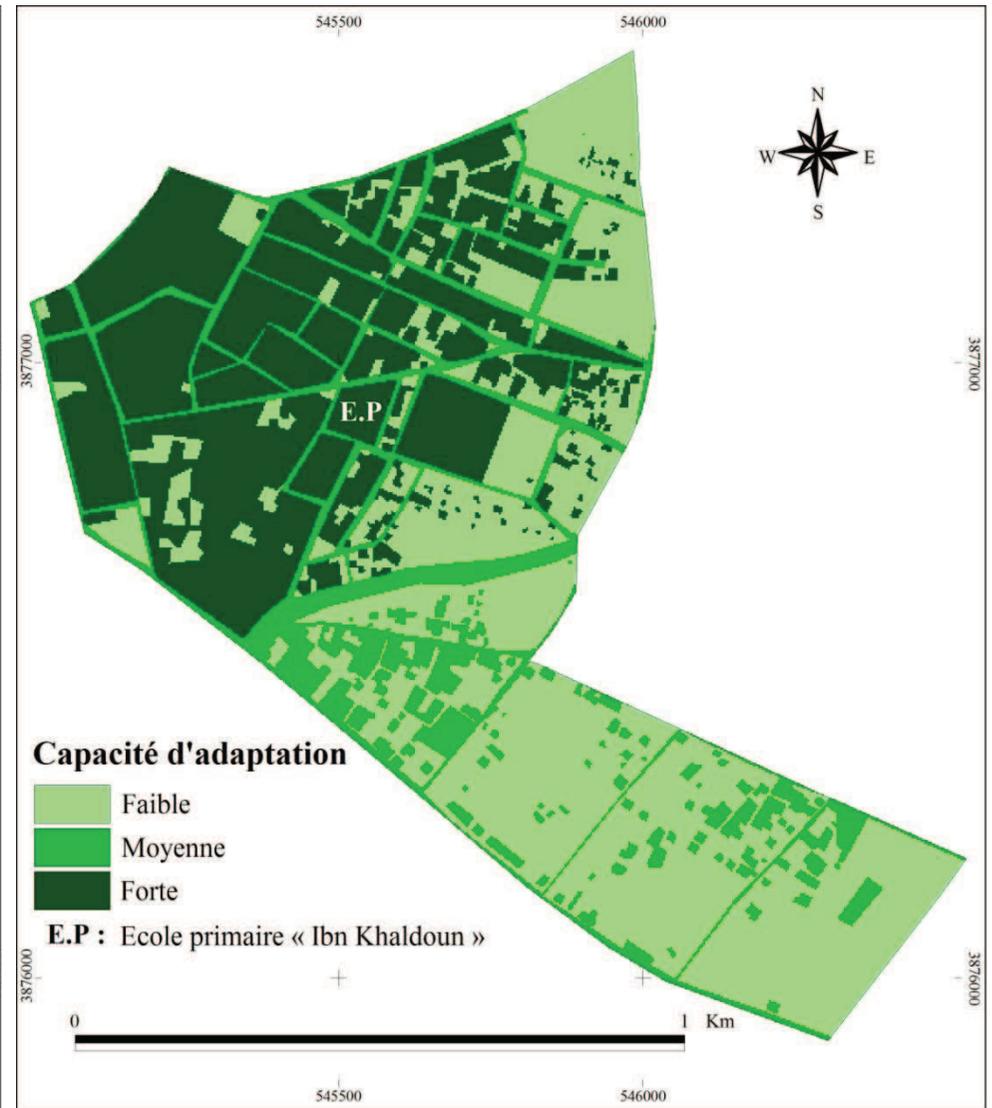


Figure. 9.15: La capacité d'adaptation dans quartier le Ouled Chelbi à la ville de Sidi Bouzid (**Source :** Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

L'examen de la figure 9.15 et du tableau 9.20 permet de constater que les types d'occupation du sol qui ont une capacité d'adaptation forte sont essentiellement: les habitats individuels en bande, les habitats groupés organisés, l'industrie manufacturière et les secteurs d'activités civiques. Ces derniers couvrent environ 35,7 % de la superficie totale du quartier soit 36,97 ha, (Tab.9.21).

Tab.9.21: Répartition surfacique de la capacité d'adaptation au risque inondation dans le quartier d'Ouled Chelbi dans la commune de Sidi Bouzid

Classes	Intervalles	Superficie en (ha)	%
Faible	5 - 10	47,78	46,16
Moyenne	10 - 15	18,76	18,12
Forte	15 -20	36,97	35,72
Total	-	103,51	100

9-2-6-Carte du risque d'inondation dans le quartier d'Ouled Chelbi

Cette carte et le produit de la combinaison de trois cartes, conçues pour le quartier d'Ouled Chelbi (ville de Sidi Bouzid): carte de l'exposition (Fig.9.12), carte de la vulnérabilité (Fig.9.14) et la carte de la capacité d'adaptation (Fig.9.15). L'analyse de la carte du risque du quartier Ouled Chelbi (Fig.9.16), laisse voir que les types d'occupation qui se caractérisent par un degré du risque très fort sont essentiellement les habitats individuels isolés, les habitats groupés désorganisés et les routes. Cette catégorie s'étale sur environ 13,71 ha, (Tab.9.22).

Tab.9.22: Répartition surfacique du risque inondation dans le quartier d'Ouled Chelbi à la commune de Sidi Bouzid

Classes	Superficie en (ha)	%
Très Faible	41,74	40,32
Faible	12,82	12,39
Moyen	31,67	30,59
Fort	3,57	3,45
Très fort	13,71	13,25
Total	103,51	100

Conclusion

À travers ce chapitre nous avons essayé de cartographier le risque d'inondation dans des quartiers types, particulièrement vulnérables, de Mansourah Nord dans la ville de Kairouan et d'Ouled Chelbi dans la ville de Sidi Bouzid. Les enquêtes de terrain et les entretiens avec la population locale nous ont permis de déduire que :

Dans le quartier de Mansourah nord, les citoyens ont un sentiment de confiance vis-à-vis les travaux hydrauliques déjà réalisés (Digue et Barrages). Ils sont aussi conscients du risque d'inondation. En effet, la majorité des habitats sont situés au-dessus du niveau de la route et on observe des travaux de rehaussement sous forme d'escaliers devant les portes

d'entrée. Ces travaux ont été réalisés essentiellement suite aux inondations de 2015. Cette population est également consciente que le vrai problème aggravant le risque d'inondation est l'absence de branchement des bâtiments au réseau d'évacuation des eaux pluviales.

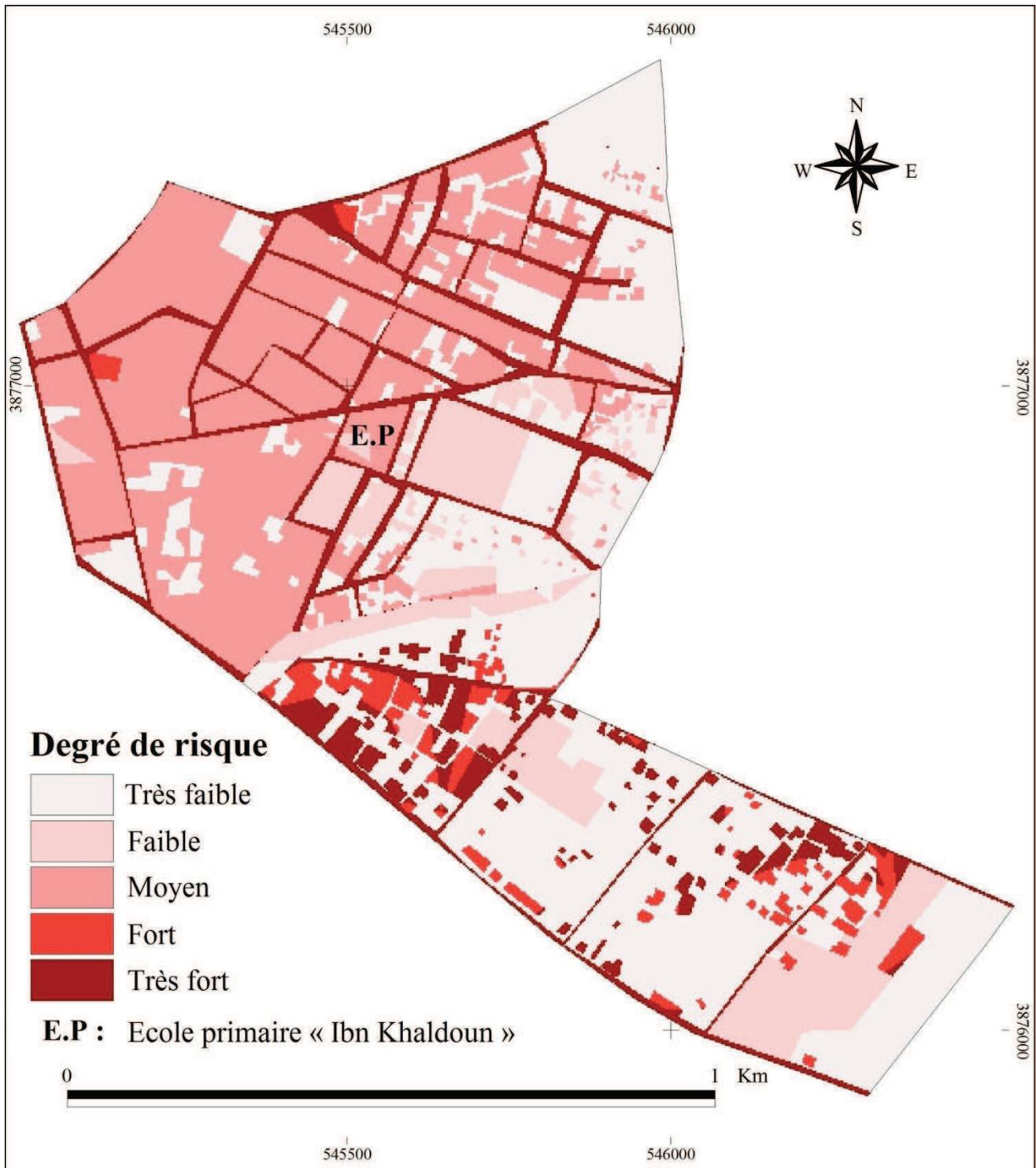


Figure. 9.16: Risque d'inondation dans quartier Ouled Chelbi à la ville de Sidi Bouzid
(Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019).

Quartier Ouled Chelbi : Un entretien avec une dame de 38 ans travaillant à la municipalité de Sidi Bouzid et habitante du quartier « Ouled Chelbi » au niveau de la route principale « Vers El Faïdh » près de la prison. Son constat est que ce quartier est considéré



parmi les plus vulnérables au risque inondation. Les habitats sont situés au-dessous du niveau de la route. La proximité de l'abattoir et l'absence de réseau d'évacuation des eaux pluviales, favorisant l'accumulation des déchets obstruant les canaux de l'ONAS et empêchant l'eau de pluie de s'évacuer convenablement. Ceci engendre la remontée de l'eau par les égouts et sa pénétration à l'intérieur de leurs maisons à chaque événement pluvieux, même à lors de journées peu pluvieuses, d'environ 10 mm/jour. Les travaux de pompage par les agents de la protection civile et les aménagements particuliers réalisés par les citoyens (comme par exemple les sacs remplis de sable), permettent de réduire les dégâts. L'existence d'une station d'épuration à proximité du quartier

« Ouled Chelbi », est jugée comme un facteur aggravant le risque inondation (**Photo : 13**).

D'autres habitations sont en extension autour de l'embouchure du canal (**Photo : 14**). Les routes y sont mal entretenues (sous forme des pistes), favorisant la stagnation des eaux. Un habitant du quartier enquêté juge que le facteur favorisant la construction



dans ces terrains inondables est le coût relativement bas du terrain. « *M. Rafik, un ouvrier qui a travaillé à Sousse pendant 12 ans n'est pas arrivé à acheter un lot de terrain. Dès son retour à Sidi Bouzid, il a pu acheter un lot avec 40 D.T / m²* ». Les occupants du quartier « Ouled Chelbi » sont toujours en attente de l'aménagement des voiries et déménagement de l'abattoir (qui est récemment dans sa phase d'extension au même endroit).

Chapitre 10

La gestion du risque inondation

Introduction

« *La gestion des risques est l'ensemble des moyens (techniques, financiers, juridiques...) mis en œuvre pour prévenir et réduire les conséquences potentielles des catastrophes naturelles. Elle inclut aussi les moyens de limiter au mieux les incertitudes sur ces menaces, en particulier l'acquisition des connaissances* », (Leone et al., 2010). Dans ce chapitre, il s'agit d'évoquer les différents types d'aménagements hydrauliques réalisés pour protéger les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid vis-à-vis du risque d'inondation urbaine. Il s'agit notamment des aménagements hydrauliques réalisés soit par la Direction d'Hydraulique Urbaine (D.H.U) ou par les services de Conservation des Eaux et des Sols (C.E.S).

10-1- Les ouvrages existants de protection de la ville de Kairouan

La protection de la ville de **Kairouan** contre les inondations s'est faite en plusieurs temps :

10-1-1-Une protection rapprochée : par une digue autour du périmètre communal. Cette digue a été construite par tranches. La première tranche, réalisée en 1968, a été extrêmement utile en 1969 pour protéger une partie de la ville et a été complétée par la DHU en plusieurs tranches. Cette digue a le profil suivant :

* Endiguement de 3 m environ réalisé à partir des déblais du canal créé à cet effet. Ce canal a été pratiquement comblé par les apports solides des différentes crues.

* Protection de la liaison digue canal par des épis latéraux, ce qui lui a permis de se comporter efficacement lors des inondations de 1969, (DHU, 1998).

Photo.10.1 : Digue de protection de la ville de Kairouan. Clichés Nasrallah Wafa, le 24/04/2017



La déviation de l'Oued Merguellil

La déviation de l'oued Merguellil s'est faite en plusieurs étapes, à savoir :

* Réalisation de l'ouvrage d'entonnement sur le Merguellil.

* Le canal de déviation : La déviation de l'oued Merguellil s'est faite à travers un canal long de 10 Km et des endiguements latéraux avec une emprise de largeur variable de 50 à 200 m. Ce canal est dimensionné pour un débit de $250 \text{ m}^3/\text{s}$ de fréquence vingtennale du Merguellil, (DHU, 1998). Ce canal est protégé par 2 endiguements, l'un du côté de la ville et l'autre du côté de la plaine. Les endiguements sont conçus de manière à faire partie intégrante de la section de l'oued pour les débits supérieurs à $250 \text{ m}^3/\text{s}$. Ceci revient à considérer que ce canal admet une double section, l'une en déblais et l'autre en remblais (DHU, 1998).

Dans le traitement de l'oued Merguellil, une attention particulière a été portée à Rakkada, ville universitaire et historique, et un endiguement localisé a été prévu sur Oued Merguellil pour la protéger contre les crues cinquantenales.

* Le raccordement avec le Zeroud, (DHU, 1998).

Les aménagements sur l'Oued Zeroud

* *Les endiguements du Zeroud* : Il s'agit de la construction d'une digue sur une longueur de 7 Km le long de l'oued Zeroud avec une emprise large de 50 m, (DHU, 1998). Cette digue est dimensionnée pour protéger la ville de Kairouan contre les crues de fréquence 1/10.000 ans, (DHU, 2002).

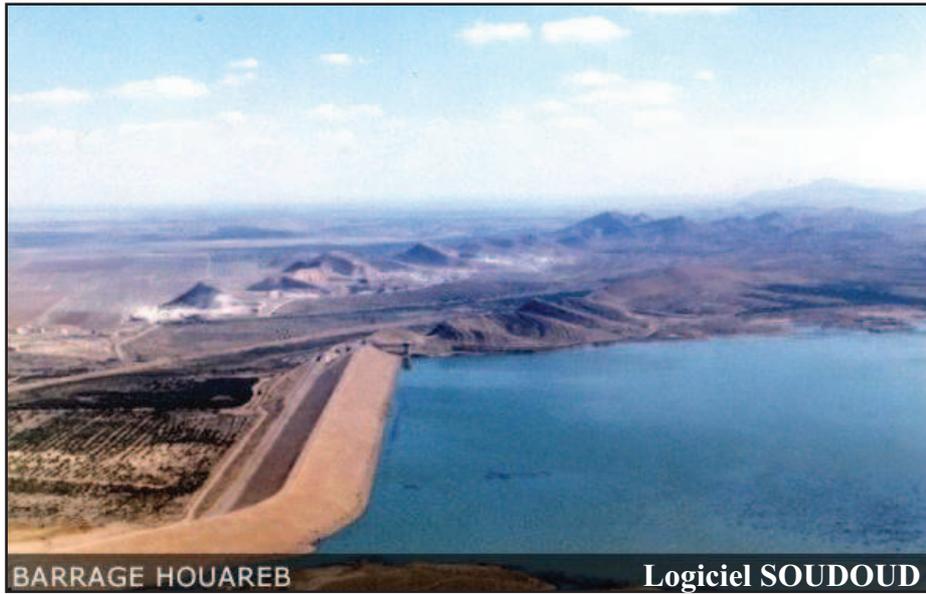
* *L'évacuation des eaux de la plaine* : L'ensemble des eaux du Zeroud et du Merguellil, une fois canalisées, se dirigent vers le col de *Draa tamar* avant de rejoindre l'oued Ataf, qui dirige vers Sabkat El Kelbia, (DHU, 1998).

10-1-2-Une protection éloignée : qui a consisté à créer le barrage de Sidi Saâd sur l'Oued Zeroud et le barrage El Houareb sur l'Oued Merguellil et ce après les crues exceptionnelles de 1969. La mise en eau de ces barrages a été effectuée respectivement en 1981 et 1989, (DHU, 2008). Ces deux barrages ont été réalisés pour répondre à plusieurs fonctions : Irrigation, recharge de la nappe et surtout la protection de la plaine et de la ville de Kairouan contre les inondations, (DHU, 2002).

Ces deux barrages présentent les caractéristiques suivantes :

*** Barrage El Houareb sur le Merguellil**

Le barrage d'El Houareb contrôle un bassin versant de 1120 Km^2 et a pour fonction de réduire les crues du Merguellil à l'entrée de la plaine de Kairouan. Il a été conçu de manière à ce que la tranche d'écrêtage entre la RN (Cote 217) et les plus hautes eaux « PHE » (Cote 226.5) soit importante ($V_{RN}=95 \text{ Mm}^3$, $V_{PHE}=218 \text{ Mm}^3$, $V_{\text{crête}}=250 \text{ Mm}^3$). Le niveau de consigne a été prévu être rehaussé régulièrement de manière à compenser l'envasement, (DHU, 1998).



L'évacuateur de crue, d'une longueur de 40 mètres est prévu pour fonctionner dans les conditions suivantes :

Période de retour (années)	Q entrant (m ³ /s)	Q sortant (m ³ /s)
10	1130	0
20	1675	30
50	2380	280
100	2900	480

Q : Débit

(DHU, 1998)

*** Barrage Sidi Saad sur le Zeroud**

Le barrage de Sidi Saad contrôle un bassin versant de 8650 Km². Il a pour fonction de réduire les crues du Zeroud à l'entrée de la plaine de Kairouan. Les ouvrages d'évacuation sont constitués de 5 pertuis à la cote 270 et d'un déversoir de 63 m à la cote 290, (DHU, 1998).



Ces ouvrages sont prévus pour fonctionner dans les conditions suivantes :

Période de retour (années)	Q entrant (m ³ /s)	Q sortant (m ³ /s)
10	4485	810
20	7320	1000
50	10800	1550
100	13500	2350

Q : Débit

(DHU., 1998)

Ces deux barrages ont donc pour effet de transformer fortement les hydrogrammes naturels des crues, notamment dans la traversée de la plaine de Kairouan, d'une part en stockant une partie du volume des crues, d'autre part en étalant dans le temps l'hydrogramme entrant qui ressort avec un débit largement réduit en pointe, (DHU, 2002).

En outre, Sidi Sâad et El Houareb sont considérés parmi les barrages qui sont exposés à un rythme d'envasement rapide. En effet, le rythme annuel moyen est estimé de 1,5 % (Fig. 10.2). Ceci a pour conséquence de diminuer la durée de vie de ces deux barrages : Vers 2020, la perte globale de la capacité des barrages de Sidi Sâad et d'El Houareb est estimée respectivement de 50% et 48% (Henia et Hlaoui, 2008).

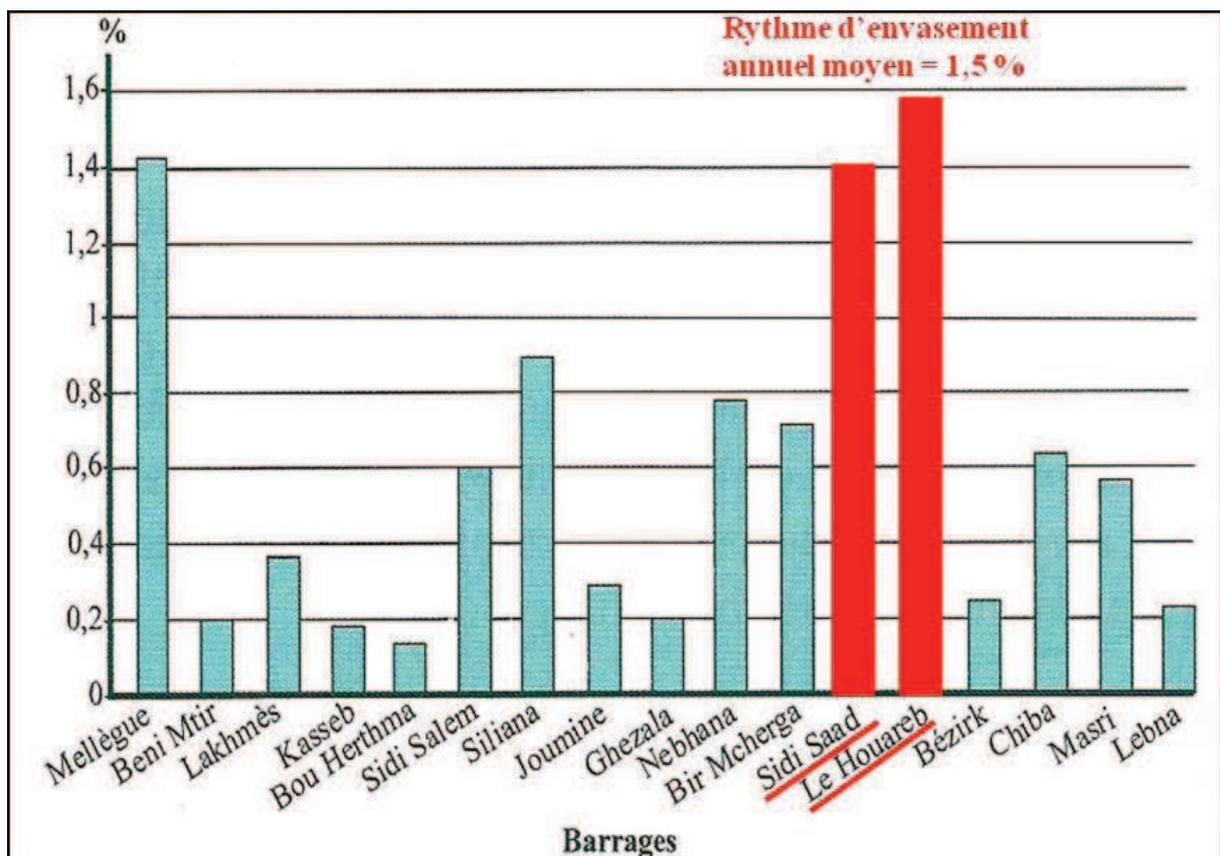


Figure.10.2: Rythmes annuels d'envasement des barrages tunisiens en (%) de la capacité de la retenue (Henia et Hlaoui, 2008).

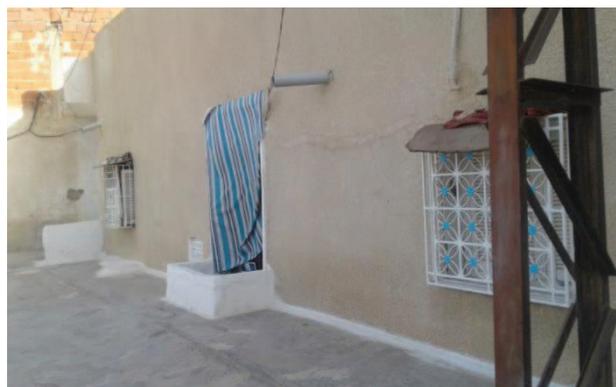
D'autres travaux d'aménagement sont réalisés soit par :

La population locale, comme les techniques de protection des entrées des habitations observées au niveau de la RN 12 conduisant vers Haffouz, au niveau de la ville de Kairouan.

La Direction de l'Hydraulique Urbaine (D.H.U) comme le réseau d'évacuation des eaux pluviales, (Fig.10.4).

Photos.10.2 : Autres travaux de protection à la ville de Kairouan

Les techniques de protection des entrées des habitations à la RN n° 12 vers Haffouz à la ville de Kairouan



Réseau d'évacuation des eaux pluviales à la Cité Echbilia à Kairouan



Clichés Nasrallah Wafa, le 24/04/2017

10-2- Les ouvrages existants de protection de la ville de Sidi Bouzid

Digue de protection Nord : C'est une digue de ceinture de 2 à 3 m de hauteur, qui contourne au Nord la ville de Sidi Bouzid. Cette digue réalisée après les inondations de 1969 a subi des travaux de surélévation après les inondations de 1990 (Hmercha, 2010). La protection de la digue contre l'érosion par les eaux de l'Oued Serg Dhiba est assurée par des épis en terre aménagés presque tous les 200 m le long de la digue. Avant les crues de Janvier 1990, cette digue continuait suivant la RR 125 jusqu'à environ 2 Km de la RN13. Cette partie

fusible de la digue entre Sidi Bouzid et la RN 13 a été emportée par les eaux de crues en Janvier 1990 (DHU, 1990).



Photo.10.3. Digue de protection Nord à Sidi Bouzid. Photo prise par (Nasrallah Wafa., le 24-04-2017)

Canal Fellet Galla : Le canal de Fellet Galla constitue la composante principale de la protection de la zone Sud de Sidi Bouzid. Ce dernier, de 1 à 1,5 m de profondeur ne permet que le transit d'un débit de l'ordre de $40 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondant à une période de retour théorique de 5 ans (DHU, 1990).



Photo.10.4. Canal Fellet Galla à Sidi Bouzid. Photo prise par (Nasrallah Wafa., le 20-04-2018).

Digue canal : Réalisée en 2000, cette digue «est formée par un canal en terre de section trapézoïdale composée de hauteur variant de 0,58 m à 2,7 m, longeant une digue du côté gauche de hauteur variant de 0,84 m à 3,55 m. Elle est protégée par des enrochements sur presque la totalité du tracé. Cette digue canal barre l'oued Mazzouzi et permet sa dérivation vers l'Est à Sabkhat Sidi Bouzid», (Hmercha, 2010).

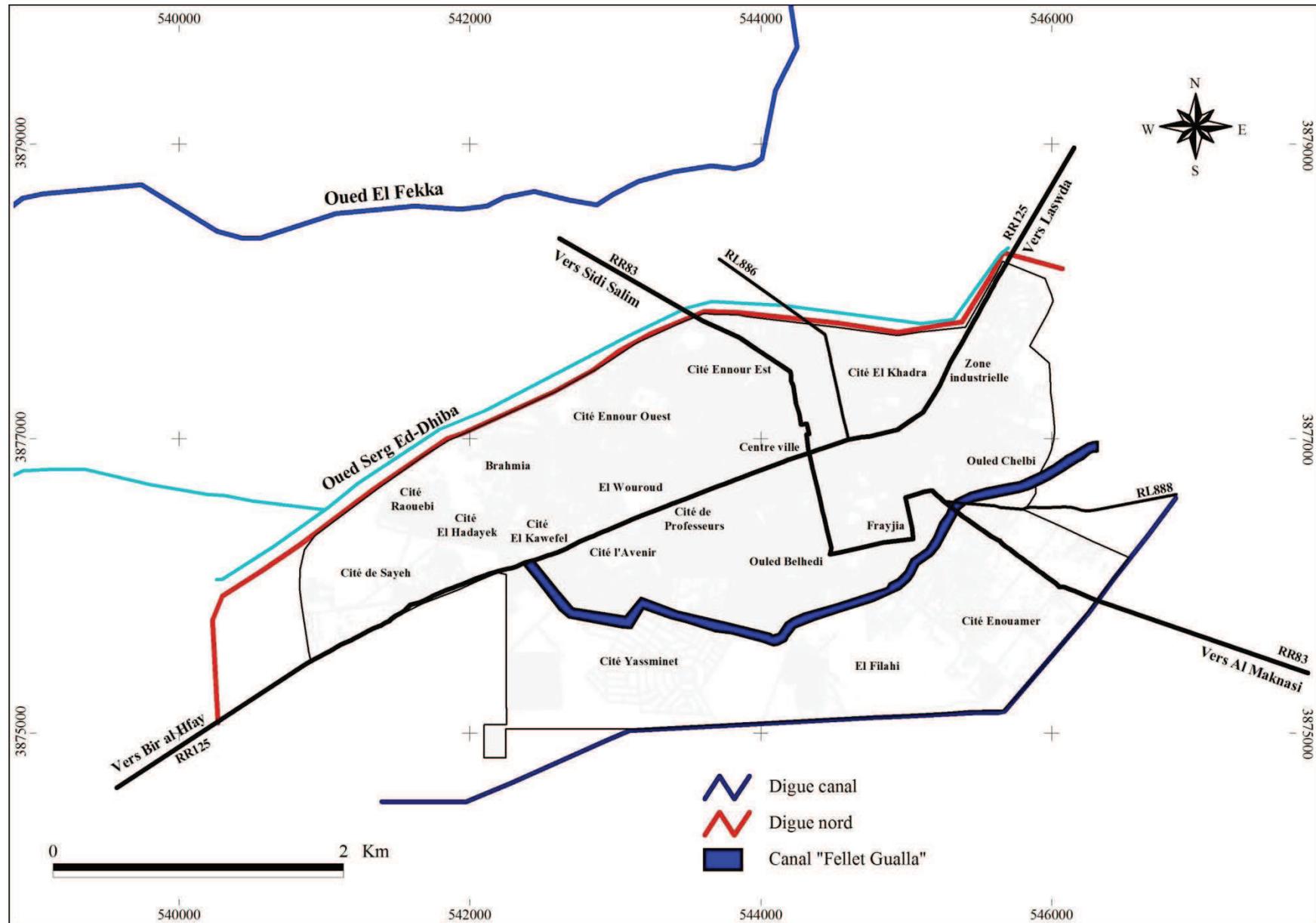


Figure.10.3: Les ouvrages de protection de la ville de Sidi Bouzid (Source : Réalisation Nasrallah Wafa., 2019 d'après la Direction de l'Hydraulique Urbaine D.H.U).

10-3- Des recommandations de gestion futures...

↳ **L'établissement d'un plan de prévention du risque inondation (P.P.R.I) pour les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid :** C'est un plan cartographique et réglementaire qui permet aux décideurs de dégager facilement les zones les plus exposés au risque inondation pour y prendre les précautions nécessaires afin de réduire les dégâts de ce fléau. Les cartes de risque réalisées dans cette thèse pour les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid peuvent jouer le rôle d'un P.P.R.I. Il est à noter que la cartographie des P.P.R.I peut être améliorée si on dispose d'autres types de données, issues essentiellement des enquêtes de terrain, permettant la cartographie du risque au niveau du bâti.

↳ **L'étalement et le redimensionnement du réseau d'évacuation des eaux pluviales :** Les aménageurs doivent accorder une attention particulière à ce genre de dispositif. En effet, il permet d'atténuer le risque d'inondation en retenant les eaux de ruissellement urbain. À Kairouan et à Sidi Bouzid l'étalement du réseau d'évacuation des eaux pluviales est limité aux principaux voies de communications et au alentour de certains quartiers. Des quartiers à risque comme ceux d'Ouled Chelbi à Sidi Bouzid et Sidi Saad-Keblià à Kairouan ne sont pas branchés jusqu'aujourd'hui à ce réseau.

↳ **L'entretien des aménagements hydrauliques existants :** Il s'agit essentiellement de :

✓ **Rehaussement et renforcement des digues :** Notamment la digue canal au sud de la ville de Sidi Bouzid au niveau de quartier « El Filahi » où on y est remarqué l'existence d'une brèche.

✓ **Curage des barrages :** Même s'il s'agit d'une technique coûteuse, le curage des barrages est une phase importante. Elle permet d'augmenter la durée de vie des deux barrages. En effet, Sidi Sâad et El Houareb sont considérés parmi les barrages qui sont exposés à un rythme d'envasement annuel moyen rapide estimé de 1,5 %.

↳ **La proposition des lieux de refuge au profit des citoyens pour y accéder au cas d'inondations extrêmes :** Ces zones de refuge sont situées essentiellement aux endroits les plus élevés de la ville. Elles se caractérisent aussi par leur forte capacité d'accueil. Aux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid ces lieux de refuge peuvent être : Les écoles, les lycées, les mosquées...

↳ **Renaître chez les citoyens une conscience du risque,** à travers :

✓ **L'information :** Il s'agit de mobiliser tous les moyens nécessaires pour informer les citoyens de la possibilité de la survenance des inondations. Parmi ces moyens, on peut citer : Les médias, les radios locales, les sirènes, les mosquées ainsi que par le contact direct des gestionnaires avec les citoyens.

✓ **La formation :** Ceci, nécessite la sensibilisation des citoyens de la nécessité de protéger leurs maisons par des techniques de protection particuliers, afin de réduire les dégâts.

✓ **L'encouragement des évacuations préventives.**

Conclusion

Gérer un risque consiste à réduire les facteurs de vulnérabilité et d'exposition et renforcer la capacité de réponse et d'adaptation. En effet, la capacité de s'adapter est la manière de faire face aux menaces inclut la capacité d'absorber les impacts en les protégeant

ou en s'y adaptant. D'après Creach, (2015), il ya quatre mesures pour gérer un risque : La stratégie de protection, l'adaptation du bâti, les actions relatives à la prévention et l'évacuation et la relocalisation des biens. La première stratégie est celle adoptée pour les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid. Elle vise à réduire la vulnérabilité en se basant sur les aménagements hydrauliques comme les digues et les barrages. Il est temps de mettre en place les autres stratégies. Il s'agit notamment d'informer les citoyens, les prévenir, les alerter et les équiper pour faire face au risque.

Conclusion

La vulnérabilité, les enjeux, l'aléa et la capacité d'adaptation sont les paramètres de base pour réaliser une carte de risque synthétique. Dans cette troisième partie, tous ces paramètres ont été utilisés pour cartographier le risque d'inondation à deux échelles : à macro-échelle au niveau des villes de Kairouan et de Sidi Bouzid et à micro-échelle au niveau de deux quartiers types, à savoir, Mansourah Nord à Kairouan et Ouled Chelbi à Sidi Bouzid.

Les résultats ont montré que les quartiers où le risque d'inondation est fort à très fort sont celles de Menchia 1 et 2, Keblia centre, la Medina, Sidi Saad Keblia et la zone industrielle à la ville de Kairouan et les quartiers d'El Wouroud, d'Ouled Chelbi et cité Ennour Est à la ville de Sidi Bouzid. À l'échelle des quartiers ce sont les routes qui se caractérisent par un degré de risque très fort à Mansourah Nord. Quant au quartier Ouled Chelbi les types d'occupation qui ont un très fort degré de risque sont les habitats individuels isolés, les habitats groupés désorganisés ainsi que les routes. Les moyens de gestion sont multiples l'exemple des barrages, des digues et des canaux, mais leur efficacité reste minime. En effet, l'absence et le sous dimensionnement des réseaux d'évacuation des eaux pluviales est le vrai problème qui aggrave le risque d'inondation dans ces deux villes.

Conclusion générale



Kairouan – Quartier « El Menchia » - Inondations 07 Août 2018

Source : <https://www.nessma.tv/article/>

Au terme de ce travail de thèse, on peut conclure que les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid sont concernées par le risque d'inondation. Historiquement, ces deux villes ont souffert des crues catastrophiques qui ont causés des dégâts lourds. Les inondations les plus mémorables sont celles de l'automne 1969 et de janvier 1990. En outre, les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid sont concernées par deux types de risque d'inondation : **les crues d'oued** causés essentiellement par les deux grands cours d'eau de la Tunisie Centrale, à savoir les oueds de Merguellil et de Zeroud ; et le phénomène de **ruissellement urbain** qui est devenu de plus en plus récurrent ces dernières décennies. C'est à ce deuxième type d'inondation qu'on s'est intéressé dans ce travail.

D'ailleurs, depuis la fin du XX^{ème} siècle les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid ont connu un étalement sans précédent de la tâche urbaine. En effet, suite à la construction des digues et des barrages, les citoyens se sentent à l'abri de ce risque et ces deux villes ne cessent de s'étendre sur des terrains inondables. Cette dynamique récente de l'urbanisation s'est faite sur des terrains plats à pente faible favorisant la stagnation des eaux pluviales, même avec des faibles quantités de pluie. Ceci, est le résultat de plusieurs facteurs notamment le sous dimensionnement voire l'absence des réseaux d'évacuation des eaux pluviales. Le climat joue aussi un rôle important dans l'aggravation du risque inondation. Ce sont les situations de « retour d'Est », qui y sont les responsables des pluies à risque d'inondation. En fait, c'est pendant la saison d'automne et surtout en mois de septembre et d'octobre que les pluies diluviennes ont le plus de chance de s'y produire.

À travers cette thèse, nous avons réussi à cartographier le ruissellement urbain et le risque d'inondation. Ceci, en intégrant divers types de données dans un système d'informations géographiques (S.I.G). Ces données sont à la fois des données climatiques (notamment pluviométriques), hydrologiques, socioéconomiques et cartographiques (Cartes topographiques, des plans d'aménagement urbain, des extraits Google Earth à très haute résolution...). La cartographie de risque est faite à différentes échelles : à l'échelle de la ville (en tenant compte du périmètre communale) ainsi qu'à l'échelle du quartier (quartier Mansourah Nord à Kairouan et quartier Ouled Chelbi à Sidi Bouzid). La méthodologie suivie consiste à combiner plusieurs facteurs afin d'aboutir à une carte de risque synthétique. Il s'agit essentiellement des cartes de vulnérabilité, des enjeux, de l'aléa et de la capacité d'adaptation. Les résultats obtenus sont validés par des observations de terrain. Cette thèse est une tentative de cartographie du risque inondation. La méthode utilisée est reproductible sur d'autres villes et à plusieurs échelles. Elle fournit des éléments de décision pour les gestionnaires du risque et des éléments d'information de la population. Il est à noter, que nous sommes conscients que ce travail comporte des lacunes. En fait, on ne peut pas tout étudier dans une thèse.

Ce travail n'est qu'un démarrage pour nos recherches futures en domaine d'Hydro-climatologie urbaine. En continuité à ce travail, il est envisagé d'améliorer : **la cartographie de la vulnérabilité** en basant sur des enquêtes de terrain afin d'évaluer la vulnérabilité à l'échelle du bâti. Ceci, en se tenant compte de plusieurs critères tels que: Le nombre de personnes vulnérables en cas d'inondation par logement (Individus à mobilité réduite, personnes âgées, enfants moins de 10 ans...), **la cartographie de l'aléa** en y intégrant les aménagements hydrauliques et en améliorant la formule du « Potentiel de ruissellement » en y

incorporant d'autres paramètres tels que : la porosité, la teneur en matière organique, l'état de surface, etc... Et **la cartographie des enjeux** en utilisant la télédétection (T.H.R) pour déterminer les coefficients d'occupation des sols « C.O.S » avec plus de précision. En outre, on peut collaborer avec un programmeur pour la réalisation d'**une carte dynamique du risque d'inondation en milieu urbain.**

Bibliographie

- Adger, (2006).- Vulnerability. *Global Environmental Change*. Vol.16, pp.268-281. Doi : 10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006.
- Amri, (2013). - *Estimation régionale de l'évapotranspiration sur la plaine de Kairouan (Tunisie) à partir de données satellites multi-capteurs*, Instrumentations et Détecteurs [physics.ins-det]. Université Paul Sabatier - Toulouse III., 176 p.
- Anctil, Rousselle, et Lauzon, (2012).- *Hydrologie : Cheminements de l'eau*. Polytechnique Montréal, Cours, 422 p.
- Auly, Laymond, Prat et Veiga., (2012).- *Petit vocabulaire des risques et des catastrophes d'origine naturelle*. Bordeaux : Editions Confluence, 96 p.
- Balica., et al., (2012). - A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts, *Natural Hazards*, Volume 64, Issue 1, pp. 73–105.
- Belhadj, (2005). - *Hydrologie urbaine*, Notes de cours, ESIER, 50 p.
- Belhedi, (1993). - De l'urbain en Tunisie. La ville, difficultés de mesure et essai de définition. *Papiers de l'INRS-Urbanisation*, Montréal, 9 p.
- Belhedi, (2000). - Le concept de ville. *La gouvernance urbaine : villes et pouvoirs*. Colloque du Département Sciences Politiques, FDSP, Tunis, 5 p.
- Ben Boubaker, (2000) – *Les gradients climatiques en Tunisie : Application à la température et à la pluie*. Publications de l'Université de Tunis I, Faculté des Lettres et des sciences humaines de la Manouba, 324 p.
- Ben Romdhane, (1993). – *Contribution à l'élaboration d'un schéma directeur de maîtrise des eaux des crues dans le centre et le sud Tunisien : Diagnostic des inondations de Janvier 1990*, Mémoire de Fin d'études du cycle de spécialisation, Institut National Agronomique de Tunisie, 106 p + Annexes.
- Ben Jelloul, (2014). - Contestations collectives et soulèvement du 17 décembre 2010. La révolte des quartiers populaires de Sidi Bouzid (Tunisie) : Enjeux et stratégies des acteurs. *Les Cahiers d'EMAM*, 22, pp. 71-115.
- Birkmann, (2006).- *Measuring vulnerability to natural hazards: Towards disaster resilient societies*. Tokyo: United Nations University Press, 524 p.
- Bohle, (2001). - Vulnerability and Criticality : Perspectives from Social Geography. *Newsletter of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change*. n° 2, pp. 1-7.
- Bousnina, (1981) - *La variabilité des pluies en Tunisie*, Thèse de doctorat, Faculté des sciences humaines et sociales de Tunis, 299 p.
- Bousnina et Oueslati, (1990).-Les inondations de janvier 1990 en Tunisie: Contexte climatique et conséquences morphologiques. *Rev.Tun.Géogr.*, n°19, pp 67-114.
- Bouzaiane et Lafforgue, (1986). – *Monographie Hydrologique des oueds Zeroud et Merguellil*, 1058 p.
- Bureau de l'Inventaire et des Recherches Hydrauliques (B.I.R.H), (1969). –*Crues de Septembre et Octobre 1969 : Propagation des crues*, 7 p + Carte.

- Bureau de l'Inventaire et des Recherches Hydrauliques (B.I.R.H), (1969). –*Note sommaire sur les crues de 1969*, 20 p + Carte.
- Burton et Kates, (1964). – The perception of natural hazards in resource management. *Naturel Resources Journal*, 3, pp. 412-414.
- Cardona, (2003). - A need for rethinking the concept of vulnerability and risk from a holistic perspective: A necessary review and criticism for effective risk management. In Tomety, (2017). – *Exposition et vulnérabilité face aux risques d'inondation au Burkina Faso : cas de la ville de Dori*, Master en gestion des risques et des catastrophes, Faculté des sciences, Université de Liège, 77 p.
- Carrega, (2016). - *Les inondations azuréennes du 3 octobre 2015 : une catastrophe annoncée? Premières considérations*. 25 p.
- Chambers, (1989). - “Editorial Introduction: Vulnerability, Coping and Policy”, in *Vulnerability: How the Poor Cope*, IDS Bulletin 20 (2), pp. 1-7.
- Cherni, (2004). - *Evaluation des paramètres de la sensibilité et de risque à l'érosion hydrique dans le bassin versant d'oued Béja*, Approche géomatique, DEA, F.L.A.H de la Manouba, 124p.
- Chouari, (2009). - *Environnement et risques naturels dans le Grand Tunis, Approche cartographique*, Thèse, Université Paris VII, 408 p.
- Colombert et al., (2006). - Climat urbain: de l'évolution des villes au changement climatique. *Les risques liés au temps et au climat. Actes du XIXe colloque international de climatologie*, Epernay, pp. 172-177.
- Correia, Santos et Rodrigues, (1987). – “Engineering Risk in Regional Drought Studies”, in Duckstein and Plate, eds, *Engineering Reliability and Risk in Water Resources*, Dordrecht/Bosten: Martinus Nijhoff, pp. 61-86.
- C.R.D.A de Kairouan, (2011). - *Actualisation de l'étude de planification des aménagements CES du gouvernorat de Kairouan. Élaboration du plan d'aménagement (Rapport final définitif)*.141 p.
- Creach, (2015).- *Cartographie et analyse économique de la vulnérabilité du littoral atlantique français face au risque de submersion marine-Volume 1*, Thèse de doctorat en géographie et économie, Universités de Nantes, 320 p.
- Crichton, (1999). – “The Risk Triangle”, in J. Ingleton, ed., *Natural Disaster Management*, London: Tudor Rose, pp. 102-103.
- D'Amato, (1998). - *Etude climatologique et statistique des évènements pluvieux en zone sahélienne, analysée à partir des données pluviographiques de l'expérience EPSAT-NIGER*, Thèse de doctorat en Mécanique - Génie mécanique - Génie civil, Université de Montpellier II Sciences et techniques du Languedoc, 232 p.
- D'Ercole, (1994). – Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse. *Revue de géographie alpine*. Vol.82, n° 4, pp. 87-96. Doi : 10.3406/rga.1994.3776.
- Dallel, (2009). – *Les évènements pluviométriques exceptionnels en Tunisie : Recherche d'une téléconnexion avec les Oscillations Nord Atlantique et étude d'impacts hydrologiques*, Thèse de doctorat en Climatologie, Faculté des sciences humaines et sociales de Tunis, 344 p.

- Dallel, (2015). - Les pluies à risques en Tunisie. *Contribution à l'étude des aléas et risques climatiques en Tunisie*, Publications de l'Université de Tunis, F.S.H.S, U.R « GREVACHOT », pp. 33-59.
- Dauphiné et Provitolo, (2013).- *Risques et catastrophes-Observer, spatialiser, comprendre, gérer*. Paris : Armand Colin, 416 p.
- De stage et al., (2002). – *Learning about Livelihoods: Insights from Southern Africa*, Cape Town: Peri peri and Oxfam.
- Defossez, Vinet et Léone, (2018). - Diagnostiquer la vulnérabilité face aux inondations: progrès et limites, *Inondations 1: La connaissance du risque*, ISTE Editions Ltd, pp.263-281.
- Despois, (1955) - *La Tunisie orientale, Sahel et basses Steppes*, Editions Armand Colin, Paris, 554 p.
- D.G.P.C, (2012). - *Recensement général de la circulation*, 287p.
- D.H.U, (1990). - *Protection des villes contre les inondations. Lot 2: Ville de Sidi Bouzid. Avant projet détaillé*, 129 p.
- D.H.U, (1998). - *Protection contre les inondations de la ville et de la plaine de Kairouan. Avant projet détaillé*, 40 p.
- D.H.U, (2002). - *Mission d'analyse et d'évaluation des études de protection contre les inondations de la ville et de la plaine de Kairouan. Etape 2: Amélioration des études existantes*. 52 p + Annexes.
- Direction des travaux publics, (1946). – *Compte rendu sur les dégâts causés par les crues des Oueds Merguellil et Zeroud du 26 au 30 Janvier 1946*, Collection B.I.R.H, 7 p + Carte.
- Direction Générale de l'aménagement de Territoire (D.G.A.T), (2004). - *Schéma directeur de l'aménagement de l'agglomération de Sidi Bouzid*, In, Ministère de L'équipement, d'habitat et d'Aménagement du territoire - Direction régionale de Sidi Bouzid., (2013) – *Révision du Plan d'Aménagement Urbain de la commune de Sidi Bouzid. Première phase : Rapport provisoire*, 45 p.
- D.R.E.H et commune de Sidi Bouzid, (2002). - *Révision du Plan d'Aménagement de Sidi Bouzid : Projet définitif du Plan d'Aménagement*, 59 p.
- El Melki, (2008) – Exemples de situations de « Retour d'Est » en Tunisie orientale, *Atlas de l'eau*, Publications de l'Université de Tunis I, Faculté des sciences humaines et sociales, unité de recherche « GREVACHOT », pp. 46-47.
- El Melki, (2014). - *Climatologie dynamique de la Tunisie*. F.L.A.H de la Manouba, 438 p.
- El Melki, (2015). - Dynamique atmosphérique et événements pluviométriques intenses en méditerranée occidentale : cas de la Tunisie. *Actes du Deuxième Colloque international « Eau & Climat : Regards croisés Nord/Sud »*, Fès (Maroc), 27-28 novembre 2013. Publication de la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines Saïs - Fès, N°: 52, pp. 21-30.
- Faye, (2015). - Étude des sécheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : Caractérisation et cartographie de la sécheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal. *Physio Géo*, 9, pp.17-35.
- Fehri, (2011). - Étude des facteurs de vulnérabilité hydrogéomorphologique dans le Grand Tunis : Approche comparative entre trois bassins versants. *Revue Tunisienne de Géographie*, vol. 41, pp 131-160.

- Fehri, (2013). - Extension urbaine et risque d'inondation autour de l'extrémité septentrionale du Jebel Bou Garnine (Grand Tunis – Tunisie). *Revista de Geomorfologie*, (Roumanie), vol. 15, pp 13-26.
- Fehri, (2014). - L'aggravation du risque d'inondation en Tunisie : éléments de réflexion. *Physio-Géo*, vol. 8, pp. 149-175.
- Fehri, et Mathlouthi, (2012). – Extension urbaine et risque d'inondation sur le piémont est du Jebel Ennahli (Ariana - Tunisie). *Actes du septième colloque du Département de Géographie, F.L.A.H de la Manouba*. pp 313-334.
- Fehri, Mathlouthi, et Zahar, (2007).- L'extension urbaine et ses conséquences sur le fonctionnement hydrogéomorphologique du bassin versant des oueds El-Ghrich et El-Gseb (Ariana – versant sud de Jebel Ennahli). *Actes du XX^{ème} colloque de l'AIC*. pp 252-258.
- Fehri, Samaâli, et Abaza, (2009). - Les inondations catastrophiques du 13 octobre 2007 dans le secteur de Sabbelet Ben Ammar entre aléa climatique et responsabilité anthropique (Grand Tunis – Tunisie), *Revue Tunisienne de Géographie* n°40, pp 31-55.
- Grecu, Zavoianu, Zaharia et Comanescu, (2007). - Analyse quantitative du réseau hydrographique du bassin versant du Slănic (Roumanie), *Physio-Géo*, Volume 1, pp. 79-93.
- Hajri, (1994). – Erosion et aménagement anti-érosif dans le bassin versant de l'oued Jebbes (El Ala : Tunisie Centrale). *La variabilité du climat et l'Homme en Tunisie*. Série colloque : 7, Volume : III, Université de Tunis I, pp.205-231.
- Hamza, (1993). - Les conséquences géomorphologiques des inondations de janvier 1990 en Tunisie centrale et méridionale. *Actes du 2ème Congrès des Géographes Africains* (Rabat et Agadir), pp. 113-129.
- Hangnon et al., (2015). - Précipitations 'extrêmes' et inondations à Ouagadougou : Quand le développement urbain est mal maîtrisé... *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **28**, pp. 497-502.
- Hebal et Remini, (2011). - Choix du modèle fréquentiel le plus adéquat à l'estimation des valeurs extrêmes de crues (cas du Nord de L'Algérie). *Canadian Journal of Civil Engineering*, **38**, pp. 881-892.
- Helaoui, (2005).- Les séquences de jours à fortes pluies dans les villes à risque d'inondation en Tunisie. *Actes du XVIII^{ème} colloque de l'AIC*. pp 69-72.
- Henia, (1993) - *Climat et Bilan de l'eau en Tunisie : Essai de régionalisation climatique par les bilans hydriques*. Publications de l'Université de Tunis I, Faculté des sciences humaines et sociales, série géographique, volume XXVI, 391p.
- Henia, (2008) - *Atlas de l'eau en Tunisie*. Publications de l'Université de Tunis I, Faculté des sciences humaines et sociales, unité de recherche « GREVACHOT », 186p.
- Henia et El Melki, (2000). - Circulation de "Retour d'est" et pluies diluviennes sur la Tunisie orientale. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **13**, pp.120-127.
- Henia et El Melki, (2015). - Les facteurs géographiques et aérologiques du climat de la Tunisie. *Contribution à l'étude des aléas et risques climatiques en Tunisie*, Publications de l'Université de Tunis, F.S.H.S, U.R « GREVACHOT », pp. 7-30.

- Henia et Hlaoui, (2008). – L’envasement des barrages, *Atlas de l’eau*, Publications de l’Université de Tunis I, Faculté des sciences humaines et sociales, unité de recherche « GREVACHOT », pp. 140-141.
- Hilhorst et Bankoff, (2004). – « Introduction: Mapping Vulnerability », in Bankoff, Frerks and Hilhorst, eds, *Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People*, London: Earthscan.
- Hirschboeck, (1988).- Flood hydroclimatology, in Baker, Kochel, and Patton, eds., *Flood Geomorphology*, John Wiley & Sons, pp. 27-49.
- Hirschboeck, (2007). - *Flood Hydroclimatology: Insights into Mixed Flood Populations*. California Extreme Precipitation Symposium. 25 p.
- Hlaoui, (2008) – Les fortes pluies journalières. *Atlas de l’eau en Tunisie*. Publications de l’Université de Tunis I, Faculté des sciences humaines et sociales, unité de recherche « GREVACHOT », pp. 24-25.
- Hmercha, (2010). – *Les risques hydrologiques dans le bassin versant d’oued El Fakka : Essai de caractérisation et d’analyse pour une meilleure gestion*, Master, F.L.S.H de Sfax, 162 p.
- Hmercha, (2016). - *Les risques d’inondation dans le bassin de Sfax*, Thèse de doctorat en Géographie, Faculté des Lettres et Sciences Humaines de Sfax, 291 p.
- Horton, (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to Quantitative morphology. *Bull. Geol. Soc. Am.* Vol. 56, pp. 275-370.
- Idris, (1962). -*La Berbérie Orientale sous les Zirides, Xe-XIIIe siècles*, 2 vols. in-8°, 2 tableaux dépliant, publication de l'Institut d'Études Orientales de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines d'Alger, Paris, 896 p.
- Jguirim, (1999). – *Tendances pluviométriques en Tunisie : 1901 - 1990*, Vol. 1/2, Thèse de doctorat en Climatologie, Faculté des sciences humaines et sociales de Tunis, 584 p.
- Kassab, (1979) - *Les très fortes pluies en Tunisie*, Publications de l’Université de Tunis, 244p.
- Kassab, (1994). – Précipitations remarquables et types de temps en Tunisie. *La variabilité du climat et l’Homme en Tunisie*. Série colloque : 7, Volume : III, Université de Tunis I, pp.117-154.
- Langbein, (1967). - Hydroclimate. In: *The Encyclopaedia of Atmospheric Sciences and Astrogeology* (ed. R.W. Fairbridge), Reinhold, New York, pp. 447–451.
- Larousse, (1995). – *Super major dictionnaire CM 1 CM2 6^e*, 1280 p.
- Leone et Vinet, (2006).- La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des méthodes d’évaluation des risques naturels. *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles-Analyses géographiques*. Montpellier : Presses Universitaires de la Méditerranée, pp.9-25
- Leone, Meschiné De Richemond et Vinet, (2010). – *Aléas naturels et gestion des risques*. Licence Géographie. PUF.287 p.
- Lepelley, et Dupuis, (1999). - *Frontières et limites géographiques de l’Afrique du Nord Antique (Hommage à Pierre Salama)*, (Actes de la table ronde, Paris 1997), 312 p.
- M.A.E. et G.I.Z., (2011). - *Elaboration de la "Stratégie Nationale sur le Changement Climatique" de la Tunisie*, 148 p.

- Mahfoudh, (2003). - *Architecture et urbanisme en Ifriqiya Médiévale (Proposition pour une nouvelle approche)*. F.L.A.H de la Manouba, Centre de publication universitaire, 297 p.
- M.D.D.E.F.P et M.A.M.R.O.T, (2011). - *Guide de gestion des eaux pluviales: Stratégies d'aménagement, principes de conception et pratiques de gestion optimales pour les réseaux de drainage en milieu urbain*, Québec, 386 p.
- Mejbri, (2010). - *Le ruissellement en milieu urbain : Cas du bassin versant de la sebkha d'Essijoumi*, DEA, F.L.A.H de la Manouba, 176 p.
- Ministère de L'équipement, d'habitat et d'Aménagement du territoire - Direction régionale de Sidi Bouzid, (2013). - *Révision du Plan d'Aménagement Urbain de la commune de Sidi Bouzid*, 43 p.
- M.T.E et D.G.A.T, (2011). - *Atlas du gouvernorat de Kairouan*, Rapport définitif, 85 p.
- Nasrallah, (2013). - *Impacts de l'urbanisation et des aménagements sur le ruissellement et les écoulements dans la banlieue sud du Grand-Tunis : Cas des bassins versants exoréiques entre Hammam-Lif et Borj Cédria*, Master, F.L.A.H de la Manouba, 76 p + Annexes.
- Nasrallah, Ben Boubaker et Vinet, (2017). - Les pluies extrêmes à risque d'inondations dans la ville de Kairouan. *In Actes du XXXe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie « Climat, ville et environnement »*, pp.325-331.
- Nasrallah et Fehri, (2017). - Cartographie de la vulnérabilité à l'inondation dans la banlieue sud du Grand-Tunis : Cas des bassins versants exoréiques entre Hammam-Lif et Borj Cédria. *In Actes du colloque International : « L'information géographique et le monde changeant »* à Sfax du 19 au 21 juin 2014, Cahiers du C.E.R.E.S, Série cartographie N°3, pp. 65-90.
- Oueslati, (1999). - *Les inondations en Tunisie*, Tunis, 206p.
- Ozer et al., (2014). - Évolution récente des extrêmes pluviométriques en Mauritanie (1933-2010). *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **27**, pp. 394-400.
- Pagney, (1994) - *Les catastrophes climatiques*, P.U.F, Q.S.J, 2878, 128p.
- Pelling, (2003). - *The vulnerability of cities : Natural disasters and social resilience*. London : Earthscan Publications Ltd, 212 p.
- Penet, (1909). - *Les syndicats d'inondation de la plaine de Kairouan Zeroud et Merguellil : Contribution à l'étude de l'Hydraulique Agricole en Tunisie catastrophes*, Collection B.I.R.H, 36 p.
- Poncet, (1970). - La catastrophe climatique de l'automne 1969 en Tunisie. *Ann. Géogr.* 435, pp. 581-595.
- Rebhi, (2007). - Dynamique urbaine non-réglementaire et gouvernance locale à Kairouan. *Insaniyat*, **38**, pp. 11-28.
- Reghezza, (2006).- La vulnérabilité : un concept problématique. *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles-Analyses géographiques*. Montpellier : Presses Universitaires de la Méditerranée, pp.35-39.
- Roux, (1996). - *Analyse des précipitations en hydrologie urbaine : Exemple de la Seine-Saint-Denis*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 290 p.

- S.T.U.D.I, G.I.Z et M.E.D.D, (2013). - *Etablissement d'un diagnostic concerté et bilans actualisés des trois barrages de Kairouan dans un contexte de changement climatique. Volet 1 : Rassemblement et partage des données*, 117 p.
- Sahani et al., (2012). - Évolution des caractéristiques pluviométriques dans la zone urbaine de Butembo (RDC) de 1957 à 2010. *Geo-Eco-Trop*, **36**, pp.121-136.
- Sakiss, (1994). – Contribution à l'étude des variations climatiques en Tunisie : Cas de la pluviométrie et de la température. *La variabilité du climat et l'Homme en Tunisie*. Série colloque : 7, Volume : III, Université de Tunis I, pp.39-62.
- Schanze, Zeman, et Marsalek, (2006). – *Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*, Nato Science Series: IV; 67, 319 p.
- Shelton, (2008). - The realm of hydroclimatology. *Hydroclimatology: Perspectives and Applications*. Cambridge University Press, 10 p.
- Sirven, (2007). - De la pauvreté à la vulnérabilité : Évolutions conceptuelles et méthodologiques. *Mondes en développement* 2007/4 (n° 140), pp. 9-24.
- Thiery, (2007). - *Susceptibilité du bassin de Barcelonnette (Alpes du sud, France) aux "mouvements de versant" : cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste*. Thèse de doctorat, université de Caen Basse-Normandie, 443 p.
- UN / ISDR (International Strategy for Disaster Reduction), (2004). – *Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives*, 2004 version, Geneva: UN Publications.
- UNDP (United Nations Development Programme), (1992). – *An Overview of Disaster Management*, 2nd edn, Washington, D.C.: UNDP.
- UNDP (United Nations Development Programme), (2004). – *Reducing Disaster Risk: A Challenge for Development*. A Global Report, New York: UNDP Publications.
- Vandiepenbeeck, (1997). - Bilan climatologique saisonnier. Hiver 1997 : Une période de froid remarquable. *Ciel et Terre*, **113**, pp. 65-66. In : Sene et Ozer, (2002). - Évolution pluviométrique et relation inondations événements pluvieux au Sénégal. *Bulletin de la société géographique de Liège*, **42**, pp. 27-33.
- Veyret, (2004).- *Géographie des risques naturels en France : de l'aléa à la gestion*. Paris : Hatier, 251 p.
- Vinchon, (2007).- Les enseignements du projet LIFE Environnement/ RESPONSE) pour une nouvelle approche de la vulnérabilité côtière. *Actes du colloque SHF « Variations climatiques et hydrologique »*. Lyon : SHF.2007, 10p.
- Vinet, Saidi, Douvinet, Fehri, Nasrallah, Menad et Mellas., (2016). - Urbanization and land use as a driver of flood risk. *The Mediterranean Region under Climate Change*, pp.563-575.
- Vogel et O'Brien, (2004). – “Vulnerability and Global Environmental Change: Rhetoric and Reality”, *AVISO – Information Bulletin on Global Environmental Change and Human Security* 13.
- WBGU (German Advisory Council on Global Change), (2005). – *World in Transition : Fighting Poverty through Environmental Policy*, London: Earthscan.
- Wendland, (1998). – Hydroclimatology. *Encyclopedia of Hydrology and Lakes*. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Dordrecht, pp 357-360.
- Zahar, (1991). - Les inondations en Tunisie ... Quels risques et quel programme ? *Revue n° 11 de l'association des géographes Tunisiens*, pp. 195-204.

Webographie

<http://archives.meteo60.fr/archives-bracknell.php>
<http://openstreetmap.org/>
<http://www.commune-kairouan.gov.tn/>
http://www.huffpostmaghreb.com/2013/10/06/pluies-kairouan-inondations_n_4052594.html
<http://www.kapitalis.com/societe/18525-tunisie-inondations-et-degats-dans-la-medina-de-kairouan.html>
<http://www.meteociel.com/modeles/archives/archives.php>
<http://www.onagri.tn/pluviometrie>
<http://www.tuniscope.com/article/32684>
<http://www.tunisienumerique.com/tunisie-photo-du-jour-la-mosquee-okba-ibn-nafaa-envahie-par-les-eaux/267991>
<http://www.turess.com/fr/lapresse/104638>
<http://www.webdo.tn/2014/05/19/les-fortes-intemperies-font-5-morts-kairouan/>
<https://earthexplorer.usgs.gov/>
<https://web.facebook.com/CommuneSidiBouzyd/>
<https://web.facebook.com/KairouanNewsKN/photos/>
<https://web.facebook.com/News.SidiBouzyd.Live/photos/>
<https://web.facebook.com/PageKAIROUAN/>
<https://www.nessma.tv/article/>

Liste des figures

Figure 1 : Les décès liés aux inondations dans la Tunisie (1962 - 2011).....	3
Figure 2: Schéma simplifié du phénomène d'hydroclimatologie.....	4
Figure 3: Les mécanismes causatifs des inondations.....	5
Figure 4 : Carte de localisation des villes de Kairouan et Sidi Bouzid.....	5
Figure 5 : Carte hydro-topographique des bassins versants des oueds de Zeroud et de Marguellil.....	6
Figure 6 : Régimes hydrologiques des bassins versants des oueds de Zeroud et de Marguellil.....	7
Figure 7 : Carte bioclimatique des bassins versants des oueds de Zeroud et de Marguellil.....	7
Figure 8: Schéma simplifié des paramètres intégrés pour la cartographie du risque inondation.....	9
Figure 9: Diagramme méthodologique.....	10
Figure 1.1 : Les stations pluviométriques dans les gouvernorats de Kairouan et de Sidi Bouzid.....	14
Figure 1.2 : Représentation schématique de la densité des pluviomètres.....	15
Figure 1.3 : Représentation schématique de la distance entre les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid et les stations hydrométriques.....	17
Figure 1.4 : Les stations hydrométriques dans les gouvernorats de Kairouan et de Sidi Bouzid.....	17
Figure 2.1: L'Hypsométrie dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan....	28
Figure 2.2: Courbes hypsométriques du bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et du bassin versant de l'oued El Fekka.....	29
Figure 2.3: L'Hypsométrie dans le bassin versant de l'oued El Fekka.....	30
Figure 2.4: Répartition fréquentielle des classes de pentes dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et dans le bassin versant de l'oued El Fekka.....	31
Figure 2.5: Les pentes dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan.....	32
Figure 2.6: Les pentes dans le bassin versant de l'oued El Fekka.....	34

Figure 2.7: Carte hydrographique des bassins versants des oueds de Zeroud et de Marguellil.....	36
Figure 2.8: Le réseau hydrographique dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan.....	37
Figure 2.9 : Oued Merguellil : Profil en long de l'Oued principal et ses principaux affluents.....	38
Figure 2.10: Le réseau hydrographique dans le bassin versant de l'oued El Fekka.....	41
Figure 2.11: Les débits annuels moyens des oueds Merguellil à la station de Haffouz Téléphérique entre 1991 et 2011 et Zeroud à la station de Sidi Saâd Aval entre 1956 et 1978.....	42
Figure 2.12: Les débits annuels moyens d'oued El Fekka à la station de Khanguet Zazia entre 1957 et 2009.....	42
Figure 2.13: Les débits mensuels et saisonniers moyens d'oued El Fekka à la station de Khanguet Zazia entre 1957 et 2009.....	44
Figure 2.14: Potentiel d'écoulement superficiel dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan.....	46
Figure 2.15: Méthodologie de calcul du potentiel d'écoulement superficiel.....	47
Figure 2.16: Potentiel d'écoulement superficiel dans le bassin versant de l'oued El Fekka.....	48
Figure 2.17: Types d'occupation du sol dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan.....	50
Figure 2.18: Types d'occupation du sol dans le bassin versant de l'oued El Fekka.....	51
Figure 2.19: Évolution de l'occupation du sol dans la ville de Kairouan entre 1950 à 2015..	55
Figure 2.20: Évolution de l'occupation du sol dans la ville de Sidi Bouzid entre 1950 à 2014.....	55
Figure 3.1 : Pluie annuelle et apports des flux atmosphériques.....	57
Figure 3.2: Fréquences saisonnières des circulations atmosphériques génératrices des pluies à risque en Tunisie entre 1969 et 2008.....	57
Figure 3.3: Variabilité des totaux pluviométriques interannuels à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 et Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971et 2014.....	58
Figure 3.4: L'écart à la moyenne annuelle de la pluviométrie à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 et Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971et 2014.....	59

<u>Figure 3.5:</u> Répartition mensuelle et saisonnière de la pluviométrie en (%) à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 et Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971et 2014.....	60
<u>Figure 3.6:</u> Variabilité des pluies d'automne, d'hiver, de printemps et d'été à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013.....	61
<u>Figure 3.7:</u> Variabilité des pluies d'automne, d'hiver, de printemps et d'été à la station de Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971et 2014.....	62
<u>Figure 3.8:</u> Fréquence interannuelle de jours de pluies torrentielles à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 et Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971et 2014	63
<u>Figure 3.9:</u> Fréquence moyenne mensuelle et saisonnière de jours de pluies à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 et Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971et 2014.....	64
<u>Figure 3.10:</u> Répartition mensuelle, saisonnière et annuelle moyenne de la pluviométrie à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 et Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971et 2014.....	66
<u>Figure 3.11 :</u> Courbes IDF KHANGUET ZAZIA - Formules de Montana.....	67
<u>Figure 3.12 :</u> Courbes IDF HAFFOUZ - Formules de Montana.....	67
<u>Figure 3.13:</u> Variabilité mensuelle moyenne de la température à la station de Kairouan SM entre 1985 et 2010.....	69
<u>Figure 3.14:</u> Tendence apparente des températures moyennes annuelles à la station de Kairouan SM entre 1965 et 2004.....	69
<u>Figure 3.15:</u> Variabilité mensuelle de la durée d'insolation en heures à la station de Kairouan SM entre 1990 et 2001.....	71
<u>Figure 4.1 :</u> Evolution des surfaces urbanisées dans la commune de Kairouan entre 1930 et 2015.....	73
<u>Figure 4.2 :</u> Evolution des surfaces urbanisées dans la commune de Sidi Bouzid entre 1934 et 2014.....	73
<u>Figure 4.3 :</u> Extension du tissu urbain entre 1930 et 2015 dans la ville de Kairouan.....	74
<u>Figure 4.4 :</u> Extension du tissu urbain entre 1934 et 2014 dans la ville de Sidi Bouzid.....	75
<u>Figure 4.5 :</u> Les quartiers d'habitat non réglementaire dans la ville de Kairouan.....	77
<u>Figure 4.6 :</u> Les quartiers d'habitat non réglementaire dans la ville de Sidi Bouzid.....	78
<u>Figure 4.7 :</u> Extension du bâti au-delà de la digue dans la ville de Kairouan.....	80
<u>Figure 4.8 :</u> Extension du bâti au-delà du périmètre communal de Sidi Bouzid.....	81

Figure 4.9: Débit journalier moyen de la circulation motorisée des véhicules à deux essieux ou plus à la ville de Kairouan.....	82
Figure 4.10 : Les cas de recouplement entre réseau hydrographique et voirie dans la ville de Kairouan.....	83
Figure 5.1: Les maximas journaliers de la pluviométrie à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 et à Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971et 2014.....	89
Figure 5.2: Evolution du nombre de jours de pluie ($P \geq 1$ mm) à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 et Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971et 2014.....	90
Figure 5.3: Fréquence de jours de pluie dont le total est supérieur au 95 ^e percentile à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 et Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971et 2014.....	90
Figure 5.4: Fréquence de jours de pluie dont le total est supérieur au 99 ^e percentile à Kairouan SM entre 1959 et 2013 et à Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971et 2014.....	91
Figure 5.5: Les jours des pluies à risque à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 et Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971et 2014.....	92
Figure 5.6: Ajustement statistique de la pluviométrie maximale journalière selon la « Loi Gumbel » à la station de Kairouan SM (1959- 2013) et Sidi Bouzid Ferme 20 (1971- 2014).....	92
Figure 5.7: Répartition annuelle des évènements pluvieux extrêmes (Nombre et total pluviométrique) à la station de Kairouan SM entre 1959 et 2013 et Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971et 2014.....	94
Figure 5.8: Répartition saisonnière du nombre d'évènements pluvieux extrêmes à Kairouan SM (1959- 2013) et à Sidi Bouzid Ferme 20 (1971- 2014).....	95
Figure 5.9: Répartition des mois selon la pluviosité et le nombre des évènements pluvieux extrêmes à Kairouan SM entre 1959 et 2013 et à Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971et 2014.....	95
Figure 6.1: Les débits maximums journaliers et instantanés d'oued Zeroud à la station de Sidi Saâd Aval entre 1956 et 1978.....	102
Figure 6.2 : Les débits maximums journaliers et instantanés d'oued El Fekka à la station de Khanguet Zazia entre 1957 et 2009.....	102
Figure 6.3: Répartition spatiale des pluies du 21 au 23 janvier 1990 dans le gouvernorat de Sidi Bouzid.....	120
Figure.6.4: Champ barométrique au sol et champ barométrique de la surface 500hpa, du 22 janvier 1990.....	121

<u>Figure 6.5</u> : Radiosondages de Tozeur du 21 au 24 janvier 1990 à 12h00mn.....	122
<u>Figures 6.6 et 6.7</u> : Répartition spatiale des pluies du 05 octobre 2013 et du 30 septembre 2015 dans le gouvernorat de Kairouan.....	125
<u>Figures 6.8 et 6.9</u> : Les cartes synoptiques en surface des évènements de 05 octobre 2013 et 30 septembre 2015.....	128
<u>Figures 6.10 et 6.11</u> : Les cartes synoptiques en altitude des évènements de 05 octobre 2013 et 30 septembre 2015.....	128
<u>Figure 6.12</u> : Radiosondages de Tunis-Carthage du 05 octobre 2013 à 12h00mn.....	129
<u>Figure 6.13</u> : Radiosondages de Tunis-Carthage du 30 septembre 2015 à 12h00mn.....	130
<u>Figure 7.1</u> : Diagramme méthodologique.....	142
<u>Figure 7.2</u> : Degré de protection des sols dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan.....	144
<u>Figure 7.3</u> : Niveaux de protection des sols dans le bassin versant de l'oued El Fekka.....	146
<u>Figure 7.4</u> : Les classes de pente dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et dans le bassin versant de l'oued El Fekka.....	147
<u>Figure 7.5</u> : Degré de propagation des crues dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan.....	148
<u>Figure 7.6</u> : Degré de propagation des crues dans le bassin versant de l'oued El Fekka.....	150
<u>Figure 7.7</u> : Susceptibilité des terrains au risque inondation dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan.....	152
<u>Figure 7.8</u> : Susceptibilité des terrains au risque inondation dans le bassin versant de l'oued El Fekka.....	154
<u>Figure.8.1</u> : Les différentes approches de la vulnérabilité.....	162
<u>Figure 8.2</u> : Typologie d'occupation du sol dans la ville de Kairouan : Situation 2015.....	171
<u>Figure 8.3</u> : Typologie d'occupation du sol dans la ville de Sidi Bouzid : Situation 2014....	175
<u>Figure 8.4</u> : Groupes hydrologiques des sols dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid.....	178
<u>Figure 8.5</u> : Les coefficients du ruissellement dans la ville de Kairouan.....	182
<u>Figure 8.6</u> : Les coefficients du ruissellement dans la ville de Sidi Bouzid.....	183
<u>Figure 8.7</u> : Les points cotés couvrant la commune de Kairouan.....	184
<u>Figure 8.8</u> : Hauteur de l'eau ruisselée dans la ville de Kairouan.....	185

<u>Figure 8.9:</u> Hauteur de l'eau ruisselée dans la ville de Sidi Bouzid.....	186
<u>Figure 8.10 :</u> Les points côtés couvrant la commune de Sidi Bouzid.....	187
<u>Figure 8.11:</u> L'hypsométrie dans la ville de Kairouan.....	188
<u>Figure 8.12:</u> Les pentes dans la ville de Kairouan.....	189
<u>Figure 8.13:</u> L'hypsométrie dans la ville de Sidi Bouzid.....	190
<u>Figure 8.14:</u> Les pentes dans la ville de Sidi Bouzid.....	191
<u>Figure 8.15:</u> L'inondabilité dans la ville de Kairouan.....	193
<u>Figure 8.16:</u> L'inondabilité dans la ville de Sidi Bouzid.....	194
<u>Figure 8.17:</u> Les zones de stagnation des eaux pluviales.....	196
<u>Figure 8.18:</u> Les autres critères d'aléa dans la ville de Kairouan.....	197
<u>Figure 8.19:</u> Les autres critères d'aléa dans la ville de Sidi Bouzid.....	199
<u>Figure 8.20:</u> L'aléa dans la ville de Kairouan.....	201
<u>Figure 8.21:</u> L'aléa dans la ville de Sidi Bouzid.....	202
<u>Figure 8.22:</u> Les enjeux dans la ville de Kairouan.....	204
<u>Figure 8.23:</u> Les enjeux dans la ville de Sidi Bouzid.....	206
<u>Figure 8.24:</u> L'exposition dans la ville de Kairouan.....	208
<u>Figure 8.25:</u> L'exposition dans la ville de Sidi Bouzid.....	209
<u>Figure 8.26:</u> La vulnérabilité dans la ville de Kairouan.....	214
<u>Figure 8.27:</u> La vulnérabilité dans la ville de Kairouan.....	216
<u>Figure 8.28:</u> La capacité d'adaptation dans la ville de Kairouan.....	218
<u>Figure 8.29:</u> La capacité d'adaptation dans la ville de Kairouan.....	220
<u>Figure 8.30:</u> Risque d'inondation dans la ville de Kairouan.....	222
<u>Figure 8.31:</u> Risque d'inondation dans la ville de Sidi Bouzid.....	223
<u>Figure. 9.1:</u> Les classes de pente dans le quartier Mansourah Nord à Kairouan.....	225
<u>Figure. 9.2:</u> L'aléa dans quartier Mansourah Nord à Kairouan.....	225
<u>Figure. 9.3:</u> Les classes d'enjeux dans le quartier Mansourah Nord dans la ville de Kairouan.....	227

<u>Figure. 9.4:</u> L'exposition dans le quartier Mansourah Nord dans la ville de Kairouan.....	227
<u>Figure. 9.5:</u> L'emplacement des endroits visités dans quartier Mansourah Nord	229
<u>Figure. 9.6:</u> La vulnérabilité au risque d'inondation dans le quartier Mansourah Nord.....	240
<u>Figure. 9.7:</u> La capacité d'adaptation dans le quartier Mansourah Nord au risque d'inondation.....	240
<u>Figure. 9.8:</u> Risque d'inondation dans le quartier Mansourah Nord.....	242
<u>Figure. 9.9:</u> Les pentes dans quartier Ouled Chelbi à la ville de Sidi Bouzid.....	244
<u>Figure. 9.10:</u> L'aléa dans quartier Ouled Chelbi à la ville de Sidi Bouzid.....	244
<u>Figure. 9.11:</u> Les niveaux d'enjeux dans le quartier Ouled Chelbi.....	246
<u>Figure. 9.12:</u> Les niveaux d'exposition au risque d'inondation urbaine dans le quartier Ouled Chelbi.....	246
<u>Figure. 9.13:</u> L'emplacement des endroits visités dans quartier Ouled Chelbi.....	248
<u>Figure. 9.14:</u> La vulnérabilité dans quartier le Ouled Chelbi à la ville de Sidi Bouzid.....	258
<u>Figure. 9.15:</u> La capacité d'adaptation dans quartier le Ouled Chelbi à la ville de Sidi Bouzid.....	258
<u>Figure. 9.16:</u> Risque d'inondation dans quartier Ouled Chelbi à la ville de Sidi Bouzid ...	260
<u>Figure.10.1:</u> Les ouvrages de protection de la ville de Kairouan.....	264
<u>Figure.10.2:</u> Rythmes annuels d'envasement des barrages tunisiens en (%) de la capacité de la retenue.....	266
<u>Figure.10.3:</u> Les ouvrages de protection de la ville de Sidi Bouzid.....	269

Liste des tableaux

<u>Tableau.1.1</u> : Situation des stations et caractéristiques des séries des totaux annuels.....	15
<u>Tableau 1.2</u> : Normes pour un réseau minimal d'enregistrement de précipitations et d'écoulement.....	16
<u>Tableau 1.3</u> : Situation des stations et caractéristiques des séries des totaux annuels.....	18
<u>Tableau 1.4</u> : Seuils des débits intenses et extrêmes pour les villes de Kairouan aux stations de Sidi Saâd Aval (1956-1978) et Haffouz Téléphérique (1991-2011) et Sidi Bouzid à la station de Khanguet Zazia (1957-2009).....	21
<u>Tableau 2.1</u> : Répartition surfacique des classes d'altitude dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et dans le bassin versant de l'oued El Fekka.....	26
<u>Tableau.2.2</u> : Caractéristiques physiques du bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et du bassin versant de l'oued El Fekka.....	29
<u>Tableau 2.3:</u> Altitudes caractéristiques du bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et du bassin versant de l'oued El Fekka.....	31
<u>Tableau 2.4:</u> Paramètres du relief du bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et du bassin versant de l'oued El Fekka.....	31
<u>Tableau. 2.5:</u> Répartition surfacique des classes de pentes dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et dans le bassin versant de l'oued El Fekka.....	33
<u>Tableau.2.6</u> : Description des bassins versants des oueds Zeroud et Marguellil.....	36
<u>Tableau.2.7</u> : Caractéristiques hydrologiques des bassins versants des oueds Zeroud et Marguellil.....	40
<u>Tableau.2.8</u> : Les débits mensuels et saisonniers moyens aux stations de Haffouz Téléphérique (1991-2011) et de Sidi Saâd Aval (1956-1978).....	43
<u>Tableau. 2.9:</u> Caractéristiques morphométriques du bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et du bassin versant de l'oued El Fekka.....	45
<u>Tableau.2.10:</u> La densité du drainage.....	45
<u>Tableau.2.11</u> : Description des groupes des sols.....	45
<u>Tableau.2.12:</u> Répartition surfacique du potentiel d'écoulement superficiel dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et le bassin versant de l'oued El Fekka.....	49
<u>Tableau.2.13:</u> Répartition surfacique des types d'occupation dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et dans le bassin versant de l'oued El Fekka.....	52
<u>Tableau.2.14:</u> Évolution surfacique des différents types d'occupation du sol dans les villes de Kairouan (1950-2015) et de Sidi Bouzid (1950-2014).....	53
<u>Tableau.3.1:</u> Distance minimale par rapport à la mer pour les deux stations de Kairouan et de Sidi Bouzid.....	56

<u>Tableau.3.2</u> : Répartition mensuelle et saisonnière des précipitations pluvieuses aux stations de Kairouan SM (1959-2013) et de Sidi Bouzid Ferme 20 (1971-2014).....	60
<u>Tableau.3.3</u> : Résultats de l'application de la formule de Montana.....	68
<u>Tableau.3.4</u> : Température mensuelle moyenne à la station de Sidi Bouzid (1974-2005).....	69
<u>Tableau.3.5</u> : Insolation mensuelles moyenne à la station de Sidi Bouzid (1974-2005).....	71
<u>Tableau.3.6</u> : Evaporation mensuelle moyenne à la station de Sidi Bouzid (1974-2005).....	71
<u>Tableau. 4.1</u> : Evolution de la population dans les communes de Kairouan (1984-2014) et de Sidi Bouzid (1966-2014).....	72
<u>Tableau.4.2</u> : Evolution du débit journalier moyen de la circulation motorisée des véhicules à deux essieux ou plus à la ville de Sidi Bouzid entre 1992 et 2012.....	82
<u>Tableau.5.1</u> : Seuils des pluies intenses et extrêmes pour les stations de Kairouan SM (1959-2013) et Sidi Bouzid Ferme 20 (1971-2014).....	90
<u>Tableau.5.2</u> : Nombre de séquences de jours à très forte pluie (total ≥ 30) à Kairouan SM (1959-2013) et à Sidi Bouzid Ferme 20 (1971-2014).....	91
<u>Tableau.5.3</u> : Les deux critères (BIC) et (AIC) calculés pour les modèles GUMBEL et GEV.....	93
<u>Tableau.5.4</u> : Types des événements pluvieux aux villes de Kairouan (1959-2013) et Sidi Bouzid (1971-2014).....	93
<u>Tableau 5.5</u> : Durée et apport pluviométrique des événements extrêmes à Kairouan SM entre 1959 et 2013.....	96
<u>Tableau 5.6</u> : Durée et apport pluviométrique des événements pluvieux à Sidi Bouzid Ferme 20 entre 1971 et 2014.....	97
<u>Tableau.6.1</u> : Les crues très abondantes du Merguellil et Zeroud jusqu'au 1907.....	98
<u>Tableau.6.2</u> : Principales inondations et dégâts associés au centre de la Tunisie à Kairouan jusqu'au XX ^{ème} siècle.....	99
<u>Tableau.6.3</u> : Types de crues aux villes de Kairouan aux stations de Sidi Saâd Aval (1956-1978) et Haffouz Téléphérique (1991-2011) et Sidi Bouzid à la station de Khanguet Zazia (1957-2009).....	100
<u>Tableau.6.4</u> : Dates et débits des crues exceptionnelles et très exceptionnelles à Kairouan (stations de Sidi Saâd Aval (1956-1978) et Haffouz Téléphérique (1991-2011)) et à Sidi Bouzid (station de Khanguet Zazia, 1957-2009).....	101
<u>Tableau.6.5</u> : Caractéristiques des plus grandes crues de à l'Oued Zeroud à la station de Sidi Saâd.....	103
<u>Tableau.6.6</u> : Caractéristiques des principales crues à la station de Haffouz.....	103
<u>Tableau.6.7</u> : Caractéristiques des plus fortes crues observées à la station de Khanguet Zazia.....	104

<u>Tableau.6.8</u> : Les zones d'inondation des oueds Merguellil et Zeroud à Kairouan et des oueds El Fekka et Serg Dhiba à Sidi Bouzid.....	106
<u>Tableau.6.9</u> : Transport solide des bassins versants des oueds Zeroud et Merguellil.....	109
<u>Tableau.6.10</u> : Les différentes variations de l'Oued El Fekka dans sa partie aval et de l'Oued Serg Dhiba, suite aux crues de janvier 1990.....	110
<u>Tableau.6.11</u> : Apports des sédiments et turbidité moyenne des crues observées sur l'Oued Zeroud à la station de Sidi Saâd (Septembre et octobre 1969).....	113
<u>Tableau 6.12</u> : Caractéristiques des pluies exceptionnelles des mois de septembre et octobre 1969 aux stations de Kairouan SM et Sidi Bouzid Ferme 13.....	114
<u>Tableau 6.13</u> : Dégâts associés aux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid lors des inondations du mois d'octobre 1969.....	117
<u>Tableau 6.14</u> : Caractéristiques des pluies exceptionnelles de décembre 1973 aux stations de Kairouan SM et de Sidi Bouzid Ferme 20.....	118
<u>Tableau 6.15</u> : Dégâts enregistrés dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid lors des inondations de décembre 1973.....	119
<u>Tableau 6.16</u> : Dégâts enregistrés dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid suite aux inondations des 22, 23 et 24/01/1990.....	123
<u>Tableau 6.17</u> : Les dégâts occasionnés par les crues des oueds El Fekka et Serg Dhiba (gouvernorat de Sidi Bouzid) et des oueds Merguellil et Zeroud (gouvernorat de Kairouan) en janvier 1990.....	124
<u>Tableau 6.18</u> : Caractéristiques des pluies exceptionnelles à la station de Kairouan SM (Octobre 2013 et Septembre 2015).....	125
<u>Tableau 6.19</u> : Trajectoire de la masse nuageuse vers Kairouan le 05 octobre 2013.....	126
<u>Tableau 6.20</u> : Trajectoire de la masse nuageuse vers Kairouan le 30 septembre 2015.....	127
<u>Tableau 6.21</u> : Dégâts associés à la ville de Kairouan lors des inondations du 05/10/2013 et 30/09/2015.....	131
<u>Tableau 6.22</u> : Dégâts associés à la ville de Kairouan lors des inondations du 19/05/2014.....	133
<u>Tableau 7.1</u> : Les données de base utilisées pour la création de la banque des données.....	143
<u>Tableau 7.2</u> : Répartition des types d'occupation selon leur degré de protection des sols dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et dans le bassin versant de l'oued El Fekka	143
<u>Tableau 7.3</u> : Répartition surfacique du degré de protection des sols dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et dans le bassin versant de l'oued El Fekka	145
<u>Tableau 7.4</u> : Matrice Potentiel d'écoulement superficiel en fonction de la Pente.....	149
<u>Tableau 7.5</u> : Répartition surfacique du degré de protection des sols dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et dans le bassin versant de l'oued El Fekka.....	149

<u>Tableau 7.6:</u> Matrice S.T.I = D.P.C × D.P.....	151
<u>Tableau 7.7:</u> Répartition surfacique de la susceptibilité des terrains au risque inondation dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et dans le bassin versant de l'oued El Fekka.....	153
<u>Tableau 8.1 :</u> Étude de la vulnérabilité à Micro échelle	163
<u>Tableau 8.2 :</u> Taux moyen d'imperméabilisation pour chaque type d'occupation des sols à la commune de Kairouan.....	167
<u>Tableau 8.3 :</u> Taux moyen d'imperméabilisation pour chaque type d'occupation des sols à la commune de Sidi Bouzid.....	172
<u>Tableau 8.4 :</u> « Curve Number » pour plusieurs types des sols et couvertures végétales « AMC II ».....	176
<u>Tableau 8.5 :</u> Détermination du type de conditions antécédentes de précipitation en hiver.....	177
<u>Tableau 8.6 :</u> Le cumul pluviométrique des 5 jours précédents l'évènement pluvieux le plus extrême à Kairouan et à Sidi Bouzid.....	179
<u>Tableau 8.7 :</u> Répartition surfacique des groupes hydrologiques des sols dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid.....	179
<u>Tableau 8.8 :</u> Les coefficients de ruissellements pour chaque type d'occupation selon les groupes hydrologiques du sol à la ville de Kairouan.....	180
<u>Tableau 8.9 :</u> Les coefficients de ruissellements pour chaque type d'occupation selon les groupes hydrologiques du sol à la ville de Sidi Bouzid.....	181
<u>Tableau 8.10 :</u> Répartition surfacique des coefficients du ruissellement dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid.....	184
<u>Tableau 8.11 :</u> Répartition surfacique des classes de pente dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid.....	187
<u>Tableau 8.12 :</u> Matrice de la hauteur de la lame d'eau ruisselée en fonction de la pente.....	192
<u>Tableau 8.13 :</u> Répartition surfacique de l'inondabilité des surfaces dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid.....	192
<u>Tableau 8.14 :</u> Les autres critères d'aléa par quartier dans la commune de Kairouan.....	195
<u>Tableau 8.15 :</u> Les autres critères d'aléa par quartier dans la commune de Sidi Bouzid.....	198
<u>Tableau 8.16 :</u> Matrice d'aléa.....	200
<u>Tableau 8.17 :</u> Répartition surfacique de l'aléa dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid.....	200
<u>Tableau 8.18 :</u> Répartition des types d'occupation selon leur degré d'enjeux dans la ville de Kairouan.....	203
<u>Tableau 8.19:</u> Répartition surfacique des enjeux dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid.....	203

<u>Tableau 8.20</u> : Répartition des types d'occupation selon leur degré d'enjeux dans la ville de Sidi Bouzid.....	205
<u>Tableau 8.21</u> : Matrice des enjeux en fonction d'aléa.....	207
<u>Tableau 8.22</u> : Répartition surfacique de degré d'exposition des enjeux dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid.....	207
<u>Tableau 8.23</u> : Etude de la vulnérabilité liée au bâti/population par quartier à la ville de Kairouan.....	210
<u>Tableau 8.24</u> : Etude de la vulnérabilité liée au bâti par quartier à la ville de Sidi Bouzid.....	211
<u>Tableau 8.25</u> : Etude de la vulnérabilité liée au voirie/réseau par quartier à la ville de Kairouan.....	212
<u>Tableau 8.26</u> : Etude de la vulnérabilité liée au voirie/réseau par quartier à la ville de Sidi Bouzid.....	213
<u>Tableau 8.27</u> : Matrice de la vulnérabilité.....	215
<u>Tableau 8.28</u> : Répartition surfacique des classes de vulnérabilité dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid.....	215
<u>Tableau 8.29</u> : Etude de la capacité d'adaptation par quartier à la ville de Kairouan.....	217
<u>Tableau 8.30</u> : Etude de la capacité d'adaptation par quartier à la ville de Sidi Bouzid.....	219
<u>Tableau 8.31</u> : Répartition surfacique de la capacité d'adaptation au risque inondation dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid.....	219
<u>Tableau 8.32</u> : Répartition surfacique du risque inondation dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid.....	221
<u>Tableau 9.1</u> : Répartition surfacique des classes de pente dans le quartier de Mansourah Nord à la commune Kairouan.....	224
<u>Tableau 9.2</u> : Répartition surfacique du degré d'aléa dans le quartier de Mansourah Nord à la commune Kairouan.....	226
<u>Tableau 9.3</u> : Répartition des types d'occupation selon leur place dans la hiérarchie des enjeux dans le quartier de Mansourah Nord (ville de Kairouan).....	226
<u>Tableau 9.4</u> : Répartition surfacique des classes d'enjeux dans le quartier de Mansourah Nord à la commune Kairouan.....	226
<u>Tableau 9.5</u> : Répartition surfacique de degré d'exposition des enjeux dans le quartier de Mansourah Nord à la commune Kairouan.....	228
<u>Tableau 9.6</u> : Étude de la vulnérabilité du quartier Mansourah Nord vis-à-vis du risque d'inondation.....	230
<u>Tableau 9.7</u> : Etude de la vulnérabilité au risque d'inondation au quartier Mansourah Nord à la ville de Kairouan.....	239

<u>Tableau 9.8:</u> Répartition surfacique des classes de vulnérabilité dans le quartier de Mansourah Nord à la commune Kairouan.....	239
<u>Tableau 9.9 :</u> Etude de la capacité d’adaptation au quartier Mansourah Nord dans la ville de Kairouan.....	241
<u>Tableau 9.10:</u> Répartition surfacique de la capacité d'adaptation au risque inondation dans le quartier de Mansourah Nord à la commune de Kairouan.....	241
<u>Tableau 9.11:</u> Répartition surfacique du risque d’inondation dans le quartier de Mansourah Nord à la commune de Kairouan.....	243
<u>Tableau 9.12:</u> Répartition surfacique des classes de pente dans le quartier d’Ouled Chelbi à la commune de Sidi Bouzid.....	243
<u>Tableau 9.13:</u> Répartition surfacique de l’aléa inondation dans le quartier d’Ouled Chelbi à la commune de Sidi Bouzid.....	243
<u>Tableau 9.14.</u> Répartition des types d’occupation selon leur degré d’enjeux dans le quartier de Mansourah Nord.....	245
<u>Tableau 9.15:</u> Répartition surfacique des niveaux d’enjeux dans le quartier d’Ouled Chelbi à la commune de Sidi Bouzid.....	245
<u>Tableau 9.16:</u> Répartition surfacique du degré d’exposition des enjeux dans le quartier d’Ouled Chelbi à la commune de Sidi Bouzid.....	247
<u>Tableau 9.17 :</u> Etude de la vulnérabilité au risque d’inondation au quartier Ouled Chelbi dans la ville de Sidi Bouzid.....	247
<u>Tableau 9.18 :</u> Étude de la vulnérabilité du quartier Ouled Chelbi vis-à-vis le risque inondation.....	249
<u>Tableau 9.19:</u> Répartition surfacique des classes de vulnérabilité dans le quartier d’Ouled Chelbi à la commune de Sidi Bouzid	257
<u>Tableau 9.20 :</u> Etude de la capacité d’adaptation au risque d’inondation au quartier Ouled Chelbi à la ville de Sidi Bouzid.....	257
<u>Tableau 9.21:</u> Répartition surfacique de la capacité d'adaptation au risque inondation dans le quartier d’Ouled Chelbi dans la commune de Sidi Bouzid.....	259
<u>Tableau 9.22:</u> Répartition surfacique du risque inondation dans le quartier d’Ouled Chelbi à la commune de Sidi Bouzid.....	259

Liste des photos

- Photo 1.1** : Entretien auprès d'un habitant du quartier « El Mansourah Nord » à Kairouan.....18
- Photo 2.1** : Jbal Al Kbar.....27
- Photo 4.1** : Une route non aménagée au quartier d'Ouled Chelbi à la ville de Sidi Bouzid...84
- Photo 4.2** : Canal Fellet Galla (Cité Ouled Chelbi à la ville de Sidi Bouzid). Accumulation de déchets plastiques dans le canal pouvant causer des phénomènes d'embâcle lors des inondations.....84
- Photo 4.3** : Un cours d'eau canalisé à quartier El Mansourah à la ville de Kairouan.....85
- Photo.6.1** : Habitations inondées à la ville de Kairouan au niveau de la route nationale n° 2 vers Haffouz le 30-09-2015.....132
- Photo.6.2** : Stagnation des eaux pluviales près des bassins aghlabides à la ville de Kairouan le 29-09-2015 gêne la circulation.....132
- Photo.6.3** : Route coupée à la circulation automobile au niveau de Cité Mohamed Ali à la ville de Kairouan suite aux inondations du 05-10-2013.....132
- Photo.6.4** : La mosquée Okba à la ville de Kairouan envahie par les eaux pluviales du 05-10-2013.....132
- Photo.6.5** : L'évènement pluvieux du 26 mars 2015 (Au centre ville de Sidi Bouzid).....133
- Photo.6.6** : L'évènement pluvieux du 11 mai 2016 (Café des princes à quartier « El Khadhra » - La ville de Sidi Bouzid).....134
- Photo.6.7** : L'évènement pluvieux du 17 décembre 2016 (Quartier « Ouled Chelbi » - Ville de Sidi Bouzid).....134
- Photo.6.8** : L'évènement pluvieux du 16 décembre 2016 (Quartier « El Hajjam » - Ville de Kairouan).....135
- Photo.6.9** : L'évènement pluvieux du 05 octobre 2017 (Lycée Chedli Atallah- Rue de Fès-Ville de Kairouan).....135
- Photo.6.10** : L'évènement pluvieux du 19 juin 2018 (Rue d'« Ouled Farhane » - Ville de Kairouan).....136
- Photo.6.11** : L'évènement pluvieux du 07 août 2018 - Ville de Kairouan137
- Photo.6.12** : L'évènement pluvieux du 18 août 2018 - La ville de Sidi Bouzid138

<u>Photo.6.13</u> : L'évènement pluvieux du 19 août 2018 (Quartier El Mansourah - Ville de Kairouan).....	139
<u>Photo.6.14</u> : L'évènement pluvieux du 20 septembre 2018 (Rue d'« Ouled Farhane » - Ville de Kairouan).....	139
<u>Photo.10.1</u> : Digue de protection de la ville de Kairouan.....	262
<u>Photos.10.2</u> : Autres travaux de protection à la ville de Kairouan	267
<u>Photo.10.3</u> : Digue de protection Nord à Sidi Bouzid.....	268
<u>Photo.10.4</u> : Canal Fellet Galla à Sidi Bouzid.....	268

Annexes

Questionnaire d'enquête :

« Evaluation de la vulnérabilité au risque inondation »

I. Métadonnées

1. Nom de la ville : **Kairouan** (1) / **Sidi Bouzid** (2)
2. Nom du quartier :
3. Type du bâti :
4. Le nombre d'étages :
5. Situation du bâti: Hors P.A.U (1) / In P.A.U (2)
6. Numéro de photographie de l'habitation:
7. Coordonnées du logement : **X** (.....), **Y** (.....), **Z** (.....)
8. Nom du cours d'eau susceptible d'endommager les bâtiments :
9. Sexe de l'enquêteur : Homme (1) / Femme (2)
10. Âge : < 20 (1) / 20-40 (2) / 40-60 (3) / > 60 (4)
11. Profession : Commerçant (1) / Artisan (2) / Salarié (3) / Retraité (4) / Agriculteur (5) / Autres (6) :
12. Lieu de travail : Hors site (1) / In site (2)
13. Date de l'enquête :
14. Numéro du questionnaire :

II. Vulnérabilité humaine et psychosociologique

II.1. Connaissance de l'aléa

15. Avez-vous déjà été inondé depuis que vous êtes ici ? Oui (1) / Non (2)

↪ Si oui, en quelle (s) année (s) et/ou combien de fois ? :.....

16. Avez-vous noté des changements récents dans la survenance des crues et des inondations ? Oui (1) / Non (2) :

↪ Si oui, précisez période :.....

↪ Comment expliquez-vous ces changements ou cette absence de changements?

➤

17. Pensez-vous que les inondations récentes sont : plus fréquentes et plus graves (1) / moins fréquentes et moins graves (2) / plus fréquentes et moins graves (3) / moins fréquentes et plus graves (4). Comment expliquez-vous ca :.....

II.2. Mémoire du risque

18. Vous souvenez-vous de l'évènement hydro-pluviométrique le plus exceptionnel ? Oui (1) / Non (2), si oui :

↪ Quand ? (Date : Mois / Année)

↪ Durée ?

↪ La vitesse du courant était : Très rapide (1) / Rapide (2) / Lente (3) / Très lente (4)

↪ Qu'elle est l'hauteur de l'eau moyenne envahissant votre logement ?.....

↪ Quels types de pièces ont été touchés ? Chambre (1) / Salle de séjour (2) / Cuisine (3) / Salle de bain (4) / Sanitaire (5) / Garage (6) / Cave (7)

19. Y-a-t-il des dégâts aux biens mobiliers et immobiliers ? Si oui, ampleur ?

↪ Perte en vie humaine (1) / Pertes matérielles (2)

↪ Nature :.....

↪ Autres :.....

20. Souvenez-vous de la date de la seconde inondation la plus importante (en termes de hauteur d'eau) que vous avez vécu?

↪ Quand ? (Date : Mois / Année)

↪ Durée ?

↪ Qu'elle est l'hauteur de l'eau moyenne envahissant votre logement ?.....

↪ Quels types de pièces ont été touchés ? Chambre (1) / Salle de séjour (2) / Cuisine (3) / Salle de bain (4) / Sanitaire (5) / Garage (6) / Cave (7)

21. Votre lieu de travail a-t-il déjà été inondé ? Oui (1) / Non (2), si oui :

↪ Quand ? (Date : Mois / Année)

↪ Durée ?

↪ Qu'elle est l'hauteur moyenne de la lame d'eau ayant envahie votre lieu de travail ?.....

↪ Quel type de dommage ?

➤ Des dégâts matériels (1), Nature :.....

➤ Une baisse de production (2)

➤ Autres :

II.3. Vulnérabilité propre aux individus

22. Depuis quand habitez-vous ce quartier ?.....
23. Etes-vous : Locataire (1) / Propriétaire (2)
24. Quel est le nombre d'individus dans votre foyer ? Moins de 2 (1) / 2 à 5 (2) / > 5 (3)
25. Y a-t-il dans votre logement des personnes qui seraient vulnérables en cas d'inondation ?
Oui (1) / Non (2), si oui :
- ↳ Combien ?
 - ↳ Il s'agit des : Enfants moins de 10 ans (1) / Individus à mobilité réduite (2) / Personnes âgées (3) / Autres (4) :.....

II.4. Evacuation

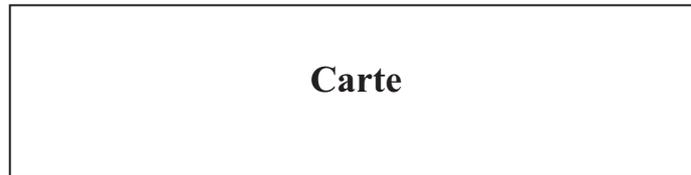
26. Votre logement possède-il un sous-sol / une cave ? Oui (1) / Non (2)
27. Par rapport au niveau de la route, votre RDC se situe : Au même niveau (1) / Sous le niveau de la route (2) / Au-dessus du niveau de la route (3)
- ↳ A combien de mètre(s) au-dessus, ou en-dessous, du niveau de la route êtes-vous situés?
28. Combien y a-t-il de chambres à coucher situées de plain-pied ? Aucune (1) / 1 (2) / 2 (3) / 3 et plus (4)
29. Quelles sont les personnes qui les occupent ? Enfants moins de 10 ans (1) / Adolescents (2) / Adultes (3) / Personnes âgées (5) / Individus à mobilité réduite (6) / Inoccupées (7)
30. Existe-t-il un moyen d'évacuer par les airs depuis l'intérieur de l'habitation? Aucun (1) / Balcon (2) / En construction (3) / Autres (4) :.....

II.5. Sentiment de menace

31. Vous sentez-vous concerné par le risque inondation ? Oui (1) / Non (2)
32. Lors de votre installation, étiez-vous informé d'un risque éventuel d'inondation dans votre quartier ? Oui (1) / Non (2)
- ↳ Si oui,
 - ↳ Comment l'avez-vous appris ?.....
 - ↳ Quelles sont les facteurs qui vous avez encouragé à habiter ou construire dans un milieu à risque d'inondation ? Les terrains sont moins chers (1) / La proximité du lieu de travail (2) / La proximité des moyens de transport (3) / La proximité des services (4) / Autres (5) :.....
 - ↳ Si non, sur quelles formes souhaitez-vous avoir plus d'informations ? Document (1) / Média (2) / Réunion publique (3) / Autres (4) :.....
33. Pensez-vous que les aménagements hydrauliques déjà effectués (Digue, Barrages...) sont capables de protéger le quartier en cas de forte pluie? Oui (1) / Non (2)

➤ Si non, quels sont vos désirs en matière de lutte contre le risque inondation ?.....

34. Sur cette carte du quartier quels sont pour vous les points inondables en cas de forte pluie?.....



II.1.6. Culture de prévention

35. Votre logement est-il adapté au risque inondation par des aménagements particuliers ? Oui (1) / Non (2):

↳ Si oui, quels types d'aménagements?

↳ Si non, pour quelles raisons? :

- a. Ce n'est pas fait mais il est prévu de prendre des mesures
- b. Votre bâtiment n'est pas ou peu exposé au risque d'inondation
- c. Vous prenez des mesures temporaires au moment de l'inondation et estimez qu'elles sont suffisantes
- d. Vous ne savez pas ce qu'il faut faire, ni quels travaux de prévention/protection réaliser chez vous
- e. Vous n'avez pas l'argent nécessaire pour réaliser les travaux
- f. Quelque soient les travaux, ils seront inutiles ou insuffisants pour réduire les dégâts en cas d'inondation
- g. Il y a peu de risque pour qu'une nouvelle inondation importante se reproduise avant un moment
- h. Vous savez ce qu'il faudrait faire mais les travaux à réaliser sont trop contraignants
- i. Vous ferez des travaux si une (nouvelle) inondation se produit
- j. Je suis locataire, ce n'est pas à moi de réaliser les travaux
- k. D'autres obstacles vous ont conduit à ne pas prendre de mesures de prévention (déménagement prochain, manque de temps, âge, etc.). Lesquels:.....

III. Vulnérabilité structurelle

III.1. Vulnérabilité structurelle interne

36. Quel est l'âge de votre habitation?.....

37. Quelle est la nature des murs extérieurs? Dur (Pierre, béton, brique...) (1) / Bois (2) / Autre (3) :.....

↪ Précisez leur état : Bon (1) / Plutôt bon (2) / Plutôt mauvais (3) / Mauvais (4)

38. Quel est le nombre d'ouvertures pour chaque étage? Porte (1) :...../ Fenêtre (2) :.....

39. Existe-il un mur de clôture extérieur? Oui (1) / Non (2)

↪ Si oui, nature : en dur (Pierre, béton, brique...) (1) / en bois (2) / en grillage (3) / Autre (4) :.....

↪ Hauteur (en cm):.....

↪ Leur état : Bon (1) / Plutôt bon (2) / Plutôt mauvais (3) / Mauvais (4)

III.2. Les réseaux (électricité, eau, assainissement et évacuation des eaux pluviales)

40. Votre logement est-il branché à un réseau :

↪ 41-a- d'assainissement ? Oui (1) / Non (2)

↪ 41-b- d'eau potable ? Oui (1) / Non (2)

↪ 41-c- d'électricité ? Oui (1) / Non (2)

↪ 41-d- d'évacuation des eaux pluviales ? Oui (1) / Non (2)

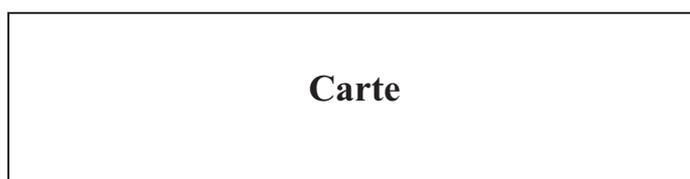
➤ Si non, l'évacuation des eaux pluviales se fait vers : Réseau d'assainissement (1) / La rue (2) / Réservoir (3)

41. A quelle hauteur se situent les prises, le compteur électrique et le disjoncteur au rez-de-chaussée ? Moins de 50 cm (1) / 50 à 100 cm (2) / > 100 cm (3)

IV. Vulnérabilité fonctionnelle et/ou institutionnelle

42. A préciser sur la carte du quartier les points de faiblesse au niveau de la digue et des canalisations:

1. Zones d'affaissement.
2. Surplomb par rapport à la voirie.
3. Accumulation des déchets plastiques ou de produits polluants.



➤ Si vous disposez des photos sur les inondations et vous souhaitez nous les faire partager, nous serions vraiment reconnaissants.

Fin de l'enquête

Table des matières

Remerciements

Introduction générale.....	1
1- Problématiques.....	2
2- Définition des concepts.....	2
3- Choix de la zone d'étude.....	6
4- Etat de la question.....	8
5- Les objectifs de la recherche.....	8
6- Démarche méthodologique.....	9
7- Structuration de la thèse.....	9
<u>Première partie</u> : Données, méthodes, cadre géo-climatique et humain.....	12
Introduction.....	13
<u>Chapitre 1</u> : Données et méthodes d'investigation.....	14
1-1- Données.....	14
1-1-1- Données climatiques (pluviométriques):Sources et qualité.....	14
1-1-2- Données hydrologiques : Sources et qualité.....	16
1-1-3- Données socioéconomiques.....	18
1-1-4- Données cartographiques.....	19
1-2- Méthodes d'investigation.....	20
1-2-1- Méthodes d'analyse climatique.....	20
1-2-2- Méthodes d'analyse hydrologique.....	21
1-2-2-1- La détermination des crues intenses et extrêmes.....	21
1-2-2-2- La détermination des coefficients de ruissellement via le modèle S.C.S : « Soil Conservation Service of U.S.A ».....	21
1-2-3- Méthodes d'analyse cartographique.....	21
1-2-3-1- La cartographie des cartes thématiques et de synthèse.....	21
1-2-3-2- La cartographie du risque inondation.....	22
1-2-3-2-1-Problème de délimitation de la zone d'étude.....	22
1-2-3-2-2-Les échelles de cartographie du risque inondation.....	23
Conclusion.....	23
<u>Chapitre 2</u> : Cadre géographique et hydrologique.....	24
2-1- Le site.....	24
2-1-1- La ville de Kairouan.....	24
2-1-2- La ville de Sidi Bouzid.....	25
2-2- La topographie locale et environnante.....	26

2-2-1- L'hypsométrie.....	26
2-2-1-1- L'hypsométrie du bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan.....	27
2-2-1-2- L'hypsométrie du bassin versant de l'oued El Fekka.....	27
2-2-2- Les pentes.....	31
2-3- L'hydrographie et l'hydrologie.....	35
2-3-1- Hydrographie : Description des oueds.....	35
2-3-1-1- Les principaux cours d'eau menaçant la ville de Kairouan.....	35
2-3-1-2- Les principaux cours d'eau menaçant la ville de Sidi Bouzid.....	38
2-3-2- Hydrologie : Variabilité, répartition et fréquence des débits.....	39
2-3-2-1- Irrégularité interannuelle des débits.....	40
2-3-2-2- Répartition mensuelle et irrégularité saisonnière des débits.....	43
2-3-3- Caractéristiques morphométriques du bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et du bassin versant de l'oued El Fekka.....	44
2-4- Les groupes hydrologiques des sols : Le potentiel d'écoulement superficiel.....	45
2-5- Les types d'occupation des sols.....	49
2-5-1- Les types d'occupation des sols dans le bassin versant septentrional de la plaine de Kairouan et le bassin versant de l'oued El Fekka.....	49
2-5-2- Evolution de l'occupation des sols dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid.....	52
Conclusion.....	54
Chapitre 3 : Caractéristiques climatiques.....	56
3-1- Les facteurs géographiques et aérologiques.....	56
3-1-1- Les facteurs géographiques.....	56
3-1-2- Les facteurs aérologiques.....	57
3-2- Caractéristiques pluviométriques moyennes.....	58
3-2-1- Irrégularité interannuelle de la pluviométrie.....	58
3-2-2- Répartition mensuelle et irrégularité saisonnière de la pluviométrie.....	59
3-3- Les intensités journalières des pluies.....	62
3-4- Pluviographie.....	65
3-5- Autres aspects du climat.....	68
3-5-1- Température.....	68
3-5-2- Vent.....	70
3-5-3- L'humidité relative.....	70
3-5-4- L'insolation.....	70
3-5-5- Evaporation.....	71
Conclusion.....	71
Chapitre 4 : Caractéristiques anthropiques : Une hydrologie fortement affectée par l'Homme.....	72

4-1- Une démographie galopante.....	72
4-2- L'extension du tissu urbain.....	72
4-3- Les quartiers d'habitat non réglementaire.....	76
4-4- L'étalement du bâti au-delà des digues de protection.....	79
4-5- La voirie : Facteur aggravant le risque inondation.....	79
4-6- Autres facteurs de responsabilité anthropique.....	84
Conclusion.....	85
Conclusion.....	86

Deuxième partie : Aléa hydro-climatique et susceptibilité des terrains au risque inondation...	87
Introduction	88
Chapitre 5 : Pluies extrêmes et risque d'inondation dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid.....	89
Introduction	89
5-1- Les maximas pluviométriques journaliers : fréquence et variabilité	89
5-2- Les évènements pluviométriques à risque d'inondations : Typologie	91
5-3- Les évènements pluvieux extrêmes	94
5-3-1-Fréquence annuelle des évènements pluvieux extrêmes.....	94
5-3-2-Répartition saisonnière de la fréquence d'évènements pluvieux extrêmes.....	95
5-3-3-Répartition mensuelle selon la pluviosité et le nombre d'évènements pluvieux extrêmes.....	95
5-3-4-Caractérisation des évènements pluviométriques extrêmes : Durée et apport pluviométrique.....	96
Conclusion	97
Chapitre 6 : Historique des crues extrêmes et des inondations dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid...	98
Introduction	98
6-1- Répartition spatio-temporelle des crues extrêmes	100
6-1-1- Répartition temporelle des crues extrêmes.....	100
6-1-2- Répartition spatiale des crues extrêmes.....	104
6-2- Conséquences environnementales des crues extrêmes	109
6-2-1- Dérivation et changements des lits d'oueds suite aux crues.....	109
6-2-2- Un volume important des sédiments charriés.....	109
6-3- Caractéristiques des grandes inondations dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid	113
6-3-1- Caractéristiques des inondations de l'automne 1969.....	113
6-3-1-1- Analyse de la situation météorologique de l'automne 1969.....	114
6-3-1-2- Les dégâts occasionnés par les inondations de l'automne 1969.....	117
6-3-2- Caractéristiques des inondations de décembre 1973.....	117

6-3-2-1-	Analyse de la situation météorologique du mois de décembre 1973.....	118
6-3-2-2-	Les dégâts occasionnés par les inondations du mois de décembre 1973.....	119
6-3-3-	Caractéristiques des inondations du mois de janvier 1990.....	119
6-3-3-1-	Analyse de la situation météorologique du mois de janvier 1990.....	121
6-3-3-2-	Les dégâts occasionnés par les inondations du mois de janvier 1990.....	123
6-4-	Les évènements pluvieux récents de 2013 et 2015.....	125
6-4-1-	Quantité pluviométrique des évènements pluvieux de 2013 et 2015.....	125
6-4-2-	Situations météorologiques des évènements pluvieux de 2013 et 2015.....	126
6-4-3-	Dégâts associés des évènements pluvieux de 2013 et 2015.....	131
6-5-	Autres évènements pluvieux récents.....	133
6-5-1-	Evènement pluvieux excessif marqué de 2014.....	133
6-5-2-	Evènement pluvieux de 2015.....	133
6-5-3-	Evènements pluvieux excessif de 2016.....	134
6-5-4-	Evènement pluvieux de 2017.....	135
6-5-5-	Evènements pluvieux de 2018.....	136
Conclusion.....		140
<u>Chapitre 7</u>	: Cartographie de la susceptibilité des terrains à l'inondation dans le bassin versant Septentrional de la plaine de Kairouan et le bassin versant de l'oued El Fekka.....	141
Introduction.....		141
7-1-	Approche méthodologique de la cartographie de la susceptibilité des terrains à l'inondation dans le bassin versant Septentrional de la plaine de Kairouan et le bassin versant de l'oued El Fekka: Données et méthodes.....	141
7-2-	Carte du degré de protection des sols.....	143
7-3-	Carte des niveaux de propagation des crues.....	147
7-4-	Carte de susceptibilité des terrains au risque inondation (S.T.I).....	149
Conclusion.....		153
Conclusion.....		155

<u>Troisième partie</u>	: Le risque inondation dans les villes de Kairouan et Sidi Bouzid : Cartographie, gestion et moyens de lutte.....	156
Introduction.....		157
<u>Chapitre 8</u>	: Cartographie du risque inondation à Macro – échelle : À l'échelle des villes de Kairouan et Sidi Bouzid.....	158
Introduction.....		158
8-1-	Définitions des concepts de base.....	159

8-1-1- Risque.....	159
8-1-2- Aléa.....	159
8-1-3- Enjeux.....	159
8-1-4- Exposition.....	160
8-1-5- Vulnérabilité.....	160
8-1-6- Capacité d'adaptation.....	165
8-2- L'aléa ruissellement.....	166
8-2-1- La détermination des coefficients de ruissellement via le modèle S.C.S : « Soil Conservation Service of U.S.A ».....	166
8-2-1-1- Présentation du modèle S.C.S.....	166
8-2-1-2- Les types d'occupation des sols.....	166
8-2-1-2-1- Les types d'occupation des sols à la commune de Kairouan.....	167
8-2-1-2-2- Les types d'occupation des sols à la commune de Sidi Bouzid.....	172
8-2-1-3- Le calcul des coefficients de ruissellement.....	174
8-2-2- La spatialisation de l'inondabilité des surfaces.....	184
8-2-2-1- L'hauteur de l'eau écoulée.....	184
8-2-2-2- Les pentes.....	184
8-2-2-3- La carte d'inondabilité.....	192
8-2-3- Facteurs locaux d'aggravation de l'aléa.....	195
8-2-4- La carte d'aléa de synthèse.....	200
8-3- Les enjeux.....	203
8-4- L'exposition des enjeux.....	207
8-5- La vulnérabilité.....	210
8-5-1- La vulnérabilité liée au bâti/population.....	210
8-5-2- La vulnérabilité liée à la voirie/réseau.....	211
8-6- La capacité d'adaptation.....	217
8-7- Cartographie de risque d'inondation à l'échelle de la ville.....	221
Conclusion.....	221
Chapitre 9 : Diagnostic du risque inondation à Micro – échelle :Application sur les quartiers Mansourah Nord à Kairouan et Ouled Chelbi à Sidi Bouzid.....	224
Introduction.....	224
9-1- Cartographie du risque d'inondation au quartier de Mansourah Nord (ville de Kairouan).....	224
9-1-1- La pente et l'aléa induit.....	224
9-1-2- Carte des enjeux.....	226
9-1-3- Carte d'exposition.....	228
9-1-4- Carte de vulnérabilité au risque d'inondation à l'échelle du quartier Mansourah Nord.....	228

9-1-5-Carte de capacité d'adaptation.....	239
9-1-6-Carte du risque d'inondation.....	241
9-2- Cartographie du risque d'inondation au quartier d'Ouled Chelbi (ville de Sidi Bouzid).....	243
9-2-1- La pente et l'aléa induit.....	243
9-2-2-Carte des enjeux.....	245
9-2-3-Carte d'exposition au risque d'inondation dans le quartier Ouled Chelbi.....	247
9-2-4-Carte de vulnérabilité.....	247
9-2-5- Cartographie de la capacité d'adaptation.....	257
9-2-6-Carte du risque d'inondation dans le quartier d'Ouled Chelbi.....	259
Conclusion.....	259
<u>Chapitre 10</u> : La gestion du risque inondation.....	262
Introduction.....	262
10-1- Les ouvrages existants de protection de la ville de Kairouan.....	262
10-1-1-Une protection rapprochée.....	262
10-1-2-Une protection éloignée.....	263
10-2- Les ouvrages existants de protection de la ville de Sidi Bouzid.....	267
10-3- Des recommandations de gestion futures.....	270
Conclusion.....	270
Conclusion.....	271
Conclusion générale.....	273
Bibliographie.....	275
Webographie.....	282
Liste des figures.....	283
Liste des tableaux.....	290
Liste des photos.....	296
Annexes.....	298
Table des matières.....	303

Résumé

Les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid, ont connu au cours de l'histoire récente des phénomènes hydroclimatiques extrêmes qui ont provoqué souvent des conséquences graves sur l'économie, la population, l'infrastructure de base... L'ensemble des aménagements hydrauliques ayant été construits suite à la catastrophe de 1969, comme les barrages et les digues, ont donné à la population un sentiment de confiance qui s'est traduit par une dynamique effrénée de l'urbanisation. En effet, c'est à partir des années soixante-dix du dernier siècle que les deux villes de Kairouan et de Sidi Bouzid ont connu une extension urbaine sans précédent, sur des plaines traversées par des cours d'eau faiblement encaissés. La faiblesse des pentes associée à l'empiètement des cours d'eau et à l'agressivité des pluies ont augmenté la vulnérabilité de la zone d'étude face au risque d'inondation. Cette étude se base sur le dépouillement des données climatiques, hydrologiques, cartographiques, socio-économiques ainsi que sur des prospections et des enquêtes de terrain. L'objectif est d'abord d'estimer les coefficients de ruissellement pour chaque type d'occupation via un modèle largement utilisé en hydrologie urbaine (modèle de « Soil Conservation Service of U.S.A » (S.C.S). Ensuite, la cartographie du risque d'inondation par une approche SIG s'est basée sur l'intégration de trois paramètres majeurs: l'exposition, la vulnérabilité et la capacité d'adaptation. Cette cartographie du risque d'inondation s'est faite sur deux échelles fines: la ville et le quartier. Le produit final, qui est la carte de risque d'inondation, permet d'orienter les décideurs vers la rationalisation des aménagements susceptibles de minimiser les risques et les dégâts.

Abstract

The cities of Kairouan and Sidi Bouzid, have experienced in recent history extreme hydroclimatic phenomena that have often caused serious consequences on the economy, population, basic infrastructure ... All the hydraulic developments that were built following the 1969 disaster such as dams and dikes gave the population a sense of confidence that resulted in an increased dynamic of urbanization. Indeed, it is from the seventies of the last century that the two cities of Kairouan and Sidi Bouzid knew an unprecedented urban extension on plains traversed by weakly cashed streams. Slow slopes associated with watercourse encroachment and aggressive rains increase the vulnerability of the study area to the risk of flooding. This study is based on the analysis of climatic, hydrological, cartographic and socioeconomic data, as well as surveys and field surveys. The objective of this work is first to estimate the runoff coefficients for each type of occupation and this based on a model widely used in urban hydrology which is the model of "Soil Conservation Service of USA", (SCS). Then, through an S.I.G approach, attempts were made to map the risk of flooding based on the integration of three major parameters, namely: exposure, vulnerability and adaptive capacity. This flood risk mapping was done on two fine scales: the city and the neighborhood. The final product, which is the flood risk map, helps guide decision-makers towards the rationalization of developments that minimize risks and damage.

ملخص

شهدت مدينتنا القيروان وسيدي بوزيد ، حديق، ظواهر هيدرولوجية و مناخية متطرفة خلفت في كثير من الأحيان عواقب وخيمة على الاقتصاد والسكان والبنية التحتية...ولقد أعطت مختلف وسائل التهينة الهيدروليكية التي تم انجازها بعد كارثة فيضان 1969 مثل السدود والجواجز الترابية شعورا لدى السكان بالثقة والأمان مما أدى إلى انفلات ديناميكية التحضر. فمنذ أواسط السبعينيات من القرن الماضي ، عرفت مدينتنا القيروان وسيدي بوزيد توسعا حضريًا غير مسبوق على السهول التي تعبرها المجاري المائية. وقد أدى ضعف المنحدرات، وانتهاك المجاري المائية و حدة الأمطار إلى تزايد هشاشة المدينتين لخطر الفيضانات. وتستند هذه الدراسة إلى تحليل البيانات المناخية والهيدرولوجية والخرائطية والاجتماعية الاقتصادية ، فضلاً عن المسوحات والتحقيقات الميدانية و ذلك بهدف تقدير معاملات الجريان السطحي لكل نوع من أنواع إشتغال الأرض على أساس نموذج يستخدم على نطاق واسع في مجال الهيدرولوجيا الحضرية و هو نموذج "خدمة حفظ التربة في الولايات المتحدة الأمريكية" (S.C.S). و لرسم خريطة لخطر الفيضان استندنا على منظومة معلومات جغرافية "S.I.G" على أساس تكامل ثلاثة معايير رئيسية وهي: التعرض،الهشاشة والقدرة على التكيف. وقد تم رسم خرائط مخاطر الفيضان على سلمين دقيقين هما: المدينة والحي. و تمثل خريطة مخاطر الفيضان التي أفرزتها هذه الدراسة، وثيقة توجيهية لصناع القرار نحو الاختيار الصحيح للمرافق التي من شأنها الحد من الأضرار الناجمة عن أفة الفيضانات.