Université Sidi Mohammed Ben Abdellah
Faculté des Sciences et Techniques
www.fst-usmba.ac.ma

Année Universitaire : 2015-2016

Master Sciences et Techniques : Géoressources et Environnement

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Modélisation hydraulique du tronçon d'oued Mikkes (Amont barrage Sidi Echahed)

Présenté par:

Mohamed EL FARTATI

Encadré par:

- Mr. Abdel-Ali CHAOUNI, FST - Fès

Soutenu le 17 Juin 2016 devant le jury composé de:

- **Mr. Abderrahim LAHRACH**
- **Mr. Lahcen BENAABIDATE**
- **Mr. Hassan TABYAOUI**
- **Mr. Abdel-Ali CHAOUNI**

Stage effectué à : FST- Fès

Université Sidi Mohammed Ben Abdellah
Faculté des Sciences et Techniques
www.fst-usmba.ac.ma

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom: Mohamed EL FARTATI

Année Universitaire : 2015/2016

Titre: Modélisation hydraulique du tronçon d'oued Mikkes (Amont barrage Sidi Echahed)

Résumé

Les risques naturels sont considérés parmi les problèmes les plus spectaculaires dans les pays du monde, les inondations enregistrées dernièrement au Maroc ont causé des dégâts catastrophiques. L'étude et la gestion préventives deviennent plus en plus nécessaires pour lutter contre ce phénomène catastrophique.

La zone en question se caractérise par l'implantation des olives et les terrains d'agricultures (blé ; Mais, …), notamment dans la zone centrale. Le débordement en eau peut affecter seulement l'agriculture puisqu'il n'y a plus de populations qui vivent à la bordure d'oued Mikkes.

La délimitation et la cartographie des zones inondables du tronçon d'Oued Mikkes semblent parmi les moyens les plus efficaces dans le cadre d'une gestion plus efficiente. Les cartes de délimitations peuvent être utilisées comme une base de données de la gestion de l'espace urbain et de prévention. Alors l'outil informatique illustré dans notre étude par le logiciel mathématique HEC RAS permet aux décideurs d'élaborer des stratégies et des plans d'aménagement qui visent à lutter contre les risques des inondations.

J'explique quels sont les aménagements possibles afin d'éviter de subir des inondations lors des crues du oued Mikkes, je ne tiens pas de donner des solutions réelles, je propose quelque éléments de réponse au vu de nos résultats.

Les solutions que je propose sont :

- diminuer l'imperméabilité des sols, Pour cela il faut implanter un maximum de zones.
- Constructions des obstacles pour dévier l'eau de ruissellements vers barrage sidi Echahed (mur en maçonnerie, mur en gabion …).
- En arrêtant d'urbaniser dans les zones inondables.

Mots clés: Zone inondable, Modélisation, HEC-RAS, HEC-GEORAS, oued Mikkes, bassin versant du Sebou

Résumé

Les risques naturels sont considérés parmi les problèmes les plus spectaculaires dans les pays du monde, les inondations enregistrées dernièrement au Maroc ont causé des dégâts catastrophiques. L'étude et la gestion préventives deviennent plus en plus nécessaires pour lutter contre ce phénomène catastrophique.

La zone en question se caractérise par l'implantation des olives et les terrains d'agricultures (blé ; Mais, …), notamment dans la zone centrale. Le débordement en eau peut affecter seulement l'agriculture puisqu'il n'y a plus de populations qui vivent à la bordure d'oued Mikkes.

La délimitation et la cartographie des zones inondables du tronçon d'Oued Mikkes semblent parmi les moyens les plus efficaces dans le cadre d'une gestion plus efficiente. Les cartes de délimitations peuvent être utilisées comme une base de données de la gestion de l'espace urbain et de prévention. Alors l'outil informatique illustré dans notre étude par le logiciel mathématique HEC RAS permet aux décideurs d'élaborer des stratégies et des plans d'aménagement qui visent à lutter contre les risques des inondations.

Parmi les solutions proposées pour lutter contre l'inondation lors des crues de l'oued Mikkes sont : de diminuer l'imperméabilité des sols, Pour cela il faut implanter un maximum de zones, de construire des obstacles pour dévier l'eau de ruissellements vers barrage Sidi Echahed (mur en maçonnerie, mur en gabion …) et en arrêtant d'urbaniser dans les zones inondables.

Mots clés: Zone inondable, Modélisation, HEC-RAS, HEC-GEORAS, oued Mikkes, bassin versant du Sebou

REMERCIEMENTS

Au terme de ce projet de fin d'études de Master, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à Mr. Abdel-Ali CHAOUNI, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, pour m'avoir encadré, me prodigué les conseils pertinents et qui m'a aidé à réaliser mon projet dans les meilleures conditions possibles.

Je tiens à remercier du fond du cœur Mr. Lahcen BENABIDATE, Professeur à la Faculté des Sciences et Technique de Fès, Responsable du Master ***Géoressources et Environnement.***

Je tiens à remercier tous les Professeurs qui m'ont encadré au cours des deux années de formation au Master Géoressources et Environnement à la Faculté des Sciences et Technique de Fès. Je citerai Profs. LAHRACH, RAIS, JABRANE, CHARRROUD, HASSANI, HINAJE, BENABDELHADI, EL AZZAB, GHACHTOULI, FADEL, KHALIL, CHETIOUI…

Mes remerciements s'adressent également aux membres de jury pour avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie également ma famille qui m'a soutenu tout au long de mon cursus, mes amis de Master et à tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, à accomplir ce projet, et plus précisément Mr Abdelbaset Midaoui, doctorant à la faculté des Sciences et Technique Fès.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail. . . .

À toute ma famille que je

remercie infiniment pour leur amour, leur patience,

leur soutien, leurs encouragements, et leur confiance.

A ma chère femme Safae.

A mes professeurs.

Et

A mes chers amis qu'ils trouvent dans ce travail mon

profond respect.

Mohamed EL FARTATI

INTRODUCTION GENERALE ---------- 4

CHAPITRE I : PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDES **---------- 5**

I. Introduction ---------- 5

II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE ---------- 5

1. Situation géographique ---------- 5

2. Cadre géologique général ---------- 6

3. Contexte climatique de la zone d'étude ---------- 9

3.1. Les précipitations ---------- 9

a) Analyse des précipitations annuelles ---------- 9

b) Analyse des Précipitations mensuelles ---------- 10

3.2. La température ---------- 11

a) La température moyenne annuelle ---------- 11

b) La température moyenne mensuelle ---------- 11

c) Diagramme Ombrothermique ---------- 12

3.3. L'estimation de l'évaporation ---------- 13

a) Evapotranspiration potentielle ETP ---------- 13

b) Evapotranspiration réelle ETR ---------- 14

III. LES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MORPHOLOGIQUES DU BASSIN VERSANT DE MIKKES ---------- 17

1. Les caractères physiques du bassin de Mikkes ---------- 17

1.1. L'indice de forme ---------- 17

1.2. Hypsométrie du bassin versant ---------- 17

1.2.1. La carte hypsométrique ---------- 18

1.2.2. Courbe hypsométrique ---------- 20

1.2.3. Les altitudes caractéristiques ---------- 21

1.3. Les indices de pente ---------- 21

1.4. Le rectangle équivalent ---------- 25

1.5. Le réseau hydrographique ---------- 25

1.5.1. La densité de drainage ---------- 26

Conclusion ---------- 28

CHAPITRE II: ETUDE HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE MIKKES **---------- 29**

I. Introduction ---------- 29

II. ANALYSE DES DEBITS ---------- 29

1. Débit moyen annuel ---------- 29

1.1. Relation entre les débits et les précipitations ---------- 30

1.2. Coefficient d'hydraulicité ---------- 31

2. Débits mensuels ---- 32
1.3. Coefficient mensuel du débit ---- 32
III. ETUDES DES CRUES ---- **33**
1 .Les crues ---- 33
1.1. Analyse fréquentielle des crues maximales annuelles ---- 34
1.2. Donnes et méthodes ---- 34
1.3. Aperçu sur le test choisit (Test d'indépendance de Wald Wolfowitz) ---- 34
1.4. Les statistiques de base ---- 35
a) Résultats des statistiques de base ---- 35
b) Histogramme de fréquence ---- 35
1.5. Résultats et interprétation des ajustements aux lois statistiques ---- 36
a) Ajustement à la loi de Gumbel (méthode de vraisemblance) ---- 36
b) Ajustement à la loi de Jenkinson GEV (méthode des moments pondérés) ---- 37
c) Ajustement à la loi Gamma (ou Pearson) ---- 38
d) Ajustement à la loi de Log-Pearson III (méthode des moments) ---- 39
1.6. Résultats de comparaison des ajustements aux lois statistiques ---- 40
1.7. Quantiles estimés pour différentes périodes de retour ---- 42
1.8. Débits retenus ---- 44
Conclusion ---- **45**
CHAPITRE III: ETUDE HYDRAULIQUE DU TRONÇON D'OUED MIKKES ---- **46**
I. Introduction ---- **46**
II. REALISATION DU MODELE HYDRAULIQUE D'OUED ---- **46**
1. Les étapes d'élaboration du modèle hydraulique ---- 46
1.1. Création du projet HEC RAS ---- 47
1.2. Préparation des données topographiques (Création de la géométrie de l'Oued) ---- 47
1.3. Choix des paramètres hydrométriques et conditions aux limites ---- 50
1.4. Simulation hydraulique ---- 51
III. VISUALISATION ET DISCUSSION DES RESULTATS ---- **52**
1. Ligne d'eau ---- 53
2. Vue de trois dimensions du tronçon modélisé ---- 53
3. Vitesse d'écoulement ---- 54
4. Restitution de la courbe de tarage ---- 55
IV. CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES DANS LE TRONCON MODELISE 56
Conclusion ---- **59**
CONCLUSION GENERALE ---- **60**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ---------- **61**

ANNEXES 1 ---------- **62**

APERCU SUR LOGICIEL HEC-RAS ---------- **62**

1. Présentation du modèle HEC-RAS ---------- 62

2. Les caractéristiques du logiciel ---------- 62

3. La modélisation ---------- 63

3.1. Les outils de la modélisation ---------- 63

3.1.1. Les données d'entrés ---------- 64

3.1.2. Les résultats des calculs ---------- 65

3.2. Principes du calcul hydraulique par HEC-RAS ---------- 65

3.2.1. Bases théoriques du logiciel HEC-RAS ---------- 65

3.3. Le fonctionnement de HEC RAS ---------- 67

3.4. Contraintes d'utilisation du modèle HEC-RAS ---------- 67

ANNEXES 2 ---------- **68**

INTRODUCTION GENERALE

Le bassin versant de Mikkes englobe trois ensembles des domaines structuraux différents, les rides prerifian au Nord, la plaine de Saiss au centre et le causse d'El Hajeb-Ifrane au sud. Il s'étend sur une superficie de 1360 km2, son altitude est compris entre 187 m en aval et 2092 m dans l'amont.

L'étude hydrologique et climatique de l'ensemble des séries pluvieuses et de débits de station d'El Hajra et Ain Taoujdate permettent de déterminer le comportement hydrologique du bassin versant de Mikkes.

Dernièrement, le Maroc a connu des précipitations fortes qui ont causé des inondations catastrophiques, notamment dans la région d'Er-Rachidia et Ouarzazate, les dégâts ont été énormément spectaculaires au niveau humain et matériel sans oublier la dégradation du sol. C'est pour cela on a choisi de faire une étude de délimitation des zones inondables du tronçon de Mikkes, l'étude consiste à combiner le logiciel mathématique HEC RAS avec l'autre extension de HEC GEORAS ce qui permet de proposer un plan d'aménagement de protection contre les risques d'inondations.

Le travail en question comporte trois chapitres, le premier s'occupe de la présentation générale de la zone étudiée, concernant le deuxième chapitre, il 'est consacré à l'étude hydrologique afin d'extraire les débits de pointes pour les différentes périodes de retour moyennant l'exploitation des lois statistiques (Gumbel, log de Person III, gamma,….).

Le chapitre trois est consacré pour la modélisation hydraulique et la délimitation des zones inondables tout en long du tronçon de Mikkes.

CHAPITRE I : PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDES

I. Introduction

Le bassin versant d'Oued Mikkes traverse plusieurs formations géologiques qui représentent des textures lithologiques d'âges différents, une géologie diversifiée comme celle-ci, conditionne multiples modes d'écoulements que soient superficiels ou souterrains.

L'étude lithologique et morphologique d'un bassin versant, nous permet de connaitre le comportement de régime hydrologique des cours d'eaux. La morphologie influence sur le processus de ruissèlement et le régime d'écoulement en période de crue ou d'étiage.

Le niveau piézométrique ainsi est influencé par la forme géométrique et la texture lithologique du bassin, notamment lorsque les eaux souterraines alimentent le bassin durant la période d'étiage.

Les conditions climatiques du bassin versant influencent directement sur le bilan hydrologique par les changements des paramètres climatiques tels que la précipitation, température et l'évaporation.

Dans ce chapitre, on va rappeler brièvement les définitions des principaux caractères physiques du bassin qu'il est nécessaire et vraisemblablement suffisant de connaître, ainsi définir les caractéristiques géographiques, climatiques et géologiques de la zone d'étude.

II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1. Situation géographique

Oued Mikkes est situé au centre-nord du Maroc. Exactement à environ de 30 Km au NW de Fès et à 30 Km au NE de Meknès sur la route principale N°4 reliant Fès et Sidi Kacem (Fig. 1).

Il se caractérise par une géologie diversifiée qui comporte trois zones naturelles principales : la première zone appartient au moyen Atlas où le sud du bassin versant. Pour la seconde zone, elle est localisée dans la plaine de Saiss au centre du bassin, finalement la troisième zone est située au Nord du bassin qui englobe une partie du pré-Rif et d'autres parties des rides pré-rifian.

L'étude topographique de la zone en question montre une variété d'altitude d'une zone à l'autre allant du moyen atlas vers le rif.

- Au moyen Atlas les reliefs sont mamelonnés plus au moins accidentés avec une altitude allant de 800 m à 1700 m.

- Dans la zone de Sais au centre est caractérisée par une altitude essentiellement qui varie entre 300 m à 800 m.
- La zone au Nord du bassin, l'altitude des reliefs accidentés peuvent aller jusqu'à 1000 m à Jbale kannoufa de la côte du Zerhoun.

Le bassin versant est situé entre les coordonnées Lambert suivantes :

X_1 = 490 000 m Y_1 = 310 000m
X_2= 536 000 m Y_2= 392 000 m

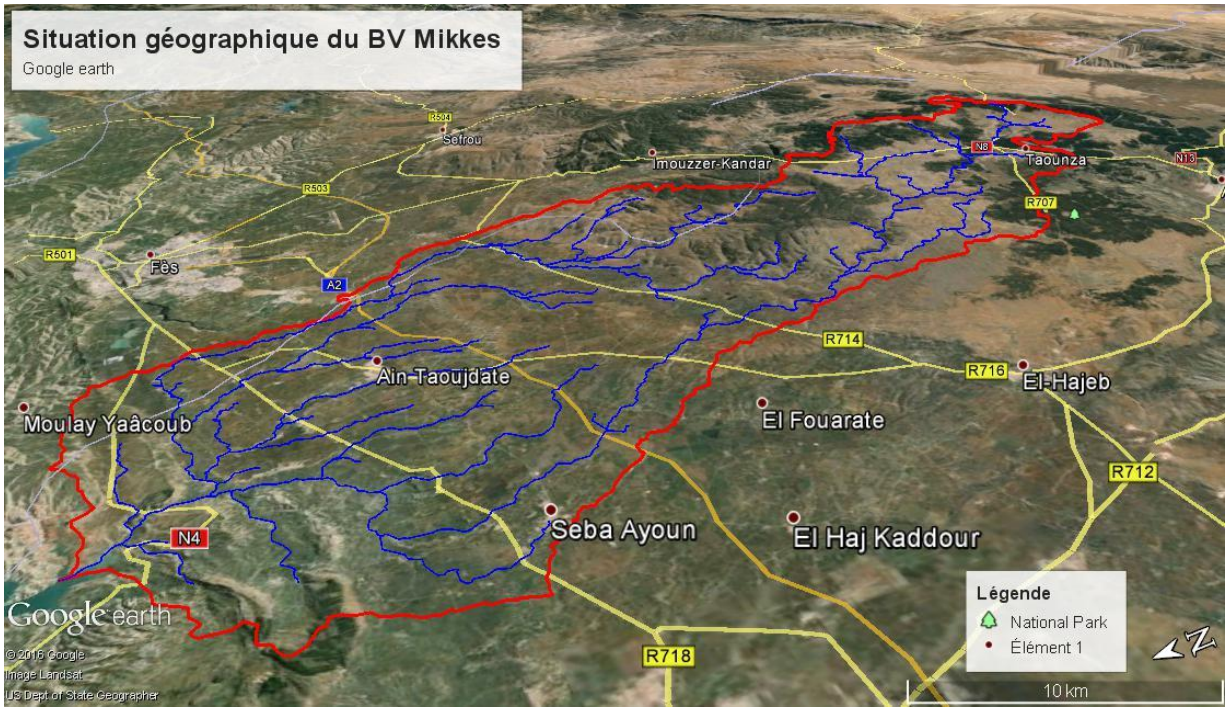


Figure 1 : Carte de la situation géographique de la zone de bassin de Mikkes

2. Cadre géologique général

Le Bassin Versant de Oued Mikkes recouvre trois domaines structuraux différents (Fig. 2) qui sont :

- Domaine atlasique
- Domaine de meseta
- Domaine de prerif

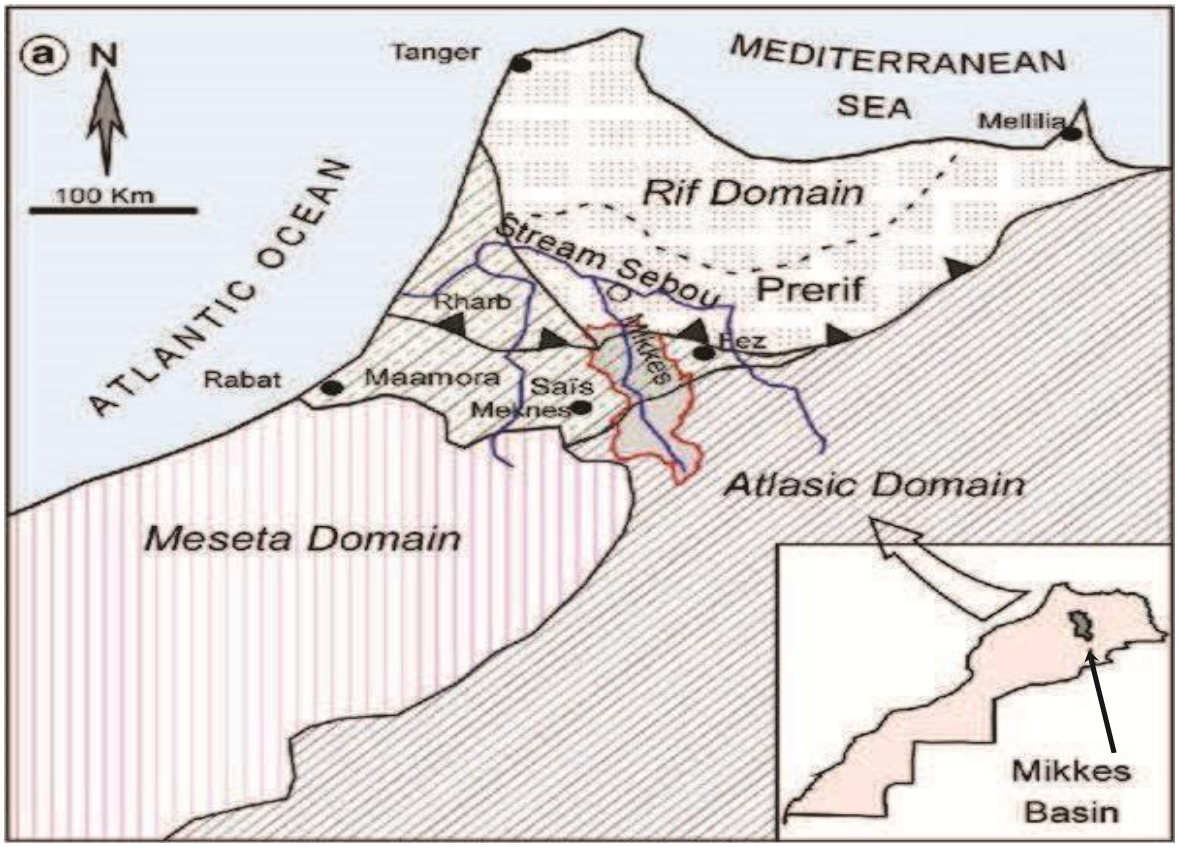


Figure 2 : Carte de la situation de la zone de bassin de Mikkes (Cirac, 1987 ; modifiée)

Le causse d'El Hajeb- Ifrane, caractérisé par une forte fracturation dont la majorité est orientée vers NW et SW, et occupe la partie Sud où il y a une prédominance des formations carbonatées représentées par les calcaires et les dolomies du Lias inférieur et moyen. La zone centrale du bassin est constitué par les calcaires lacustres et les sables fauves du Pliocène ainsi que les marnes du Miocène. Dans la partie Nord, au niveau du Pré-Rif, affleurent essentiellement les argiles du Trias et les marnes du Miocène supérieur (Fig. 3).

La partie centrale du bassin d'Oued Mikkes fait partie du bassin du Sais. Ce dernier constitue, lui aussi, la partie centrale du sillon sud-Rifain. Les études antérieures (Taltasse, 1953; Ait Brahim, 1991; Fassi, 1999; Essahlaoui, 2000) montrent que l'origine de ce bassin est liée à la dislocation du substratum liasique, qui s'ennoie sous la couverture néogène. Il forme ainsi un large graben qui s'étend depuis le causse Moyen Atlas jusqu'au Sud jusqu'au domaine Pré-Rifain au Nord selon une direction NS.

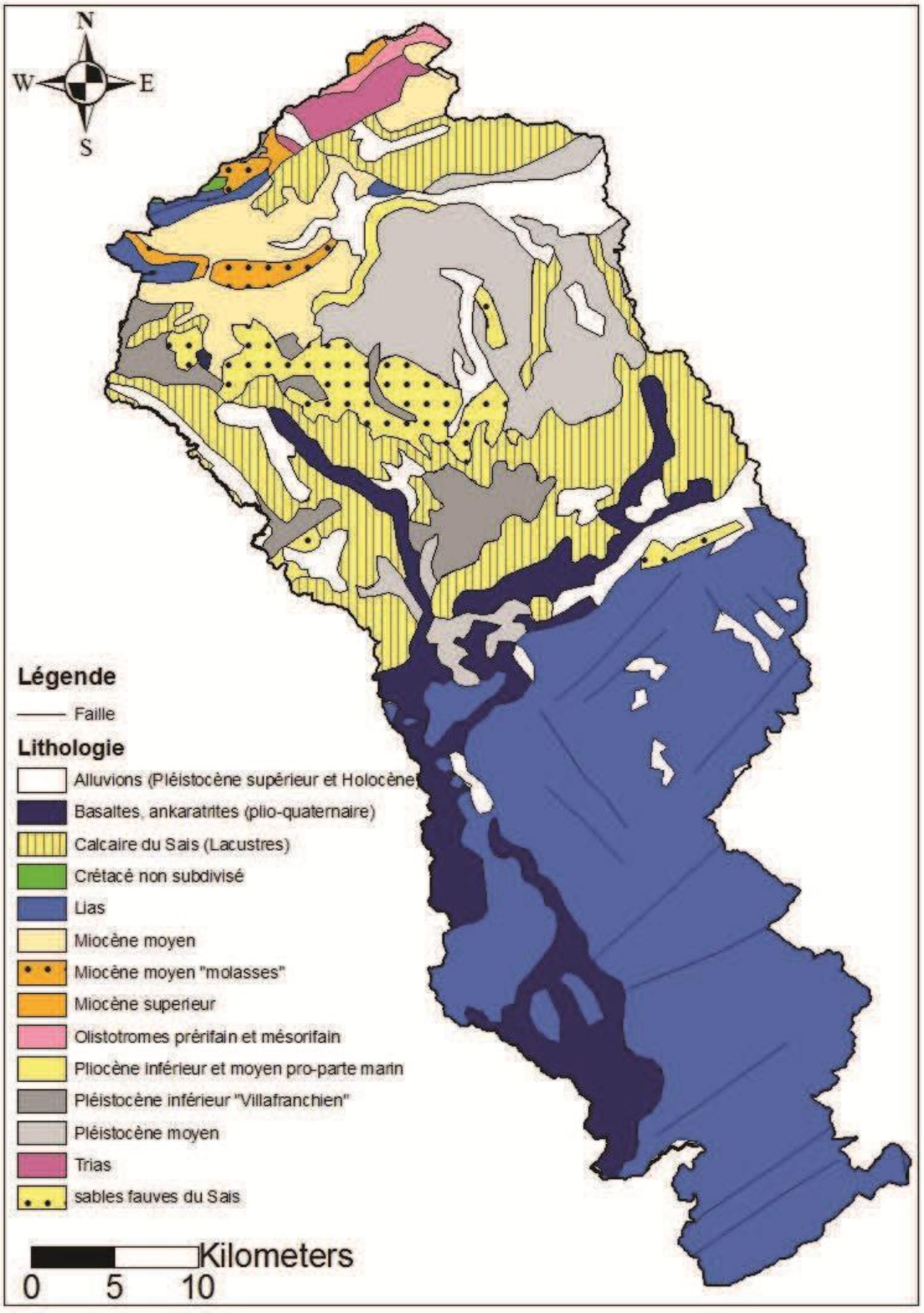


Figure 3 : Carte géologique du bassin versant de Mikkes (extrait de la Carte Géologique du Maroc au 1/ 1 000 000)

3. Contexte climatique de la zone d'étude

Plusieurs manifestations climatiques récentes de grande ampleur ont poussé la communauté mondiale à s'intéresser aux changements climatiques et à leurs impacts sur les ressources en eau. Celles-ci sont provenues essentiellement de la sécheresse qu'a affecté notamment les pays maghrébins. En particulier le Maroc, qui a connu dans les dernières décennies années des changements climatiques importants dus essentiellement au développement industriel et la croissance démographique. Les études ont montré que le Maroc aura des problèmes au niveau d'eau à partir de 2020, Il est en train de se rapprocher au seuil critique hydrique, ce problème doit pousser les régions considérées à préparer un plan de gestion rationnelle pour lutter contre l'appauvrissement en eau.

Dans cette partie, on va étudier en particularité la variabilité spatio-temporelle des paramètres climatiques enregistrés dans les deux stations suivantes (plus proches de Oued Mikkes): El Hajjra_Mikkes ; Ain Taoujdate. Le tableau suivant illustre les caractéristiques géographiques de ces stations.

Tableau 1: Les caractéristiques géographiques des stations météorologiques étudiées

Station	Z(m)	X (km)	Y (km)
Ain Taoujdate	465	517.3	371.8
El Hajra	215	508.86	382.76

3.1. Les précipitations

Les précipitations sont toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,...). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression. Les précipitations constituent l'unique « entrée » des principaux systèmes hydrologiques continentaux qui sont les bassins versants.

a) Analyse des précipitations annuelles

D'après l'histogramme des précipitations (Fig. 4), on peut conclure les résultats suivants :

- Les années qui se caractérisent par un pluviomètre très fort sont les années 1969 ,1979 et l'année 1996 ou la pluie en moyenne a atteint une valeur qui varie entre 615 et 633.
- Pour les années de pluviomètre faibles sont multiples, en générale sont marquées par des précipitations faibles et irrégulières, parmi ces années on trouve 1981, 1994,2001 et 2007.

Selon les deux courbes de tendance, on observe qu'il y a une diminution de l'ampleur des précipitations avec le temps.

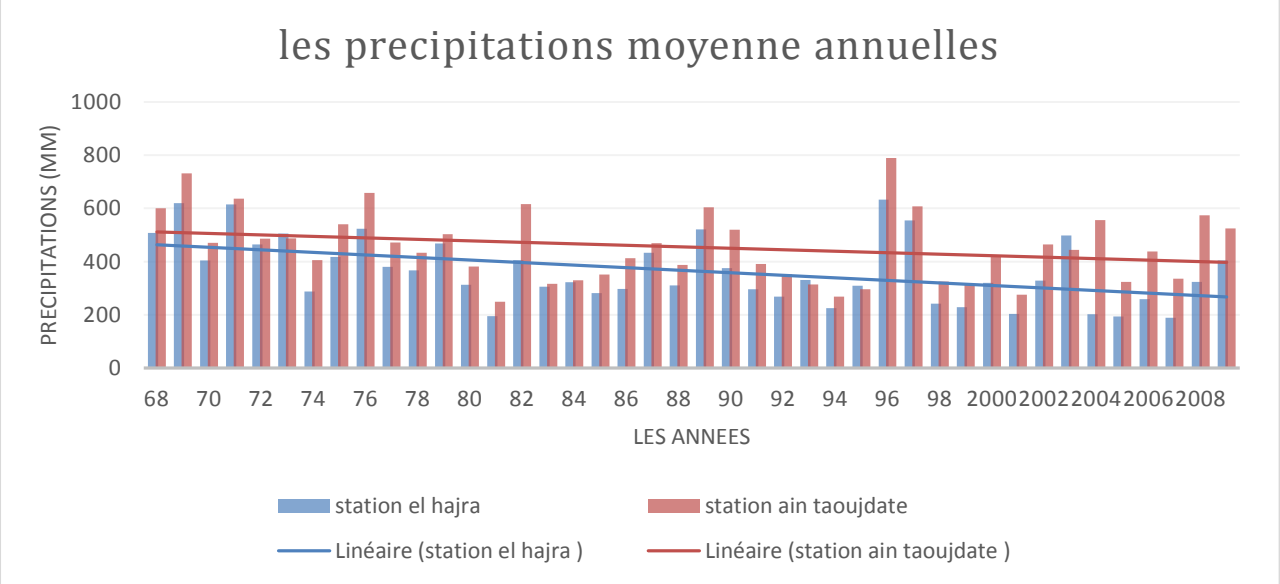
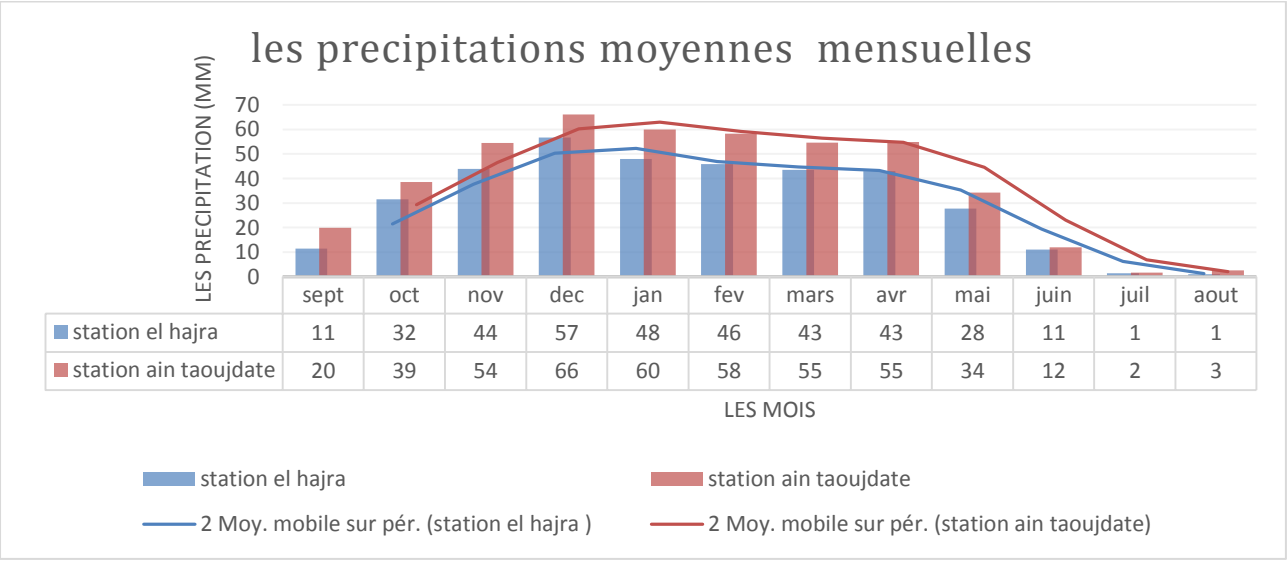


Figure 4: Précipitations moyennes annuelles de la station El Hajra et la station Ain Taoujdate (1968-2009)

b) Analyse des Précipitations mensuelles

D'après la (Fig. 5), on observe pour les deux stations que le mois de Décembre est le mois le plus pluvieux, par contre le mois d'Août est le mois le plus sec.



	sept	oct	nov	dec	jan	fev	mars	avr	mai	juin	juil	aout
station el hajra	11	32	44	57	48	46	43	43	28	11	1	1
station ain taoujdate	20	39	54	66	60	58	55	55	34	12	2	3

Figure5 : Précipitations moyennes mensuelles de la station El Hajra et la station Ain Taoujdate (1968-2009)

La courbe montre que les précipitations augmentent progressivement à partir du mois de Septembre jusqu'à ce qu'elles arrivent à leur valeur maximale en mois Décembre, à partir duquel, elles se diminuent jusqu'à atteindre leur valeur minimale au mois d'Août.

3.2. La température

La température est considérée comme l'élément fondamental dans le processus du cycle d'eau, vu qu'elle intervient dans l'estimation des potentialités hydrologiques d'une région donnée, elle contrôle l'intensité de l'évaporation et l'évapotranspiration.

a) La température moyenne annuelle

La (Fig. 6), montre que la température moyenne annuelle maximale est de 20°C, elle est enregistrée en 1997 ,1999 et 2003. Tandis que la température moyenne annuelle minimale est de 17°C. Elle est enregistrée en 1973,1992 et 2008.

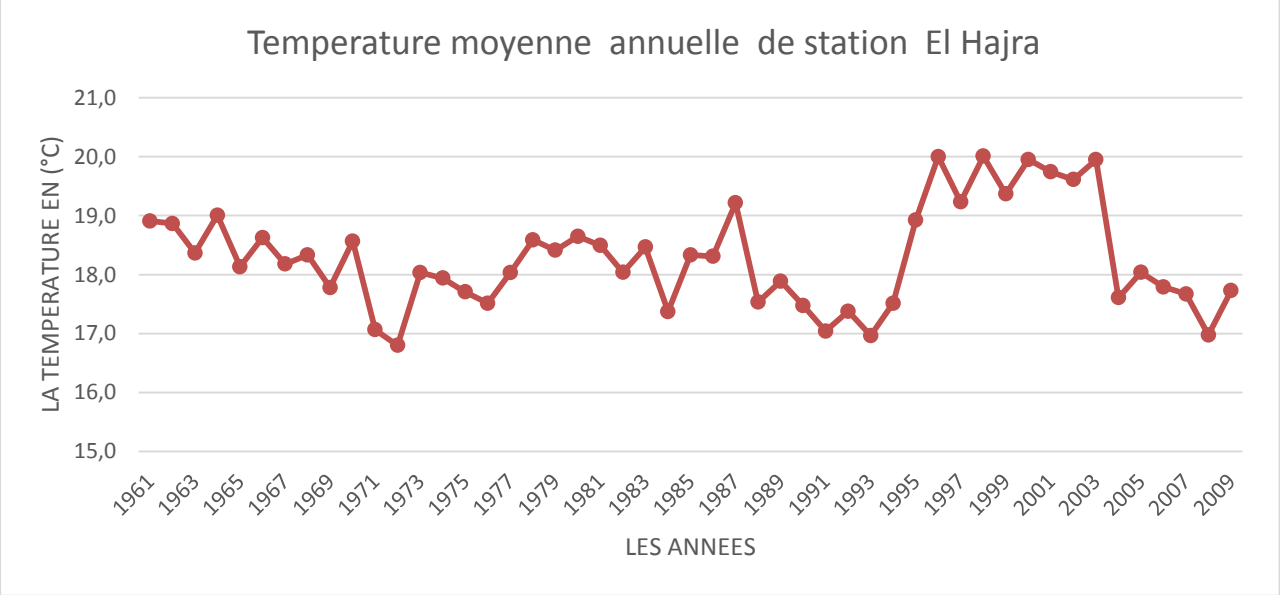


Figure 6 : Température moyenne annuelle de la station El Hajra (1961-2009)

b) La température moyenne mensuelle

Le diagramme ci-dessous (Fig. 7) illustre que les mois les plus froids sont les mois de Décembre, Janvier, Février et Mars où la température atteint une moyenne minimum de 10.6°C. Tandis que les mois de Juin, Juillet, Août et Septembre forment la période sèche où la température moyenne maximale peut atteindre 27°C.

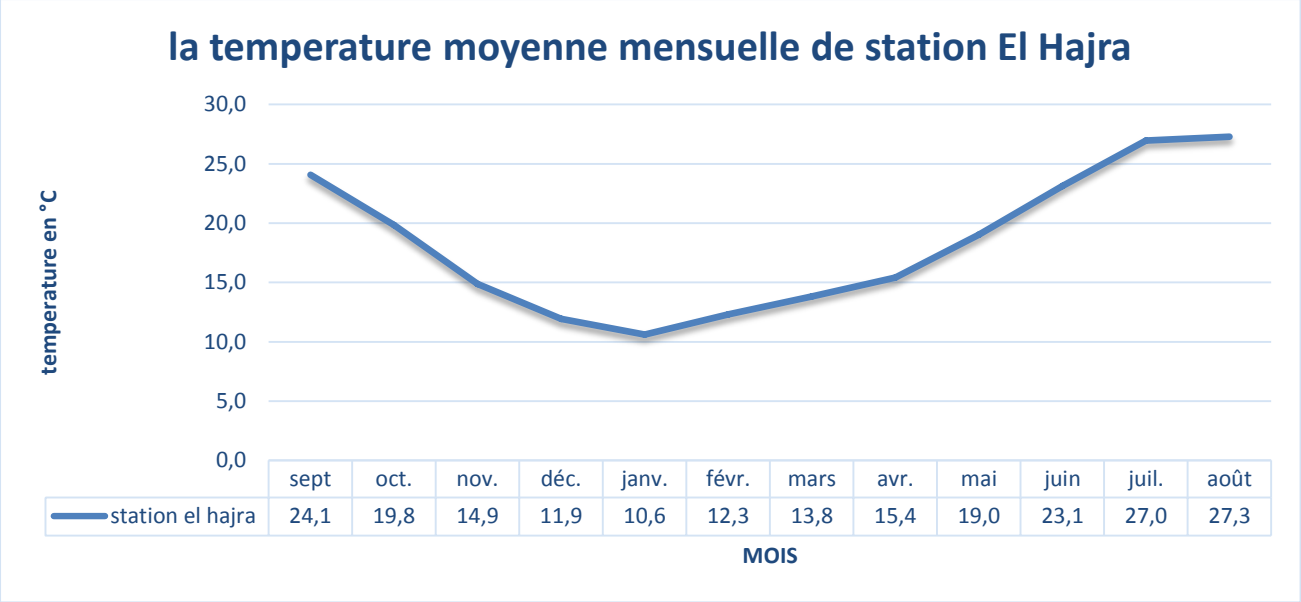


Figure 7 : Température moyenne mensuelle de la station El Hajra (1961-2009)

c) Diagramme Ombrothermique

Le diagramme Ombrothermique de Gaussen a pour objet de déterminer les mois secs et les mois humides de l'année. Il définit la période humide comme étant celle où les précipitations mensuelles dépassent le double des températures mensuelles, tandis que la période sèche est celle où le double des températures mensuelles dépasse les précipitations mensuelles.

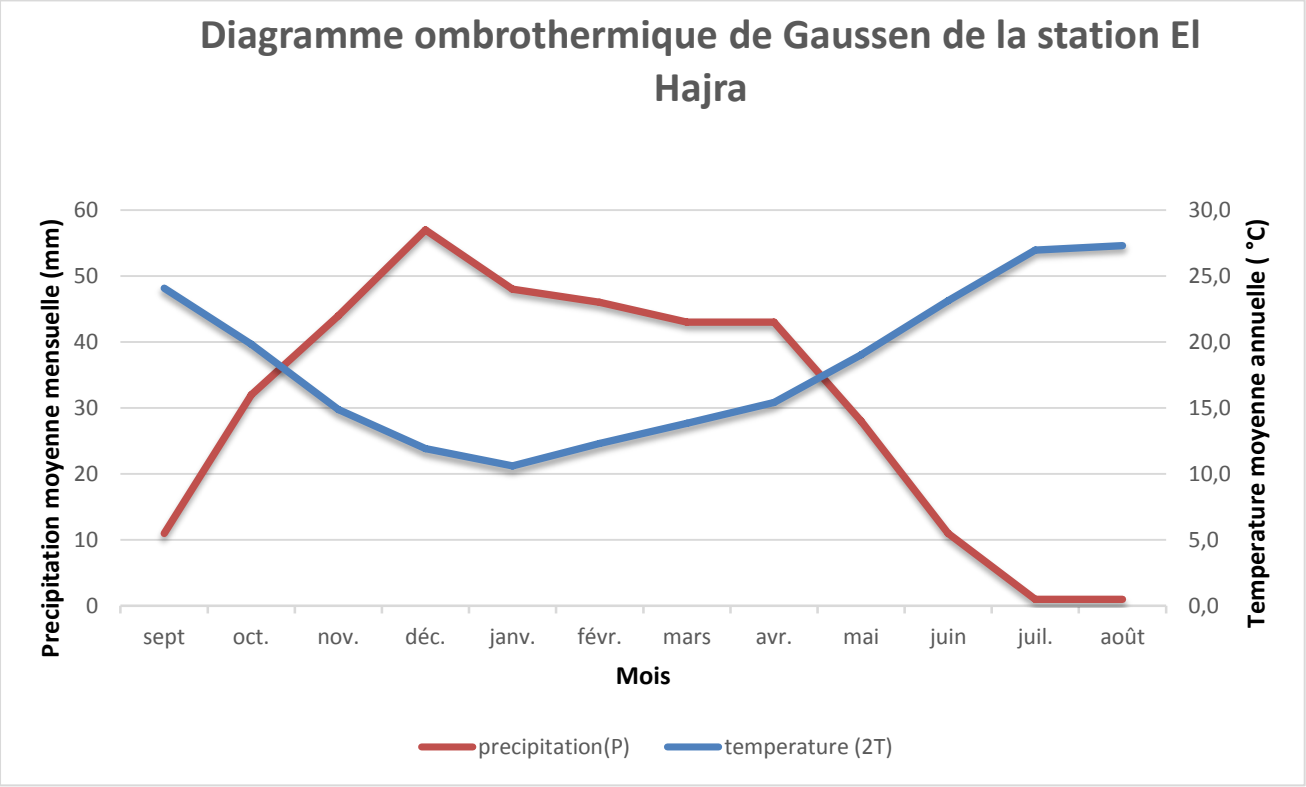


Figure 8 : Diagramme Ombrothermique de Gaussen de la station El Hajra (1961-2009)

Dans notre station (Fig. 8) ; Gaussen montre que la période humide débute en Octobre et finit en Mai, alors que la saison sèche commence en Juin et termine en Septembre.

3.3. L'estimation de l'évaporation

L'évaporation c'est un élément contrôlant dans le processus de cycle hydrologique, son étude permet de savoir le potentiel hydrique d'une région ou d'un bassin donné.

L'eau s'évapore de toutes les étendues d'eau depuis la simple flaque jusqu'aux océans. On parle alors de phénomène d'évaporation. Mais l'eau peut aussi s'évaporer de la végétation, c'est l'évapotranspiration. Cette dernière regroupe deux types d'évapotranspiration qui est réelle **(ETR)** et l'autre est potentiel **(ETP).**

a) Evapotranspiration potentielle ETP

L'Evapotranspiration potentielle, est définie comme l'ensemble des pertes en eau par évaporation et transpiration d'une surface de gazon de hauteur uniforme, couvrant totalement le terrain, en pleine période de croissance, recouvrant complètement le sol et abondamment pourvue en eau.

Pour calculer ETP et la mettre en valeur, Thornthwaite (1948) a pu établir une équation qui se base sur la température moyenne mensuelle :

$$ETP = 16 * \left(\frac{10*T}{I}\right)^{\alpha}$$

Avec,
ETP : L'évapotranspiration de référence ou évapotranspiration potentielle (mm).
T: La température moyenne mensuelle (°C).
I: La somme des indices mensuels (i) de l'année,**i= (T/5)$^{1.514,}$** i= 88.58°C

α : α= (1.6∗I/100) +0.5, α =1.917

Tableau 2 : Tableau montre le calcule d'ETP mensuelle en mm

MOIS	SEPT	OCT.	NOV.	DÉC.	JANV.	FÉVR.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUIL.	AOÛT
T°C	24.1	19.8	14.9	11.9	10.6	12.3	13.8	15.4	19	23.1	27	27.3
I°C	10.79	8.05	5.21	3.73	3.12	3.91	4.67	5.5	7.56	10.17	12.81	13.06
ETP en (mm)	108.23	74.35	43.2	28.11	22.54	29.95	37.31	46.01	68.72	79.69	134.46	137.33
precipitation en (mm)	11	32	44	57	48	46	43	43	28	11	1	1

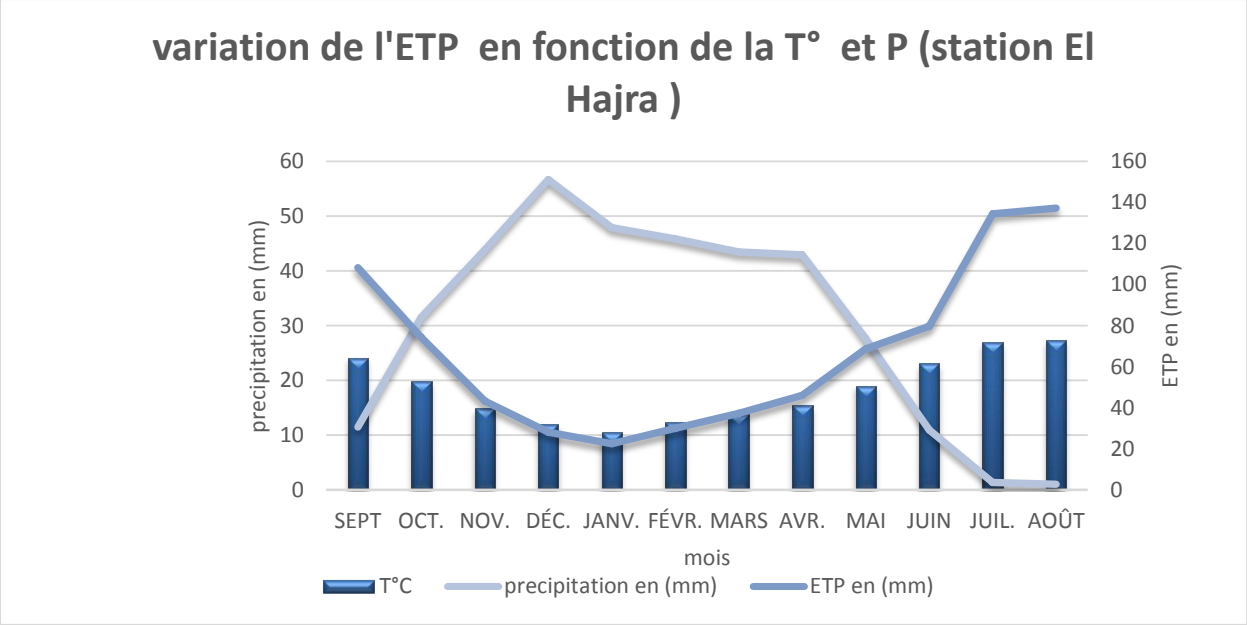


Figure 9: Variation de l'ETP en fonction de la T° et P (station El Hajra)

D'après la (Fig. 9), l'ETP calculée est généralement supérieure à la lame d'eau précipitée dans les mois d'Octobre jusqu'à le mois Avril, tandis que, les mois de Juin à Aaoût le phénomène s'inverse due essentiellement à l'augmentation de la température.

b) Evapotranspiration réelle ETR

ETR c'est la somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et par les plantes quand le sol est à son humidité spécifique actuelle et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire réel.

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour calculer l'ETR, parmi lesquelles la formule de Turc et la formule de Coutagne, ces formules sont basées sur la température et la hauteur des précipitations moyennes annuelles ou mensuelles. Pour notre étude concernant le bassin de Mikkes, on va utiliser la méthode de Turc et la méthode de Thornthwaite

- **Méthode de turc**

La formule est écrite comme la suit : $$\boldsymbol{ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9+\frac{P^2}{L^2}}}}$$

Avec :
ETR : évapotranspiration réelle annuelle (mm)
P : hauteur de précipitation annuelle (mm)

$L=300+25T+0.05T^3$ Où **T** est la température moyenne annuelle (°C)

Pour la station de El Hajra (1961-2009) l'ETR est égale **T= 18.9 °C**, **P=365mm** et **L=1110.05**

Alors **ETR=365mm**

- **L'étude de bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite**

L'utilisation des différents paramètres hydro-climatiques calculés, auparavant, permet de fournir une base de données nécessaire pour le calcul de l'ETR par la méthode de Thornthwaite. Cette méthode est basée sur la notion RFU qui est définie comme étant la réserve en eau facilement utilisable et qui dépend de la saturation du sol et des précipitations.

La zone en question est considérée comme une région qu'a un climat aride à semi-aride, alors on peut admettre la hauteur d'eau emmagasinée dans le sol du bassin de Mikkes est de 50mm au maximum.

Pour calculer l'ETR par cette méthode, on doit prendre en considération les équations suivantes :

- **Si (P + RFU) ≥ETP ----------ETR = ETP**
- **Si (P + RFU) ≤ ETP ----------ETR = P + RFU**

Le tableau suivant illustre les principaux résultats liés à la station d'El Hajra qui représente le bassin versant de Mikkes.

Tableau 3 : Calcul de l'ETR par la méthode de Thornthwaite (1961-2009)

MOIS	SEPT	OCT.	NOV.	DÉC.	JANV.	FÉVR.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUIL.	AOÛT
T°C	24.1	19.8	14.9	11.9	10.6	12.3	13.8	15.4	19	23.1	27	27.3
ETP en (mm)	108.23	74.35	43.2	28.11	22.54	29.95	37.31	46.01	68.72	79.69	134.46	137.33
P en (mm)	11	32	44	57	48	46	43	43	28	11	1	1
ETR (mm)	11	32	43.2	28.11	22.54	29.95	37.31	46.01	68.72	17.27	1	1
P-ETP	-97.23	-42.35	0.8	28.89	25.46	16.05	5.69	-3	-41	-69	-133	-136
RFU	0	0	0.8	29.69	50	50	50	46.99	6.27	0	0	0
EXEDENT (mm)	0	0	0	0	5.15	16.05	5.69	0	0	0	0	0

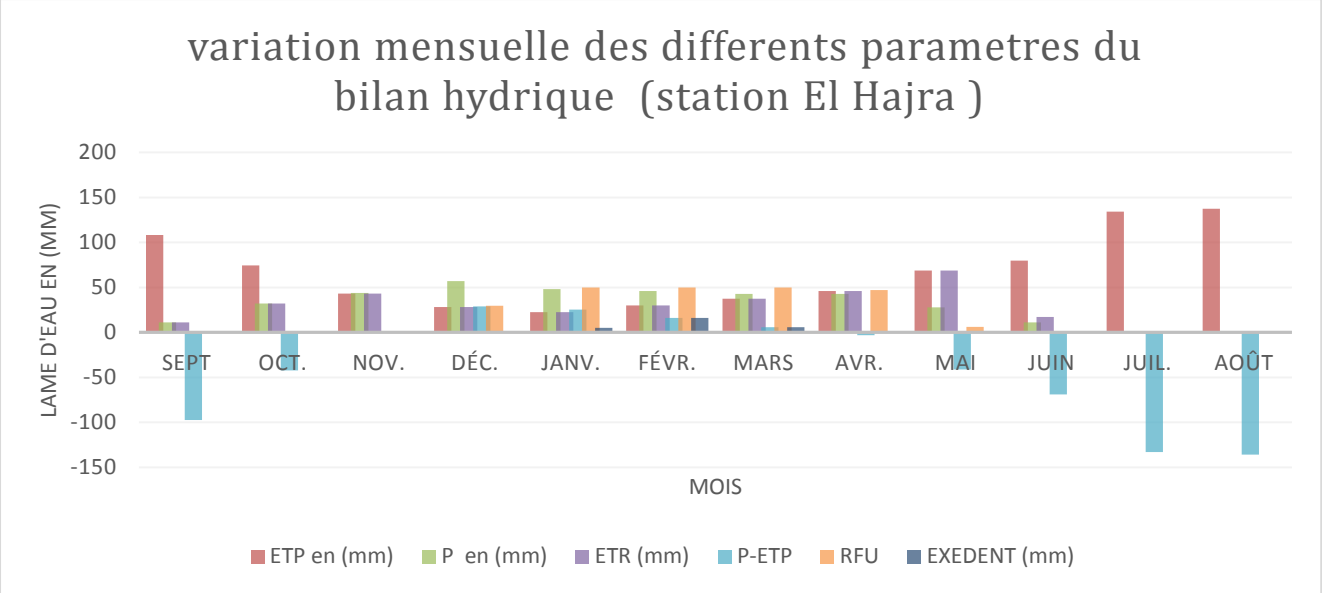


Figure 10 : Variation mensuelle du différent paramètre du bilan hydrique de la zone d'étude

➢ Calcule de l'ETR moyenne annuelle

Après avoir calculé l'ETR moyenne mensuelle en utilisant les deux méthodes, on peut évaluer l'ETR moyenne annuelle par la somme des ETR mensuelles, le tableau suivant résume les résultats de l'ETR annuelle.

Méthode	turc	Thornthwaite	moyenne
ETR (mm)	**365**	**338.11**	**351.55**

Le calcul de l'ETR par l'utilisation des différentes méthodes que soient de Turc ou de Thornthwaite a permet d'avoir des données sur les caractéristiques du climat du bassin versant du Mikkes, selon les données présentées, on peut classer le climat de la région en question avec un climat semi-aride à aride, les formules de calcul ont donné à l'ETR une valeur de 351 .55 mm qui est effectivement une valeur inférieure à celle de précipitation moyenne annuelle qui est de 365 mm, alors le surplus va aboutir à l'alimentation des nappes souterraines ou l'alimentation du ruissellement superficiel.

III. LES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MORPHOLOGIQUES DU BASSIN VERSANT DE MIKKES

Les caractères physiques d'un bassin sont très nombreux, On s'est attaché à ne retenir que ceux qui pouvaient s'exprimer par un nombre, ainsi les courbes hypsométriques et les graphiques de profil en long ont été écartés, certains caractères numériques choisis pouvant prétendre apporter une information équivalente.

Dans un bassin versant, on peut retenir 3 caractères physiques principaux:

- la surface A
- l'indice de compacité, ou coefficient de forme C
- l'indice de la pente Ip

Un caractère secondaire, l'indice de pente global IG, et 3 caractères intermédiaires de calcul : le périmètre P, la dénivelée totale D et la longueur du rectangle équivalent L.

1. Les caractères physiques du bassin de Mikkes

1.1. L'indice de forme

La plupart de ces caractères physiques sont classiques et bien connus. On rappelle simplement ici leur formule d'établissement :

L'indice de compacité $\boxed{KC = \frac{0.28.P}{\sqrt{A}}}$

Avec,

KC: Indice de compacité de Gravelius

A : surface du bassin versant (Km^2)

P : périmètre du bassin (Km)

L'indice est égal à 1 pour un bassin de forme circulaire et croît à mesure que la déformation s'accentue. La valeur de l'indice de compacité du bassin de Mikkes est égale à KC=1.92, alors on peut conclure que la forme de bassin en question est de forme allongée. Cette forme induit de faibles débits de pointe de crue.

1.2. Hypsométrie du bassin versant

L'altitude et la pente sont des facteurs physiques qui influencent sur le régime hydrologique et sur les changements des conditions climatiques. Alors le relief du bassin versant joue un rôle très

important pour déterminer le processus de ruissèlement et évaluer le rôle de la morphologie dans la réponse hydrologique. La restitution des différentes variables géomorphométriques du bassin versant de Mikkes est réalisée à partir des courbes au niveau de la carte topographique.

1.2.1. La carte hypsométrique

A partir de la carte topographique, on peut calculer la superficie en km^2 et en % pour chaque tranche d'altitude. La répartition du bassin versant de Mikkes en tranche d'altitude est consignée dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Répartition de la surface totale par tranches d'altitudes

Tranche d'altitude en (m)	Surface en (km^2)	la superficie%
400	0.308	0.02
600	19.238	1.41
800	99.249	7.29
1000	112.711	8.28
1200	120.189	8.83
1400	149.692	11
1600	149.996	11.02
1800	150.256	11.04
2000	275.471	20.24
2200	284.204	20.88
Total	1361.314	100

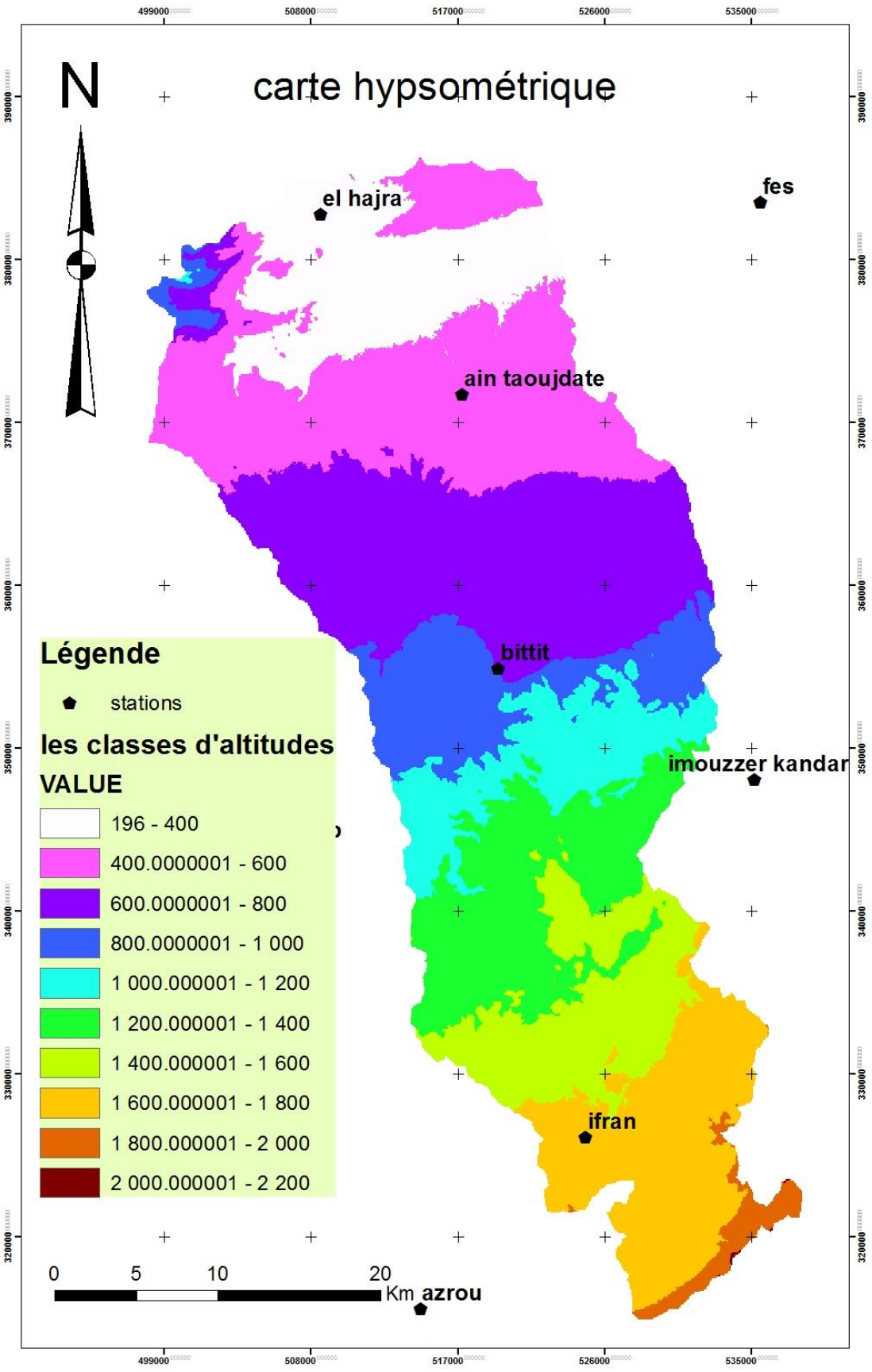


Figure 11 : Carte hypsométrique du bassin versant de Mikkes

1.2.2. Courbe hypsométrique

C'est un graphe sur lequel les valeurs des altitudes sont reparties sur l'axe des abscisses. La surface, en% de la surface totale comprise entre deux altitudes successives, est reportée sur l'axe des ordonnées.

Tableau 5: Répartition de la surface cumulée en fonction d'altitudes

Tranche d'altitude en (m)	Surface en (km^2)	Superficie (%)	Superficie cumulée (%)
400	0.308	0.02	0.02
600	19.238	1.41	1.43
800	99.249	7.29	8.72
1000	112.711	8.28	17
1200	120.189	8.83	25.83
1400	149.692	11	36.83
1600	149.996	11.02	47.85
1800	150.256	11.04	58.89
2000	275.471	20.24	79.13
2200	284.204	20.88	100
Total	1361.314	100	

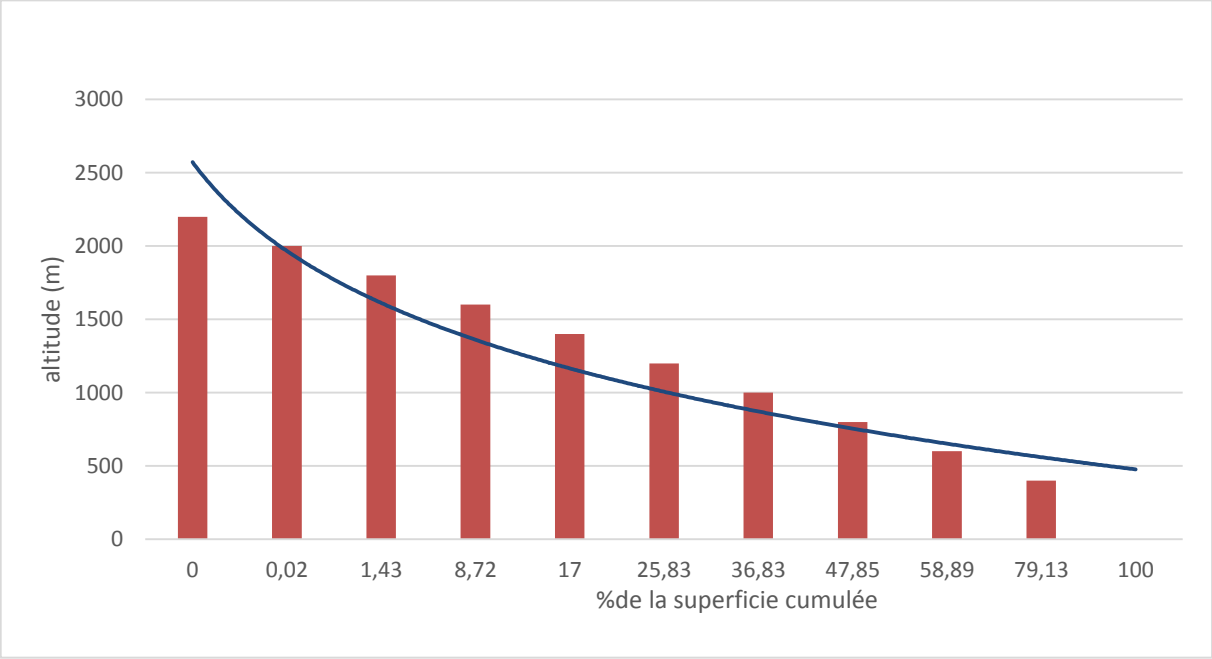


Figure 12 : Courbe hypsométrique du bassin versant de Mikkes

1.2.3. Les altitudes caractéristiques

Ces altitudes caractéristiques sont définies comme étant les côtes les plus basses et plus hautes du bassin.

- La côte la plus basse est de **400m**
- La côte la plus haute est de **2000m**

a) L'altitude moyenne

Elle est définie comme étant la moyenne entre l'altitude la plus haute et la plus basse, dans le cas étudié, elle est de **1200 m**

b) L'altitude médiane

Elle traduit l'altitude de fréquence qui correspond à 50% de la courbe hypsométrique. Elle est de l'ordre de **800 m.**

c) L'altitude la plus fréquente

C'est l'altitude qui correspond à la tranche d'altitude qui représente le maximum de l'histogramme des fréquences altimétriques, soit 2000 m à 2200 m, le bassin versant de Mikkes est un bassin d'une altitude modérée.

1.3. Les indices de pente

La pente c'est une caractéristique physique qui dépend essentiellement de la topographie du bassin versant, elle est considérée comme variable déterminante sur le temps de concentration du ruissellement et l'influence sur le débit de point après une averse. On en distingue :

- La pente moyenne qui est égale au quotient de la différence entre les hauteurs maximum et minimum par longueur du rectangle équivalent.

$$\boldsymbol{Pmoy = \frac{\Delta H}{L} = \frac{Hmax - Hmin}{L}}$$

Avec,

Pmoy : la pente moyenne du bassin versant en m/Km

ΔH : L'altitude moyenne en (m)

L : la longueur du rectangle équivalent en (Km)

La pente moyenne du bassin versant est **13,58 m/km**

- Indice de pente global(Ig) qui est donné par la formule suivante :

$$\mathbf{Ig=(H_5\ \%-H_{95}\%)/L}$$

Avec ;

Ig : indice de pente global en m/km

H_5 %-H_{95}% : la dénivelée

Leq : longueur du rectangle équivalent

$H_{5\%}$: altitude correspondant à 5%de la surface totale du bassin versant

$H_{95\%}$: altitude correspondant à 95%de la surface totale du bassin versant

La valeur de l'indice de pente globale est égale : **11 ,46 m/km**

Selon la classification du relief donne par l'ORSTOM. La valeur de l'indice de pente du bassin de Mikkes est borné entre $0.05 < Ig < 0.5$ ce qui montre que le relief est fort.

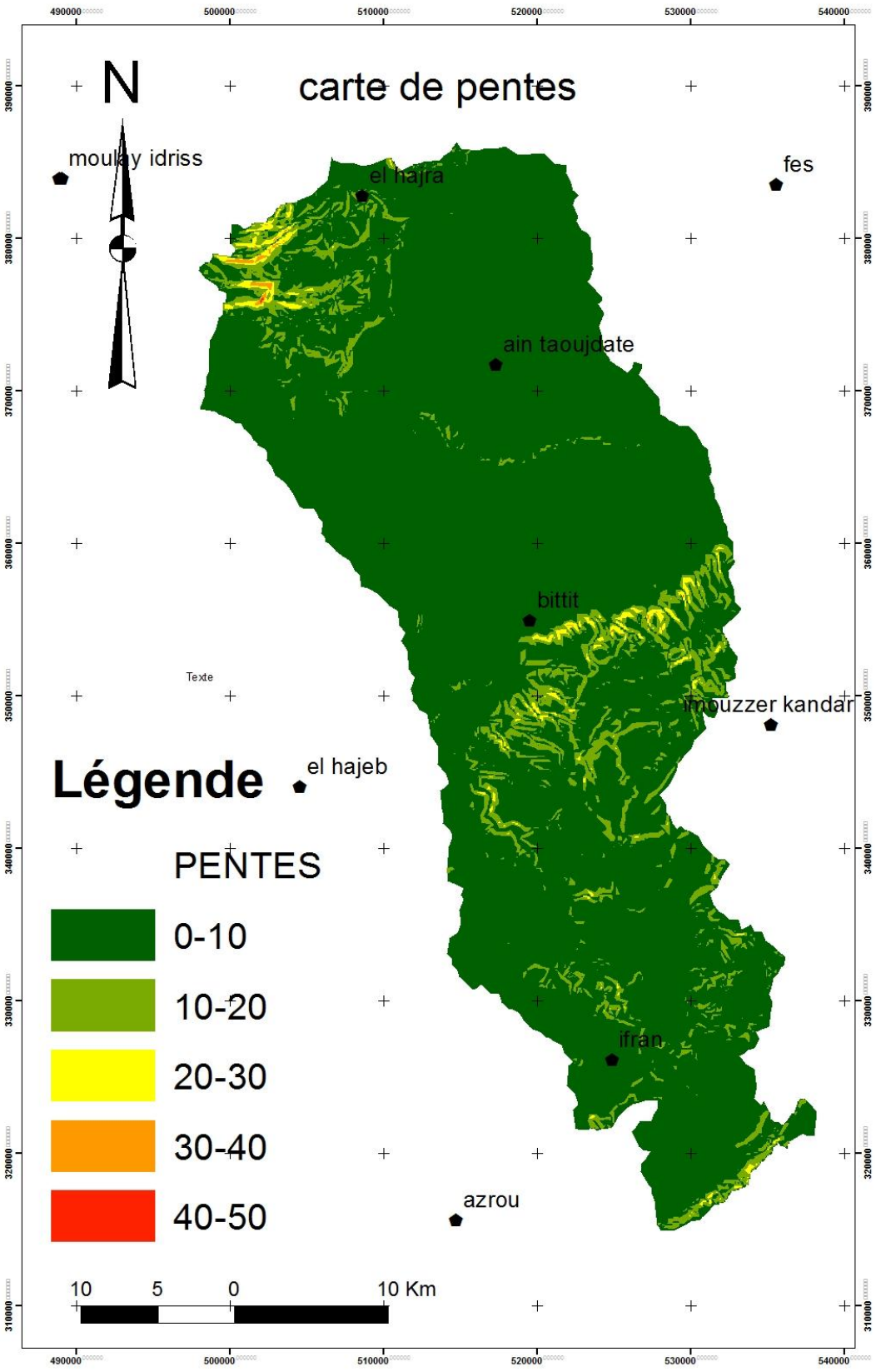


Figure 13 : Carte des pentes du bassin versant de Mikkes

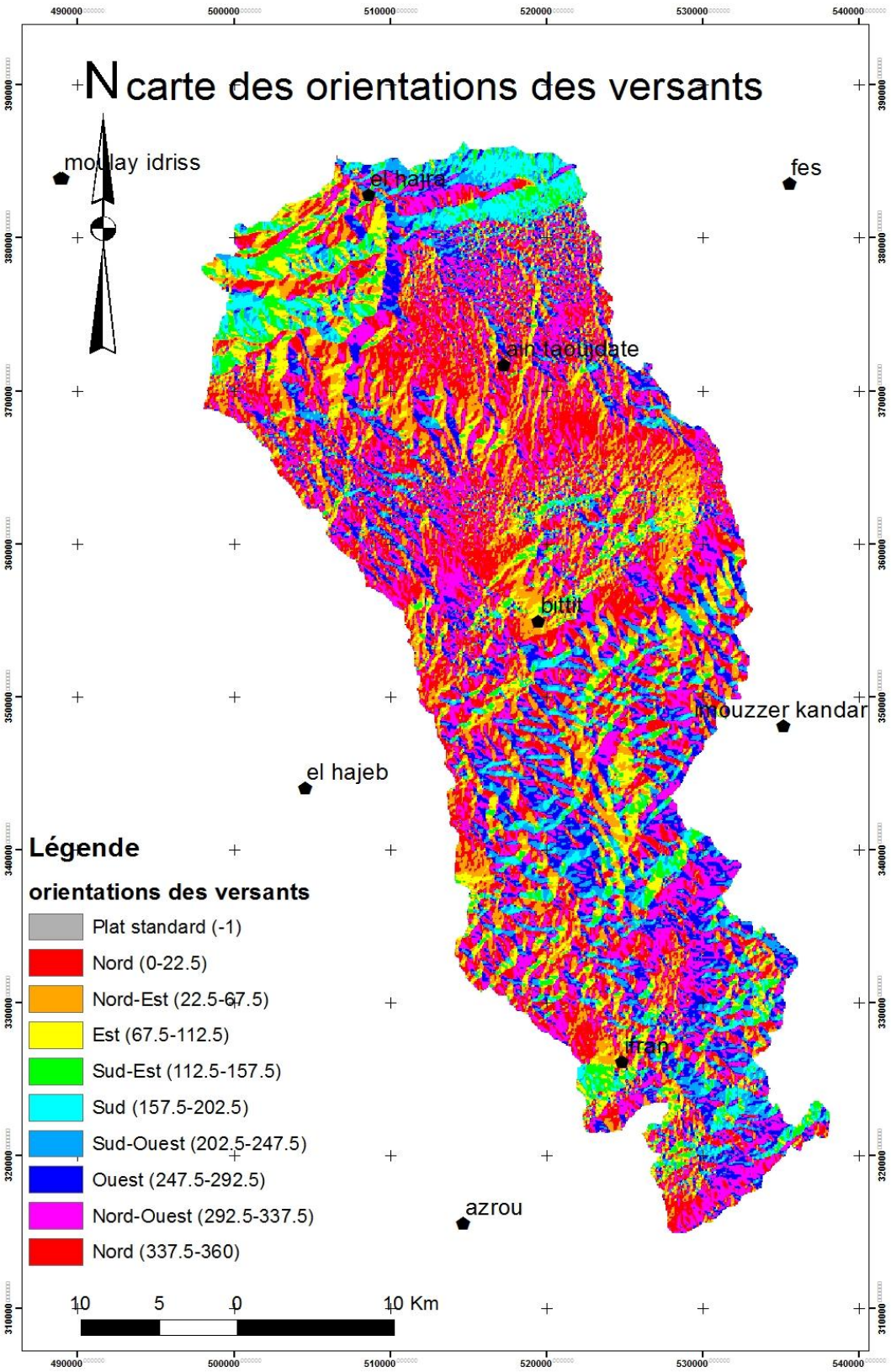


Figure 14 : Carte d'orientation des pentes du bassin versant de Mikkes

1.4. Le rectangle équivalent

Le rectangle équivalent au bassin a la même surface, le même périmètre (donc le même indice de compacité) et la même hypsométrie. Ses côtes, longueur L et largeur l, sont tels que L.l = A et 2 (L + l) = P. Ils sont égaux quand le bassin a la compacité d'un carré, alors C = 1,12moins de 3 % des bassins étudiés ont une meilleure compacité, ce qui justifie l'emploi du rectangle équivalent, dont la formulation est plus simple que celle du cercle équivalent, l'assimilation physique à un cercle est, en outre, plus irréaliste que celle à un rectangle.

Appelé aussi rectangle de Graveluis, dans ce cas les courbes de niveaux deviennent des droites parallèles aux petits côtes du rectangle, l'un de ces petits côtes représente l'exutoire et l'autre l'altitude maximum du bassin.

La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau. Plus un rectangle équivalent est allongé moins il sera drainé. Les dimensions du rectangle équivalent sont déterminées par les formules suivantes **(ROCHE, 1963)** :

$$\mathbf{L}=\frac{Kc\sqrt{A}}{1.12}\left[1+\sqrt{1-(1.12|Kc)^2}\right] \qquad \textbf{et} \qquad \mathbf{l}=\frac{Kc\sqrt{A}}{1.12}\left[1-\sqrt{1-(1.12|Kc)^2}\right]$$

L=117.8 Km **l=11.9 Km**

Avec,

K_c: Indice de compacité de Gravelius et qui doit être supérieur ou égal à **1 ,12**

A : Superficie du bassin versant en km2

L : Longueur du rectangle équivalent en km

l : Largeur du rectangle équivalent en km.

1.5. Le réseau hydrographique

Un réseau hydrographique désigne un ensemble hiérarchisé et structuré de chenaux qui assurent le drainage superficiel, permanent ou temporaire, d'un bassin versant ou d'une région donnée. Par lequel s'écoulent les eaux provenant de ruissellement ou restituées par les nappes souterraines.

Dans ce chapitre l'extraction de réseau hydrographique du bassin de Mikkes est basée sur le modèle numérique du terrain (MNT).

1.5.1. La densité de drainage

La densité de drainage, introduite par Horton, est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant : $$D_d = \frac{\sum Li}{A}$$

Avec,

$\boldsymbol{D_d}$: densité de drainage [km/km^2]

$\boldsymbol{L_i}$: longueur des cours d'eau [km]

$\boldsymbol{A}$: surface du bassin versant [km^2]

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie), des caractéristiques topographiques du bassin versant et dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques. En pratique, les valeurs de la densité de drainage varient de 3 à 4 pour des régions où l'écoulement n'a atteint qu'un développement très limité et se trouve centralisé, elles dépassent 1000 pour certaines zones où l'écoulement est très ramifié avec peu d'infiltration.

La densité de drainage au niveau d'Oued Mikkes est égal à 0,1 km/km^2, ceci traduit que le bassin présente dans son ensemble une formation géologique perméable, alors, l'écoulement est plutôt limité et centralisé ainsi que l'infiltration est augmentée.

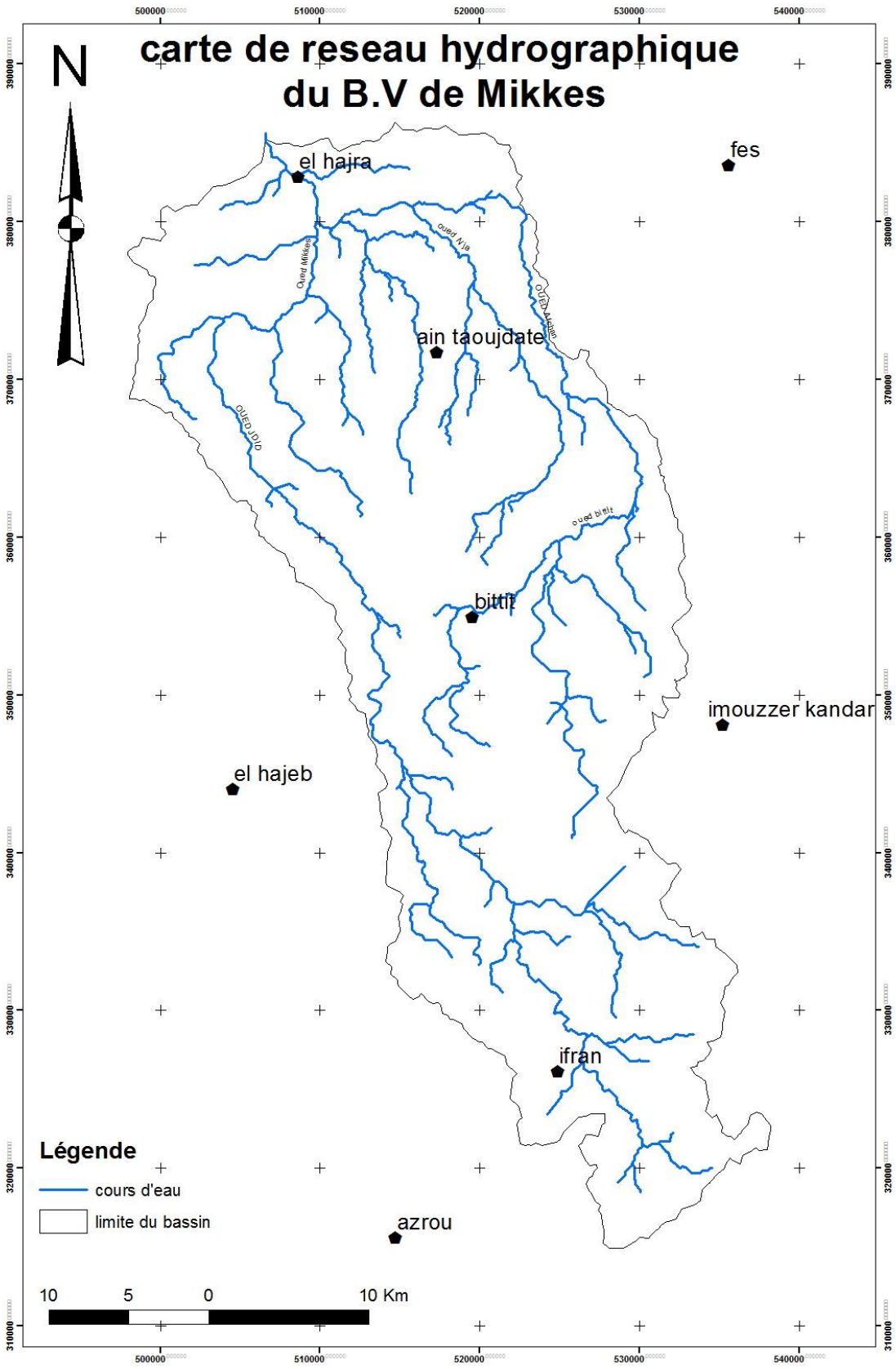


Figure 15 : Carte de réseau hydrographique du bassin versant de Mikkes

Conclusion

En se basant sur la topographie du bassin de Mikkes, nous pouvons déterminer les principales caractéristiques physiques, cette étude est réalisée par l'utilisation du modèle numérique de terrain MNT, les tableaux suivants résument les différentes caractéristiques physiques du bassin versant de Mikkes.

Tableau 6 : La fiche morphométries du bassin versant de Mikkes

les caractéristiques physiques du bassin versant Mikkes	
surface en (km^2)	**1360**
périmètre en (km)	**254**
indice de compacité	**1.94**
altitude moyenne (m)	**1200**
altitude la plus élevée(m)	**2000**
altitude la plus basse (m)	**400**
altitude médiane (m)	**800**
altitudes les plus fréquentes (m)	**600 à 800**
dénivelée (m)	**1100**
longueur du rectangle équivalent (km)	**117.8**
largeur du rectangle équivalent (km)	**11.9**
pente moyenne du bassin (m/km)	**13.58**
indice de pente globale (m/km)	**9.33**
densité de drainage (km/km^2)	**0.1**

Tableau 7 : Les paramètres climatiques du bassin versant de Mikkes (station El Hajra)

Les paramètres climatiques (station El Hajra)	La valeur (1961-2009)
Précipitation moyenne annuelle (mm)	**365 mm**
Température moyenne annuelle (°C)	**18.9 °C**
Evapotranspiration potentielle (mm)	**809.9 mm**
Evapotranspiration réelle (mm)	**351.55 mm**

CHAPITRE II: ETUDE HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE MIKKES

I. Introduction

L'Oued Mikkes, prend son origine dans la région d'Ifrane. En plaine, l'oued reçoit l'apport des affluents mineurs, alimentés par des ressources localisées ou des émergences diffusées par les nappes du bassin. Le réseau hydrographique du bassin de l'Oued Mikkes est canalisé essentiellement par quatre affluents : Oued N'ja et Oued Atchane (affluent rive droite), Oued Tizguit et Oued Akkous (affluent rive gauche). Les premiers drainent la plaine du Sais et les seconds le plateau de Meknès et le Causse. La direction de l'écoulement est généralement SSE-NNW, à l'exception de l'Oued N'ja qui s'écoule de l'Est en Ouest.

L'étude hydrologique est une approche qui vise à reconnaitre des crues de projets par les aspects du débit de pointe et de l'hydrogramme de crue.

Ce chapitre résume l'étude fréquentielle sur une longue série des débits enregistrés dans l'exutoire du bassin versant de Mikkes exactement à l'entrée de barrage Sidi Chahed.

Cette analyse fréquentielle facilite l'estimation de temps de retour d'une valeur que soit de débit ou de précipitation. L'étude préventive est basée sur la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel qui est une équation décrivant le comportement statistique d'un processus. Dans la présente étude, on va utiliser l'ajustement par la loi de Gumbel et d'autres lois.

II. ANALYSE DES DEBITS

1. Débit moyen annuel

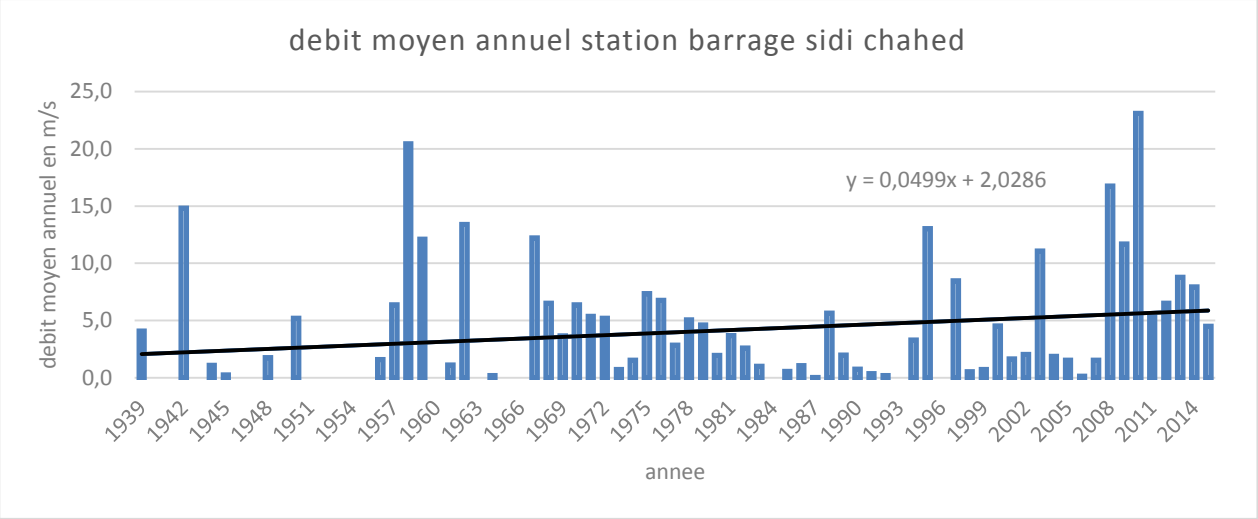


Figure 16 : Variation interannuel des débits moyens annuels pour la station barrage Sidi Chahed

Le débit moyen annuel était calculé à partir de la moyenne arithmétique des débits moyens mensuels.

Le régime de l'Oued Mikkes correspond généralement à un écoulement faible. Ses débits présentent une variation temporelle, qui tend globalement vers une augmentation faible avec une valeur de 0.05 selon la droite de régression linéaire appliquée sur les débits moyens annuels.

Le module annuel dans la station de barrage Sidi Chahed en aval du bassin de Mikkes (1939 à 2015) est de 4 .5 m 3 /s. Ceci reflète la succession de période humide et de période sèche.

1.1.Relation entre les débits et les précipitations

La (Fig. 17) montre l'influence de la pluviométrie moyenne annuelle sur les débits moyens annuels du cours d'eau. La plupart des études sur la variabilité du climat décrivent la variabilité des pluies ou des écoulements, avec un lien entre les deux.

D'après le graphe on observe que les pluies enregistrées dans la station d'El Hajra influencent directement le débit, notamment après les années 80 qui ont été des années pluvieuses dans le bassin de Mikkes.

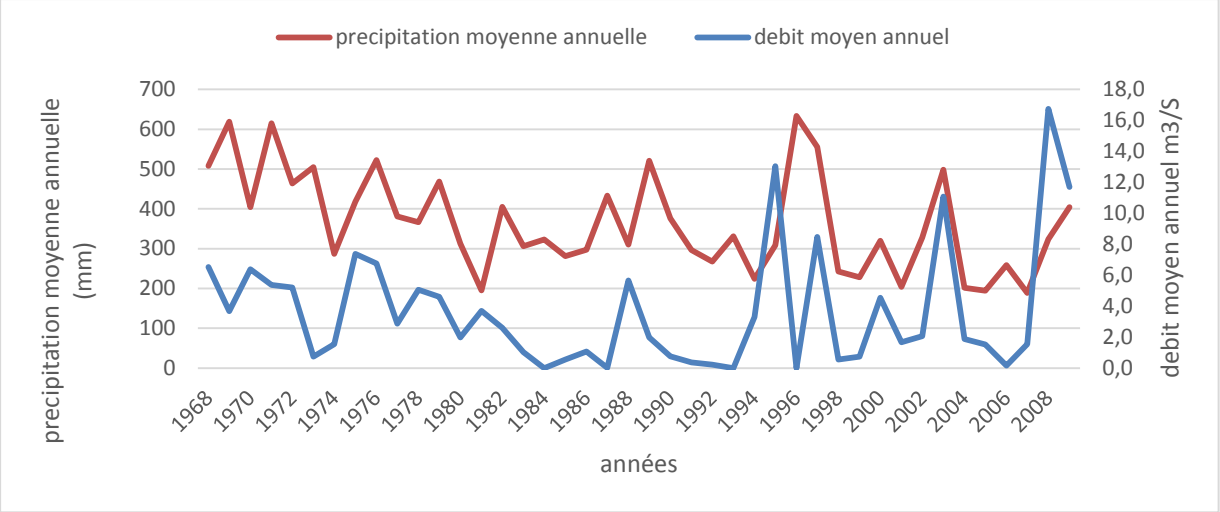


Figure 17 : Relation pluie-débit sur la station El Hajra (1968-2014)

1.2. Coefficient d'hydraulicité

Pour un cours d'eau, le coefficient d'hydraulicité c'est le débit d'une année donnée sur le débit moyen interannuel (calculée sur plusieurs années).

Pour un coefficient (C.H>1) c'est une année humide à écoulement important, dans le cas contraire c'est une année à faible hydraulicité, c'est à dire de faible débits du cours d'eau ou du bassin versant.

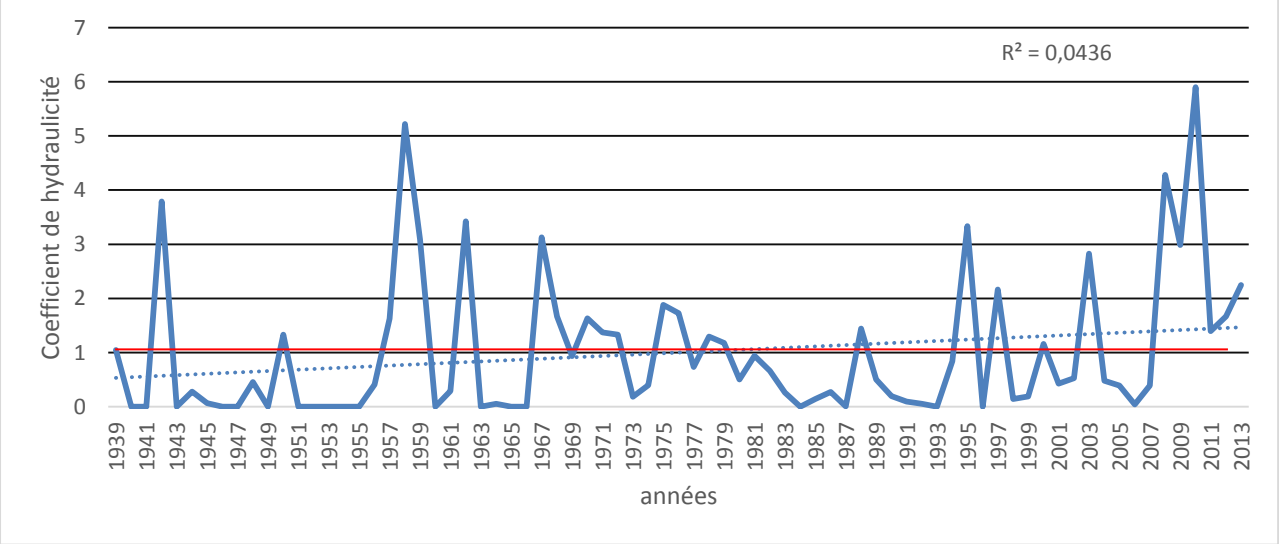


Figure 18 : Variations du coefficient d'hydraulicité des débits au niveau de l'Oued Mikkes

La (Fig. 18) montre que le coefficient d'hydraulicité varie d'une période à l'autre. Généralement, les années 60 et 70 ont connu une période humide importante et ont présenté des écoulements aussi importants, par contre les années 80 le coefficient est devenu inférieur à 1 ce qui confirme que ces

années étaient sèches. Au début de l'année 1993 le coefficient est supérieur 1 ce qui confirme un période humide et que l'écoulement est devenue plus important effectivement en 2010.

2. Débits mensuels

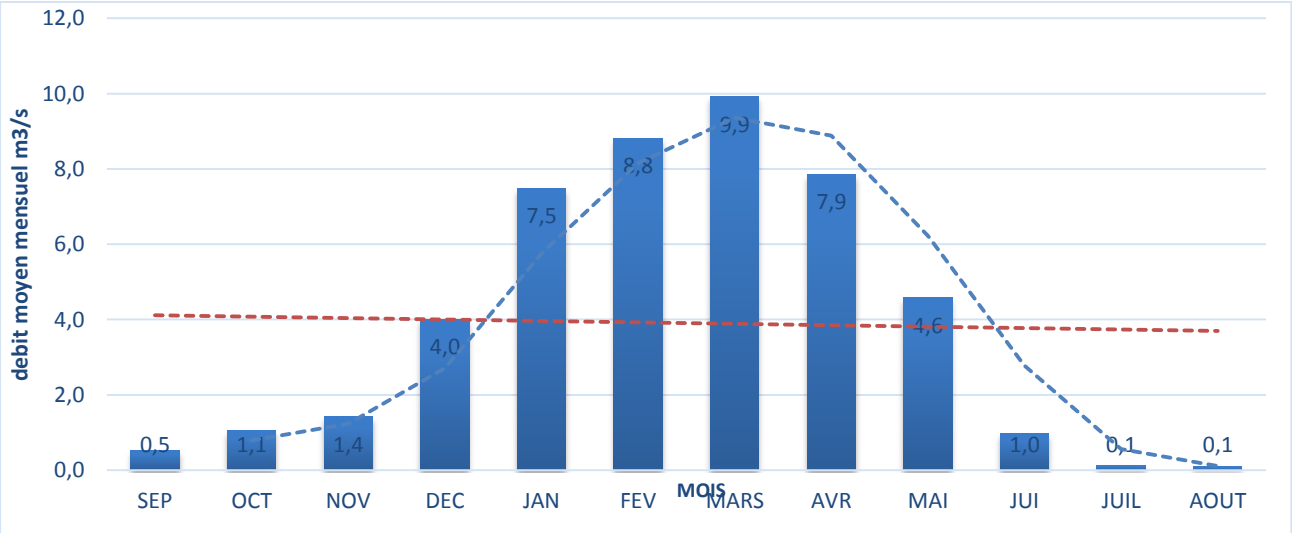


Figure 19 : Débits moyens mensuels de l'Oued Mikkes (1939-2015)

La (Fig. 19) représente les débits moyens mensuels calculés pour une période de 76 ans, et montre qu'il y a un seul mode de précipitation d'origine pluvial.

Les débits mensuels de l'Oued Mikkes sont généralement variables. Ils commencent à augmenter à partir du mois de Décembre pour atteindre le maximum au mois de Mars (hiver) avec une valeur moyenne de 9.9 m^3/s. Pendant les mois de l'hiver, les cours d'eau recueillent les précipitations importantes et engendrent une augmentation du débit. Cependant, au cours des mois d'été, une diminution du débit (période d'étiage) qui se poursuit pour atteindre son minimum au mois de Août et moi de Juillet avec une moyenne de 0.1 m^3/s. Les débits mensuels durant les périodes sèches de l'année (Juillet, Août et Septembre) sont des écoulements d'étiage.

1.3.Coefficient mensuel du débit

Le coefficient mensuel du débit est la relation entre le débit moyen mensuel et le module brut annuel. Il permet de rendre compte de l'importance d'un mois sur l'année. Il met en évidence la variabilité des écoulements, qui se manifeste par des périodes de hautes et basses eaux. Ce coefficient est déterminé par le rapport des débits moyens mensuels sur le débit moyen interannuel.

$$C = Q_m / Q_{mi}$$

Avec :

C *:* Coefficient mensuel des débits
Q m: Débit moyen mensuel
Q mi: Débit moyen interannuel

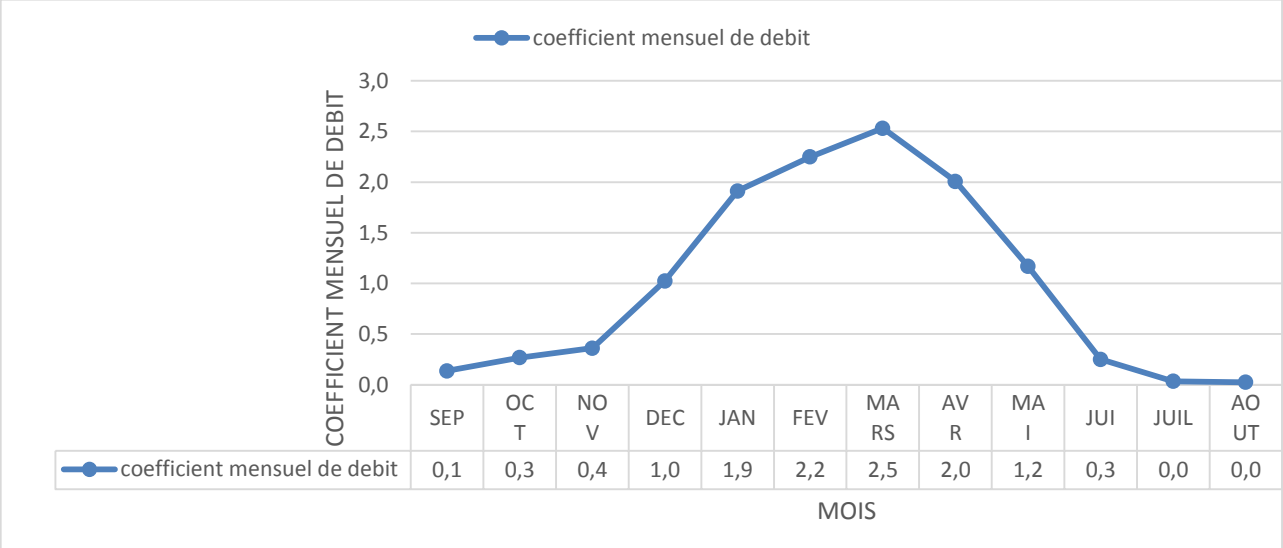


Figure 20 : Variations du coefficient mensuel des débits au niveau de l'Oued Mikkes

Les variations du coefficient mensuel des débits au niveau de cette station (Fig. 20) montrent que le régime hydrologique se distingue par une période des hautes eaux (C >1) et des basses eaux (C <1).

La période des hautes eaux (C >1) pour Oued Mikkes, correspond à une période qui s'étale de Janvier jusqu'au Avril. Elle en résulte des crues violentes qui caractérisent le mois de Mars. La période des basses eaux (C<1) correspond à la période la plus longue qui s'étale du mois de Mai jusqu'au Décembre. Elle en résulte des étiages.

III. ETUDES DES CRUES

Les crues constituent des situations qui ne peuvent être cernées que dans leur succession chronologique, allant de quelques heures à plusieurs jours. Dans la présente étude des crues, on s'intéresse à leur analyse qui constitue une prévision des risques et des défaillances en année de bonne ou mauvaise hydraulicité.

1 .Les crues

Selon F. Frécau, (1971), il convient de distinguer entre crues et hautes eaux ; les hautes eaux moyennes représentent une situation saisonnière durable. Les crues au contraire, constituent avec les étiages extrêmes dans le comportement des cours d'eaux. Il s'agit de gonflements fluviaux exceptionnels et irréguliers, tant en saison froide (période de hautes eaux), qu'en saison chaude

(période de basses eaux), Pour certains auteurs les crues sont des débits égaux ou supérieurs à un certain multiple du module annuel. D'après G.Remeniaras à 1976, une crue annuelle est le débit le plus fort observé dans l'année. On peut caractériser une crue par un débit maximum instantané observé au cours du phénomène qui s'appelle débit de pointe.

1.1. Analyse fréquentielle des crues maximales annuelles

La méthode d'analyse est basée sur l'analyse statistique des débits maximums instantanés relevés en calculant la probabilité pour qu'un débit donné supérieur à une valeur fixé survienne un nombre donné pendant une durée donnée, d'où l'objectif de la présente étude était d'extraire les débits de pointe pour faire la modélisation en utilisant un logiciel très sophistiqué qui est HEC RAS. Cette méthode conditionne l'application de plusieurs tests qui font partie de logiciel HYFRAN, parmi ces tests le test d'homogénéité, l'indépendance et le test de la stationnarité des évènements de crues. La présente étude se focalise sur le choix du test d'indépendance pour ajuster la distribution extraite en utilisant des lois théoriques de probabilité connue de façon à interpréter aussi fidèlement que possible l'observation disponible.

Le variable pour notre étude est le débit maximum instantané enregistré dans l'exutoire du bassin versant de Mikkes en aval.

1.2. Donnes et méthodes

La série étudiée représente les débits instantanés maximums annuels mesurés au niveau de la station en aval de bassin versant de Mikkes d'une période de (1939-2015), on a soumis la série à une analyse fréquentielle en employant le logiciel HYFRAN (Hydrology Fréquency Analysis) conçu spécialement pour le traitement des données hydrologiques extrêmes.

HYFRAN est un logiciel d'ajustement de loi statistique comprenant un ensemble d'outils mathématiques puissants, conviviaux et flexibles permettant en particulier l'analyse statistique d'événement extrêmes et de manière plus générale l'analyse statistique de série de données.

1.3. Aperçu sur le test choisit (Test d'indépendance de Wald Wolfowitz)

C'est un test autocorrélation vérifiant l'indépendance de deux échantillons subdivisés à partir de l'échantillon global. Ce test, est connu également comme test de l'Eléa, utilisée pour tester l'hypothèse selon laquelle une série de nombre est aléatoire. La procédure consiste à ranger les valeurs de chaque groupe par ordre croissant tout en attribuant un code propre pour les valeurs de chaque ordre. On considère que l'hypothèse H0 d'indépendance est vérifiée, l'ordre d'apparition des valeurs issues de deux groupes seront dû au hasard.

Le programme de HYFRAN calcule la plus grande valeur statistique du test U et l'acceptation H0 à un niveau α= 5% cette valeur doit remplir la condition suivante :

$$-U\alpha_{/2} \leq U \leq U\alpha_{/2}$$

1.4. Les statistiques de base

a) Résultats des statistiques de base

Tableau 8 : Résultats des statistiques de base d'oued Mikkes dans la station en aval

DEBIT MAXIMUM ANNUEL D'OUED MIKKES EN AVAL	
Statistiques de base	**débit en m^3/s**
Nombre d'observations	**77**
Minimum	**1**
Maximum	**65.1**
Moyenne	**16.7**
Ecart-type	**13.7**
Médiane	**14.2**
Coefficient de variation (Cv)	**0.819**
Coefficient d'asymétrie (Cs)	**1.11**
Coefficient d'aplatissement (Ck)	**3.95**

Les paramètres de formes concrétisés par le Coefficient d'asymétrie (Cs) et le Coefficient d'aplatissement (Ck) nous permettent, de conclure respectivement la répartition de l'échantillon ou de la distribution autour de la moyenne et la forme de la courbe de fréquence (Tab. 8).

Le coefficient d'asymétrie et le coefficient d'aplatissement pour les deux stations sont positifs, ce qui permet de conclure, qu'on est devant une asymétrie gauche de la distribution.

b) Histogramme de fréquence

L'histogramme de fréquence est plus élevé à gauche pour les observations de Mikkes, cette allure confirme l'asymétrie gauche de la distribution, déjà mise en évidence par le coefficient d'asymétrie.

La classe des faibles débits au niveau de la station en aval de Mikkes est [48 – 56], celle des forts débits [0 -8] est plus importante au niveau de la série (Fig. 21).

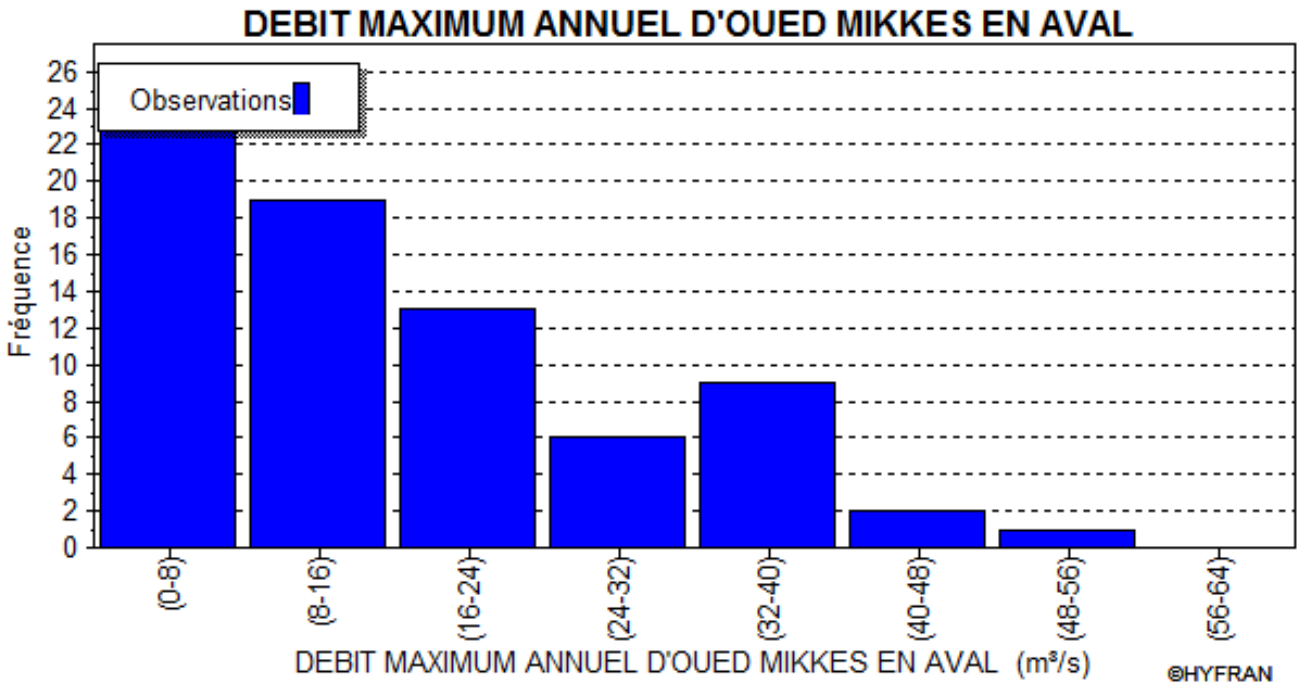


Figure 21 : Histogramme de fréquence des débits maximum annuel pour la station en aval d'oued Mikkes

1.5. Résultats et interprétation des ajustements aux lois statistiques

La série des débits maximums annuels a été utilisée pour l'analyse fréquentielle. Des lois statistiques, caractérisés par l'étude des événements extrêmes, ont été utilisées pour leurs ajustements. Il n'existe pas de règles théoriques pour justifier le choix d'une telle loi, mais puisque on dispose des variables aléatoires représentant des crues maximales annuelles, les lois des valeurs extrêmes sont plus adaptées à la loi Gamma, Gumbel, Jenkinson(GEV).

a) Ajustement à la loi de Gumbel (méthode de vraisemblance)

La distribution statistique de Gumbel est une loi double exponentielle, elle dépend de deux paramètres:

α (paramètre de position) et β (paramètre de dispersion).

Apres avoir ajusté la série, le tableau et le graphe montrent les résultats obtenus :

Tableau 9 : Résultat de l'ajustement à la loi de Gumbel (Maximum de vraisemblance) pour Mikkes

paramètres				résultats			
Oued	α	β	X^2	P	Degré de liberté	Nb. de classe	Nb. d'observation
Mikkes	9.87	10.60	22.57	0.004	8	11	77

Hypothèse:

H0 : L'échantillon provient d'une loi de Gumbel

H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi de Gumbel
Nous devons REJETER H0 au niveau de signification de 1%.

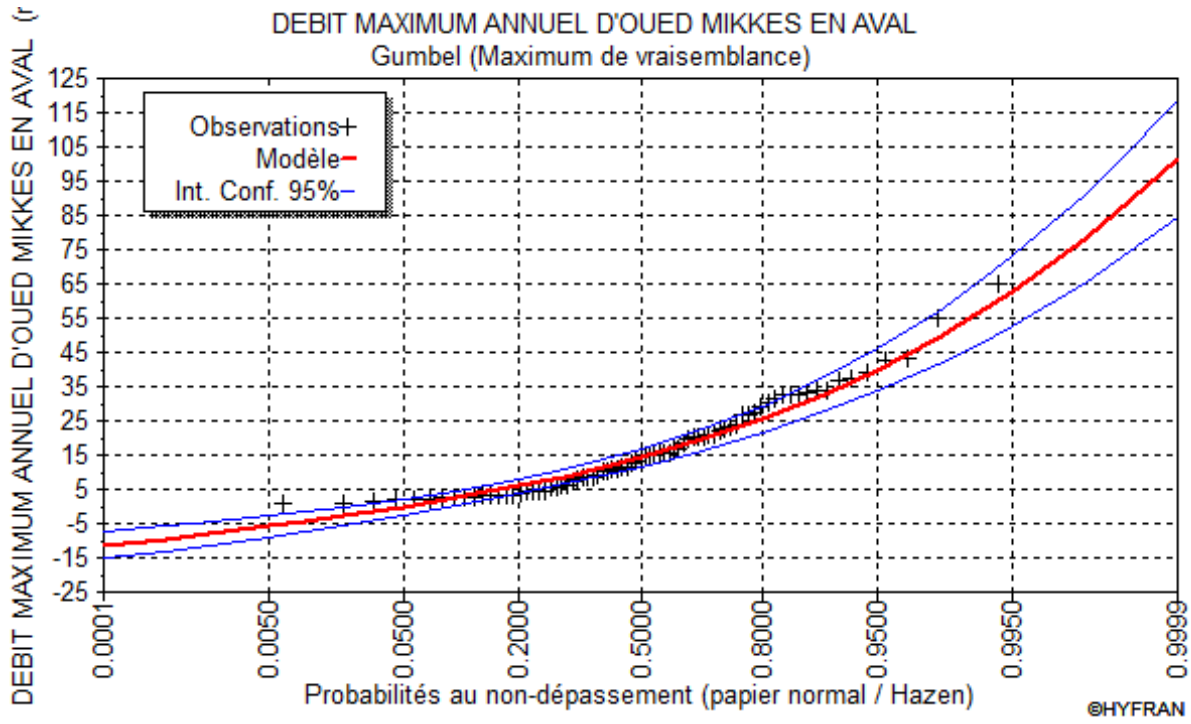


Figure 22 : Ajustement graphique de la série des débits maximums annuels à la loi de Gumbel pour Mikkes

b) Ajustement à la loi de Jenkinson GEV (méthode des moments pondérés)

L'estimation des moments pondérés est une méthode statistique courante utilisée pour inférer les paramètres de la distribution de probabilité d'un échantillon donné. C'est une méthode de trois paramètres K, α, u.

K : Position variable s'assimilant en quelque sorte à la valeur moyenne pour une loi normale,

α: Echelle d'assimilant en quelque sorte à l'écart type (standard déviation) pour une loi normale centrée réduite,

U : Non nul qui forme la distribution.

Après avoir ajusté la série, le tableau et le graphe montrent les résultats obtenus :

Tableau 10 : Résultats et les paramètres de la loi de l'ajustement à la GEV pour Mikkes

paramètres					résultats			
Oued	k	α	u	X^2	P	Degré de liberté	Nb. de classe	Nb. d'observation
Mikkes	-0.097	9.758	10.03	20.29	0.005	7	11	77

Hypothèse :

H0 : L'échantillon provient d'une loi de GEV

H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi de GEV

- Nous devons REJETER H0 au niveau de signification de 1%.

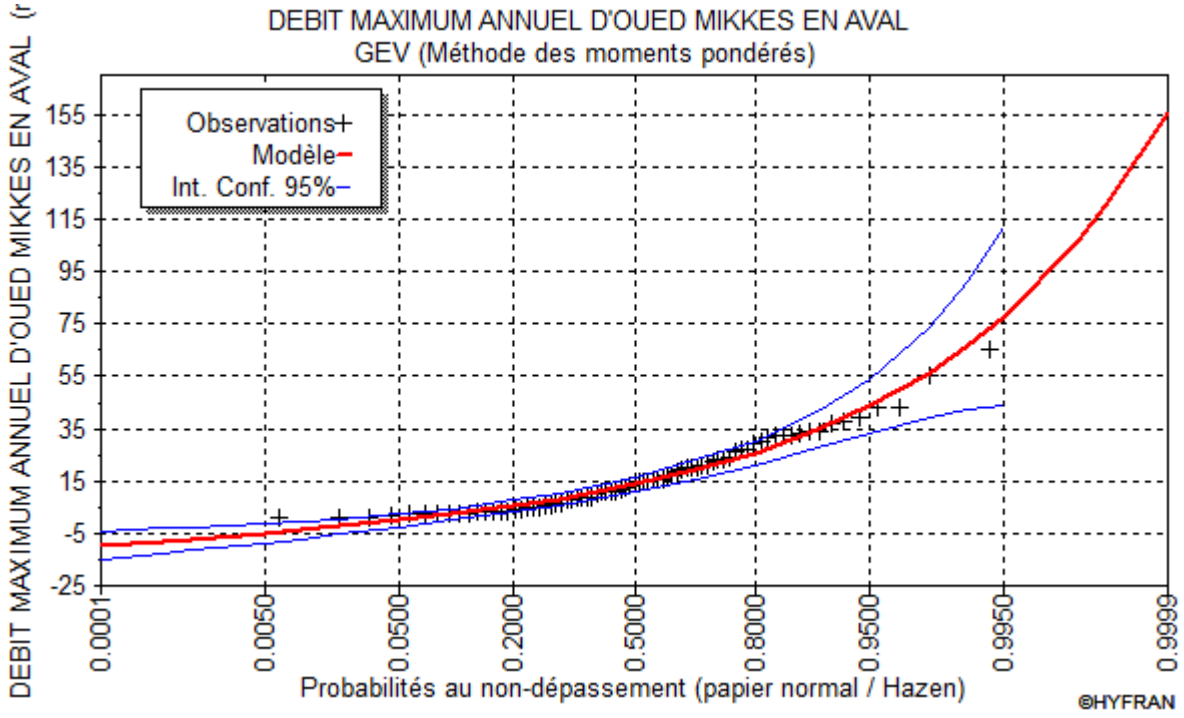


Figure 23 : Ajustement graphique de la série des débits maximums annuels à la loi de GEV pour Mikkes

c) Ajustement à la loi Gamma (ou Pearson)

Ajustement de la loi de Gamma : il s'agit d'une loi à deux ou trois paramètres. Cette distribution convient pour modéliser les variables qui sont bornées inférieurement et n'ont pas de limite supérieure. La fonction de densité de probabilités est exprimée par la formule suivante :

$$F(x) = f\,x = \alpha^{\lambda} / \tau(\lambda).\, x^{\lambda-1}.e^{-x}$$

Avec :

x> 0
α: paramètre de forme
λ: paramètre d'intensité
τ(λ): La fonction Gamma

Apres avoir ajustée la série, le tableau et le graphique montrent les résultats obtenu :

Tableau 11 : Résultats et paramètres de l'ajustement à la loi de Gamma pour Mikkes

paramètres				résultats			
Oued	α	λ	X^2	P	Degré de liberté	Nb. de classe	Nb. d'observation
Mikkes	0.081	1.356	9.14	0.33	8	11	77

Hypothèse :

- **H0** : L'échantillon provient d'une loi de Gamma
- **H1** : L'échantillon ne provient pas d'une loi de Gamma

➢ Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5%.

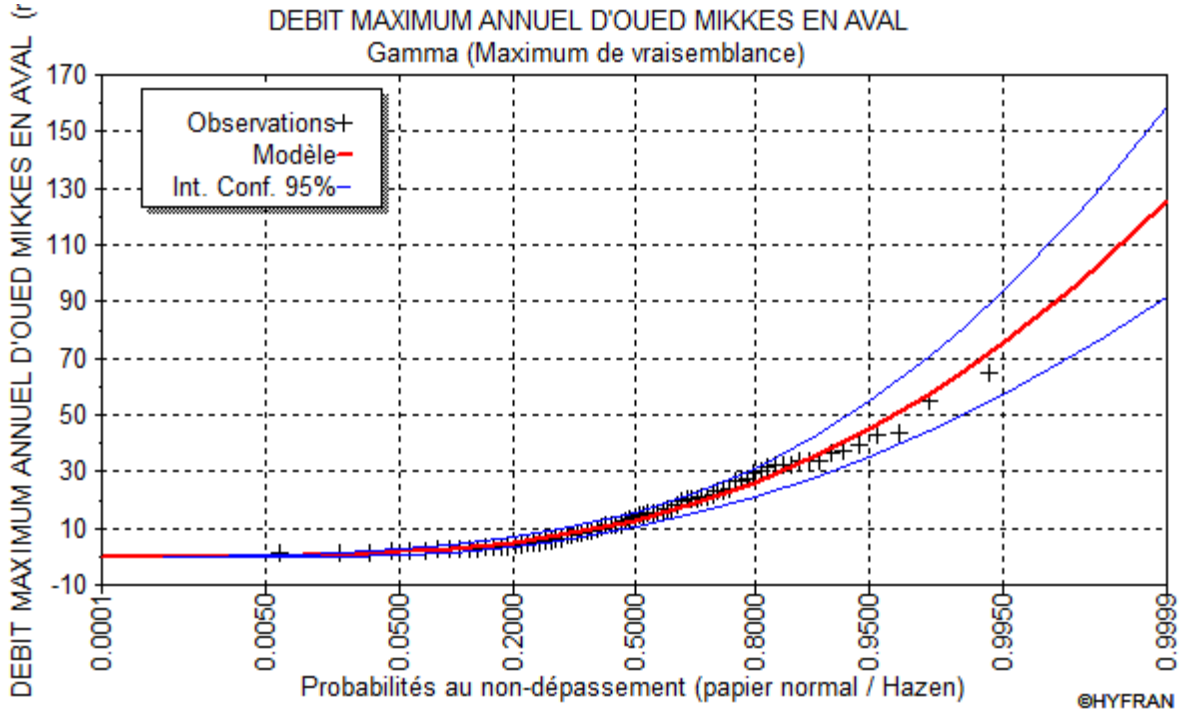


Figure 24 : Ajustement graphique de la série des débits maximums annuels à la loi de Gamma pour Mikkes

d) Ajustement à la loi de Log-Pearson III (méthode des moments)

Ajustement de la loi de Log Pearson III, c'est une loi à trois paramètres qui sont :

$$f_x(x)=\alpha^{\lambda}/x^{\Gamma}(\lambda)\ .(\ln-m)^{\lambda-1}\ e^{-\alpha(\ln x-m)}$$

Avec,

Les paramètres $\alpha\neq0$, $\lambda\geq0$ et $\Gamma(\lambda)$ fonction de gamma

La fonction de répartition est $\mathbf{F(x)=\Gamma(-\alpha(\ln x-m))\ /\Gamma(\lambda)}$

Apres avoir ajusté la série, le tableau et le graphique montrent les résultats obtenus :

Tableau 12 : Résultats et paramètres de l'ajustement à la loi de Log-Pearson type III pour Mikkes

Paramètres					Résultats			
Oued	m	α	λ	X^2	P	Degré de liberté	Nb. de classe	Nb. d'observation
Mikkes	1.901	-3.777	3.280	13.14	0.0687	7	11	77

Hypothèse :

- **H0** : L'échantillon provient d'une loi de Log-Pearson type III
- **H1** : L'échantillon ne provient pas d'une loi de Log-Pearson type III

➢ Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5%.

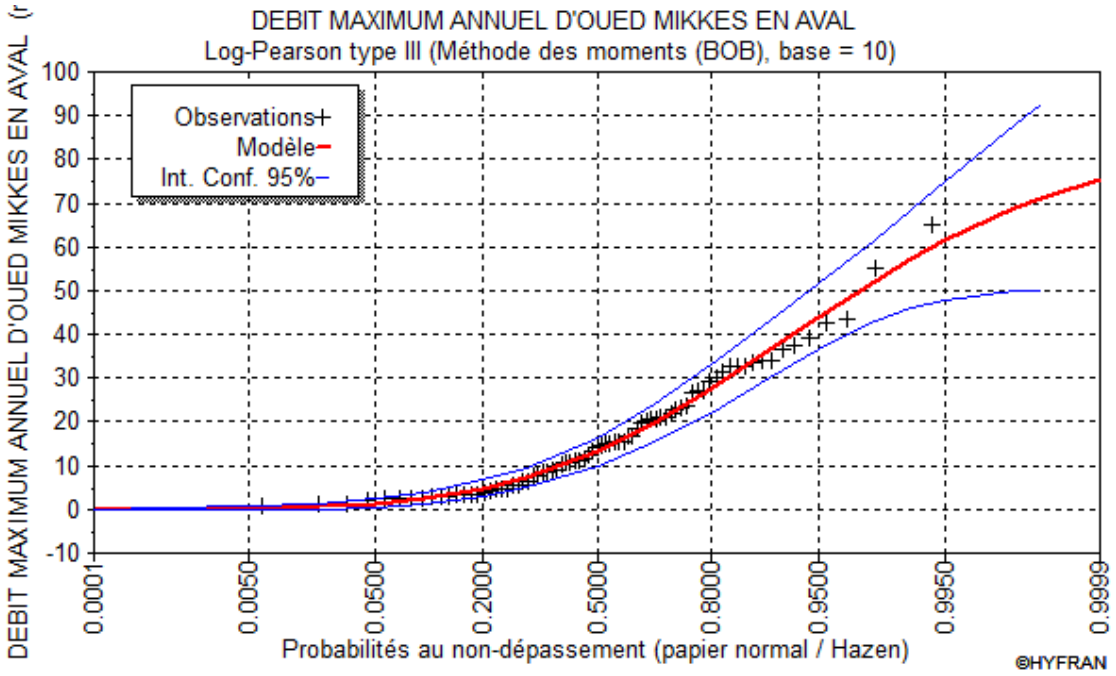


Figure 25 : graphique de la série des débits maximums annuels à la loi de Log-Pearson type III pour Mikkes

1.6. Résultats de comparaison des ajustements aux lois statistiques

Après avoir ajusté les données des débits maximums annuels par l'utilisation des déférentes lois statistiques afin d'arriver à extrapoler les quantiles pour modéliser la zone en question, selon le graphe au dissous on peut conclure que la loi Log Pearson type III (Courbe en bleu clair) c'est la loi le plus adapté aux données et le plus fiable pour l'ajustement de variable débits et particulièrement à des fin extrapolations.

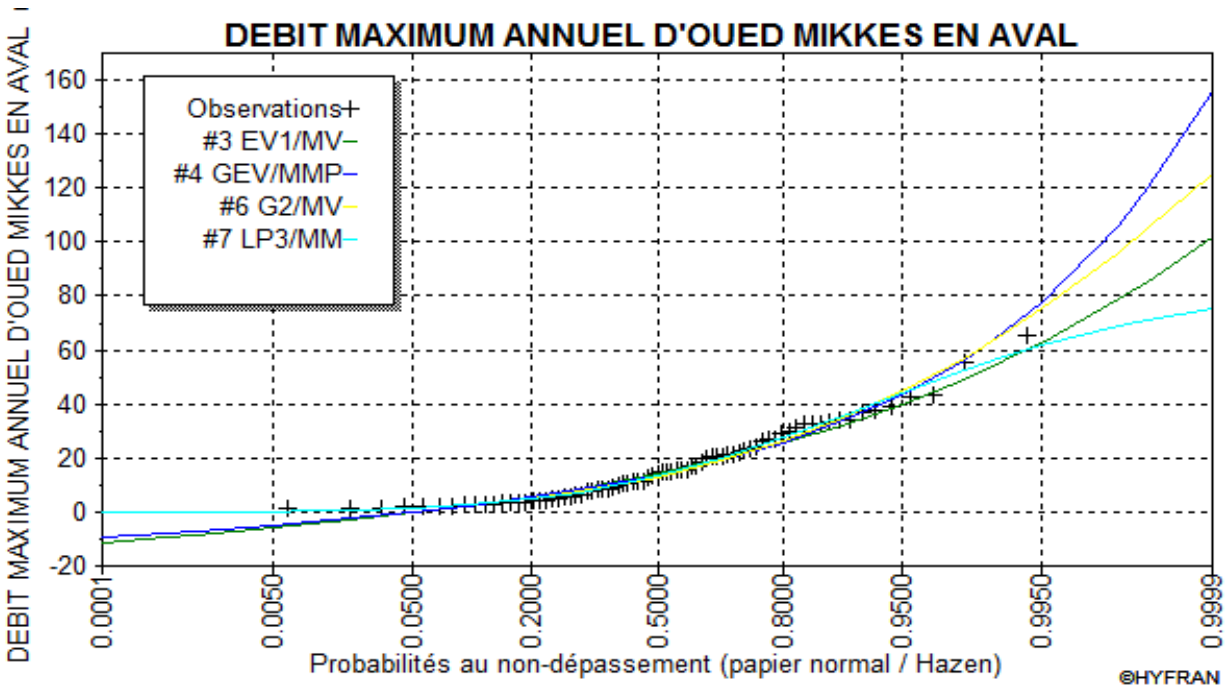


Figure 26 : Résultats de comparaison des ajustements aux différentes lois des débits maximums annuels pour Mikkes

EV1/MV : loi de Gumbel (méthode de vraisemblance)
GEV/MMP : loi de Jenkinson GEV (méthode des moments pondéré)
G2/MV : loi de Gamma (méthode de vraisemblance)
LP3/MM : loi de Log-Pearson type III (méthode des moments)

Une autre méthode est utilisée pour savoir la loi la plus adapté aux données en se basant sur les critères AIC et BIC, Ces critères sont calculés par les formules suivantes :

Critère d'information *Bayésien (BIC)*:

$$\boldsymbol{BIC} = -2\log\boldsymbol{L} + 2\boldsymbol{k}\log(\boldsymbol{N})$$

Critère d'information *d'Akaike (AIK) :*

$$\boldsymbol{AIC} = -2\log\boldsymbol{L} + 2\boldsymbol{k}$$

Avec,

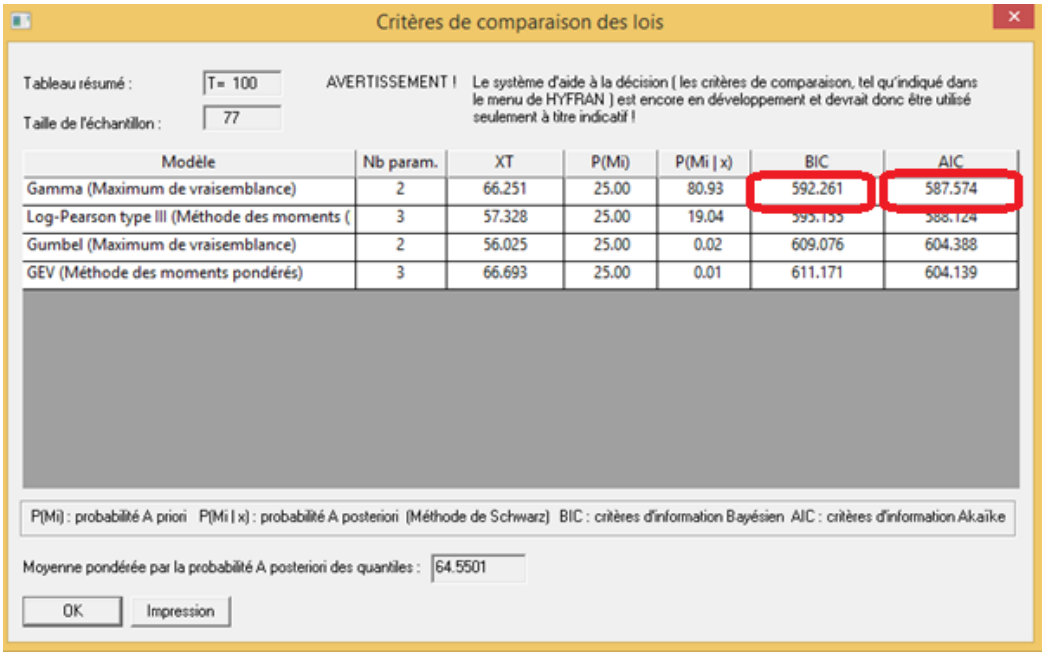
L (MV) : la vraisemblance,

K : le nombre de paramètres

N : la taille de l'échantillon.

Le principe de ces critères est : plus ses valeurs sont petites plus la loi statistique est plus adaptée à l'ajustement, chacune de ces lois utilisées sont soumises au même principe, le tableau (Tab. 13) suivant illustre les résultats de celui-ci :

Tableau 13 : Résultats de comparaison des ajustements aux différentes lois des débits maximums annuels pour Mikkes



Selon les deux méthodes, nous avons choisi la loi statistique de loi Log Pearson type. En général, les deux lois Gamma et Pearson sont mieux adaptées.

1.7. Quantiles estimés pour différentes périodes de retour

Moyenne à long terme du temps ou du nombre d'années séparant une crue de grandeur donnée d'une seconde ou d'une grandeur égale ou supérieure. Par exemple une crue dont la période de retour est de 10 ans à chaque année une chance sur 10 de se produire (on parle de crue décennale). On parle alors de crue de référence 0,1.

Les résultats des quantiles estimés pour différentes périodes de retour, au niveau d'Oued Mikkes, sont présentés respectivement dans le tableau (Tab. 14) suivant :

Tableau 14 : Résultats d'ajustement graphique de la série des débits maximums annuels de Mikkes

		Quantile X_T (m3/s) pour différentes période de retour selon les lois d'ajustement			
T (ans) période de retour	q (probabilité au non-dépassement)	gamma	log Pearson III	Gumbel	GEV
10000	0.9999	125	75.4	102	156
2000	0.9995	105	71.2	85.6	120
1000	0.999	96	68.9	78.8	106
200	0.995	75.3	61.5	62.9	77.7
100	0.99	66.3	57.3	56	66.7
50	0.98	57.2	52.3	49.1	56.4
20	0.95	45	44.1	39.9	43.7
10	0.9	35.7	36.5	32.8	34.6
5	0.8	26.1	27.5	25.4	25.8
3	0.6667	19.1	19.8	19.5	19.2
2	0.5	12.8	13.2	14.2	13.7
1.4286	0.3	7.46	7.21	8.77	8.24
1.25	0.2	5.14	4.74	5.91	5.5
1.1111	0.1	2.88	2.45	2.37	2.22
1.0526	0.05	1.67	1.33	-0.226	-0.116
1.0204	0.02	0.8	0.62	-2.86	-2.43
1.0101	0.01	0.435	0.356	-4.47	-3.81
1.005	0.005	0.208	0.207	-5.86	-4.98
1.001	0.001	-0.0374	0.0615	-8.48	-7.15
1.0005	0.0005	-0.0764	0.0369	-9.42	-7.92
1.0001	0.0001	-0.0914	0.0116	-11.3	-9.44

D'après le tableau 14), on observe que les débits pour T inférieur à 10 ans augmentent progressivement, par contre pour les grandes périodes qui sont supérieures à 200 ans, les quantiles estimés devenant plus importants.

D'âpres les résultats, on a pu conclure que la loi de GEV a donné des valeurs de débits plus importantes par rapport à la loi de Gumbel qui a donné des quantiles plus faibles.

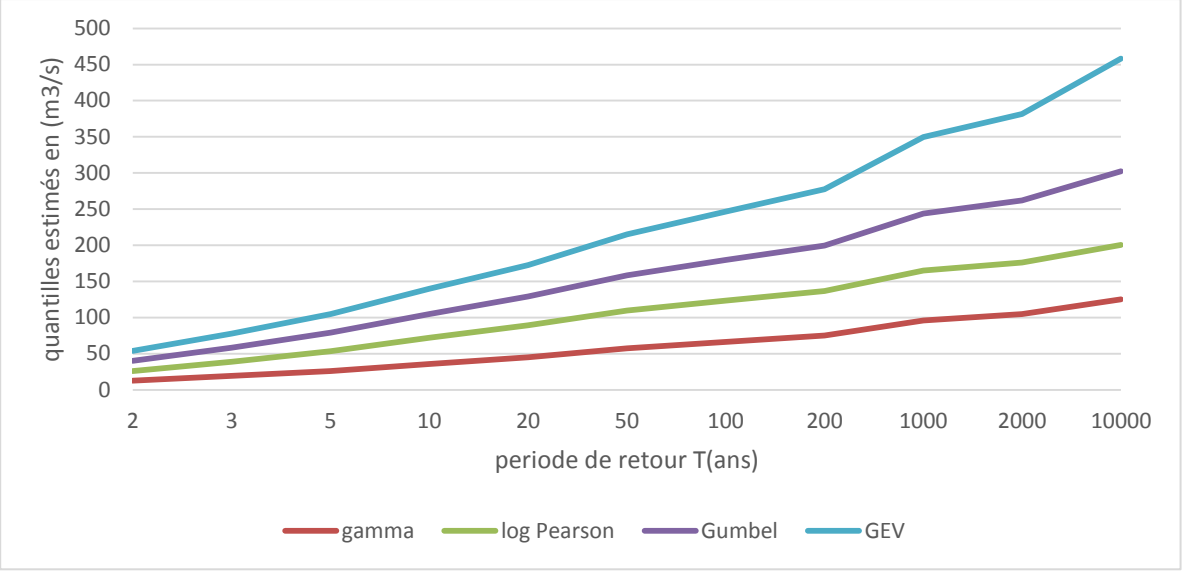


Figure 27 : Temps de retour correspondant aux débits maximums annuels de Mikkes

1.8. Débits retenus

Les débits retenus sont les débits estimés par la loi de loi Pearson, ils sont les débits qu'on va utiliser pour faire la modélisation du tronçon d'Oued Mikkes afin de déterminer les zones inondables, le tableau (Tab. 15) suivant montre les résultats retenus :

Tableau 15 : les débits retenus pour les différents périodes de retour

T (ans)	T 2	T5	T10	T20	T50	T100	T1000
Débit (m^3/s)	13.2	27.5	36.5	44.1	52.3	57.3	68.9

Conclusion

Oued Mikkes est caractérisé en générale par un régime hydrologique très simple, les analyses des débits montrent que l'eau écoulée est d'origine souterraine dans la plupart du temps, le débit se change vers l'augmentation dans la période hivernales ou la précipitation est très forte, par contre dans la périodes d'été le débit devient plus faible ce qui est causé par les pluies faibles, c'est la période d'étiage.

Dans la période des hautes eaux l'eau de pluie se partage entre le remplissage des nappes et l'écoulement, la première partie s'écoule vers le barrage de Sidi Chahed pour s'accumuler et l'autre partie alimente les sources, la lithologie du terrain de lias permet l'accumulation d'eau dans la nappe et réapparait à nouveau au niveau de la source.

Les analyses fréquentielles des débits maximum permettent l'extraction des débits de pointes de différentes périodes de retour afin d'estimer les risques extrêmes lié aux évènements hydrologiques, pour réaliser cette étude on a eu le recours à des lois statistiques de probabilités basées sur les méthodes des moments et de maximum de vraisemblance. En l'occurrence les lois Log Pearson III et Gamma, en plus de la GEV et celle de Gumbel.

Apres avoir réalisé, l'ajustement de la série, en se basant sur des critères de l'étude visuelle pour choisir la loi d'ajustement la mieux adaptée aux données, nous avons conclu que la loi de Log Pearson III est la plus efficace et la plus fiable pour l'ajustement de cette série et pour l'extrapolation des quantiles. Les résultats retenus vont nous aider pour modéliser le tronçon d'Oued Mikkes afin de délimiter les zones inondables.

CHAPITRE III: ETUDE HYDRAULIQUE DU TRONÇON D'OUED MIKKES

I. Introduction

Les dernières années, Le Maroc a connu des inondations destructives causées par des mois pluvieux intenses. Cette précipitations intenses ont abouti à l'augmentation de niveau d'eau dans les Oueds et les barrages et ont causé aussi d'importants dégâts humains et matériels qui ont eu lieu notamment en 1995 (Ourika), 1996- 1997 (plaine du Gharb), décembre 2002 (Mohammedia, El Jadida, Taza, Tétouan, Settat, Berrechid), 2009-2010 (plaine du Gharb, Rabat, Er-Rachidia, Missouri, IminTanout, Tanger, Nador, Casablanca, Khenifra, Tétouan, Agadir, Ait Melloul, Essaouir, et dernièrement cette année 2016 (Er-Rachidia ,Taroudannt, Ouarzazate),

Les niveaux d'eau sont parfois un élément primordial pour la prévision des inondations, la gestion des cours d'eau et des plaines inondables, l'acquisition d'un model hydraulique plus réaliste, nous permet de calculer la hauteur d'eau atteinte par l'écoulement dans des conditions spécifiques et d'élaborer un plan d'aménagement urbain qui vise à lutter contre les inondations et la conservation du sol.

Dans cet égard, on a décidé de faire une étude hydraulique du bassin versant du Mikkes, dont l'objectif est d'évaluer et intégrer tous les paramètres fondamentaux, tels que la géométrie, le débit, et les conditions aux limites pour avoir un model hydraulique plus proche de la réalité. Ce travail est réalisé par une combinaison de plusieurs logiciels HEC-RAS, HEC-GEORAS et ARC GIS.

II. REALISATION DU MODELE HYDRAULIQUE D'OUED

1. Les étapes d'élaboration du modèle hydraulique

Pour faire la simulation hydraulique d'un écoulement que soit permanent ou non, en utilisant **HEC RAS**, on doit procéder les étapes d'élaboration qu'elles commencent par :

- Création du projet HEC RAS,
- Préparation des données topographiques (création de la géométrie de l'Oued),
- Choix des paramètres hydrométriques et conditions aux limites,
- Simulation hydraulique.

1.1. Création du projet HEC RAS

Après l'ouverture de logiciel HEC RAS, la barre de menu comprend toutes les fonctions, le menu file permet d'ouvrir et créer et sauvegarder un projet qu'on veut traiter.

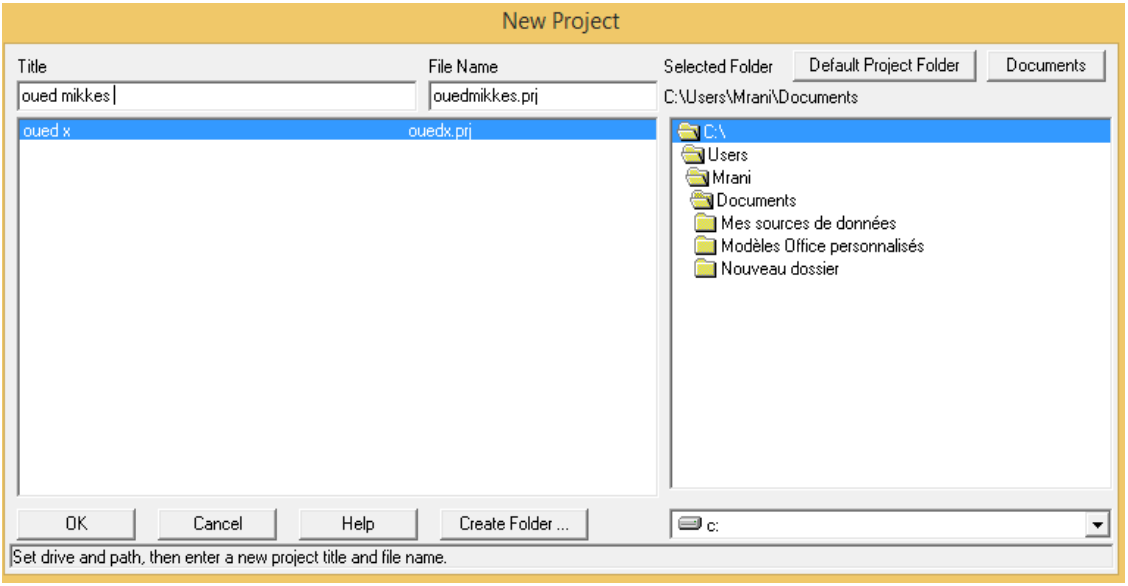


Figure 28 : la création de nouveau projet avec HEC RAS

1.2. Préparation des données topographiques (Création de la géométrie de l'Oued)

L'étape de la préparation des données topographique c'est un processus qui consiste à extraire la géométrie du tronçon étudié en se basant sur le modèle numérique du terrain (MNT). Un dossier des données géométriques est nécessaire au modèle hydraulique, la saisie manuellement des donnes topographique c'est une étape fastidieuse et demande beaucoup du temps.

La qualité de la modélisation dépend étroitement de la qualité de données topographiques, c'est pour cela, la précision des mesures et la résolution sont deux facteurs indispensables pour avoir une qualité fiable de données géométriques.

Dans cet égard, la préparation des données géométriques est réalisé à l'aide de L'ARC GIS, le model MNT TIN (Fig. 33) obtenu est considéré le meilleur fond topographique pour le modèle hydraulique HEC RAS afin de bien représenter le terrain à grande échelle. Après la conversion des données en format MNT TIN, la prolongation HEC GEO RAS complète la préparation de dossier par une série de thèmes de RAS qui sont : la ligne centrale de jet **(Stream Centerline),** les lignes centrales de chemin d'écoulement **(Main Channel Banks)**, les lignes de berges **(Flow Path Centerlines)**, les profils en travers **(Cross-Sectional CutLines)**, le modèle de rugosité **(Land Use),** le levée d'alignement***(Levee Alignment),*** les régions inefficaces d'écoulement **(Ineffective Flow Areas)** et les zones de stockage (**Storage Areas).**

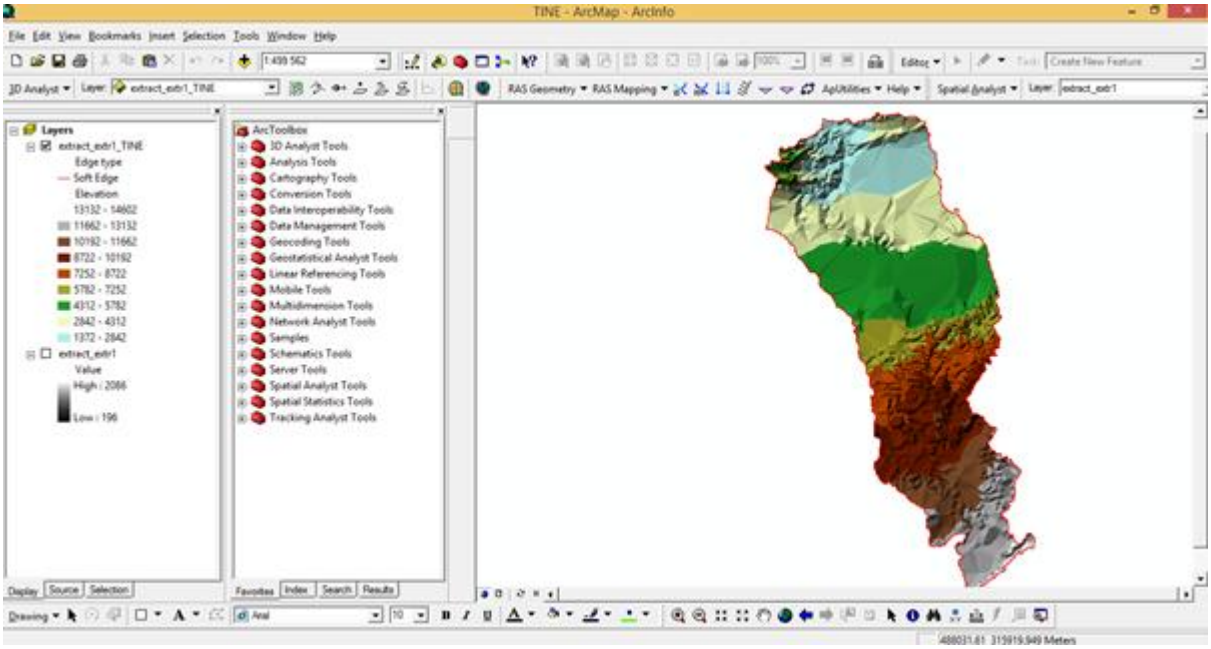


Figure 29 : Création du MNT TIN du bassin versant d'oued Mikkes

Avant que HEC GEORAS complète la préparation afin de former le dossier de la géométrie pour HEC RAS, le profil en travers tracé sur le MNT TIN doit respecter certaines règles pour qu'il soit représentatif (Fig. 34):

- Les profils doivent être perpendiculaires à la direction de l'écoulement des eaux.
- Ils ne doivent pas se croiser, recouper toute la plaine d'inondation et décrire le profil en long du cours d'eau.
- Ils doivent encadrer les ouvrages structurants du cours d'eau (ponts, seuils…).
- Ils doivent prendre en compte les modifications géomorphologiques des lits mineur et majeur tel qu'un élargissement, un méandre ou une contraction.

La figure suivante représente les principaux thèmes de Ras crées par L'HEC GEO RAS sous l'ARCGIS et à l'aide de MNT TIN.

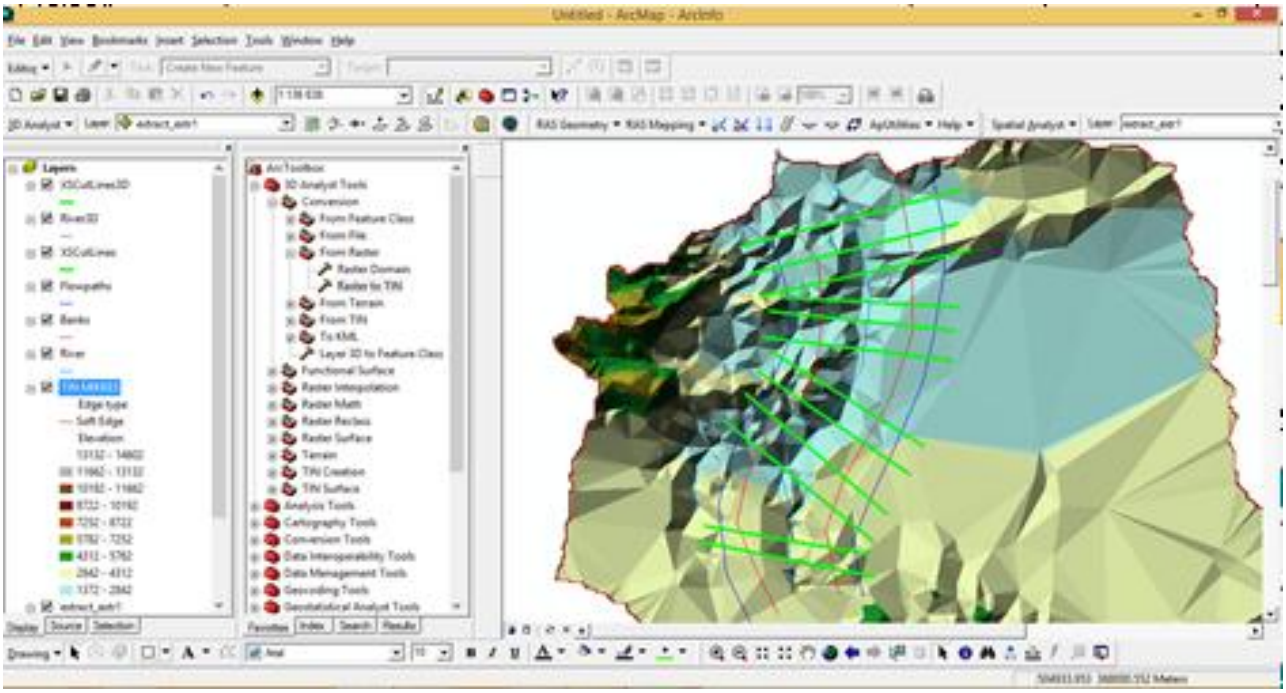
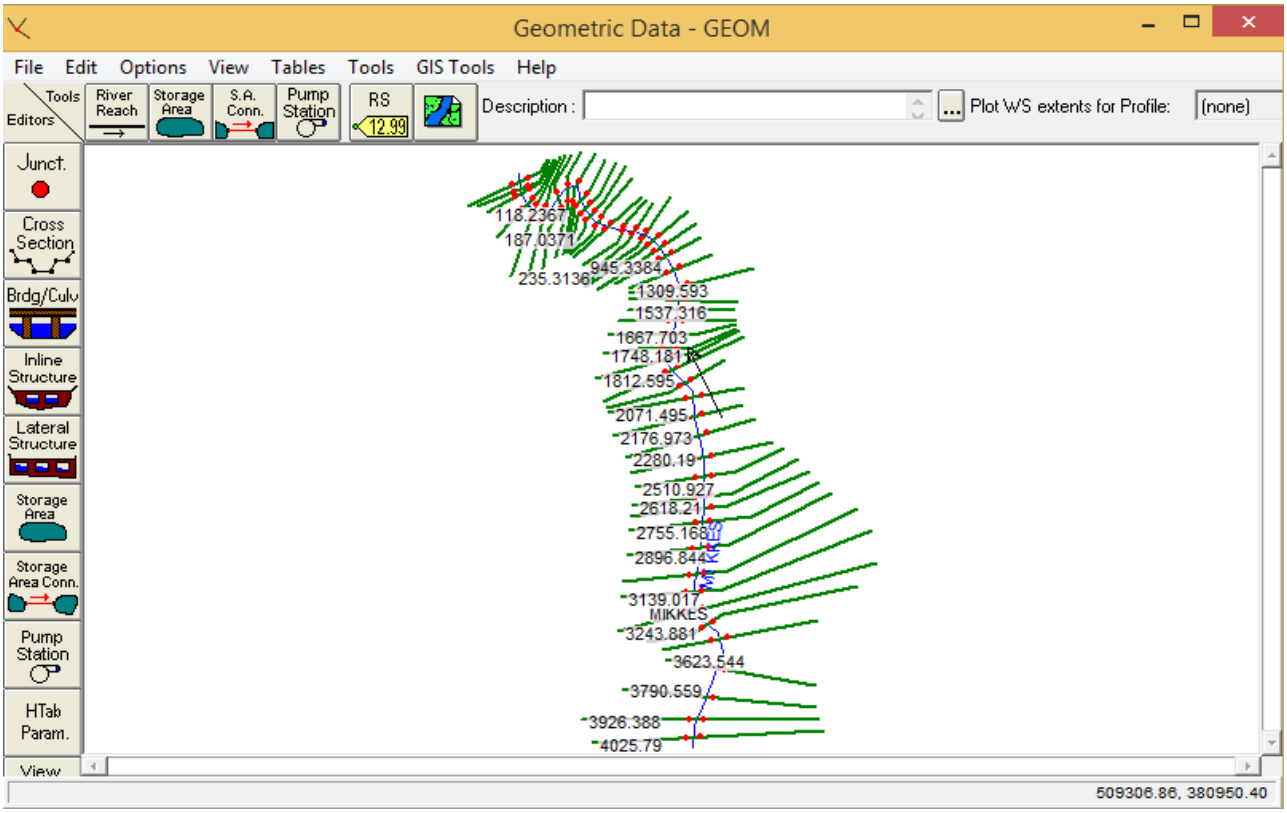


Figure 30 : principaux thèmes de Ras crées par L'HEC GEO RAS

Une fois le dossier d'importation est près, l'HEC Ras l'exporte grâce la commande geometric data et fait apparaitre la fenêtre suivante (Fig. 35) :



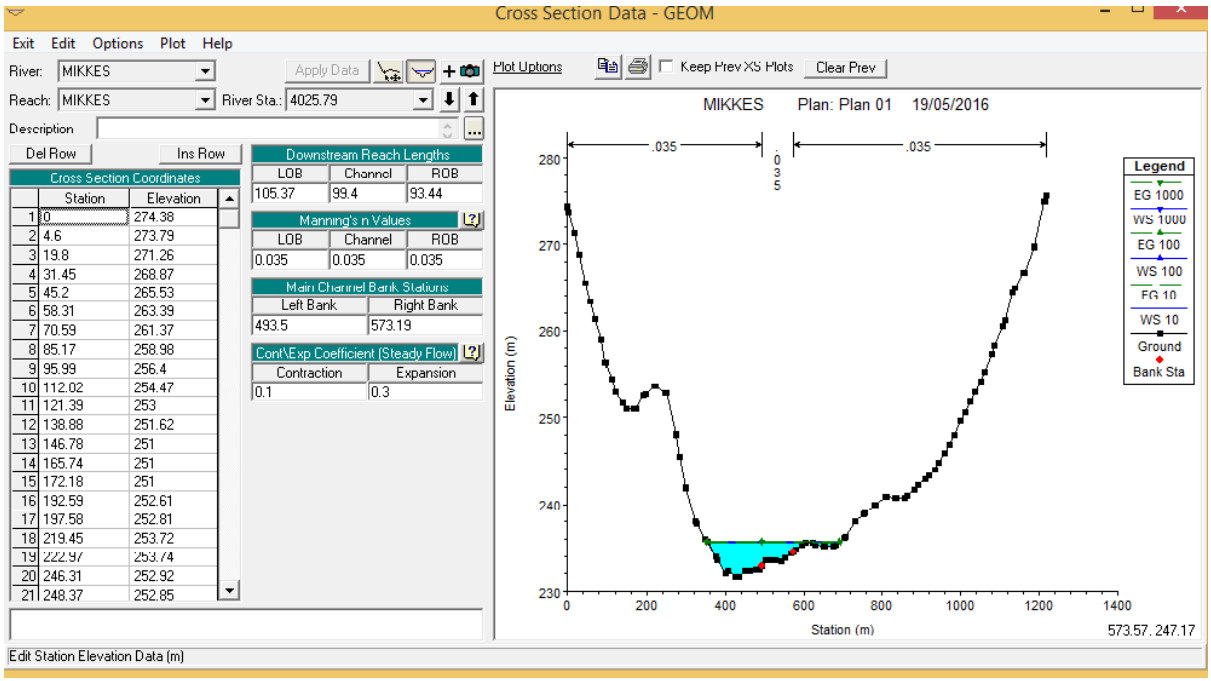


Figure 31 : La géométrie d'oued Mikkes dans le logiciel HEC RAS

1.3. Choix des paramètres hydrométriques et conditions aux limites

L'étape qui suit la préparation de la géométrie c'est de spécifier les débites utilisés (Fig. 36)pour calculer les profils d'écoulements .les valeurs des débits obtenus par l'ajustement de la loi de Gumbel qui correspondent aux périodes de retours **10, 100, 1000 ans**, vont entrer aux cases correspondantes et considérés valides sur tout le tronçon de la rivière.

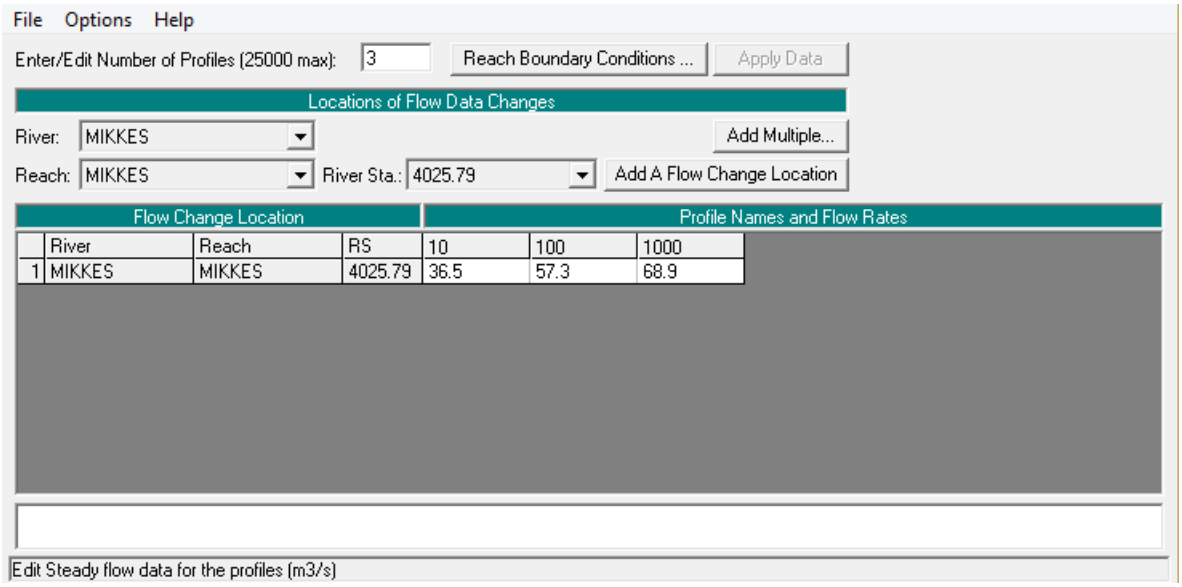


Figure 32 : Fenêtre des données hydrométriques

Après avoir introduit tous les débits correspondants aux profils d'écoulement, on doit définir les conditions aux limites, si l'écoulement est torrentiel (supercritique) les conditions aux limites vont être en amont, si l'écoulement et fluvial (infracritique) les conditions aux limites vont être en aval.

Le HEC-RAS offre la possibilité de faire entrer comme conditions aux limites, une hauteur d'eau connue, une profondeur critique, une pente normale du point en amont ou en aval selon le régime d'écoulement ou une courbe d'estimation (différentes hauteurs d'eau et les débits correspondants).

Pour notre cas, on a introduit la valeur de **0.004 m /m** comme une pente normale évaluée à l'amont du bassin de Mikkes, la figure (Fig. 37) suivante indique ces conditions aux limites.

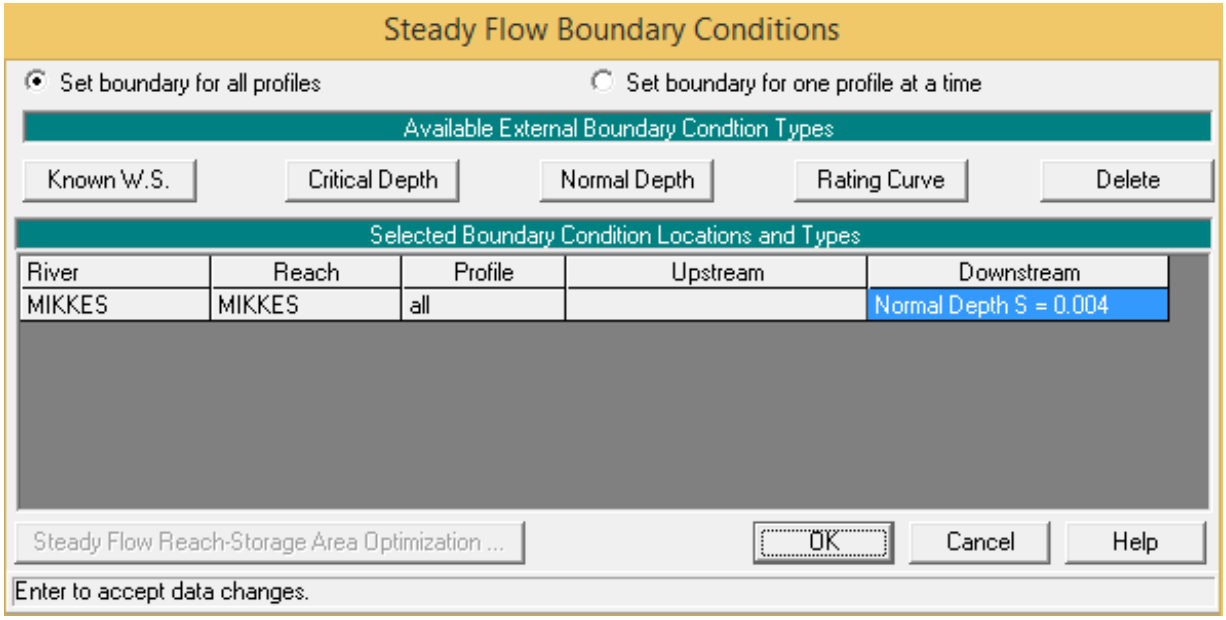


Figure 33 : Fenêtre des conditions aux limites

1.4. Simulation hydraulique

Après avoir définit la géométrie, les données hydrométriques et les conditions aux limites nécessaires à la simulation et après avoir enregistré les fichiers correspondants, on peut passer à la simulation hydraulique en utilisant le bouton **Performa steady flow simulation** pour le régime permanent. Dans notre cas on obtient la fenêtre suivante :

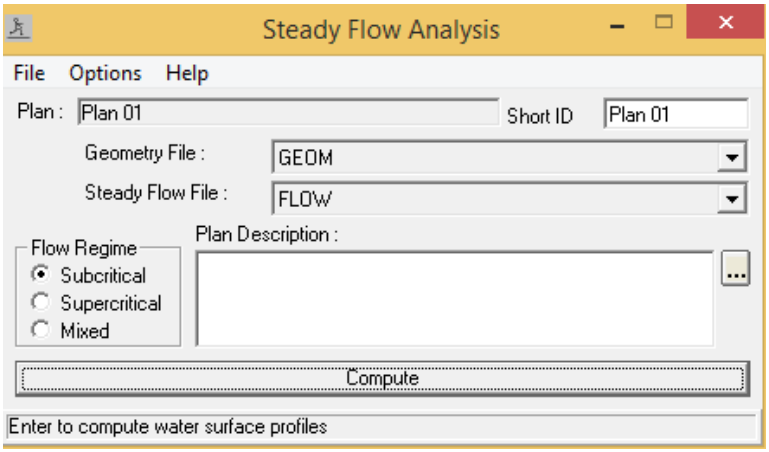
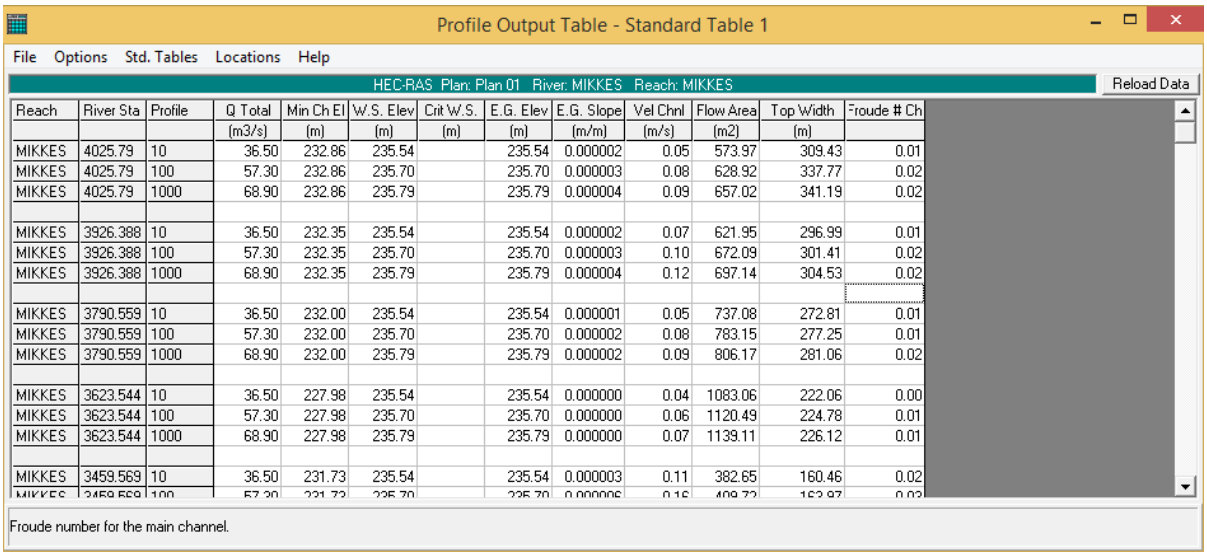


Figure 34 : Fenêtre de simulation pour le régime permanent

Après avoir désigné le type de régime adéquat, on clique sur la barre Compute pour faire la simulation (Fig. 38), le logiciel enregistre automatiquement tous les fichiers nécessaires, dans le cas où il y a un problème de simulation à cause de la manipulation ou la saisie des données, on doit rectifier les erreurs et refaire les calculs.

III. VISUALISATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

Après la simulation, les résultats obtenus peuvent être affichés sous formes des graphes (forme de niveau d'eau de chaque période de retour sur les profils, une vue de 3D et la courbe de tarage) ou des tableaux, la (Fig. 39) suivante illustre les résultats sous forme de tableau :



Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Ch
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
MIKKES	4025.79	10	36.50	232.86	235.54		235.54	0.000002	0.05	573.97	309.43	0.01
MIKKES	4025.79	100	57.30	232.86	235.70		235.70	0.000003	0.08	628.92	337.77	0.02
MIKKES	4025.79	1000	68.90	232.86	235.79		235.79	0.000004	0.09	657.02	341.19	0.02
MIKKES	3926.388	10	36.50	232.35	235.54		235.54	0.000002	0.07	621.95	296.99	0.01
MIKKES	3926.388	100	57.30	232.35	235.70		235.70	0.000003	0.10	672.09	301.41	0.02
MIKKES	3926.388	1000	68.90	232.35	235.79		235.79	0.000004	0.12	697.14	304.53	0.02
MIKKES	3790.559	10	36.50	232.00	235.54		235.54	0.000001	0.05	737.08	272.81	0.01
MIKKES	3790.559	100	57.30	232.00	235.70		235.70	0.000002	0.08	783.15	277.25	0.01
MIKKES	3790.559	1000	68.90	232.00	235.79		235.79	0.000002	0.09	806.17	281.06	0.02
MIKKES	3623.544	10	36.50	227.98	235.54		235.54	0.000000	0.04	1083.06	222.06	0.00
MIKKES	3623.544	100	57.30	227.98	235.70		235.70	0.000000	0.06	1120.49	224.78	0.01
MIKKES	3623.544	1000	68.90	227.98	235.79		235.79	0.000000	0.07	1139.11	226.12	0.01
MIKKES	3459.569	10	36.50	231.73	235.54		235.54	0.000003	0.11	382.65	160.46	0.02

Figure 35 : Affichage des résultats de simulation sous forme d'un tableau détaillé

1. Ligne d'eau

La ligne d'eau représente une vue en profile de tronçon d'étude avec le niveau et la surface d'eau de l'oued et le niveau d'eau de chaque période de retour. Dans notre cas la différence entre les niveaux des périodes de retour n'est pas bien visible, la figure suivante montre l'absence de grande différence entre les niveaux de périodes de retour, la (Fig. 40) illustre les résultats obtenus concernant la ligne d'eau :

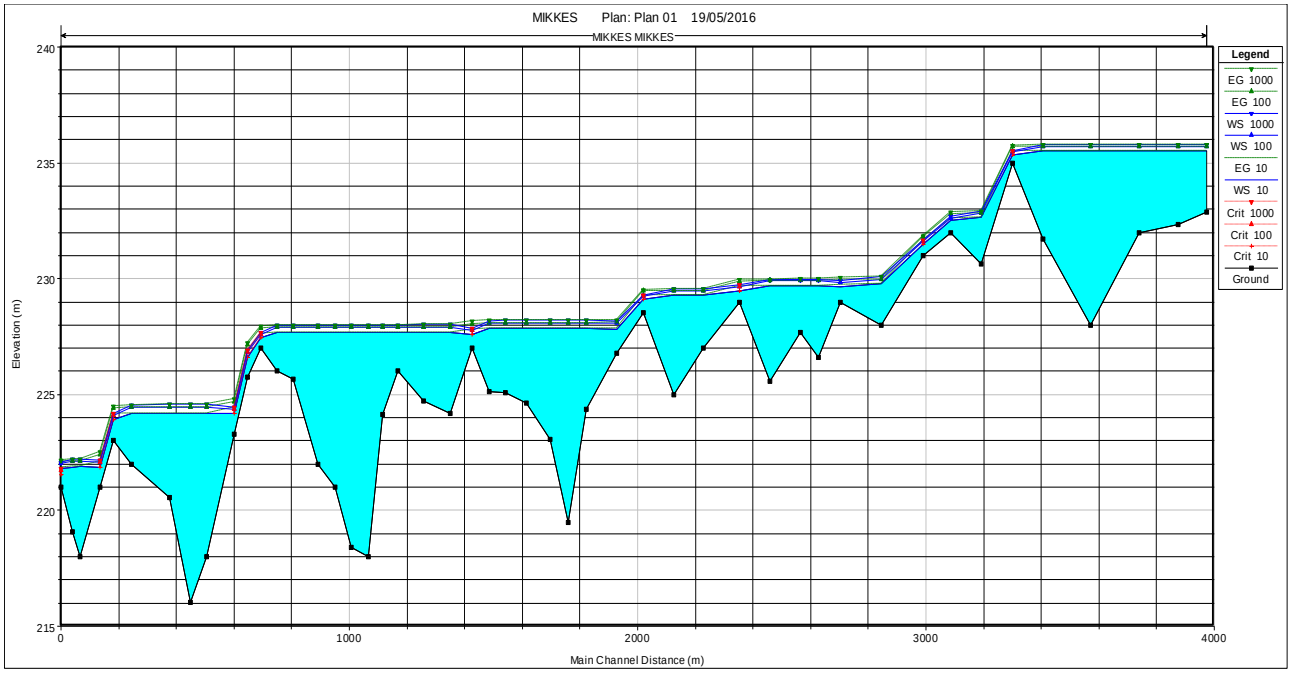


Figure 36 : Le profil en long du tronçon modélisé d'Oued Mikkes

2. Vue de trois dimensions du tronçon modélisé

La vue en **3D** (Fig. 41) permet de déterminer les points de débordement d'eau toute au long du tronçon étudié mais il ne permet plus de donner des informations sur les zones inondables, ce qui détermine les zones inondables c'est le logiciel ARC GIS à travers l'extension HEC géo ras, celui-ci donne seulement ou il y a débordement d'eau d'une telle période de retour.

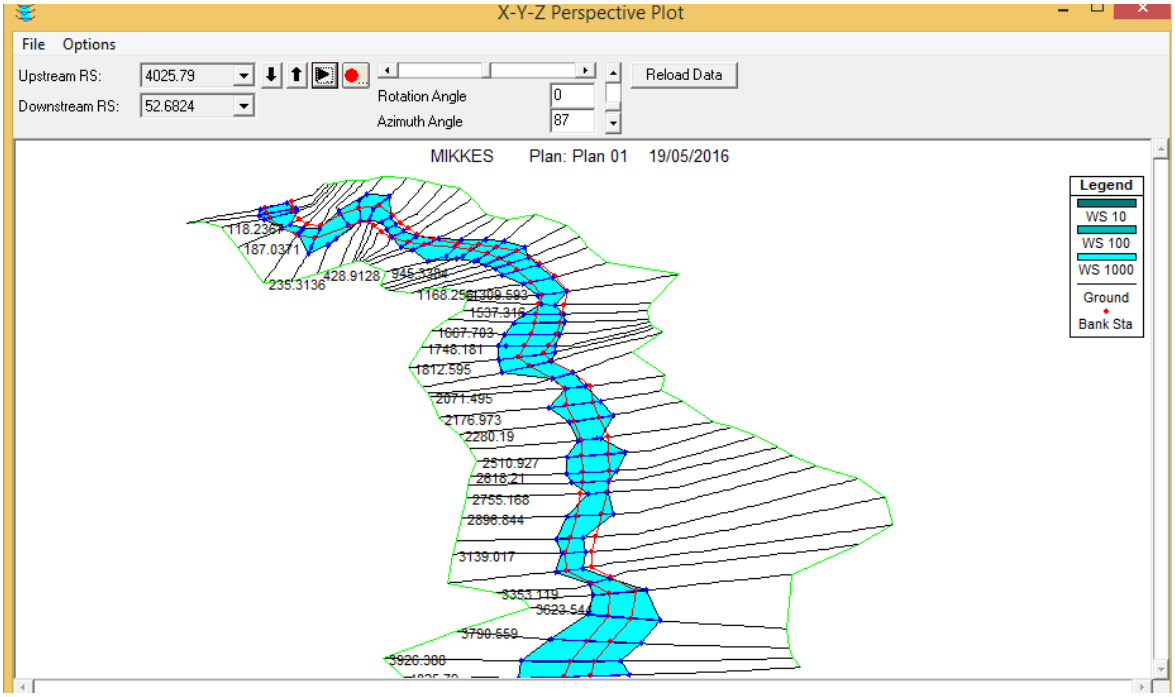


Figure 37 : Vue 3D du tronçon modélisé

D'après la (Fig. 41), le débordement généralement affecte tout au long du tronçon étudié, il est causé essentiellement par la pente surtout que le bassin étudie est fait partie de causse el Hajeb-Ifrane exactement l'amont de ce dernier.la concentration d'eau sera importante en fonction de l'altitude.

3. Vitesse d'écoulement

La (Fig. 42) représente la variation de la vitesse d'écoulement d'eaux pour chaque période de retour en fonction de la distance à partir de l'exutoire sur la bordure gauche, au centre et la bordure droite de la rivière.

D'après le graphe (Fig. 42) on observe presque la même allure pour tous les niveaux d'eau, il y a une alternance de la variation de vitesse ; parfois la vitesse d'écoulement augmente et d'autre diminue, on se déplaçant de l'amont vers l'aval du tronçon, on observe que la vitesse deviennent plus importante à l'exutoire celle-ci provient à la variation de la topographie de la zone étudiée. On observe aussi que la vitesse varie entre la droite et la gauche de tronçon ; elle est plus importante au niveau de la gauche toute en long de la rivière.

En général, La vitesse d'écoulement influence directement sur l'importance de l'érosion et la quantité du volume transporté par les eaux de crue.

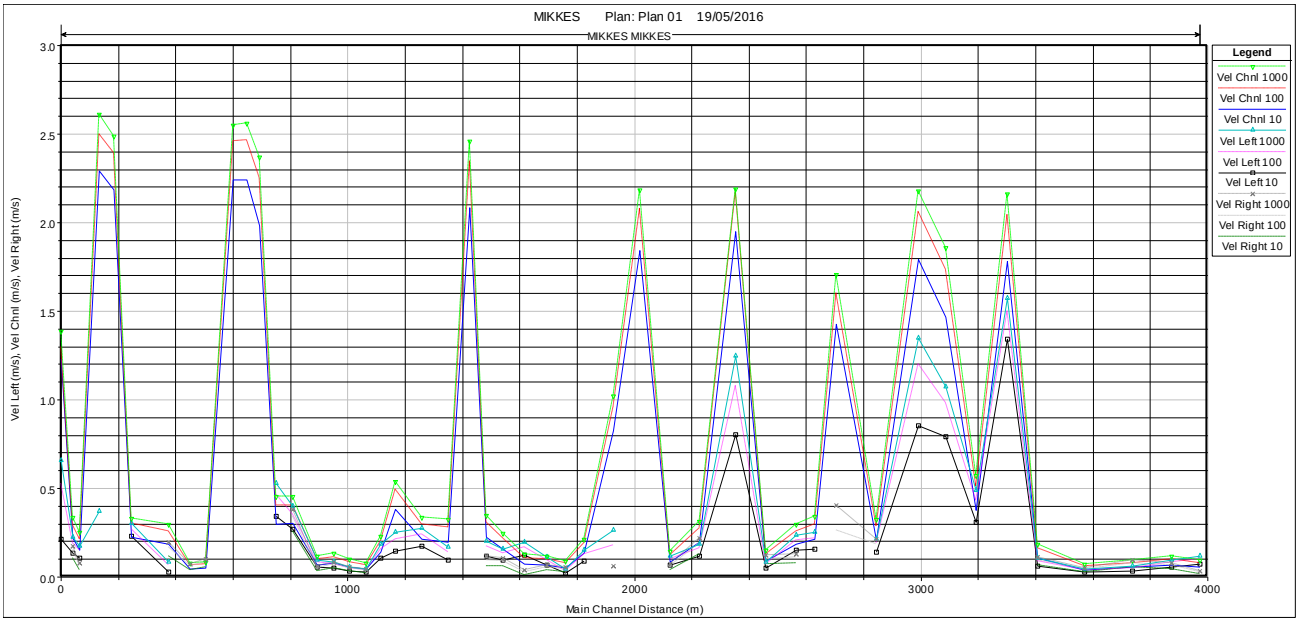


Figure 38 : La variation de la vitesse d'écoulement en fonction de la distance à partir de l'exutoire

4. Restitution de la courbe de tarage

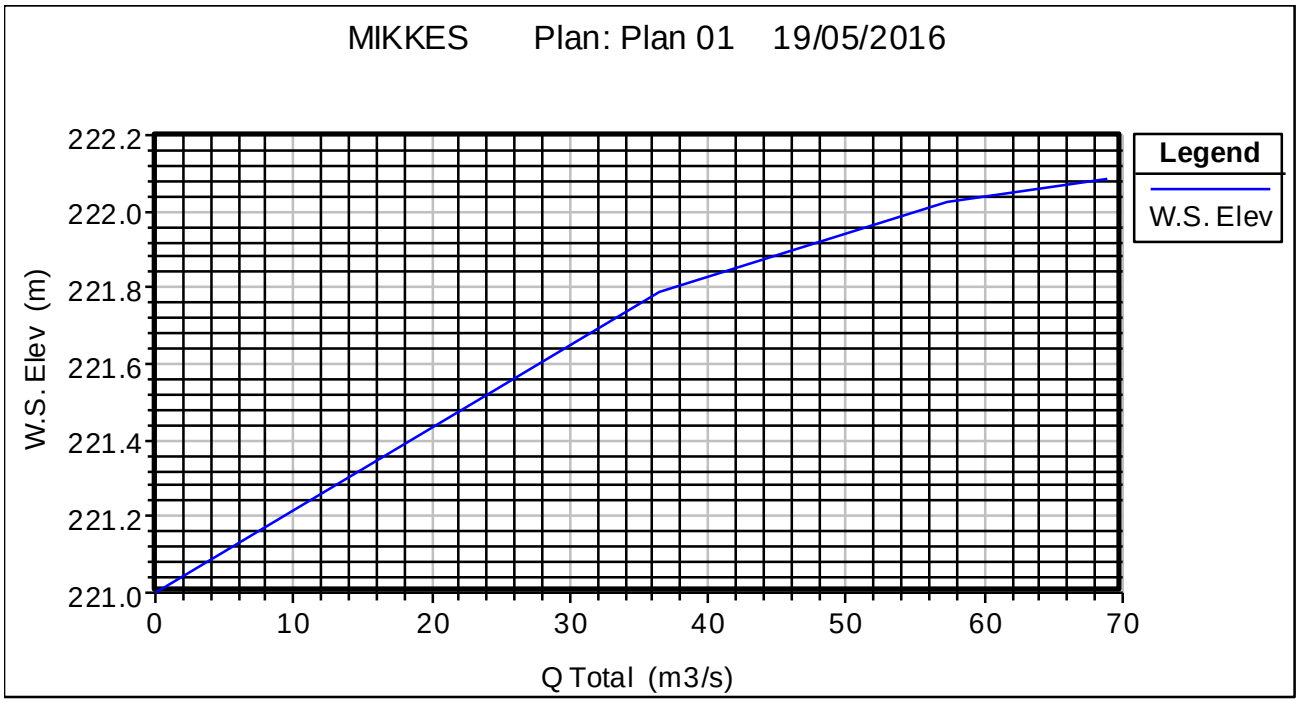


Figure 39: Courbe de tarage du tronçon modélisé d'Oued Mikkes

D'après (Fig. 43) on observe que la hauteur d'eau augmente en fonction de l'augmentation de débit.

IV. CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES DANS LE TRONCON MODELISE

Lorsque la simulation est bien effectuée, on peut exporter les résultats vers l'ARC GIS grâce à l'extension de HEC GEO RAS dont l'objectif de délimiter les zones inondables, la (Fig. 44) représente la délimitation finale après l'exportation du dossier de simulation :

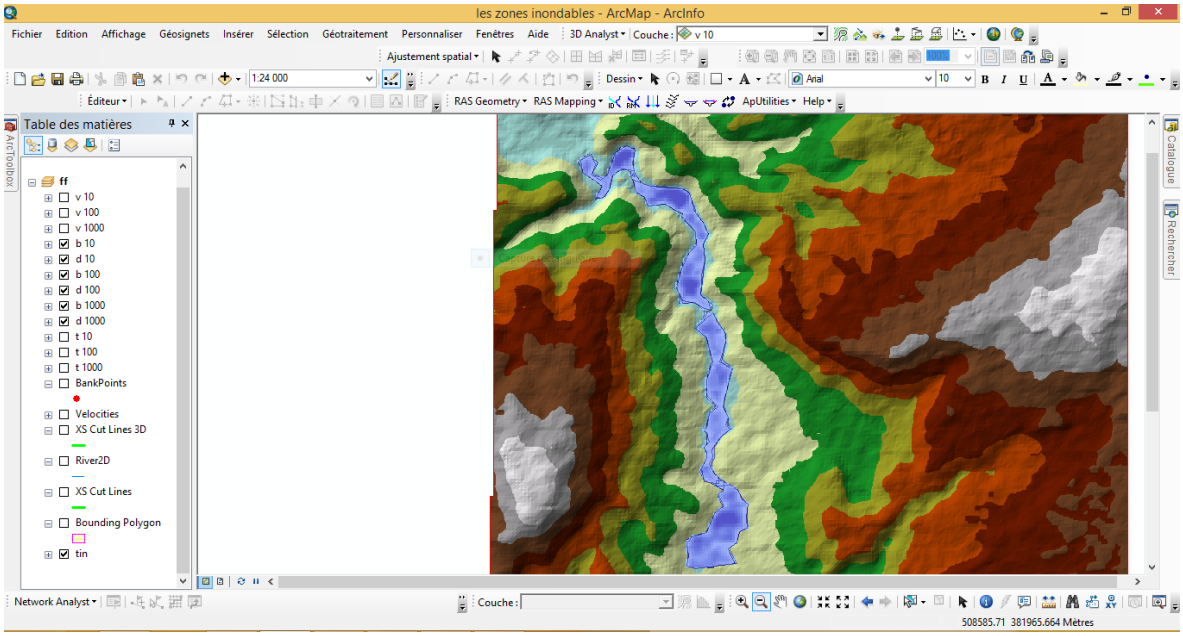


Figure 40 : Tâches inondables d'après un débit de fréquence milléniale

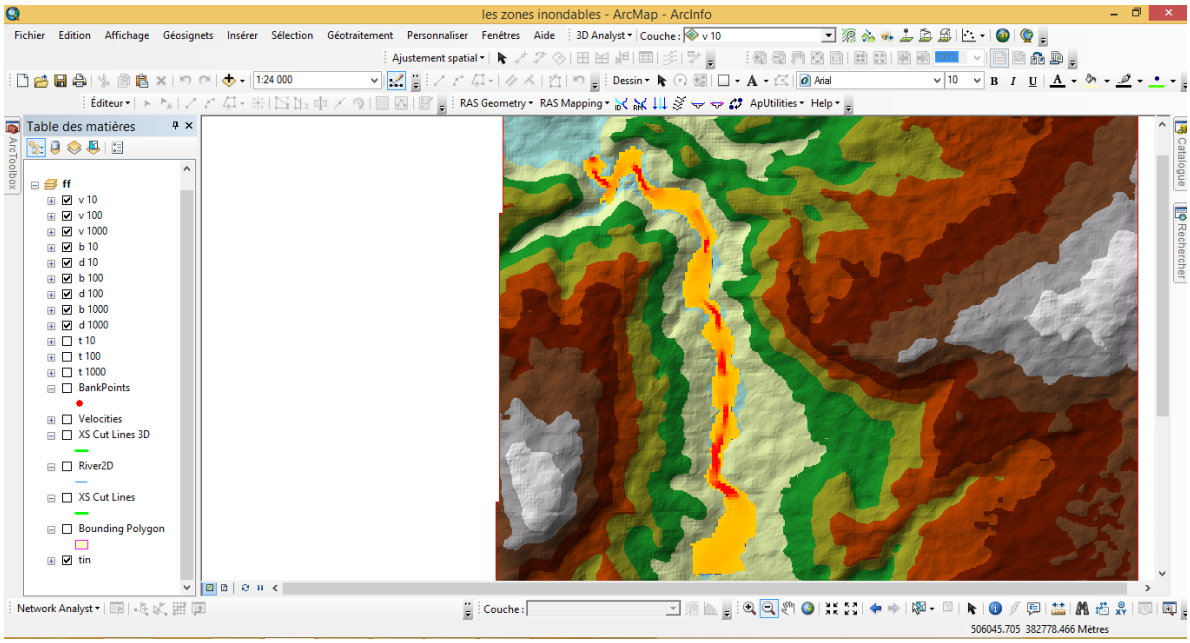
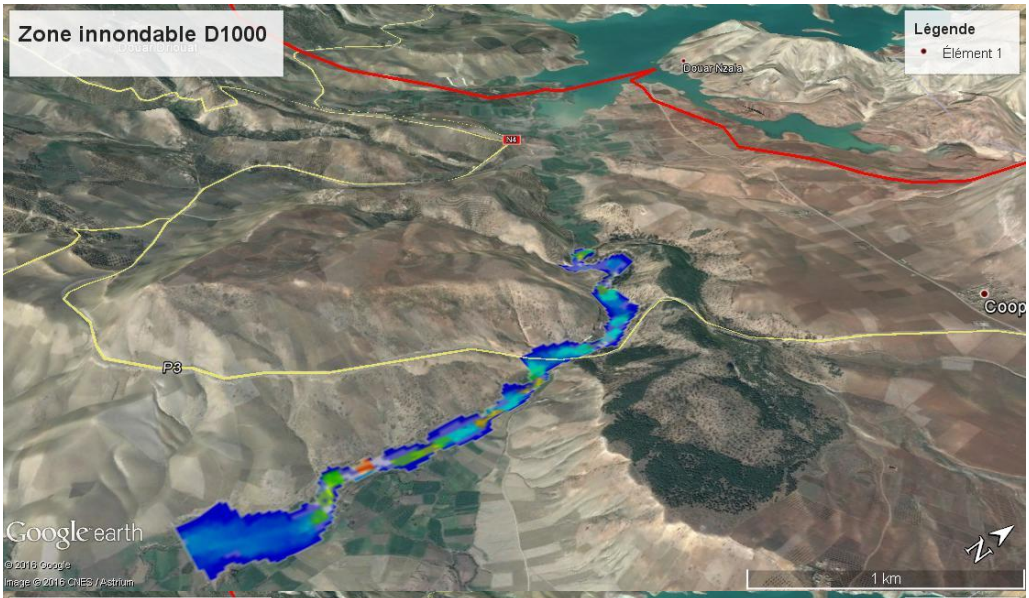
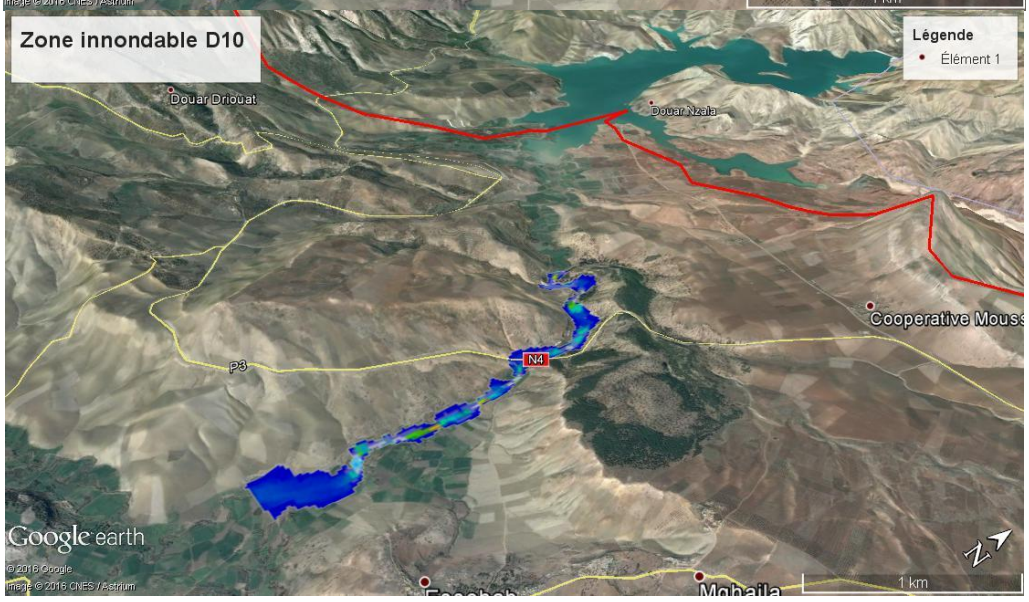


Figure 41 : Carte de la vitesse d'écoulement pour les différents débits prévenus

Une fois les taches inondables et la vitesse d'écoulement sont identifiées pour les différents débits prévenus, l'arc gis va classifier et organiser leurs couches thématiques pour faire extraire à la fin la carte des zones inondables tout au long du tronçon d'oued Mikkes, les figures suivantes représentent les zones inondables pour les trois profils :


Zone innondable D1000
Légende
Élément 1
Douar Nzala
N4
P3
Google earth
1 km

Zone innondable D100
Légende
Élément 1
Douar Nzala
N4
P3
Google earth
1 km


Zone innondable D10
Légende
Élément 1
Douar Driouat
Douar Nzala
Cooperative Mouss
P3
N4
Google earth
1 km

Conclusion

Dans La modélisation par HEC RAS, on a adopté à l'écoulement permanant de régime fluvial, ce choix est bien justifié puisque l'écoulement non permanant demande des données spécifiques et qu'elles sont entièrement manquantes, ainsi que le tronçon étudié est fait partie de la plaine de Saiss (altitude comprise entre 318 m 400m et sur une distance d'environ de 4.5km)

Normalement, les zones inondables par approche de la modélisation hydraulique augmentent avec la progression de débit.la zone inondable change depuis le débit décennale jusqu'à la crue millénial. Mais notre cas, on n'observe pas de grande différence, peut être due à la topographie de la zone. L'étude préventive signale que la zone étudiée ne pose plus des problèmes liés à l'inondation.

CONCLUSION GENERALE

Le bassin versant de Mikkes a des caractéristiques physiques spécifiques telles que la forme qui est allongée, une altitude moyenne de 1300m, le cours d'eau principale a plusieurs affluents qui sont Oued Jdid et Oued Atchane …

L'étude hydrologique a permet de déterminer le type de régime hydrologique du bassin, Mikkes est caractérisé par un régime simple, les eaux d'écoulement ne sont pas toujours d'origine météorique, la nappe captive qui caractérise la plaine de Saiss au centre de bassin alimente les écoulements superficiel.

La modélisation hydraulique réalisé par HEC RAS a permet de déterminer les zones inondables du tronçon étudié et les lignes de débordements des eaux.

Les résultats obtenus peuvent servir aux décideurs d'élaborer des plans d'aménagement spécifiques à la zone étudiée pour lutter contre les inondations probables et sensibiliser les populations concernées par les zones le plus risquées.

Parmi les solutions proposées pour lutter contre l'inondation lors des crues de l'oued Mikkes sont : de diminuer l'imperméabilité des sols, Pour cela il faut implanter un maximum de zones, de construire des obstacles pour dévier l'eau de ruissellements vers barrage Sidi Echahed (mur en maçonnerie, mur en gabion …) et en arrêtant d'urbaniser dans les zones inondables.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BACHI MOHAMED (2011) : problématique du risque inondation en milieu urbain ; cas de l'agglomération de sidi bel Abbes,), Mémoire de fin d'études de Master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, 128pages.

BARGACH KAOUTAR (2011) : Les déformations plio-quaternaires dans la partie frontale de la chaîne du Rif (Rides prérifaines, et bassin du Saïs) un exemple de la tectonique en coins expulsés, thèse de doctorat, faculté des sciences rabat, 229 pages.

CHEIKH SIDI EL LKHAIR (2013) : Délimitation des zones inondables par l'utilisation combiné du logiciel HEC-RAS et HEC GEORAS cas du centre « Ain Jemaa », Mémoire de fin d'études de Master, Faculté des sciences et de techniques Fès, 97pages.

EL HAMDANI MAJDA (2013) : Etude Hydrologique du Bassin Versant de L'Oued Mikkès, Mémoire de fin d'études de Master, Faculté des sciences et de techniques Fès, 84 pages.

ESSAHLAOUI.AL (2010): Interactions eaux de surface–eaux souterraines: bassin versant de l'Oued Mikkes (Maroc), Hydrological Sciences Journal, p 1-15.

GUIDE HEC-RAS (2005*):* Gestion des ressources hydriques. Université du Québec, École de technologie supérieure. Département de Génie de la construction, 19pages.

MERIAM LAHSAINI (2011) : étude et modélisation des crues du tronçon urbain de l'oued aggay, ville de Séfrou, Mémoire de fin d'études de Master, Faculté des sciences et de techniques Fès, 121pages.

MOURJANE Mohammed (2010) : Modélisation hydraulique de la vallée du tronçon urbain d'Oued Jeouna (Taza, Maroc), Mémoire de fin d'études de Master, Faculté des sciences et de techniques Fès, 83pages.

SITES WEB

http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/annexes/AnalFrequ.html

http://www.glossaire.eaufrance.fr/concept/p%C3%A9riode-de-retour-d'une-crue

ANNEXES 1

APERCU SUR **LOGICIEL** HEC-RAS

1. Présentation du modèle HEC-RAS

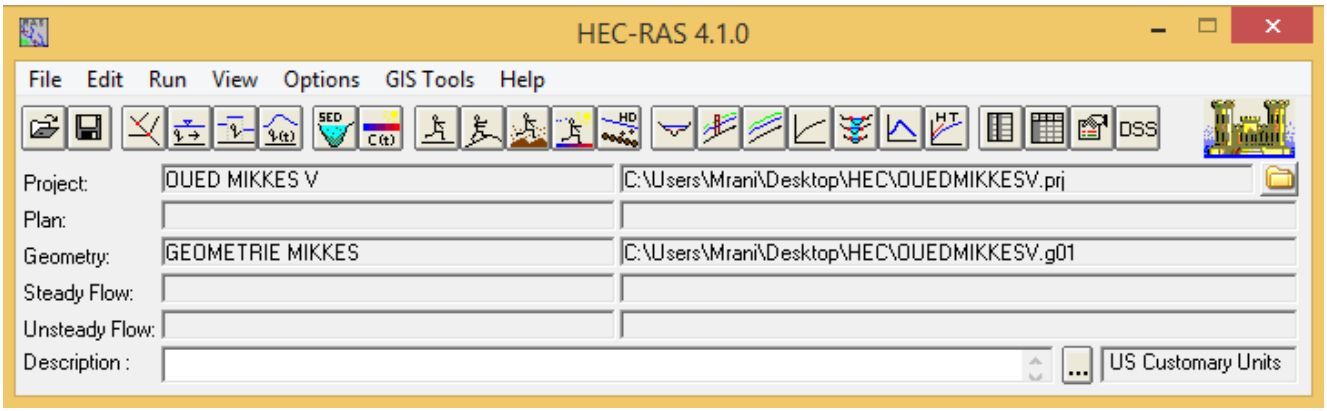


Figure 1 : interface de logiciel HEC-RAS 4 .1 .0

HEC-RAS est un logiciel de modélisation hydraulique destiné à simuler l'écoulement dans les cours d'eau et les canaux(Hydrologic Engineering Centers River Analysis System) (Système d'analyse des rivières du centre d'ingénierie hydrologique).

Le programme a été élaboré par le ministère américain de la Défense (corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis) dans le but de gérer les rivières, les ports et autres travaux publics relevant de leur compétence, il a été largement diffusé par le monde depuis sa publication en 1995. Développé par l'Hydrologic Engineering Center (HEC) en Californie, ce système permet aux ingénieurs en hydraulique d'analyser les débits dans le lit des rivières et de déterminer les zones inondables. Il intègre de nombreux moyens de saisie de données (HEC-GEORAS et ARC-GIS), de composants d'analyse hydraulique, de stockage de données, d'édition de rapports sous forme de tables et de graphiques.

2. Les caractéristiques du logiciel

Pour les écoulements permanents, le logiciel HEC-RAS est basé sur la solution de l'équation de conservation de l'énergie à une dimension. Les pertes d'énergie sont évaluées par les frottements et les effets de contraction et expansion. L'équation de quantité de mouvement est également utilisée dans les

situations d'écoulement rapidement variées, par exemple au niveau de ressauts hydrauliques, de ponts et de confluences.

Pour les écoulements non permanents, le logiciel résout l'ensemble dynamique des équations de Saint-Venant par la méthode des différences finies. Ce module de résolution est adapté des travaux du Dr., Robert L. Barkau .Il est présentement utilisé dans plusieurs firmes d'ingénierie et organismes gouvernementaux et Permet de simuler les écoulements permanents et non permanents, le transport de sédiments et certaines fonctions facilitant la conception d'ouvrages hydrauliques, HEC-RAS permet également de simuler l'évolution de la qualité de l'eau. Il est capable de simuler divers régimes d'écoulement (subcritique, de transition, supercritique) en prenant en compte les effets de ponts et seuils.

3. La modélisation

L'élaboration d'un model hydraulique consiste à intégrer deux principaux facteurs qui sont :

- La géométrie et la morphologie d'oued Mikkes
- Les débits de crues ou de pointes

Avec l'utilisation de ces données de simulation hydraulique, on peut définir les zones inondables dans tout au long du profil d'Oued de Mikkes durant le passage des différentes crues. Il permet également de calculer les niveaux d'eau et la vitesse d'écoulement dans chaque point préalablement défini.

3.1. Les outils de la modélisation

Pour faire la simulation hydraulique d'Oued Mikkes, on va utiliser le logiciel mathématique (HEC-RAS .4) avec l'extension de (HEC-GEORAS qui fonctionne sous ARC-GIS). Ce logiciel s'est déjà montré très performant pour ce type d'étude, et bon nombre d'entreprises et de laboratoires le considèrent comme l'outil idéal de première approche (K. DEBIANE 2000 et R. CHAMPREDONDE 2006).

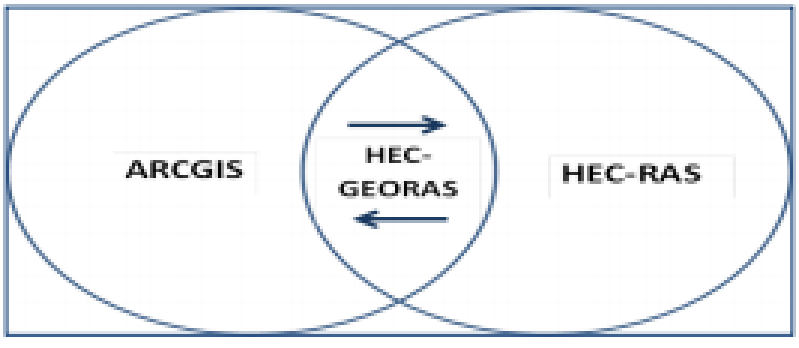


Figure2 : Représentation schématique de l'outil informatique utilisé

Selon la figure 3, on peut conclure que HEC-GEORAS c'est une extension qui permet d'assurer les échanges des données, soit par la transformation des données spatiales et les rendre compatibles dans le logiciel HEC-RAS afin de faire la simulation hydraulique. La même chose pour faire récupérer les résultats obtenus par HEC- RAS et l'utiliser par ARC -GIS afin d'analyser et cartographier la zone inondable. L'élaboration du fichier de la géométrie à exporter, est basée sur un modèle numérique de terrain qui doit être de préférence sous forme de TIN.

La figure au-dessous de l'interface de L'ARC-GIS montre que la barre de HEC-GEORAS est constitué par deux menus déroulants essentiels, le premier s'appelle **RAS Geometry** : il permet de faire toutes les opérations nécessaires à l'établissement du fichier de la géométrie (preprocessing) ; le deuxième s'appelle **RAS Mapping** : il permet d'effectuer les opérations en relation avec l'exploitation des résultats de la simulation par HEC-RAS.

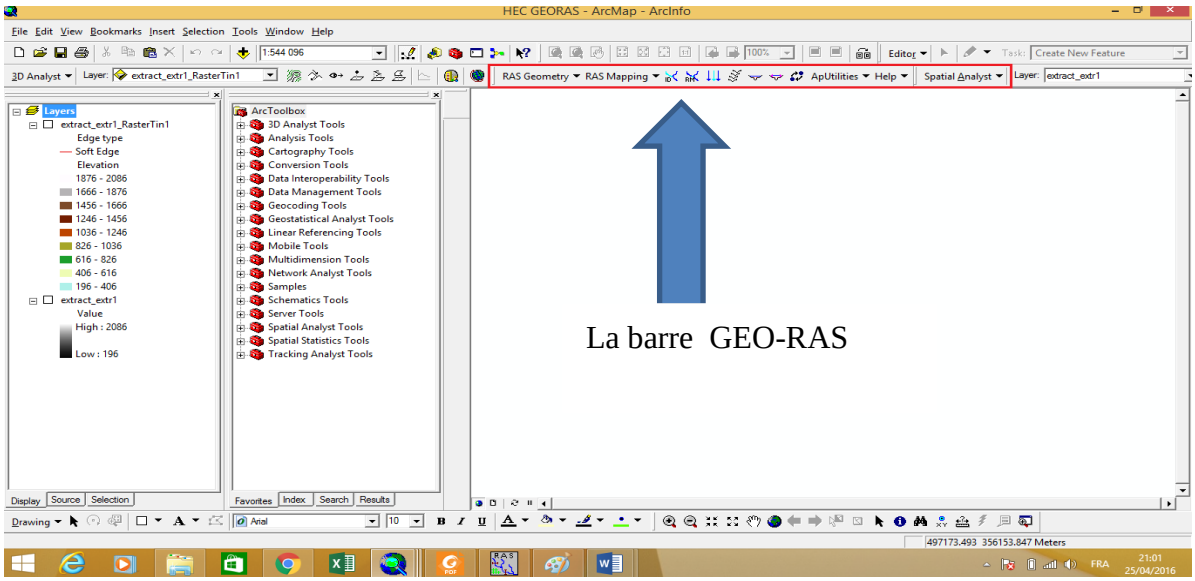


Figure 3: interface de l'arc-gis avec l'extension HEC-GEORAS

La modélisation d'un Oued est basé sur les profils en travers avec la prise en considérations les ouvrages de franchissements existants, et sur les coefficients de rugosité pour chaque section.

La simulation hydraulique se déroule de la manière suivante :

3.1.1. Les données d'entrés

- La topographie des profils en travers du cours d'eau.
- Les distances entre les profils.
- Le coefficient de Manning.
- Une description hydraulique des ouvrages (ponts, dalots.)

- Les conditions limites (amont et aval)
- Les débits des crues.

3.1.2. Les résultats des calculs

- Les niveaux d'eau et d'énergie dans chaque profil en travers ;
- Les vitesses d'écoulement dans chaque section.
- Le profil en long dans le temps des lignes d'eau.

3.2. Principes du calcul hydraulique par HEC-RAS

Le modèle HEC-RAS est un modèle unidimensionnel conçu par Hydrologic Engeeniering Centre pour modéliser l'écoulement à surface libre permanent et non permanent. La première version (version 1.0) a été libérée en Jjuillet de 1995. Depuis lors il y a eu plusieurs dégagements importants de ce progiciel, y compris des versions : 1.1 ; 1.2 ; 2.0 ; 2.1 ; 2.2 ; 3.0, 3.1, 4.0 et maintenant la version 4.1 qui est conçue pour exécuter les tâches suivantes:

- Calcul des hauteurs d'eau dans un régime permanent.
- Simulation de l'écoulement non permanent.
- Calcul de la capacité de transport solide.
- Exécution d'une analyse de qualité de l'eau.

Pour notre étude, on va traiter les deux premières fonctionnalités qui sont l'écoulement permanant et non permanent.

3.2.1. Bases théoriques du logiciel HEC-RAS

Les bases théoriques d'HEC-RAS sont publiées dans les livres d'aide du logiciel. Malgré cela, on va citer les principales concernant le régime permanent. L'HEC-RAS a la capacité de détermination unidimensionnelle des lames d'eaux à partir du calcul de la variation de la hauteur d'eau entre deux sections successives par la résolution, et d'une procédure itérative, de l'équation d'énergie suivante :

$$Y2 + Z2 + \frac{\alpha 2 V^2 2}{2g} = Y1 + Z1 + \frac{\alpha 1 V^2 1}{2g} + he \qquad (1).$$

Avec :

- **y1 et y2** : Tirant d'eau dans chaque section,
- **Z1, Z2** : Côte de fond,
- **V1, V2** : Vitesse moyenne dans chaque section,
- **α1, α2** : Coefficients relatives à la répartition des vitesses dans une section,

- **g** : Accélération de la pesanteur
- **he** : Perte de charge totale.

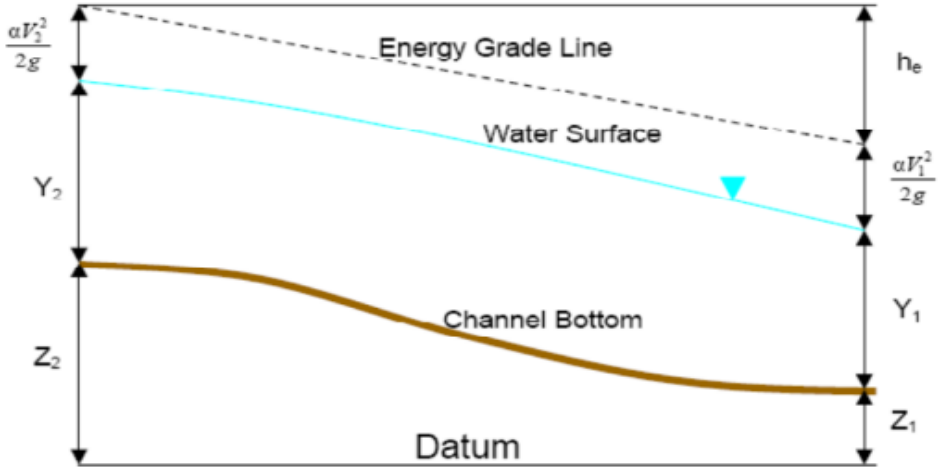


Figure 4 : Représentation des termes de l'équation d'énergie

La perte de charge est composée de perte de charge linéaire et singulière.

$$he = LS_f + c\left|\frac{\alpha 2 V^2 2}{2g} - \frac{\alpha 1 V^2 1}{2g}\right| \quad (2)$$

Avec :

L : Distance entre deux sections,

C : Coefficient de perte par expansion ou contraction,

S_f : Pente représentative de frottement entre deux sections tel que :

$$S_f = (Q|R) \quad (3)$$

Avec

Q : est le débit d'eau ;

Q = V×A (Equation de continuité) d'où : $V = \frac{V}{Q} \quad (4)$

K : Coefficient de débit calculé comme suite :

$$k = \frac{1{,}486}{n} AR^{2.\cdot 3} \quad (5)$$

Avec

n : Coefficient de rugosité de Manning,

A : Section mouillé

R : Rayon hydraulique.

La procédure de calcul de la hauteur d'eau dans la section considérée est faite par action itérative et déroule comme suit :

1. Proposer une hauteur d'eau à la section en aval (si l'écoulement est fluviale ou en amont s'il est torrentiel).
2. Sur la base de la hauteur d'eau proposée, déterminer le coefficient de débit K **(équation 5)** et la vitesse moyenne **(équation 4)**.
3. Avec les valeurs obtenues du coefficient de débit et de la vitesse moyenne, calculer Sf**(équation 3)** et résoudre l'équation de h_c**(équation 2)**.
4. Avec les valeurs obtenues dans les étapes 2 et 3 (la perte de charge et la vitesse moyenne), résoudre l'équation globale d'énergie **(équation 1)** ; c'est-à-dire, calculer la hauteur d'eau dans la deuxième section,
5. Comparer la valeur de la hauteur d'eau calculée avec celle proposée au début.
6. Répéter la procédure jusqu'à l'obtention de la précision.

3.3. Le fonctionnement de HEC RAS

Le logiciel HEC-RAS est présenté sous forme de projets, chaque projet contient plusieurs fichiers dans chacun porte le nom de projet et possède son propre extension et présente son propre jeu de données, ces fichiers sont présentés comme suit :

- **Le fichier de projet (*.prj)**: c'est le fichier principale qui contient les informations descriptives de projet et les configurations par défaut ou choisi.
- **Le fichier de géométrie (*.G--)** : il comporte les informations relatives à la géométrie (schéma, sections en travers, rugosité, ouvrage…etc.).
- **Le fichier (flow) débit (*.F--)** : il stocke les données de débits, il peut comporter plusieurs profils où chaque profil regroupe de conditions particuliers de débit.
- **Le fichier Plan (*.P--)** : chacun contient des données particulières et aide l'utilisateur à simuler plusieurs scénarios avec les mêmes données.
- **Le fichier exécution (*.R--)** : il se crée automatiquement à l'exécution de chaque simulation et contient les données relatives à la simulation.
- **Le fichier (output) résultat (*.O--)** : il regroupe les résultats de la simulation.

Tous les fichiers HEC-RAS prennent la numérotation de 0 à 99, leurs nom est ceux définis par l'utilisateur et ne doivent pas modifiés.

3.4. Contraintes d'utilisation du modèle HEC-RAS

Malgré la performance prouvé de logiciel HEC RAS et sa convivialité, il présente quelques contraintes qui doivent être prises en considération.

- Le non prise en compte des échanges de masse et des échanges turbulents entre le lit mineur et le lit majeur, ces phénomènes sont responsables de pertes de charge très importantes.
- En tant que modèle 1D il s'avère moins performant quand il s'agit de grandes plaines d'inondation présentant des diffluences et de confluences multiples (caractère 2D).

ANNEXES 2

Pluies et température moyenne annuelles 1968-2009 (ABHS-Fès)

	pluie moyenne annuelle (mm)		température moyenne annuelle (°c)
Année	Ain Taoujdate	EL Hajra	El Hajra
68	600	508	18.3
69	732	619	17.8
70	470	405	18.6
71	637	615	17.1
72	486	464	16.8
73	488	505	18.0
74	406	287	17.9
75	541	418	17.7
76	659	523	17.5
77	472	381	18.0
78	433	367	18.6
79	503	469	18.4
80	381	312	18.6
81	249	195	18.5
82	616	405	18.0
83	316	306	18.5
84	329	323	17.4
85	352	281	18.3
86	413	297	18.3
87	469	433	19.2
88	388	310	17.5
89	604	521	17.9
90	520	376	17.5
91	391	296	17.0
92	353	268	17.4
93	314	331	17.0
94	269	225	17.5
95	296	309	18.9
96	790	633	20.0
97	607	555	19.2
98	325	242	20.0
99	315	228	19.4
2000	425	320	20.0
2001	275	204	19.7
2002	464	328	19.6

2003	444	499		19.9
2004	556	202		17.6
2005	324	194		18.0
2006	438	259		17.8
2007	336	189		17.7
2008	574	324		17.0
2009	524	404		17.7
moy	454	365		18.2

Débit moyen

Année	Débit moyen annuel (m^3/s)
1983	1.3
1984	3.3
1985	1.5
1986	1.1
1987	0.5
1988	1.4
1989	2.2
1990	0.8
1991	0.4
1992	1.1
1993	0.0
1994	10.2
1995	7.4
1996	3.8
1997	7.3
1998	1.4
1999	0.7
2000	1.9
2001	0.9
2002	3.9
2003	3.8
2004	1.4
2005	4.5
2006	1.5
2007	1.0
2008	15.4
2009	25.8
2010	13.7
2011	4.6
2012	13.9
2013	9.5
2014	8.9

annuelle barrage sidi chahed (1983-2014) (ABHS-Fes)

Pluiemoyenne mensuelle(mm) 1968-2009 (ABHS-Fes)

L'apport de barrage sidi chahed en (m ^{3} /s) 1939-2015(ABHS-Fes)

ANNEE	JAN	FEV	MAR	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AO	SEP	OCT	NOV	DEC
1939	2.3	31.3	22.1	22.4	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.0	4.1
1940	16.1	30.7	18.3	37.5	12.5	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	9.4	0.0
1941	5.2	11.3	42.7	24.7	11.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

	SEPT	OCT.		NOV.	DEC.	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT
EL HAJRA	11	32		44	57	48	46	43	43	28	11	1	1
Ain Taoujdate	20	39		54	66	60	58	55	55	34	12	2	3

1942	0.0	0.0	1.0	5.8	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.8

1943	3.5	0.3	22.9	5.5	2.1	7.2	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
1944	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1
1945	0.0	0.0	10.6	9.5	7.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
1946	0.0	8.4	11.7	0.9	15.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1947	0.0	3.9	0.0	1.4	14.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1948	1.4	0.0	0.0	10.4	18.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8
1949	9.0	5.2	2.5	0.1	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1950	14.7	14.8	27.0	12.8	7.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	5.2
1951	4.0	4.6	6.8	21.1	10.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1952	4.4	0.8	8.9	15.1	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1953	0.0	6.9	11.2	33.9	10.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1954	10.7	22.1	32.5	25.9	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1955	0.0	19.0	38.1	39.1	20.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1956	0.0	0.0	0.3	6.2	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.6
1957	13.9	19.6	5.0	4.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.4
1958	9.9	2.7	15.0	4.1	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.4
1959	32.0	32.6	24.5	11.1	2.6	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.1
1960	13.7	20.5	14.0	12.9	1.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0
1961	0.0	0.0	23.2	18.6	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.1	1.1
1962	27.3	43.4	16.8	3.1	34.8	17.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.4
1963	4.0	3.0	5.5	27.3	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1964	7.1	10.4	14.9	12.8	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
1965	0.4	0.2	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	20.5	1.4	0.0
1966	0.0	0.0	0.0	1.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.5	0.9	0.0	0.0
1967	1.3	10.1	33.8	22.1	10.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	4.8	12.2
1968	19.1	27.9	29.2	16.1	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5
1969	65.1	24.2	22.0	12.6	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	3.7
1970	15.6	9.8	9.9	33.5	22.3	7.4	0.1	0.0	0.0	0.0	5.2	6.4
1971	10.9	14.0	22.1	8.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	3.3	5.4
1972	8.0	10.7	11.5	7.5	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	5.2
1973	4.0	4.6	6.8	21.1	10.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
1974	1.3	3.0	5.7	5.6	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5
1975	1.9	3.1	2.7	2.9	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	7.4
1976	19.6	32.5	12.7	3.3	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	3.1	6.8
1977	6.5	10.9	9.8	5.0	4.2	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9
1978	4.3	26.5	20.7	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	18.1	23.2	4.3	5.1
1979	5.6	3.6	10.1	3.2	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	3.4	4.6
1980	4.2	2.5	1.2	2.1	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	2.0
1981	4.0	3.4	1.5	3.6	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.9	3.7
1982	3.9	4.6	2.6	1.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	2.6
1983	2.3	0.8	0.9	0.8	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
1984	2.4	1.4	0.0	0.6	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1985	2.0	11.3	5.1	2.7	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6

1986	1.0	6.3	1.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1
1987	2.4	1.6	1.5	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1988	0.3	0.9	0.3	1.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.7
1989	2.1	0.4	0.0	0.2	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0
1990	1.7	2.1	4.7	3.2	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8
1991	0.5	0.4	0.6	2.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
1992	0.1	0.1	1.3	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.2
1993	1.3	3.2	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0
1994	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.4	0.9	3.3
1995	23.8	10.5	14.2	5.4	4.0	1.4	0.4	0.3	0.5	0.5	0.6	13.0
1996	15.5	8.8	2.3	3.0	2.4	1.2	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
1997	6.7	8.8	2.3	3.0	2.4	1.2	0.6	0.1	1.2	1.3	3.3	8.5
1998	13.1	11.3	2.6	2.0	2.7	1.2	0.2	0.0	0.4	0.4	0.4	0.5
1999	2.6	1.5	1.6	0.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.6	0.7
2000	0.6	0.1	0.0	0.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.5	0.1	0.5	4.5
2001	3.3	1.5	1.0	0.1	0.3	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	1.7
2002	1.4	0.3	0.7	1.2	0.1	0.1	0.1	0.4	0.0	0.0	7.7	2.1
2003	6.7	2.2	2.7	2.1	1.1	0.4	0.1	0.1	0.0	0.4	1.4	11.1
2004	3.3	2.3	2.4	1.4	1.8	0.2	0.1	0.2	0.1	0.4	1.1	1.9
2005	1.0	0.6	2.8	0.1	0.8	0.1	0.1	0.2	0.0	0.5	1.3	1.5
2006	5.1	8.2	8.7	1.7	1.3	0.6	0.3	0.0	0.4	0.5	0.1	0.2
2007	1.0	1.6	1.0	3.0	1.3	0.3	0.6	0.1	0.0	0.4	0.7	1.5
2008	1.5	1.1	0.9	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	1.2	1.2	3.0	16.7
2009	17.0	36.8	17.0	4.4	2.3	0.6	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	11.7
2010	24.3	40.2	55.1	18.4	8.7	4.5	2.0	2.6	2.5	3.3	11.5	23.1
2011	12.5	10.3	9.9	5.0	7.9	2.9	0.0	0.0	0.0	0.4	7.2	5.5
2012	5.4	4.6	1.8	2.8	1.4	0.4	0.4	0.0	0.2	2.1	7.6	6.5
2013	12.5	8.6	30.1	14.2	4.9	1.9	1.6	0.0	5.8	5.3	7.0	8.8
2014	13.5	16.7							4.33	4.94	5.15	7.94
2015	9.999	10.97	15.56	12.40								4.5