



Année Universitaire : 2014-2015



Master Sciences et Techniques : Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et
Techniques

La modélisation hydrologique au niveau du bassin d'AGUENZA, par GR2M et HEC-HMS

Présenté par:

Khalid EN-NAGR

Encadré par:

- Mr. Lahcen Benaabidate , FST - Fès
- Mr. Hassan Brirhet , chef de service Hydrologique

Soutenu le 26/ 06/ 2015 devant le jury composé de

- Chaouni A.
- Brirhet H.
- Lahrach A.
- Benaabidate L.
- :Rais N.

Stage effectué à : Ministère Délégué Chargé de l'Eau



RÉSUMÉ

Le bassin versant de Souss Massa se situe au centre géographique du Maroc et couvre une superficie de l'ordre de 25.000 km² et renferme plusieurs sous bassins, parmi lesquels le sous bassin d'Aguenza s'étale 1129 Km.

L'étude à été entamée par une caractérisation morphologique de la zone d'étude, suivie par une synthèse géologique et climatologique de ce bassin versant. Avant d'entamer l'étude hydrologique, on a commencé montrer l'importance de la modalisation dans le domaine hydrologique.

Ce bassin a un périmètre de 190 km et cumulant une superficie 1129 km². Il reçoit une pluie moyenne de 300 mm, et une température annuelle de 21.30C. Sur le plan hydrométrique, le bassin a montré un régime typique méditerranéen caractérisé par l'abondance pluviale à très forts débits hivernaux, générant de fortes crues, et une saison sèche.

Par ailleurs, nous nous sommes intéressés à l'aspect qui présente la finalité de ce travail, à savoir la prévision pour une meilleure gestion des crues au niveau d'oued Issen et plus précisément les stations d'Amsoul et d'Aguenza. Cette étude prévisionnelle a été réalisée grâce au logiciels HEC HMS et GR2M.

Mots-clés: Fonctionnement hydrologique, bassin versant, Agueunza, modélisation.

Sommaire

Résumé :.....	1
INTRODUCTION GENERALE.....	2
CHAPITRE I :Les caractéristiques physiographique du bassin versants d'ageunza.....	4
I - Situation géographique.....	5
II-Les caractéristiques physiques du bassin d'agauenza.....	6
II -1- Surface.....	7
II -2- Périmètre.....	4
II -3- Indice de compacité de graveliuskG.....	5
II -4- Indice de compacité de Horton.....	5
II -5- Les caractéristiques du relief.....	5
II-6-Carte hypsométrique.....	6
II-7- Courbe hypsométrique.....	7
II-8-Le temps de concentration.....	8
II -9-Etude de pente.....	9
II -10-Le réseau hydrographique.....	10
III- Aperçu géologique du bassin.....	11
Chapitre II : Contexte climatologie du basinversant d'agaeunza.....	16
I-Pluviométrie.....	16
I -1- Précipitations moyennes annuelles.....	16
II-2- Précipitations mensuelles.....	17
a – Température.....	17
b - L'évaporation.....	18
III - Les données hydrométriques.....	21
III -1-Les débits moyens annuels.....	21
III -2-Les débits moyens mensuels.....	22

III -3- Les débits moyens saisonniers.....	22
Chapitre III : la modélisation hydrologique.....	23
I - La modélisation pluie-débit.....	23
Définition et structure générale d'un modèle pluie-débit.....	23
I-1-Intérêts de la modélisation pluie-débit.....	23
I-2- Mise en œuvre du modèle conceptuel.....	24
I-2-1-Principe.....	24
I-2-2-Phase de calage et optimisation des paramètres.....	25
I-2-3-Initialisation et phase de mise en route du modèle.....	25
I-3-Efficacité d'un modèle pluie-débit.....	25
II -Les modèles hydrologiques.....	25
II-1- Modèles déterministes.....	26
II-1-1- Modèles paramétriques.....	26
II-1-2-Modèles à base physique.....	26
II-1-2-1- Modèles empiriques.....	26
II-1-2-2- Modèles analytiques.....	27
II-1-2-3- Modèles conceptuels.....	27
II-1.2.3.1- Modèles globaux.....	27
II-1.2.3.2 - Modèles spatialisés.....	28
Chapitre IV : modélisation hydrologique a travers (HEC-HMS).....	29
Présentation du modèle HEC-HMS.....	29
I - Le débit de base.....	29
II - La fonction de production.....	30
III - Fonction de transfert.....	31
calage de modèle.....	32
Conclusion.....	41
Chapitre V : modélisation hydrologique a travers la plat forme par GR2M.....	42

Présentation de logiciel GR2M.....	42
I -Structures de GR2M.....	42
II - Les paramètres des modèles.....	43
II-1- Fonction de production.....	43
II-2-Fonction de transfert ou « routage ».....	43
III- Approche Méthodologie.....	44
III-1- Calcul des pluies de bassin.....	44
III-2-Calcul de l'ETP moyenne.....	44
III-3- Optimisation du modèle.....	44
IV-Application du modèle GR2M et simulation des débits mensuels.....	45
Conclusion générale.....	48
Bibliographie.....	49
Webographie.....	50

Liste des abréviations :

- **LAT**: latitude
- **LON**: longitude
- **HEC HMS**: hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System
- **SMA**: Soil Moisture Accounting
- **SCS**: Soil Conservation Service
- **CN**: Curve Number
- **TC**: Temps de Concentration
- **ST**: coefficient de Stockage
- **GR2M** : génie rurale à deux paramètres
- **K_c** :Indice de compacité de gravelius kG
- **K_H** Indice de compacité de Horton
- **A** : la superficie du basin(Km²)
- **L** : longueur du plus thalweg(Km)
- **ETP** : évapotranspirations potentielle
- **X1** : capacité de production
- **X2** : fonction de transfert

Listes des figures

- Figure 1: Carte de la situation géographique de l'oued ISSEN d'aguenza.....	4
- Figure 2 : carte hypsométrique du bassin versant d'aguenza.....	6
- Figure 3 : histogramme de fréquence de l'altitude en fonction de la superficie.....	8
- Figure 4 : la courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Issen à la station d'Aguenza.....	8
- Figure 5: carte des pentes du bassin d'Aguenza.....	10
- Figure 6 : la carte hydrographique du bassin d'ageunza.....	11
— Figure 7 :La carte géologique du bassin versant de la plaine de souss en générale..	12
- Figure 8: la carte des types du sol du bassin d'Aguenz.....	15
- Figure 9 : la variation des précipitations annuelle de station ageunza.....	16
- Figure 10 :variations des précipitations annuelles à la station d'ageunza.....	17
- Figure11: variation des précipitations mensuelles à la station d'Aguenza.....	18
- Figure 12: hauteurs des évaporations mensuelles au Piche dans le pont d'ssen.....	18
- Figure 13: variation des précipitations annuelles à la station d'Aguenza.....	20
- Figure14: variation des précipitations mensuelles à la station d'Aguenza.....	20
- Figure 15 : variation des débits moyens mensuels (en m ³ /s) à la station d'Aguenza.	21
- Figure 16:variation saisonnière des débits (en m ³ /s) à la station d'Aguenza.....	21
- Figure 18: Classification des modèles hydrologiques.....	26
- Figure 19 :hydrogramme de crue de l' événement de 2000 dans la station d'Aguenz	33
- Figure 20:hydrogramme de crue d'événement de 1995 dans la station d'Aguenz.....	33
- Figure 21:hydrogramme de crue d'événement de 1995 dans la station d'Aguenza.....	34
- Figure22: hydrogramme des crues d'événement de 1996 dans la station d'Aguenza.	35
- Figure 23 :Hydrogramme des crues d'événement de 2003 dans la station d'Aguenza.....	35
- Figure24: Hydrogramme des crues d' événement de 2004 dans la station d'Aguenza.....	36
- Figure 25 :Hydrogramme des crues d'événement de 1988 dans la station d'Aguen..	37
- Figure 26 :hydrograme des crues de la période 1999 à 2001.....	39
- Figure 27 : hydrograme des crues de la période 2003 à 2005.....	39
- Figure 28 : hydrogramme des crues de la période 2009 à 20011.....	39
- Figure 29 : hydrogramme de crue de la période 2010.....	40
- Figure 30 : Schéma conceptuel du modèle GR2M. (Makhlouf, 1994).....	43
- Figure 31: hydrogramme de crue de la période 1999 à 2001.....	46
- Figure32 : hydrogramme de crue de la période 2002 à 2004.....	46
- Figure 32: hydrogramme de crue de la période janvier1999 à novembtre1999....	47

Les listes des tableaux

<i>Tableau 1 : Répartition hypsométrique du bassin versant d'Issen à Aguenza.....</i>	<i>7</i>
<i>Tableau 2: Evaporations mensuelles à la station d'Issen-pont.....</i>	<i>19</i>
<i>Tableau 3: Numérotation des épisodes , au station d'Aguenza.....</i>	<i>32</i>
<i>Tableau 4 Les caractéristiques des événements.....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 5 : Les caractéristiques des périodes de calage.....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 6: Valeur du critère d'évaluation du modèle retenu pour la station et d'Aguenza ...</i>	<i>47.</i>
<i>Tableau 7 :La synthèse du calage du modèle au station d'Aguenza.....</i>	<i>.....</i>

INTRODUCTION GENERALE

Les ressources en eau, plus que toute autre forme de ressource, constituent un élément fondamental et nécessaire au maintien et au développement de toute activité humaine économique et sociale. Cependant, le succès de telles ressources passe nécessairement par une bonne connaissance du régime hydrologique de la zone d'étude. En effet, la connaissance des débits des rivières est de première importance pour la gestion de la ressource en eau et la maîtrise du risque hydrologique..

La zone d'étude est située dans le bassin Souss. Cette région est située au Sud-ouest du Maroc et comprise entre le 30^{ème} et le 31^{ème} parallèle nord, et autour du 9^{ème} degré de longitude ouest de Greenwich. La région comprend une plaine, la vallée du Souss, et un ensemble montagneux qui forme un triangle ouvert vers l'océan.

La vallée de Souss, dont la superficie est d'environ 4400 km², occupe à peu près le quart de l'ensemble du bassin de l'oued, qui s'étend également sur le versant sud du Haut-Atlas et le versant nord de l'Anti-Atlas, soit au total une superficie de 16300 km² (Hsisous, 2002).

La forme de la plaine de Souss est triangulée, ce qui nous a ramené de limiter notre étude aux régions situées en amont du barrage Abdelmoumen. Cette zone d'étude est soumise à un

climat semi aride dont l'impact sur l'écoulement de l'eau est bien marqué dans le temps et dans l'espace. L'organisation de ce travail se focalisera autour des volets suivants :

- cadre générale de la zone ;
- la modélisation hydrologique ;
- la modélisation à travers la plateforme de HEC-HMS ;
- la modélisation à travers la plateforme de GR2M.

CHAPITRE I : LES CARACTÉRISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES DU SOUS BASSIN VERSANT D'AGUENZA

Le sous bassin d'Agauenza s'inscrit dans le domaine méditerranéen, à la fois par son contexte bioclimatique (semi aride, semi humide, un régime fluviale à étiages en été et crue en hiver et le couvert végétale à composition floristique caractéristique)

Dans ce chapitre, nous allons étudier la situation géographique du sous bassin versant d'Agauenza et à partir cette étude, on pourra avoir une idée qualitative du mode des différents facteurs qui transforme les eaux de pluies en écoulement.

I - Situation géographique

Le bassin versant de l'oued Issen en amont du barrage Abdelmoumen, se situe dans la zone montagneuse semi aride du Haut Atlas occidental, entre les parallèles 30°20' et 31°N, et entre le méridien 8°50'W et l'océan Atlantique. Il est limité à l'Est par le bassin mésozoïque d'Erguitta (région de Mentaga), et au Nord par la partie septentrionale de la dépression dite d'Argana. Au Sud, la limite géographique correspond à l'oued Souss.

L'oued Issen, également dénommé Assif n'Ait Moussa en montagne, constitue le plus important affluent atlasique de la rive droite de oued Sous. Il est clairement individualisé grâce notamment à sa superficie importante et au grand nombre d'affluents qu'il reçoit. Il s'étend sur une vaste dépression creusée en très grande partie dans les formations gréseuses et argileuses permo-triasiques du couloir d'Argana. Sa vallée ne reçoit pas d'affluents importants sur sa rive droite, cependant les affluents de la rive gauche sont plus nombreux : l'assif n'Ait Bkhar, n'Ait Chaib, n'Ait Tounet, et assif n'Ait Driss. [2]

Plus à l'aval, l'oued Issen est limité par les formations gréseuses des jbel Askal et l'Adrar-Tkhnkine entre lesquels il s'insinue pour traverser ensuite des crêtes rocheuse par des gorges profondes.

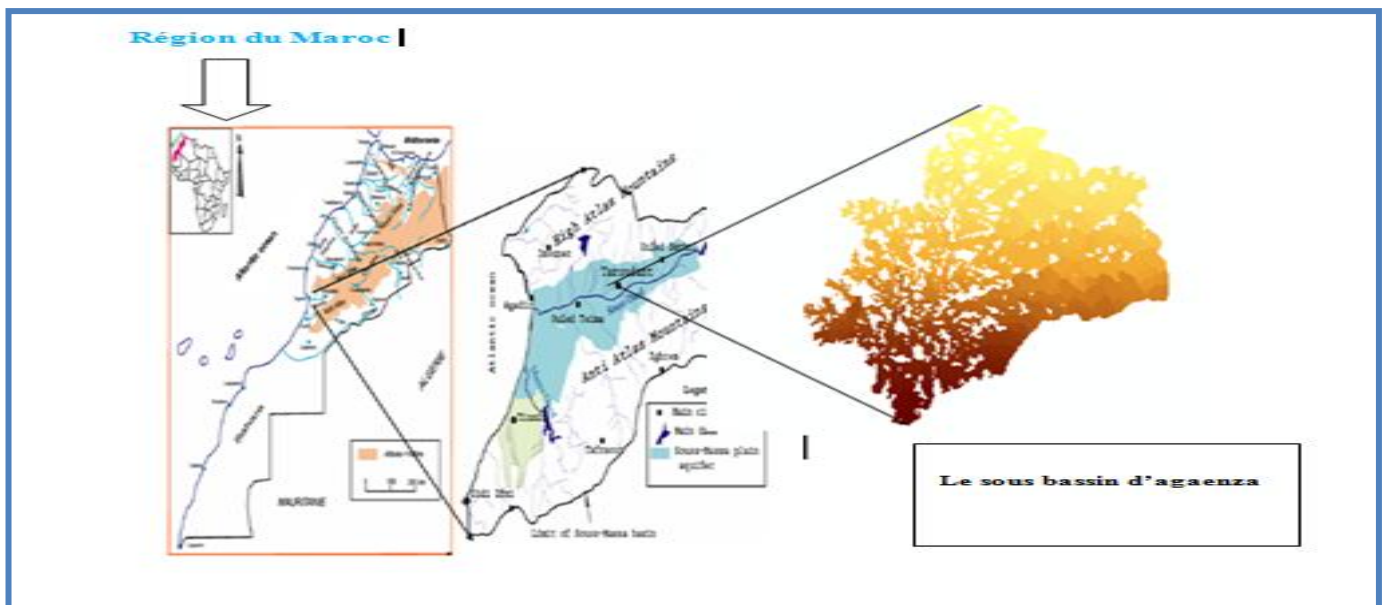


Figure 1: Carte de la situation géographique de l'oued Issen d'Agauenza

II-Les caractéristiques physiques du bassin d'Agauenza

Il s'agit des caractéristiques purement géométriques permettant de nous renseigner sur le degré d'allongement du bassin versant qui traduit sa réaction vis -à- vis de l'écoulement globale contre le phénomène météorologique. Les principale caractéristiques physiographiques et géomorphologiques du bassin versant étudiées ont une importante majeur care elles interviennent, et souvent d'une façon combinée dans la modalité de l'écoulement superficiel. Son comportement hydrologique est influencé par les facteurs suivent :

II -1- Surface

Le bassin versant étant l'aire de réception de précipitation et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont donc être en partie reliés à sa surface.

Dans notre étude la surface du bassin versant qui est 1129 km² est déterminée à partir de la carte topographique. En effet, un petit bassin versant réagit très vite à une averse, les eaux se rassemblent rapidement, alors qu'un grand bassin versant réagit très lentement à une averse.

II -2- Périmètre

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de limite du bassin versant, il est exprimé en Km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Le périmètre de ce bassin est de 190 Km

II -3- Indice de compacité de Gravelius k_G

Cet indice donne une idée sur la forme du bassin versant qui a une influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout sur l'allure du l'hydro gramme à l'exutoire du bassin, résultant d'une pluie donnée.

Cet indice est déterminé à partir d'une carte topographique en mesurant le périmètre du bassin versant et sa surface. Il est proche de 1 pour un bassin versant quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongé.

Il est défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface par la formule mathématique suivante :

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

Avec : P: le périmètre du bassin (Km)

A : la surface du bassin versant (Km²)

Pour le cas de ce bassin k_c est de l'ordre de 1,58, donc il est presque six fois plus long que large donc a une forme allongée.

II -4- Indice de compacité de Horton

Cet indice exprime le rapport de la largeur moyenne du bassin versant à la longueur L du cours d'eau principale. Il est calculé de la manière suivante :

$$K_H = 1/L^2 = 0.08$$

L : la largeur moyenne du bassin versant (m)

L : la longueur de cours d'eau principale (m)

Dans le cas du bassin versant d'Aguenza, cet indice est 0.008 est inférieur à 1. il conforme allongé de ce bassin versant.

II -5- Les caractéristiques du relief

C'est à partir de l'étude de ces caractéristiques qu'on peut déterminer la morphologie du bassin versant, sa réaction au phénomène météorologique et son comportement hydrologique.

L'influence du relief sur l'héogramme est encore plus évidente, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude et la morphologie du bassin versant.

Sur la carte le relief est indiqué par les courbes de niveau en joignant les points égales altitude.

Il est nécessaire de déterminer la répartition du bassin versant par les tranches d'altitude en fin de pouvoir dégager le différent paramètre du relief.

II-6- Carte hypsométrique

Nous avons représenté la surface comprise entre les courbes de niveau de la carte par le couleur différent, dans laquelle se succèdent des zones de hautes altitudes supérieur à 3525 m et des basses altitudes inférieur 136 m.

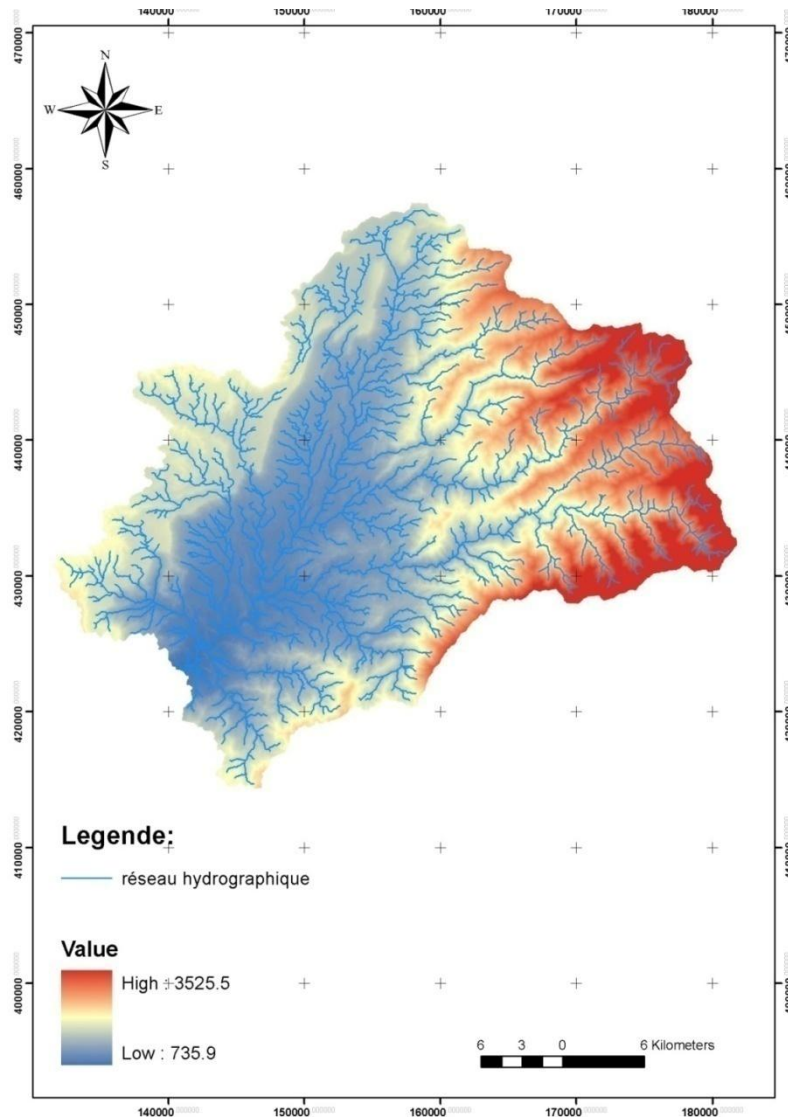


Figure 2 : Carte hypsométrique du bassin versant d'Aguenza

II-7- Courbe hypsométrique

Pour mieux comprendre les variations d'altitude au sein du bassin versant d'Aguenza on va appliquer une méthode qui permet grâce à un histogramme et une courbe hypsométrique de traduire la répartition des altitudes à l'intérieur de la zone d'études.

Le manque de données hypsométriques de l'ensemble du bassin d'Issen jusqu'au barrage, nous a obligé d'établir la courbe hypsométrique jusqu'à la station d'Aguenza.

La courbe hypsométrique est obtenue par planimétrie des surfaces comprises entre les courbes de niveau et qui différencient les différentes tranches d'altitudes.

Chaque tranche d'altitude correspond à une superficie et un pourcentage de la surface totale du bassin. Les mesures sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1 : Répartition hypsométrique du bassin versant d'Issen à Aguenza

Tranches d'altitudes (m)	Surfaces élémentaires (Km ²)	Fractions de surface (%)
720-800	11,3	1
800-1000	180,8	16
1000-1200	169,5	15
1200-1400	192,1	17
1400-1600	180,8	16
1600-1800	90,4	8
1800-2000	79,1	7
2000-2200	79,1	7
2200-2400	56,5	5
2400-2600	45,2	4
2600-2800	22,6	2
2800-3000	11,3	1
3000-3200	11,3	1
Total	1129,9	100

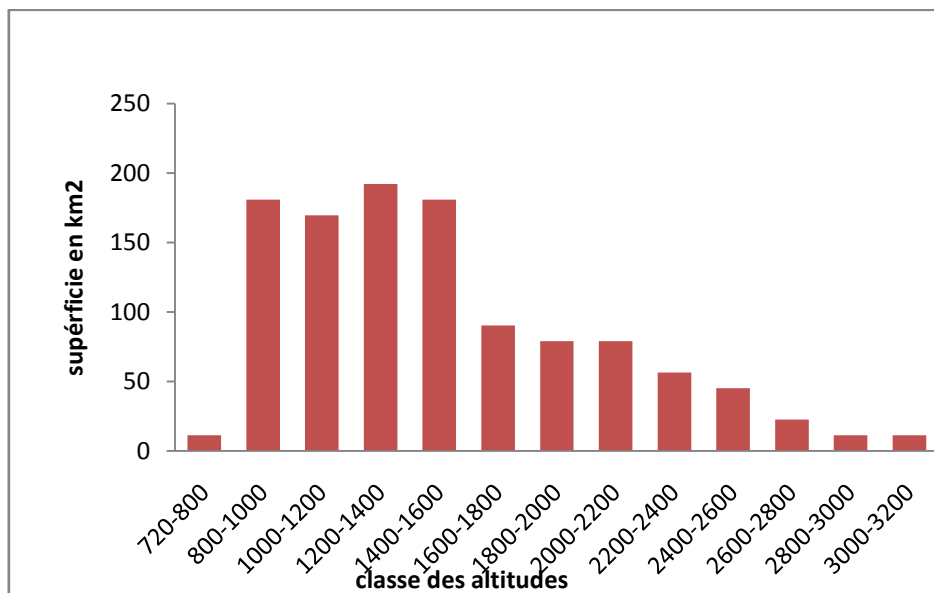


Figure 3 : Histogramme des fréquences de l'altitude en fonction de la superficie

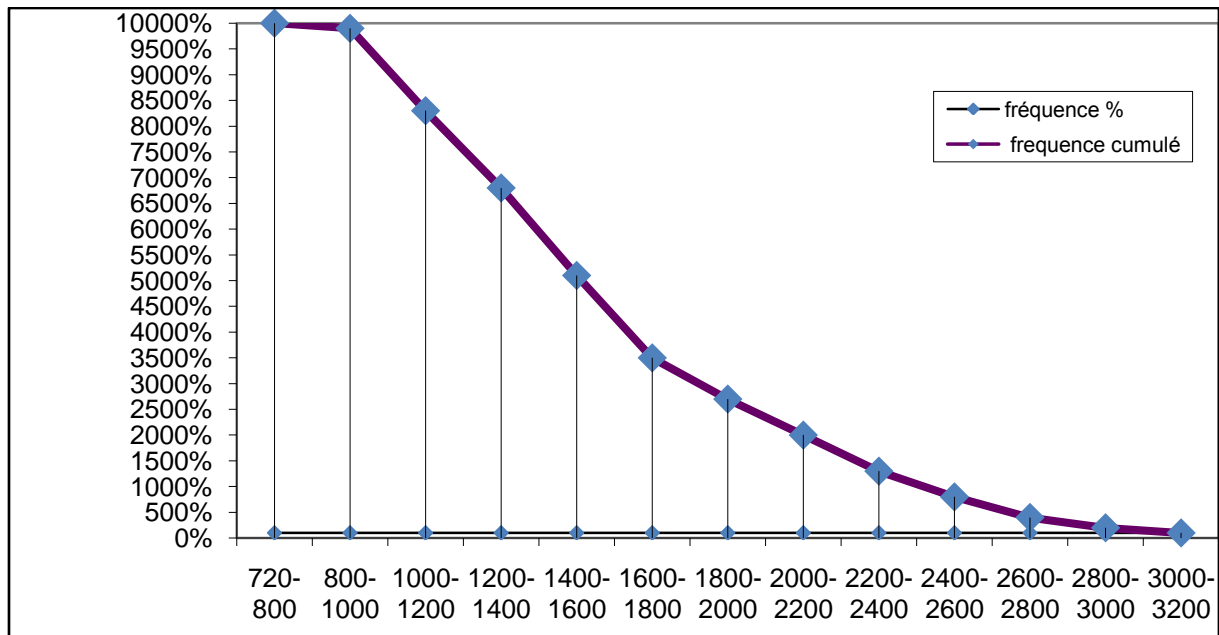


Figure 4 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Issen à la station d'Aguenza

L'analyse de l'aspect de la courbe figure on peut tirer les constatations suivantes :

Un relief montagneux élevé (plus de 1000 m) qui occupe 83% du bassin alors que les surfaces plus basses (moins de 1000 m) occupent 17%.

- L'altitude moyenne est de : 1517 m
- L'altitude médiane : 1490 m
- L'altitude de fréquence maximale : 1200 à 1400 m

II-8-Le temps de concentration

Le temps de concentration (T_c) des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau parcourir le chemin hydrologique ente un point du bassin et l'exutoire de ce bassin, pour son calcul nous faisons appel à la formule de Giandotti :

$$T_C = 4\sqrt{A+1.5L}/0.8\sqrt{H_{moy}}$$

- T_c : le temps de concentration (heure)
- A : la superficie du bassin(Km²)
- L : longueur du plus thalweg(Km)
- H_{moy} : Altitude moyenne (m)

II -9-Etude de pente

La pente joue un rôle incontournable dans le cycle hydrologique elle influence directement l'infiltration et le ruissellement. Ainsi ; pour un même versant et à perméabilité équivalente, la dualité de partage entre écoulement superficiel et infiltration sur le bassin sera essentiellement en fonction de la pente.

La pente moyenne est donnée par les moyennes pondérées des pentes de toutes les surfaces élémentaires :

$$P \text{ (Pente moyenne)} = Dt/L$$

Avec : L : la longueur du rectangle et Dt : la dénivelée totale, on trouve donc $P= 0,029$.

P est la pente moyenne de tout le bassin. Les versants montagneux auront des pentes fortes et le cours principal une pente relativement douce.

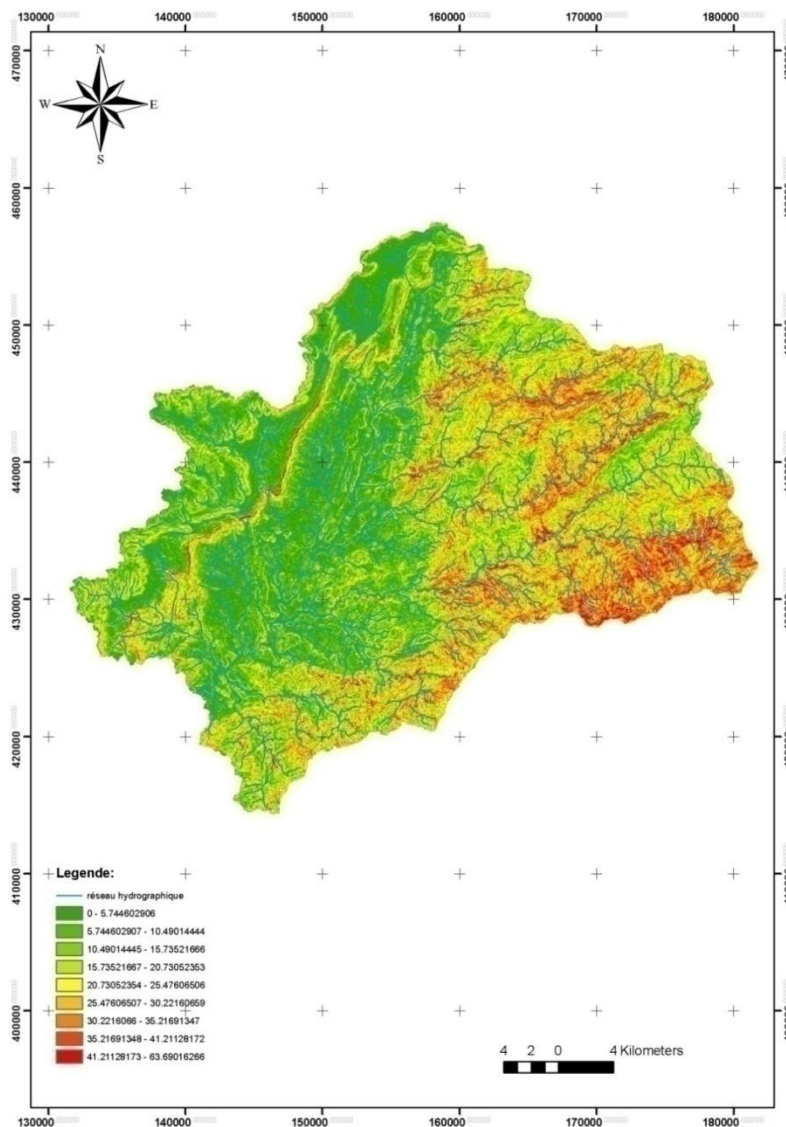


Figure 5: carte des pentes du bassin d'Aguenza

II -10-Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou superficiels, permanent ou temporaire, qui participe à l'écoulement dans le bassin.

Pour définir les limites de ce bassin versant d'Aguenza on a porté une carte 50000ème, ce qui permet de sortir la carte hydrographique.

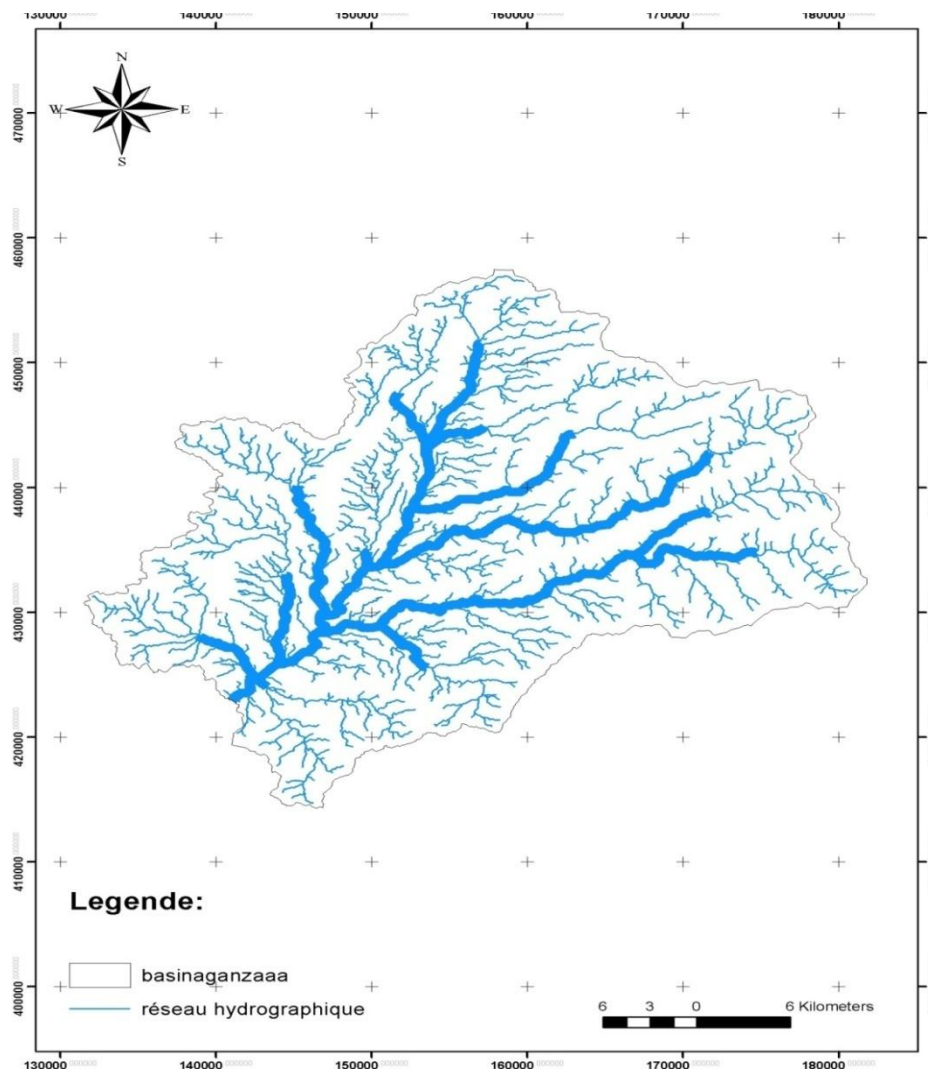
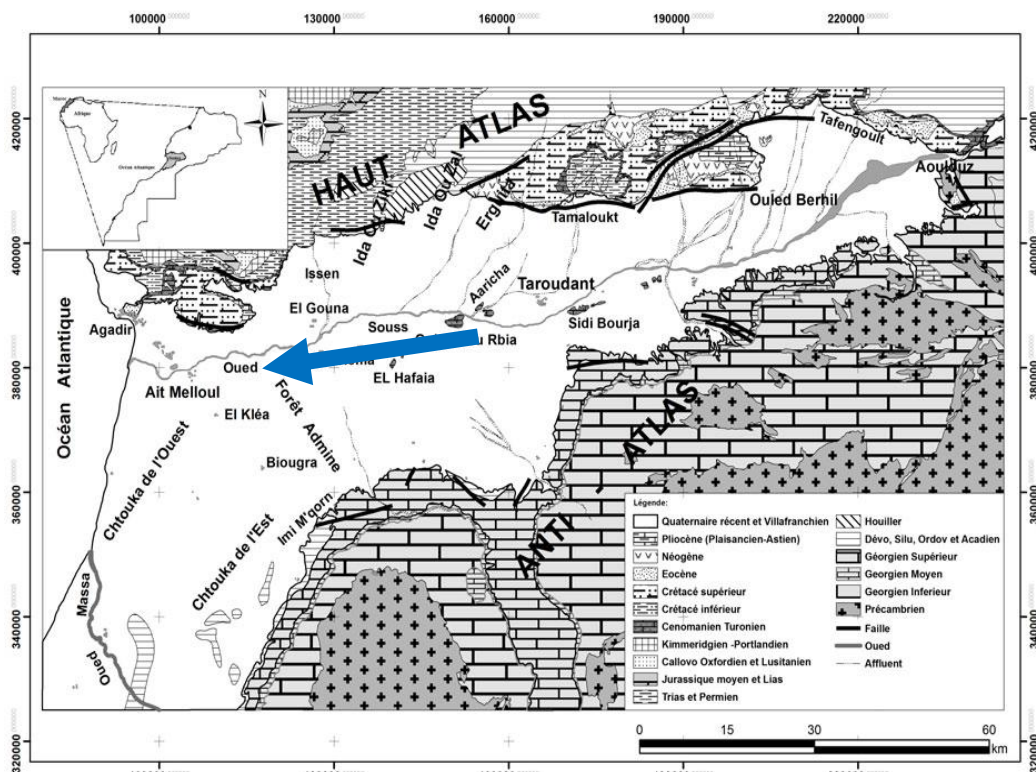


Figure 6 : la carte hydrographique du bassin d'Aguenza

III- Aperçu géologique du bassin

La géologie du bassin versant c'est un facteur primordial de l'écoulement superficiel. Lorsque le bassin versant est caractérisé par des formations très perméable, en plus d'une couverture végétale plus au moins continue, automatiquement la densité de drainage sera faible ce qui explique une meilleur infiltration des eaux superficiels. Par contre si les formations géologiques du bassin versant sont imperméables et meuble ; cela favorise l'érosion et par la suit la densité de drainage sera élevée, donc le ruissellement des eaux superficiels l'emporte sur l'infiltration.

Sur le plan géologique, la succession stratigraphique des formations de la région de Souss- est relativement connue grâce aux forages exécutés dans la plaine, et à travers quelques affleurements de surface surtout aux pieds des montagnes de l'Anti-Atlas et du Haut Atlas et au



niveau de quelques buttes témoins au centre de la plaine (Ambroggi, 1963).

Figure 7 : Carte géologique du bassin versant de la plaine de Souss en général

Les formations géologiques rencontrées s'étendent depuis le Précambrien jusqu'au Quaternaire. On reconnaît particulièrement:

❖ **Les formations primaires**

- **Le Précambrien I:** Composé à la fois de terrains sédimentaires et cristallins, le Précambrien I dévoile des granites, des migmatites, des micaschistes, des gneiss et de roches basiques.
- **Le Précambrien II;** à dominance sédimentaire est, en revanche, composé d'une succession de quartzites et de schistes d'environ 2000 m de puissance surmontée par un ensemble conglomératique. (Hsissou et al. 2002)

❖ **Les formations secondaires**

A cette succession sédimentaire s'ajoutent des roches métamorphiques et magmatiques constituées de dolérites, et de granites. Enfin le Précambrien III est représenté par des formations sédimentaires détritiques constituées par des grès et des conglomérats dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs centaines de mètres. Ces formations constituent des aquifères fissurés à potentiel très limité.

- **Le Paléozoïque:** Dans la plaine du Souss, le Cambrien est représenté par les affleurements de la base de la colline de Sidi Bourja. Il est reconnu aussi par le biais des forages hydrogéologiques dans la plaine du Souss au niveau de la bordure septentrionale de l'Anti-Atlas. Il est représenté à la fois par la série schisto- calcaires géorgiens et par des schistes verts imperméables acadiens.
- **Le Permo-Trias:** Reconnu essentiellement au niveau de l'oued Issen, le Permo-Trias à dominance détritique est représenté par des conglomérats, des grès, des argiles gréseuses et des marnes rouges (1000 m d'épaisseur), cette succession basale est

surmontée par des argiles gypsifères et salifères de 500 m de puissance. Les évaporites du Trias sont à l'origine de l'anomalie de la salinité des eaux de la nappe du Souss au niveau de l'Issen (Boutaleb et al. 2000, Bouchaou et al. 2008).

- **Le Jurassique:** Dans la plaine du Souss, le Jurassique a été reconnu par le forage pétrolier de Hassi El-Beguer HB1 (2374 m de profondeur) qui a recoupé les grès et les marnes du Lias et du Dogger et l'ensemble calcaires dolomitiques-marnes du Jurassique supérieur. Par sa nature calcaire, le Jurassique constitue un aquifère karstique relativement important dans le Haut Atlas. (Hsissou et al. 2002)
- **Le Crétacé:** il est reconnu au niveau de la plaine du Souss en subsurface par sondages et en affleurement d'une manière discontinue au niveau des collines de Haffaia, Ouled-Bou-Rbiaa, Sidi Bourja, Tagma-Tagtrannt et Igoudar (OuledBerrehil). Le Crétacé inférieur est caractérisé par des formations carbonatées où dominant les calcaires et les dolomies gréseux avec intercalation de quelques niveaux marneux ou gréseux

L'ensemble du bassin versant de l'oued Issen présente une géologie formée par les successions suivantes :

L'étage le plus récent formé de calcaires dolomitiques et grés fins formant les terrains les plus résistants à l'érosion. Cette caractéristique est d'ailleurs illustrée par une jonction brutale souvent sous forme de cascade ou de falaise entre ces calcaires et de terrains sous jacents très friables.

Les argiles du permo-trias, de véritables régosols, avec un taux de salinité souvent élevé dans les cuvettes et au niveau des sources. Ces argiles ont un pouvoir de dispersion qui accentue le phénomène d'érosion. Il s'agit de la caractéristique essentielle de ce bassin. Ces argiles imperméables font que des sources apparaissent à leur contact avec les calcaires.

A l'étage inférieur, apparaissent bien à l'aval du barrage Abdelmoumen, les roches du secondaire et du primaire (Silurien et Dévonien) grés et schistes et argiles.

L'étude des directions des structures plissées et des grandes failles montre des orientations variables : NW-SE, E-W, et NE-SW. Cependant, la direction de grande perméabilité (sens d'écoulement des eaux dans les aquifères) des formations Haut-Atlasique est NE-SW. La faille de l'oued Issen est de direction N70, elle met en contact les schistes paléozoïques au Nord avec les argiles du compartiment Sud. Vers l'Ouest elle se divise en plusieurs accidents

successifs, tandis que vers l'Est elle se prolonge dans le paléozoïque rejoignant ainsi l'accident de Tizit n'Test. (Hsissou et al. 2002).

❖ **Aperçu pédologique**

Pour étudier la nature pédologique du bassin versant, ainsi que les variations des types des sols on se base sur des études effectuées dans la région. On constate que ce sont des sols formés sur des alluvions actuelles ou sur des apports éoliens. Leur évolution est limitée par le climat actuel aride et par leur érosion hydrique ou éolienne, qui rajeunit ou dégrade ces sols (respectivement par l'apport ou le décapage). Ces sols d'apport alluvial se répartissent sur les terrasses actuelles de l'oued Souss et ses affluents. Leur texture est sablo-limoneuse dans les horizons de surface, avec des horizons plus argileux à partir de 20-50 cm. Ce sont des sols provenant d'altérations de roches, et donc formés de matériel importé d'amont par les ruissellements.

Des sols halomorphes sont répartis sur les terrasses aval et les zones d'épandage des eaux de crues de l'oued Issen, qui draine un permo-trias argileux, gypseux et salifère.

- Les sols colluvions du piémont, leur richesse est en fonction de la nature minéralogique (limon superficiel ou profond, cailloutis plus au moins abondants).
- Les sols alluviaux, dans les vallées, généralement profonds riches en éléments fins, faciles à travailler.
- Les sols de terrasse sur croûte calcaire ou graveleuse.

- Les sols alluviaux sur horizon sableux, argileux. Soumis à une forte insolation et à des précipitations brutales.

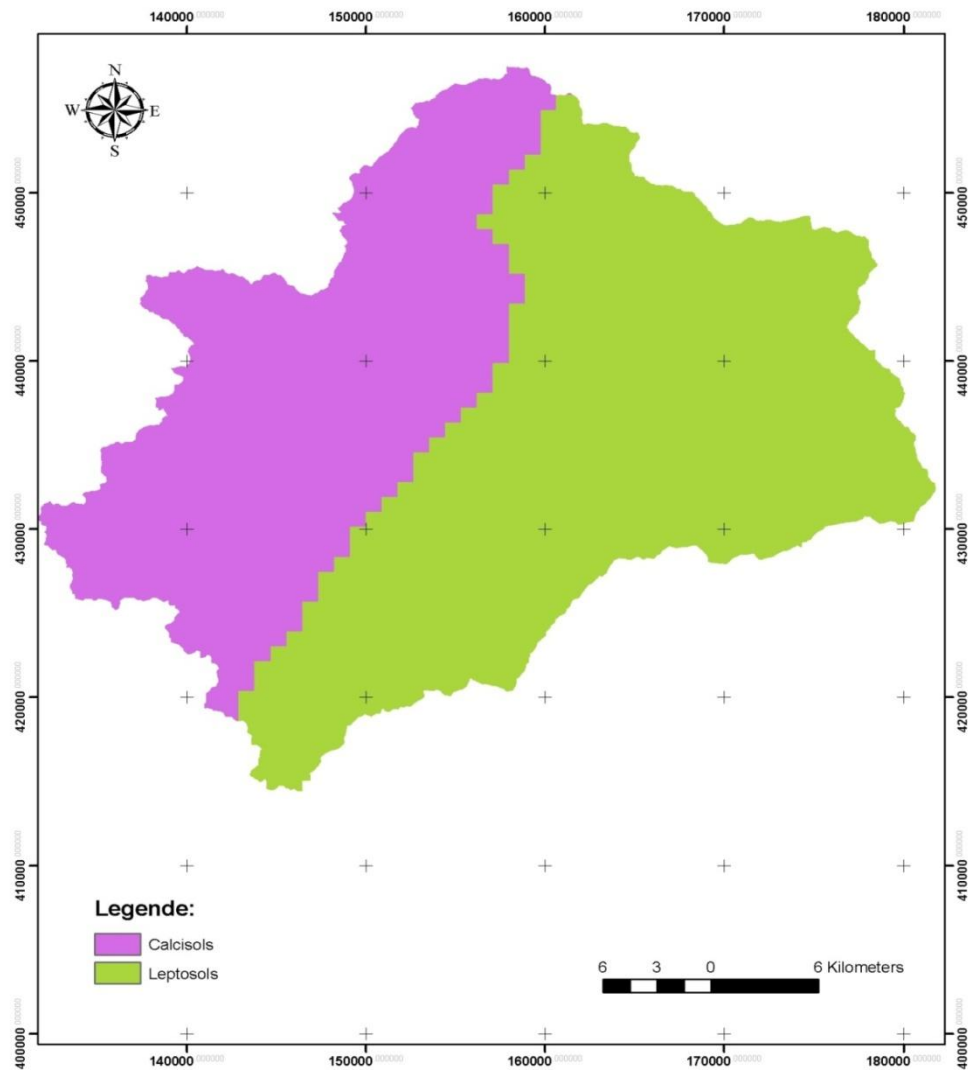


Figure 8: la carte des types du sol du bassin d'Aguenza

CHAPITRE II : CONTEXTE CLIMATOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT

Le climat de la zone d'étude est en relation direct avec l'éloignement des cotes méditerranéennes et l'atlantique et aussi avec le contexte générale du climat du pays qui influencé par l'anticyclone des acores. Et le climat chaud et saharien.

Ce chapitre sera focalisé sur les variables qui donnent le contraste spatio-temporel, des précipitations et des températures. C'est aussi par l'analyse mensuelle et annuelle que l'étude a été réalisée sur la base des données

I- Pluviométrie

Les précipitations forment un paramètre hydrologique de grande importance dans le fonctionnement d'un bassin versant. Elles désignent toutes les eaux météorologiques qui tombent sur la surface de la terre sous déférent forme (liquide et solide). Elles sont provoqué par un changement de températures et de pression.

I-1- Précipitations moyennes annuelles

L'analyse de l'histogramme des précipitations moyenne annuelle permet de distingué un maximum au niveau de l'année 1996 et 2002 et le minimum en 1992.

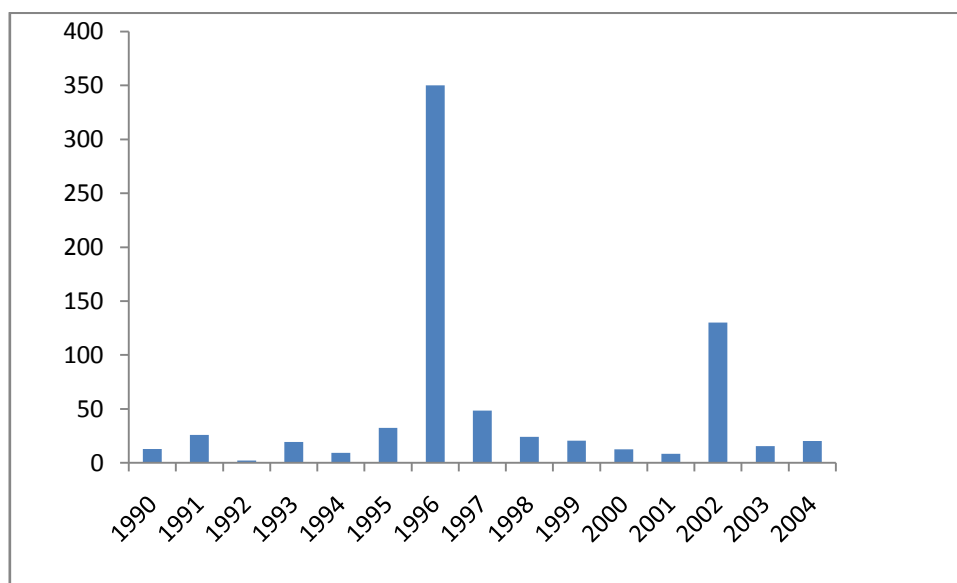


Figure 9 : Variation des précipitations annuelle de station Aguenza

La moyenne arithmétique des pluies annuelles, abattues sur le bassin, de 1990 à 2004, est de l'ordre de 64,62mm. La variation des hauteurs de précipitations est, ici aussi, importante. Les deux valeurs extrêmes s'étalent de 140 mm en 2004, à 350.2, mm en 1996, nous distinguons aussi une période de haute pluviosité annuelle, de 1996, suivie d'une période de pluviosité médiocre.

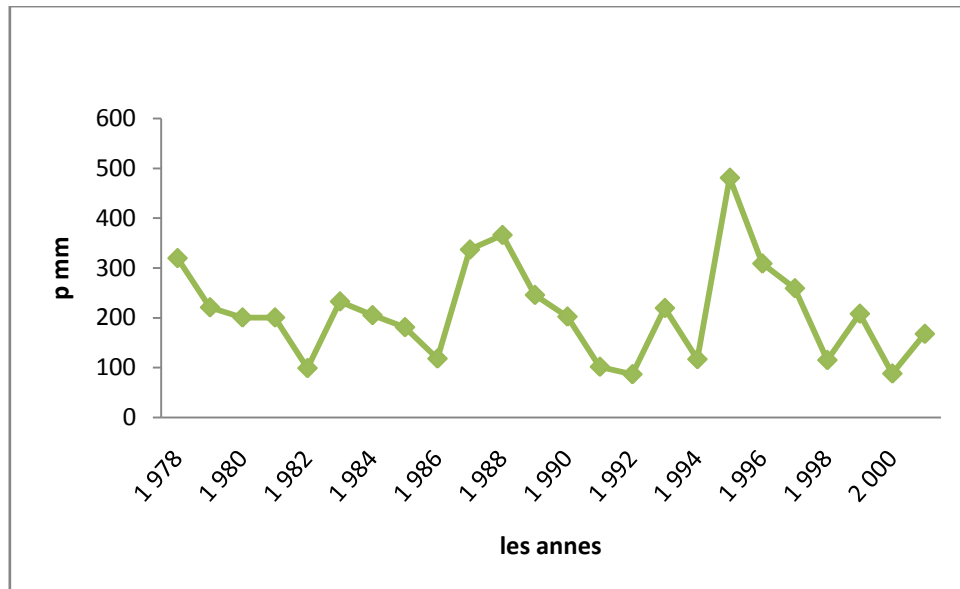


Figure 10 : Variations des précipitations annuelles à la station d'Ageunza

L'analyse du diagramme montre une variation irrégulière de précipitations annuelles avec une moyenne de 17,7 mm. Il s'agit donc d'un régime pluvial à deux pics, l'un d'automne – hiver et l'autre du printemps. La station d'Ageunza présente une pluviométrie assez importante. Les données s'étalent sur une période allant de 1978 à 2000/01 avec un maximum de 650.9 mm en 95/96 et un minimum de 47.2 mm en 82/83 et dont le module annuel est 247 mm.

II-2- Précipitations mensuelles

Cette étude permet de connaître la répartition des pluies au cours de l'année. C'est ce qu'on appelle le régime pluviométrique.

Au niveau du station d'Ageunza la variation des pluies moyenne mensuelles est représenté dans la figure (11) sous forme de diagramme.

Ce diagramme montre 60% de pluviométrie mensuelle est concentrée durant la période pluvieuse qui s'étale entre le mois d'octobre jusqu'à mai. On remarque que les valeurs

moyennes mensuelles maximales sont enregistrées au mois novembre tandis que les valeurs minimales sont enregistrées dans les mois de juillet.

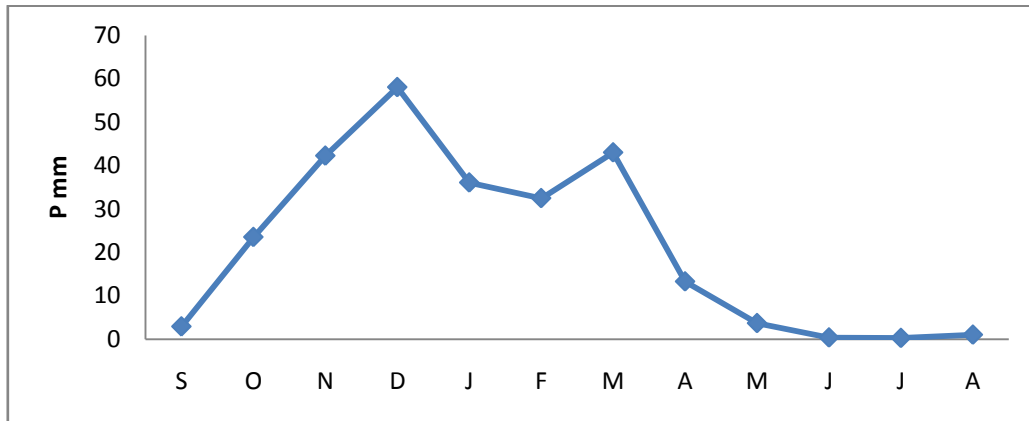


Figure 11: variation des précipitations mensuelles à la station d'Aguenza.

a - Température

L'étude du facteur température, constitue une étape primordiale pour caractériser le contexte climatique d'un bassin versant. La combinaison de ce facteur aux précipitations, permet de contrôler plusieurs paramètres du cycle de l'eau surtout, les indices climatiques et l'évapotranspiration.

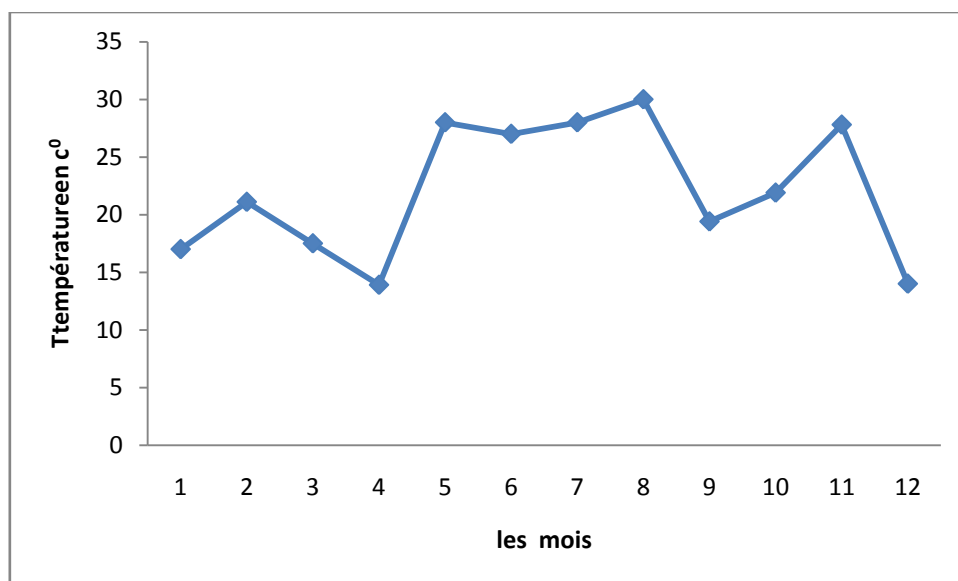


Figure 12 : Variation des températures mensuelles

L'analyse de la figure donne une première estimation concernant la répartition des mois chauds et de mois froids. Les mois de décembre, janvier, février et mars constituent les mois plus ou moins froids ; par contre le juin, juillet, août et septembre caractérisant la saison chaude. Les variations temporelles des températures sont en relation avec les caractéristiques climatiques des saisons. Par contre les variations spatiales sont en relation avec les caractéristiques géographiques.

b - L'évaporation

Le terme d'évaporation désignera l'ensemble des phénomènes qui transforment en vapeur par un processus spécifiquement physique, l'eau apportée par les précipitations et la renvoient dans l'atmosphère. On associe souvent à cette évaporation le phénomène de transpiration, qui est une évaporation biologique effectuée par les plantes, lesquelles par leurs racines, vont puiser dans le sol l'eau nécessaire à leur développement et à leur vie.

Les mesures relatives à la partie aval, sont fournies par la station d'Issen-pont située à 142 m d'altitude et à 40 km d'Agadir; elle couvre une dizaine d'années de 1968 à 1977. L'évaporation moyenne annuelle est ici de 2120 mm. A l'échelle mensuelle, les évaporations potentielles s'établissent comme suit :

Tableau 2: *Evaporations mensuelles à la station d'Issen-pont*

Mois	Evaporation en (mm)
Janvier	184
Février	210
Mars	162
Avril	137
Mai	119
Juin	127
Juillet	154
Août	166
Septembre	146
Octobre	203
Novembre	216
Décembre	218

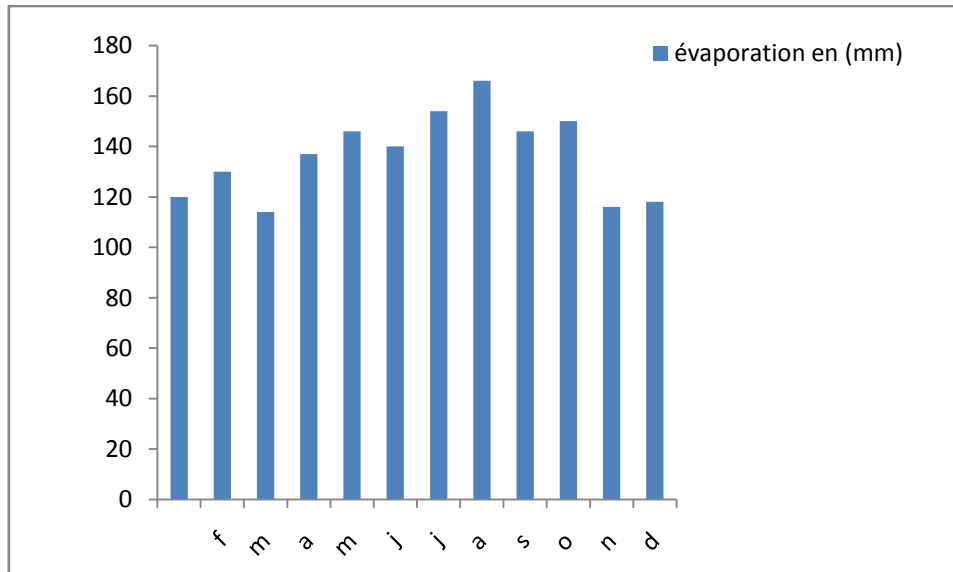


Figure 13: Hauteurs des évaporations mensuelles au Piche dans le pont d'ssen

Les valeurs de l'évaporation calculés pour la zone d'études (Issen), montrent le mois de mai est plus clément que le mois de juin, qui comporte souvent des jours de Chergui. L'évaporation atteint son maximum pendant la saison sèche, de mai à septembre.

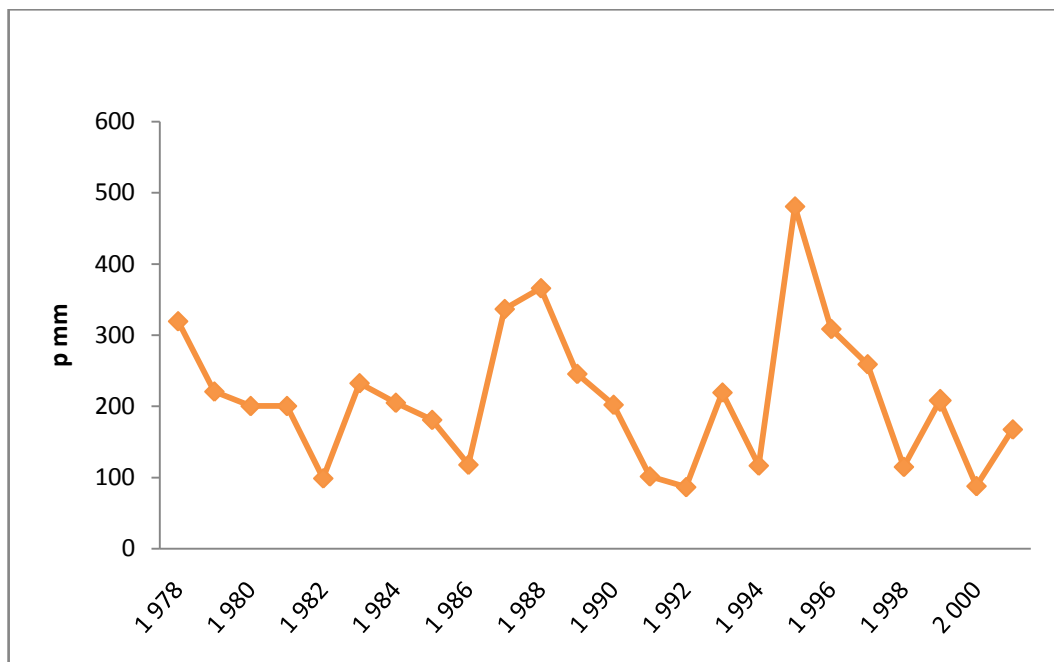


Figure 14: variation des précipitations annuelles à la station d'Aguenza

III - Les données hydrométriques

III -1- Les débits moyens annuels

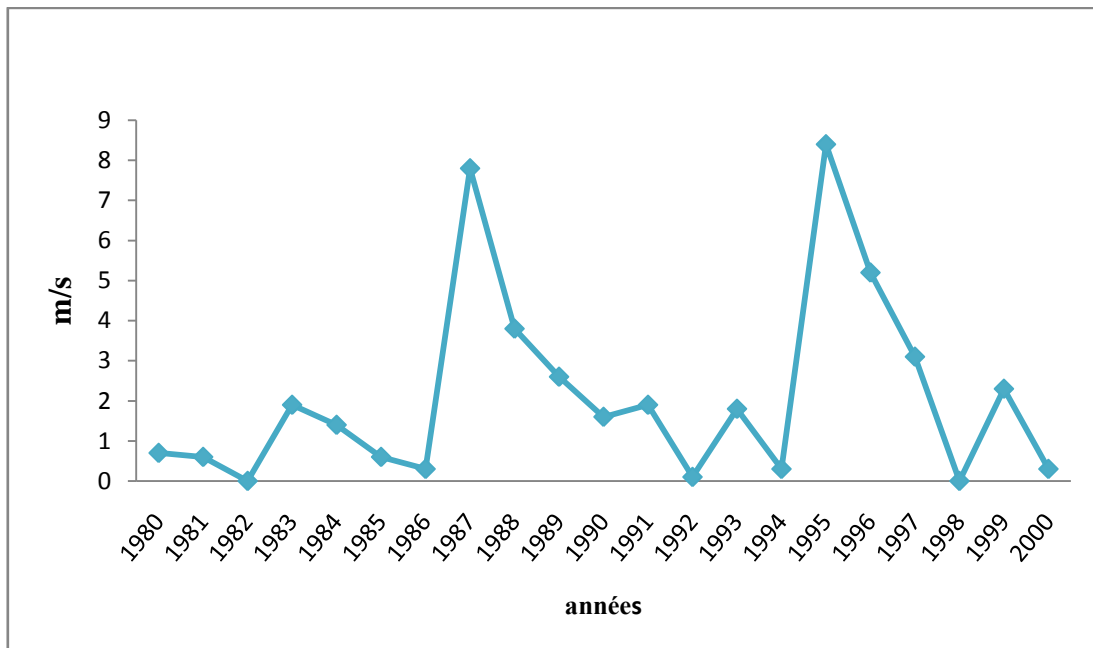


Figure15: Variation des précipitations mensuelles à la station d'Aguenza

III -2- Les débits moyens mensuels

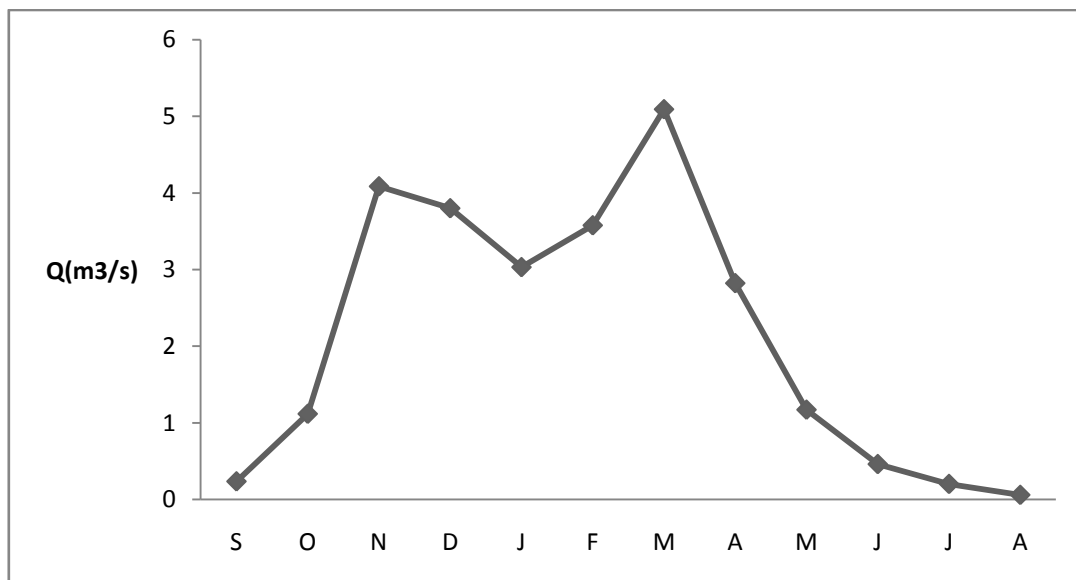


Figure 16 : Variation des débits moyens mensuels (en m^3/s) à la station d'Aguenza

L'observation de l'hydrogramme montre que le débit augmente de Septembre à Novembre où il atteint $4,1 m^3/s$, puis il diminue légèrement en Décembre et Janvier, ensuite il augmente

rapidement pour atteindre sa valeur maximale de $5,1 \text{ m}^3/\text{s}$ en Mars ; enfin il diminue jusqu'à atteindre sa valeur minimale de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ en Août. Donc on a un régime pluvial à deux pics : l'un en automne, hiver et l'autre au printemps

III -3- Les débits moyens saisonniers

A partir des valeurs moyennes mensuelles inter – annuelles, on a calculé les écoulements moyens saisonniers exprimés en m^3/s pour chaque station.

La lame d'eau écoulee augmente de l'automne à l'hiver ou elle atteint une valeur maximale de $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ puis diminue jusqu'en été avec un minimum de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$.

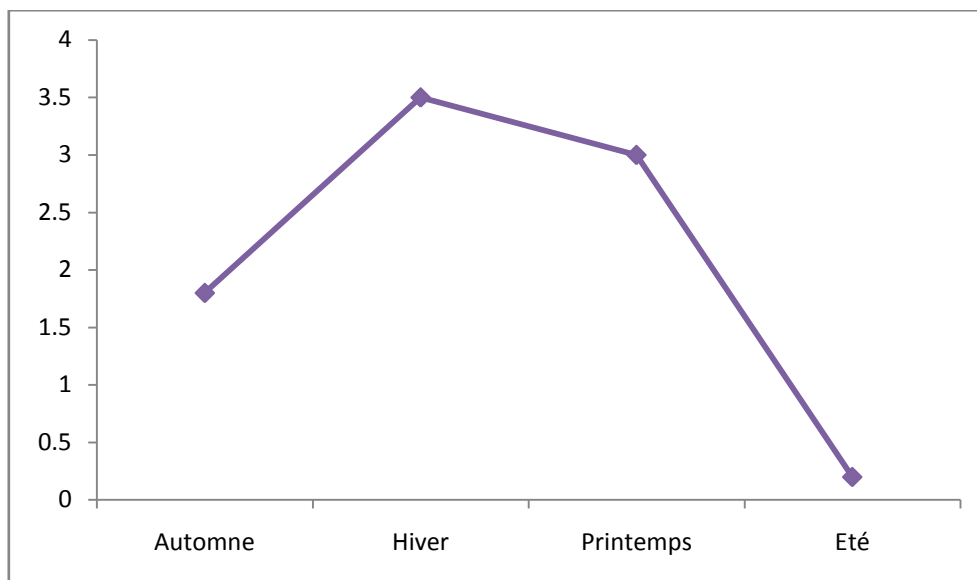


Figure 17: Variation saisonnière des débits (en m^3/s) à la station d'Aguenza

CHAPITRE III : LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

Cette partie donne un aperçu sur la modélisation en générale et de savoir les différents modèles existants dans le domaine de la modélisation des ressources en eau dans les bassins versants. Le Dictionnaire de l'environnement donne pour le mot "modèle" la définition suivante : " Représentation simplifiée, relativement abstraite, d'un processus, d'un système, en vue de le décrire, de l'expliquer l'intérêt de la modélisation débits-pluies

I - La modélisation pluie-débit

Un modèle est une représentation simplifiée d'un système complexe. En hydrologie le système étudié est le bassin versant. Les modèles pluie-débit y figurent la transformation de la pluie en débit à des fins scientifiques et/ou opérationnelles.

Tout modèle est caractérisé par ses variables d'entrée, sa structure (ensemble des compartiments du système étudié et relations qui les lient) et ses variables de sortie. Dans le cas d'un modèle pluie-débit, les entrées sont toujours les données de précipitations puis, selon la complexité du modèle, des données d'évapotranspiration potentielle (ETP), de température, de nature des sols, de végétation, de topographie, d'altitude... Le débit à l'exutoire du bassin versant constitue la sortie du modèle qui intéresse l'hydrologue opérationnel. Le modèle est parfois capable d'en produire d'autres: cartes d'humidité des sols, flux de polluants. (Nicolas ECKERT.2002).

I-1-Intérêts de la modélisation pluie-débit

Connaître le débit des rivières est, c'est une évidence, de première importance pour la gestion de la ressource en eau et la maîtrise du risque hydrologique. La modélisation pluie-débit constitue un substitut efficace à des mesures de débit fastidieuses, quand elles sont possibles.

Les applications des modèles pluie-débit sont multiples : simulations de crues à court terme, prévision d'étiages, prédétermination des crues et dimensionnement d'ouvrages, mise en évidence du non stationnarité du comportement hydrologique sous l'effet du changement climatique ou de l'évolution de l'occupation du sol... De plus les modèles pluie-débit permettent d'allonger les délais de prévision par rapport aux modèles débit-débit.

I-2- Mise en œuvre du modèle conceptuel.

I-2-1-Principe

L'utilisation d'un modèle conceptuel sur un nouveau bassin versant jaugé nécessite

- une série de données aussi représentatives que possibles des entrées dans le système
- une estimation initiale des paramètres et variables d'état du système ;
- une méthode d'optimisation des paramètres ;
- un contrôle de la qualité de l'ajustement du modèle au système.

I-2-2-Phase de calage et optimisation des paramètres

L'optimisation des paramètres consiste à déterminer les valeurs qui minimisent une fonction critère préalablement choisie. Celle-ci est souvent la somme des carrés des erreurs entre débit observé et débit simulé sur la période de calage. Notons que de nombreux auteurs préconisent une analyse multicritère (Dunn et Colohan, 1999).

La phase de contrôle s'effectue sur une période différente de la phase de calage. Le critère de contrôle le plus commun est celui de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970) dérivé des moindres carrés.

$$CR(\%) = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{cal,i}})^2} \right]$$

$Q_{obs,i}$ et $Q_{cal,i}$ sont les débits observés et calculés au pas de temps i , $\overline{Q_{cal,i}}$ est la moyenne des débits observés sur la période considérée. Le modèle est parfait pour $CR=100$. Il est supposé être acceptable pour $CR > 70$. Ce critère présente l'inconvénient de donner beaucoup

d'importance aux forts débits. Par conséquent, si l'on ne s'intéresse pas spécifiquement aux crues on applique le critère de Nash appliqué aux racines carrées des débits.

I-2-3-Initialisation et phase de mise en route du modèle

L'initialisation du modèle implique des choix arbitraires et pas forcément judicieux concernant les valeurs des états du système. C'est pourquoi on laisse le modèle tourner durant une durée correspondant à un cycle hydrologique avant de prendre en compte les résultats de la simulation dans le critère de qualité (Eckert, 2002)

I-3-Efficacité d'un modèle pluie-débit

Il est très difficile de définir ce qu'est l'efficacité d'un modèle pluie-débit et de l'évaluer de façon satisfaisante (Rango et Martinec, 1994; Perrin et al., 2001). Il est généralement admis que l'efficacité d'un modèle consiste uniquement en sa capacité à reproduire les débits mesurés en phase de contrôle, évaluée par le critère de Nash. Cela est justifiable d'un point de vue opérationnel mais moins d'un point de vue scientifique puisque les modèles pluie-débit ont prouvé en de maintes occasions leur capacité à obtenir de bons résultats en attribuant des valeurs physiquement incorrectes aux différents paramètres, voire même à s'accommoder de données d'entrée présentant un biais systématique (Andréassian et al., 2001).

II -Les modèles hydrologiques

Depuis l'apparition de la modélisation hydrologique, de nombreux modèles ont été développés en fonction des objectifs recherchés, sur base de différents choix d'élaboration, menant à une multitude de modèles exploitables dont chacun est doté de champs d'application et de validité restreints. Dans cette partie l'étude sera focalisée sur les différentes modèles hydrologiques et leur classification.

La figure si dessous donne une classification des modèles hydrologiques en se basant sur ces critères.

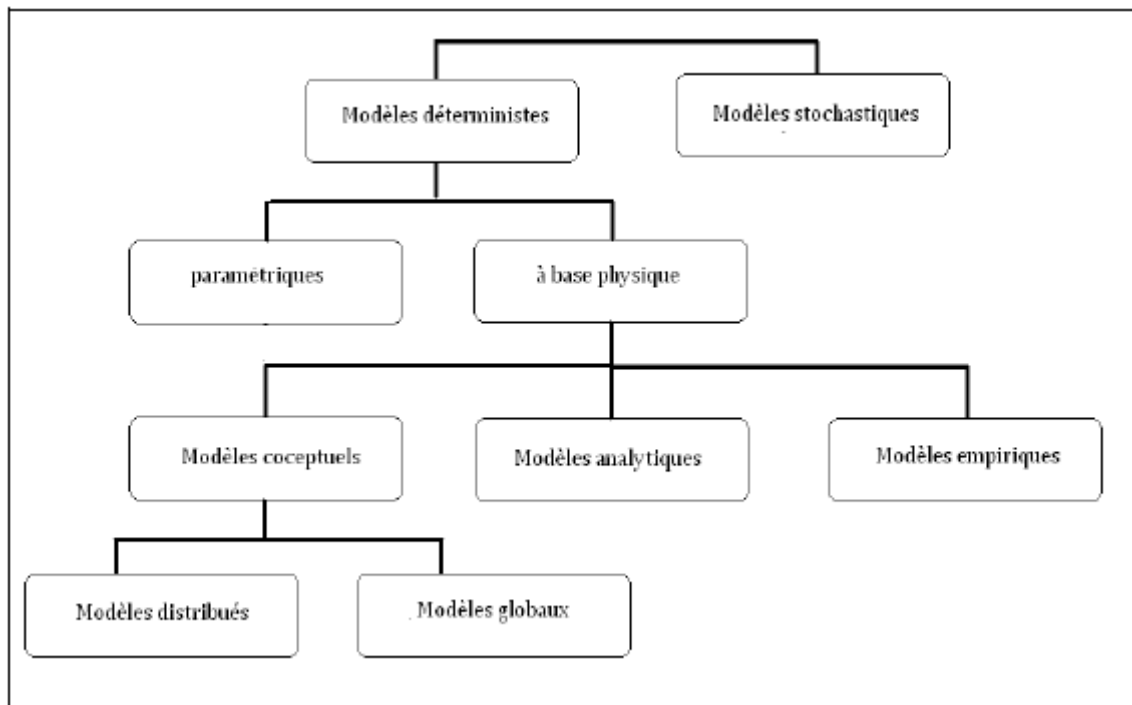


Figure 18: Classification des modèles hydrologiques

II-1- Modèles déterministes

Un modèle est dit déterministe (par opposition à stochastique) si aucune de ses grandeurs n'est considérée comme aléatoire, c'est à dire résultant soit de l'observation soit de grandeurs reconstituées. La plupart des modèles hydrologiques sont déterministes. Ces modèles associés à chaque jeu de variables de forçage, de variables d'état et de paramètres, une valeur de réalisation unique des variables de sortie (il s'agit essentiellement des débits simulés à l'exutoire d'un bassin versant).

II-1-1- Modèles paramétriques

Les modèles paramétriques sont les modèles incluant des paramètres dont la valeur doit être estimée par calage.

II-1-2- Modèles à base physique

Le modèle à base physique est basé uniquement sur des équations de la physique, et ne comportant idéalement aucun paramètre. Il n'existe pas de modèle à base physique au sens strict en hydrologie. L'importance de l'hétérogénéité spatiale dans la réponse hydrologique des bassins versants rend cependant difficile voire impossible l'utilisation de tels modèles. La précision spatiale des données disponibles en particulier concernant les types de sols et leurs profondeurs n'est pas suffisante. Dans la pratique, les profondeurs et les conductivités

moyennes des sols représentatifs de sous parties du bassin versant doivent être évaluées par calage.

II-1-2-1- Modèles empiriques

Les modèles empiriques reposent sur les relations observées entre les entrées et les sorties de l'hydro système considéré .Ils expriment la relation entre variables d'entrée et de sortie du système (relation pluie débit) à l'aide d'un ensemble d'équations développées et ajustées sur la base des données obtenues sur le système. Un modèle empirique ne cherche pas à décrire les causes du phénomène hydrologique considéré de ni à expliquer le fonctionnement du système, le système est vu comme une boîte noire.

II-1-2-2- Modèles analytiques

Ce sont des modèles pour lesquels les relations entre variables de sortie et les variables d'entrée ont été établies par analyse de séries de données mesurées. L'exemple type est celui des modèles linéaires : les paramètres de ces modèles sont liés aux coefficients de corrélation entre les variables. Notons que l'analyse des données peut conduire au choix de relations non linéaires entre les variables.

II-1-2-3- Modèles conceptuels

Les modèles conceptuels considèrent en générale le bassin versant, après quelques simplifications du cycle de l'eau, comme un ensemble de réservoir interconnectés. Ce type de modèle reproduit donc au mieux le comportement d'un système, plutôt qu'il n'avance d'explications causales sur son comportement. Le modèle CEQUEAU est un parfait exemple de modèle conceptuel

II-1.2.3.1- Modèles globaux

Dans un modèle global le bassin est considéré comme une entité unique. Des relations empiriques (issues de l'expérience) relient les entrées et les sorties sans chercher à se rapprocher d'une loi physique.

Les modèles globaux offrent à l'utilisateur un choix très attractif, car il présente une structure très simplifiée, il ne demande pas trop de données, faciles à utiliser et à calibrer. La représentation du processus hydrologique est très simplifiée. Il peut souvent mener à des résultats satisfaisants, et spécialement si l'objectif majeur est la prévision d'une crue.

II-1.2.3.2 - Modèles spatialisés

Actuellement plusieurs modèles spatialisés correspondent à des différentes écoles hydrologiques sont en phase avancée de développement. En principe, les modèles spatialisés sont des modèles qui utilisent des entrées et des sorties ou les caractéristiques des bassins versants sont distribuées dans l'espace. La spatialisation peut être arbitraire ou basée sur des divisions morphologiques naturelles (découpage en sous bassins) ou hydrologiques (aires contributives).

Nous pouvons classer les modèles spatialisés en trois grands types :

- Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés ;
- Modèles physiques spatialisés ;
- Modèles physiques conceptuels semi-spatialisés.
- Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés

Les modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés représentent un grand progrès sur les modèles globaux quand il s'agit d'analyser le fonctionnement interne d'un bassin. Le bassin versant est discrétisé en unités spatiales (mailles ou sous bassins) considérées comme homogènes, qui se vident les unes dans les autres de l'amont en aval. Ainsi, on a la possibilité de tenir compte de la répartition spatiale des facteurs et de suivre la genèse et la propagation des débits à l'intérieur du bassin. C'est le cas du modèle CEQUEAU et du modèle HEC-HMS.

CHAPITRE IV : MODELISATION HYDROLOGIQUE A TRAVERS (HEC-HMS)

Présentation du modèle HEC-HMS

Le modèle HEC-HMS, est un modèle hydrologique déterministe et conceptuel HEC-HMS (Hydrologic Modeling System). Ce modèle hydrologique a été développé par le « Hydrologic Engineering Center (HEC) » de l'U.S. Army Corps of Engineers (USACE).

Plusieurs versions sont disponibles, nous nous intéressons dans notre travail à la version publique à savoir HEC-HMS 3.5. Le modèle peut être utilisé sur une base événementielle, aussi, le modèle HEC-HMS est conçu pour simuler les processus de précipitations et des ruissellements des bassins versants avec un réseau hydrographique dendritique. Il est conçu pour être applicable pour des régions géographiques variées, pour résoudre un large éventail de problèmes dans ce chapitre sera focalisé sur déférente variables afin de savoir le principe de fonctionnement de modèle aussi les préparations des donnes et en fin la discussions des résulta obtenues.

I - Le débit de base

Le débit de base est le débit initial au début de la simulation. La constante de récession décrit le taux de décroissance du débit de base. C'est la part du débit de base au temps t par rapport au temps t-1. Le seuil est le point de l'hydrographe où le débit de base remplace le débit de ruissellement direct, il est exprimé en proportion du débit de pointe de la crue (USACE, 2010). Ce formalisme donne la possibilité de simuler la contribution du réservoir souterrain au débit avant et après le pic ou les pics de l'événement de crue, et ceci en établissant une relation exponentielle entre le débit à deux temps consécutifs, cette relation est formalisée par l'équation:

$$Q_t = Q_0 \times k^t$$

Où Q_t : le débit au temps t ;

Q_0 : le débit initial ;

K : la constante de décroissance exponentielle.

En effet, avant le pic de l'hydrogramme, et connaissant le débit initial, l'équation ci dessus s'active et commence à reproduire le débit total composé uniquement du débit de base de la rivière, jusqu'au point de début de la crue, depuis lequel ce module agira en parallèle avec le module de la fonction de transfert pour restituer le débit total composé à la fois d'un débit de base en décroissance et d'un débit de surface en forte action.

Ce constat demeure actif jusqu'à un certain point nommé seuil, où l'ampleur de participation dans le débit total se renverse.

II - La fonction de production

De même que pour les averses, la mise en place de cette fonction a été réalisée par le NRCS en coopération, cette fois-ci, avec trois consultants privés à savoir : Horner, Horton et Sherman Cette fonction de production apparue en 1950 et surnommée autrefois la SCS CN est le fruit de plus de deux décennies d'analyses des relations pluies-débits sur des petits bassins. Elle relie la pluie nette participante au ruissellement à trois facteurs fondamentaux : l'occupation du sol, le type de sol et l'humidité antécédente, selon l'équation suivant

$$Pe = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S}$$

Avec : Pe : les précipitations nettes au temps t ;

P : les précipitations brutes au temps t ;

Ia : l'abstraction initiale ;

S : le potentiel maximum de rétention.

Après avoir effectué de nombreuses expériences, le NRCS a proposé une relation empirique supplémentaire liant l'abstraction initiale d'un bassin versant au potentiel maximum de rétention

$$Ia = 0,2 \times S$$

Ainsi, l'équation (1) devient :

$$Pe = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}$$

Pour chaque pas de temps, la pluie nette est la différence de la valeur de Pe au début et à la fin du pas de temps.

L'influence des deux premiers facteurs susmentionnés est estimée par le paramètre CN qui est relié à S par l'équation

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

III - Fonction de transfert

Une fois que les précipitations en excès sont connues, elles sont transformées en ruissèlement direct. La plateforme HEC-HMS dispose de plusieurs fonctions de transfert : hydrogrammes unitaires de Clark, Snyder et SCS, hydrogrammes définis par l'utilisateur, transformation de Modclark et onde cinématique. Parmi ces méthodes, l'hydrogramme unitaire de Clark est fréquemment utilisé pour une modélisation événementielle. Cette méthode est particulièrement efficace pour reproduire des hydrogrammes complexes, dans des bassins présentant une topographie et une occupation des sols variés (Sabol, 1988).

La méthode de l'hydrogramme unitaire de Clark représente 2 processus ; la translation et l'atténuation. La translation est basée sur un histogramme synthétique temps-surface avec un temps de concentration Tc. L'histogramme représente la superficie du bassin qui contribue à l'écoulement à l'exutoire en fonction du temps. L'atténuation est modélisée par un réservoir linéaire. Le débit sortant moyen du réservoir pendant une période t est donné par :

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1}$$

Avec I_t , le débit entrant dans le réservoir au temps t, C_A , C_B , des coefficients calculés avec la relation :

$$C_A = \frac{\Delta t}{S_t + 0,5\Delta t}$$

Et :

$$C_B = 1 - C_A$$

Δt est le pas de temps de calcul, ici 1 heure.

Les paramètres requis par la méthode de Clark sont donc :

Le temps de concentration, T_c (heures)

Le coefficient de stockage, St (heures)

Ces deux paramètres peuvent être estimés par calibration lorsque des enregistrements de pluie et débit sont disponibles.

Pour étudier le fonctionnement hydrologique de bassin est réalisé en se basant sur les données disponibles au niveau de stations des Aguenza et Amsoul, étant donné que les mesures hydrométriques de ces stations. Nous entreprendrons principalement les débits et leur relation avec les précipitations de ces stations.

Les événements utilisés pour la modélisation de sous du bassin d'Aguenza au pas horaires

Tableau 3: Numérotation des épisodes au niveau de la station d'Aguenza

Episodes	Numéro
21/12/2000 à 23/12/2000	1
06/12/1999 à 11/12/2000	2
10/01/1997 à 08/01/1997	3
13/12/1995 à 17/12/1995	4
17/12/1991 à 23/12/1991	5
28/11/2014 à 28/11/2014	6

Calage du modèle

Le modèle choisi pour mener les simulations est la méthode SCS-CN pour le modèle d'infiltration, la méthode de l'Hydrogramme unitaire de Clark pour le modèle du ruissellement et le modèle de récession pour le débit de base.

L'objectif est de transformer un événement pluvieux (en mm) reçu sur un bassin versant en un hydrogramme (débit en m^3/s) entrant et se propageant dans le cours d'eau. Les hydrogrammes de crues de calage, obtenus par le modèle, sont représentés comme suit :

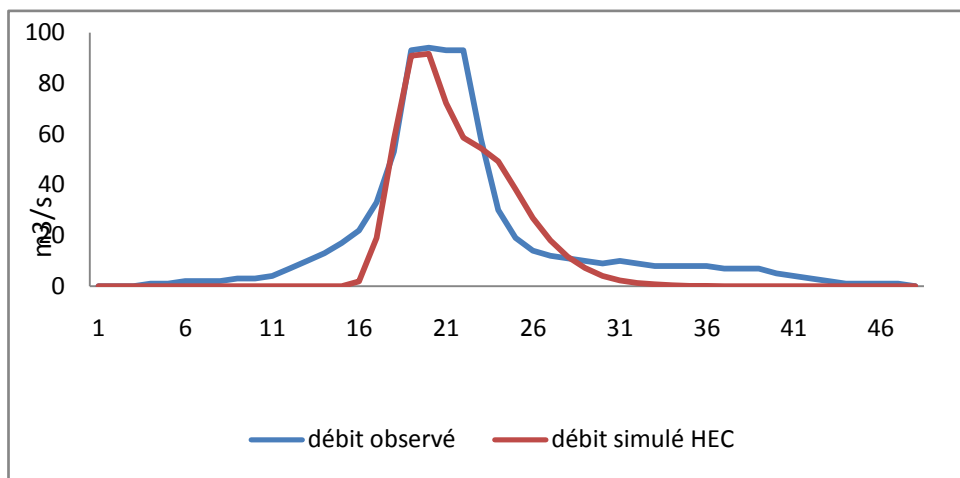
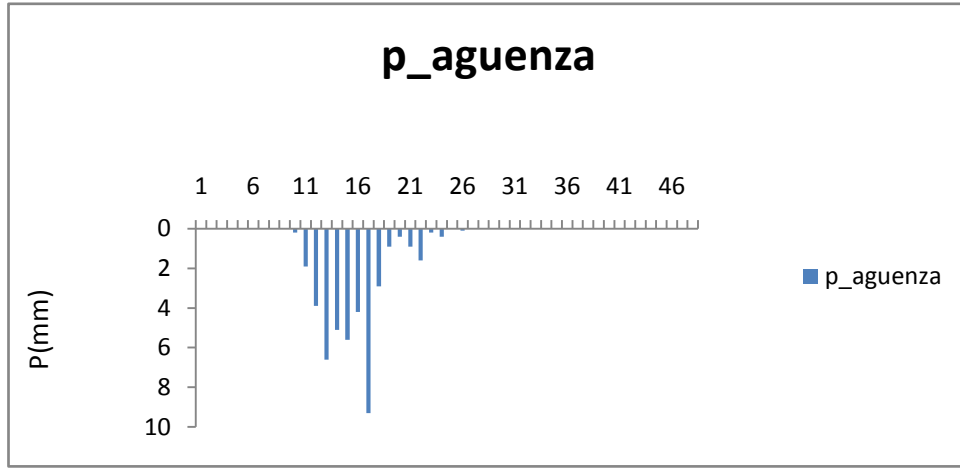


Figure 19 : Hydrogramme de crue de l'événement de 2000 dans la station d'Aguenza

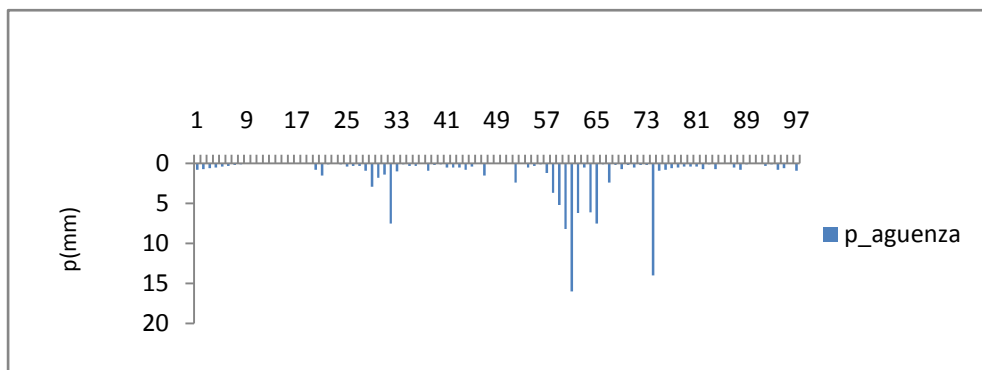


Figure 20: Hydrogramme des crue d'événement de 1995 dans la station d'Aguenza

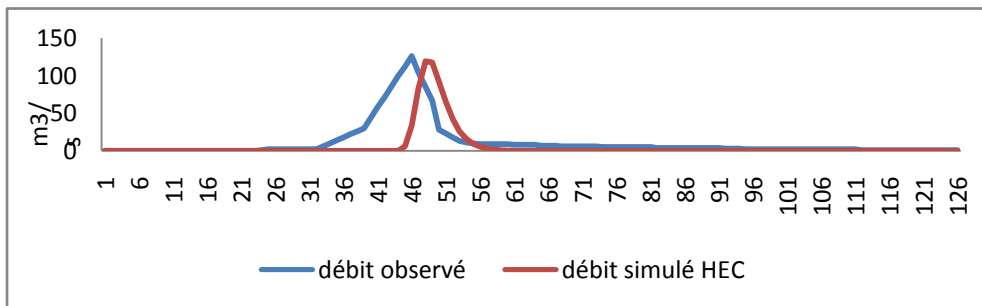
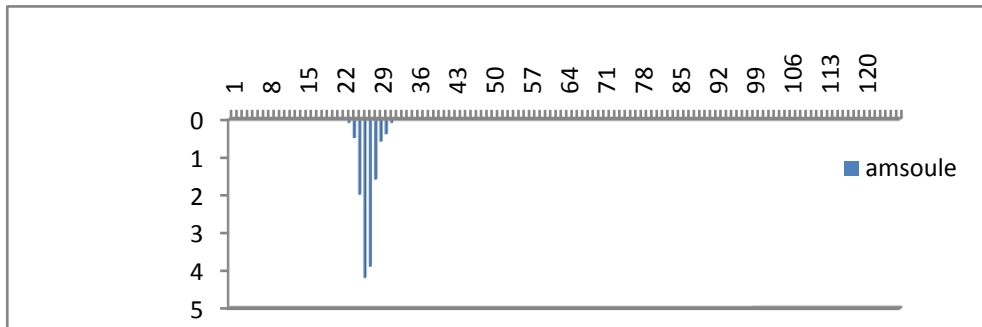
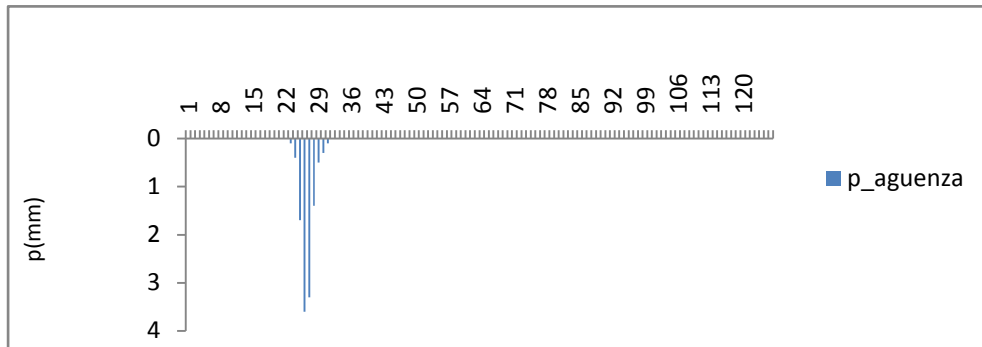
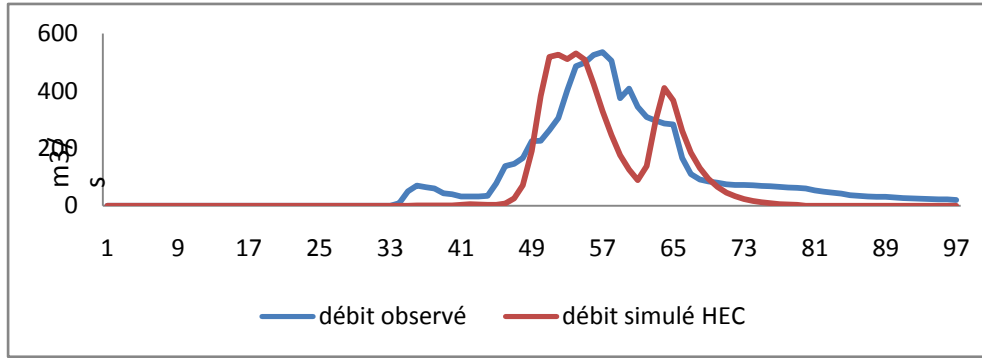


Figure 21: Hydrogramme des crues du premier événement de 1995 dans la station d'Aguenza

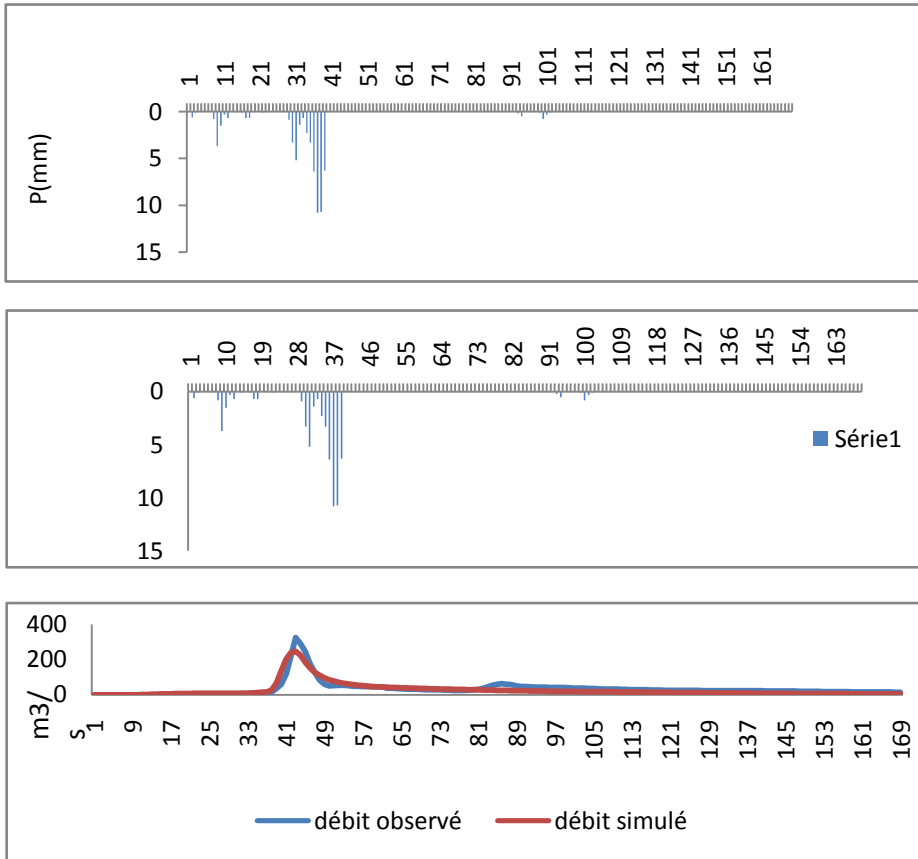


Figure22 : Hydrogramme des crue d'événement de 1996 dans la station d'Aguenza

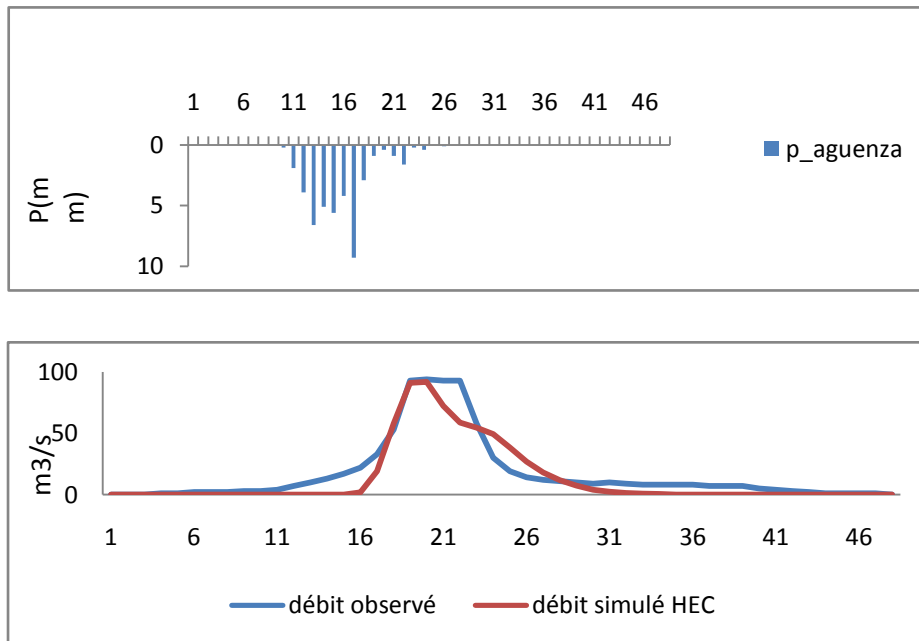


Figure 23 : Hydrogramme des crue d'événement de 2003 dans la station d'Aguenza

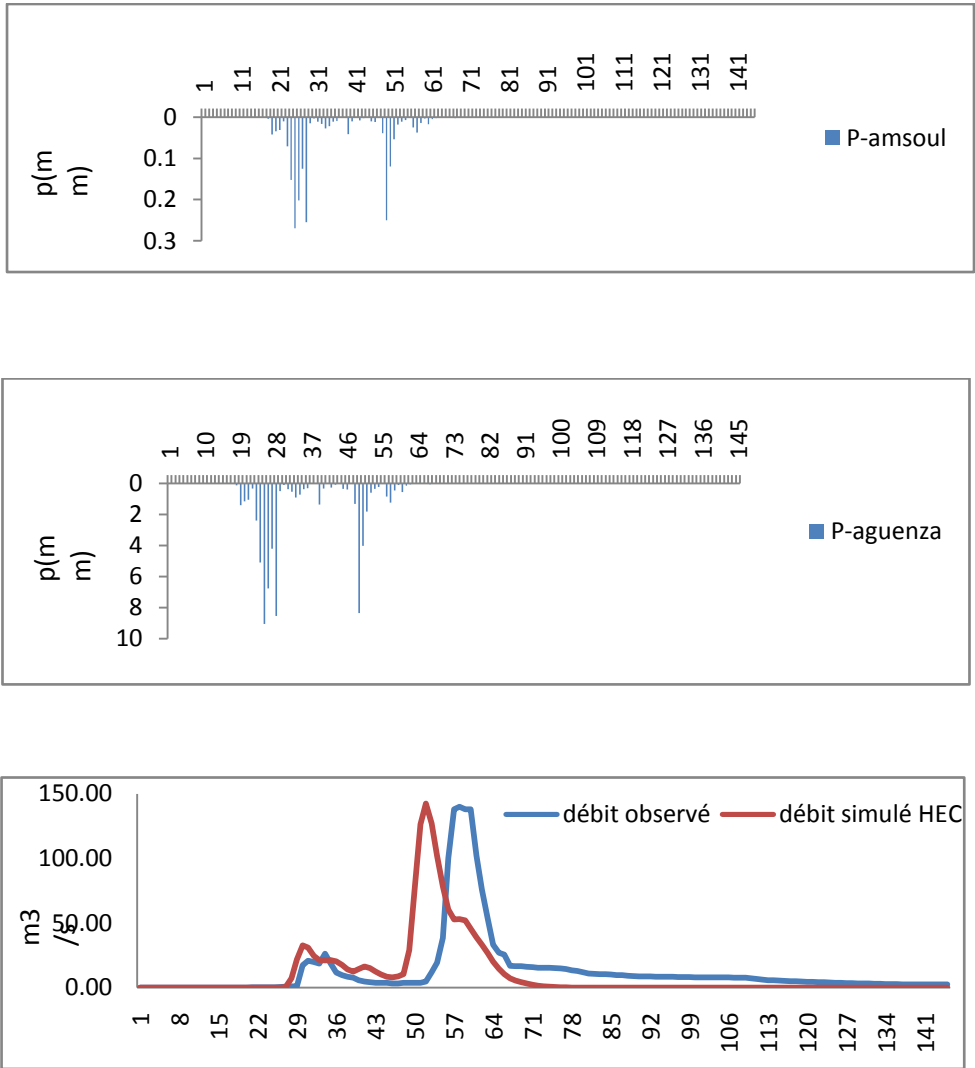


Figure24: Diagrammes des crues du première événement de 2004 dans la station d'Aguenza

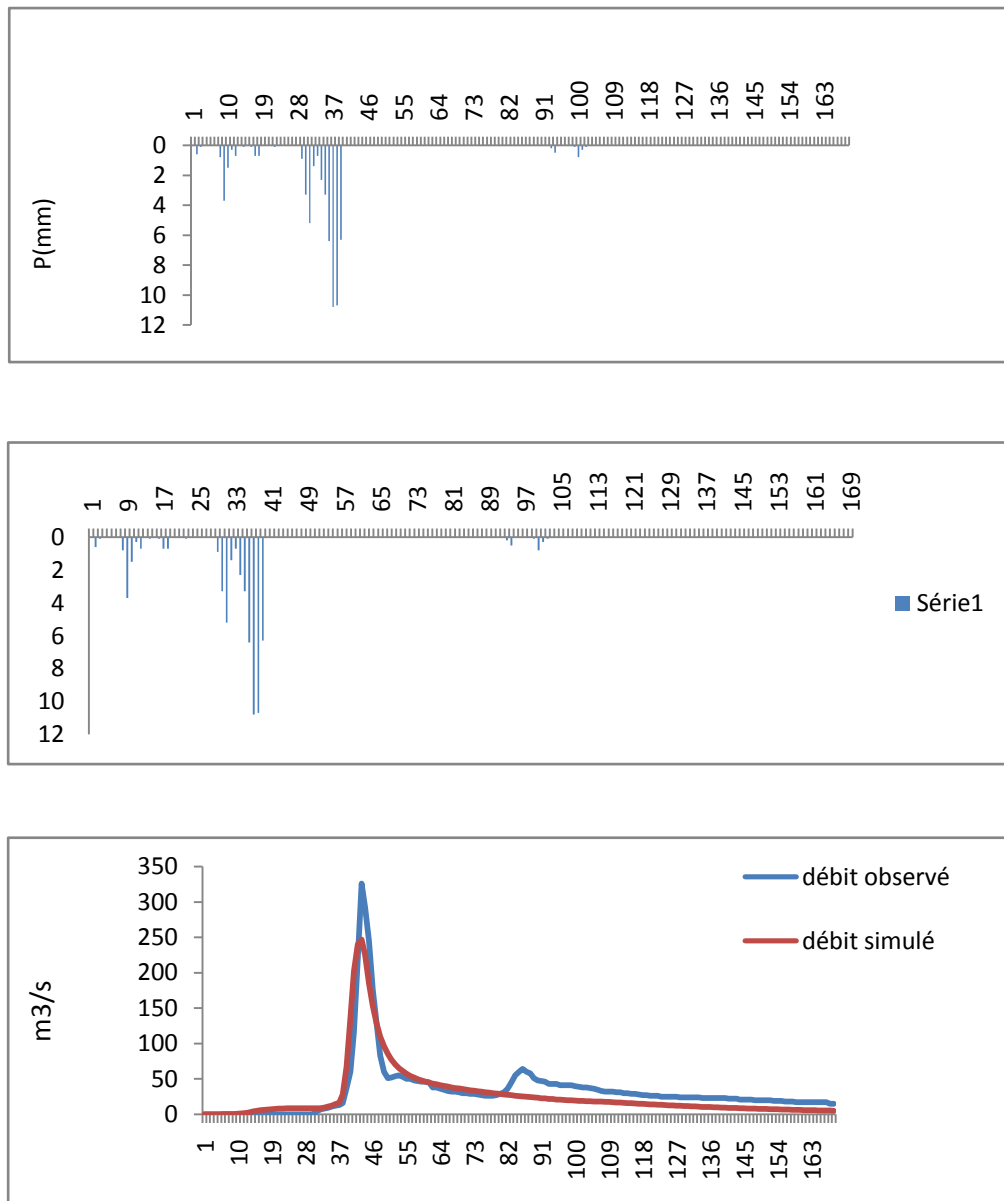


Figure 25 : Hydrogrammes des crue d'événement de 1988 dans la station d'Aguenza

Après calage, l'écoulement modélisé reconstitue bien celui observé pour les 6 événements. La modélisation des petites "oscillation" du débit avant le pic de crue principal est assez médiocre mais le modèle donne de bons résultats sur le pic de crue principal.

La synthèse du calage du modèle sur la base des événements est représentée dans le tableau ci-dessous (Tab.4):

Pour le modèle d'infiltration, le paramètre à analyser est le numéro de courbe (CN), les paramètres du modèle de récession sont fixés par calibration et examen visuel préalable sur

les évènements. Pour le modèle du ruissellement, l'analyse sera faite sur le temps de concentration (T_c) et le coefficient de stockage (S_t), les paramètres sont calibrés pour reproduire au mieux chaque épisode de crue.

Tableau 4 : Les caractéristiques des événements

<i>Les dates</i>	<i>Curve number</i>	<i>temps de concentration (H)</i>	<i>Storage coefficient (H)</i>	<i>Nash</i>	<i>EAM</i>	<i>EQM</i>
11/12/2000	64	3	3	0.80	0.60	0.882
06/12/1999	80	3	3	0.65	0.49	0.830
10/01/1996	69	3	2	0.86	0.39	0.578
13/12/1995	40	3	5	0.81	0.10	0.57
12/12/1991	95	3	3	0.83	0.40	0.62
12/12/2014	64	3	3	0.74	0.20	0.65

Les paramètres du modèle de récession ne sont pas supposés changer d'un épisode à l'autre car ils sont déterminés par les propriétés physiques du bassin.

Les paramètres de récession introduits sous la plate-forme HEC-HMS:

- Le débit de base ;
- La constante de récession R_c
- Le seuil T_d

La constante de récession est une valeur qui présente le taux de décroissance du débit de base, par exemple une valeur de 0.7 signifie qu'en absence de précipitation, le débit provenant de l'écoulement de base à un instant donné représente 70% de la valeur observée. La moyenne de Nash $0,78166667 = 78,1666667\%$.

Le calage des périodes continue

Les graphiques ci-dessous reprennent les hydrogrammes sortants calculés et observés à la station d'Ageunza et ansoul selon les pluies simulées.

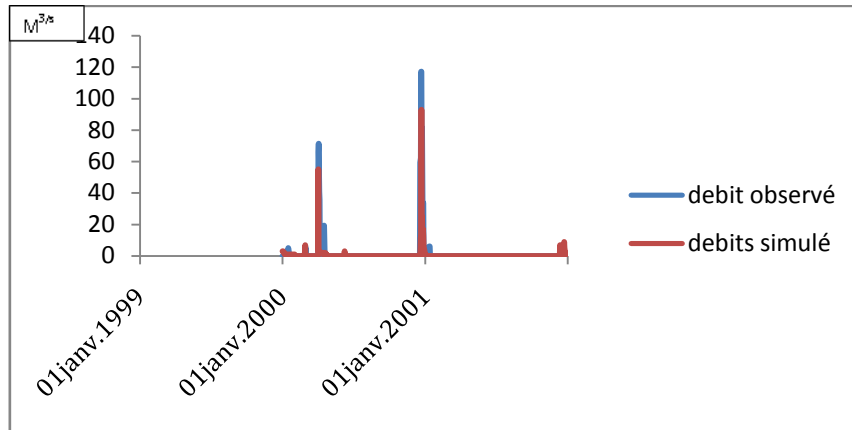


Figure 26 :Hydrogramme de crue de la période 1999 à 2001

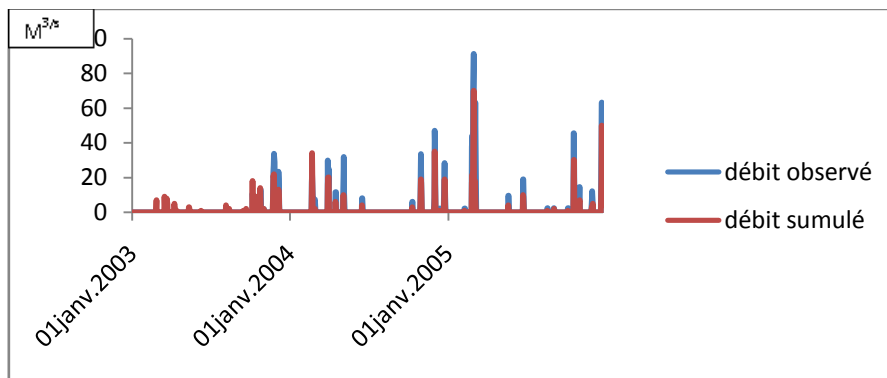


Figure 27: Hydrogramme de crue de la période 2003 à 2005

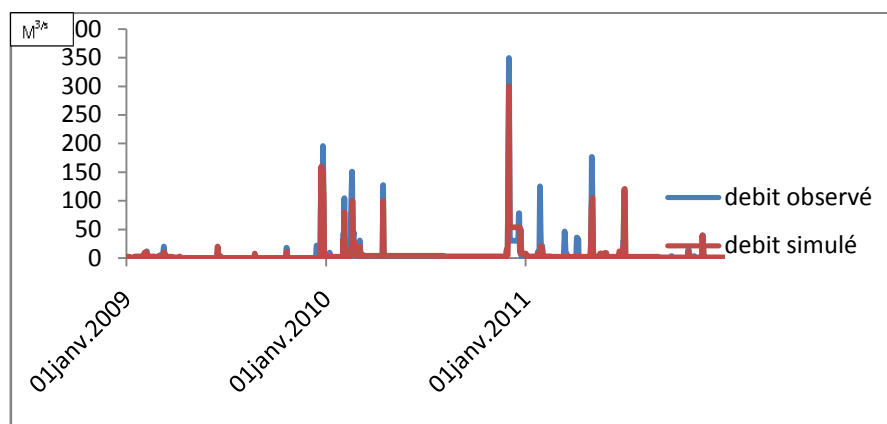


Figure 28 : Hydrogramme de crue de la période 2009 à 20011

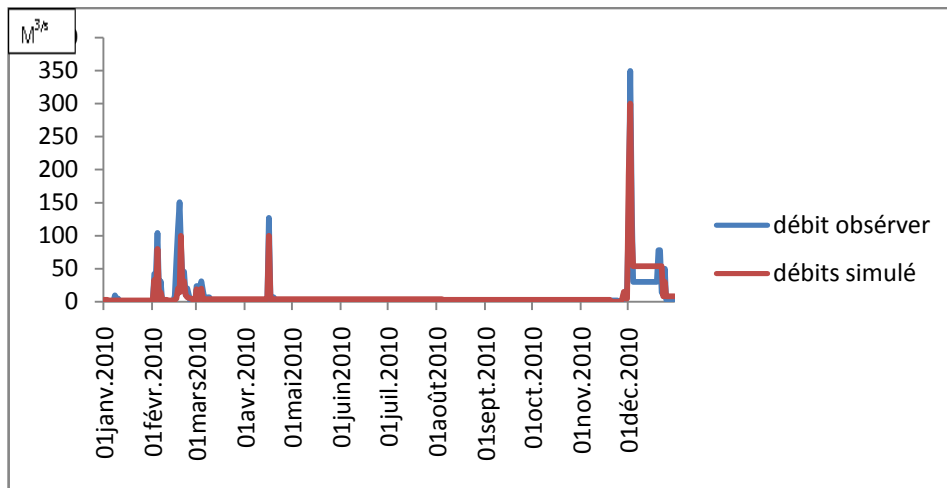


Figure 29 : Hydrogramme de crue de la période 2010

D'après cette station et les témoignages (reconnaissance de terrain), les crues les plus marquantes au droit des zones d'enjeux sont :

Les Crues de la période 1999 à avril 2001 pic 65 M³/s : on constate que l'hydrogramme des Débits calculé est plus proches à celle d'observé avec une extrapolation entre les deux. Cette crue a été la moyenne en terme de débit de pointe, est sous estimé par le modèle.

Les périodes d'étiage ne sont bien représentées tout au long de notre période de simulation en raison de l'erreur des données surtout pendant les années 1999 à 2000

Les crues de la période 2003 à 2005

L'analyse de cette période des crues a montré que au début de cette période, on observe une période d'étiage pendant l'année 2003, dû à la faible précipitation moyenne mensuelle, le débit du point est sous estimé par le modèle. On note aussi un décalage entre le débit calculé et le débit observé d'un mois à l'autre au niveau des pics ayant des valeurs plus grandes.

Les crues 2009 à 2011 (Pic à 290.0 m³/s) : Cette crue a été la plus importante en termes de débit de pointe. La période d'étiage est bien représentée tout le long de cette période de simulation.

Tableau 5 : Les caractéristiques des périodes de calage

Les dates	Curve number	temps de concentration(H)	Storage coefficient (H)	Nash	EAM	EQM
1999-2001	63	3	3	0.67	0.10	0.752
2003-2005	72	3	3	0.60	0.59	0.610
2009-2011	69	3	2	0.68	0.29	0.478
2010	65	2	2	0.62	0.39	0.56

Conclusion

À travers cette étude portant sur l'analyse des graphes sur les caractéristiques de l'événement des crues du bassin versant d'Aguenza, nous pouvons déduire que :

La variation des débits simulé par le modèle HEC-HMS ce caractérisant par une fluctuation pendant les différent périodes de pas horaires pendant la simulation. Dans cette station on observe que les quatre mois de juin, juillet et août reçoivent des précipitations faibles et par conséquences les valeurs des pics sont aussi faibles.

On note que pour les événements des crues pour les périodes continues sur trois ans. Le paramètre à analyser est le numéro de courbe (CN), les paramètres du modèle de récession sont fixés par calibration et examen visuel préalable sur les évènements. Quant au modèle du ruissellement, l'analyse sera faite sur le temps de concentration (T_c) et le coefficient de stockage (S_t), les paramètres sont calibrés pour reproduire au mieux chaque épisode de crue.

Tableau 6: Valeur du critère d'évaluation du modèle retenu pour la station et d'Aguenza.

Date	Nash
20/01/2010	67,30%

Les résultats de la simulation montrent que par l'ajustement des paramètres pour le numéro de courbe, les paramètres de l'hydrogramme unitaire Clark sont transformés pour chaque événement, et les données d'entrée de précipitations peuvent être utilisées pour adapter la réponse simulée à l'écoulement observé.

CHAPITRE V : LA MODALISATION HYDROLOGIQUE A TRAVERS LA PLATEFORME PAR GR2M

Présentation de logiciel GR2M

La modélisation pluie-débit au pas de temps mensuelle a déjà fait l'objet d'un sujet de DEA proposé par l'équipe hydrologie de l'unité QHAN (Cemagref, Antony) sous le thème de

« Mise au point d'un modèle de transformation pluie-débit au pas de temps mensuelle »

(Bouabdallah, 1996). Cette tentative de modélisation est relativement sommaire et sujette à différentes critiques : initialisation non convaincante des paramètres, architecture relativement compliquée. Cependant, elle a permis de présenter deux modèles GR1A et GR2A, respectivement à 1 et 2 paramètres. Ils se présentent comme des dérivés du modèle au pas de temps mensuel, à deux paramètres, GR2M (Makhlouf, 1994). Ce dernier dérive lui même du modèle journalier GR3J (Edijatno, 1991)

Ce chapitre sera focalisé sur l'application de modèle GR2M sur notre zone, basé sur des données disponibles des pluies et des débits et de températures caractéristiques de la zone,

I -Structures de GR2M

Nous utilisons une version semi-globale du modèle GR2M (Makhlouf et Michel, 1994). Il s'agit d'un modèle hydrologique conceptuel global qui fonctionne au pas de temps mensuel. Il contient deux paramètres libres à caler X1 et X2 : X1 intervient dans la partie « fonction de production » alors que X2 intervient dans la partie « fonction de transfert ». La fonction de production traduit la transformation proprement dite de la pluie en lame d'eau disponible au ruissellement ; la fonction de transfert traduit le mouvement de cette lame d'eau, accumulée au sol lors de la précipitation, vers l'exutoire du bassin versant. Ces deux paramètres sont déterminés pour l'ensemble du bassin versant.

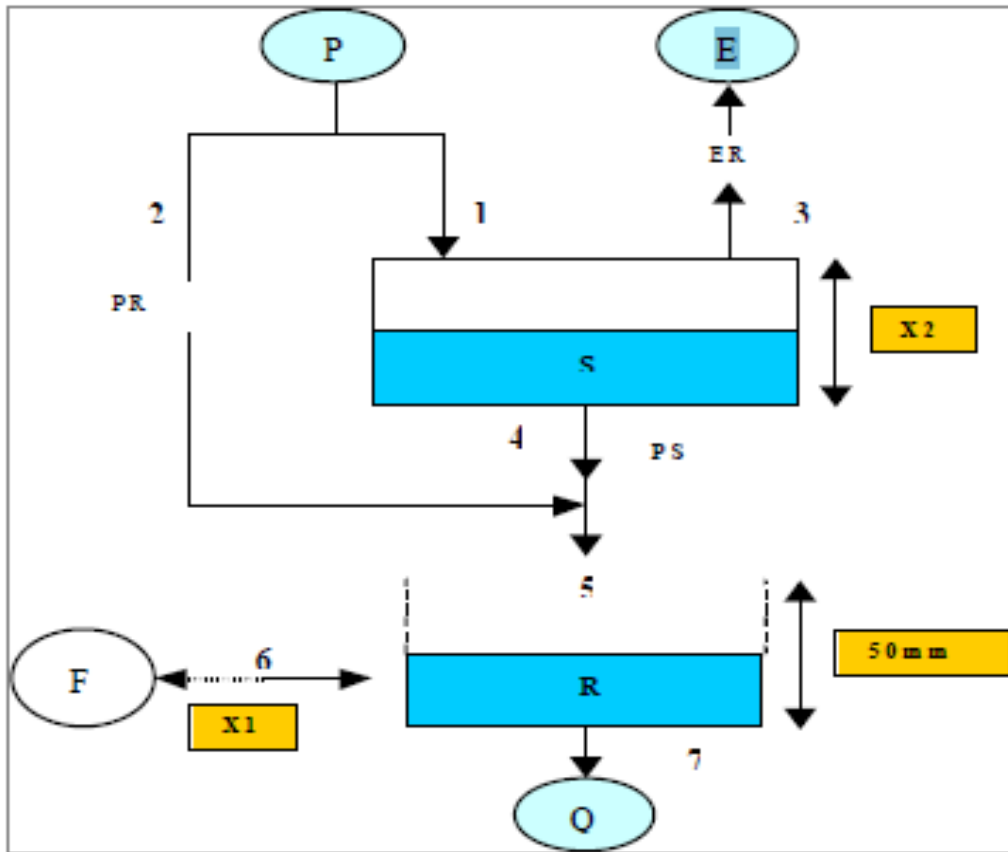


Figure 30 : Schéma conceptuel du modèle GR2M. (Makhlouf, 1994)

II - Les paramètres des modèles

II-1- Fonction de production

Fonction de production : passer de la quantité de pluie tombée à la quantité qui va mettre à ruisseler, (en fonction des caractéristiques des sols : perméabilité, saturation ...)

II-2-Fonction de transfert ou « routage »

La fonction de transfert se traduit seulement par un réservoir de routage dont le fonctionnement est semblable à ceux des pas de temps journalier et mensuel. Ce réservoir est aussi alimenté par une partie de la pluie nette. Il s'agit de la fraction de la pluie nette qui n'a pas servi pour alimenter le réservoir sol.

III- Approche Méthodologie

La méthode adoptée dans ce travail comporte 4 étapes suivantes :

III-1- Calcul des pluies de bassin

Parmi les méthodes généralement proposées pour calculer la moyenne des pluies mensuelles à partir de l'ensemble de mesures ponctuelle obtenue à plusieurs stations pluviométriques sur le bassin ou à proximité, on trouve la moyenne arithmétique qui consiste à calculer la moyenne arithmétique des valeurs obtenues à la station étudiée.

III-2- Calcul de l'ETP moyenne

L'évapotranspiration ou l'évapotranspiration de référence, la quantité maximale d'eau susceptible d'être transformée en vapeur d'eau par l'évaporation de l'eau du sol et la transpiration des végétaux pendant un temps considéré et pour un terrain donné

L'ETP moyenne mensuelle est calculée à partir des données de températures de la station disponibles par la méthode de Thornthwaite qui a été établie dans les stations de Aguenza, dont on dispose des données nécessaires.

- L'analyse de la sensibilité du modèle et des choix des jeux de données d'entrée du modèle;
- Le calage et la validation croisés du modèle avec les données d'entrée choisies à l'étape précédente ;
- La simulation des écoulements des bassins en utilisant les jeux de paramètres validés.

III-3- Optimisation du modèle

L'optimisation (ou calage) des paramètres du modèle nécessite la définition d'une fonction quantifiant l'erreur du modèle, c'est-à-dire la distance entre les débits observés et ceux simulés. Le critère quantitatif utilisé pour mesurer la qualité des ajustements réalisés par le modèle est celui proposé par Nash et Sutcliffe (1970), appelé Nash dans l'usage courant en hydrologie, et défini de la manière suivante :

$$Nash(Q) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Où $Q_{obs,i}$ est le débit observé au pas de temps i , $Q_{calc,i}$ est le débit simulé au pas de temps i , Q_{obs} est le débit moyen observé, N est le nombre total de pas de temps de la période de simulation.

Le critère de Nash permet d'évaluer la qualité des résultats des simulations en comparaison des observations, à la fois en terme de phase et d'intensité (Nash et Sutcliffe, 1970). Il varie de $-\infty$ à 1. Le modèle ajusté est d'autant meilleur que cette fonction est proche de 1. Un critère de Nash inférieur à 0,6 est l'indication d'un modèle défailant sur le bassin versant étudié (Ardoin-Bardin, 2004).

IV-Application du modèle GR2M et simulation des débits mensuels

Nous avons appliqué le modèle GR2M avec les paramètres préalablement sélectionnés sur l'ensemble de la série pour simuler les débits à partir de pluie moyenne mensuelle obtenue par la méthode arithmétiques et l'ETP moyenne mensuelle. Ces trois données d'entrée ont permis d'étendre les séries de débits mensuels du bassin de 1999 à 2001 Pius 2002 à 2004. Les figures (27, 28 et 29) donnent les hydrogrammes observés et simulés. Les débits mensuels maximums calculés sont bien situés dans le temps mais avec parfois des erreurs d'amplitude. Pour les étiages par contre, on observe une bonne superposition des hydrogrammes des débits observés et calculés.

En outre, cette modélisation permettra de constituer une banque de données à partir de laquelle on pourra étudier le régime des cours d'eau en termes d'analyse fréquentielle des crues.

La valeur du critère de Nash en calage est, de façon générale, bonne pour notre zone car supérieure à 0,62 (tab.8 ; ci-dessus). Il en va de même pour le critère de Nash en validation, à quelques exceptions.

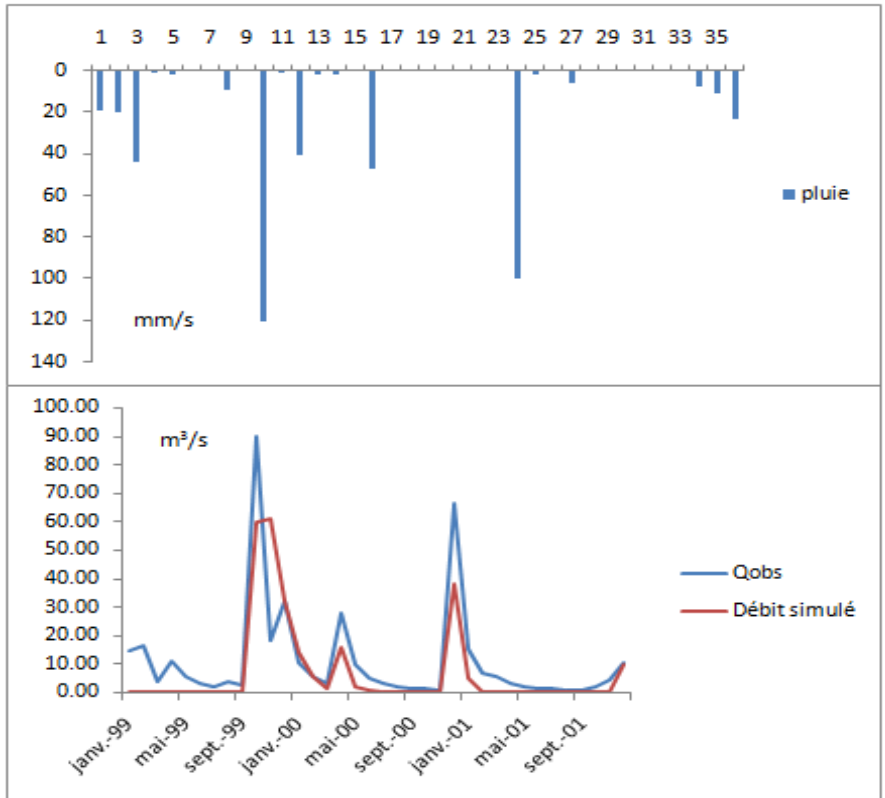


Figure 31: Le diagramme de crue de la période 1999 à 2001

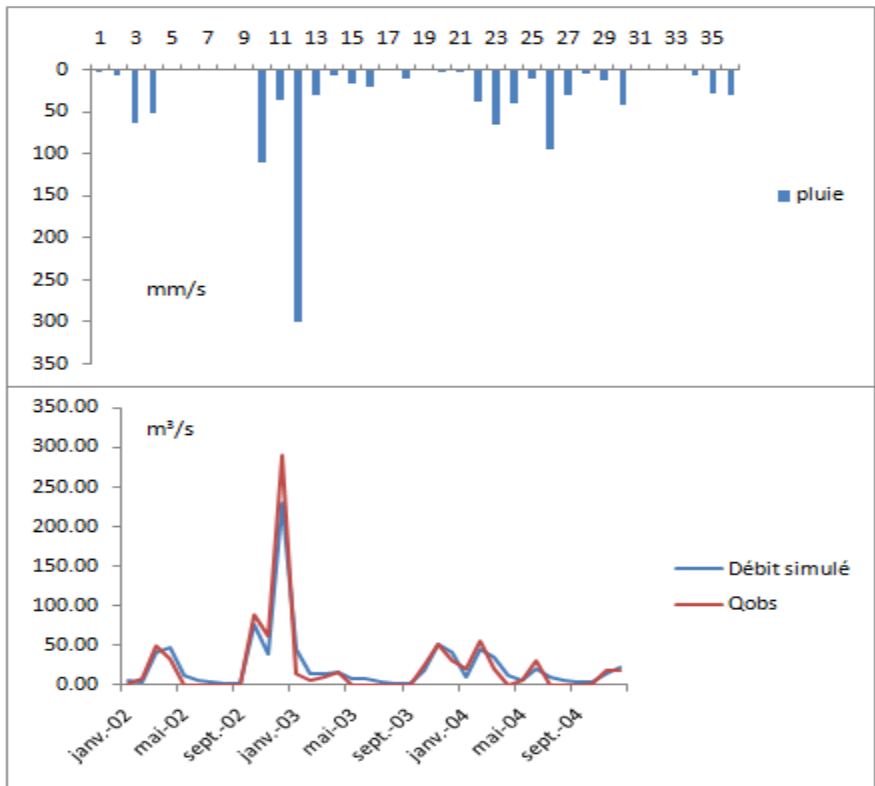


Figure 32 : Le diagramme de crue de la période 2002 à 2004

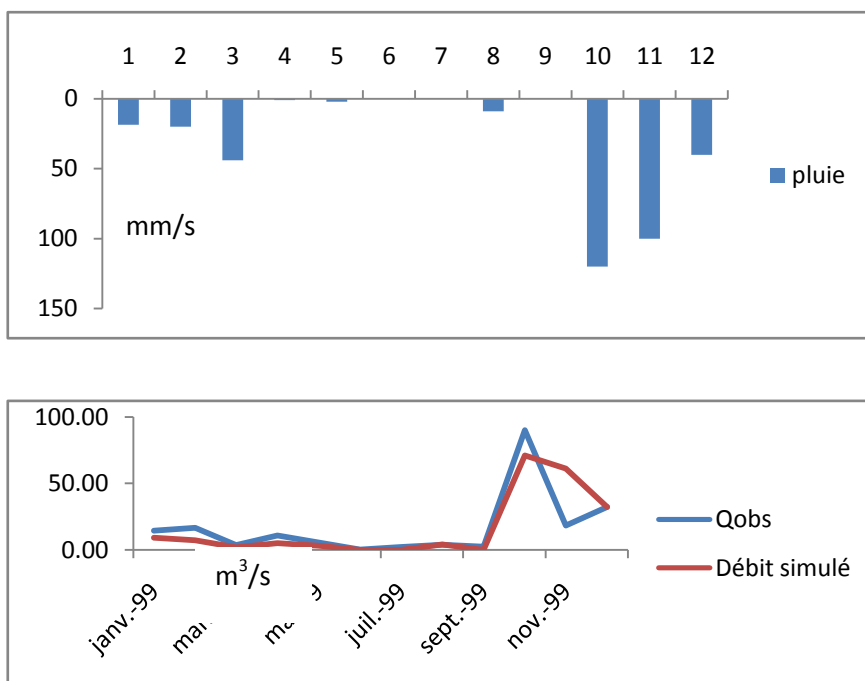


Figure 32: Le diagramme de crue de la période janvier1999 à novembtre1999

Tableau 7 : Synthèse du calage du modèle au station d'Aguenza

Période de calage	janvier1999-décembre 1999	Janvier 1999a décembre 2001	Janvier2002 décembre 2004
X1 calé	0.5	0.2	0.3
X2 claté	1	0.9	0.5
Nash de calage	0.63	0.64	0.77
Moy de nash	0.68		

Tableau 8 : Valeur du critère d'évaluation du modèle retenu pour la station

Période de calage	janvier1999-décembre 1999
X1 calé	0.5
X2 calé	1
Nash de calage	0.63

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le bassin versant d'Aguenza est étendu sur une superficie de 1129 km² et un périmètre de 190 km. Ce bassin versant a une forme allongée et sa largeur plus grande que sa longueur. L'hypsométrie du bassin est caractérisée par des variations des altitudes du Nord vers l'Ouest. Les précipitations moyennes mensuelles recueillies dans la station montrent des valeurs maximales enregistrées au mois de décembre et alors que les valeurs minimales sont enregistrées au mois juillet et août. Le régime hydrologique du bassin peut être considéré comme un régime typique méditerranéen, caractérisé par l'abondance pluviale avec de moyens débits hivernaux. Dans cette optique, ce travail été réalisé dont le but principale est la limitation des risques d'inondation dans la plaine de Souss. En général, ce que nous avons traité reste utile dans la mesure où les résultats que nous avons obtenus, permettent aux ingénieurs et aux hydrologues de prendre la décision sur le choix du modèle adéquats qui permet de traité la transformation de pluie en débit dans les stations

La modélisation hydrologique pourrait par ailleurs être complétée par une modélisation hydraulique pour élaborer des scénarii de plaine d'inondation pour différents volumes de crues, afin d'améliorer la gestion du risque d'inondation. (en cours de réalisation).

- Une meilleure connaissance des précipitations lors des crues, en particulier leur répartition spatiale, permettra d'augmenter la performance du modèle.
- L'estimation des précipitations reçues à l'échelle du bassin pourra être améliorée grâce à l'installation de pluviomètres supplémentaires, en particulier dans les zones des plus importants reliefs.

BIBLIOGRAPHIE

ANDREASSIAN, V., PERRIN, C., MICHEL, C., USART-SANCHEZ, I., and LAVABRE, J., (2001): Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models, *J. Hydrol.*, 250, 206–223, 2001.

AUDARD-VINCENDON B., (2010). Apport des modèles météorologiques de résolution kilométrique pour la prévision des crues rapides méditerranéennes. Thèse En vue de l'obtention du Doctorat de l'Université de Toulouse.

Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau, (2011). Guide simple d'utilisation du logiciel "Watershed Modeling System", Direction de la recherche et de planification de l'eau ;

Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau, (2007). Situation hydrologique du bassin du sous-souss-massa, Agence du bassin hydraulique du Souss-Massa, Agadir;

Direction de la recherche et de la planification de l'eau. (2006). Etude de révision du plan directeur d'aménagement intègre des ressources en eau de bassin du Souss-Massa, Collecte des données diagnostic et évaluation des ressources en eau et état de leur utilisation ;

DUNN et COLOHAN. (1999). DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie pour obtenir le doctorat.

ECKERT N., (2002). Prise en compte des couverts neigeux temporaires au sein d'un modèle pluie débit.

HSISSOU Y., MUDRY J., BOUCHAOU L., CHAUVE P., MANIA J., (2002). Use of chemical tracers to study acquisition modality of mineralization and behaviour of unconfined groundwater under semi-arid climate: the case study of the Souss plain (Morocco). *Environ. Geol.* 42:672-680.

MICHEL M. C., (2005). Quantification des incertitudes des débits calculés par un modèle pluie-débit empirique. Mémoire de Master 2^{ème} année.

MOUELHI S., (2006). Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Pour obtenir le grade de Docteur de l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts

PAYAN J. L., (2007). Prise en compte de barrages-réservoirs dans une modèle globale pluie débit. Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'Engref.

RAHDOU M. et TOUNDAOUI F., (2008). Contribution à l'hydrologie en zone semi aride, bassin d'Issen en amont du barrage Abdelmoumen (haut Atlas Occidental) ;

Kaçaroglu F, Gunay G (1997). Impacts of Human Activities on

MAKHLOUF Z. et MICHEL C., (1994). Etude du calage, de la validation et des performances des réseaux de neurones formels à partir des données hydro-climatiques du bassin versant du Bandama blanc en Côte d'Ivoire. Thèse En vue de l'obtention du DOCTORAT

SAIDI E. M., (1995). Contribution à l'étude hydrologie profonde et superficielle du bassin du sous. Thèse Pour obtenir le grade de Docteur.

ZEKOUDA N., (2009). Modélisation des crues de l’oued Ouahran pour la gestion intégrée des risques d’inondation. Pour obtenir le doctorat.

WÉBOGRAPHIE

- **http://www.water.gov.ma/index.cfm?gen=true&id=13&ID_PAGE=32**
(Ressource en eau pour bassin Souss-Massa);
- **http://www.water.gov.ma/userfiles/file/18_Souss-massa-d%C3%A9f.pdf**
(Présentation de bassin sous massa) ;