



Année Universitaire : 2012-2013

**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

**Apport des outils Hyfran Plus, WMS et HEC-HMS à la Modélisation hydrologique
du bassin du Mdouar (Oued El Makhazine), Maroc septentrional**

Présenté par:

Hamza Berrouch

Encadré par:

- Ing.H. BRIRHET, DRPE, Rabat
- Pr. L. BENAABIDATE, FST - Fès

Soutenu Le 21 Juin 2013 devant le jury composé de:

- Pr.A.LAHRACH
- Pr.A.CHAOUNI
- Pr.H.TABYAOUI
- Ing.H. BRIRHET
- Pr. L. BENAABIDATE

Stage effectué à : DRPE, Rabat

Royaume du Maroc



**Ministère de l'Energie, des Mines,
de l'Eau et de l'Environnement**

Dédicace

A mes très chers parents,

En témoignage de profond amour, de grande reconnaissance et pour tous les sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et mon bonheur.

A mes enseignants

A mes chers (es) amis (es) et collègues

A toute personne qui m'aime et qui contribuera à ma joie familiale et mon bonheur professionnel.

Remerciements

Je remercie « الله » le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Je remercie mes encadrants, Mr Lahcen BENAABIDATE (Professeur et Chercheur à l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah) et Mr Hassan BRIRHET (Ingénieur et Chef du Service Hydrologie à la DRPE Rabat), qui m'ont accordé leur confiance et m'ont prodigué leurs nombreux et précieux conseils.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette recherche en acceptant d'examiner ce travail et de l'enrichir par leurs remarques et critiques constructives.

Je n'oublie pas aussi mes amis (es) pour leur soutien et leurs différents conseils qui m'ont encouragé parfaitement pour atteindre mes objectifs.

A tous, Merci.

Table des matières

Résumé	2
Table des matières	5
Liste des figures	7
Liste des tableaux	9
Introduction	10
<hr/>	
Chapitre 1 : Cadre général du bassin d'Oued El Makhazine	11
1. Données générales	11
2. Géologie	12
3. Topographie	13
4. Climatologie	14
5. Couvert végétal	17
6. Eaux de surface	18
7. Eaux souterraines	19
a. Nappe de Rmel	19
b. Nappe d'Ouled Ogbane	20
c. Nappe Alluviale	20
<hr/>	
Chapitre 2 : Traitement et analyse statistique des données (Précipitations/débit)	22
1. Régime pluviométrique du bassin versant	23
a. Précipitations mensuelles	23
b. Précipitations annuelles	23
c. Ajustement des lois	24
i. Présentation du logiciel	24
ii. Méthode visuelle (analyse des graphes)	25
iii. Méthode numérique (analyse des critères statistiques)	25
iv. Estimation de la précipitation selon les périodes de retour	27
v. Critères de la loi d'ajustement la mieux adaptée	27
2. Analyse des débits	28
a. Débits moyens mensuels	28
b. Débits moyens annuels	28
c. Ajustement des lois	29
i. Méthode visuelle (analyse des graphes)	29
ii. Méthode numérique (analyse des critères statistiques)	29
iii. Estimation du débit de retour	31
iv. Critères de la loi d'ajustement la mieux adaptée	32

Chapitre 3 : Préparation des données à l'aide du logiciel WMS	33
1. Plateforme WMS (Watershed Modeling System)	33
a. Présentation de l'interface du logiciel	33
i. L'icône des modules	33
ii. Les outils	34
iii. Les Marcos	34
iv. La fenêtre des propriétés	34
v. La barre d'aide	35
b. Les modules de WMS	35
2. Préparation des données du modèle sur WMS	35
a. Traitement des DEM avec WMS	35
b. Délimitation et présentation du réseau hydrographique	37
c. Détermination des paramètres géométriques du bassin	38
d. Détermination des paramètres hydrologiques du bassin	40
i. Calcul du numéro de courbe (SCS-CN)	40
ii. Calcul du temps de concentration (Tc)	42
iii. Calcul du temps de réponse (Tlag)	44

Chapitre 4 : Modélisation et calage du modèle HEC-HMS	45
1. Préparation du modèle HEC-HMS	45
a. Débit de base : Modèle de récession	45
b. Fonction de production : SCS-CN	46
c. Fonction de transfert : Clark Unit Hydrograph	48
d. Calage du modèle HEC-HMS	49
2. Caractérisation des événements utilisés pour la modélisation	50
3. Calage du modèle	53
4. Validation du modèle	57
5. Evaluation de la qualité du modèle	60
a. Critère de Nash-Sutcliffe	60
b. Erreur d'amplitude sur les pics	60
Conclusion générale et perspective	62

<i>Références bibliographiques</i>	<i>63</i>
------------------------------------	-----------

Liste des figures

Figure 1 : Localisation du bassin versant d'Oued El Makhazine	11
Figure 2 : Carte géologique du bassin (extraite de la carte géologique du Rif 1/25000)	13
Figure 3: Modèle numérique du terrain	14
Figure 4 : Précipitations moyennes mensuelles au barrage, Mdouar et Bab Taza entre 1991 et 2010	15
Figure 5 : Pluies et températures du barrage Oued El Makhazine	16
Figure 6 : Bilan ombrothermique – Poste : barrage Oued El Makhazine	16
Figure 7 : Couvert végétal	17
Figure 8 : Réseau hydrographique du Bassin	19
Figure 9 : Les principales nappes d'eau souterraines (Wahby, 2008)	21
Figure 10 : Situation de la station du Mdouar dans le bassin d'Oued El Makhazine	22
Figure 11 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles	23
Figure 12 : Précipitations totales annuelles au niveau du bassin versant Mdouar	24
Figure 13 : Ajustements statistiques des précipitations maximales journalières selon les lois de Gumbel, Lognormale, exponentielle et Weibul	25
Figure 14 : Débits moyens mensuels interannuels au niveau du bassin versant Mdouar	28
Figure 15 : Débits moyens annuels au niveau du bassin versant Mdouar	29
Figure 16 : Graphiques des ajustements des lois de débit maximal journalier	30
Figure 17 : Composantes principales de l'interface de WMS (BENNAJAH, A.MESSKA, E. (2011))	34
Figure 18 : Carte des données numériques de terrain (DNT)	36
Figure 19 : Intégration de deux fichiers MNT dans WMS	37
Figure 20 : Modèle d'écoulement à huit points (Roy, 2000)	38
Figure 21 : Direction de l'écoulement et accumulation d'eau (Roy, 2000)	38
Figure 22 : Délimitation du bassin d'Oued El Makhazine et détermination des ses paramètres géométriques par WMS	39
Figure 23 : Application du modèle hydrologique (détermination du CN)	40
Figure 24 : Calcul du numéro de courbe (SCS-CN) par WMS	41
Figure 25-a : Numéro de courbe calculé pour le bassin Mdouar	42
Figure 25-b : Numéro de courbe calculé pour le bassin intermédiaire	42
Figure 26 : Calcul du temps de concentration T_c par WMS	43
Figure 27 : Calcul du temps de réponse (T_{lag}) par WMS	44
Figure 28 : Paramètres introduits dans le modèle de récession sur HEC-HMS	46
Figure 29 : Paramètres introduits dans le modèle SCS-CN sur HEC-HMS	47
Figure 30 : Hydrogrammes des crues de calage de différents événements	54
Figure 31 : Distribution des paramètres S_t et T_c optimisés pour chaque épisode	56

Figure 32 : Distribution du paramètre CN optimisé pour chaque épisode	57
Figure 33 : Relation débit observé- débit estimé de l'événement N° 21	58
Figure 34 : Relation débit observé- débit estimé de l'événement N° 22	59
Figure 35 : Relation débit observé- débit estimé de l'événement N° 23	59

Liste des tableaux

Tableau 1 : Pluviométrie moyenne interannuelle (1970-2006) (ABHL, 2007)	15
Tableau 2 : Ajustements numériques des lois de Gumbel, Lognormale, exponentielle et Weibul (Période 20 ans)	26
Tableau 3 : Ajustements numériques des lois de Gumbel, Lognormale, exponentielle et Weibul (Période 50 ans)	26
Tableau 4 : Ajustements numériques des lois de Gumbel, Lognormale, exponentielle et Weibul (Période 100 ans)	26
Tableau 5 : Estimation des précipitations maximales journalières annuelles selon la loi Lognormale	27
Tableau 6 : Statistiques descriptives des précipitations maximales journalières.....	27
Tableau 7 : Critères de comparaison des ajustements des lois aux débits de pointe à la station hydrologique Mdouar	31
Tableau 8 : Estimation des débits de retour selon des différentes lois d'ajustement	31
Tableau 9 : Statistiques descriptives de débit maximal journalier à la station hydrologique Mdouar	32
Tableau 10 : Valeurs de CN pour chaque bassin	41
Tableau 11 : Temps de concentration (heures) pour chaque bassin	43
Tableau 12 : Temps de réponse (Lag) pour chaque sous-bassins	44
Tableau 13 : Numérotation des événements, relatives aux sous bassin Mdouar, au pas instantané	51
Tableau 14 : Caractérisation des événements, relatives aux sous bassin Mdouar, au pas instantané	52
Tableau 15 : La synthèse du calage du modèle relative au sous bassin versant Mdouar	55
Tableau 16 : Evénements utilisés pour la validation du modèle	58
Tableau 17 : Valeurs du critère d'évaluation du modèle retenu pour le bassin du Mdouar	61
Tableau 18 : Erreur d'amplitude du modèle en validation sur les 3 épisodes de validation	61

Introduction

La simulation des débits à l'exutoire d'un bassin versant est intéressante, voire indispensable, pour la gestion des ressources en eau, telles que la prévision des crues. Cette dernière s'intéresse à la formation d'un débit particulier dans le futur. La simulation est donc capitale au niveau de l'annonce et de la protection des personnes en cas d'événement de crue.

A cet effet, notre étude a pour objectif une meilleure connaissance de la réponse hydrologique au sein du bassin versant d'Oued El Makhazine. Pour cela nous avons utilisé une base de données hydrologique et géomorphologique qui a été mise à notre disposition principalement par le service Hydrologie de la Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau.

Cette étude s'est articulée donc autour de deux principales parties :

- Une première partie où nous avons utilisé des lois statistiques applicables à l'hydrologie, et qui présentent un intérêt particulier lorsqu'on parle d'analyses fréquentielles et de l'estimation des risques associés aux événements hydrologiques. Cette méthode statistique consiste à étudier des événements historiques afin d'en évaluer les probabilités d'apparition future.

- Dans la seconde partie, nous avons essayé de :

- Effectuer une délimitation du bassin versant à l'aide du logiciel WMS, ainsi un ensemble de paramètres géométriques et hydrologiques devaient être définis. Un travail préliminaire a donc eu lieu afin de collecter certaines informations.
- Choisir un modèle hydrologique de simulation des événements, dont le but est d'intégrer l'ensemble des données disponibles et d'optimiser les paramètres du modèle hydrologique choisi.
- Utiliser le modèle comme outil de synthèse et de validation dont la représentation doit être la plus conforme possible à la réalité du point de vue des mécanismes et des processus simulés.

Chapitre 1 : Cadre général du bassin d'Oued El Makhazine

1. Données générales

Le bassin d'Oued El Makhazine appartient au bassin du Loukkos qui fait partie des bassins Nord Atlantiques du Royaume. Il est caractérisé par un climat méditerranéen avec une influence atlantique. Sa position géographique (Figure 1), sa structure géomorphologique et son climat font que ce bassin dispose d'un important potentiel de ressources en eau. Ce grand potentiel a favorisé le développement de l'activité agricole au niveau d'un important périmètre irrigué au Maroc.

Le bassin est limité au Nord-Est par le bassin du Tangérois, au Nord-Ouest par le bassin de l'Oued Laou, au Sud et à l'Ouest par les bassins de Drader-Souiere.

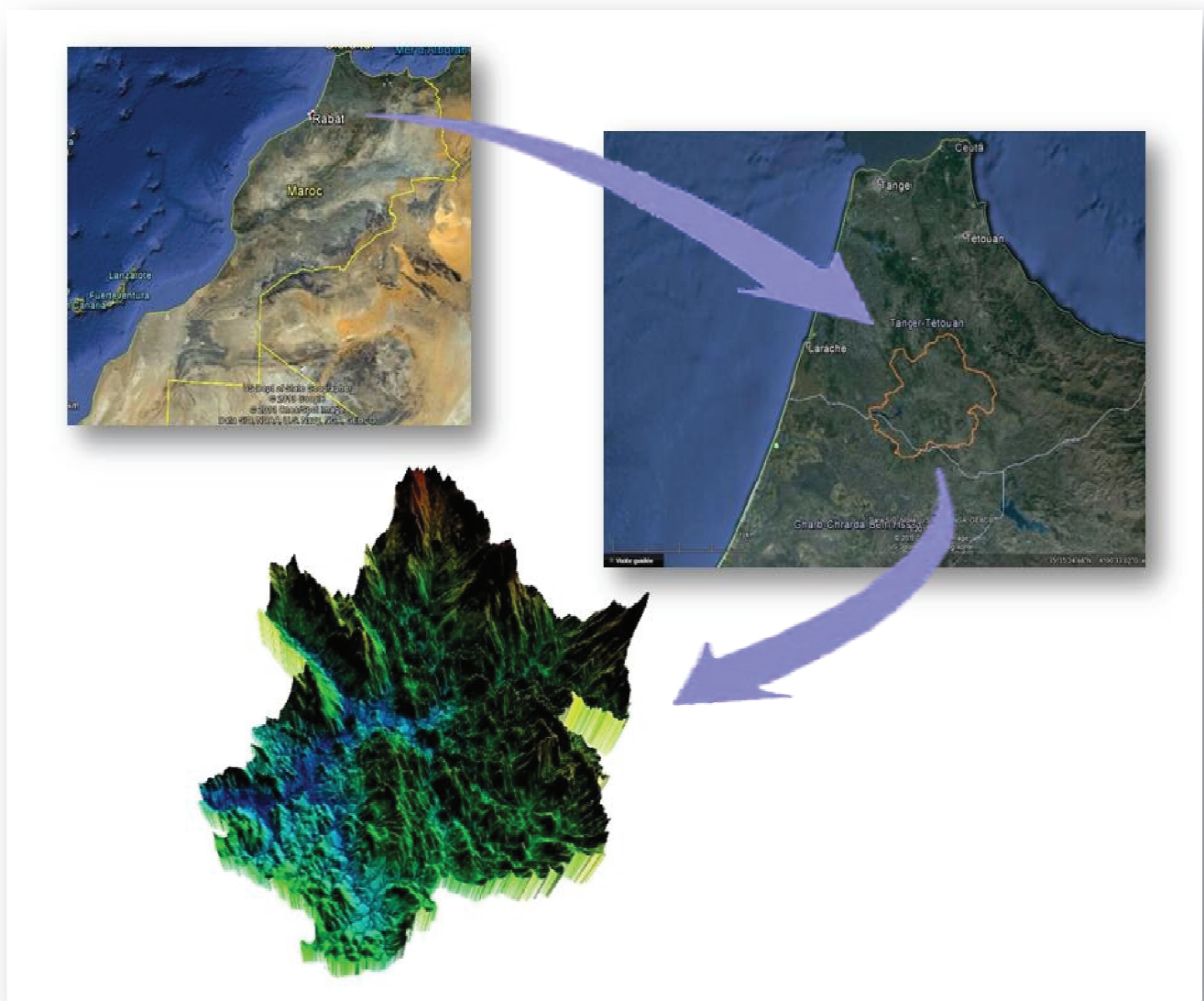


Figure 1 : Localisation du bassin versant d'Oued El Makhazine

2. Géologie

Le bassin d'Oued El Makhazine est situé à la limite de la zone mésorifaine qui constitue la limite supérieure du bassin dans sa partie Est. Au Nord-Est du bassin, prédomine la chaîne calcaire constituée essentiellement de marno-calcaires de couleur blanche, de l'Eocène, des marnes grises à banc gréseuse de l'Oligo-Miocène. Au Sud, les collines des Ouled-Ogbane sont constituées essentiellement de cailloutis villafranchiens limités au Sud par des affleurements de nappe pré-rifaine dont les terrains sont assez analogues à ceux de la zone mésorifaine, mais dont la structure est beaucoup plus complexe et fréquemment injectée de Trias gypseux (Service Géologique, 1971).

Sur le plan hydrogéologique, les marnes bleues, plus ou moins sableuses, vers le haut, du Miocène supérieur et du Miocène inférieur, constituent le substratum imperméable des aquifères situés dans la plaine (Service Géologique, 1971)

Les formations continentales villafranchiennes comprennent des cailloutis à ciment argileux rouge qu'on trouve dans la partie Sud-Est du bassin. En passage latéral et supérieur on trouve des limons sableux rouges qui se limitent à l'Est par l'Oued Loukkos (Figure 2) (Service Géologique, 1971).

Les sols de la partie amont du bassin sont constitués d'une alternance de marnes et de grès, tandis que la partie ouest et centrale du bassin est formée de séries marneuses soumises à une forte érosion. La prédominance des sols imperméables dans le bassin versant du Loukkos favorise le ruissellement, qui est accru par l'effet de pente à mesure que l'on progresse vers l'Est.

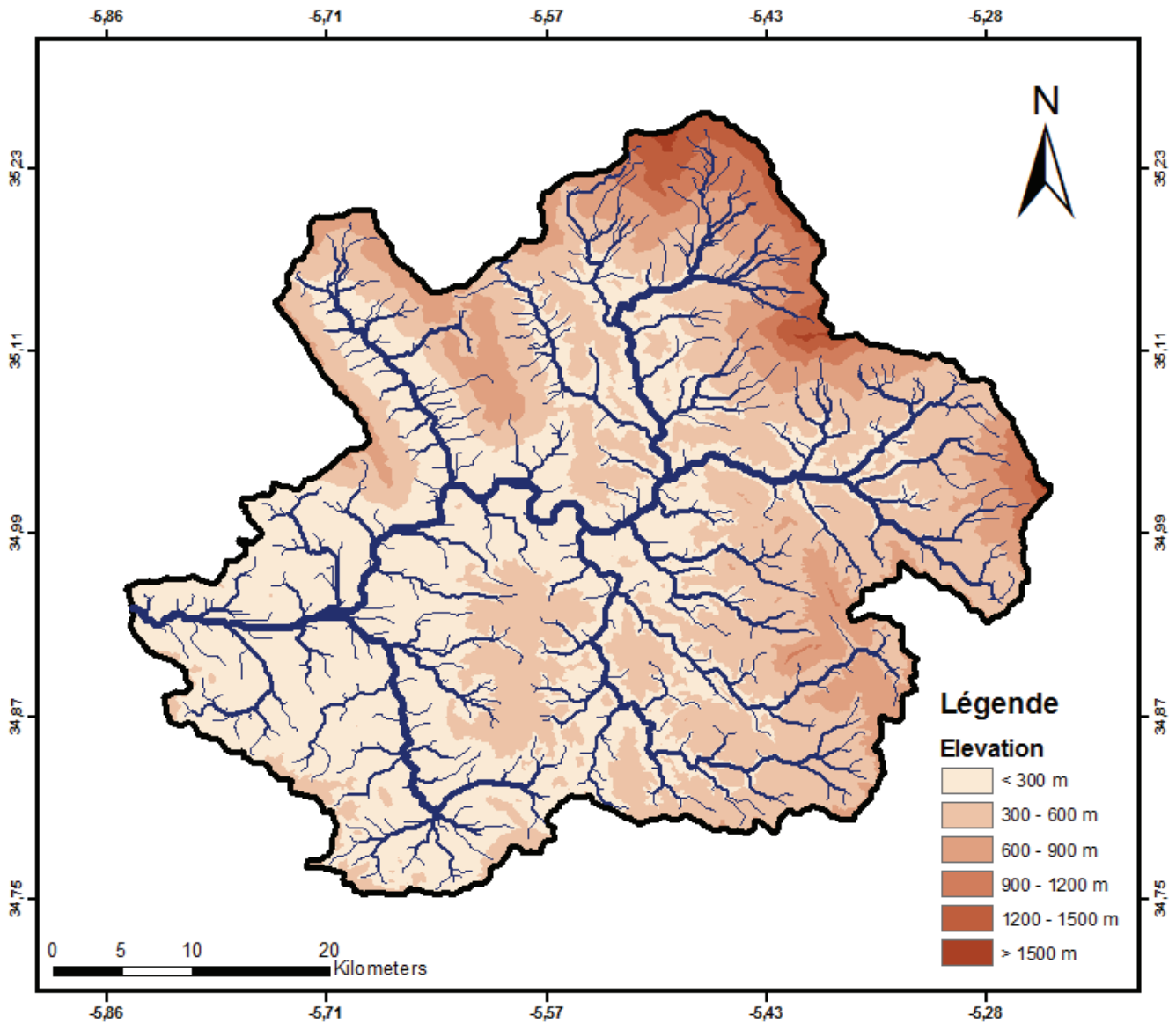


Figure 3: Modèle numérique du terrain

Cette configuration du relief associée à la présence de l’océan Atlantique à l’ouest est la principale cause des précipitations importantes mesurées dans le bassin (1100 mm par an).

4. Climatologie

Le bassin d’Oued El Makhazine bénéficie d’un climat méditerranéen caractérisé par l’alternance d’une saison humide et fraîche d’Octobre à Avril et d’une saison sèche et chaude de Mai à Septembre (Figure 5).

Il subit aussi l’influence de l’océan Atlantique, à 40 km en aval du barrage Makhazine, ce qui explique la variation remarquable de température augmentant à l’approche de la ville de Ksar El Kébir (Service Géologique, 1971).

Des données de précipitations quotidiennes sont disponibles pour les stations du barrage Makhazine (60 m), Mdouar (90 m) entre 1970 et 2006 (Tableau 1).

Station	Pluviométrie interannuelle (mm)	Altitude Z (mm)
B. O. El Makhazine	614	60
Mdouar	813	90
Bab Taza	1080	860

Tableau 1 : Pluviométrie moyenne interannuelle (1970-2006) (ABHL, 2007)

La pluviométrie moyenne annuelle durant les quatre dernières décennies varie entre 614 mm (Station du B. O. El Makhazine) et 813 mm (Station de Mdouar) (Tableau 1) et elle est concentrée dans sa quasi-totalité entre Octobre et Avril. Cette pluviométrie augmente en allant de l'aval vers l'amont du bassin (Figure 4).

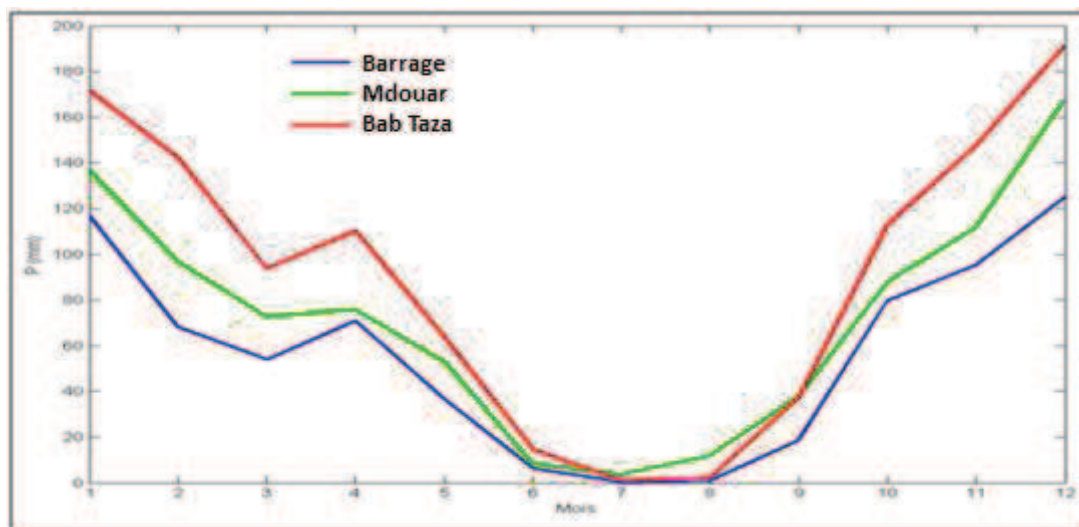


Figure 4 : Précipitations moyennes mensuelles au barrage, Mdouar et Bab Taza entre 1991 et 2010

Quant aux températures (Figure 5), elles varient entre 10°C en période froide et 32°C en période chaude.

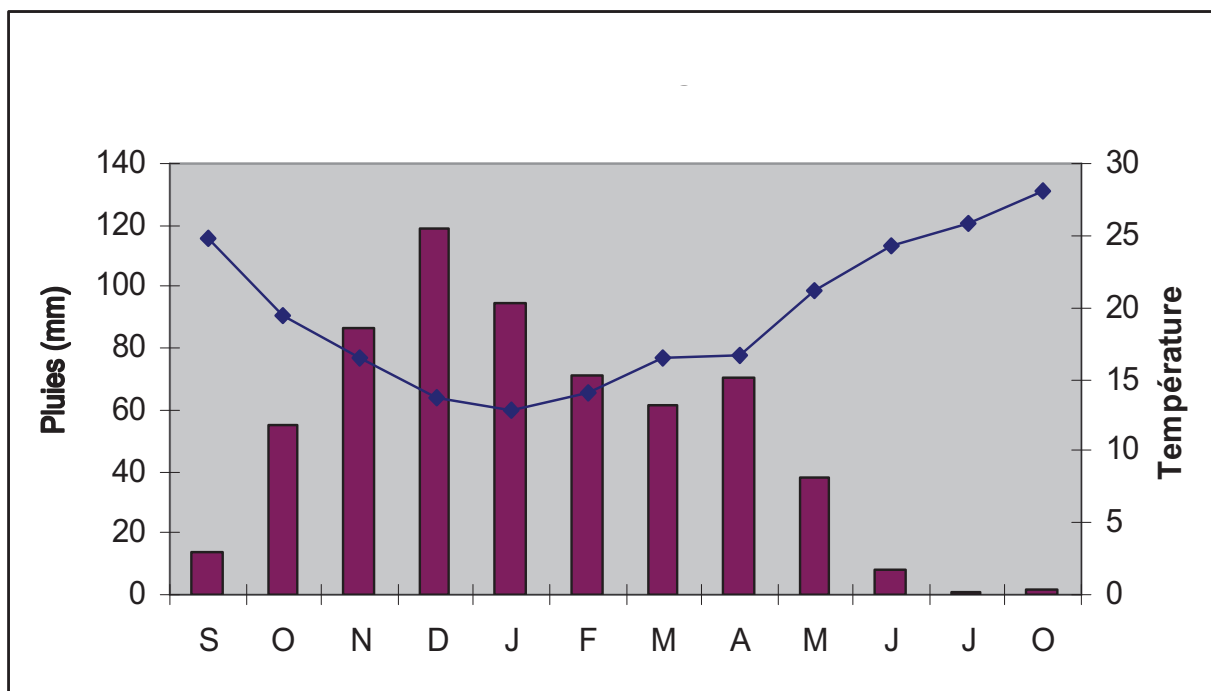


Figure 5 : Pluies et températures du barrage Oued El Makhazine

Le bilan ombrothermique, présenté par la figure 6, nous a permis de constater que la période humide s'étend de la fin de Septembre au début de Mai, alors que la période sèche couvre le reste de l'année hydrologique.

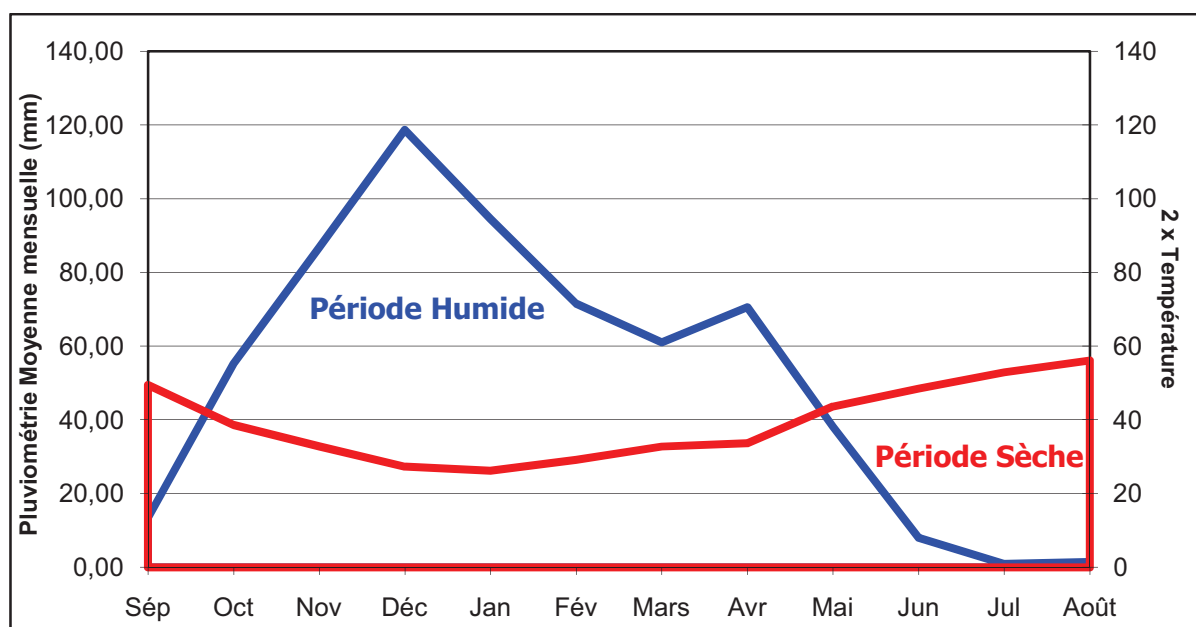


Figure 6 : Bilan ombrothermique – Poste : barrage Oued El Makhazine

5. Couvert végétal

Le couvert végétal du bassin est caractérisé à l'est par la présence de matorrals, typiques des paysages méditerranéens, avec une prédominance des forêts de chêne-liège. La majeure partie du couvert forestier se situe à l'amont du bassin. (Tramblay, 2012). Le reste du bassin est caractérisé par un terrain non boisé ou bien la présence des périmètres irrigués concentrés au Sud du bassin (Figure 7).

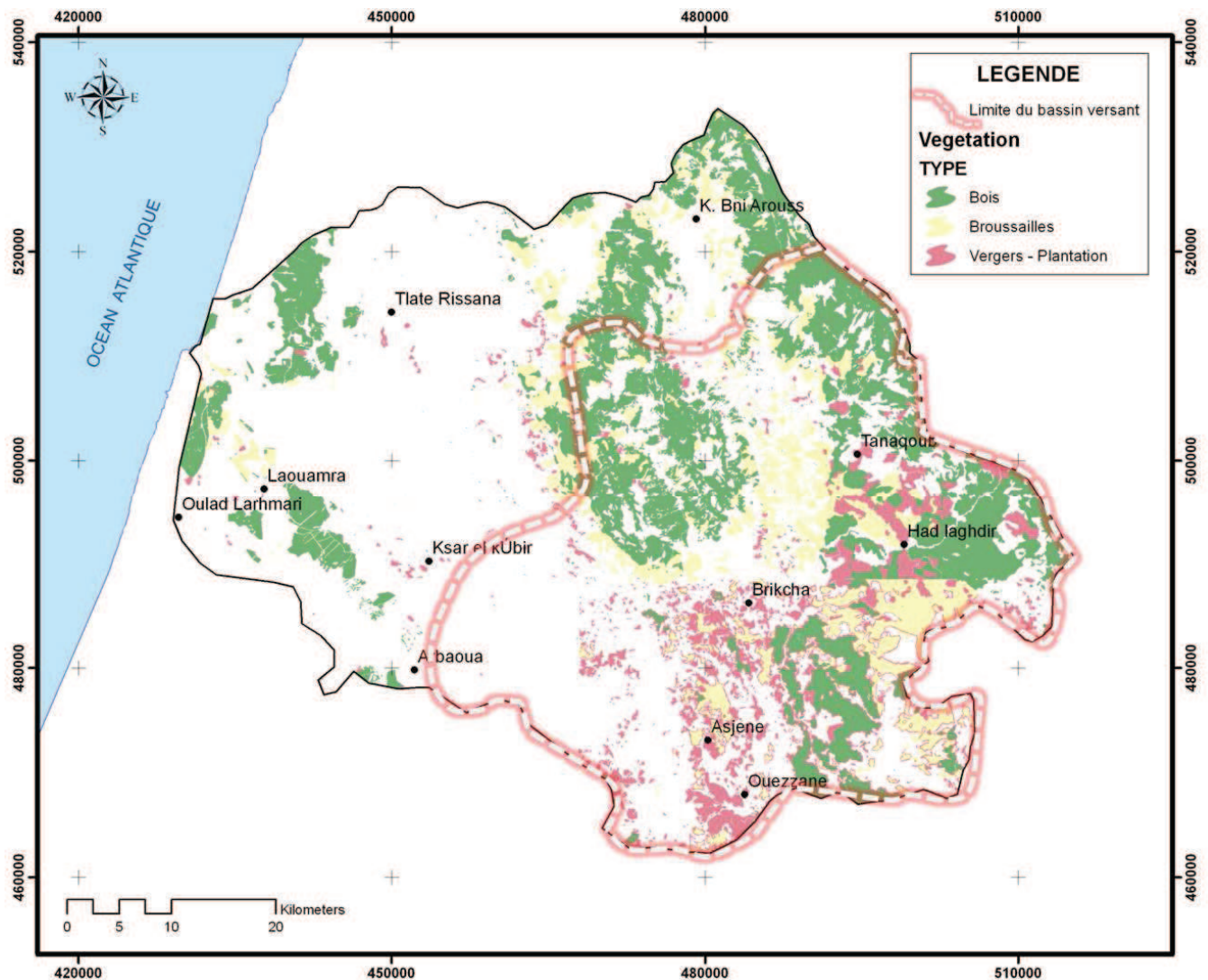


Figure 7 : Couvert végétal

L'agriculture constitue l'activité économique dominante au niveau du bassin. A ce titre, il convient de distinguer entre l'agriculture moderne concentrée dans les périmètres irrigués au niveau de la plaine et l'agriculture traditionnelle dans les autres zones. En effet, en dehors des périmètres irrigués, l'agriculture et l'élevage traditionnel demeurent prédominants, surtout au niveau des zones montagneuses.

6. Eaux de surface

En raison de son climat et de son contexte géomorphologique, le bassin d'Oued El Makhazine recèle d'importantes ressources en eau constituées essentiellement par les eaux superficielles.

Le réseau hydrographique comprend Oued El Makhazine et ses affluents (Figure 8). En outre, il bénéficie de ressources en eau souterraines constituées essentiellement par la trois aquifères adjacents : la nappe de Rmel, la nappe d'Ouled Ogbane et la nappe alluviale (Figure 9).

Le bassin d'Oued El Makhazine est subdivisé en deux bassins (Figure 8) :

- Le bassin du Mdouar ayant une superficie de 749 Km².
- Un bassin intermédiaire ayant une superficie de 1060 Km².

Le barrage Oued El Makhazine constitue la pièce maîtresse de l'aménagement hydro-agricole de la plaine du Loukkos qui compte près de 40.000 ha de terres irriguées de façon moderne. Ce barrage dont la capacité normale actuelle est de l'ordre de 720 Mm³ (ABHL, 2007) sert, en outre, à l'alimentation en eau potable des villes de Larache, Ksar El Kébir, Ouezzane et divers centres ruraux avoisinants. Il permet également la valorisation énergétique des eaux régularisées grâce à l'usine hydro-électrique qui lui est associée.

C'est un barrage de type mixte en terre zonée et enrochements, haut de 67 m. Son bassin versant, s'étendant sur une superficie de 1810 km² (Figure 8), est bien arrosé avec une pluviométrie moyenne de 1080 mm/an dont 420 mm ruissellent et forment un apport moyen au barrage de 760 Mm³/an. L'évaporation au niveau de la retenue du barrage s'élève à 1176 mm/an. (ABHL1, 2006).

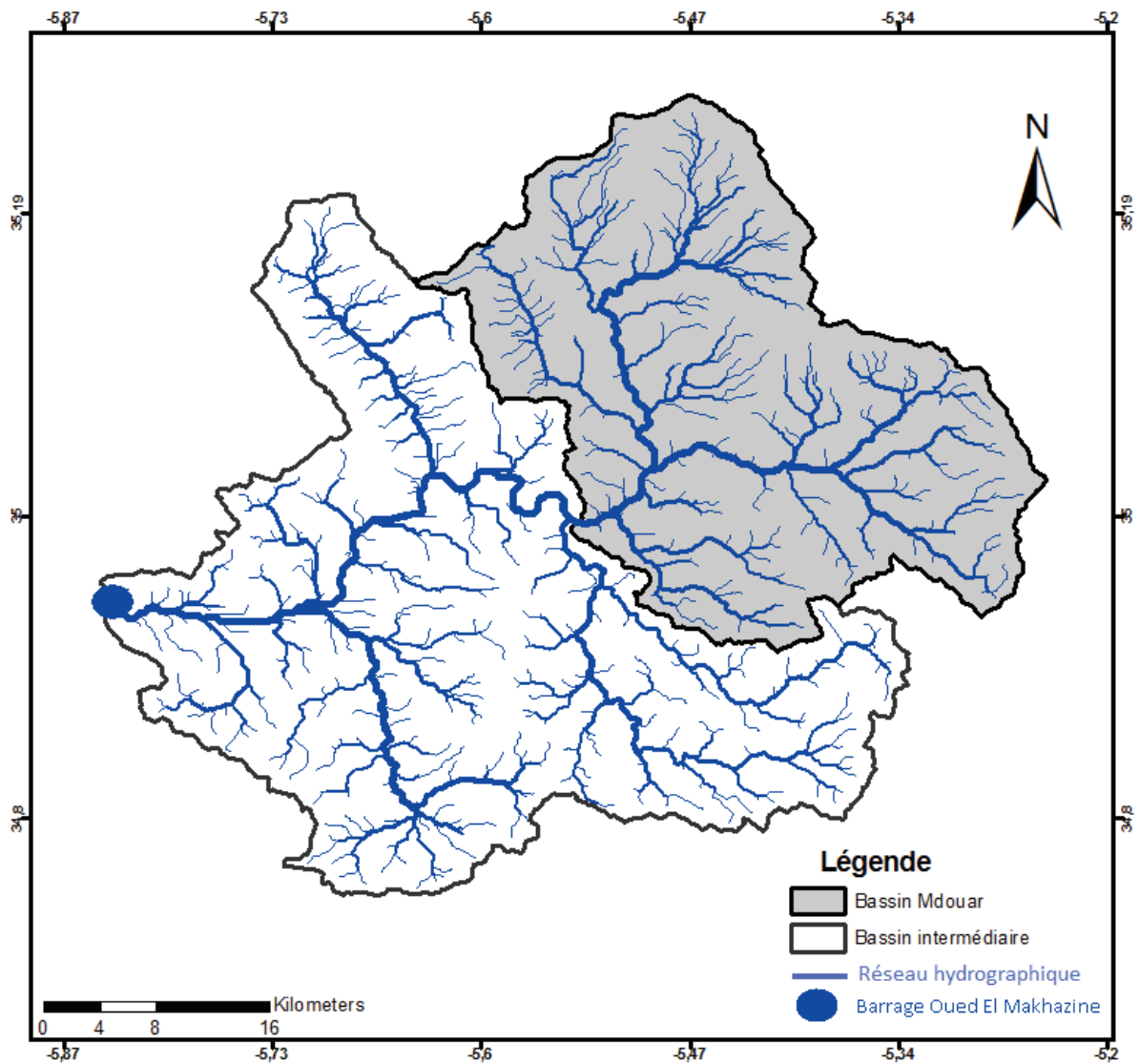


Figure 8 : Réseau hydrographique du Bassin

6. Eaux souterraines

a. Nappe de Rmel

Cette plaine, située au Sud de la ville de Larache, s'étend sur une superficie de 245 Km². Elle est limitée naturellement par les affleurements marneux du Secondaire et du Tertiaire au Nord, par le Talus quaternaire dominant la plaine au Sud, par les Oueds Smid El Ma et El Kihel à l'Est et au Nord-Est, par les cailloutis à ciment argileux de la nappe d'Ouled Ogbane au Sud-Est et par l'Océan Atlantique à l'Ouest.

La nappe de Rmel constitue la réserve d'eau la plus importante confirmée au Nord-Ouest du Maroc vu la quantité des ressources en eau qu'elle offre. Elle est formée de grès coquilliers du Plio-Villafranchien et de sables dunaires du quaternaire. Ces deux formations

hydrogéologiques sont généralement séparées par une couche de perméabilité et d'épaisseur variables, attribuée aux formations sablo-argileuses ou argileuses du Villafranchien. Le substratum de la nappe de Rmel est constitué essentiellement par des marnes bleues du Mio-Pliocène (ABHL, 2006).

b. Nappe d'Ouled Ogbane

Cette nappe est située au Nord-ouest de la ville de Ksar-El-Kébir, s'étend sur une longueur de 16 Km environ du Nord-Ouest au Sud-est et sur une superficie d'environ 58 Km². Elle est limitée au Nord par le bassin de Rmel et à l'Est par la vallée de l'Oued Loukkos (ABHL2, 2006). Elle circule dans les alluvions plio-quadernaires, constituée essentiellement par des galets à intercalations marneuses. Son épaisseur varie entre 40 à 60 m. Son substratum est constitué essentiellement de marnes bleues du mio-pliocène, qui se sont affleurées au niveau des limites Ouest et Sud de la plaine.

L'alimentation de la nappe se fait principalement par l'infiltration des eaux pluviales, estimées à environ 6 Mm³/an (ABHL2, 2006). La nappe bénéficie aussi des alimentations superficielles en provenance des cours d'eau qui la traversent.

c. Nappe alluviale

Cette nappe circule dans les alluvions du quadernaire, constituée de galets et de sables en majorité. La nature lenticulaire de ces alluvions revient à l'existence de deux niveaux aquifères séparés par des limons argileux.

L'écoulement souterrain, en amont de la nappe, suit la direction du cours d'eau de l'oued. La profondeur de l'eau est généralement faible et s'annule au niveau des merjas.



Figure 9 : Les principales nappes d'eau souterraines (Wahby, 2008)

Chapitre 2 : Traitement et analyse statistique des données (Précipitation/débit)

En raison du manque des données, notre étude s'est limitée sur le bassin du Mdouar qui fait partie du bassin d'Oued El Makhazine.

L'objectif de ce chapitre est de faire une analyse fréquentielle sur une longue série de débits et de précipitations maximales journalières enregistrées dans la station du Mdouar :

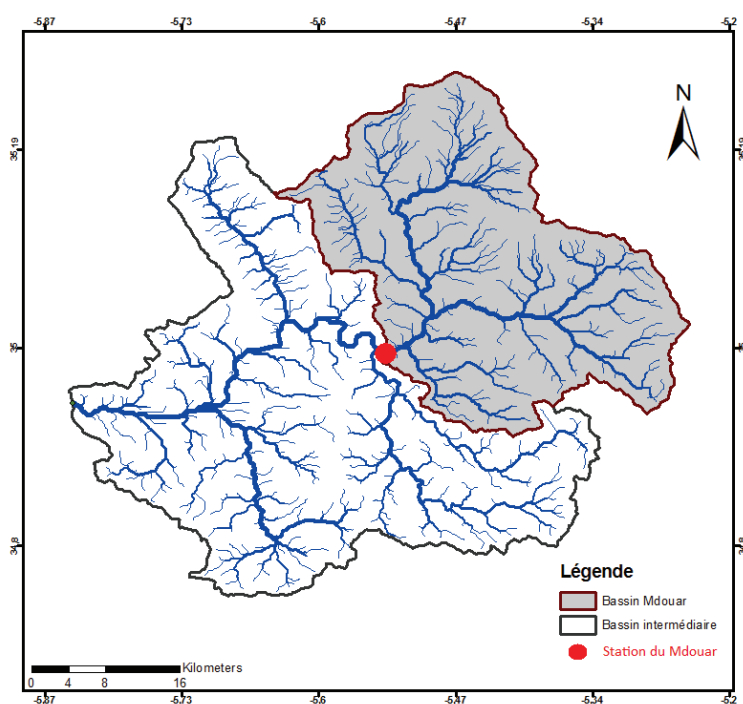


Figure 10 : Situation de la station du Mdouar dans le bassin d'Oued El Makhazine

Cette analyse permettra d'estimer le temps de retour d'une valeur soit de débit ou de précipitation. Cette prédiction repose sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel qui est une équation décrivant le comportement statistique d'un processus (par exemple dans ce chapitre, on va utiliser les différentes lois comme Gamma, Halphen, log-normal...). Ces modèles décrivent la probabilité d'apparition d'un événement de valeur donnée (débit/précipitation). C'est à partir du choix de la loi de probabilité que dépendra la validité des résultats de l'analyse fréquentielle.

1. Régime pluviométrique du bassin versant du Mdouar

a. Précipitations mensuelles

La représentation graphique des variations des moyennes mensuelles interannuelles des précipitations, sur une période de 36 ans (1970-2007), montre une variation régulière ; les fortes valeurs sont enregistrées au niveau des mois de Novembre, Décembre et Janvier (les mois les plus pluvieux), alors que les faibles valeurs caractérisent les mois de Juin, Juillet et Août (les mois les plus secs) (Figure 11).

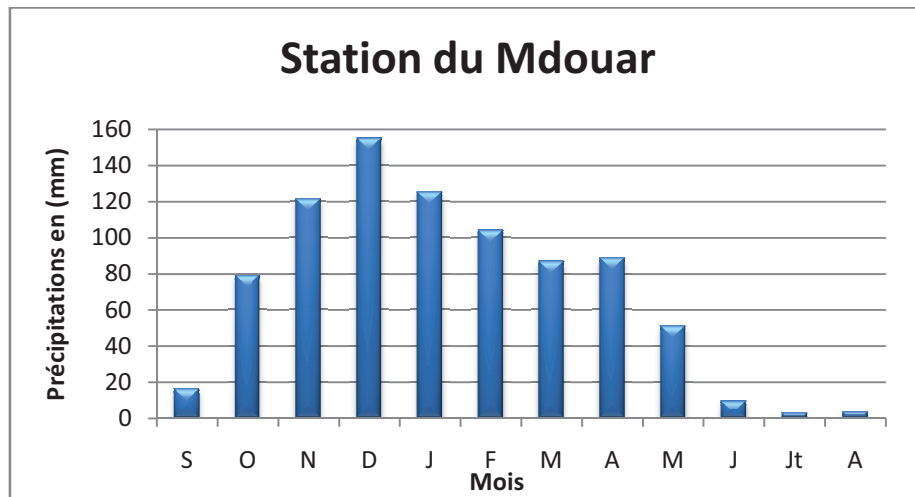


Figure 11 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles

b. Précipitations annuelles

L'analyse de l'évolution des précipitations à la station Mdouar, sur une période de 36 ans (1970-2007), montre que l'année 2002-2003 est la plus arrosée avec 1647 mm et l'année 1994-1995 est la plus sèche avec 379.6 mm. Notons que la précipitation moyenne interannuelle s'évalue à 816.8 mm (Figure 12).

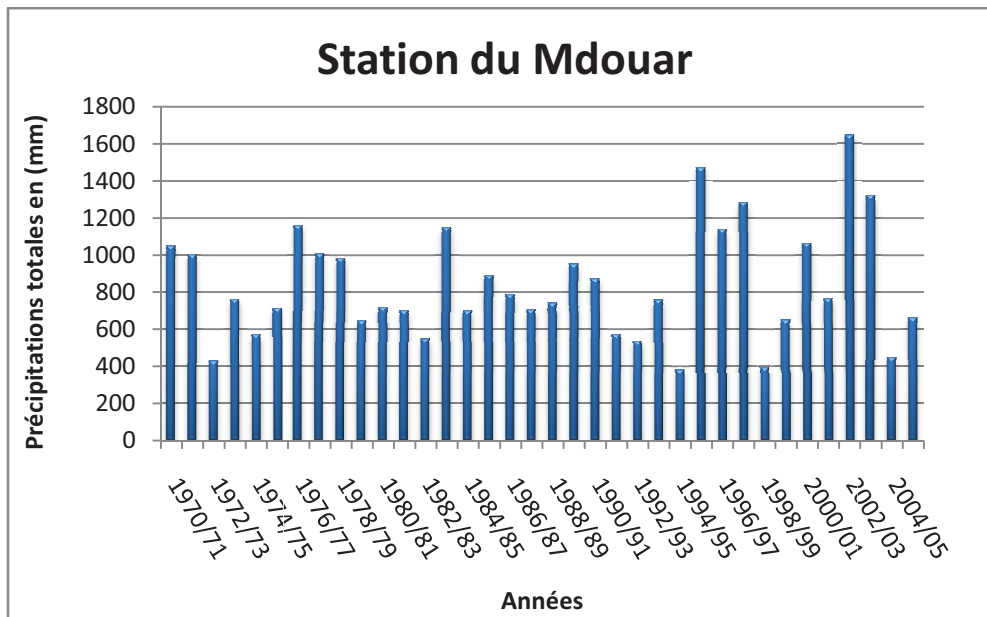


Figure 12 : Précipitations totales annuelles au niveau du bassin versant Mdouar

c. Ajustement de lois à un échantillon de pluie

L'estimation des périodes de retour des valeurs extrêmes de pluie est l'un des problèmes majeurs posés aux concepteurs d'aménagements. Pour cela, on procède à l'analyse statistique des chroniques d'observation des pluies maximales journalières.

Notre étude porte sur l'ajustement des précipitations maximales journalières du bassin versant Mdouar, et ce, sur une période d'observation de 36 ans (1970/71 - 2006/07).

Les lois statistiques appliquées dans cette étude sont : la loi de Gumbel, la loi de Weibul, la loi exponentielle et la loi log-normale. Le test d'ajustement des répartitions empiriques et théoriques est fait par le test d'adéquation de χ^2 .

i. Présentation du logiciel utilisé dans cette étude

Le logiciel HYFRAN-PLUS permet d'ajuster un nombre important de distributions statistiques à une série de données qui vérifient les hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité. Un Système d'Aide à la Décision (SAD) a été développé pour permettre de choisir la classe de distributions la plus adéquate pour estimer le quantile de période de retour élevée.

ii. Méthode visuelle (analyse des graphes)

La figure 13 montre des graphiques qui présentent les probabilités empiriques et théoriques des distributions des lois de Gumbel, exponentielle, Weibull et Log-normale sur papier normal de probabilité.

Visuellement on remarque que les lois Gumbel et Log-normale présentent les meilleurs ajustements de la variable précipitation maximale journalière.

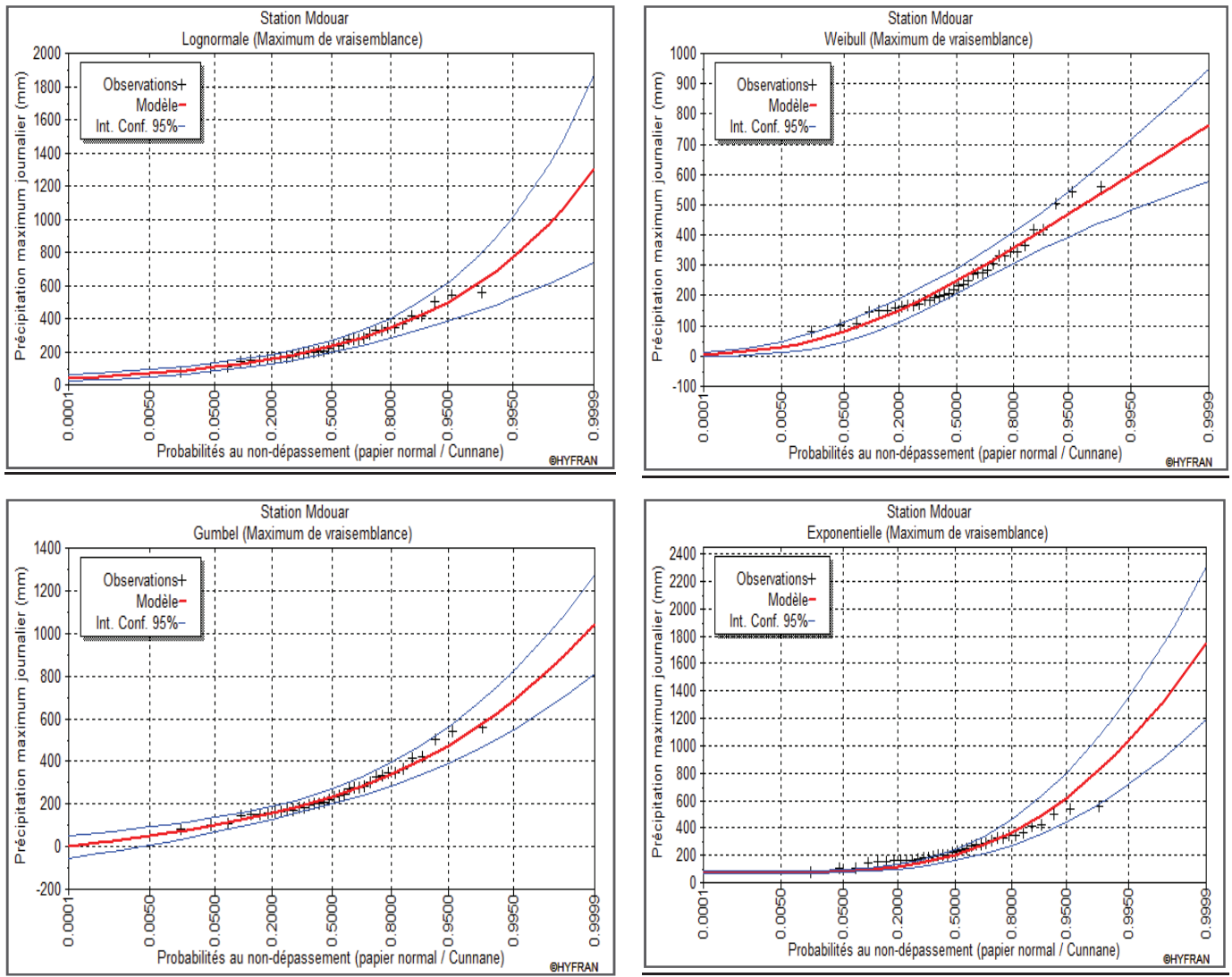


Figure 13 : Ajustements statistiques des précipitations maximales journalières selon les lois de Gumbel, Lognormale, exponentielle et Weibul

iii. Méthode numérique (Analyse statistique)

Les tableaux 2, 3 et 4 montrent les valeurs observées des critères d'information bayésien (BIC) et d'Akaike (AIC). Ces critères permettent de comparer le degré d'ajustement. Les meilleurs ajustements correspondent aux plus faibles valeurs de ces statistiques.

	Nb de Paramètres	Précipitation estimée	BIC	AIC
Log-normale (Maximum de vraisemblance)	2	497.402	445.192	442.025
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	473.468	445.833	442.666
Weibull (Maximum de vraisemblance)	2	467.956	448.904	445.737
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	2	619.405	453.754	450.587

Tableau 2 : Ajustements numériques des lois de Gumbel, Lognormale, exponentielle et Weibul (Période 20 ans)

	Nb de Paramètres	Précipitation estimée	BIC	AIC
Log-normale (Maximum de vraisemblance)	2	601.577	445.192	442.025
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	558.581	445.833	442.666
Weibull (Maximum de vraisemblance)	2	525.346	448.904	445.737
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	2	785.934	453.754	450.587

Tableau 3 : Ajustements numériques des lois de Gumbel, Lognormale, exponentielle et Weibul (Période 50 ans)

	Nb de Paramètres	Précipitation estimée	BIC	AIC
Log-normale (Maximum de vraisemblance)	2	682.867	445.192	442.025
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	622.362	445.833	442.666
Weibull (Maximum de vraisemblance)	2	563.840	448.904	445.737
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	2	911.908	453.754	450.587

Tableau 4 : Ajustements numériques des lois de Gumbel, Lognormale, exponentielle et Weibul (Période 100 ans)

Le meilleur résultat d'ajustement visuel est trouvé pour la loi Log-normale en première position, suivi par la loi de Gumbel.

Aussi bien, pour les résultats d'ajustement numérique obtenus on trouve que la loi Log-normale est la mieux adaptée pour l'estimation des précipitations maximales journalières. Elle permet également de faire une estimation pour les périodes de retour les plus élevées.

De même, on remarque que les précipitations maximales journalières les plus élevées ajustées par la loi Weibull sont sous estimés.

iv. Estimation des précipitations maximales journalières

Le tableau 5 présente les estimations des précipitations maximales journalières annuelles calculées pour les différentes périodes de retour selon la loi Lognormale.

Période de retour	200	100	50	20	10	5	3	2
Précipitation estimée	767	683	602	497	420	342	283	231

Tableau 5 : Estimation des précipitations maximales journalières annuelles selon la loi Lognormale

La comparaison graphique et les critères statistiques d'ajustement obtenus nous permettent de conclure que la loi la mieux adaptée pour l'estimation des précipitations maximales journalières est la loi Log-normale.

v. Critères de la loi d'ajustement le mieux adapté pour l'estimation

La comparaison graphique et les critères statistiques d'ajustement obtenus nous permettent de conclure que la loi la mieux adaptée pour l'estimation des précipitations maximales journalières est la loi Log-normale.

Le tableau 6 nous permet de vérifier la validation de cette loi Log-normale. En effet, on remarque que la population et l'échantillon ont relativement la même moyenne et à peu près le même écart-type avec une variation légère qui montre une homogénéité des données analysées.

	Caractéristiques de l'échantillon	Caractéristiques de la population (Lognormale)
Minimum	80	-
Maximum	560	-
Moyenne	257	258
Ecart-Type	120	127
Médiane	227	231
Coefficient de variation	0,469	0,491
Coefficient d'asymétrie	0,970	1,59
Coefficient d'aplatissement	3,08	5,78

Tableau 6 : Statistiques descriptives des précipitations maximales journalières

Cette méthode pourrait donc être recommandée pour l'analyse statistique des pluies maximales, puisqu'il n'est pas toujours possible dans la réalité de connaître la forme de leurs distributions.

2. Analyse des données hydrologiques

a. Débits mensuels

Les débits sont généralement de moyennes valeurs à élevées (Figure 14), avec un régime simple et régulier au cours de l'année, ils commencent à augmenter à partir du mois de Novembre pour atteindre le maximum au mois de Février (hiver).

Pendant les mois de l'hiver, les cours d'eau recueillent les précipitations importantes et engendrent une augmentation du débit qui se poursuit pour atteindre son maximum au mois de Janvier, Février et Mars. Au cours des mois d'été, les débits diminuent brutalement (période d'étiage) et les oueds sont pratiquement à sec.

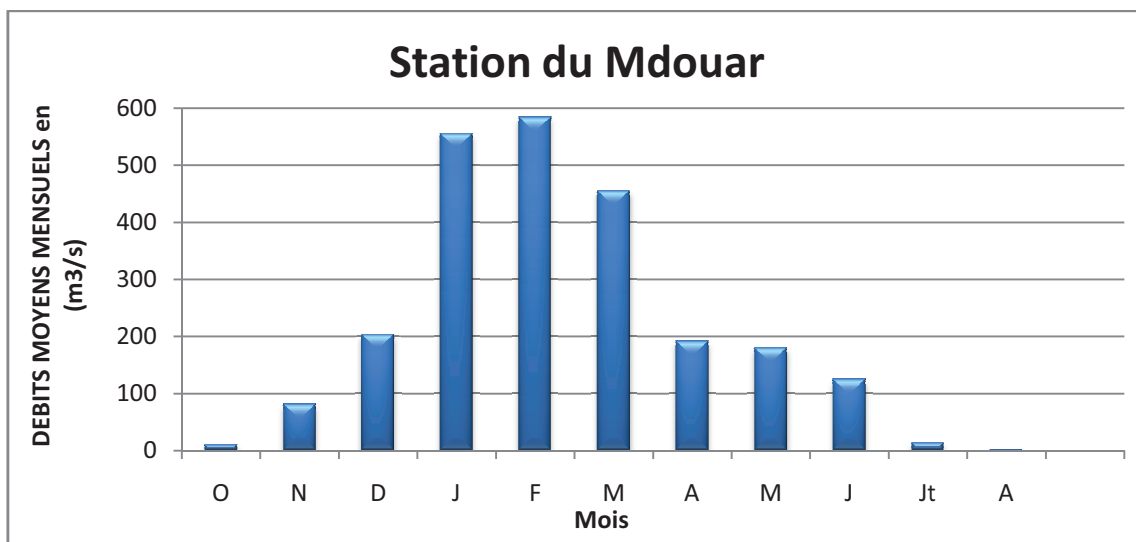


Figure 14 : Débits moyens mensuels interannuels au niveau du bassin versant Mdouar

b. Débits annuels

Le régime annuel est très irrégulier d'une année à l'autre. Les années 1976, 1978, 1995 et 1997 correspondent à des années humides avec un maximum au cours de cette première année avec un maximum de 504.81 m³/s (Figure 15). Par contre les années 1972, 1974, 1992 et 1994 sont plutôt sèches et correspondant généralement aux périodes de sécheresse qui ont sévi dans la région, généralement le débit ne dépasse pas les 100 m³/s durant ces années.

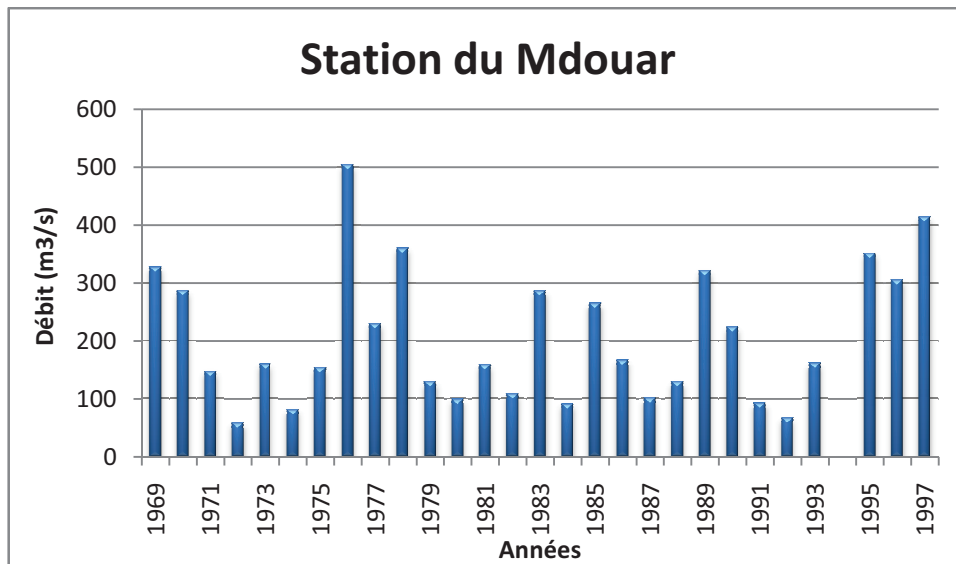


Figure 15 : Débits moyens annuels au niveau du bassin versant Mdouar

Une analyse fréquentielle des débits maximums journaliers au niveau de la station hydrologique Mdouar a été réalisée dans le but de prédire les probabilités d'apparition future.

c. Ajustement de lois

i. Méthode visuelle (analyse des graphes)

La figure 16 montre les graphiques des résultats obtenus. Ils représentent les probabilités empiriques et théoriques des distributions Pareto, Weibull, loi des Fuites, exponentielle, Gumbel et Gamma sur papier normal de probabilité à l'aide du logiciel Hyfran.

Visuellement, on peut conclure que les lois Pareto, Weibull et loi des Fuites présentent les meilleurs ajustements de la variable débit maximal journalier.

ii. Méthode numérique (analyse des critères statistiques)

Le tableau 7 illustre la valeur observée des critères d'information bayésien (BIC) et d'Akaike (AIC). D'après les résultats numériques obtenus, les lois Pareto et loi des Fuites représentent les meilleurs ajustements de la variable débit maximal journalier.

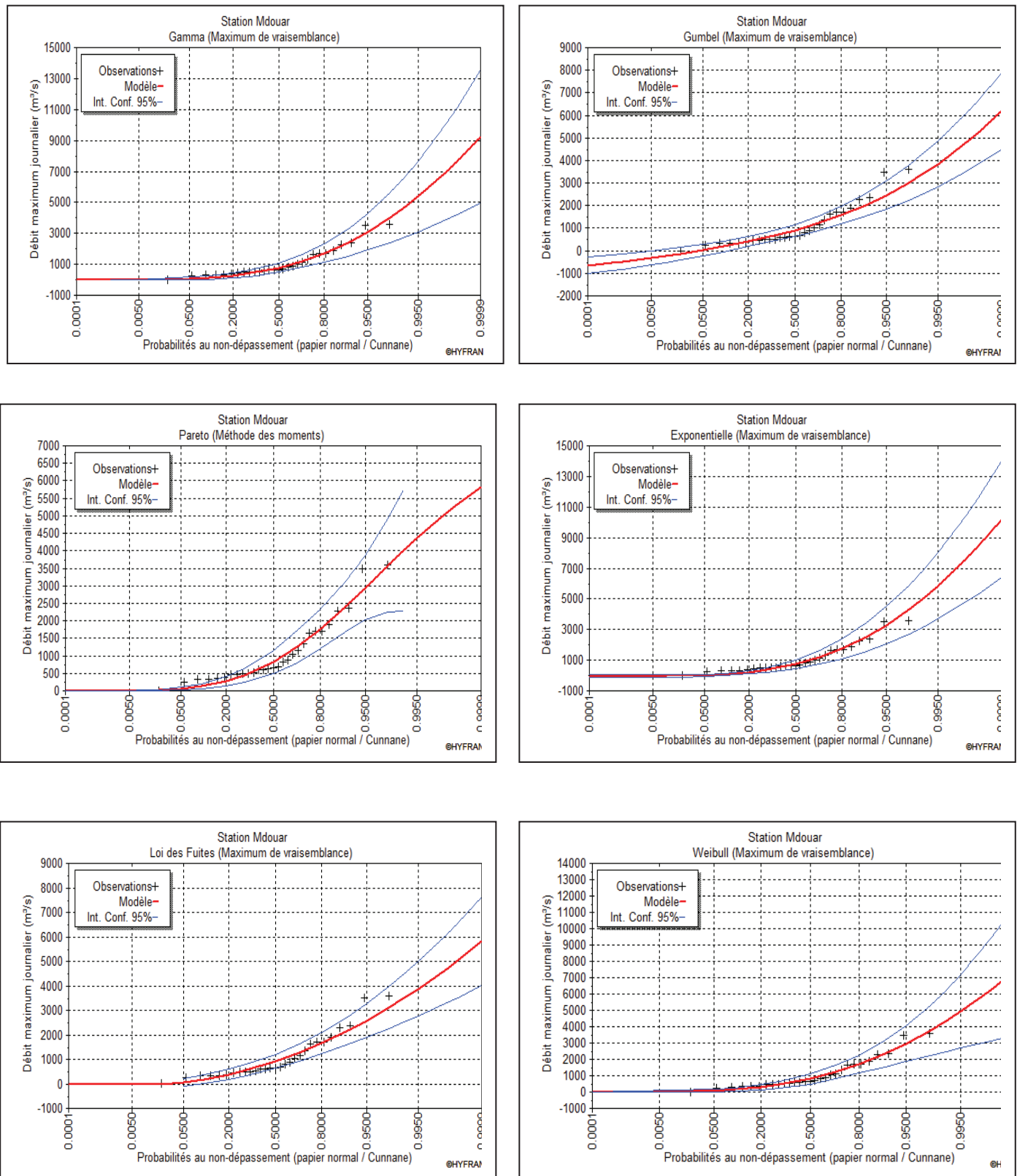


Figure 16 : Graphiques des ajustements des lois de débit maximal journalier

Modèles	BIC	AIC
Loi des Fuites (Maximum de vraisemblance)	466.067	463.333
Pareto (Méthode des moments)	468.581	465.847
Weibull (Maximum de vraisemblance)	468.930	466.195
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	471.513	468.779
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	472.070	469.335
Gamma (Maximum de vraisemblance)	469.318	466.584

Tableau 7 : Critères de comparaison des ajustements des lois aux débits de pointe à la station hydrologique Mdouar

iii. Estimation des débits de pointe de périodes de retour

Dans le tableau 8 figurent les débits estimés pour quatre périodes de retour à partir des paramètres calculés précédemment pour les six lois de probabilité.

Modèle	Période de retour			
	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Loi des Fuites (Maximum de vraisemblance)	1976.1	2983.6	3120.289	3505.450
Pareto (Méthode des moments)	2391.894	2944.815	3581.371	4000.368
Weibull (Maximum de vraisemblance)	2346.394	2968.148	3767.120	4358.023
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	2521.246	3291.646	4310.060	5080.460
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2024.793	2454.210	3010.046	3426.567
Gamma (Maximum de vraisemblance)	2412.464	3106.540	4019.054	4706.769

Tableau 8 : Estimation des débits de retour selon des différentes lois d'ajustement

On remarque que les résultats estimés pour les grandes périodes de retour sont très variables d'une loi à l'autre. Par contre, les périodes de retour de 10 ans et 20 ans présentent une faible variabilité.

Les lois Gamma et Exponentielle semblent inadaptées à l'ajustement, elles surestiment les hauteurs de débits de pointe de faible fréquence (20, 50, 100 ans).

iv. Critères de la loi d'ajustement la mieux adaptée pour l'estimation

Le tableau 9 montre que la loi la mieux adaptée pour l'analyse fréquentielle des débits maximums journaliers est la loi des Fuites. Les caractéristiques de la distribution selon cette loi donnent des résultats satisfaisants (même moyenne, l'écart-Type et le coefficient de variation sont presque identiques) aux caractéristiques statistiques de l'échantillon.

	Caractéristiques de l'échantillon	Caractéristiques de la population (Pareto)
Minimum	0.358	--
Maximum	3600	--
Moyenne	1070	1070
Ecart-Type	926	914
Médiane	650	824
Coefficient de variation	0.862	0.737
Coefficient d'asymétrie	1.49	1.11
Coefficient d'aplatissement	3.99	4.63

Tableau 9 : Statistiques descriptives de débit maximal journalier à la station hydrologique Mdouar

La comparaison des critères statistiques et des graphiques, entre les différentes lois utilisées dans l'ajustement de la variable Débit maximal journalier, donne les mêmes résultats : parmi les trois meilleures lois d'ajustement, la loi des fuites est la mieux adaptée pour les observations extrêmes.

Pour conclure, l'analyse fréquentielle des débits et des pluies maximales journalières a un rôle très important dans l'estimation du risque d'apparition d'une crue donnée pour une période de retour. Ainsi, on peut dire que la loi des fuites est la mieux adaptée pour l'estimation des débits maximaux journaliers et la loi Log-normale est la mieux adaptée pour l'estimation des pluies maximales journalières.

Chapitre 3 : Préparation des données à l'aide du logiciel WMS

L'objectif de ce chapitre est d'effectuer une délimitation du bassin versant à l'aide du logiciel WMS, ainsi un ensemble de paramètres géométriques et hydrologiques doivent être définis. Un travail préliminaire a donc eu lieu afin de collecter certaines informations.

1. Plateforme utilisée WMS (Watershed Modeling System)

WMS est un environnement complet d'analyse hydrologique. Il a été développé par le Laboratoire de recherche en modélisation Environmental de Brigham Young University, en collaboration avec l'US Army Corps of Engineers et est actuellement développé par Aquaveo LLC.

WMS offre une panoplie d'outils pour effectuer la délimitation du bassin automatisé et calculer des paramètres importants du bassin, comme la superficie, la pente, le numéro de courbe (CN), le Lag time, le temps de concentration... Il sert également d'interface utilisateur-graphique pour plusieurs modèles hydrauliques et hydrologiques. Le programme fournit des outils d'affichage pour la visualisation de nombreuses surfaces de terrain et exportation des images pour les rapports et les présentations.

La conception modulaire du programme permet à l'utilisateur de sélectionner des modules dans des combinaisons sur mesure, permettant à l'utilisateur de choisir uniquement les capacités de la modélisation hydrologique qui sont nécessaires.

a. Présentation de l'interface du logiciel

L'interface de WMS est composée de 5 principales parties:

i. L'icône des modules

WMS est organisé en huit modules. Chaque module est associé à un type d'objet particulier. Un seul module est actif à un moment donné. Lorsqu'un module est actif, les outils qui lui sont attribués sont affichés (Figure 17).

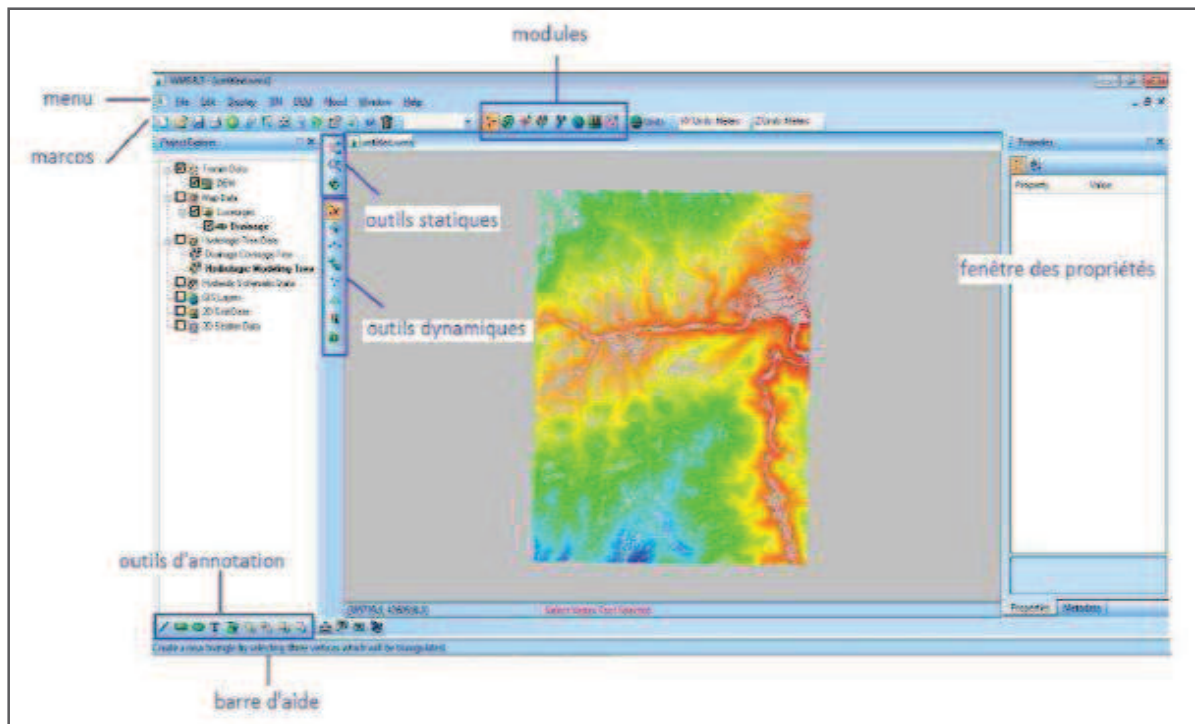


Figure 17 : Composantes principales de l'interface de WMS

ii. Les outils

L'action qui aura lieu lorsque vous cliquez dans la fenêtre graphique dépend de l'outil qui est actif. Les outils sont organisés en trois groupes. La première série de trois icônes, connus sous le nom des outils statiques, est pour manipuler l'affichage. Le deuxième groupe, connu sous le nom des outils dynamiques, est un ensemble d'outils spécifiques au module qui sont utilisés pour créer et modifier des objets dans la fenêtre graphique. Le troisième groupe, connu sous le nom outils d'annotation, permet aux utilisateurs d'ajouter des informations graphiques (tels que des étiquettes de texte et des objets de dessin) à la fenêtre graphique.

iii. Les Marcos

Les macros sont un ensemble d'icônes en haut de la palette d'outils. Les macros sont des raccourcis aux commandes les plus souvent utilisées.

iv. La fenêtre des propriétés

La fenêtre des propriétés sur le côté droit de la fenêtre WMS sert pour afficher quelques propriétés des données sélectionnées (coordonnées, nom, notation).

Les champs de saisie peuvent être utilisés pour modifier les coordonnées des objets sélectionnés (les points, les nœuds et les sommets).

v. La barre d'aide

La bande d'aide au bas de la fenêtre WMS est utilisée pour afficher l'aide contextuelle. Lorsque vous déplacez le curseur sur un élément dans une boîte de dialogue, une commande de menu, ou l'un des outils ou des boutons dans la fenêtre principale, une chaîne d'aide décrivant la fonction de l'élément est affichée dans la bande de l'aide.

b. Les modules de WMS

L'interface WMS est séparée en plusieurs modules, ces modules contiennent des outils qui permettent la création et la manipulation des modèles à partir des différents types de données.

- Module de traitement des cartes (Map module) ;
- Module du SIG ;
- Module du terrain (terrain data module) ;
- Module de drainage ;
- Module de modélisation hydrologique ;
- Module de modélisation hydraulique (River Modeling Module).

2. Préparation des données du modèle sur WMS

a. Traitement des DEM avec WMS

Le logiciel WMS, Watershed Modeling System (B.Y.U & Environmental Modeling Research Laboratory, 1999) a permis d'importer les informations nécessaires à la construction du modèle (Figure 18). Il s'agit d'un outil qui permet de définir les limites d'un bassin versant et d'évaluer ses principales caractéristiques requises pour l'analyse hydrologique (aire de drainage du bassin, pentes ...). Les sources des données sont les cartes de données numériques de terrain (DNT) ou "Digital Elevation Model" (DEM) que l'on peut se procurer gratuitement sur des sites Internet spécialisés canadiens ou américains.

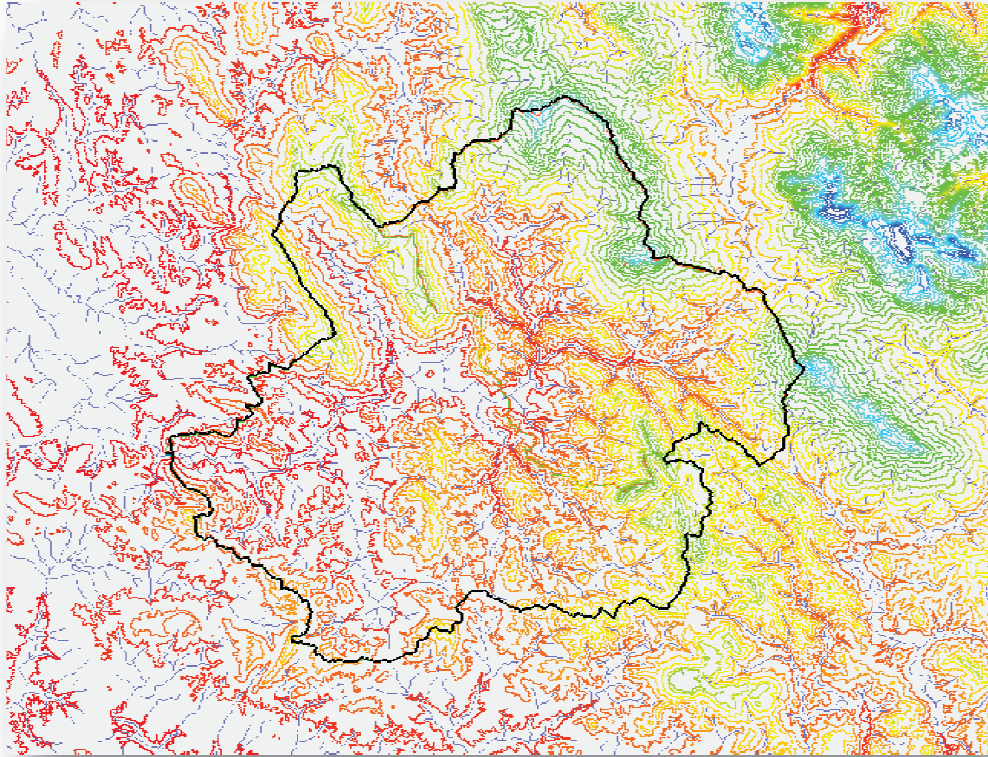


Figure 18 : Carte des données numériques de terrain (DNT)

Les valeurs d'élévation sont en mètres par rapport au niveau moyen de la mer, selon le système de référence nord-américain de 1983, système de référence horizontal (Geobase, 2004). Les DEM sont produits par l'United States Geological Survey (U.S.G.S). Deux fichiers sont nécessaires pour reconstituer l'ensemble de la zone couvrant le bassin Barrage Makhazine. WMS est capable d'assembler plusieurs fichiers car chaque fichier a un profil commun avec celui à l'est et celui à l'ouest et chaque profil comporte un point de chevauchement avec celui au nord et au sud (Figure 19).

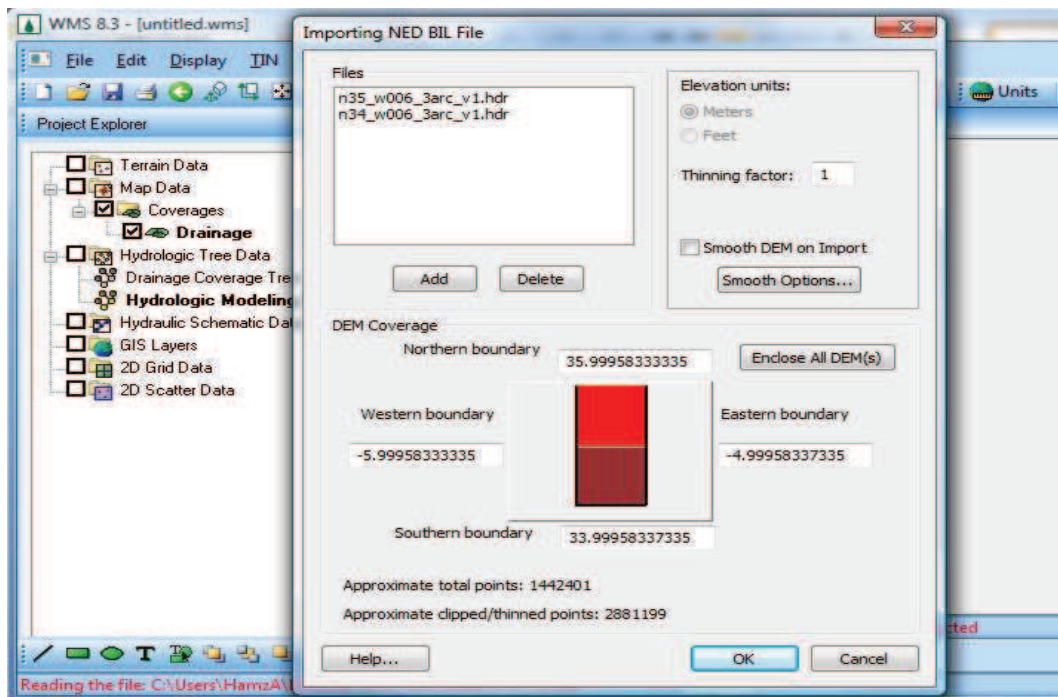


Figure 19 : Intégration de deux fichiers MNT dans WMS

b. Délimitation et présentation du réseau hydrographique

Suite au traitement des données d'élévation, l'utilisation de ces données pour déterminer les limites d'un bassin versant nécessite d'abord de calculer la direction de l'écoulement de l'eau à la surface du sol. Le module TOPAZ (Topographie Paramétrisation) permet à WMS d'évaluer en chaque point cette direction. Elle est définie comme étant le vecteur présentant la différence d'élévation la plus grande entre ce point et l'un des huit points adjacents. Ce concept du modèle à 8 points (D8 method) est illustré par la figure 20.

WMS calcule à partir de ces vecteurs la valeur d'accumulation d'eau (flow accumulation), c'est-à-dire le nombre de points amont dont le chemin d'écoulement passe par ce point.

Il ne s'agit encore que d'un scalaire qui représente les caractéristiques de drainage de chaque point en relation avec une superficie drainée.

Le réseau hydrographique du territoire n'est obtenu que lorsque l'accumulation est transformée en vecteur d'écoulement possédant une direction, une orientation et une pente, tel qu'illustré à la figure 21.

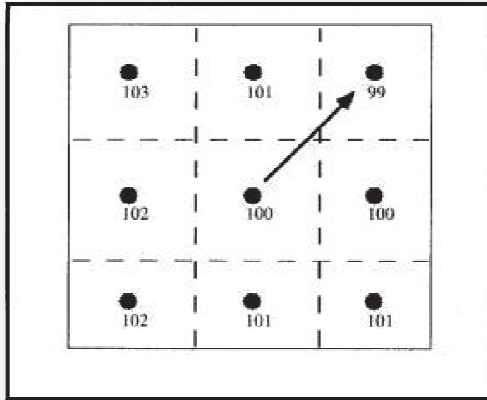


Figure 20 : Modèle d'écoulement à huit points
(Roy, 2000)

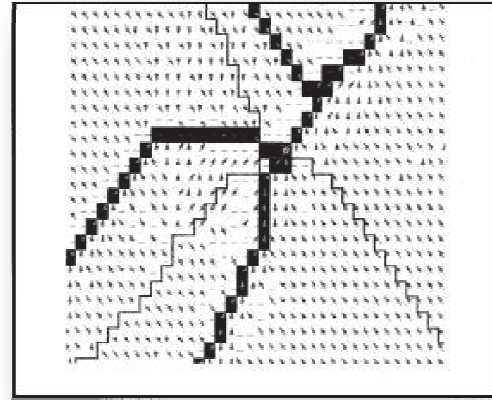


Figure 21 : Direction de l'écoulement et
accumulation d'eau (Roy, 2000)

Après ces étapes de traitement du DEM, on spécifie la position sur le tracé hydrographique des exutoires de bassins selon le découpage qu'on souhaite faire du bassin. Dans le cas de cette étude, le découpage en bassins a été reproduit. La délimitation du bassin versant et des sous-bassins est effectuée en associant chacun des points du DEM à un exutoire, en fonction de la direction de l'écoulement et du réseau hydrographique établi précédemment. Les limites du bassin versant et des sous-bassins sont ainsi créées, auxquelles un polygone est associé afin de calculer les caractéristiques requises. La représentation conceptuelle du bassin utilisée par HEC-HMS est également produite automatiquement en respectant les exutoires.

Le bassin versant d'Oued El Makhazine est délimité selon cette méthodologie est présenté à la figure 22, ainsi la représentation du réseau hydrographique et les limites des sous-bassins constituant le bassin barrage Makhazine. Le réseau hydrographique qui y est illustré représente bien les principaux cours d'eau présents sur le bassin du barrage Makhazine.

c. Détermination des paramètres géométriques du bassin

Les paramètres morphologiques du bassin versant tels que l'aire, le périmètre, la pente, l'élévation moyenne du bassin... sont tous déterminés par WMS, ces paramètres sont affichés sur la carte si dessous.

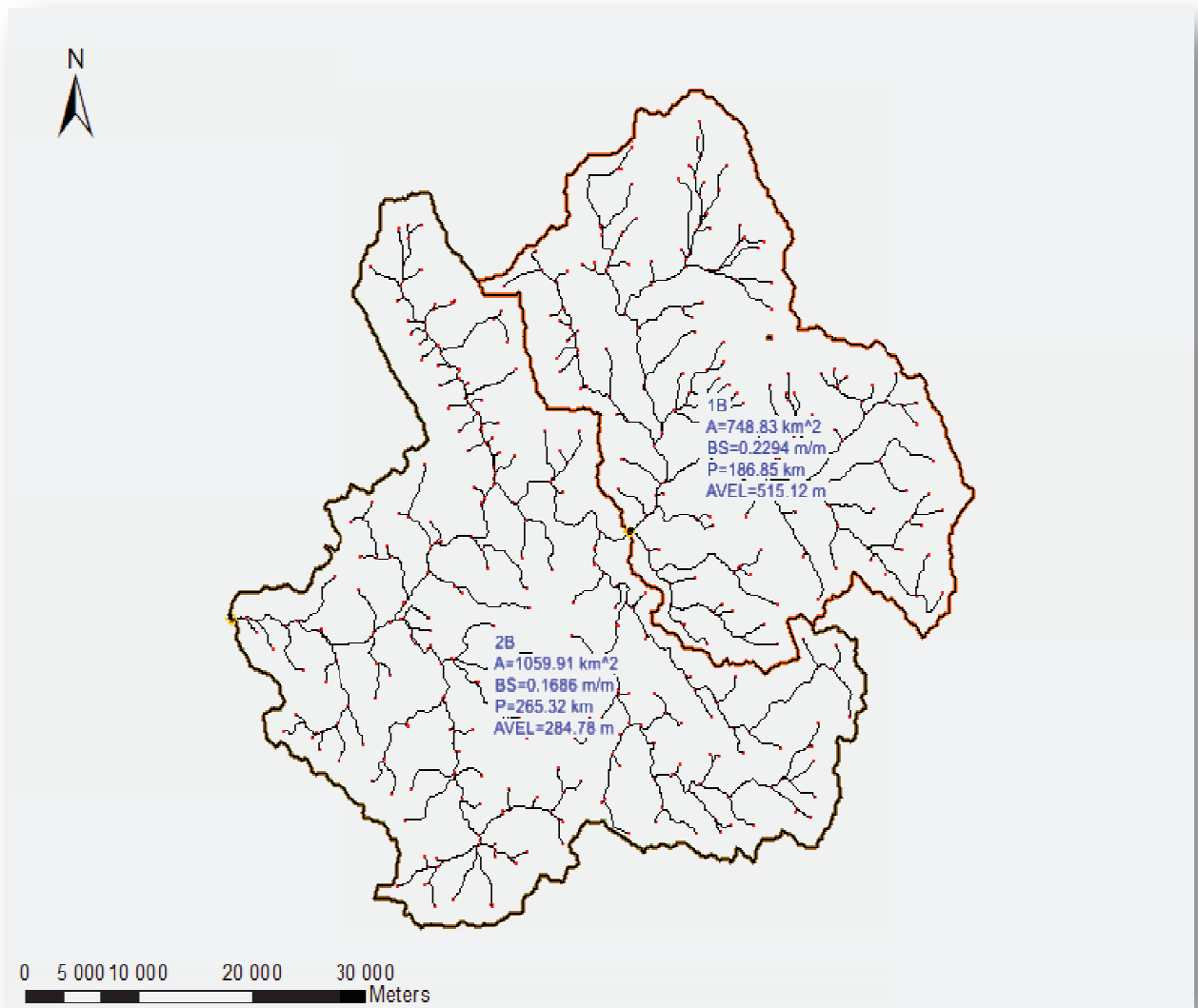


Figure 22 : Délimitation du bassin d'Oued El Makhazine et détermination des ses paramètres géométriques par WMS

Avec :

- 1B : Bassin Mdouar ,
- 2B : Bassin intermédiaire ,
- A : Surface (Area) ;
- BS : Pente du bassin ,
- P : Périmètre ,
- AVEL : Elévation moyenne du bassin.

d. Détermination des paramètres hydrologiques du bassin

i. Calcul du numéro de courbe (SCS-CN)

Le numéro de courbe (CN) (Figure 23) renseigne sur la capacité du sol à infiltrer l'eau de pluie. Les valeurs sont typiquement entre 30 et 99. Une valeur de 30 correspond à une importante capacité d'infiltration, alors que la valeur de 99 correspond à une absence d'infiltration.

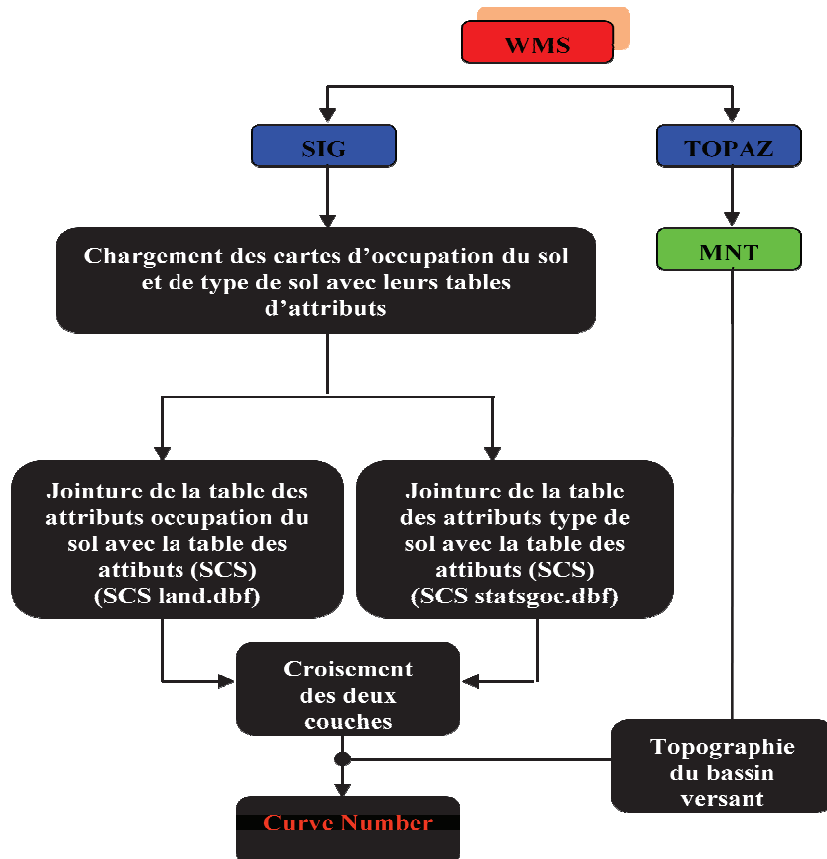


Figure 23 : Application du modèle hydrologique (détermination du CN)

La détermination du SCS-CN (Soil Conservation Service - curve number) a été réalisée en utilisant le Module GIS de WMS (Figure 24), par la superposition des deux cartes d'occupation du sol et du types du sol (En code A, B, C) et par la construction des tables attributaires pour chacune de ces cartes en WMS.

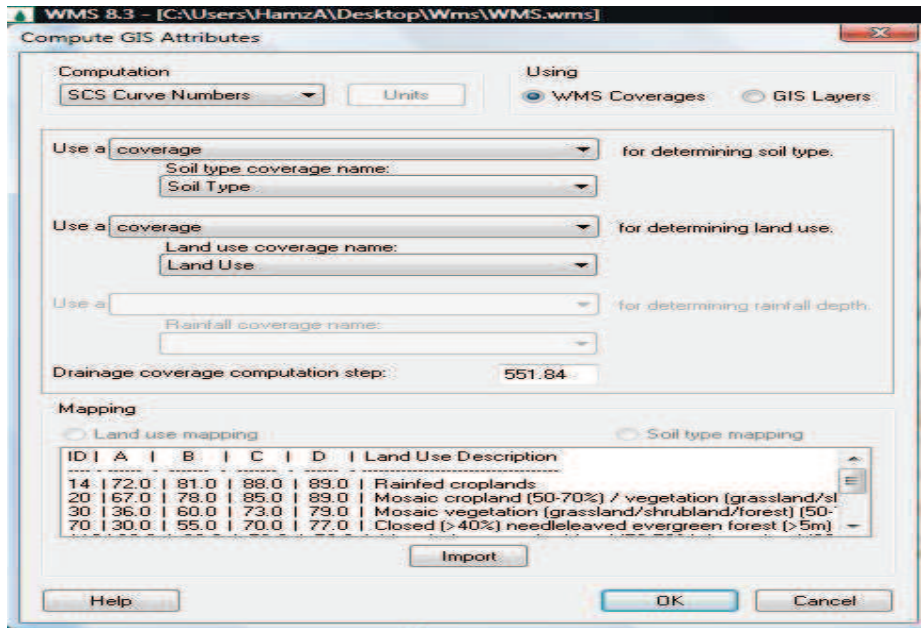


Figure 24 : Calcul du numéro de courbe (SCS-CN) par WMS

Le coefficient CN obtenu est la moyenne des CN des différentes sous-sections du bassin versant, pondérée par la superficie de ces sous-sections, un rapport s’affiche sous un format texte à la fin du processus du calcul de CN (Figure 25), les résultats obtenus sont les suivants :

	Bassin Mdouar	Bassin Intermédiaire
Numéro de courbe (CN)	69.5	73

Tableau 10 : Valeurs de CN pour chaque bassin

Runoff Curve Number Report (Generated by WMS)			
Tue Apr 23 00:47:32 2013			
Runoff Curve Number Report for Basin 1B			
HSG	Land Use Description	CN	Area km ²
			Product CN x A
B	Mosaic vegetation (grassland/shrubland/forest)	60	181.154
B	Mosaic cropland (50-70) / vegetation (grassla	78	95.746
B	Mosaic forest or shrubland (50-70) / grasslan	60	56.574
B	Closed (>40) needleleaved evergreen forest (>	55	22.219
B	Closed to open (>15) (broadleaved or needlele	56	70.804
B	Mosaic grassland (50-70) / forest or shrublan	66	55.528
B	Rainfed croplands	81	1.996
D	Mosaic vegetation (grassland/shrubland/forest)	79	113.049
D	Mosaic grassland (50-70) / forest or shrublan	83	33.564
D	Mosaic cropland (50-70) / vegetation (grassla	89	30.054
D	Mosaic forest or shrubland (50-70) / grasslan	79	31.093
D	Closed to open (>15) (broadleaved or needlele	77	49.176
D	Closed (>40) needleleaved evergreen forest (>	77	1.803
D	Sparse (<15) vegetation	88	3.483
B	Sparse (<15) vegetation	77	2.584
CN (weighted) = Total Product \ Total Area			
=====			
69.4742			

Figure 25-a : Numéro de courbe calculé pour le bassin

Mdouar

Runoff Curve Number Report (Generated by WMS)			
Tue Apr 23 00:47:32 2013			
Runoff Curve Number Report for Basin 2B			
HSG	Land Use Description	CN	Area km ²
			Product CN x A
D	Mosaic vegetation (grassland/shrubland/forest)	79	65.046
D	Mosaic cropland (50-70) / vegetation (grassla	89	126.482
D	Closed to open (>15) (broadleaved or needlele	77	31.441
D	Mosaic forest or shrubland (50-70) / grasslan	79	16.295
D	Rainfed croplands	89	3.542
B	Mosaic cropland (50-70) / vegetation (grassla	78	374.603
B	Closed to open (>15) (broadleaved or needlele	56	68.585
B	Mosaic vegetation (grassland/shrubland/forest)	60	193.840
B	Mosaic forest or shrubland (50-70) / grasslan	60	84.081
B	Rainfed croplands	81	16.842
B	Sparse (<15) vegetation	77	2.400
B	Mosaic grassland (50-70) / forest or shrublan	66	26.092
B	Closed (>40) needleleaved evergreen forest (>	55	9.946
D	Bare areas	79	1.487
D	Mosaic grassland (50-70) / forest or shrublan	83	34.483
D	Closed (>40) needleleaved evergreen forest (>	77	1.768
D	Sparse (<15) vegetation	88	2.982
CN (weighted) = Total Product \ Total Area			
=====			
72.9778			

Figure 25-b : Numéro de courbe calculé pour le bassin

intermédiaire

ii. Calcul du temps de concentration (Tc)

Le temps de concentration est le temps écoulé entre le début d'une précipitation et l'atteinte du débit maximal à l'exutoire du bassin versant. Il correspond au temps nécessaire pour permettre à l'eau de ruisseler du point le plus reculé du bassin versant jusqu'à l'exutoire.

Le temps de concentration a été calculé par la méthode de Map Data qui se base généralement sur les paramètres géométriques du bassin tels que la pente, la longueur du cours d'eau, etc (Figure 26). C'est une méthode généralement précise mais qui prend aussi du temps lors du calcul.

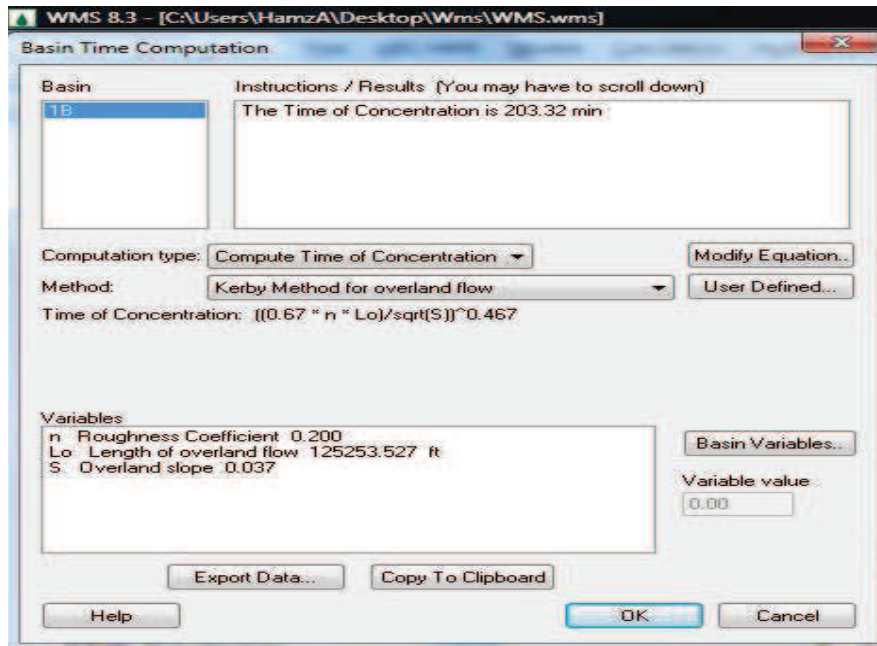


Figure 26 : Calcul du temps de concentration Tc par WMS

La formule utilisée est l'équation de Kerby :

$$\text{Equation} \quad \left(\frac{0.67 * n * Lo}{\sqrt{S}} \right)^{0.467}$$

Variables:

- **N** : Coefficient de rugosité ;
- **Lo** : Longueur du tronçon (ft);
- **S** : Pente du bassin versant.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant:

	Bassin Mdouar	Bassin Intermédiaire
Tc (hrs)	2.033	4.006

Tableau 11 : Temps de concentration (heures) pour chaque bassin

iii. Calcul du temps de réponse (Tlag)

Le temps de réponse d'un bassin t_p (ou "lag") est l'Intervalle de temps qui sépare le centre de gravité de la pluie nette de la pointe de crue ou parfois du centre de gravité de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface.

Le temps de réponse a été calculé par WMS (Figure 27) à l'aide de la formule SCS Method qui se base sur le numéro de courbe (CN) :

$$\text{Lag Time} = L^{0.8} * (((1000/CN)-10) + 1)^{0.7} / (1900 * \text{sqrt}(Y))$$

Variables

- **L** : Longueur du bassin versant (ft) ;
- **CN** : SCS numéro de courbe ;
- **Y** : Pente du bassin versant en pourcentage %.

Le tableau suivant représente les temps de réponse calculés

	Bassin 1B	Bassin 2B
Tlag (hrs)	1,2198	2,4036

Tableau 12 : Temps de réponse (Lag) pour chaque sous-bassins

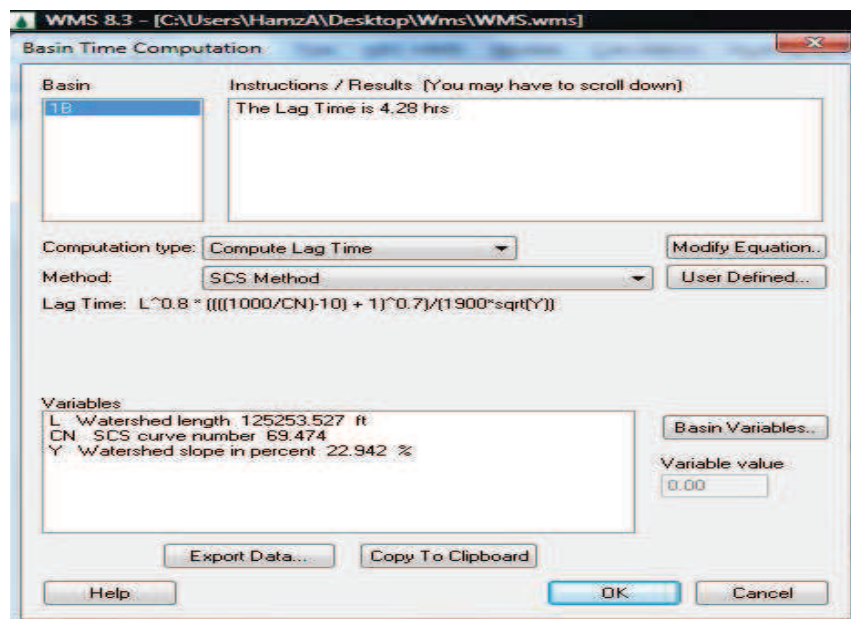


Figure 27 : Calcul du temps de réponse (Tlag) par WMS

Chapitre 4 : Modélisation et calage du modèle HEC-HMS

1. Préparation du modèle HEC-HMS

Prévu initialement pour être l'outil principal de modélisation dans ce projet, HEC-HMS est un modèle distribué qui permet de subdiviser un bassin versant en plusieurs parties, appelées sous-bassins, qui sont considérées comme ayant chacune des caractéristiques homogènes. Il est particulièrement bien adapté pour simuler le comportement hydrologique de bassins versants non urbanisés. HEC-HMS permet également de simuler et d'incorporer des réservoirs et des dérivations. Le modèle hydrologique HEC-HMS comprend une interface graphique, des capacités pour la manipulation, la gestion et le stockage de données, ainsi que des possibilités d'affichage et d'impression de résultats.

La modélisation pluie-débit événementielle des crues nécessite de considérer plusieurs composantes de l'écoulement ; le débit de base, les pertes et le transfert de l'écoulement des versants vers l'exutoire.

a. Débit de base : Modèle de récession

Le débit de base est la composante du débit qui retourne dans le cours d'eau depuis le stockage souterrain et les aquifères. La connaissance du débit de base est importante pour modéliser la récession de l'hydrogramme après la pointe de débit, ainsi que pour estimer le volume de la crue. La méthode de récession est une approche qui utilise un modèle de récession exponentielle du débit de base. Cette approche couramment utilisée est retenue dans le cadre de ce projet, elle est adaptée pour les bassins où le volume des crues est fortement influencé par les évènements pluvieux (USACE, 2010).

Dans le modèle de récession exponentielle, le débit de base B_t au pas de temps t est défini par :

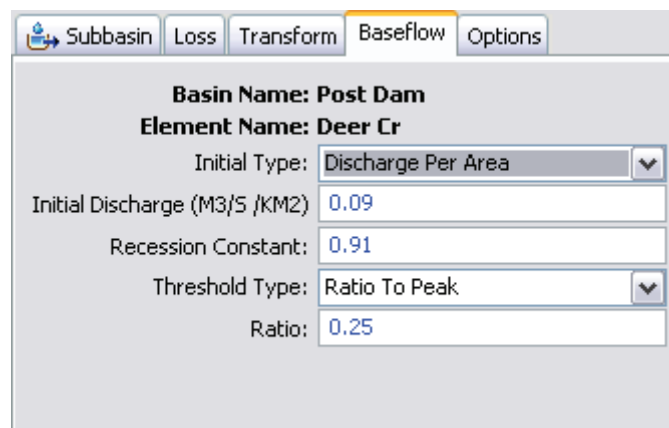
$$B_t = B_i R_c^t$$

Où :

- Bi : est le débit de base initial au temps t_0 ;
- Rc : la constante de décroissance exponentielle.

Les paramètres de la récession (Figure 28) sont :

- Le débit de base initial, Bi (m³s⁻¹)
- La constante de récession Rc ([0-1])
- Seuil, Td ([0-1])



Parameter	Value
Basin Name	Post Dam
Element Name	Deer Cr
Initial Type	Discharge Per Area
Initial Discharge (M3/S /KM2)	0.09
Recession Constant	0.91
Threshold Type	Ratio To Peak
Ratio	0.25

Figure 28 : Paramètres introduits dans le modèle de récession sur HEC-HMS

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).

b. Fonction de production : SCS-CN

Ce modèle estime les précipitations excédentaires en fonction des précipitations cumulées, de la couverture et de l'humidité initiale du sol. Pour cela est utilisé l'équation suivante :

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

Où :

- P_e : l'excès de précipitations ;
- P : le total des précipitations accumulées au temps t ;
- I_a : les pertes initiales ;
- S : le potentiel maximum de rétention.

Nous avons par ailleurs la relation empirique ci-dessous, qui a été développée à partir d'une analyse menée sur un ensemble de petits bassins versants expérimentaux qui donne I_a en fonction de S :

$$I_a = 0,2S$$

Donc :

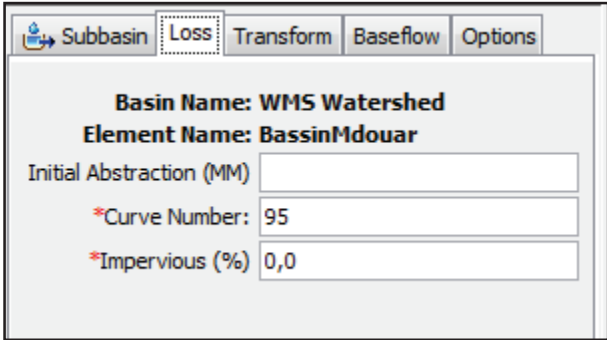
$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

Le potentiel de rétention S , et les caractéristiques du bassin versant sont reliées par l'intermédiaire du nombre CN par :

$$S = \frac{254400 - 254CN}{CN}$$

Sur HEC-HMS on introduit les paramètres (Figure 29) suivants :

- Numéro de courbe CN ;
- Impérmeabilité en %.



Subbasin	Loss	Transform	Baseflow	Options
Basin Name: WMS Watershed				
Element Name: BassinMdouar				
Initial Abstraction (MM)		<input type="text"/>		
*Curve Number:		95		
*Impervious (%)		0,0		

Figure 29 : Paramètres introduits dans le modèle SCS-CN sur HEC-HMS

Le CN peut être aussi estimé à partir de la carte du type du sol et d'occupation du sol du bassin versant.

c. Fonction de transfert : Clark Unit Hydrograph

Une fois que les précipitations en excès sont connues, elles sont transformées en ruissellement direct. 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 qui présentent une topographie et une occupation des sols variés (Sabol, 1988).

La méthode de l'hydrogramme unitaire de Clark représente 2 processus :

- la translation ;
- l'atténuation.

La translation est basée sur un histogramme synthétique temps-surface avec un temps de concentration T_c . 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 réservoir représente le stock à l'échelle du bassin, S_t . 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 de débit sont disponibles.

d. Calage du modèle

Le calage est un processus systématique d'ajustement des paramètres du modèle jusqu'à ce qu'il reproduise fidèlement les données observées. Klemeš (1986) a proposé un cadre conceptuel pour l'essai de modèles hydrologiques basé sur trois prémisses:

- Le modèle hydrologique est destiné à une application opérationnelle.
- Les critères pour l'évaluation de la performance du modèle sont définis par rapport aux tâches opérationnelles.
- Les critères sont calculés en comparant les estimations du modèle avec les observations.

La mesure quantitative du degré d'ajustement est donnée par la fonction objective. Dans la modélisation pluie-débit, cette fonction mesure la différence entre un hydrogramme observé et celui simulé par le modèle. Différentes fonctions objectives sont disponibles dans HEC-HMS ; la somme du carré des résidus, l'erreur en pourcentage sur le volume ou le débit maximum. La fonction par défaut, la racine de l'erreur quadratique moyenne pondérée pour les fortes valeurs (peak-weighted root mean square error) présente l'avantage de considérer à la fois la magnitude et la synchronisation temporelle de la crue. Elle utilise un facteur de pondération, qui donne plus de poids aux valeurs de débit supérieures à la moyenne des débits de l'épisode considéré.

$$PWRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (Q_o(t) - Q_M(t))^2 \frac{Q_o(t) + Q_A}{2Q_A}}{N}}$$

Et

$$Q_A = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Q_o(t)$$

Avec

- Q_0 : le débit observé ;
- Q_M : le débit simulé au pas de temps t ;
- Q_A : le débit moyen observé.

Le processus de calibration vise à trouver les paramètres optimaux pour minimiser la fonction objective. Deux méthodes de calibration automatiques sont disponibles dans HEC-HMS :

- La méthode du gradient univariée, qui permet d'ajuster un paramètre à la fois en tenant les autres constants.
- La méthode de Nelder et Mead, qui utilise l'approche du Simplex pour optimiser tous les paramètres simultanément.

2. Caractérisation des événements utilisés pour la modélisation du bassin Mdouar

Les données de précipitations sont disponibles pour plusieurs épisodes dans la station de Mdouar (23 épisodes) entre 1981 et 2008, la grande majorité ont lieu dans la période hivernale entre novembre et février.

Les événements seront numérotés de la façon suivante :

N° d'événement	Fonction	Episodes	Evénement
1	Calage	28/12/1981	28 Dec 81, 09:00 - 30 Dec 81, 11:00
2	Calage	31/12/1981	31 Dec 81, 13:00 - 02 Jan 82, 20:00
3	Calage	10/01/1982	10 Jan 82, 10:00 - 12 Jan 82, 20:00
4	Calage	16/01/1982	16 Jan 82, 04:00 - 18 Jan 82, 17:00
5	Calage	25/02/1982	25 Feb 82, 03:00 - 26 Feb 82, 18:00
6	Calage	15/11/1983	16 Nov 83, 13:00 -15 Nov 83, 01:00
7	Calage	20/12/1983	20 Dec 83, 21:00 - 22 Dec 83, 08:00
8	Calage	26/11/1985	26 Nov 85, 02:00 - 28 Nov 85, 02:00
9	Calage	01/01/1986	01 Jan 86, 12:00 - 02 Jan 86, 14:00
10	Calage	29/01/1986	29 Jan 86, 09:00 - 31 Jan 86, 10:00
11	Calage	31/01/1986	31 Jan 86, 11:00 - 03 Feb 86, 08:00
12	Calage	17/02/1986	17 Feb 86, 16:00 - 20 Feb 86, 02:00
13	Calage	20/02/1986	20 Feb 86, 03:00 - 21 Feb 86, 08:00
14	Calage	07/03/1986	07 Mar 86, 01:00 - 08 Mar 86, 14:00
15	Calage	12/01/1987	12 Jan 87, 16:00 - 14 Jan 87, 13:00
16	Calage	29/01/1987	29 Jan 87, 01:00 - 01 Feb 87, 08:00
17	Calage	21/02/1987	21 Feb 87, 09:00 - 24 Feb 87, 18:00
18	Calage	03/12/1987	03 Dec 87, 23:00 - 05 Dec 87, 23:00
19	Calage	27/12/1995	27 Dec 95, 07:00 - 28 Dec 95, 22:00
20	Calage	06/01/1996	06 Jan 96, 17:00 - 08 Jan 96, 11:00
21	Validation	14/11/2002	14 Nov 02, 01:00 - 14 Nov 02, 22:00
22	Validation	08/12/2003	08 Dec 03, 12:00 - 10 Dec 03, 23:00
23	Validation	29/11/2008	29 Nov 08, 22:00 - 30 Nov 08, 17:00

Tableau 13 : Numérotation des événements, relatives aux sous bassin Mdouar, au pas instantané

Le plus petit pas de temps disponible pour les épisodes de crue est de 60 minutes, aussi le pas de temps horaire est choisi pour la modélisation.

Les précipitations sont interpolées par la méthode de l'inverse distance afin de produire une pluie moyenne à l'échelle du bassin de Mdouar.

La synthèse de la caractérisation des événements est présentée dans le tableau suivant :

Caractérisation				
N°	Débit de base (m ³ s ⁻¹)	Débit max. (m ³ s ⁻¹)	Durée (heures)	Précipitations totales (mm)
1	5,9	421	51	68
2	51,2	602	54	74,8
3	8,9	355	59	68,4
4	30,1	423	62	36,7
5	18	399	39	27
6	10,4	679	38	99,1
7	116	1640	20	43,4
8	77	644	49	77,4
9	18,3	366	27	20,5
10	3	546	50	69,9
11	73,3	287	70	31
12	149	528	56	31,6
13	95,7	406	33	16,5
14	25,4	603	39	32,7
15	102,8	762	45	103,5
16	7	1110	80	180,7
17	60,8	550	82	55
18	41,6	464	41	52,2
19	20	720	21	52,3
20	34,2	801	15	21,8
21	0,5	763	22	75,6
22	61	1355,1	47	66,8
23	19	308,7	17	28,2

Tableau 14 : Caractérisation des événements, relatives aux sous bassin Mdouar, au pas instantané

3. Calage du modèle

Un modèle événementiel est choisi car de longues chroniques de données à des pas de temps infra-journaliers (horaire, tri-horaire...) ne sont pas disponibles dans le bassin Mdouar.

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.

Les hydrogrammes de crues de calage, obtenus par le modèle, sont représentés par la figure 30.

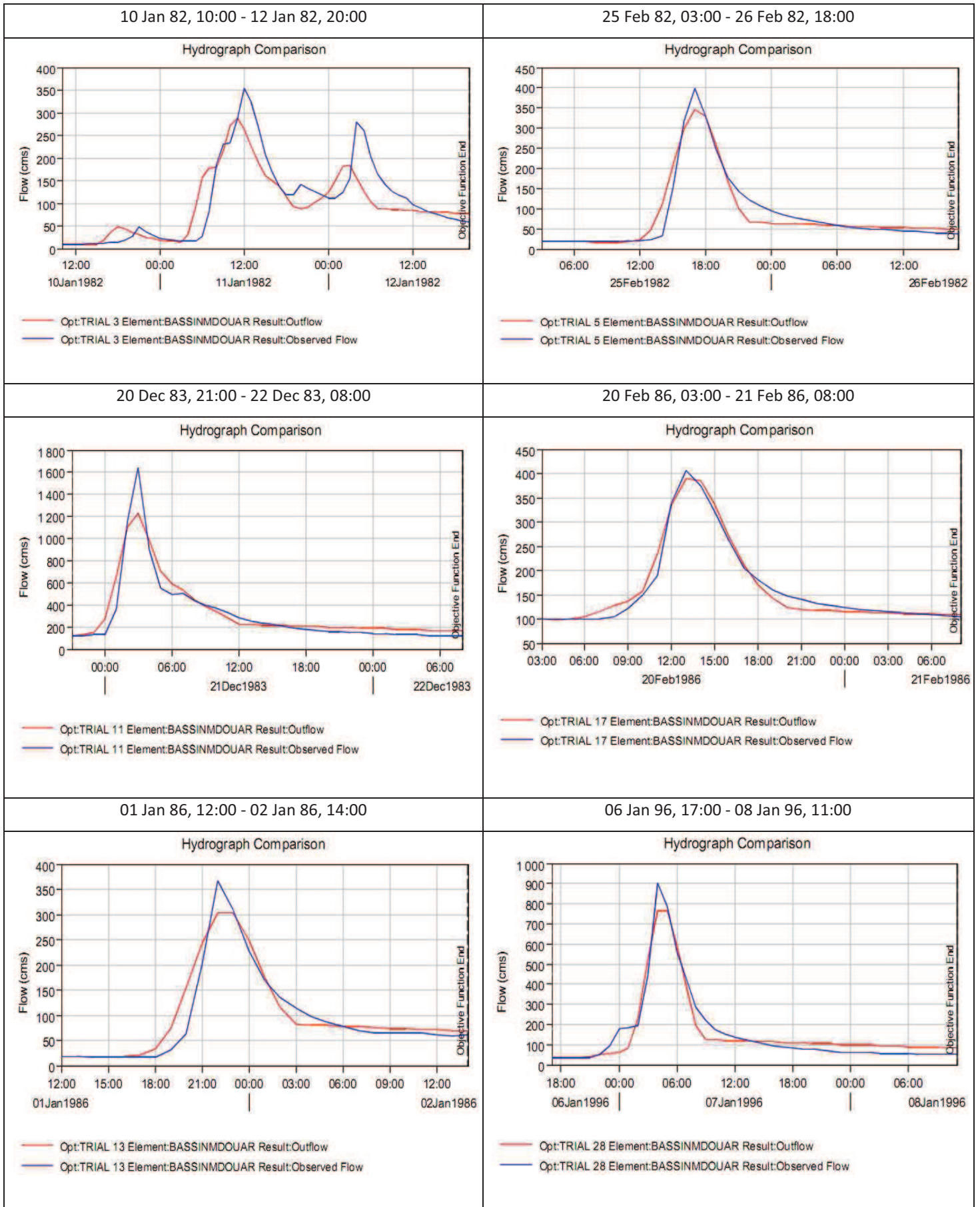


Figure 30 : Hydrogrammes des crues de calage de différents événements

La synthèse du calage du modèle sur la base des événements est représentée dans le tableau suivant :

Calage			
N° d'événement	Paramètres		
	CN	T_c (heures)	S_t (heures)
1	94,8	5,7413	2,3514
2	90,76	4,4281	3,1395
3	87,62	2,5579	4,2002
4	94,58	2,1227	4,0085
5	89,41	5,7273	1,6884
6	80,62	4,1	2,5
7	99	3,632	1,0671
8	90,76	5,7754	2,5608
9	94,88	4,9654	2,1821
10	92,46	4,9604	1,9461
11	84,16	2,9159	2,9952
12	98,11	4,2294	2,983
13	98,37	2,6306	2,557
14	95,89	4,122	2,7651
15	80,41	4,6216	1,3114
16	93,72	4,7686	2,3289
17	99	3,9371	5,9422
18	89,49	3,9371	5,9422
19	91,02	4,0827	2,983
20	99	2,3496	5,169

Tableau 15 : La synthèse du calage du modèle relative au sous bassin versant Mdouar

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 tous les 23 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.

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 constant de récession est une valeur qui présente le taux de décroissance du débit de base, une valeur de 0.9 signifie qu'on absence de précipitation, le débit provenant de l'écoulement de base à un instant donné représente 90% de la valeur observée.

Une valeur du seuil T_d 0,1 "ratio-to-peak" signifie que le ruissellement direct prend fin après que le débit ait diminué jusqu'à une valeur de 10 % du débit de pointe atteint auparavant.

Après calibration et examen visuel préalable sur tous les 23 évènements la valeur de R_c est fixée à 0,72 et le seuil T_d à 0,3. Seul le débit de base en début d'épisode est nécessaire. On observe dans le tableau 14 caractérisant les épisodes que ce débit de base est très variable selon les épisodes de 0,5 à 149 m^3s^{-1} .

Les paramètres de l'hydrogramme unitaire de Clark sont également déterminés par les caractéristiques du bassin telles que sa superficie, sa forme et sa topographie, mais néanmoins dans certains cas la calibration peut s'avérer problématique et influencer les résultats. Aussi les valeurs de S_t et T_c ont été calibrées pour chaque épisode, afin d'évaluer leur distribution.

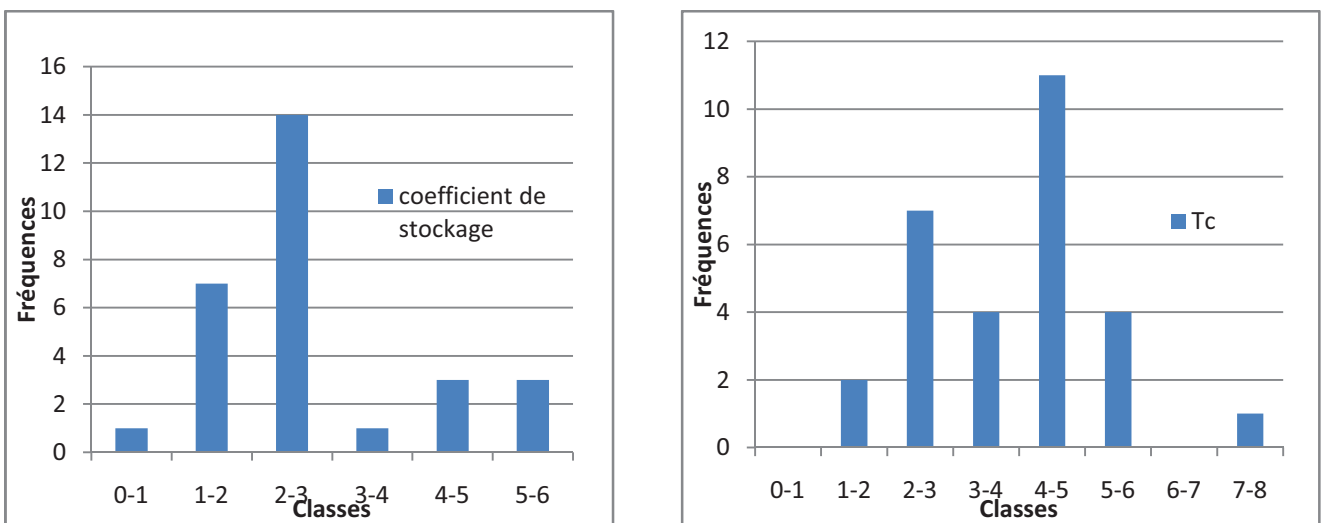


Figure 31 : Distribution des paramètres S_t et T_c optimisés pour chaque épisode

La figure 31 montre la distribution de S_t et T_c obtenus par calibration pour chaque épisode.

Les valeurs médianes respectivement de 2,4 pour S_t et 4 heures pour T_c sont convenables pour le plus grand nombre d'épisodes.

Le paramètre CN, représentant l'état du stock hydrique dans le bassin au début des évènements est lui aussi calibré pour chaque épisode. Les valeurs optimisées de CN pour chaque évènement varient de 80,41 à 99, l'analyse de la modification des valeurs de CN par des valeurs supérieures s'exprime physiquement par la modification de la végétation haute (arbres) en végétation basse (épineux, herbes, ...) c'est-à-dire l'effet de l'abattage des arbres privilégiant plus au moins le ruissellement de surface, aussi bien montre une grande variété de conditions initiales de saturation des sols au début des différents épisodes retenus.

La figure 32 montre la distribution du paramètre CN obtenu par calibration pour chaque épisode, une valeur moyenne de 90 serait représentative de tous les épisodes.

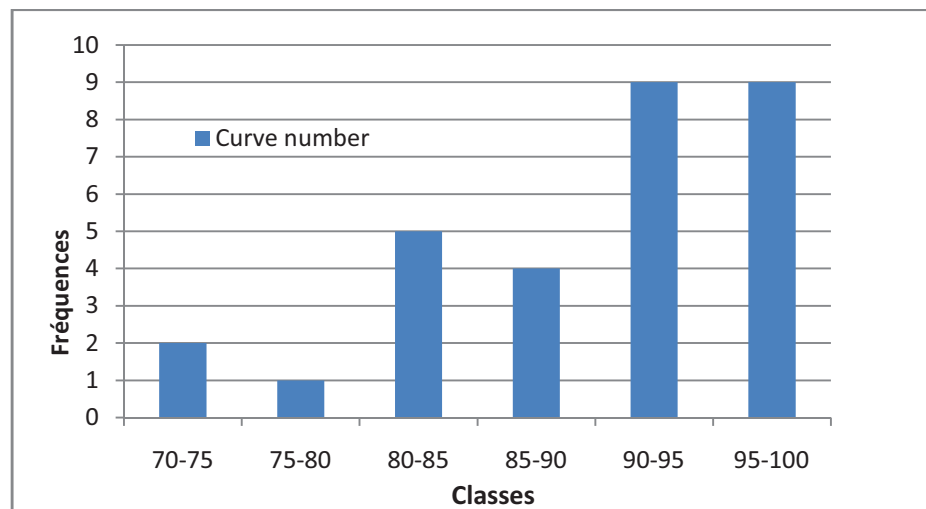


Figure 32 : Distribution du paramètre CN optimisé pour chaque épisode

4. Validation du modèle

Cette étape consiste à vérifier la reproductibilité des résultats par le modèle et la représentativité des paramètres calés pour savoir la capacité du modèle à simuler les résultats. Son principe est de tester le modèle avec les paramètres obtenus (CN , T_c et S_t) au calage sur une série de données non utilisées dans la phase du calage.

N° d'événement	Fonction	Episodes	Evénement
21	Validation	14/11/2002	14 Nov 02, 01:00 - 14 Nov 02, 22:00
22	Validation	08/12/2003	08 Dec 03, 12:00 - 10 Dec 03, 23:00
23	Validation	29/11/2008	29 Nov 08, 22:00 - 30 Nov 08, 17:00

Tableau 16 : Evénements utilisés pour la validation du modèle

Afin de valider notre modèle, on a appliqué aux autres crues des épisodes N° 21, 22 et 23 (Tableau 16) les paramètres CN, T_c et S_t ainsi retenus, à savoir CN=92, $T_c= 4$ heures et $S_t= 2,4$ heures.

La forme des deux courbes (Débits simulé et observé) est sensiblement la même, avec une coïncidence des temps de montée des crues aussi bien au niveau de la simulation que dans l'hydrogramme mesuré pour l'évènement 21 (Figure 33).

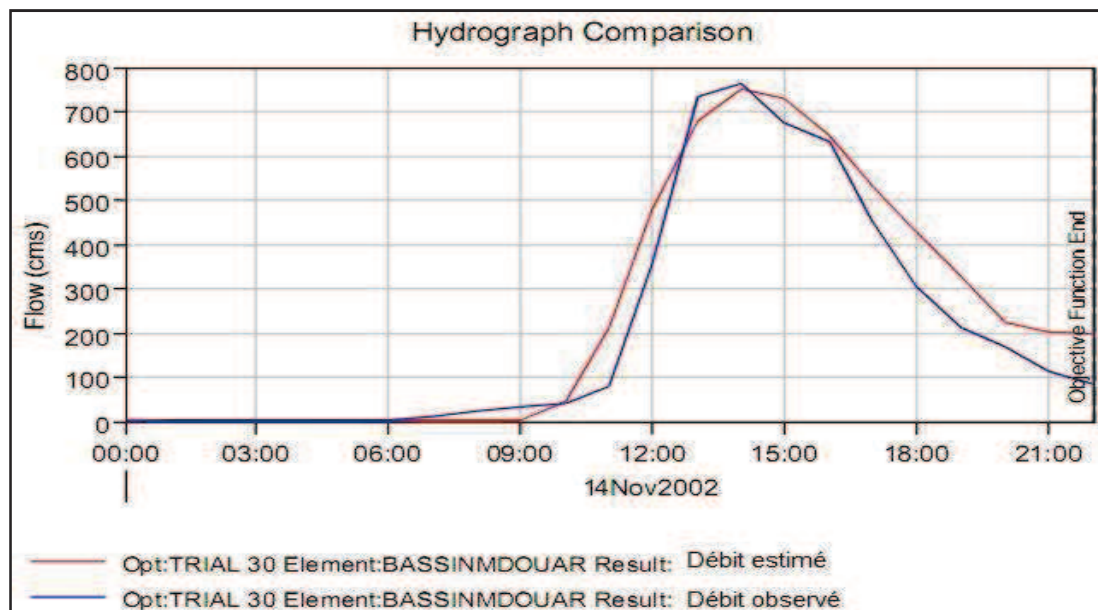


Figure 33 : Relation débit observé- débit estimé de l'évènement N° 21

Par contre on a constaté que notre modèle sous-estime les débits par rapport à la réalité pour la crue de l'évènement N° 22 (Figure 34).

Le débit de pointe n'est pas atteint. En effet, le volume ruisselé simulé pendant la montée de l'averse et inférieur à celui observé.

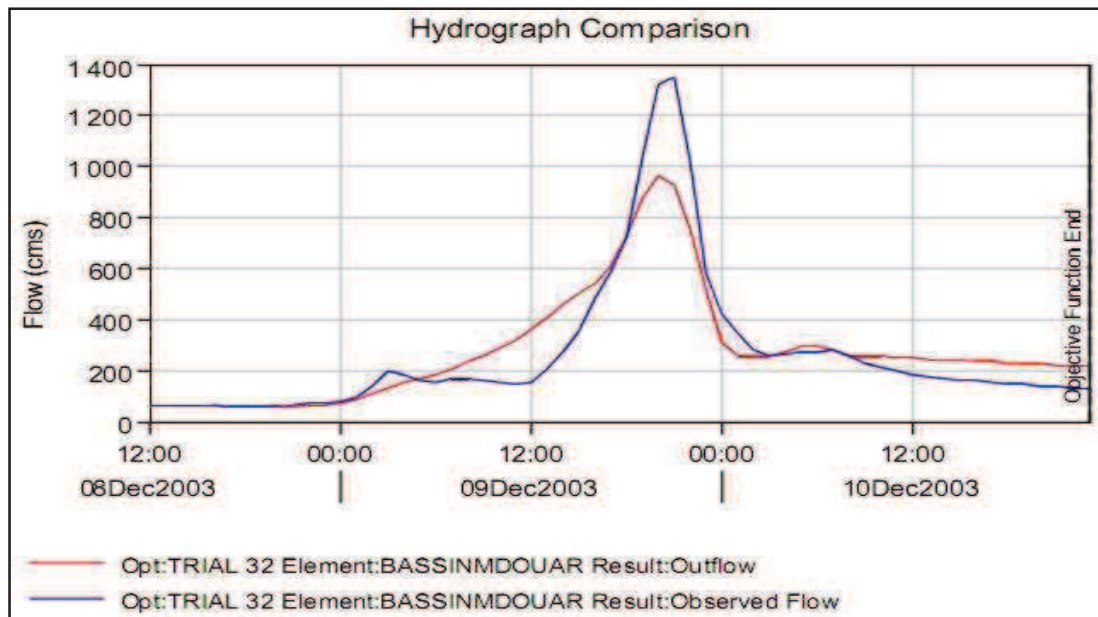


Figure 34 : Relation débit observé- débit estimé de l'événement N° 22

Pour la crue de l'événement N° 23, on a remarqué que les deux hydrogrammes ont relativement la même allure, la courbe de montée de l'hydrogramme simulé est au-dessous de celle de l'hydrogramme observé. Ceci est la conséquence du non prise en compte de l'état d'humidité du sol et de l'hétérogénéité spatiale de la pluie (Figure 35).

En réalité, les premières pluies sont acheminées directement vers l'exutoire, alors que pour le modèle, les premières pluies doivent être perdues.

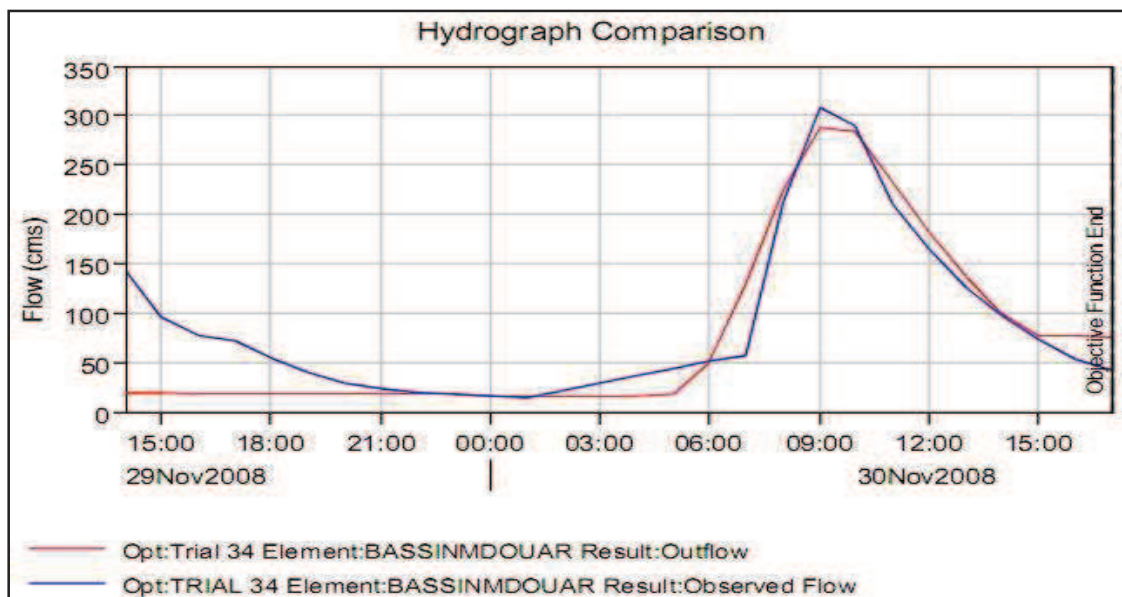


Figure 35 : Relation débit observé- débit estimé de l'événement N° 23

5. Evaluation de la qualité du modèle

Un modèle hydrologique est évalué par les critères d'évaluation de la qualité d'une simulation qui peuvent être parfois utilisés comme fonction objectif lors du calage du modèle, ou comme mesure d'évaluation de ses performances en validation. Il n'existe pas de critère d'évaluation universel.

Dans notre étude, nous utilisons les critères numériques qui se basent sur le calcul de l'erreur du modèle, c'est-à-dire la distance (évaluée de différentes manières selon le critère utilisé) entre les débits observés et simulés.

Dans tout ce qui suit, nous évaluons nos simulations en validation par les critères de Nash et Sutcliffe (1970).

a. Critère de Nash-Sutcliffe

C'est un critère de référence pour les hydrologues. Une simulation est souvent jugée satisfaisante pour un critère supérieur à 80%. Il s'exprime par l'équation suivante :

$$Nash = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{calc})^2}{\sum (Q_{obs} - Q_m)^2}$$

où Q_{obs} , Q_{calc} , Q_m sont respectivement les débits observés et simulés sur un pas de temps et la moyenne des débits observés. Le nombre total de pas de temps est n .

b. Erreur d'amplitude sur les pics

L'objectif des prévisionnistes, chargés de l'annonce des crues, est de prédire au mieux les hauteurs d'eaux maximales. Ce critère nous donne l'erreur commise par le modèle sur les pics de crue :

$$E_A = \frac{|\max(Q_{obs}) - \max(Q_{calc})|}{\max(Q_{obs})}$$

Le Tableau 17 rapporte les valeurs obtenues pour le critère d'évaluation de la qualité du modèle Nash-Sutcliffe :

	Nash
14/11/2002	87,80%
08/12/2003	83,30%
29/11/2008	82,70%

Tableau 17 : Valeurs du critère d'évaluation du modèle retenu pour le bassin du Mdouar

On constate que les performances en validation sont presque semblables d'un épisode à l'autre. Il semble que la simulation est satisfaisante puisque le critère de Nash est supérieur à 80%.

Le tableau 18 rapporte les erreurs d'amplitude obtenues en validation sur les 3 épisodes de crue du sous-bassin Mdouar. On note que les erreurs sont tellement faibles, ce qui montre que le modèle a bien estimé les débits de pointe.

	Max		Erreur d'amplitude sur les pics
	Q observé	Q simulé	
14/11/2002	749,6	763	0,0176
08/12/2003	961	1355,1	0,291
29/11/2008	287,3	308,7	0,069

Tableau 18 : Erreur d'amplitude du modèle en validation sur les 3 épisodes de validation

Conclusion

Au terme de ce travail, nous nous sommes intéressés à la modélisation hydrologique du bassin du Mdouar. Nous avons donc eu recours à plusieurs outils hydrologiques qui ont contribué à la réalisation de notre étude.

L'analyse fréquentielle des débits et pluies maximums journaliers a un rôle très important dans l'estimation de risque d'apparition d'une crue donnée pour une période de retour. A cet effet, le logiciel **Hyfran Plus** nous a permis de constater que la loi des fuites est la mieux adaptée pour l'estimation des débits maximums journaliers et la loi Log-normale la mieux adaptée pour l'estimation des pluies maximales journalières.

A l'aide de la plateforme **WMS**, nous avons effectué une délimitation automatisée du bassin versant d'Oued El Makhazine et de le subdiviser en deux ses sous-bassins : Mdouar et l'intermédiaire. Il nous a également permis de calculer un ensemble de paramètres géométriques (la surface, la pente du bassin, l'élévation moyenne du bassin...) (Figure, 22) et hydrologiques (le numéro de courbe, le temps de concentration et le temps de réponse).

Le modèle hydrologique **HEC-HMS** a été choisi comme étant l'outil principal de la modélisation pluie-débit événementielle des crues. Ainsi, pour mener des simulations, nous avons opté pour le modèle de récession pour le débit de base, la méthode de l'hydrogramme unitaire de Clark pour le modèle du ruissellement et la méthode SCS-CN pour le modèle d'infiltration.

Les paramètres du modèle de récession retenus sont la constante de récession R_c qui est fixée à 0,72, le seuil T_d qui est de l'ordre de 0,3 et le débit de base qui est très variable selon les épisodes de 0,5 à 149 m^3s^{-1} . Alors que les paramètres de l'hydrogramme unitaire de Clark sont également déterminés, les valeurs sont respectivement de 2,4 pour le Coefficient de stockage St et 4 heures pour le temps de concentration T_c . Pour le modèle d'infiltration, une valeur de 90 a été retenue pour le numéro de courbe CN.

L'évaluation de la qualité du modèle HEC-HMS semble satisfaisante puisque le critère de Nash est supérieur à 80% et les erreurs d'amplitude obtenues sont très faibles.

Références bibliographiques

- **ABHL, 2007**, Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos, Notes et données collectées à partir des tableaux de mesures des précipitations et de la pluviométrie de l'Agence en 2007.
- **ABHL1, 2006**, Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos, « Etude d'Actualisation du Plan Directeur d'Aménagement Intégrée des bassins Loukkos, Tangérois et côtiers méditerranéens ; Mission 2 : Elaboration du schéma d'aménagement, de développement et de protection des ressources en eau ; Sous-mission 2.1 : Elaboration des bilans ressources – besoins. 20 p..
- **ABHL2, 2006**, Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos, « Etude d'Actualisation du Plan Directeur d'Aménagement Intégrée des bassins Loukkos, Tangérois et côtiers méditerranéens ; Mission 1 : Analyse et Synthèse des Connaissances Actuelles dans le Domaine des Ressources en Eau – Evaluation et Prévision des Besoins et des Demandes en Eau, Sous-Mission 1.1 : Analyse et Synthèse des Connaissances Actuelles dans le Domaine des Ressources en eau ; Ressources En Eau Souterraines », Rapport d'études, 12 – 37 pp.
- **Géobase, 2004**, <http://geobase.ca/geobase/fr/>
- **Klemeš V., 1986**, Operational testing of hydrological simulation models. Hydrological Sciences Journal 31, 13–24 pp.
- **Roy L., 2000**, Évolution du risque hydrologique sur le bassin versant de la rivière Châteauguay. Unpublished Mémoire de maîtrise, ÉTS, Montréal.
- **Sabol G.V., 1988**, Clark Unit Hydrograph and r-parameter estimation. Journal of Hydraulic Engineering 114, 103-111 pp.
- **Service Géologique, 1971**, « Ressources en Eau du Maroc : Domaines du Rif et du Maroc oriental », Editions du Service Géologique du Maroc, Notes et mémoires du Services Géologique n° 231, pp. 113 – 118 pp.
- **Tramblay Y., 2012**, « Modélisation des crues dans le bassin du barrage Makhazine, Maroc » Institut de Recherche pour le Développement, Hydrosociences-Montpellier, France. 33 p..
- **Wahby Y., 2008**, Modélisation de la gestion des ressources en eau par le modèle MIKE BASIN et élaboration d'un SIG dans le bassin du Loukkos. Rapport de projet de fin d'étude, Université Mohammed V, Ecole Mohammadia d'ingénieurs de Rabat, 105 p..
- **USACE, 2010**, Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical reference manual version 3.5. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering center, Davis, CA.



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



Nom et prénom: Hamza BERROUCH

Année Universitaire : 2012/2013

**« Apport des outils Hyfran Plus, WMS et HEC-HMS à la Modélisation hydrologique
du bassin du Mdouar (Oued El Makhazine), Maroc septentrional »**

Résumé

Notre étude a pour objectif la caractérisation et la modélisation hydrologique du bassin versant du Mdouar. Pour cela, nous avons utilisé plusieurs outils hydrologiques.

Le logiciel Hyfran Plus nous a permis de faire une analyse fréquentielle sur une longue série de débits et de précipitations maximaux journaliers enregistrés dans la station du Mdouar. Cette analyse permettra d'estimer le temps de retour d'une valeur soit de débit ou de précipitation.

A l'aide de la plateforme WMS, nous avons effectué une délimitation automatisée du bassin versant et calculé un ensemble de paramètres géométriques et hydrologiques.

Quant au modèle hydrologique HEC-HMS, l'outil principal de la modélisation pluie-débit événementielle des crues, nous avons opté pour le modèle de récession pour le débit de base, la méthode de l'hydrogramme unitaire de Clark pour le modèle du ruissellement et la méthode SCS-CN pour le modèle d'infiltration.

L'évaluation de la qualité de ce modèle semble satisfaisante puisque le critère de Nash est supérieur à 80% et les erreurs d'amplitude obtenues sont très faibles.

Mots clé : Modélisation, Hydrologie, SIG, Hyfran Plus, WMS, HEC-HMS.