

Université Cadi Ayyad
Faculté des Sciences et Techniques
Marrakech



Département des Sciences de la Terre

Mémoire de Stage de Fin d'Etudes

Master Sciences et Techniques
Eau et Environnement



Application de l'algorithme génétique à la modélisation des crues

Exemple : Bassin d'Oued N'Fis.

Réalisé par

El Alaoui El Fels ABDELHAFID

Encadré par

Mr A.Bachnou

Mr M.M .saidi

Soutenu le 29 juin 2012 devant le jury composé de :

Pr Nourdine ALAA

Pr Ali BACHNOU

Pr Houssayen HANICHE

Pr Mohamed el mehdi SAIDI

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.

Remerciement

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

Je remercie les professeurs ALAA Noureddine, BACHNOU Ali et SAIDI Mohamed El Mehdi qui m'ont accordé leur confiance et m'ont prodigué leurs nombreux et précieux conseils.

Je remercie également M. AIT BBRAM Mohamed, pour ses efforts et sa disponibilité durant ma période de stage.

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

Sommaire

Introduction	p8
Chapitre 1 : Cadre général du bassin versant de l'Oued N'Fis	P10
1. Contexte géographique	P 10
2. Climatologie	P 11
3. Cadre géologique général	P12
4. lithologie	p12
5. Morphologie du bassin versant	p13
a. Indice de compacité	p13
b. Le relief et la courbe hypsométrique	p14
c. Le rectangle équivalent	p16
d. La pente moyenne	p17
e. Temps de concentration	p17
6. Réseau hydrographique	p18
7. Données et traitements	p19
a. Précipitations	p19
b. Apport liquide	p20
Chapitre 2 : Analyse des données (Précipitation /débit)	p22
1. Régime pluviométrique du bassin versant de l'oued N'Fis	p22
a. Précipitations moyennes mensuelles	p23
b. Précipitations moyennes annuelles	p24
c. Ajustement de lois	p24
i. Présentation du logiciel	p24
ii. Méthode visuelle (analyse des graphes)	p26
iii. Méthode numérique (analyse des critères statistique)	p27
iv. Estimation de la précipitation selon les périodes de retour	p27
v. Critères de la loi d'ajustement la mieux adaptée	p28
2. Analyse des débits	p28
a. Débits moyens mensuels et régime hydrologique	p28
b. Débits moyens annuels	p29
c. Ajustement de lois	p29
i. Méthode visuelle (analyse des graphes)	p29
ii. Méthode numérique (analyse des critères statistique)	p29
iii. Estimation du débit de retour	p31
iv. Critères de la loi d'ajustement la mieux adaptée	p31

Chapitre 3 : Etude et analyse statistique des crues du bassin versant de l'Oued N'Fis

N'Fis	p35
1. Définition et caractéristique des crues	p35
2. La crue dans l'année hydrologique	p36
3. Temps de montée et temps de base	p37
4. Vitesse de propagation d'une crue	p39
5. Facteurs d'influence de la réponse hydrologique dans le bassin versant de l'Oued N'Fis	p41
6. Typologie des crues du bassin versant de l'Oued N'Fis	p41

Chapitre 4 : Application de l'algorithme génétique à la modélisation des crues

1. Notion d'algorithme génétique	p45
2. Définition d'un modèle hydrologique	p52
3. Choix d'un modèle de propagation hydraulique	p53
a. Présentation du modèle de propagation hydraulique Hayami	p54
b. Solution analytique	p54
c. Le phénomène de la propagation des crues	p55
d. Applicabilité du modèle Hayami	p57
e. Calage des paramètres	p58
4. Calage du modèle Hayami par application de l'algorithme génétique	p58
5. Validation du modèle	p64
6. Evaluation de la qualité du modèle	p66

Conclusion générale et perspective

Bibliographie	p70
Liste des figures	p71
Liste des tableaux	p72

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 de l'oued N'Fis. Pour cela nous allons utiliser une base de données hydrologiques et géomorphologiques du bassin mise à notre disposition principalement par l'Agence de Bassin Hydraulique de Tensift.

Cette étude s'articulera donc autour de deux principales parties :

- Une première partie où nous utiliserons des lois statistiques applicables à l'hydrologie, et qui présentent un intérêt particulier lorsqu'on parle d'analyses fréquentielles et 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.

Par ailleurs, cette première partie comportera également une étude dynamique des crues, dans laquelle nous analyserons les hydrogrammes de crues, leurs formes, leurs caractéristiques et leurs moments d'apparition dans l'année hydrologique.

- Dans la seconde partie, nous allons essayer, premièrement de choisir un modèle mathématique de simulation des écoulements, dont le but est d'intégrer l'ensemble des données disponibles ; et deuxièmement d'optimiser les paramètres du modèle hydrologique choisi à l'aide d'une nouvelle technique, dite « algorithme génétique ». Et à la fin, 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 processus simulés.

Sommaire

Chapitre 1 : Cadre général du bassin versant de l'Oued N'Fis	P10
1. Contexte géographique	P 10
2. Climatologie	P 11
3. Cadre géologique général	P12
4. Lithologie	p12
5. Morphologie du bassin versant	p13
a. Indice de compacité	p13
b. Le relief et la courbe hypsométrique	p14
c. Le rectangle équivalent	p16
d. La pente moyenne	p17
e. Temps de concentration	p17
6. Réseau hydrographique	p18
7. Données et traitements	p19
a. Précipitations	p19
b. Apport liquide	p20

1. Contexte géographique

Le bassin versant de l'oued N'Fis est un sous bassin atlasique du grand bassin versant du Tensift dans la région de Marrakech. Il couvre une superficie de 1288 km² en considérant l'exutoire à Imin El Hammam. Limité au sud par le versant nord du Haut Atlas, au nord par la plaine du Haouz, à l'est par le bassin versant de l'oued Rérhaya, le secteur est caractérisé par des altitudes comprises entre 700 et 4000 m (fig. 1). La morphologie contrastée ainsi que la géologie du substrat rocheux vont jouer un rôle important dans la régulation du régime hydrologique du bassin (pente, lithologie...).

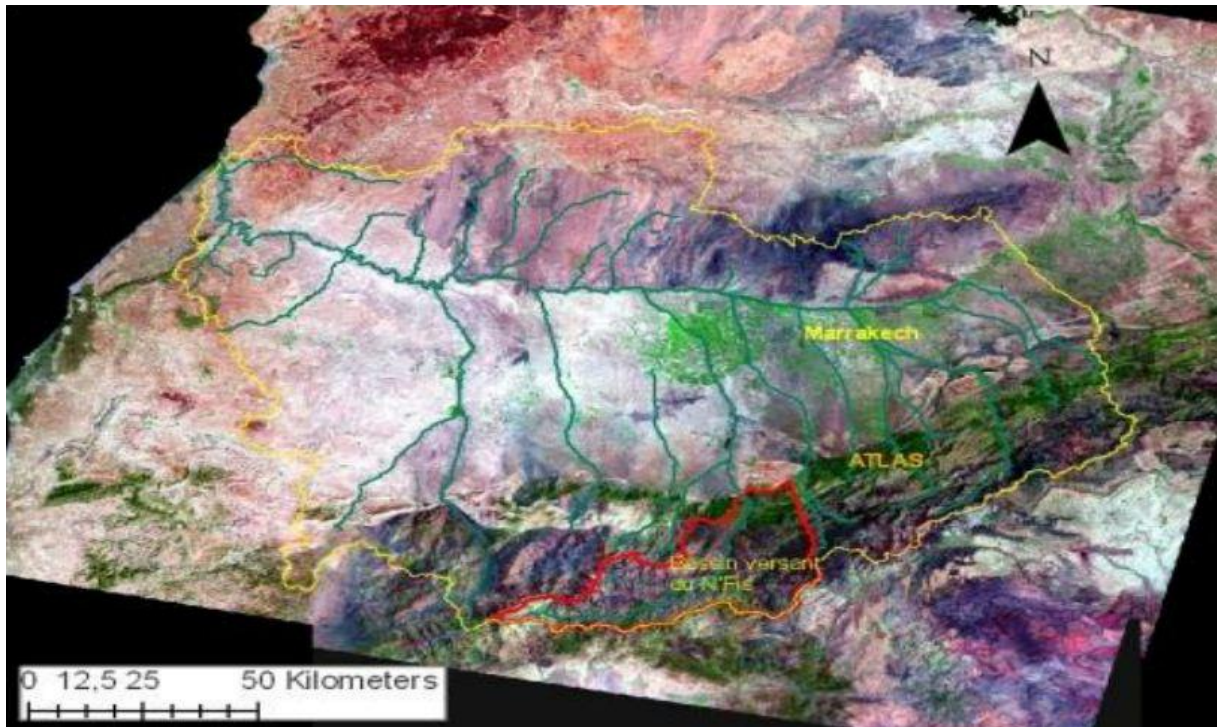


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de l'oued N'Fis

2. Climatologie

L'hétérogénéité topographique traduit une hétérogénéité climatique sur le bassin. En effet, les zones de basses altitudes (plaine du Haouz, non comprise dans le bassin versant considéré ici) sont soumises à un climat aride. Les précipitations annuelles n'y dépassent pas 300 mm et se caractérisent par des orages à l'été et s'intensifient particulièrement en hiver lors des dépressions venant du nord. On y trouve des reliques de forêts de feuillus. Enfin, aux zones de hautes altitudes, le climat est froid et les précipitations y sont les plus importantes de tout le bassin. Elles se présentent sous forme de neige.

La température est très élevée en été (46°C comme température maximale absolue) et relativement basse en hiver (-7°C comme température minimale absolue). La demande évaporatoire est très importante, avec un cumul annuel d'environ 1833,7 mm.

3. Cadre géologique général

Le bassin versant du N'Fis se compose essentiellement d'un socle primaire affecté par l'orogénèse hercynienne dont la couverture est d'âge secondaire et tertiaire. Il se divise en deux parties :

Domaine de la chaîne atlasique :

Il se compose de chaînes intercontinentales longues et étroites à formations mésozoïques en repos sur le socle hercynien ou précambrien.

Plaine du HAOUZ :

La plaine du HAOUZ est un bassin de sédimentation dans lequel se sont accumulées au Néogène et au Quaternaire des formations détritiques continentales et fluviales issues du démantèlement de la chaîne atlasique.

4. Lithologie

L'aspect lithologique se compose selon la carte géologique de 3 faciès majeurs (fig. 2) :

- Un faciès calcaire perméable dont l'âge est très varié : Crétacé, Eocène Jurassique à Primaire.
- Un faciès marno-gréseux souvent salifère et très peu perméable attribué au Crétacé, Jurassique et Permo-Trias.
- Des faciès magmatique ou métamorphique imperméables datés du Primaire et du Précambrien.

On note que dans l'ensemble, les faciès imperméables restent prédominants dans la partie active du bassin.

Quant à la plaine du HAOUZ, elle est constituée en surface d'alluvions du Quaternaire récent et sur sa frange sud du Quaternaire moyen et ancien. Ce sont des formations perméables qui ne permettent pratiquement aucun ruissellement.

SOL PERMEABLE	SOL SEMI PERMEABLE	SOL IMPERMEABLE
20%	9%	71%

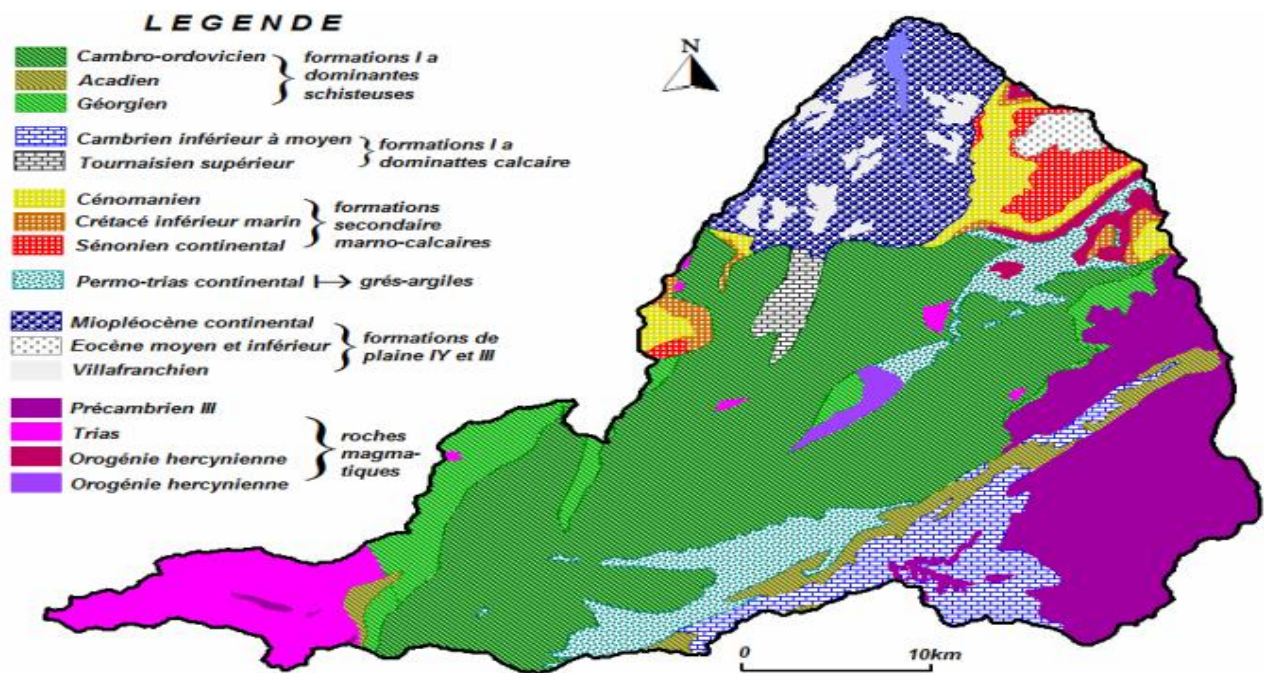


Figure 2 : Carte géologique du bassin versant de l'Oued N'Fis
(Extraite de la carte géologique de Marrakech au 1/500 000).

5. Morphologie

La forme d'un bassin versant est définie par sa superficie, son relief, ses pentes et la disposition de son réseau hydrographique. Ces caractéristiques purement géométriques du bassin s'obtiennent à l'aide d'une étude morphométrique et cartographique.

a- Indice de compacité Kc

C'est un indice établi en comparant la forme d'un bassin à celui d'un cercle pour lequel Kc est égal à 1. Il permet l'évaluation globale du réseau de drainage : un bassin très allongé (Kc élevé) ne réagira pas de la même manière qu'un bassin de forme ramassée (Kc faible). Il est calculé par la formule suivante :

$$Kc = P/2 (A)^{\frac{1}{2}} = 0,28 P/(A)^{\frac{1}{2}}$$

P: périmètre du bassin en km mesuré au curvimètre

A : surface du bassin en km² mesurée au planimètre.

Les résultats des mesures pour le bassin versant de N'Fis à la station d'Imin El Hammam sont représentés dans le tableau ci-dessous (Tabl. 1) :

Superficie du bassin	1282 km ²
Périmètre du bassin	214 km
Indice de compacité	1,67

Tableau-1 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant de N'Fis

D'après ces résultats, il ressort que le bassin versant de N'fis est à peu près 7 fois plus long que large. Cette forme allongée va permettre dans le bassin versant de N'fis un léger amortissement des écoulements qui ne seront pas simultanés comme dans le cas d'un bassin terrassé (Ourika avec $K_c = 1,3$ par exemple).

b- Le relief et la courbe hypsométrique

L'influence du relief est encore plus évidente sur la vitesse d'écoulement. Le relief est indiqué sur la carte topographique par la disposition et la valeur des courbes de niveau. Il est souvent caractérisé par la carte hypsométrique qui présente les différentes tranches d'altitude (fig. 3).

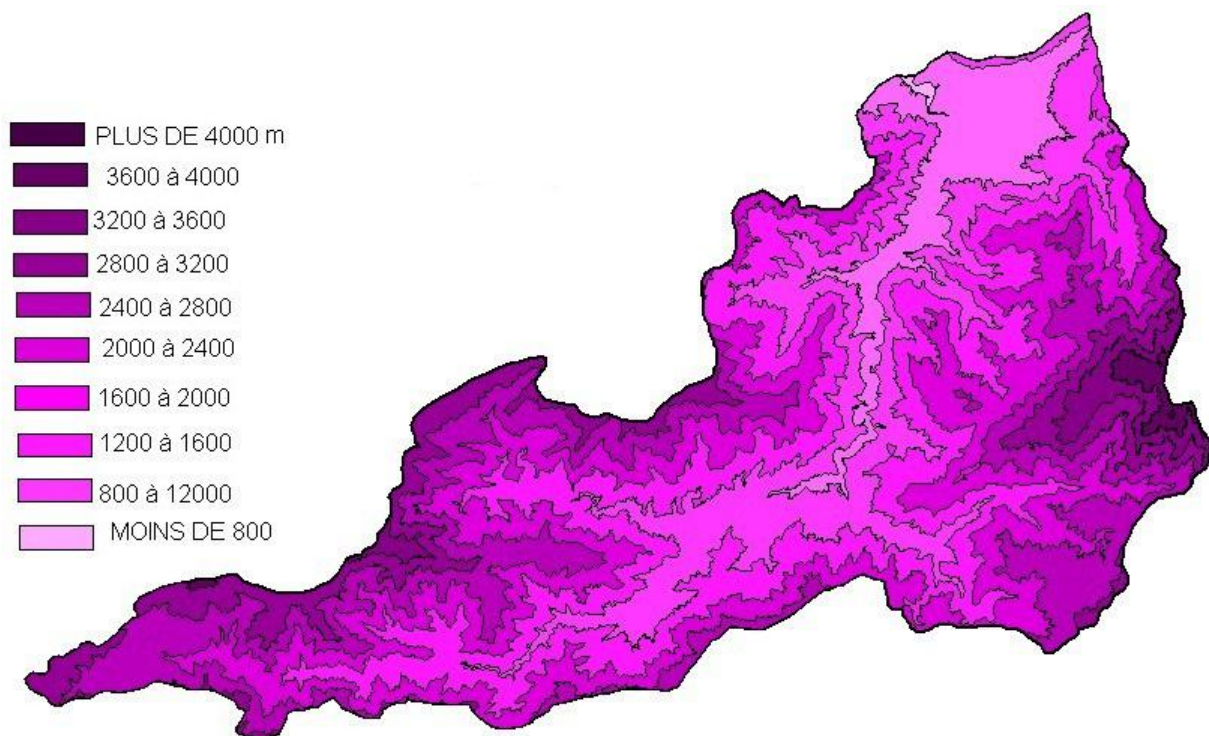


Figure 3 : Carte hypsométrique du bassin versant de l'Oued N'Fis

La courbe hypsométrique est obtenue en planimétrant les surfaces comprises entre les courbes de niveau et qui différencie 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 (tabl. 2) :

Tranches d'altitudes (m)	Surfaces élémentaires (km ²)	Fractions de surface (%)
770 -800	1,4	0,1
800-1200	89,6	7
1200-1600	193	15
1600-2000	305	23,82
2000-2400	322,6	25,2
2400-2800	223,4	17,44
2800-3200	107,6	8,4
3200-3600	27,7	2,16
3600-4000	9,8	0,76
4000-4088	0,2	0,01
Total	1280,3	99,89

Tableau-2 : Répartition hypsométrique du bassin versant de N'Fis à Imin El Hammam

La courbe hypsométrique (fig. 4) peut être établie à partir du tableau 2 en portant les tranches d'altitude (en m) en ordonnées et les fractions de surface (%) en abscisses ; elle est considérée comme une sorte de profil du BV à partir duquel on peut tirer les informations suivantes :

- Un relief montagneux très élevé occupe 77,79 % alors que le piémont occupe 22,1%
- l'altitude moyenne : 2074m
- l'altitude médiane : 2080m

L'altitude la plus fréquente du bassin se situe entre 1600 et 2000 m et représente 23,82 %.

On remarque que les altitudes de ce bassin versant sont relativement élevées, ce qui va favoriser des précipitations importantes dans ce milieu semi-aride.

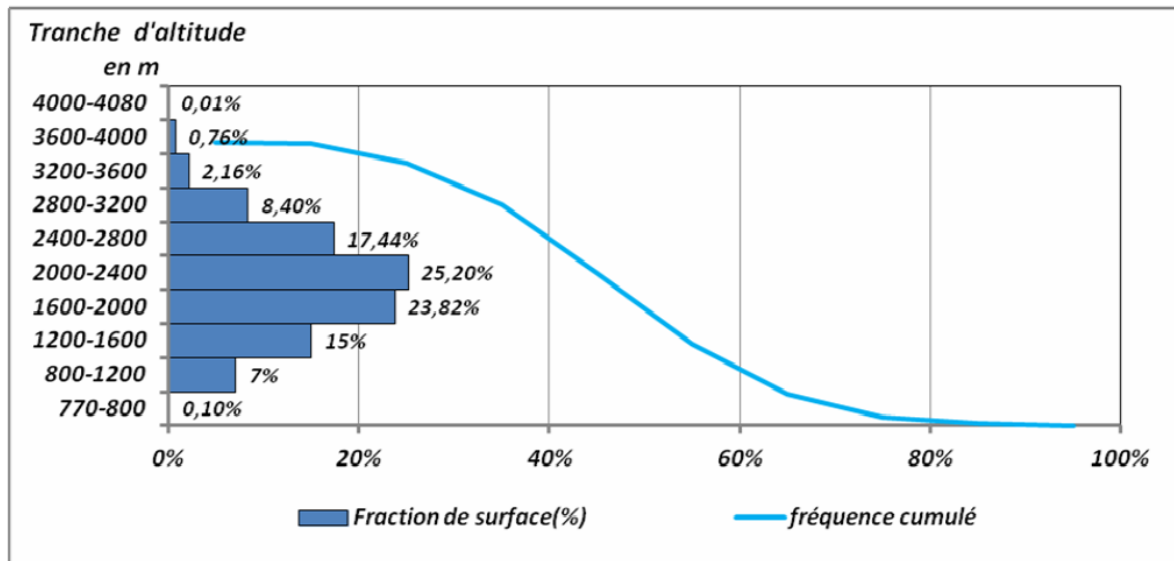


Figure 4 : Courbe hypsométrique du bassin versant de N'Fis à Imin El Hammam.

c- Le rectangle équivalent

Il s'agit d'une transformation purement géométrique du bassin en un rectangle de longueur L et de largeur l ayant le même périmètre et la même surface que le bassin versant. Les courbes de niveau sont parallèles à ses petits côtés et l'exutoire sera un des petits côtés du rectangle.

$$L = [Kc(A)^{1/2}/1.12][1+(1-(1.12/Kc)^2)^{1/2}]$$

$$l = [Kc(A)^{1/2}/1.12][1-(1-(1.12/Kc)^2)^{1/2}]$$

Avec :

Kc: indice de compacité

A : surface du bassin

Pour le bassin versant de N'Fis à Imin El Hammam, les paramètres du rectangle équivalent sont : L = 92,92 km et l = 13,77 km. Ces paramètres confirment le résultat de l'indice de compacité, c'est à dire que le bassin est 6 à 7 fois plus long que large et que les écoulements seront légèrement amortis.

d- La pente moyenne

La pente influence puissamment l'importance de l'écoulement. Lorsque la pente augmente, l'écoulement s'accélère vers le bas.

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

$$P \text{ (pentes moyennes)} = Dt/L$$

Avec L la longueur du rectangle et Dt la dénivellée totale

Pour le bassin versant de N'Fis, on trouve une pente moyenne de l'ordre de 3,5%.

e-Temps de concentration :

Pour ce paramètre on tient compte des caractéristiques géométriques et morphologiques du bassin versant. Il est donné par la relation de Giadoht :

$$TC = (4(S)^{1/2} + 1,5 * L / 0,8(H_{moy} - H_{min})^{1/2}$$

- S=surface du bassin versant (Km²)
- H.moy=altitude moyenne (m)
- L=longueur du rectangle équivalent (km)
- H.min=altitude à l'exutoire (m)

Le temps de concentration du bassin versant de N'Fis à Imin El Hammam est TC=8h30min (tabl. 3). Il correspond au temps maximal nécessaire au ruissèlement en provenance du point le plus éloigné d'atteindre l'exutoire.

Surface du B.V	1282 Km ²
Longueur du rectangle équivalent	92.92
Altitude à l'exutoire	770m
Altitude moyenne du bassin	2074m
Temps de concentration	8 heures 30 min d'après l'ABHT

Tableau-3 : Caractéristiques physiques du bassin versant de N'Fis

6. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de l'oued N'Fis (fig. 5) mesure au total 3322 km environ au barrage Takerkoust, son cours principal mesure 152 km jusqu'à la confluence avec l'oued Tensift.

Ce réseau est caractérisé par une forte densité de drainage de l'ordre de $1,97\text{km}/\text{km}^2$. Il en résulte une forme arborescente et dendritique (très ramifiée) du réseau hydrographique, ce qui pourrait accentuer la brutalité des crues.

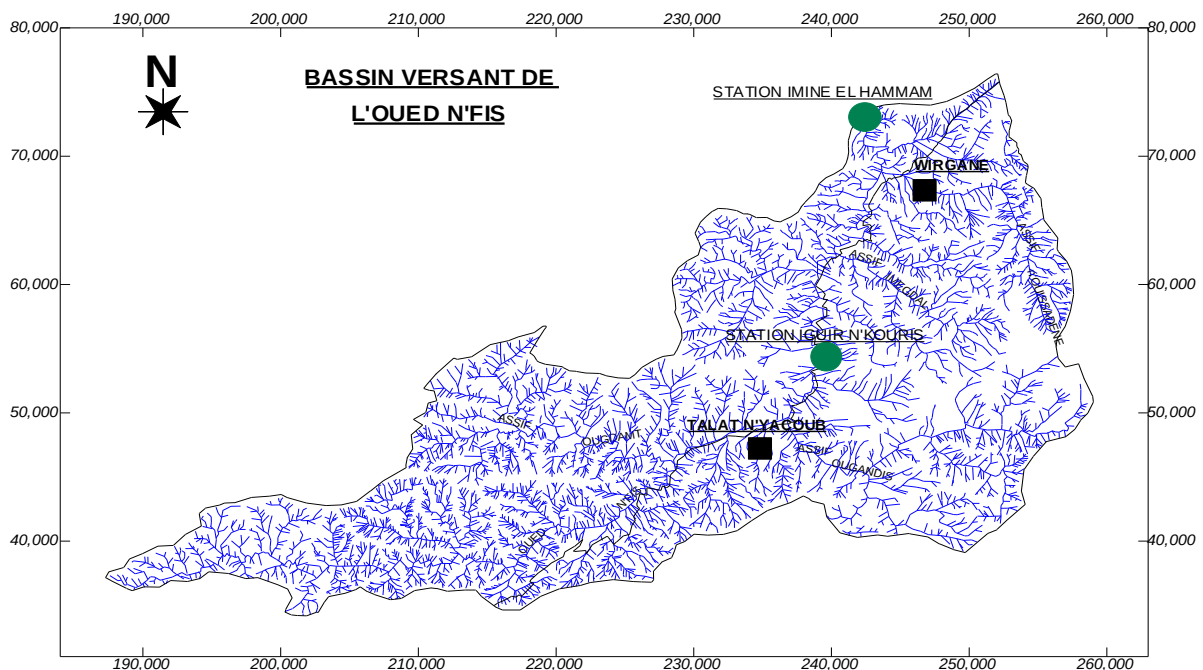


Figure 5 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued N'Fis (d'après l'ABHT)

Les principaux affluents sont :

- L'oued AMEZMIZ affluent rive gauche draine un bassin de 105 km^2 à la station hydrologique SIDI HSSAIN N° 2431/53 en service depuis Janvier 1988 ;
- ASSIF OUGDEMOT : affluent rive gauche du N'FIS qui prend naissance aux environs d'IGDAT à une altitude de 3616 m ;
- Oued OUIRGANE : affluent rive droite, il prend naissance dans la région de TAZAGHANT à une altitude de 3650 m environ ;
- ASSIF IMIGDAL : affluent rive droite, il prend naissance à l'altitude 3400 m environ ;

- ASSIF N'AUGRANDIS : affluent rive droite, il prend naissance dans la région de OUANOUKRIM à une altitude de 3600 environ.

7. Données et traitement

a. Précipitations

Les données de précipitations sont acquises à l'aide de pluviomètres localisés dans 7 stations réparties sur le bassin versant de N'Fis. La série de mesure disponible pour cette étude s'étale sur 40 années hydrologiques (de 1963 à 2007). Le tableau 4 présente les 7 stations, leurs altitudes et leurs périodes de fonctionnement correspondantes.

NOM DU POSTE	N° IRE	Nbre ans observés	COORDONNEES			ORGANISME
			X	Y	Z	
OUIRGANE	5913	72	244.65	67.630	5913	EF
TALATE N'OS	7608	30	239.55	458.550	7608	EF
IJOUKAK	4328	35	236.90	446.70	4328	EF
IDNI	4248	13	223.25	437.90	4248	EF
AGHBAR	1232	59	216.20	434.75	1232	EF
N'KOURIS	4299	30	238.90	453.800	4299	ABHT
IMIN.EL HAMMAM	4432	34	241.40	72.40	4432	ABHT

Tableau-4 : Stations pluviométriques du bassin versant de l'oued N'Fis

Les mesures sont relevées quotidiennement par un opérateur et transmises à l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift (ABHT) et la direction régionale des eaux et forêts (EF).

b. Apport liquide

Les débits instantanés sont mesurés au niveau de deux stations hydrologiques Imin el Hamame et Iguir Nkouris que se situent respectivement en aval et en Amont du bassin

versant de l'Oued N'Fis. Les mesures sont relevées quotidiennement par un opérateur et transmises à l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift (ABHT).

Le débit moyen annuel à Imin el Hamame est de $7.131 \text{ m}^3/\text{s}$, soit un volume annuel de 225 Mm^3 . Ce débit moyen varie entre un maximum de $21.05 \text{ m}^3/\text{s}$ (1987/88) et un minimum de $0.103 \text{ m}^3/\text{s}$ (2000/01).

Chapitre 2 : Analyse des données (Précipitation /débit)	p22
1. Régime pluviométrique du bassin versant de l'oued N'Fis	p22
a. Précipitation moyenne mensuelle interannuelle	p22
b. Précipitations annuelles	p23
c. Ajustement de lois	p24
i. Présentation du logiciel	p24
ii. Méthode visuelle (analyse des graphes)	p24
iii. Méthode numérique (analyse des critères statistiques)	p26
iv. Estimation de la précipitation selon les périodes de retour	p27
v. Critères de la loi d'ajustement la mieux adaptée	p27
2. Analyse des débits	p28
a. Débits moyens mensuels et régime hydrologique	p28
b. Débits moyens annuels	p28
c. Ajustement de lois	p29
i. Méthode visuelle (analyse des graphes)	p29
ii. Méthode numérique (analyse des critères statistiques)	p29
iii. Estimation du débit de retour	p31
iv. Critères de la loi d'ajustement la mieux adaptée	p31

L'objectif de ce chapitre est de faire une analyse fréquentielle sur une longue série de débits et de précipitations maximaux journaliers enregistrés au niveau de la station Imin El Hamam. 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 oued N'Fis

a. Précipitation moyennes mensuels

La représentation graphique des variations des moyennes mensuelles interannuelles des précipitations, sur une période de 33 ans (1968-2002), montre une variation irrégulière ;

les fortes valeurs sont enregistrées au niveau des mois d'Avril et Mars (les mois les plus pluvieux), alors que les faibles valeurs caractérisent les mois de Juillet et Août (les mois les plus secs) (Fig. 6).

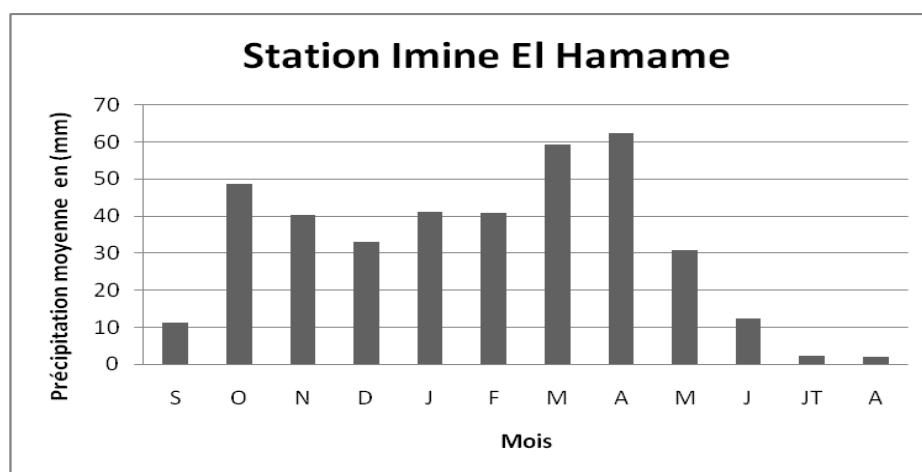


Figure 6 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles au niveau du bassin versant de l'Oued N'Fis

b. Précipitations annuelles

L'analyse de l'évolution des précipitations à Imin El Hamame, sur une période de 34 ans (1968-2002), montre que l'année 1973-1974 est la plus arrosée avec 700 mm et l'année 2000-2001 est la plus sèche avec 265 mm. Notons que la précipitation moyenne interannuelle s'évalue à 384 mm (fig. 7).

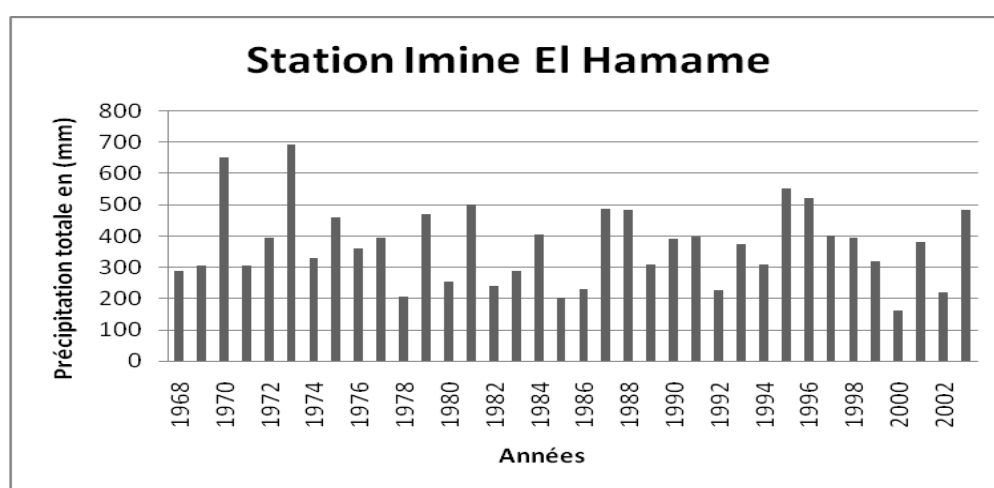


Figure 7 : Précipitations totales annuelles au niveau du bassin versant de l'Oued N'Fis

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 de l'Oued N'Fis, et ce, sur une période d'observation de 34 ans (1970/71 - 2003/2004).

Les lois statistiques appliquées dans cette étude sont : loi de Gumbel, loi de Weibul et loi exponentielle. 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 8 montre des graphiques qui présentent les probabilités empiriques et théoriques des distributions des lois de Gumbel, exponentielle et Halphen sur papier de probabilité normal.

Visuellement on remarque que les lois Gambel et Halphen présentent les meilleurs ajustements de la variable précipitation maximale journalière.

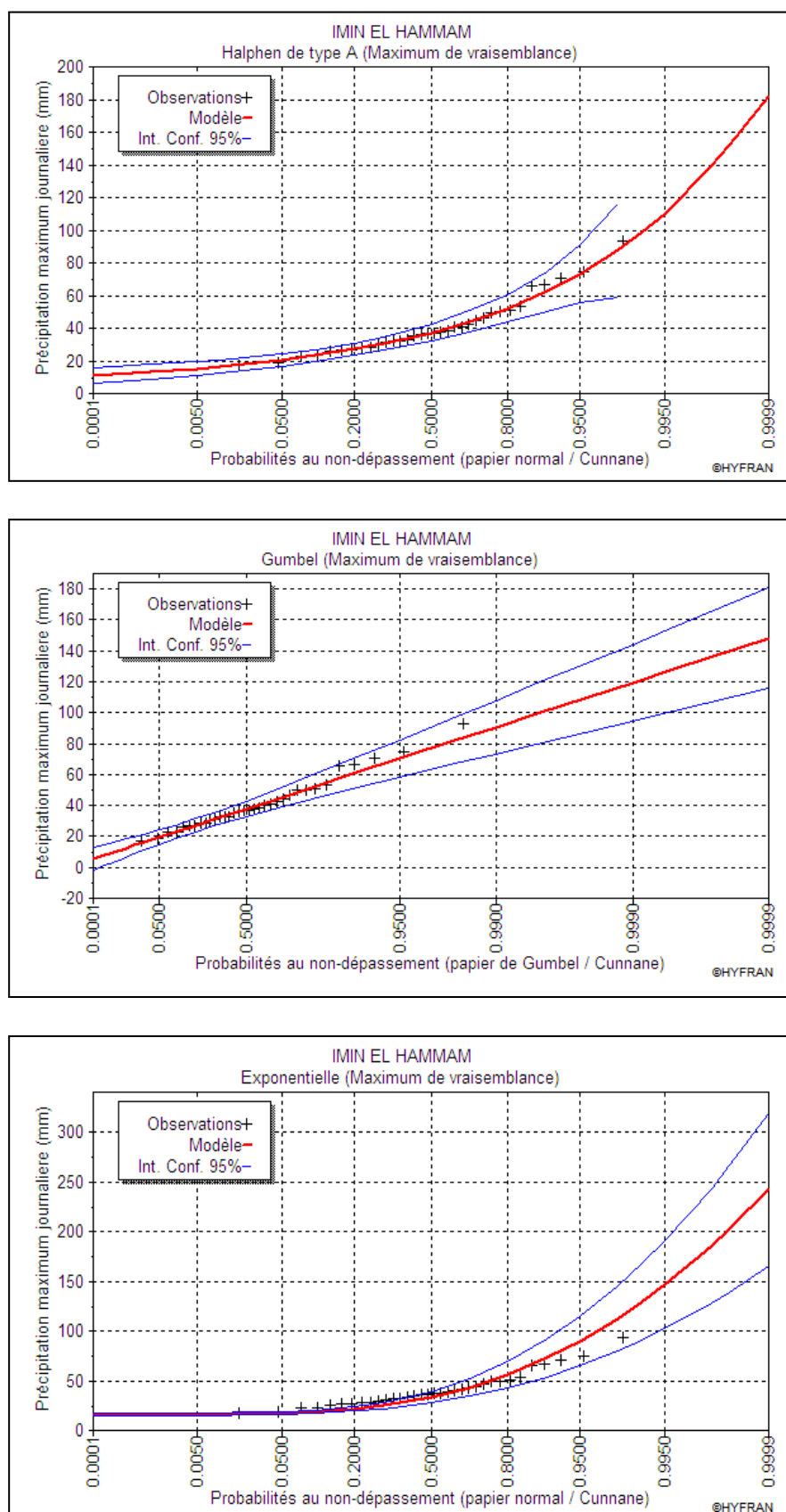


Figure 8 : Ajustement graphique des précipitations maximales journalières selon les lois de Gumbel, Halphen et exponentielle

iii. Méthode numérique (Analyse statistique)

Les tableaux 5, 6 et 7 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
Gumel (Maximum de vraisemblance)	2	70.296	286.410	283.357
Halphen de type A (Maximum de vraisemblance)	3	73.266	289.096	284.517
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	2	89.738	292.621	289.569

Tableau 5 : Ajustements numériques des lois de Gumbel et de Halphen (Période 20 ans)

	Nb de paramètres	Précipitation estimée	BIC	AIC
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	81.916	286.410	283.357
Halphen de type A (Maximum de vraisemblance)	3	87.500	289.096	284.517
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	2	112.206	292.621	289.569

Tableau 6 : Ajustements numériques des lois de Gumbel et de Halphen (Période 50 ans)

	Nbr de paramètres	Précipitation estimée	BIC	AIC
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	90.623	286.410	283.357
Halphen de type A (Maximum de vraisemblance)	3	98.585	289.096	284.517
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	2	129.203	292.621	289.569

Tableau 7 : Ajustements numériques des lois de Gumbel et de Halphen (Période 100 ans)

Le meilleur résultat d'ajustement visuel est trouvé pour la loi de Halphen en première position, suivi par la loi de Gumel. Le seul problème de la première loi est que les résultats d'estimation des précipitations maximales journalières sont limités jusqu'à la période de 50 ans.

Par contre, pour les résultats d'ajustement numérique obtenus on trouve que la loi de Gumbel 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 exponentielle sont sous estimés.

iv. Estimation des précipitations maximales journalières

Le tableau 8 présente Les estimations des précipitations maximales journalières annuelles calculées pour les différentes périodes de retour selon la loi de Gumbel.

Période de retour	200	100	50	20	10	5	3	2
Précipitation estimée	99.3	90.6	81.9	70.3	61.3	52.0	44.5	37.8

Tableau 8 : Estimation des précipitations maximales journalières annuelles selon la loi de Gumbel

La comparaison graphique et les critères statistiques d'ajustement obtenu nous permet de conclure que la loi la mieux adaptée pour l'estimation des précipitations maximales journalières est la loi de Gumbel.

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 de Gumbel.

Le tableau 9 nous permet de vérifier la validation de cette loi de Gumbel. En effet, on remarque que la population et l'échantillon ont 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 (Gumbel)
Minimum	17	
Maximum	93,2	
Moyenne	40,5	40,5
Ecart-Type	17,1	16
Médiane	36,7	37,8
Coefficient de variation	0,42	0,395
Coefficient d'asymétrie	1,25	1,14
Coefficient d'aplatissement	3,94	2,4

Tableau 9 : 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 faibles (fig. 9), avec un régime très irrégulier au cours de l'année, ils commencent à augmenter à partir du mois d'Octobre pour atteindre le maximum au mois de Novembre (automne).

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 Mars et Avril (le printemps) avec la fonte des neiges. Au cours des mois d'été, les débits diminuent brutalement (période d'étiage) et les oueds sont pratiquement à sec.

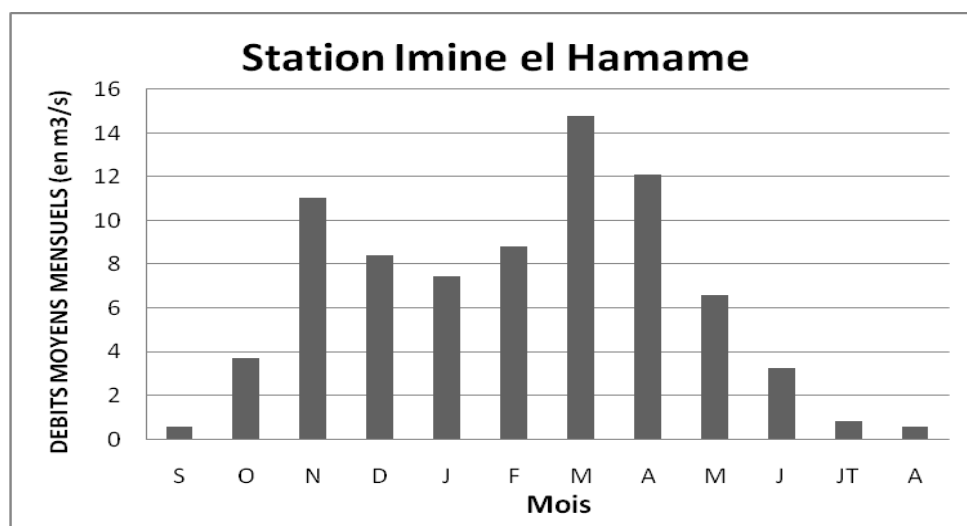


Figure 9 : Débits moyens mensuels interannuels au niveau du bassin versant de N'Fis

b. Débits annuels

Le régime annuel est très irrégulier d'une année à l'autre. Les années 1967-68, 1987-90, 1991-92 et 1995-96 correspondent à des années humides avec un maximum au cours de cette dernière année (fig. 10). Par contre les années 1982-83, 1986-87, 1992-93, 1994-95, 1998-99 et 2000-01 sont plutôt sèches et correspondant généralement aux périodes de sécheresse qui ont sévi dans la région. D'ailleurs, durant ces dernières années l'Oued N'Fis est pratiquement à sec.

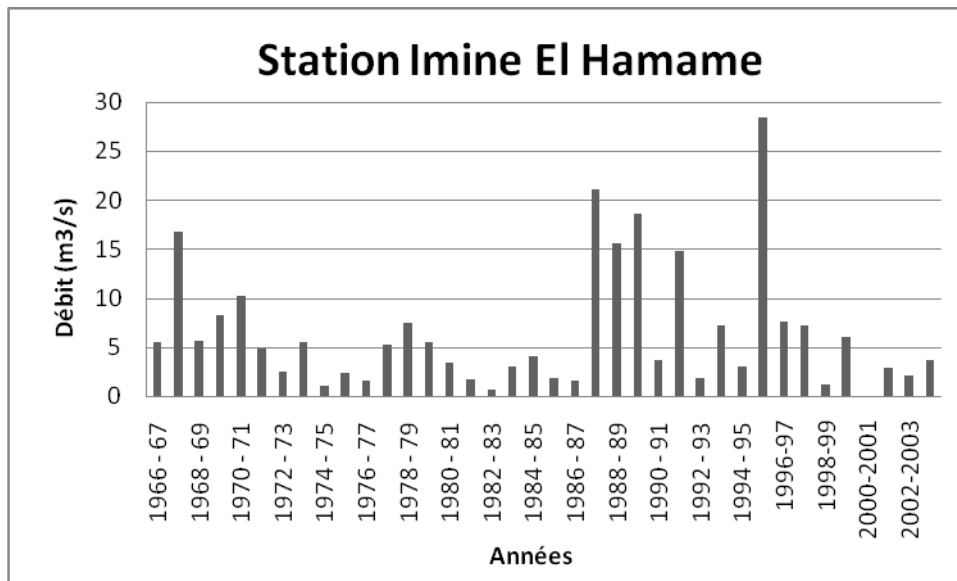


Figure 10 : Débits moyens annuels au niveau du bassin versant de N’Fis

Une analyse fréquentielle des débits maximums journaliers au niveau de la station hydrologique d’Imine El Hamame 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 11 montre les graphiques des résultats obtenus. Ils représentent les probabilités empiriques et théoriques des distributions Pareto, Gumbel, loi des Fuites, exponentielle, Log-pearson type III et Gamma sur papier de probabilité normal à l’aide du logiciel .

Visuellement, on peut conclure que les lois gamma, log-pearson et pareto présentent les meilleurs ajustements de la variable débit maximal journalier.

ii. Méthode numérique (analyse des critères statistiques)

Le tableau 10 illustre la valeur observée des critères d’information bayésien (BIC) et d’Akaike (AIC). D’après les résultats numériques obtenus, les lois Gamma et log-pearson III représentent les meilleurs ajustements de la variable débit maximal journalier.

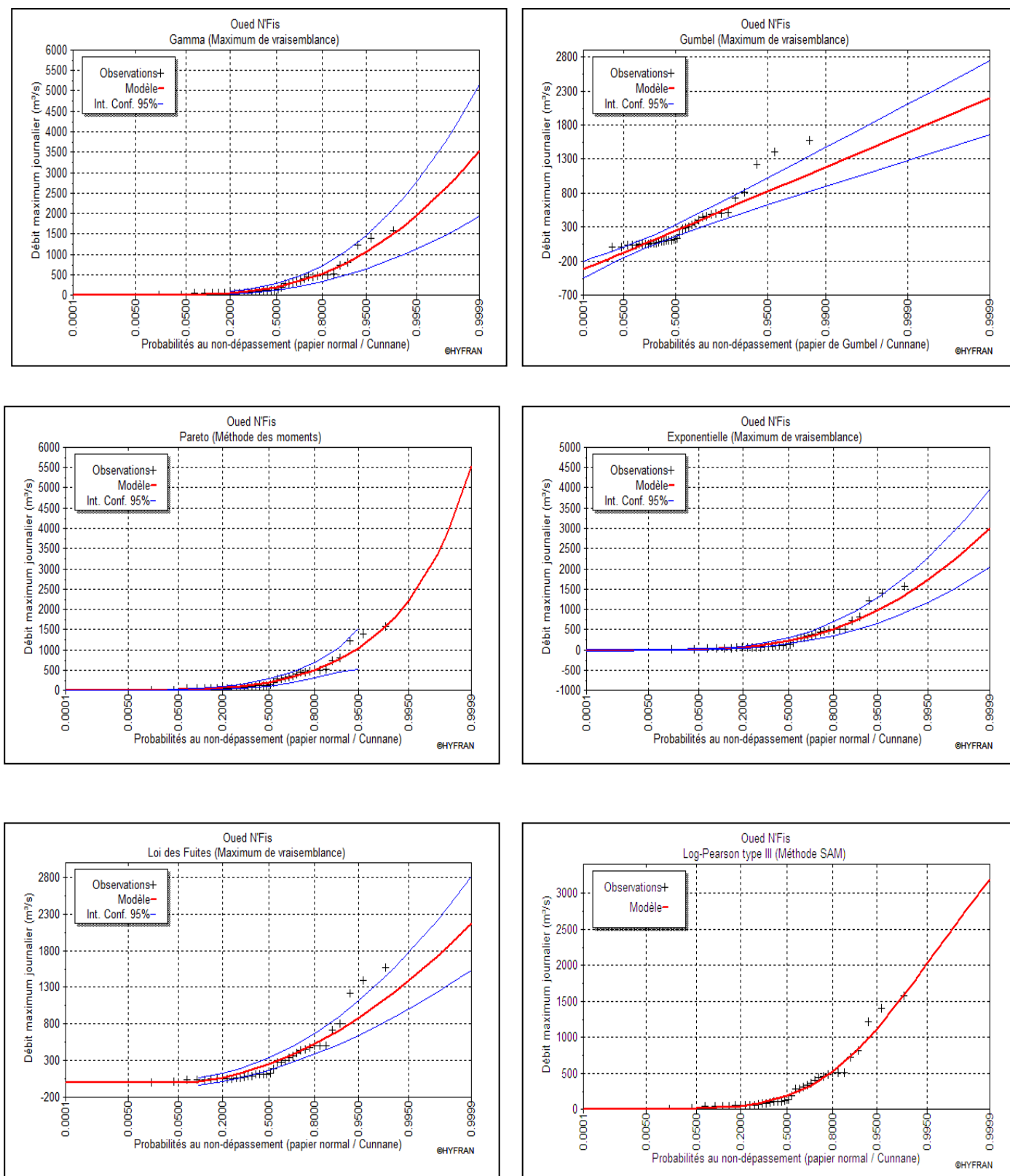


Figure 11 : Graphiques des ajustements des lois de débit maximal journalier

Modèle	BIC	AIC
Pareto (Méthode des moments)	N/D	N/D
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	544.369	541.094
Loi des Fuites (Maximum de vraisemblance)	536.601	533.326
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	523.114	519.839
Log-Pearson type III (Méthode SAM)	522.310	517.397
Gamma (Maximum de vraisemblance)	519.311	516.036

Tableau 10 : Critères de comparaison des ajustements des lois aux débits de pointe à la station hydrologique d'Imin El Hamame

iii. Estimation des débits de pointe de périodes de retour

Dans le tableau 11 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
Log-Pearson type III (Méthode SAM)	807.677	1104.061	1488.500	1765.369
Gamma (Maximum de vraisemblance)	782.071	1048.887	1407.258	1681.250
Exponentielle (Maximum de vraisemblance)	743.043	969.113	1267.960	1494.030
Loi des Fuites (Maximum de vraisemblance)	709.071	878.313	1089.466	1242.377
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	662.932	821.803	1027.444	1181.544
Pareto (Méthode des moments)	744.058	1025.824	1448.443	1810.917

Tableau 11 : 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 de Gumbel, des Fuites et Exponentielle semblent inadaptées à l'ajustement, elles sousestiment les hauteurs de débits de pointe de faible fréquence (50, 100 ans).

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

Le tableau 12 montre que la loi la mieux adaptée pour l'analyse fréquentielle des débits maximums journaliers est la loi de Pareto. Les caractéristiques de la distribution selon cette loi donnent des résultats identiques (même moyenne, Ecart-Types et coefficient de variation) aux caractéristiques statistiques de l'échantillon.

	Caractéristiques de l'échantillon	Caractéristiques de la population (Pareto)
Minimum	0,64	
Maximum	1580	
Moyenne	318	318
Ecart-Type	384	384
Médiane	126	197
Coefficient de variation	1,21	1,21
Coefficient d'asymétrie	1,94	3,61
Coefficient d'aplatissement	5,7	-2,36

Tableau 12 : Statistiques descriptives de débit maximal journalier à la station hydrologique d'Imin El Hamame

Les résultats obtenus dans le tableau 13 et extraits à partir de l'histogramme de fréquence (fig. 12) montre la validation de la loi Pareto comme une loi d'ajustement la mieux adaptée pour une meilleure estimation des débits de différentes périodes de retour.

En comparant les résultats ajustés par la loi et les fréquences des observations obtenues dans une série chronologique de 38 ans, on constate que la loi est bien adaptée pour l'estimation. Pour la vérification, on prend comme exemple le débit de retour de 5 ans ($491 \text{ m}^3/\text{s}$, voir le tableau 14) répété 8 fois dans la série chronologique étudiée de 38 ans. En cherchant dans le tableau de fréquence, on trouve que ce débit est inclus dans l'intervalle [250 ; 500] qui a un effectif de 8, ce qui confirme les résultats observés.

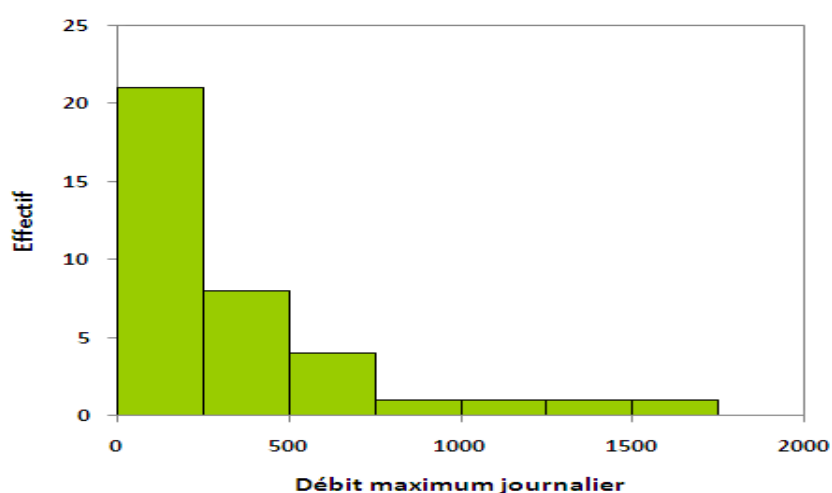


Figure 12 : Histogramme de fréquence des débits maximums journaliers

Borne inférieure	Borne supérieure	Effectif	Fréquence
0	250	21	0,568
250	500	8	0,216
500	750	4	0,108
750	1000	1	0,027
1000	1250	1	0,027
1250	1500	1	0,027
1500	1750	1	0,027

Tableau 13 : Effectif des débits maximums journaliers

Période de retour	200	100	50	20	10	5	3	2
Débit estimé	2210	1810	1450	1030	744	491	322	197

Tableau 14 : Débit estimé pour chaque période de retour selon l'ajustement de la loi Pareto

La comparaison des critères statistiques et graphiques, entre les différentes lois utilisées dans l'ajustement de la variable Débit maximal journalier, donne les mêmes résultats sauf pour la loi Pareto où le BIC et AIC ne sont pas calculés, mais parmi les trois meilleures lois d'ajustement la loi Pareto est la mieux adaptée pour les observations extrêmes.

Pour conclure, 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. Ainsi, on peut dire que La loi de Pareto est la mieux adaptée pour l'estimation des débits maximums journaliers et la loi de Gumbel est la mieux adaptée pour l'estimation des pluies maximales journalières.

Chapitre 3 : Etude et analyse statistique des crues du bassin versant de l'Oued

N'Fis

p35

- | | |
|---|-----|
| 1. Définition et caractéristiques des crues | p35 |
| 2. La crue dans l'année hydrologique | p36 |
| 3. Temps de montée et temps de base | p39 |
| 4. Facteurs d'influence de la réponse hydrologique dans le bassin de l'Oued N'Fis | p41 |
| 5. Typologie des crues du bassin de l'Oued N'Fis | p41 |

1. Définition et caractéristiques des crues

Une crue, par définition, est une augmentation plus ou moins brutale du débit dans un cours d'eau ou dans un réseau d'assainissement due à une cause naturelle (Précipitation...) ou non (rupture accidentelle ou vidange d'ouvrage de retenue, etc). Elle se caractérise par son hydrogramme, courbe représentant les variations du débit en fonction du temps.

On mesure généralement le risque d'apparition d'une crue donnée par la période de retour de l'une de ces variables caractéristiques (débit de pointe, précipitation maximale journalière...). C'est là où réside l'intérêt de l'étude statistique et l'analyse des valeurs extrêmes (étude fréquentielle dans le chapitre précédent).

La durée de la crue est égale au nombre de heures entre le début et la fin de la crue, tel qu'elle est évaluée à partir d'un hydro gramme. Le volume est l'aire sous la courbe située entre le début et la fin de la crue, telle qu'on peut l'observer dans un hydrogramme. La pointe est définie comme étant le débit maximal survenant entre le début et la fin de crue. Les caractéristiques de la crue sont illustrées dans la figure 13 et le tableau 15.

On distingue généralement deux événements de crue par année : la crue de printemps/hiver et la crue d'été/automne.

CARACTERISTIQUES DE LA CRUE	
date début	28/10/1999 à 6h
date fin	30/10/1999 à 17h
débit de pointe (m ³ /s)	1575
débit max. moyen (m ³ /s)	208,2
débit base avant (m ³ /s)	59,7
débit base après (m ³ /s)	59,7
volume 10 ⁶ m ³	43,5
temps de base (heures)	58
temps de montée (heures)	9
coefficient de pointe	7,6

Tableau 15 : Caractéristique de la crue 1999-10-2 (station d'Imin El Hamame)

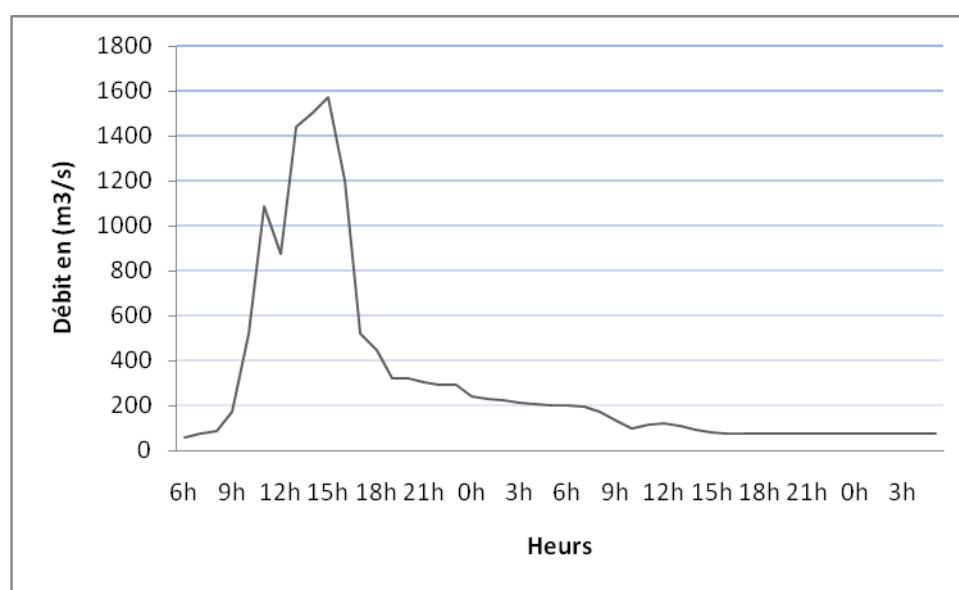


Figure 13 : Hydrogramme de la crue 1999-10-2 à la station Imin El Hamame

2. La crue dans l'année hydrologique

Les crues du bassin versant de l'Oued N'Fis se concentrent exclusivement dans une période qui va du mois de Septembre au mois de Février, avec une prédilection marquée pour les mois de Novembre et Janvier; la répartition mensuelle est assez variable bien que la saison chaude (Mai, Juin, Juillet, Août) soit dépourvue d'événements de crue (Fig. 14).

mois	Nombre de mois
janvier	3
février	1
mars	2
mai	1
septembre	1
octobre	1
novembre	4
décembre	2
Somme	15

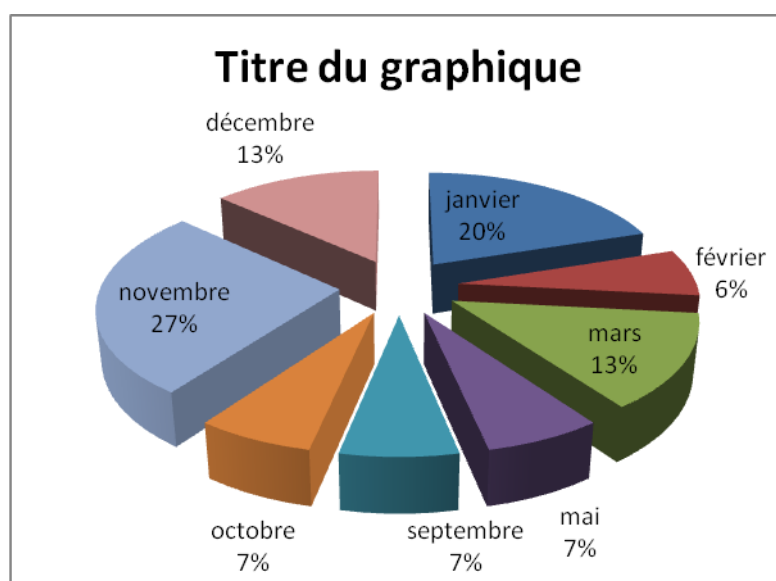


Figure 14 : Répartition mensuelle des crues dans le bassin versant de l'Oued N'Fis à la station Imin El Hamame

Les mois de Novembre et Janvier sont donc les mois les plus riches en épisodes de crues, et sont aussi les mois les plus pluvieux.

3. Temps de montée et temps de base

Temps de base

L'histogramme de temps de base (fig. 15) montre une variabilité remarquable. On constate que les crues de temps de base compris entre les intervalles [20 ; 30] et [80 ; 100] sont fréquents par rapport aux autres durée. On peut lier cette grande durée de base à la superficie du bassin de l'Oued N'Fis qui joue un rôle très important dans le temps d'évacuation des pluies, ce qui contrôle la forme de l'hydrogramme (généralement a une forme étalée).

Temps de montée

En analysant l'hitogramme de la durée de montée des crues (Fig. 16) basé sur une série chronologique allant de 1967 à 2004 au niveau de la station Imin El Hamame, on constate

que la majorité des temps de montée sont compris entre la faible valeur 4 et 30 heures avec un grand effectif de l'intervalle [4 – 10] heures.

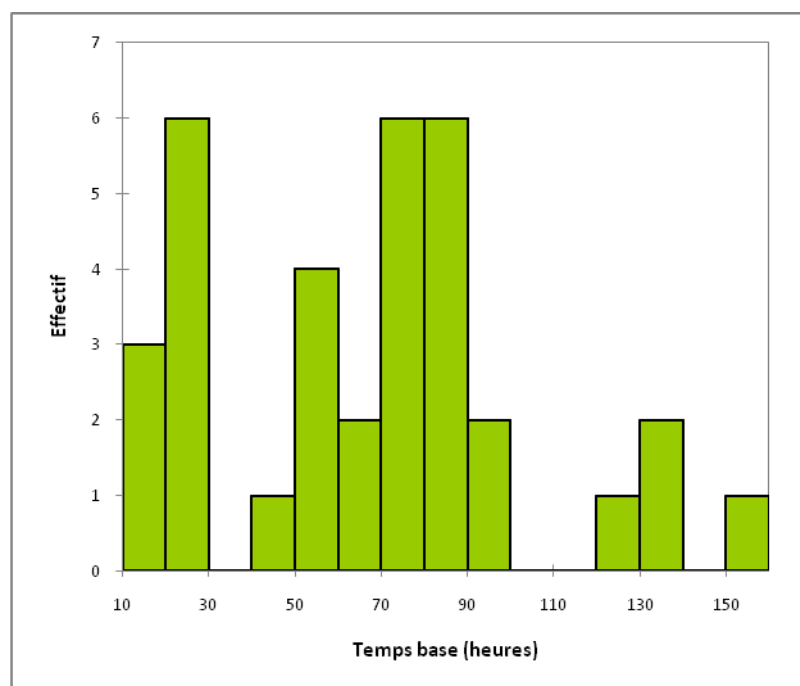


Figure 15 : Histogramme de fréquence de temps de base des crues du bassin versant de l'Oued N'Fis à la station Imin El Hamame

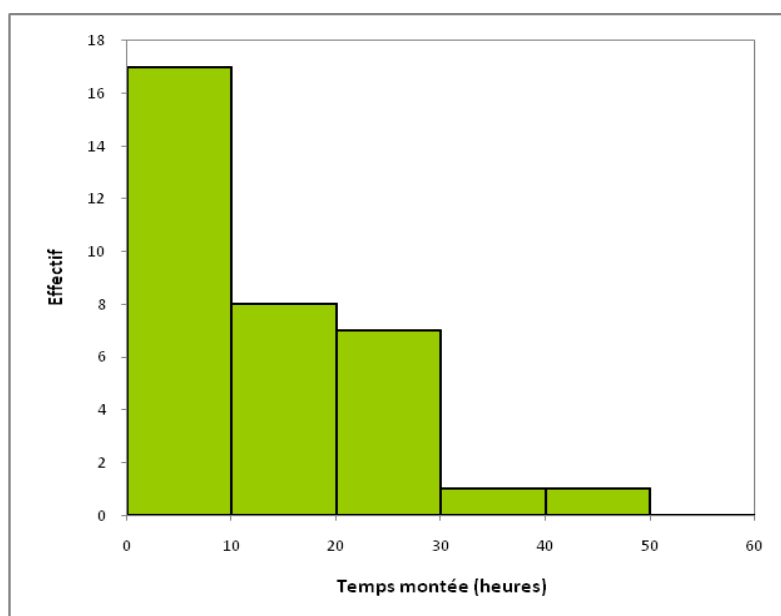


Figure 16 : Histogramme de fréquence de temps de montée des crues du bassin versant de l'Oued N'Fis à la station Imin El Hamame

4. Vitesse de propagation des crues

Une crue peut être considérée comme une onde se propageant dans le cours d'eau. Comme toute onde, elle sera caractérisée par une vitesse de propagation. Dans notre cas, on va calculer cette vitesse entre les deux stations hydrologiques Imin El Hamame et Iguir N'Kouris. Connaissant la distance qui sépare ces deux stations (33 Km) et la durée entre les pointes des hydrogrammes de ces stations hydrologiques, on peut calculer la vitesse de propagation.

$$\text{Vitesse} = \text{Distance} / \text{Temps}$$

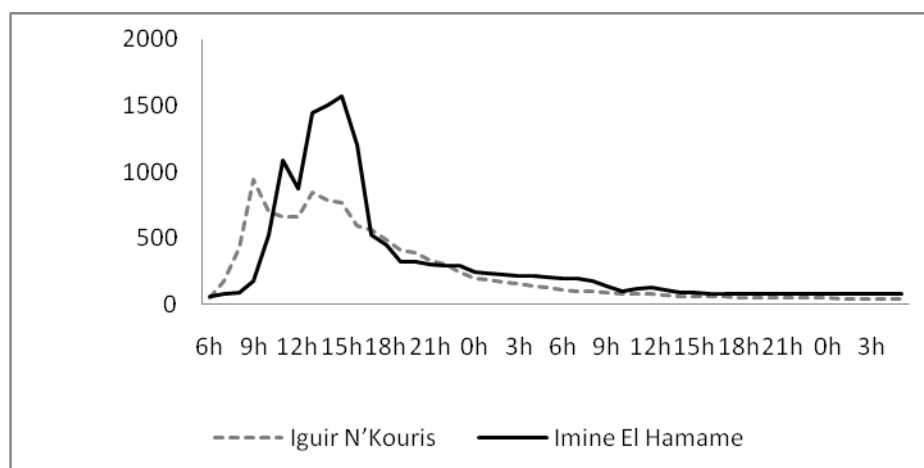
Pour ce calcul, nous avons choisi trois crues bien individualisées et ayant transité par les deux stations (fig. 17).

Le tableau 16 nous permis d'avoir une idée générale sur la vitesse de propagation des crues entre les deux stations Iguir N'kouris et Imin El Hamam du bassin de l'Oued N'Fis. Cette vitesse varie entre 11 et 16,5 Km/s, soit entre 3 et 4,6 m/s. la vitesse moyenne est alors de l'ordre de 3,8 m/s.

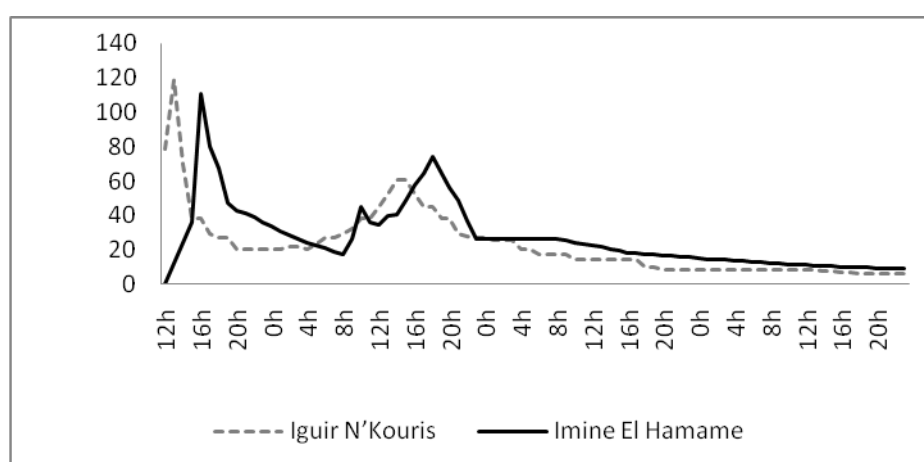
	Iguir N'kouris		Imine El Hamam		Temps de propagation	Vitesse en Km/h
	Débit de pointe	Moment de la pointe	Débit de pointe	Moment de la pointe		
05/01/1976	119	13h	111	16h	3 heures	11
	60,9	16h	74,4	18h	2 heures	16,5
26/09/1978	263	14h	301	17h	3 heus	11
28/10/1999	943	9h	1090	11h	2 heures	16,5

Moyenne	13,75 km/h
----------------	-------------------

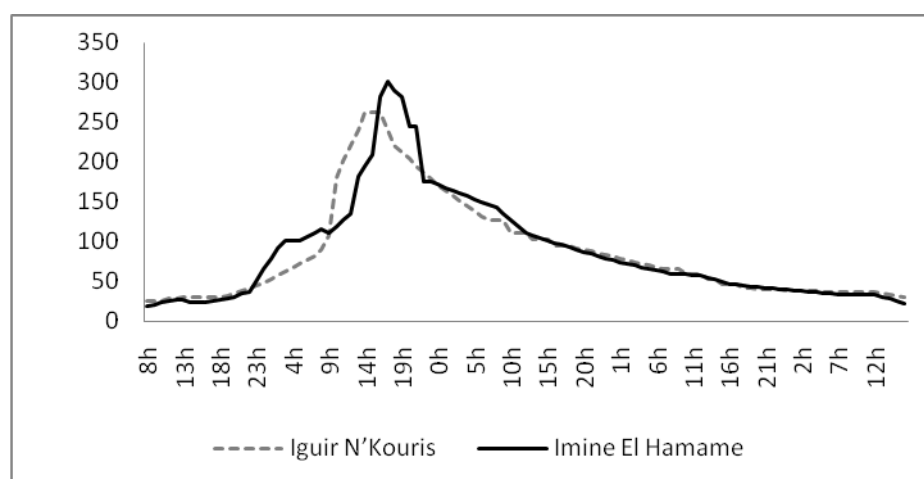
Tableau 16 : Vitesse de propagation des crues entre les deux stations Imin El Hamame et Iguir N'Kouris



La Crue du 28/10/1999



La crue du 26/09/1976



La Crue du 05/01/1978

Figure 17 : Hydrogrammes des crues choisies aléatoirement pour le calcul de la vitesse de propagation

5. Facteurs d'influence de la réponse hydrologique dans le bassin versant de l'Oued N'Fis

La réponse hydrologique de l'Oued N'Fis est influencée par une multitude de facteurs tels que ceux liés :

- Aux conditions climatiques du milieu,
- à la pluviosité (répartition spatiale et temporelle, intensité et durée),
- à la morphologie du bassin versant (forme, dimension, altimétrie, pentes, orientation des versants),
- aux propriétés physiques du bassin (nature des sols, couverture végétale),
- à la structuration du réseau hydrographique (extension, dimension, propriétés hydrauliques),
- aux états antécédents d'humidité des sols.

Les facteurs liés aux précipitations ainsi qu'aux conditions climatiques sont des facteurs externes au milieu tandis que la morphologie, les propriétés physiques du versant, la structuration du réseau et les conditions antécédentes d'humidité sont des facteurs internes. L'ensemble de ces éléments ont été déterminés lors du premier chapitre.

Typologie des crues du bassin versant de l'Oued N'Fis

A partir de l'analyse des crues de l'Oued N'Fis, on constate que on a une diversité typologique des crues :

- Crues d'amont ou crues généralisées affectent des cours d'eau important, alimentés par des bassins versants de grande dimension. Elles sont dues à des précipitations abondantes et de longue durée. La montée des eaux est lente, la crue se prolonge parfois plusieurs jours après la fin des précipitations, les dégâts matériels causés par ce type de phénomène sont souvent considérables, en revanche la lenteur de la montée des eaux permet le plus souvent d'évacuer les personnes exposées et limite les risques d'entraînement et de noyade (Fig. 18).
- Crues d'aval générées seulement dans la partie aval du bassin. Elles sont le plus souvent causées par des pluies convectives affectant parfois seulement une partie du bassin versant et sont caractérisées par une grande rapidité d'évolution. La montée

des eaux est très brutale et ne laisse que très peu de temps pour alerter les riverains. Ce sont les crues de ce type qui sont les principales causes des mortalités par noyade. On parle également de crues rapides, de crues éclairs ou de crues subites (Fig. 19).

On peut aussi diviser chaque type de crue en deux genres, les crues Simples caractérisées par un seul pic du débit de pointe et un genre complexe caractérisé par un minimum de deux pics générés par différents épisodes pluvieux.

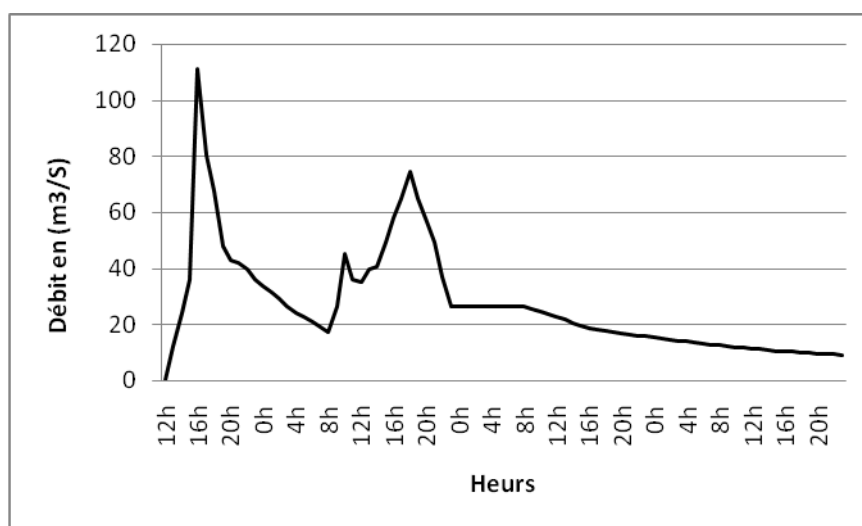


Figure 18 : Crue complexe généralisée du 26/09/1976 (Station Imin El Hamam)

Cette crue complexe généralisée est générée par deux épisodes pluvieux. Le pic principal de cette crue est caractérisé par un temps de montée très court (une heure), un débit de pointe de $111 \text{ m}^3/\text{s}$. Par contre le deuxième pic se caractérise par un temps long et un débit de pointe de $74,4 \text{ m}^3/\text{s}$

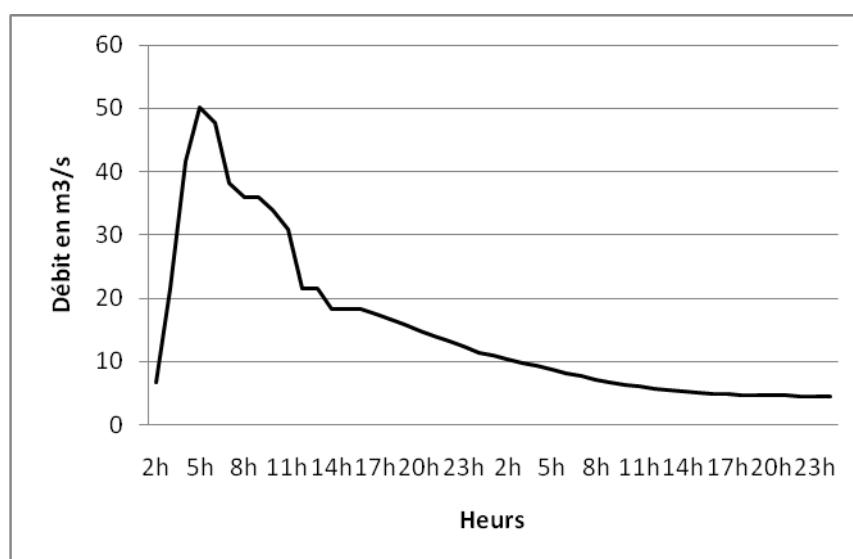


Figure 19 : Crue aval simple du 06/05/1975 (station Imin El Hamame)

Cette crue d'aval simple est enregistrée au niveau de la station Imin El Hamame. Elle a commencé le 06/05/1975 à 2h et a terminé le 07/05/1975 à 8h. Elle se caractérise par un débit de pointe de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, un temps de base de 29 (heures) et un temps de montée de 3 (heures).

Conclusion

L'analyse des temps de base et les temps de montés a permis d'évaluer l'intensité de la gravité de la réponse hydrologique. Plus le temps de montée est faible et le temps de base élevé, plus la crue est dangereuse.

Au niveau de la station Imin El Hamame, deux types des crues sont généralement observées, les crues d'amont (Crues généralisées) qui sont caractérisées par un débit de pointe élevé et les crues d'aval qui se caractérisent par un débit de pointe faible. Les crues généralisées sont généralement très puissantes et provoquent d'énormes dégâts que les crues d'amont.

Chapitre 4 : Application de l'algorithme génétique à la modélisation des crues

1. Notion d'algorithme génétique	p45
2. Définition d'un modèle hydrologique	p52
3. Choix du modèle de propagation hydraulique	p53
a. Présentation du modèle de propagation hydraulique Hayami	p54
b. Solution analytique	p54
c. Le phénomène de la propagation des crues	p55
d. Applicabilité du modèle Hayami	p57
e. Calage des paramètres	p58
5. Calage du modèle Hayami par application de l'algorithme génétique	p58
6. Validation du modèle	p64
7. Evaluation de la qualité du modèle	p66

L'objectif premier de ce travail consiste à optimiser les paramètres des fonctions du modèle à l'aide d'une technique nouvelle basée sur les algorithmes génétiques. En second lieu nous présentons la modélisation du comportement hydrologique du bassin versant avec ces paramètres simulés.

A partir de données du débit enregistrées au niveau de la station amont, et d'une modélisation par étapes successives simples, nous simulerons des valeurs de débits en aval. Ces résultats seront alors comparés avec des débits mesurés dans la station aval de l'Oued N'Fis. La dernière étape de ce travail consistera à évaluer les écarts entre le résultat de la simulation et le débit réel, et de déterminer l'importance relative de chacun des paramètres sur le cycle de l'eau du bassin versant du N'Fis.

Cette modélisation nous permettra aussi de valider la qualité des données d'entrées de débits.

1. Notion d'algorithme génétique (AG)

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle : croisements, mutations, sélection, etc. Les algorithmes génétiques ont déjà une histoire relativement ancienne

puisque les premiers travaux de John Holland sur les systèmes adaptatifs remontent à 1962. L'ouvrage de David Goldberg [1989] a largement contribué à les vulgariser.

Les techniques de recherche et d'optimisation sont en général classées en trois catégories (Coello et al., 2002) : énumératives, déterministes et stochastiques. Les AG font partie de la troisième catégorie et quatre caractéristiques les distinguent des autres techniques d'optimisation (Goldberg, 1989 ; 1994) :

- Ils utilisent un codage des paramètres et non les paramètres eux-mêmes;
- Ils travaillent sur une population d'individus (ou de solutions);
- Ils n'utilisent que les valeurs de la fonction à optimiser, pas sa dérivée, ou une autre connaissance auxiliaire;
- Ils utilisent des règles de transition probabilistes et non déterministes.

Principe de base d'un AG standard

Un AG standard nécessite en premier le codage de l'ensemble des paramètres du problème d'optimisation en une chaîne de longueur finie. Le principe d'un AG est simple, il s'agit de simuler l'évolution d'une population d'individus jusqu'à un critère d'arrêt. On commence par générer une population initiale d'individus (solutions) de façon aléatoire. Puis, à chaque génération, des individus sont sélectionnés 4, cette sélection est effectuée à partir d'une fonction objectif appelée fonction d'adaptation. Puis, les opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués et une nouvelle population est créée. Ce processus est itéré jusqu'à un critère d'arrêt. Le critère le plus couramment utilisé est le nombre maximal de générations que l'on désire effectuer. La figure 20 présente le principe de l'AG standard.

L'AG débute par la génération d'une population initiale et l'évaluation de la fonction d'adaptation de tous les individus qui composent cette première population. Puis, des individus sont sélectionnés aléatoirement pour la reproduction selon le principe de la survie du plus adapté. Ensuite, des individus « enfants » (ou les descendants) sont générés en appliquant les deux opérateurs génétiques suivants : le croisement et la mutation. Ces enfants sont placés dans une nouvelle population $P(t)$ et vont se substituer, en tout ou en

partie, à la population de la génération précédente. De nouvelles populations d'individus vont ensuite se succéder, d'une génération (t) à la génération ($t+1$), chaque génération représentant une itération jusqu'à l'atteinte du critère d'arrêt. L'AG présenté ci-dessus est dit générationnel car tous les individus enfants générés sont placés dans une population et vont remplacer entièrement la population des individus parents.

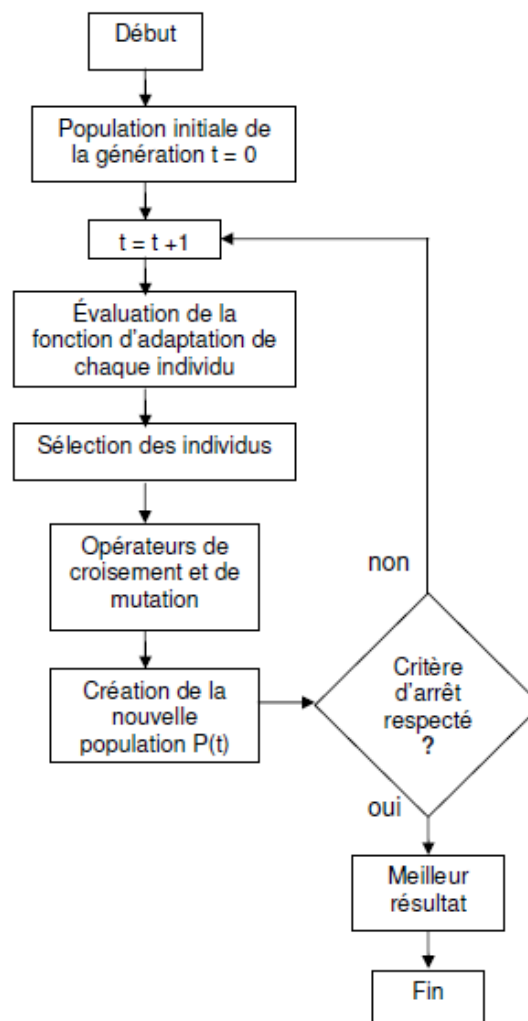


Figure 20 Organigramme d'un AG standard

Il existe de nombreuses méthodes pour la sélection, le croisement et la mutation.

Sélection

La sélection a pour objectif d'identifier les individus qui doivent se reproduire. Cet opérateur ne crée pas de nouveaux individus mais identifie les individus sur la base de leur fonction d'adaptation, les individus les mieux adaptés sont sélectionnés alors que les moins

bien adaptés sont écartés (Deb, 2000). La sélection doit favoriser les meilleurs éléments selon le critère à optimiser (minimiser ou maximiser). Ceci permet de donner aux individus dont la valeur est plus grande une probabilité plus élevée de contribuer à la génération suivante (figure 21). Il existe plusieurs méthodes de sélection, les plus connues étant la «roue de la fortune» et la «sélection par tournoi» :

- La « roue de la fortune » est la plus ancienne, où chaque individu, de la population de taille maximale J_{max} , occupe une section de la roue proportionnellement à sa fonction d'adaptation $Fitness(j)$, la probabilité de sélection d'un individu (j)

$$S'écrit : prob(j) = \frac{Fitness(j)}{\sum Fitnesss(j)}$$

À chaque fois qu'un individu doit être sélectionné, un tirage à la loterie s'effectue et propose un candidat, les individus possédant une plus grande fonction d'adaptation ayant plus de chance d'être sélectionnés.

- A chaque fois qu'il faut sélectionner un individu, la « sélection par tournoi » consiste à tirer aléatoirement (k) individus de la population, sans tenir compte de la valeur de leur fonction d'adaptation, et de choisir le meilleur individu parmi les k individus. Le nombre d'individus sélectionnés a une influence sur la pression de sélection, lorsque $k = 2$, la sélection est dite par «tournoi binaire ».

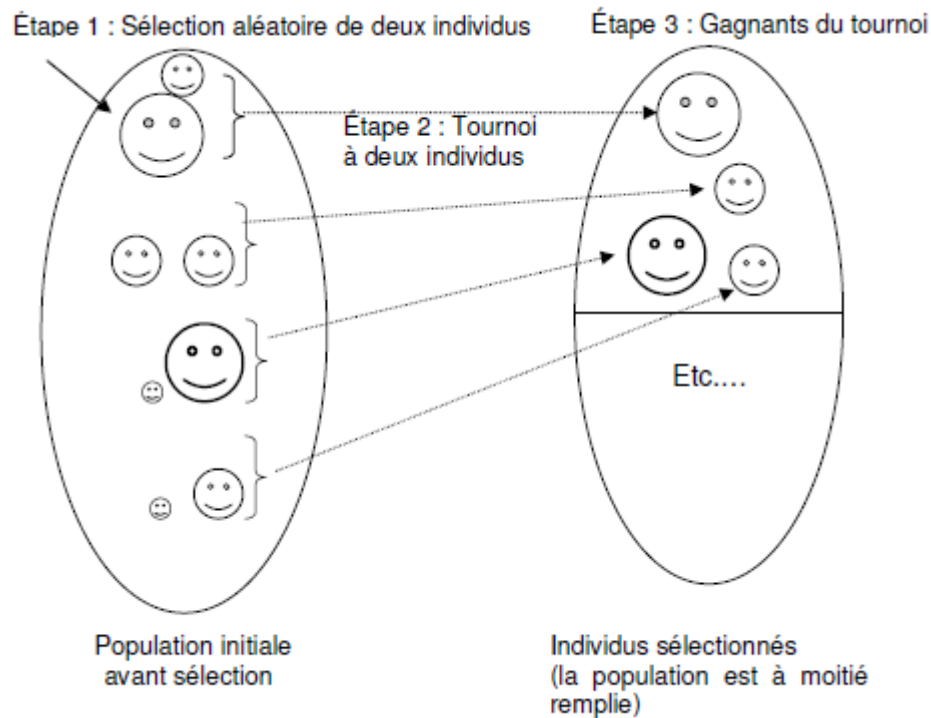


Figure 21 : Représentation d'une sélection par tournoi d'individus pour un critère de maximisation. Chaque individu représente une solution possible

Croisement

Le croisement permet de créer de nouvelles chaînes en échangeant de l'information entre deux chaînes (fig. 22). Le croisement s'effectue en deux étapes. D'abord les nouveaux éléments produits par la reproduction sont appariés, ensuite chaque paire de chaînes subit un croisement comme suit : un entier k représentant une position sur la chaîne est choisi aléatoirement entre 1 et la longueur de chaîne ($_$) moins un ($_ - 1$). Deux nouvelles chaînes sont créées en échangeant tous les caractères compris entre les positions $k + 1$ et $_$ inclusivement. L'exemple suivant (fig. 22) montre deux chaînes (A_1 et A_2) de longueur $_ = 5$ appartenant à la population initiale. Les deux nouvelles chaînes (A_3 et A_4) appartenant à la nouvelle population sont obtenues par croisement à la position $k = 4$:

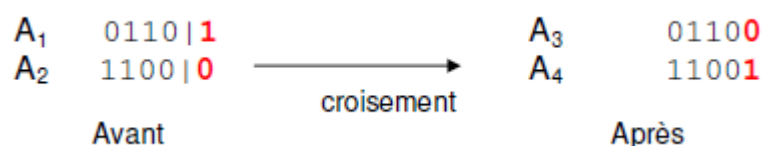


Figure 22 : Représentation d'un croisement en un point de deux chaînes

Mutation

La mutation est exécutée seulement sur une seule chaîne. Elle représente la modification aléatoire et occasionnelle de faible probabilité de la valeur d'un caractère de la chaîne, pour un codage binaire cela revient à changer un 1 en 0 et vice versa (fig. 23). Cet opérateur introduit de la diversité dans le processus de recherche des solutions et peut aider l'AG à ne pas stagner dans un optimum local.



Figure 23 : Représentation d'une mutation de bits dans une chaîne

Codage

Le codage utilisé par un AG est représenté sous forme d'une chaîne de bits qui contient toute l'information nécessaire pour représenter un point de l'espace de recherche. Le codage binaire est le code le plus utilisé (Goldberg, 1989), l'inconvénient majeur du code binaire étant que deux points proches dans l'espace des variables (voir la colonne 1 du Tableau 17) ne sont pas nécessairement codés par deux chaînes de bits voisines (colonne 2 du Tableau 17). On remédie en général à ce problème en utilisant le codage de Gray qui conserve une distance de Hamming de « 1 » entre deux chaînes (colonne 3 du Tableau 17). La distance de Hamming entre deux chaînes de bits est le nombre de bits qui diffère de l'une à l'autre. Pour les deux chaînes suivantes : 111 et 100, la distance est de 2. Le Tableau 17 montre un exemple du code binaire et le code Gray pour des variables entières allant de 0 et 7. On voit que la distance de Hamming est de 1 pour chaque entier dans le code Gray, alors que pour les nombres binaires, pour passer de 3 à 4, la distance de Hamming est de 3.

Variables entières	Code binaire	Code Gray
0	000	000
1	001	001
2	010	011
3	011	010
4	100	110
5	101	111
6	110	101
7	111	100

Tableau 17 : Code de Gray et code binaire pour une chaîne à trois bits

Paramètres d'un AG

Pour appliquer un AG à un problème réel, on doit posséder les éléments suivants :

- un codage des éléments appartenant à la population, le codage des solutions du problème à résoudre doit être choisi avec soin;
- une fonction d'évaluation ou d'adéquation ou d'adaptation de l'individu qui mesure la qualité de l'individu;
- un processus d'évolution des générations;
- des opérateurs pour modifier les individus d'une population de la génération (t) à la génération (t+1) comme le croisement et la mutation;
- des paramètres de l'AG : les opérateurs précédents dépendent de plusieurs paramètres qui sont fixés à l'avance et dont dépend fortement la convergence de l'algorithme :

✓ taille de la population : c'est-à-dire le nombre d'individus dans la population.

Si la taille est trop petite, l'AG peut ne pas converger, par contre si elle est trop grande, l'évaluation des individus peut être très longue;

✓ probabilité de croisement et de mutation. Les valeurs de ces probabilités peuvent varier d'une application à l'autre. Par exemple, dans l'étude des AGs pour l'optimisation de cinq fonctions mathématiques, De Jong (1975) a suggéré de choisir une probabilité de croisement élevée, une probabilité de mutation faible (inversement proportionnelle à la taille de la population), et une population de taille modérée (Goldberg, 1994). La probabilité de mutation est en général très faible, inférieure à 0,1, une probabilité trop grande, peut modifier les meilleurs individus;

✓ critère d'arrêt : c'est-à-dire le nombre maximal de générations à effectuer.

Processus d'évolution des générations : générationnel, stationnaire et élitiste

Traditionnellement, les AG sont générationnels. Les individus de chaque génération sont testés et une nouvelle population en entier est générée, le nombre de descendants produits est donc égal au nombre d'individus parents.

Les deux populations ne se chevauchent pas (Langdon, 1998). La nouvelle population d'individus enfants est formée à chaque génération. Cependant, certains individus enfants peuvent être une copie conforme des parents qui n'ont pas été perturbés ni par un croisement ni par une mutation.

La stratégie de remplacement stationnaire (steady-state) diffère de l'AG générationnel. Dans cette approche, il y a seulement un ou deux individus qui sont générés à la fois (Ryan, 2000). Il peut y avoir différentes façons de sélectionner « l'individu victime » à supprimer de la population. Par exemple, on peut sélectionner un individu aléatoirement ou sélectionner celui qui a la plus petite fonction d'adaptation. Dans ce type d'AG, les nouveaux individus générés sont ajoutés à la population et peuvent immédiatement être sélectionnés comme parents de nouveaux individus (Langdon, 1998).

Approche élitiste (elitist model) : les opérateurs de croisement et de mutation peuvent affecter le meilleur individu d'une génération. Le modèle élitiste a pour avantage d'écarter la possibilité de perdre cet individu. Ce modèle copie le meilleur individu de chaque génération dans la population de la génération suivante. Ce modèle peut accélérer la vitesse de domination exercée par ce super individu sur la population (Cerrolaza et Annicchiarico, 1999).

2. Définition d'un modèle hydrologique

Un modèle est par définition une représentation simplifiée d'un système complexe (Dassargues, 1991). Cette représentation doit être la plus conforme possible à la réalité du point de vue des mécanismes et processus simulés ; elle repose cependant sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Son degré de conformité à la réalité peut aussi dépendre des objectifs assignés à la modélisation. Le rôle d'un modèle peut ainsi être d'intégrer l'ensemble des données disponibles sur un système

et d'utiliser le modèle comme outil de synthèse et de vérification de la cohérence de ces données et des hypothèses qui peuvent être formulées sur la structure et le fonctionnement du système étudié. Le rôle d'un modèle peut aussi être purement opérationnel, afin de fournir une réponse pertinente à une problématique posée. De nombreux intermédiaires existent entre ces deux rôles extrêmes.

Un modèle hydrologique est caractérisé par cinq éléments constitutifs : la géométrie du système (bassin versant par exemple), les entrées dans le système, les lois de formalisation des processus, l'état initial et les conditions aux limites du système et enfin les sorties (R. Gnouma, 2006) (fig. 24).

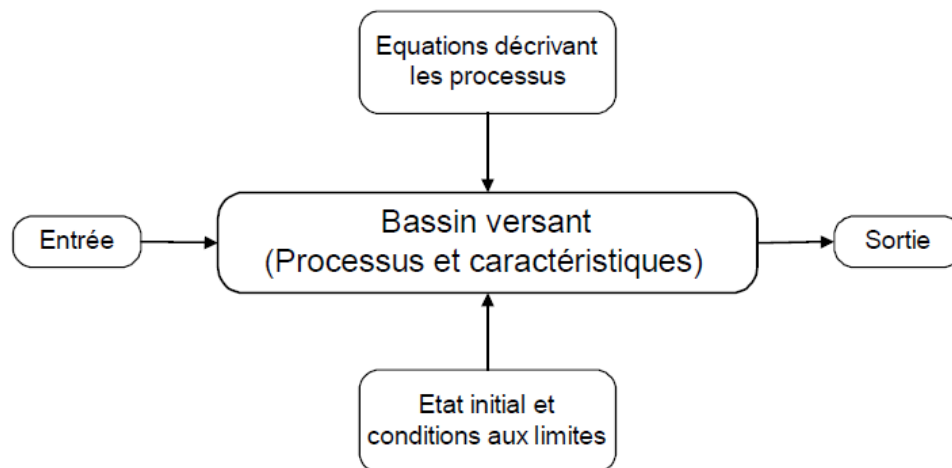


Figure 24 : Composantes du modèle

3. Choix du modèle de propagation hydraulique

La modélisation hydrologique a été très largement utilisée comme outil de simulation du fonctionnement hydrologique des bassins versants. On trouve une diversité des modèles qui ont le même but l'estimation des débits en aval, ces modèles se différencient par leurs paramètres et les types des données nécessaires.

On a travaillé la première fois sur le modèle SCS qui se base sur deux fonctions, la première est la fonction de production qui transforme les pluies brutes en pluies efficaces au ruissellement, la deuxième est une fonction de transfert qui simule les débits à partir des pluies efficaces. Le problème rencontré dans ce modèle est la nécessité des données de précipitations. Puisque la base de données est alimentée par 7 stations pluviométriques

mal réparties au niveau du bassin versant de l'oued N'fis et dont la date de fonctionnement diffèrent d'une station à l'autre, ceci entraîne une lacune de données et une mauvaise représentativité spatiale. Pour cette raison, on a abandonné l'utilisation du modèle SCS et on a choisi le modèle Hayami qui se base sur des paramètres très simples de propagation des crues (célérité, diffusion). Il nécessite seulement les débits d'amont pour estimer les débits d'aval.

a. Présentation du modèle de propagation hydraulique Hayami

Le modèle Hayami est une solution analytique du système d'équations simplifiées décrivant le phénomène de propagation. Il permet une description très condensée d'un tronçon de rivière puisqu'il ne fait intervenir que deux paramètres : la célérité et le coefficient de diffusion, en plus de la longueur du tronçon. Le principal problème pratique pour son emploi concerne son domaine d'acceptabilité et la détermination des paramètres par calage.

b. Solution analytique

L'écoulement d'une rivière en crue, c'est-à-dire en régime transitoire, est décrit par les équations de Saint Venant. En supposant que les forces de frottement, gravité et pression sont dominantes dans la description du phénomène, les termes d'inertie sont négligeables et on obtient l'équation de l'onde de crue diffusante avec apports latéraux :

$$\frac{dQ}{dt} = C\left(\frac{\partial Q}{\partial x} + q\right)D\left(\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} - \frac{\partial q}{\partial x}\right) = 0 \quad (1)$$

où Q est le débit (m^3/s), C la célérité (m/s), D le coefficient de diffusion (m^2/s) et q la distribution des apports latéraux (m^2/s).

Si l'on considère les paramètres C et D constants, alors on arrive à un modèle diffusif qui a été proposé par Shoitiro Hayami en 1951. Ce modèle, connu comme modèle Hayami, présente l'intérêt d'avoir des solutions analytiques si l'on suppose des caractéristiques globales pour le cours d'eau et l'indépendance de la condition limite aval. La méthode analytique générale pour résoudre l'équation de propagation Hayami avec apports latéraux a été détaillée par Roger Moussa (1996) avec une résolution par transformée de Laplace :

$$Q_{aval}(t, C, D) = \int_0^t Q_{amon}(t - \tau) K_{C,D}(\tau) d\tau \quad (2)$$

Avec Q_{amon} et Q_{aval} les débits à l'amont et à l'aval du tronçon de rivière sans les débits de base, $K(t)$ le noyau d'Hayami et $\phi(t)$ la fonction qui caractérise les apports latéraux :

$$I(t) = Q(0, t) - Q(0, 0) \quad (3)$$

$$O(t) = Q(L, t) - Q(L, 0) \quad (4)$$

$$K(t) = \frac{L}{2(\pi D)^{1/2}} \frac{e^{\frac{-L}{Ct} - \frac{Ct}{L} + 2}}{t^{3/2}} \quad (5)$$

$$\Phi(t) = \frac{C}{L} \int [Q_a(\lambda) - Q_a(0)] d\lambda \quad (6)$$

Avec Q_a le débit total des apports latéraux (m^3/s).

Cette solution analytique est inconditionnellement stable et requiert seulement une condition limite amont.

c. Le phénomène de la propagation des crues

Les situations où le phénomène de propagation de crue se présente peuvent être schématisées de la façon suivante (fig. 25) : Dans un bassin versant A, drainé par un cours d'eau C, des pluies importantes viennent de se produire. On constate une augmentation des niveaux d'eau à l'amont, au point M. Notre problème est de savoir comment cette montée des niveaux à l'amont va se propager à l'aval, jusqu'au point V. Il s'agit, bien sûr, de tronçons de cours d'eau qui ne présentent pas d'apports latéraux importants, comme cela est probablement le cas pour le tronçon MV.

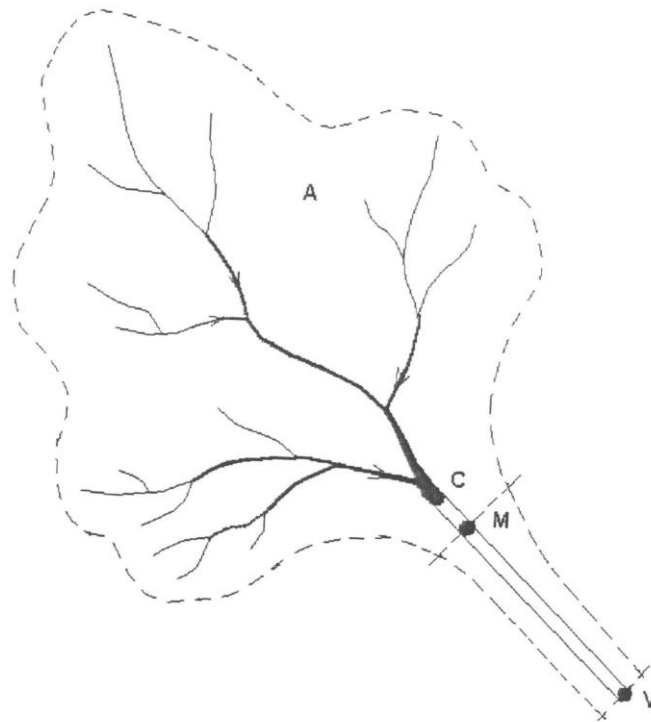


Figure 25 : Situation schématique où la propagation est prépondérante

Le phénomène de propagation d'une crue peut être assimilé à la translation d'une onde qui se déforme au cours de cette translation, en fonction du frottement et du stockage dans le cours d'eau. En effet, on observe que cette onde, tout en conservant son volume, présente une certaine réduction du débit de pointe, et met un certain temps pour parcourir le bief. Il y a donc une **atténuation** de la pointe de crue, qui se propage avec une certaine vitesse de translation, donnant donc un **temps de transfert** pour parcourir le bief (cf. fig. 26).

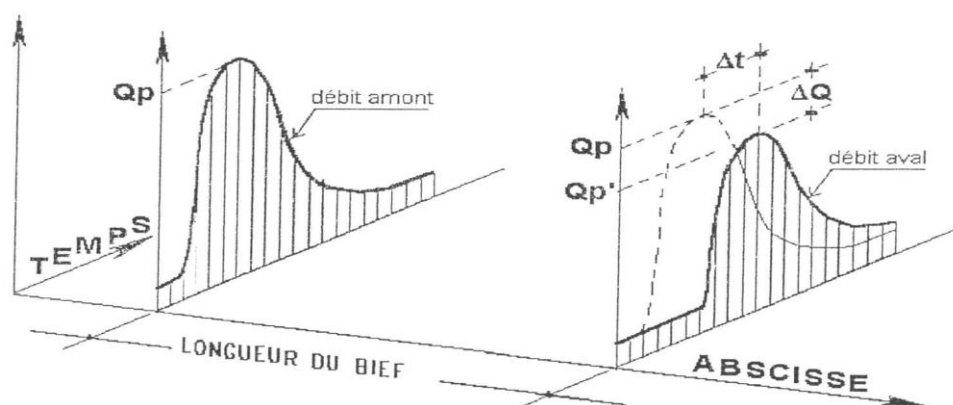


Figure 26 : Propagation d'une crue

Cette atténuation de la pointe et ce temps de transfert sont fonction des caractéristiques de frottement et stockage dans le cours d'eau, ainsi que des caractéristiques propres de la crue.

La propagation d'une crue est donc plutôt une affaire de mécanique des fluides ; du point de vue de l'hydraulique, la propagation dans les cours d'eau est un problème typique d'écoulement transitoire. L'importance du phénomène est assez variable, fonction des éléments précédemment cités.

Ainsi, la propagation est un phénomène physique général, mais qui se présente, à l'état pur, dans un nombre assez limité de situations hydrologiques. En effet, le poids relatif du phénomène de propagation, face à l'ensemble des autres processus physiques concernés, peut être assez faible dans un grand nombre de cas.

d. Applicabilité du modèle Hayami

Le modèle d'Hayami est un cas particulier du modèle d'onde de crue diffusante et possède donc son domaine de validité.

Ce modèle simplifie l'équation dynamique du système de Saint Venant en négligeant les termes d'inertie. Les forces de frottement, de pression et de gravité doivent alors être dominantes, ce qui se vérifie pour les crues lentes naturelles en rivière ayant une pente de fond non négligeable.

De plus, la solution analytique d'Hayami est dépendante d'une seule condition limite. Par conséquent, les effets des conditions avalées doivent être minimales.

Enfin, le modèle Hayami repose sur des valeurs constantes des coefficients de célérité (C) et de diffusion (D) de l'équation (1). Ce modèle ne peut donc être utilisé que sur une gamme de débit où C et D peuvent être considérés comme constants. Sachant que les coefficients C et D sont des paramètres globaux qui caractérisent toute la physique du cours d'eau, cette approximation est raisonnable au-delà d'un certain seuil (débit de plein bord) et pour des cours d'eau à géométrie simple. D'après l'étude de Marcio Baptista (1990), l'hypothèse d'invariabilité de la célérité et du coefficient de diffusion avec la crue est souvent acceptable, au moins pour des situations où l'on n'a pas de changements brutaux, et la réponse du modèle Hayami est en général très satisfaisante.

Dans notre cas, le bassin versant de l'oued N'Fis, qui se caractérise par une géométrie simple avec des crues lentes, semble vérifier les conditions d'applicabilité du modèle Hayami.

e. Calage des paramètres

Les paramètres de célérité (C) et diffusion (D) constituent les deux paramètres du modèle, en plus de la longueur, nécessaires à l'utilisation de la méthode. Leurs valeurs peuvent être obtenues par un calcul direct à partir des formules hydrauliques (Baptista, 1990). Ces formules n'étant applicables que pour des géométries rectangulaires ou prismatiques, il est préférable d'utiliser un calage sur des crues déjà observées.

La célérité modifie la vitesse de propagation de la crue, tandis que la diffusion influence la forme de l'hydrogramme. Des tests préalables montrent que la diffusion influence peu la solution.

Dans la pratique de l'hydrologie des cours d'eau naturels, les valeurs de C varient entre 0.7 et 6 m/s, et les valeurs de D sont entre 70 et 10 000 m²/s (Baptista, 1990).

4. Calage du modèle Hayami par application de l'algorithme génétique

Le calage consiste à ajuster les valeurs numériques attribuées aux paramètres du modèle Hayami (célérité et Diffusivité) pour reproduire au mieux la réponse observée. C'est le processus de choix de jeux de valeurs des paramètres. Cette opération est faite automatiquement par une procédure d'optimisation basée sur l'algorithme génétique et programmée sous Matlab, elle consiste à chercher la valeur optimale qui améliore la cohérence entre la réponse observée et calculée.

Pour des raisons de commodité avec la programmation de l'AG, les crues d'étude ne sont pas nommées par leurs dates mais par « Crue –Nombre », le tableau ci-dessous illustre la correspondance de cette nomenclature.

Crue 1	26/09/1976
Crue 2	16/03/1980
Crue 3	18/01/1979
Crue 4	05/01/1978
Crue 5	15/11/1983
Crue 6	01/11/1987

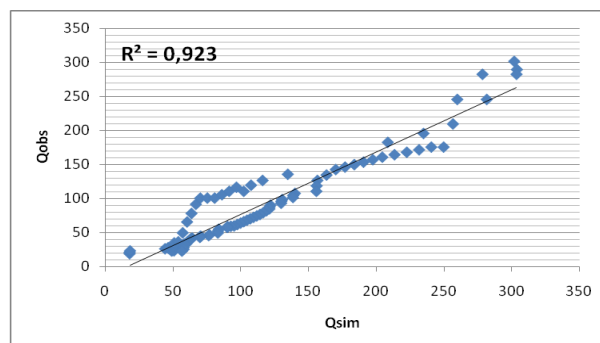
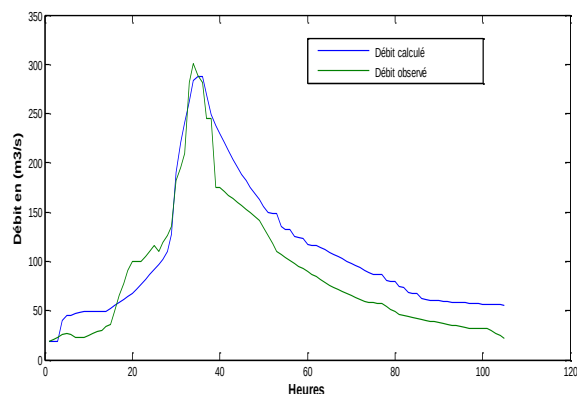
Le tableau 18 résume les résultats obtenus au niveau de la phase d'optimisation pour les 3 crues choisies aléatoirement et utilisées dans le calage. Les résultats montrent que ces crues sont caractérisées par une célérité et une diffusivité variée avec une erreur négligeable au niveau du débit de pointe (débit max) et de l'heure de la montée. L'analyse visuelle des hydrogrammes montre une bonne correspondance entre les simulations et les observations en termes de phase, des débits de pointe et l'heure de montées de ces derniers avec une variation légère de forme (Fig. 27).

Crues	Observé		Calculé		Erreur		C	D
	Débit de pointe	Heure	Débit de pointe	Heure	Débit de pointe	Heure		
15/11/1983	482	35	447	36	0,073	-0,029	3	900
05/01/1978	300	34	289	35	0,037	-0,029	2,9	1230
01/11/1987	900	28	923	28	-0,026	0,000	2.4	1195
Moyenne							2,95	1108

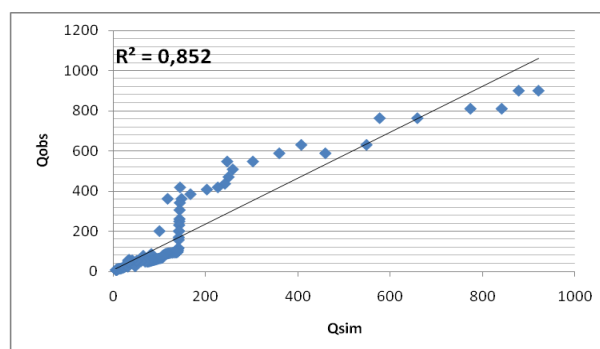
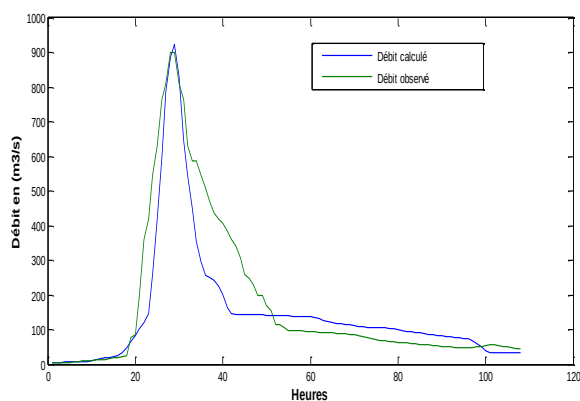
Tableau 18 : Paramètres de célérité et de diffusivité obtenus pour les crues choisies aléatoirement

Les paramètres C et D du tableau 18 ont été appliqués aux trois crues de calage (fig. 28). Il ressort que les valeurs C=3 et D=900 (paramètres de la crue du 15/11/1983) caractérisent les paramètres donnant un meilleur ajustement pour ces trois crues.

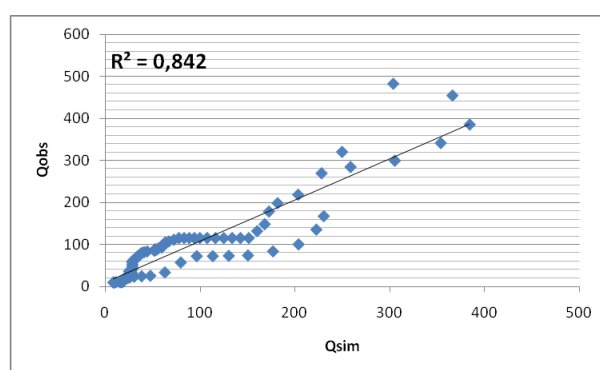
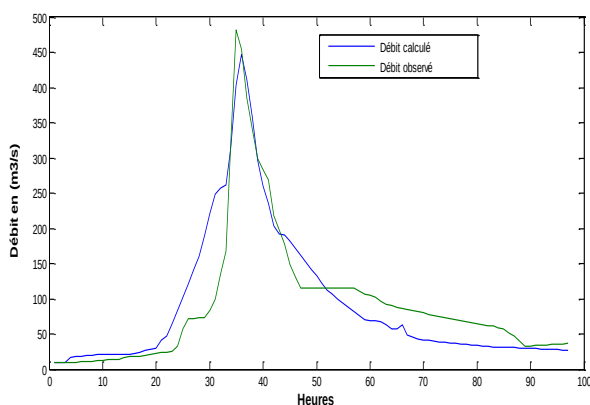
Des tests de variation des paramètres C et D ont été effectués. On constate que le paramètre D a peu d'influence sur la variation de l'allure des hydrogrammes de crues (fig. 29). Par contre le paramètre C est très sensible, une petite variation de celui-ci aura des conséquences importantes sur les résultats du modèle (fig. 30).



Crue du 05/01/1978



Crue du 15/11/1983



Crue du 01/11/1987

Figure 27 : Hydrogrammes observés et calés par le modèle Hayami

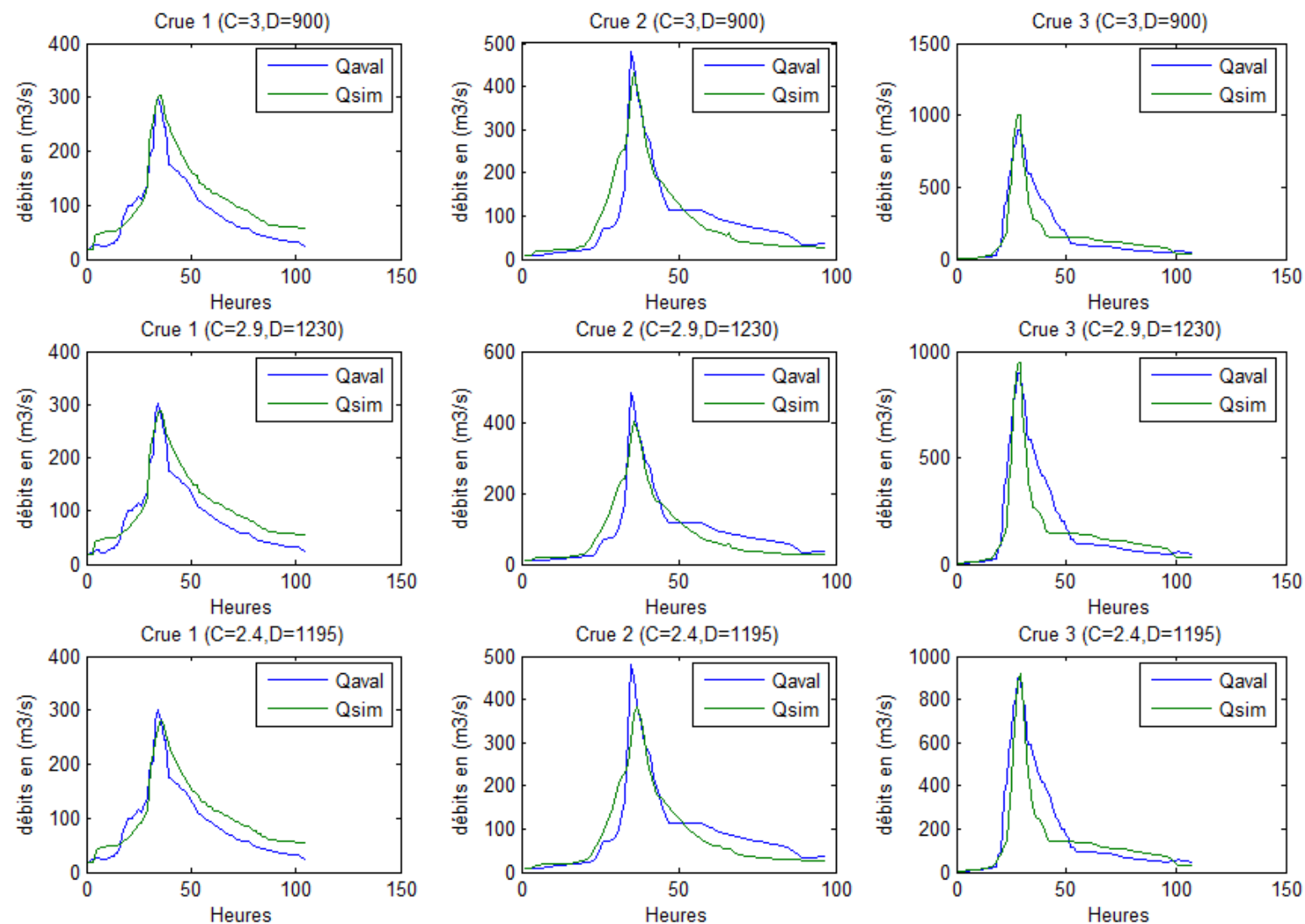


Fig. 28 : hydrogramme des crues de calage par différents paramètres

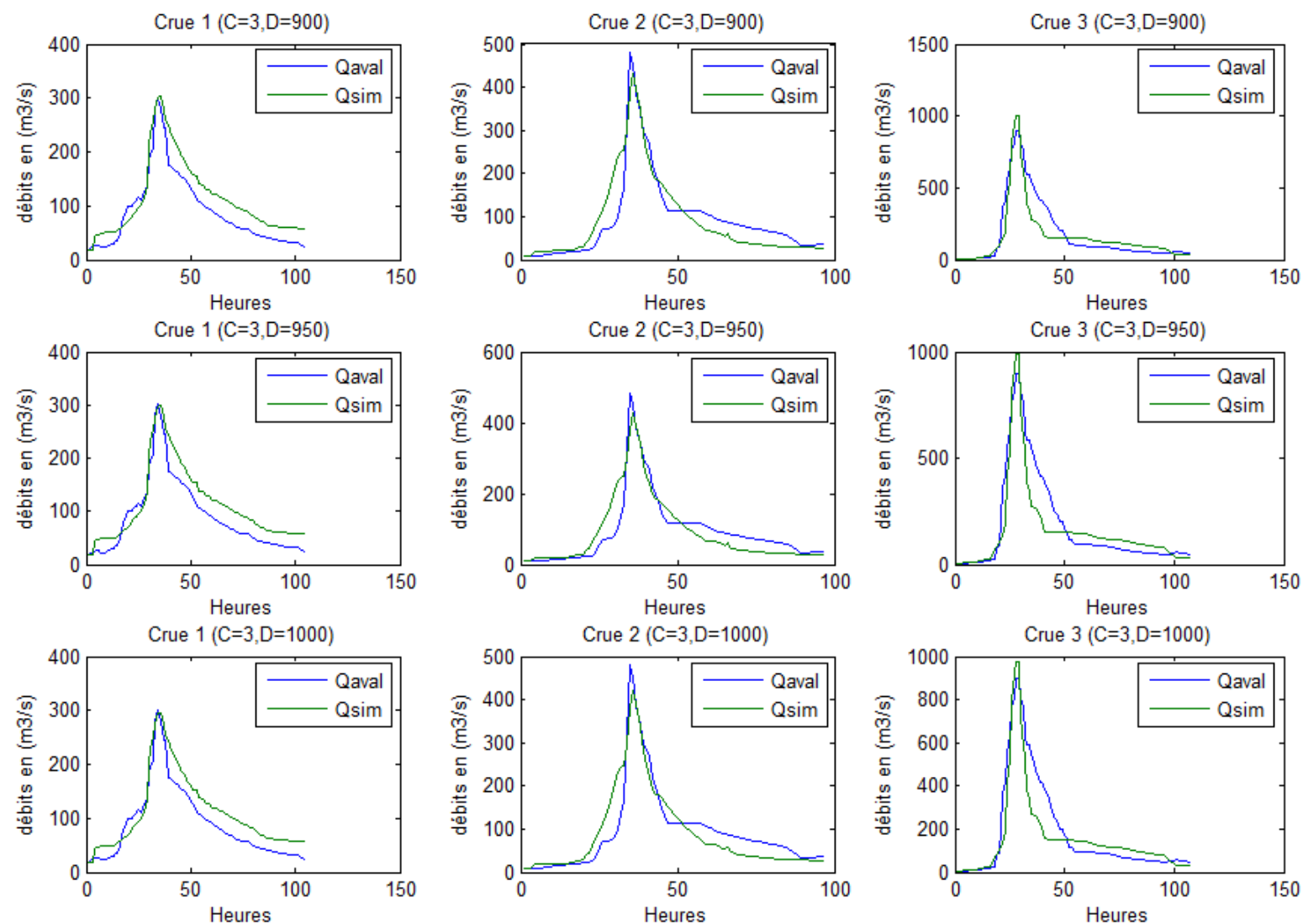


Fig. 29 : influence du la célérité sur l'estimation des débits

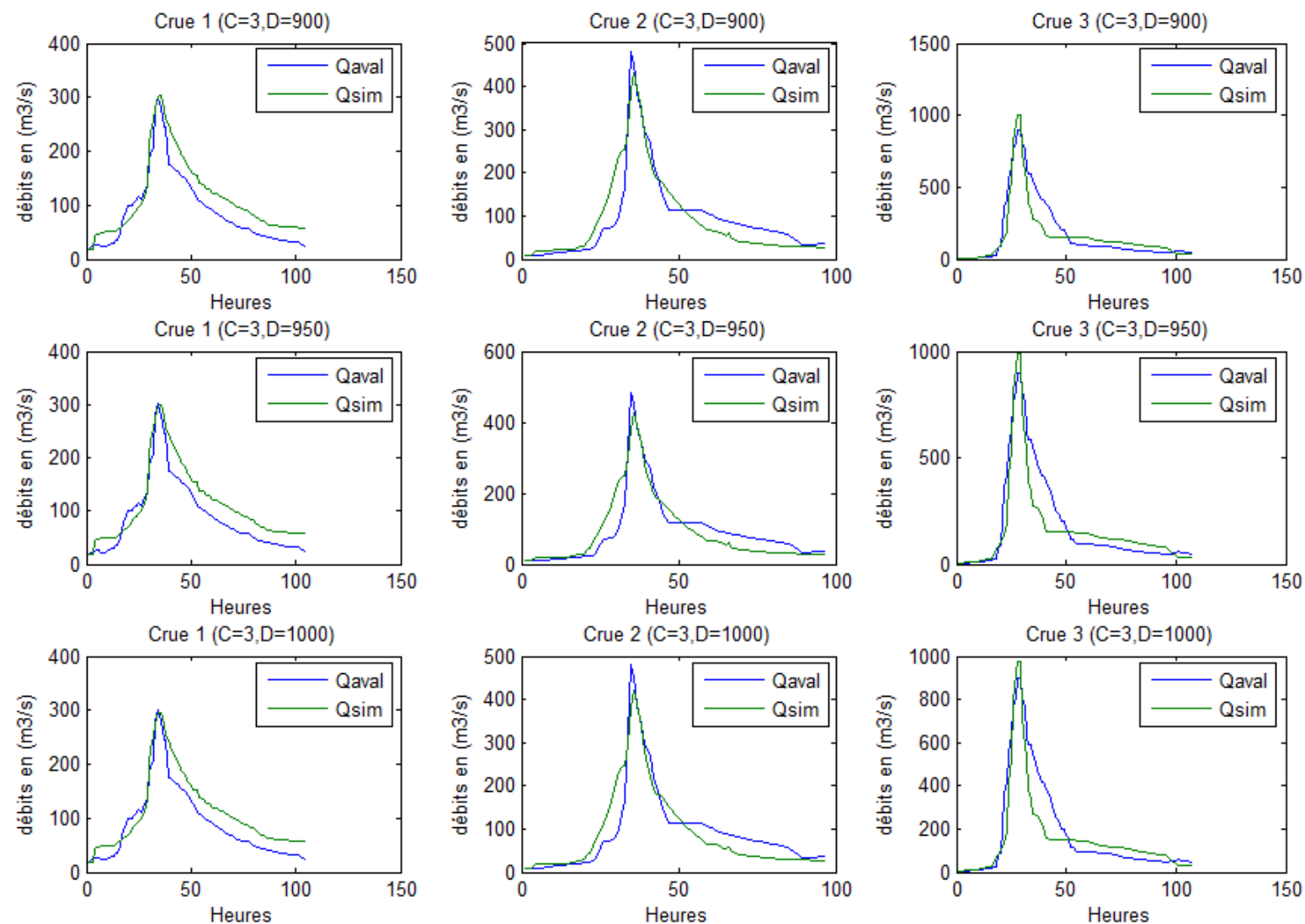


Fig. 30 : influence du la diffusion sur l'estimation des débits

5. 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 (célérité et diffusivité) au calage sur une série de données non utilisées dans la phase du calage.

Afin de valider notre modèle, on a appliqué aux autres crues les paramètres C et D retenus, à savoir $C=3$ et $D=900$. Il semble que notre modèle représente plutôt bien les débits de la crue de 26/09/1976 du bassin d'oued N'Fis (figure 31). 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.

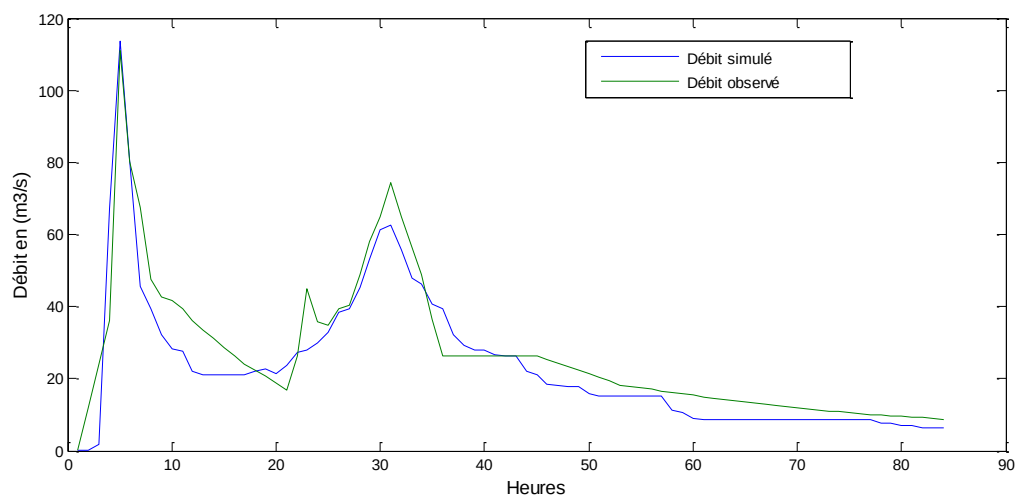


Figure 31 : Relation débit aval observé- débit aval estimé de la crue de 26/09/1976

Par contre on constate dans la crue 16/03/1980 que notre modèle surestime les débits par rapport à la réalité (figure 32). Cette surestimation est due à l'effet du phénomène de diffusion, l'hydrogramme aval est plus large et moins pointu que l'hydrogramme simulé car il est basé sur des données d'amont.

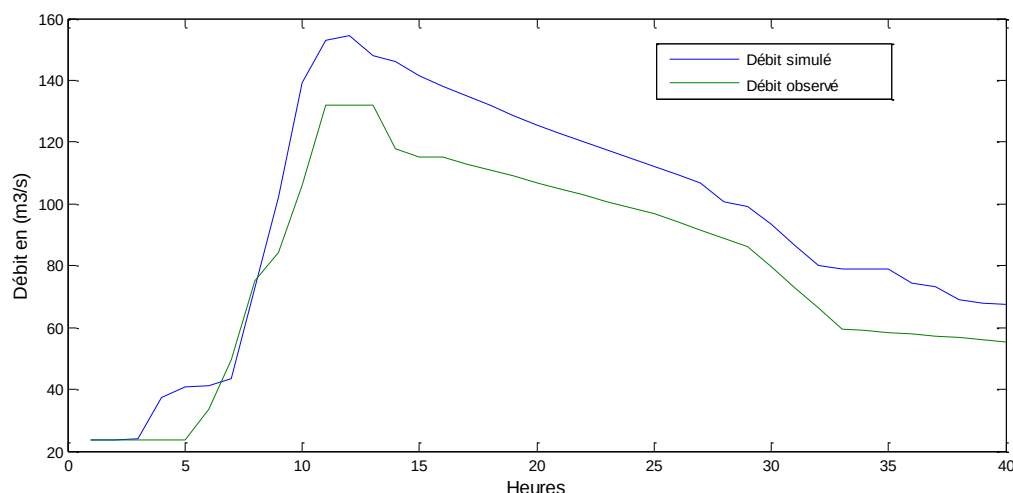


Figure 32 : Relation débit aval observé- débit aval estimé de la crue 16/03/1980

Pour la crue 18/01/1979, on remarque qu'on a une perturbation avec un décalage dans les formes des deux hydrogrammes (simulé et observé) notamment au niveau du deuxième pic (Fig. 33). Après l'analyse des hydrogrammes amont et aval, on constate que le deuxième pic d'amont n'a aucune relation avec le deuxième pic d'aval. On peut expliquer cela par la durée qui sépare les 2 pics en amont, elle n'est pas la même en aval et on sait que le modèle conserve le décalage dans le temps et par conséquent ils ne superposent jamais dans la modélisation, ils sont générés par deux types de précipitations tout à fait différentes.

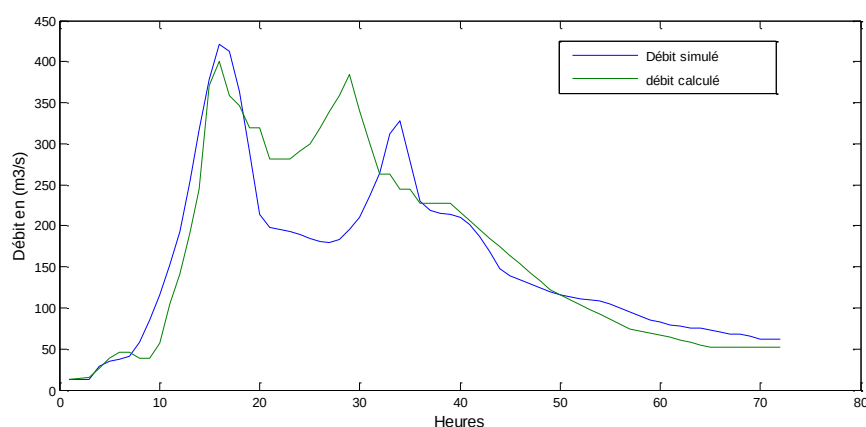


Figure 33 : Relation débit aval observé- débit aval estimé de la crue 18/01/1979

En ce qui concerne la Crue du 27/01/1987 on remarque que le modèle sousestime les débits par rapport la réalité. Cette sousestimation peut être expliquée par : les apports générés par des précipitations généralisées qui s'ajoutent constamment aux débits d'amont propagé tout au long de la trajectoire qui sépare l'amont et l'aval (Fig. 34).

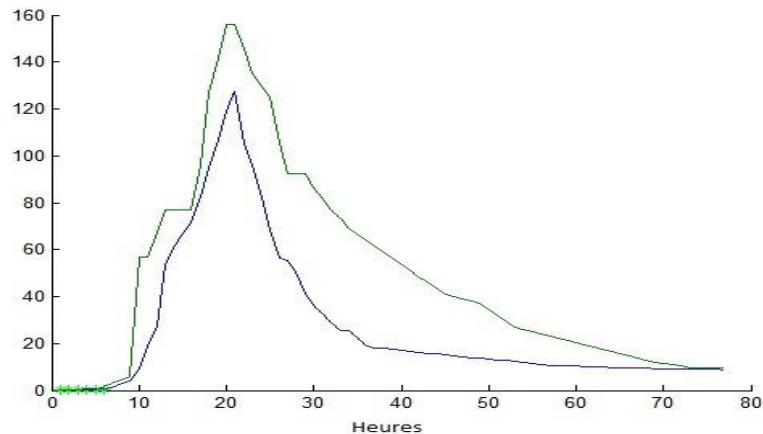


Figure 34 : Relation débit aval observé- débit aval estimé de la crue du 27/01/1987

6. 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), Root Mean Square Error (RMSE) et l'erreur relative sur les pics de crue.

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 .

RMSE

Ce critère est très utilisé pour optimiser les paramètres du modèle. Il permet d'évaluer la qualité moyenne des prévisions et ainsi d'avoir une vue d'ensemble de la qualité des modèles. Il peut être calculé sur les débits ou sur les hauteurs. Il est défini par :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Q_{obs} - Q_{calc})^2}{n}}$$

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 19 rapporte les valeurs obtenues pour les différents critères d'évaluation de la qualité du modèle.

	RMSE	Nash	R ²
26/09/1976	3,54%	85,80%	0,76
16/03/1980	5,80%	94,30%	0,94
18/01/1979	17,54%	90,70%	0,71
05/01/1978	8,06%	93,30%	0,94
15/11/1983	12,42%	88,70%	0,79
01/11/1987	7,57%	88,30%	0,82

Tableau 19 : Valeurs des critères d'évaluation du modèle Hayami retenu
pour le bassin versant de l'oued N'Fis

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

Pour la RMSE calculée, qui joue un rôle d'indicateur de la précision de l'estimation des débits, on remarque que les crues du 18/01/1979 et 15/11/1983 ont des valeurs assez grandes par

contre le reste des crues présentent des faibles valeurs, ces dernières semblent tout à fait acceptables dans le cadre de la modélisation hydraulique.

En ce qui concerne le coefficient de détermination R^2 , on remarque qu'on a une bonne corrélation entre les débits simulés et débits observés puisque ce dernier dépasse 0.7.

Le tableau 20 rapporte les erreurs d'amplitude obtenues en validation sur les 6 crues du bassin d'oued N'Fis. On note que les erreurs sont tellement faibles, ce qui montre que le modèle a bien estimé les débits de pointes.

	Max		Erreur d'amplitude sur les pics
	Q observé	Q simulé	
26/09/1976	114,05	111	0,027
16/03/1980	158,08	132	0,165
18/01/1979	428,64	400	0,067
05/01/1978	296,9	301	0,014
15/11/1983	414,22	482	0,164
01/11/1987	983,15	900	0,085

Tableau 20 : Erreur d'amplitude du Hayami en validation sur les 6 crues du bassin d'oued N'Fis

Conclusion :

La célérité est le paramètre le plus sensible dans le calage, par contre le coefficient de diffusion permet un ajustement de deuxième ordre pour l'atténuation et le décalage.

La variation des résultats obtenus dans la validation est liée à plusieurs problèmes :

- Les données sur lesquelles on a travaillé ne sont pas toutes des valeurs réelles et mesurées, bon nombre de valeurs de la base de données est plutôt estimé.
- Le modèle ne prend pas en considération les apports ajoutés par les précipitations tout au long de la trajectoire de la propagation de la crue, et aussi les pertes par la canalisation utilisée dans l'irrigation (séguias).
- Les conditions morphologiques et physiques sont variables dans l'espace.

En ce qui concerne la validité du modèle et en se basant sur les critères d'évaluation de la qualité de simulation, nous pouvons dire qu'on a un modèle assez satisfaisant pour modéliser les crues au niveau du bassin versant de l'oued N'Fis.

Conclusion générale et perspectives

L'étude morphologique du bassin d'oued N'Fis et l'analyse statistique des caractéristiques des crues (temps de base, temps de montée, ...) sont très importants pour évaluer l'intensité de la gravité de la réponse hydrologique. L'étude de la typologie des crues donne une information supplémentaire pour une meilleure modélisation.

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, on trouve que la loi de Pareto est la mieux adaptée pour l'estimation des débits maximums journaliers et la loi de Gumbel la mieux adaptée pour l'estimation des pluies maximales journalières.

Le modèle Hayami qui se caractérise par les 2 paramètres Célérité et Diffusion se présente comme un outil assez intéressant, capable de représenter convenablement une gamme importante de conditions de cours d'eau et de crues. La célérité est le paramètre le plus sensible, il a une liaison assez nette avec le décalage dans le temps. Alors que le coefficient de diffusion permet un ajustement de deuxième ordre pour l'atténuation et le décalage.

Une perspective d'amélioration du modèle Hayami consiste :

- à intégrer une autre modélisation basée sur une fonction de production pour transformer les précipitations en débit pour l'ajouter au débit d'entrée dans le cas des précipitations généralisées (Apport entre l'amont et l'aval).
- à diviser le tronçon en plusieurs parties selon les pentes (la vitesse de propagation est variable d'une pente à l'autre) pour avoir plus de précision.

Bibliographie

SAIDI M.E.M, BOUKRIM S, FNIGUIRE F, RAMROMI A, 2012: LES ECOULEMENTS SUPERFICIELS SUR LE HAUT ATLAS DE MARRAKECH CAS DES DEBITS EXTREMES. LARHYSS JOURNAL, ISSN 1112-3680, N° 10, MARS 2012, PP. 75-90.

ALAA N. MOUIDA A., IDENTIFICATION OF PRIESTLEY-TAYLOR TRANSPIRATION PARAMETERS USED IN TSEB MODEL BY GENETIC ALGORITHM, IJSCI, VOL8 ISSUE 3, NO. 1, MAY 2011

ALAA N.,B SOME,SAWADOGO , NUMERICAL SIMULATION OF GROUNDWATER LEVEL IN A FRACTURED POROUS MEDIUM AND SENSIVITY ANALYSIS OF THE HYDRODYNAMIC PARAMETERS USING GROD COMPUTING : APPLICATION OF THE PLAIN OF GOMDO (BURKINAFASO) IJSSI JOURNAL,VOLUME 9 ISSUE 1 , N°2 JANUARY 2012.

OUZINE.L. ET. KHARROU M.H, 2004 : CONCEPTION PARTICIPATIVE DE PROJETS D'IRRIGATION DANS LE PERIMETRE DU HAOUZ. PROJET INCO-WADEMED, ACTES DU SEMINAIRE MODERNISATION DE L'AGRICULTURE IRRIGUEE.

BAPTISTA.M., 1990 : CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA PROPAGATION DE CRUES EN HYDROLOGIE. THESE DE DOCTORAT SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'ENVIRONNEMENT A L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES.

LOBLIGEIS. F., 2008 : ETUDE DES STRATEGIES DE COUPLAGE ENTRE UN MODELE HYDROLOGIQUE ET UN MODELE. RAPPORT DE STAGE DE 3EME ANNEE AU DEPARTEMENT HYDRAULIQUE ET MECANIQUE DES FLUIDES A L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ELECTRONIQUE, D'ELECTROTECHNIQUE, D'INFORMATIQUE, D'HYDRAULIQUE ET DES TELECOMMUNICATION DE TOULOUSE.

EL YOUNSSI Y., 2011: CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES ETGEOMORPHOLOGIQUES DU BASSIN VERSANT DU N'FIS : CONSEQUENCES SUR L'ENVAISEMENT DU BARRAGE LALLA TAKERKOUST. LICENCE ES SCIENCES ET TECHNIQUES EAU ET ENVIRONNEMENT A LA FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES MARRAKECH.

FREDERIC. J., 2007 : MODELE DE PREVISION ET DE GESTION DES CRUES OPTIMISATION DES OPERATIONS DES AMENAGEMENTS HYDROELECTRIQUES A ACCUMULATION POUR LA REDUCTION DES DEBITS DE CRUE. THÈSE NO 3711 A LA FACULTÉ DE L'ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT.

JEAN.L. BERTRAND-KRAJEWSKI, 2006 : MODELISATION DES ECOULEMENTS EN RESEAU D'ASSAINISSEMENT. COURS D'HYDROLOGIE URBAINE A INSA DE LYON.

BÉLIVEAU.J., 2006 : ANALYSE FRÉQUENTIELLE MULTIVARIÉE DE LA POINTE, DU VOLUME ET DE LA DURÉE DELA CRUE. MEMOIRE PRESENTE A LA FACULTE DES ETUDES SUPERIEURES DE L'UNIVERSITE LAVAL DANS LE CADRE DU PROGRAMME DE MAITRISE EN STATISTIQUE POUR L'OBTENTION DU GRADE DE MAITRE ES SCIENCES (M.SC.)

Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de l'oued N'Fis	p11
Figure 2 : Carte géologique du bassin versant de l'Oued N'Fis	p13
Figure 3 : Carte hypsométrique du bassin versant de l'Oued N'Fis	p14
Figure 4 : Courbe hypsométrique du bassin versant de N'Fis à Imin El Hammam.	p14
Figure 5 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued N'Fis (d'après l'ABHT)	p16
Figure 6 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles au niveau du bassin versant de l'Oued N'Fis	p18
Figure 7 : Précipitations totales annuelles au niveau du bassin versant de l'Oued N'Fis	p23
Figure 8 : Ajustement graphique des précipitations maximales journalières selon les lois de Gumbel, Halphen et exponentielle	p25
Figure 9 : Débits moyens mensuels interannuels au niveau du bassin versant de N'Fis	p28
Figure 10 : Débits moyens annuels au niveau du bassin versant de N'Fis	p29
Figure 11 : Graphiques des ajustements des lois de débit maximal journalier	p30
Figure 12 : Histogramme de fréquence des débits maximums journaliers	p32
Figure 13 : Hydrogramme de la crue 1999-10-2 à la station Imin El Hamame	p36
Figure 14 : Répartition mensuelle des crues dans le bassin versant de l'Oued N'Fis à la station Imin El Hamame	p37
Figure 15 : Histogramme de fréquence de temps de base des crues du bassin versant de l'Oued N'Fis à la station Imin El Hamame	p38
Figure 16 : Histogramme de fréquence de temps de montée des crues du bassin versant de l'Oued N'Fis à la station Imin El Hamame	p38
Figure 17 : Hydrogrammes des crues choisies aléatoirement pour le calcul de la vitesse de propagation	p40
Figure 18 : Crue complexe généralisée du 26/09/1976 (Station Imin El Hamam)	p42
Figure 19 : Crue aval simple du 06/05/1975 (station Imin El Hamame)	p42
Figure 20 Organigramme d'un AG standard	p47
Figure 21 : Représentation d'une sélection par tournoi d'individus pour un critère	p49
Figure 22 : Représentation d'un croisement en un point de deux chaînes	p49
Figure 23 : Représentation d'une mutation de bits dans une chaîne	p50
Figure 24 : Composantes du modèle	p53
Figure 25 : Situation schématique où la propagation est prépondérante	p56
Figure 26 : Propagation d'une crue	p56
Figure 27 : Hydrogrammes observés et calés par le modèle Hayami	p60
Figure 28 : hydrogramme des crues de calage par différents paramètres	p61
Figure 29 : influence de la célérité sur l'estimation des débits	p62
Figure 30 : influence de la diffusion sur l'estimation des débits	p63
Figure 31 : Relation débit aval observé- débit aval estimé de la crue de 26/09/1976	p64
Figure 32 : Relation débit aval observé- débit aval estimé de la crue 16/03/1980	p65
Figure 33 : Relation débit aval observé- débit aval estimé de la crue 18/01/1979	p65
Figure 34 : Relation débit aval observé- débit aval estimé de la crue du 27/01/1987	p66

Liste des tableaux

Tableau-1 : calcul de l'indice de compacité	P14
Tableau-2 : Répartition hypsométrique de BV du N'fis à Imin El Hammam	p16
Tableau-3 : Caractéristiques physiques du bassin versant de N'Fis	p17
Tableau 4 : stations pluviométriques du bassin d'oued N'Fis	p19
Tableau 5 : ajustement numériques de la loi Gumbel et la loi Halphen (Periode 20 ans)	p26
Tableau 6 : ajustement numériques de la loi Gumbel et la loi Halphen (Periode 50 ans)	p26
Tableau 7 : ajustement numériques de la loi Gumbel et la loi Halphen (Periode 100 ans)	p26
Tableau 8 : Estimation des précipitations maximales journalières annuelles selon la loi Gumbel	p27
Tableau 9 : Statistiques descriptives de précipitations max journalières	p27
Tableau 10 : Critères de comparaison des ajustements des lois aux débits de pointe d'Imine El Hamame	p31
Tableau 11 : Estimation des débits de retour selon des différentes lois d'ajustement	p31
Tableau 12 : Statistiques descriptives de débit max journalier	p32
Tableau 13 : d'effectif des débits maximums journaliers	p33
Tableau 14 : débit estimé pour chaque période de retour selon l'ajustement de la loi Pareto	p33
Tableau 15 : Caractéristique de la crue 1999-10-2 (station Imine El hamame)	p36
Tableau 16 : Vitesse de propagation des crues entre les deux stations Imine el Hamame et Iguir N'Kouris	p39
Tableau 17 : Code de Gray et code binaire pour une chaîne à trois bit	p51
Tableau 18 : résultats observés et calculé des débits de pointe des crues choisis aléatoirement avec leurs paramètres (Célérité et diffusivité)	p59
Tableau 19 : Critères d'évaluation du modèle Hayami en validation pour bassin d'oued N'Fis	p67
Tableau 20 : Erreur d'amplitude du Hayami en validation sur les 6 crues du bassin d'oued N'Fis	p68
