



Université Cadi-Ayyad
Faculté des Sciences et Techniques



Agence Du Bassin Hydraulique de
Tensift

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Licence en Sciences et Techniques
Option : Eau et Environnement



**Modélisation des crues en milieu semi-aride par la méthode
de Muskingum. Cas du bassin versant de l'Oued Ksob
(Haut atlas occidental, Maroc)**

Réalisé par :

Fatiha BARCHANE

Soutenu le 2 juillet 2009 devant le jury composé de :

Bachnou A.

Encadrant

Limam N.

Encadrant

Saïdi M.E

Examineur

El Hariri K.

Examinatrice

REMERCIEMENTS

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à mon encadrant, Bachnou A., qui m'a donné de précieux conseils tout au long de ce stage. Sa disponibilité, sa patience et le partage de ses connaissances m'ont permis d'étudier dans des voies de recherche particulièrement intéressantes pour la modélisation hydrologique.

J'exprime ma profonde gratitude à MM. Arsmouk H., chef de service d'hydrologie et Limam N., ingénieur à l'ABHT, qui ont contribué à mon intégration dans le sujet par leurs conseils et leurs apports bibliographiques. Également je remercie cordialement Mr Lkihal S., technicien à l'ABHT.

Mes chaleureux remerciements à mes très chers parents pour leurs sacrifices matériels et moraux qu'ils m'ont accordés le long de mes années d'études, ainsi qu'à mon frère et mes sœurs pour leurs encouragements

Enfin, merci à toutes les personnes du Département des Sciences de la Terre qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, ainsi qu'à mes collègues et mes amis.

Sommaire

Présentation du lieu du stage	4
Introduction	5

Chapitre 1 : cadre général de la zone d'étude : bassin versant de l'Oued Ksob

1) Localisation géographique	6
2) Réseau hydrographique	7
3) Caractéristiques morphologiques	10
4) Caractéristiques géologiques	13
5) Facteurs climatiques	15

Chapitre 2 : Analyse hydrologique

1) Traitement des données pluviométriques	16
1-1) Présentation des données	16
2-1) analyse des données pluviométriques	16
a- Précipitations moyennes mensuelles interannuelles	16
b- Précipitations moyennes annuelles	17
2) Caractéristiques des crues	
2-1) Durée des crues	18
2-2) Temps de montée	18
2-3) Hydrogrammes des crues	18
2-4) Les crues dans l'année hydrologique	18
2-5) Classification génétique des crues	20
2-6) vitesse de propagation des crues dans le bassin versant de l'Oued Ksob	21
3) Evolution des crues de l'amont vers l'aval :	21
3-1) Les crues grossissant vers l'aval	21
3-2) Les crues amorties vers l'aval	23

Chapitre3 : La modélisation des crues par le modèle de Muskingum

1) Objectifs de la modélisation hydrologique	24
2) Le modèle de Muskingum	24
2-1) Mise en équation	24
2-2) Méthodologie	26
a) Choix des paramètres utilisés dans le calcul du modèle	26
b) Calcul de K moyen	26
3) Calage du modèle	27
4) Validation des deux modèles	28
5) Simulation des débits aval à partir des débits amont	35

Présentation du lieu du stage : A.B.H.T

Du fait de la valeur que revêt l'eau et le déficit qu'elle pose, la mise en place des établissements chargés de la gestion de ce secteur était la première étape. Dès lors, le secteur d'eau est partagé, dans son organisation, entre plusieurs départements ministériels et des établissements publics. Parmi lesquelles, on cite l'agence du bassin hydraulique de Tensift-Marrakech.

Cette agence couvre la wilaya de Marrakech, les provinces d'Essaouira, Safi et partiellement celle d'El Jadida et El Kalaa Des Sraghna. Il s'agit de la région hydraulique qui s'étend de la ligne de partage des eaux de surface d'Oum –Errbia au Nord, aux crêtes du Haut Atlas au sud, des premiers du Moyen Atlas à l'Est, à l'océan atlantique à l'ouest. Elle correspond aux bassins versant de l'oued Tensift, de l'oued Ksob et les oueds côtiers atlantiques d'El Jadida jusqu'au Sud de Tammanar.

Attributions des services de l'A.B.H.T. :

L'A.B.H.T est formée de plusieurs services et départements dont chacun s'occupe d'une fonction bien déterminée. On y distingue alors :

- Le service administratif ;
- Le service de gestion et planification des eaux ;
- Le service d'hydrogéologie ;
- Le service d'hydrologie ;

Mon stage s'est déroulé dans le dernier service cité.

Les prérogatives de l'A.B.H.T. consistent en la meilleure gestion des ressources en eau et l'assurance quantitative et qualitative des besoins en eau présents et futurs des divers usagers du bassin dans le cadre d'un plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau. Ce plan doit définir le partage et l'ordre des priorités entre les différents secteurs du bassin et les principaux usagers de l'eau, ainsi que la détermination des eaux qui peuvent être transférées entre les bassins et le suivi des opérations nécessaires à la mobilisation, la répartition, la protection et la restauration des ressources en eau.

1 – Introduction

Dans le monde, l'attention a toujours été attirée sur les cataclysmes hydrologiques et leurs effets destructifs bien connus. Dans les régions semi-arides plus particulièrement, ces phénomènes ont pris de l'ampleur durant ces dernières décennies, probablement en relation avec le changement climatique que connaît la planète. Au Maroc, le Haut Atlas Occidental est l'une des régions les plus touchées par ces phénomènes d'écoulement extrême à répétition. Les dernières grandes crues survenues dans la région depuis quelques années (Ourika en 1995 et en 1996 ; Ksob en 1996 et 2005, Imin'tanout et régions voisines tout récemment) témoignent d'une série impressionnantes de sous-évaluations de l'aléa hydrologique à prendre en compte (Elmimouni et al., 2009).

Dans la région d'Essaouira, le bassin versant du Ksob (extrémité occidentale du Haut Atlas) est l'une des régions les plus menacées par ce risque naturel en raison de son climat semi-aride de son relief montagneux et maritime et de ses enjeux touristiques urbanistiques et économiques. Ce bassin est parcouru par un cours d'eau à caractère torrentiel traversant et menaçant les secteurs de plus en plus développés de la bande côtière de la région d'Essaouira. Les risques d'inondation sont d'autant plus importants que la ville d'Essaouira présente une topographie plate proche du niveau de la mer (5 m d'altitude). Contrairement aux autres bassins versants du Haut Atlas occidental, le bassin versant du Ksob présente plusieurs particularités. Le débit de pointe atteint dans le bassin de Ksob lors des périodes de crue dépasse généralement 1000 m³/s. Lors de la crue du 29 Novembre 2005, la plus spectaculaire durant ces dernières décennies, le débit de pointe atteint est de 2550 m³/s d'après l'Agence de Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT). Lors des périodes de crue, un courant très destructeur traverse alors le lit majeur de l'Oued court-circuitant ainsi les méandres. L'érosion accélérée mobilise progressivement une masse importante de sédiments meubles constituée de galets, de sables, de limons, d'argiles et de débris végétaux. Toutefois, par cette charge solide qu'il véhicule lors des périodes de crue, l'oued Ksob joue un rôle fondamental dans le maintien de l'équilibre morphosédimentaire de la baie d'Essaouira (Gentile, 1997 ; El Mimouni et al., 2007).

L'objectif principal de notre étude est d'évaluer la pertinence de la méthode de Muskingum dans la modélisation des crues, ceci par la connaissance du temps de propagation des crues et la simulation de débits de pointe des crues et la précision des limites d'utilisation de la méthode.

Chapitre 1 : Cadre général de la zone étude : bassin versant de l'Oued Ksob

1) Localisation géographique

Le bassin versant du Ksob se localise sur la façade Atlantique du Maroc au sud-est de la ville d'Essaouira, entre 31°2' et 31°30' Nord et entre 9° et 9°46' Ouest, où il constitue l'extrémité occidentale de la chaîne haut atlasique. Le cours d'eau principal (Oued Ksob) résulte de la confluence des oueds Igrounzar et Zelten à l'amont de la gorge Zerrar à environ 29 km de l'océan Atlantique (Fig. 1).



Fig. 1 : localisation géographique du bassin versant de l'Oued Ksob (région d'Essaouira)

Le bassin versant du Ksob est donc composé de trois sous bassins d'une superficie totale de 1480 km² (fig. 2) :

- 823 km² pour le sous bassin d'Igrounzar qui s'étend sur la partie Nord ;
- 460 km² pour le sous bassin de Zelten sur la partie Sud ;
- 197 km² pour le sous bassin d'Adamna à l'extrême Ouest.

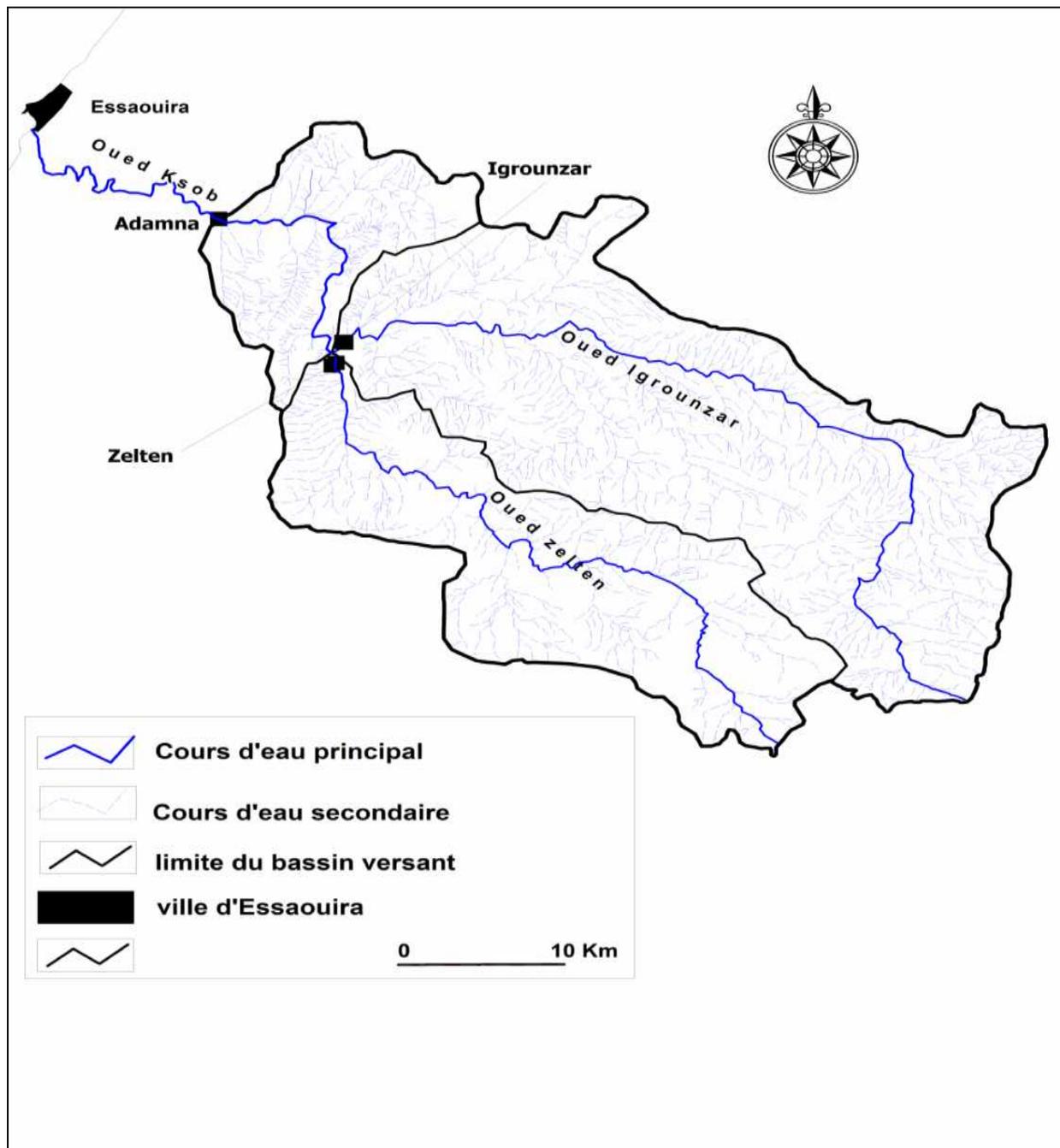


Fig. 2 : Les sous bassins constitutifs du bassin versant de l'Oued Ksob (d'après Elmimouni et al. 2009)

2) Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est l'ensemble des cours d'eau qui recueillent les eaux des sources et de ruissellement des versants. Il est composé du cours principal et des affluents appelés aussi tributaires.

La configuration en plan du réseau est très variée d'un bassin à l'autre, elle dépend de la combinaison de nombreux facteurs tels que le climat, la géologie, la topographie et l'érosion et résulte d'une longue évolution.

L'oued Ksob résulte de la confluence des oueds Igrounzar et Zelten à l'amont de la gorge Zerrar à environ 29 km de l'océan Atlantique (fig. 3).

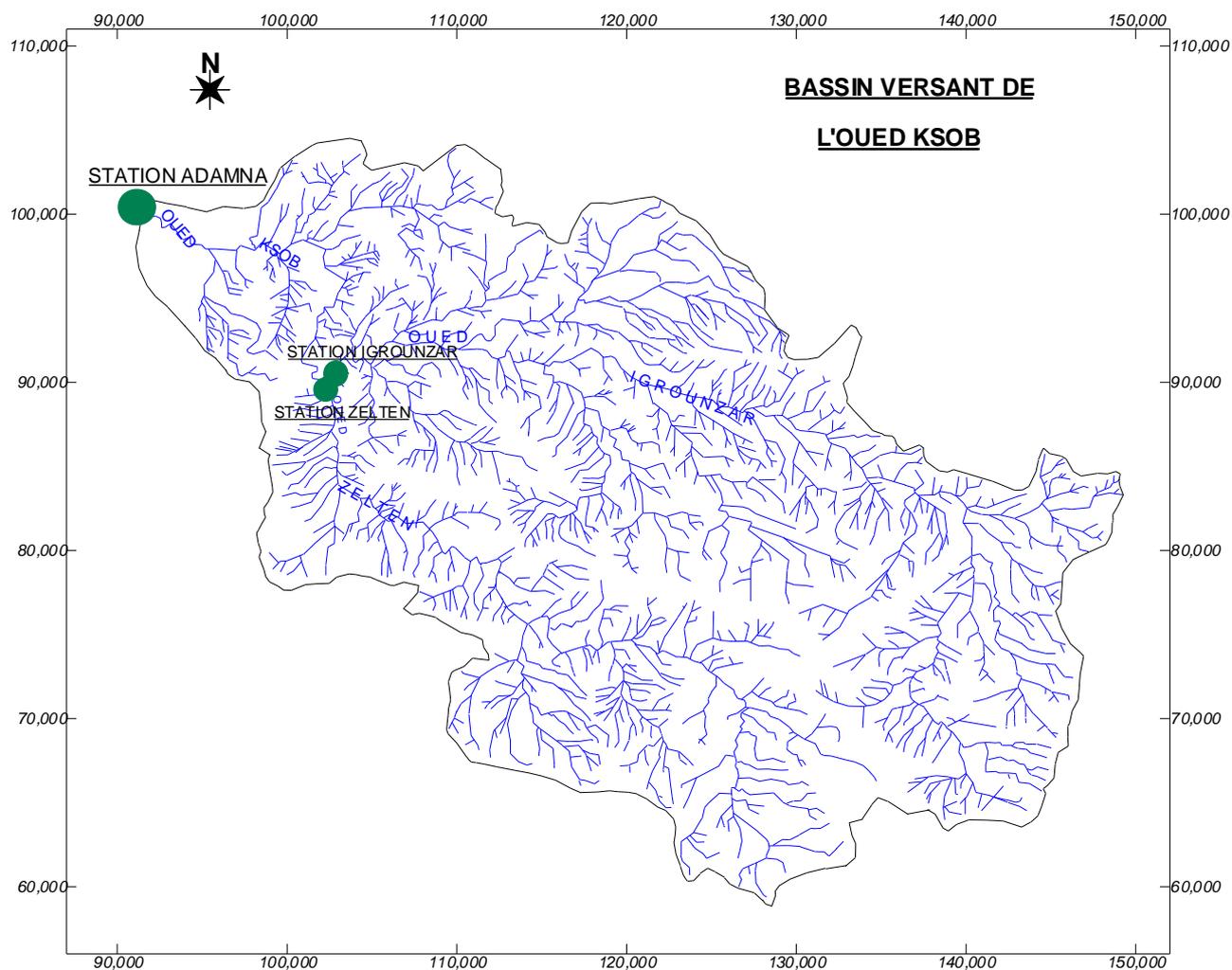


Fig. 3 : Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Ksob

a) Sous bassin d'Igrounzar (fig. 4)

L'oued Igrounzar est l'un des 2 principaux affluents de l'oued Ksob, il est dénommé dans sa partie Amont Oued Aït Ou Adil. Il draine un bassin versant de 900 km² à la station hydro-climatologique Igrounzar. Les principaux affluents de l'oued Igrounzar sont :

- sur la rive gauche
 - ◆ assif Er Rabat
 - ◆ Oued Tamaloukt
 - ◆ Oued Tagaouaout
- sur la rive droite
 - ◆ Oued Ighzifene
 - ◆ Oued Tiguidar

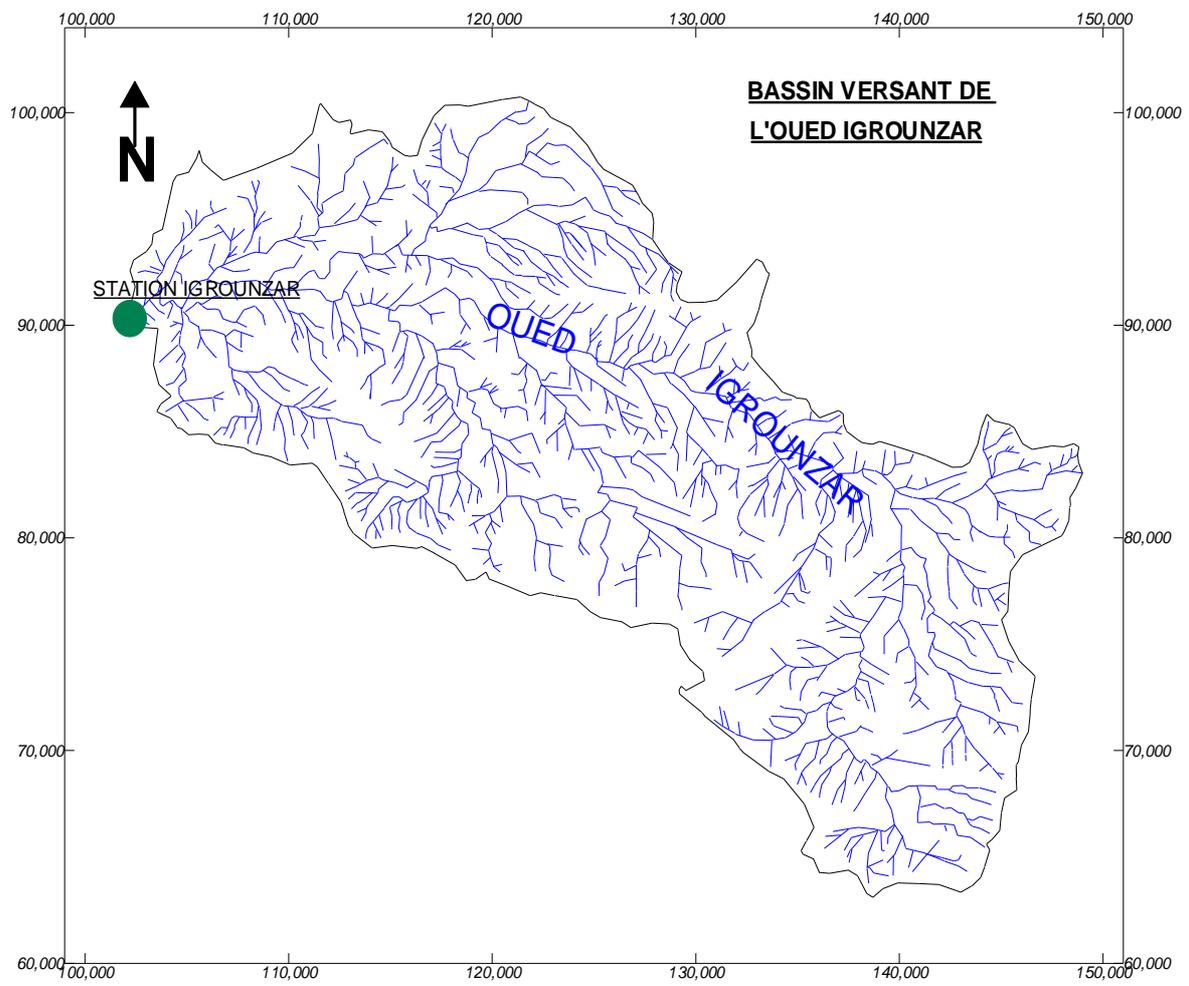


Fig. 4 : Réseau hydrographique du sous bassin versant d'Igrounzar

b) Sous bassin de Zelten (fig. 5)

L'oued Zelten porte également le nom de oued Sebt dans sa partie avale et Assif Oughouniffa en amont. Il est constitué par plusieurs petites chaâbats. Il draine un bassin versant de 423 km² à la station Zelten.

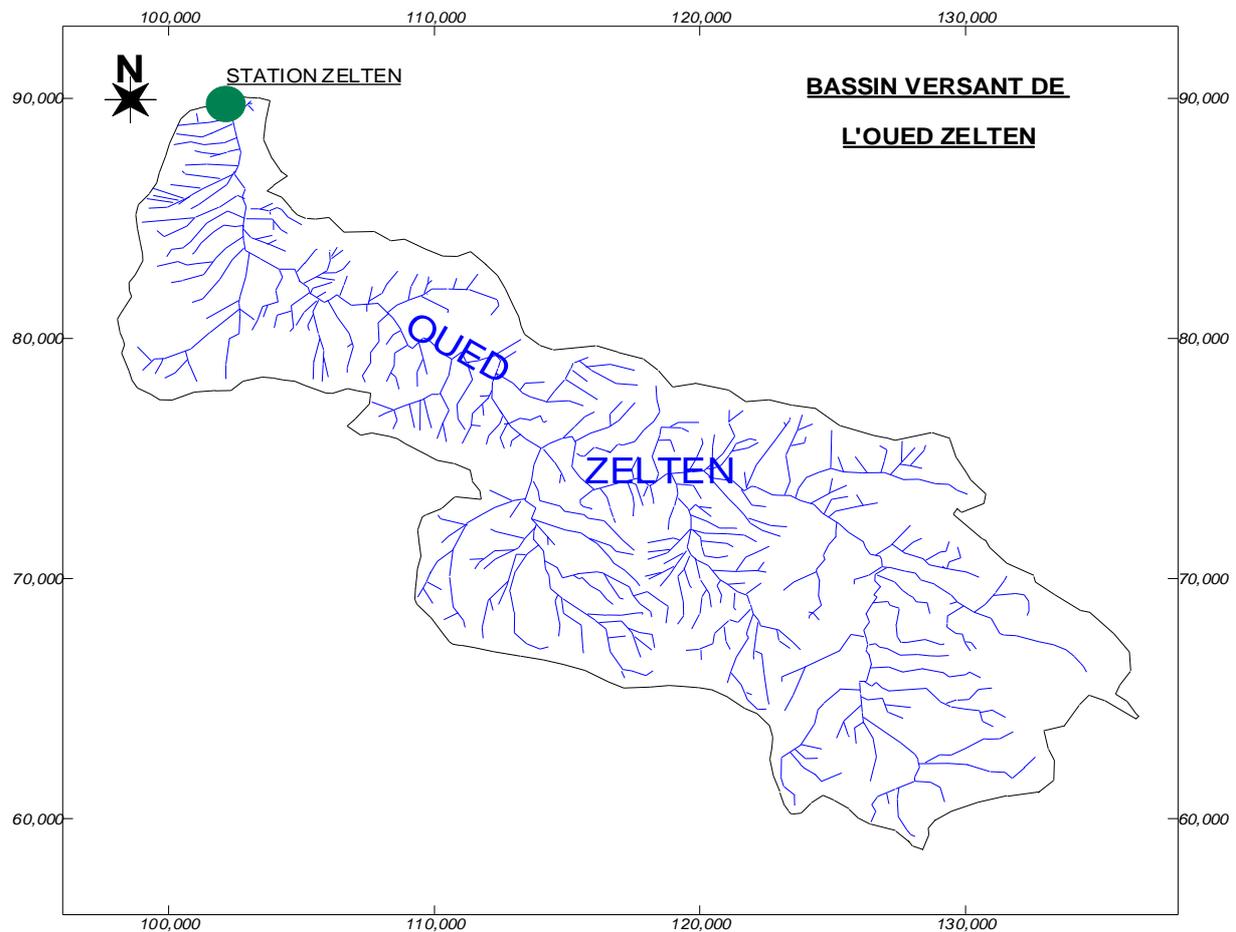


Fig. 5 : Réseau hydrographique du sous bassin versant de Zelten

3) Caractéristiques morphologiques

Situé à l'extrémité occidentale de la chaîne du Haut Atlas dans une zone semi-aride, le bassin versant de Ksob présente une forme allongée avec des pentes assez importantes au niveau des affluents et des versants.

L'ensemble du bassin actif est pratiquement limité à la confluence ; l'oued draine les eaux de ruissellement de la cuvette synclinal de Bouabout et du versant nord du Haut Atlas occidental. Le réseau hydrographique du bassin versant est peu marqué à l'aval de la confluence (longue de 28 Km) ; dans cette partie les débits des basses eaux s'infiltrent rapidement dans les alluvions du lit de l'oued Ksob qui est à sec plusieurs mois par an à la station Adamna.

Chacun de ces oueds (Igrounzar et Zelten), formant le cours principal de Ksob, correspond à une vallée linéaire alimentée, sur les deux rives, par une succession de ravins affluents. Cette situation permet aux ondes de crues de grossir vers l'aval à mesure de leur alimentation par les affluents.

La forme du bassin versant peut avoir des conséquences hydrologiques importantes, notamment la relation pluie-débit et l'évolution des écoulements en période de crue. Autrement dit,

outre la nature de l'averse, ce sont les caractéristiques morphologiques du bassin qui conditionnent la forme des hydrogrammes observés à l'exutoire (Humbert et al. 1982 ; Saidi, 1995 ; Saidi et al, 2003). Plusieurs formules et indices permettent de chiffrer les caractéristiques morphologiques des bassins versants. Le tableau 1 résume les caractéristiques morphologiques du bassin versant de Ksob.

Le bassin versant du Ksob présente plusieurs particularités morphologiques. Sur environ 80 km de distance, sa topographie passe de 0 à environ 1700 m d'altitude (fig. 6). Alors que l'oued est relativement encaissé en amont, la morphologie de la basse vallée de l'oued est relativement complexe ; modelé notamment par les vents forts du Nord (Weisrock et Fontugne, 1991) et par les nombreux aménagements réalisés au cours de ces deux dernières décennies. L'oued débouche directement dans la baie d'Essaouira.

Superficie (Km ²)	1480
Périmètre (Km)	208
Longueur du cours principal (km)	105
Indice de compacité	1,5
Altitude moyenne (m)	745
Altitude maximale (m)	1694
Longueur du rectangle équivalent (km)	87
Largeur du rectangle équivalent (km)	14,6
Pente moyenne	1,5 %

Tableau 1 : *Caractéristiques morphologiques du bassin versant de Ksob*

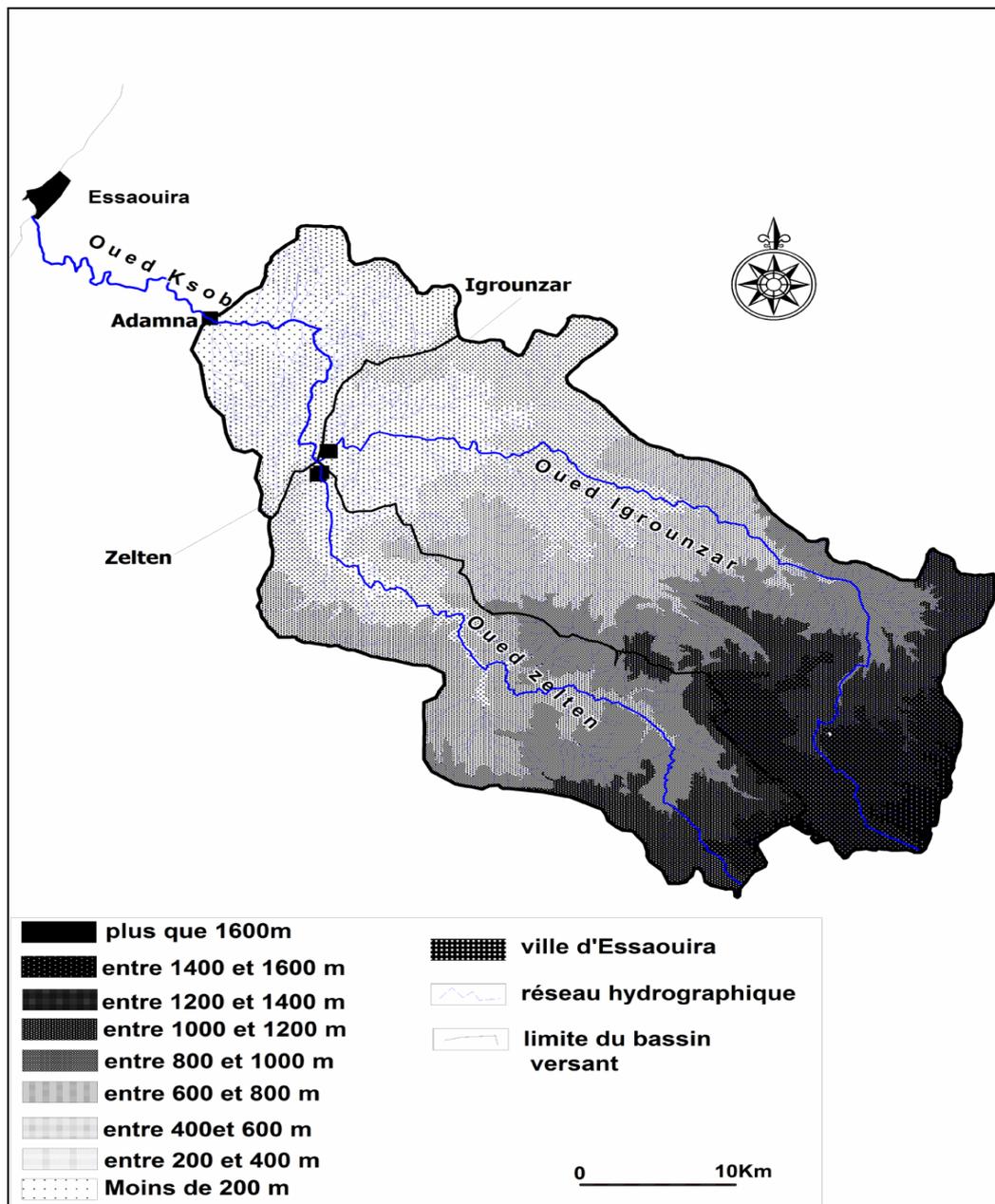


Fig. 6 : Carte hypsométrique du bassin versant de Ksob (d'après Elmimouni et al., 2009)

L'indice de compacité de Gravelius ($KC = 0,28 P/\sqrt{S}$; où P est le périmètre et S la surface) permet d'avoir une idée sur la forme géométrique du bassin (Saidi, 1995) ; il est de l'ordre de 1,5 pour le bassin versant de Ksob (1,39 pour le sous bassin d'Adamna, 1,33 pour celui d'Igrounzar et 1,73 pour celui de Zelten). Cette compacité relativement médiocre confère au bassin une forme allongée.

La répartition altimétrique dans le bassin de Ksob montre la prédominance des terrains comprise entre 600 et 1600 m représentant environ 60% de la surface totale. L'altitude moyenne s'élève à 745 m.

Le calcul des pentes moyennes du bassin de Ksob a permis de constater que celles des cours principaux ne sont pas particulièrement élevées (1,7% à Adamna, 1,8% à Igrounzar et 3,6% à Zelten) (Tabl. 2). Cependant, la vitesse et la violence des écoulements sont surtout régies par les pentes plus importantes des affluents et des versants. La quasi-totalité des affluents se jettent dans les cours principaux avec des pentes assez importantes, mais les vallons les plus pentus se situent en amont du bassin avec des pentes qui peuvent atteindre par endroit 10 %. Les pentes les plus importants dans le bassin versant sont identifiées sur le versant sud du sous bassin du Zelten (fig. 7).

	ZELTEN	IGROUNZAR
Superficie du bassin versant	446 km ²	900 km ²
Périmètre du bassin versant	123 km	160 km
Longueur du talweg principal	55 km	77 km
Altitude moyenne	796 m	750 m
Indice de compacité	1.67	1.53
Point culminant	1620 m	1690 m
Temps de concentration	8.5heures	12.38 heures
Pente moyenne	0,026	0,018
Indice de pente global		1.6 %
Longueur du rectangle équivalent		66.2 km

Tableau 2 : Caractéristiques morphologiques des deux sous bassins de ZELTEN et IGROUNZAR

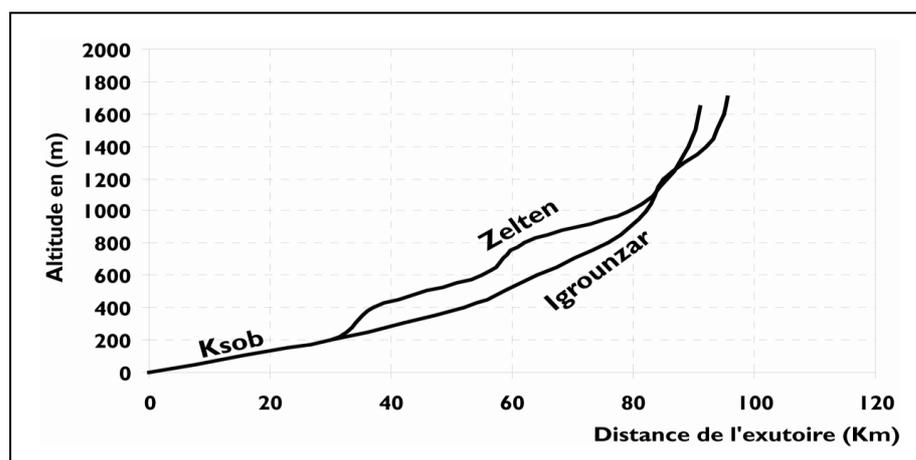


Fig. 7 : Profils longitudinaux de l'Oued Ksob et de ses deux principaux affluents (D'après Elmimouni et al. 2009)

4) Caractéristiques géologiques

Sur le plan géologique, les affleurements du bassin versant de Ksob sont constitués de faciès très diversifiés d'âges compris entre le Trias et le Quaternaire (Michard, 1976 ; Içame, 1994). Cependant, la majeure partie des faciès rencontrés dans le bassin est constituée de séries carbonatées d'âge Jurassique et Crétacé (fig. 8). Les roches tendres à moyennement tendres représentent plus de 60 % de l'étendue du bassin (El Mimouni et al., 2005).

Le haut bassin d'Igrounzar est occupé principalement par des marnes et des marno-calcaires respectivement cénomaniens et sénoniens sur lesquels le ruissellement est intense. Vers le centre du bassin, l'oued coule sur des calcaires turoniens assez fissurés pour permettre l'infiltration d'une quantité d'eau non négligeable (Içame, 1994).

Le sous-bassin versant de Zelten draine des séries du Jurassique supérieur à structures plus compliquées. Ces formations sont en majeure partie constituées par des argiles et des marnes. Le ruissellement y est par conséquent plus intense.

Vers l'aval de la confluence, les formations dunaires consolidées et mobiles du Quaternaire occupent la totalité du sous bassin versant d'Adamna (fig. 9), où les eaux s'infiltrent rapidement dans les alluvions du lit de l'oued.

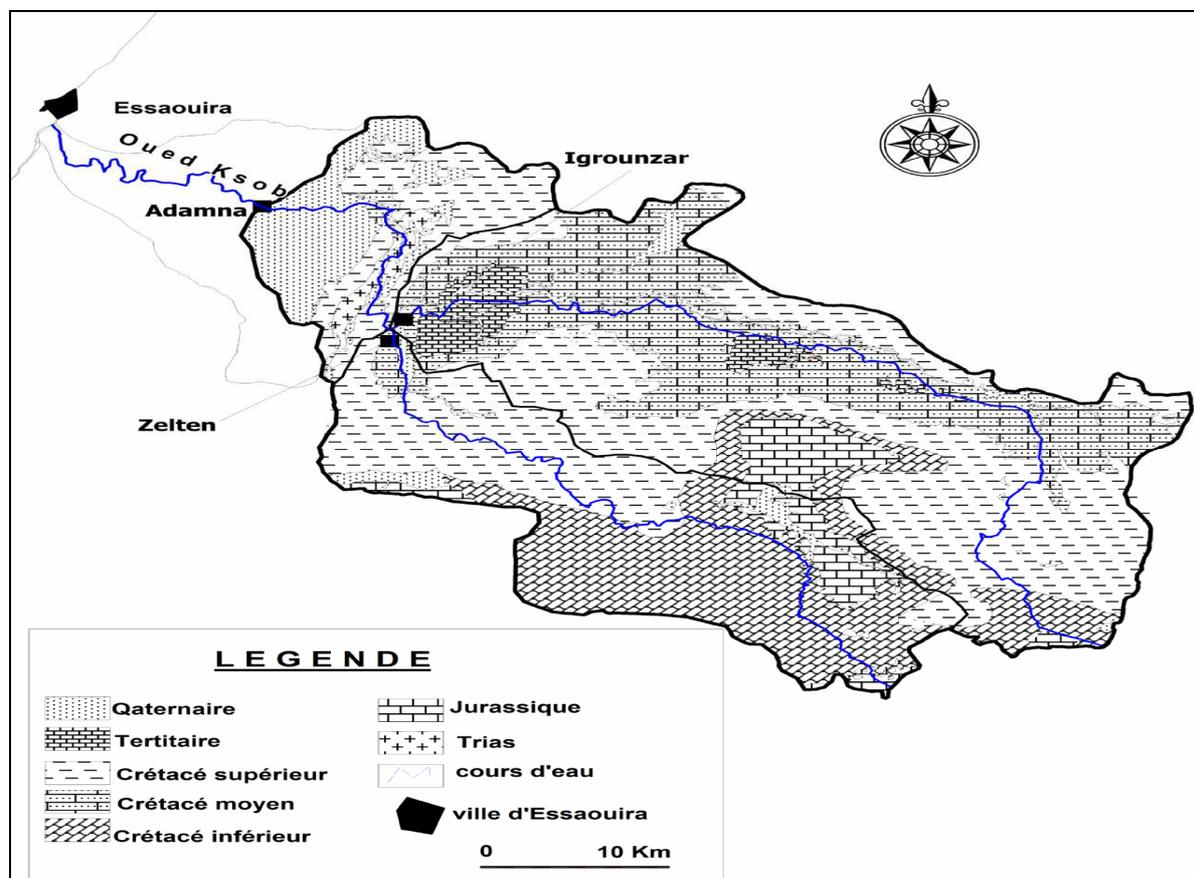


Fig. 8 : Carte géologique du bassin versant de l'Oued Ksob (d'après Elmimouni et al., 2009)



Fig. 9 : Configuration actuelle de l'embouchure de l'Oued Ksob et de la baie d'Essaouira, montrant la trajectoire du lit mineur à différentes époques

5) Facteurs climatiques

Du point de vue climatique, le bassin versant du Ksob est situé, selon plusieurs indices d'aridité, dans une zone aride à semi-aride caractérisée par l'interférence des influences océaniques (perturbations de l'Ouest), continentale et montagnarde (Hander, 1993). Les données climatiques disponibles montrent une aridité croissante de l'Ouest vers l'Est, liée à l'éloignement des influences océaniques, où la pluie diminue et les températures augmentent.

La température moyenne annuelle est de l'ordre de 19,1 °C à Essaouira. Les températures maximale et minimale enregistrées sont respectivement 46,2 et -11 °C. Globalement, la différence de température entre le mois le plus chaud (Juillet) et le mois le plus froid (Janvier) ne dépasse guère 6°C.

L'évaporation mesurée dans les trois stations est de **2390,6 mm/an** sur bac COLORADO et **2177,6 ml/ an** au PICHE. La vitesse moyenne annuelle du vent est de **2.2 m/s**. L'humidité moyenne mensuelle est de **80%** à 7 heures, **46%** à 14 heures, **55%** à 18 heures et **67%** à 21 heures.

La région est caractérisée par une variabilité spatio-temporelle des précipitations qui sont marquées par des irrégularités interannuelles et intra-annuelles importantes et une irrégularité relative des écoulements superficiels (Hander, 1993).

Chapitre 2 : Analyse hydrologique

1) Traitement des données pluviométriques

1-1) Présentation des données disponibles

Les données correspondent à des mesures qui ont été effectuées au niveau des stations pluviométriques de ADAMNA et IGROUNZAR depuis 1977 jusqu'à 2003. Elles sont sous forme des moyennes mensuelles, par contres les débits sont journaliers. Pour la station ZELTEN, il y a un manque de données pluviométriques.

2-1) analyse des données pluviométriques

L'analyse des données, faites à différentes pas de temps, permet une meilleure compréhension du régime hydro-pluviométrique et les facteurs hydrologique du bassin versant de l'Oued Ksob.

a-Précipitation moyennes mensuelles interannuelles (fig. 10 et 11)

Pour les deux stations Adamna et Igrounzar, la moyenne des précipitations mensuelles est de l'ordre de 55 mm pour les mois les plus humides (Novembre, Décembre et Janvier). La période sèche peut durer 7 mois (d'Avril à Septembre) avec un minimum de précipitations établi aux mois de Juillet et Août qui peuvent connaître une sécheresse totale (fig. 10 et 11).

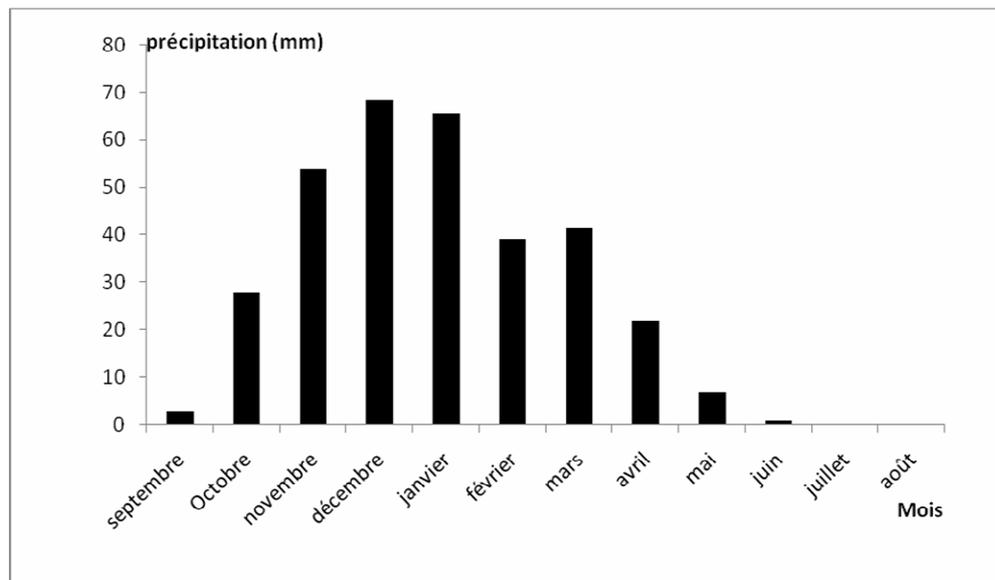


Fig. 10 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles à la station ADAMNA (Période de 1977 à 2003)

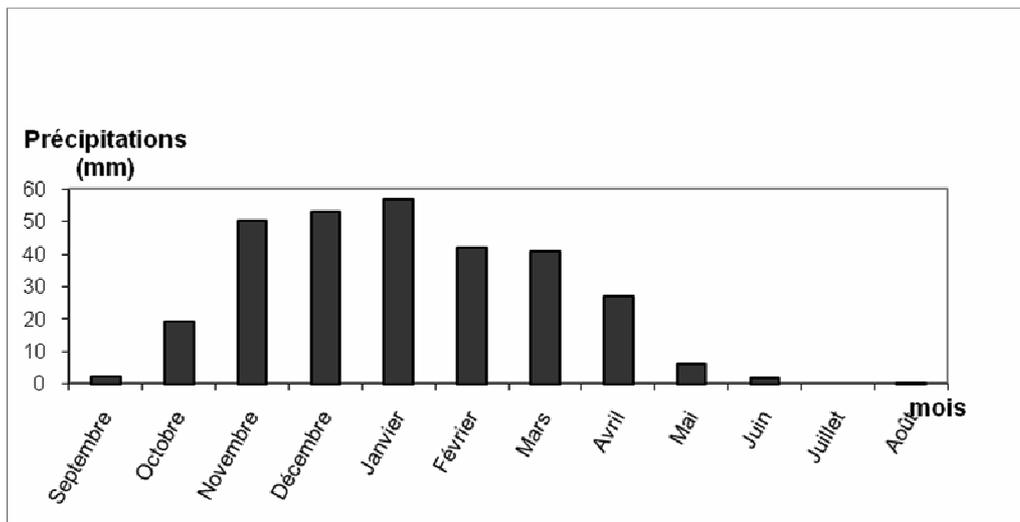


Fig. 11 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles à la station IGROUNZAR (Période de 1977 à 2002)

b-Précipitations moyennes annuelles (fig. 12 et 13)

Dans les deux stations : La pluviométrie annuelle est en moyenne de l'ordre de 330 mm, avec un coefficient de variation de 34 %.

La série de données disponibles de 1977 à 2004 à l'ABHT, montre que cette période est caractérisée par l'alternance d'années pluvieuses et d'années sèches.

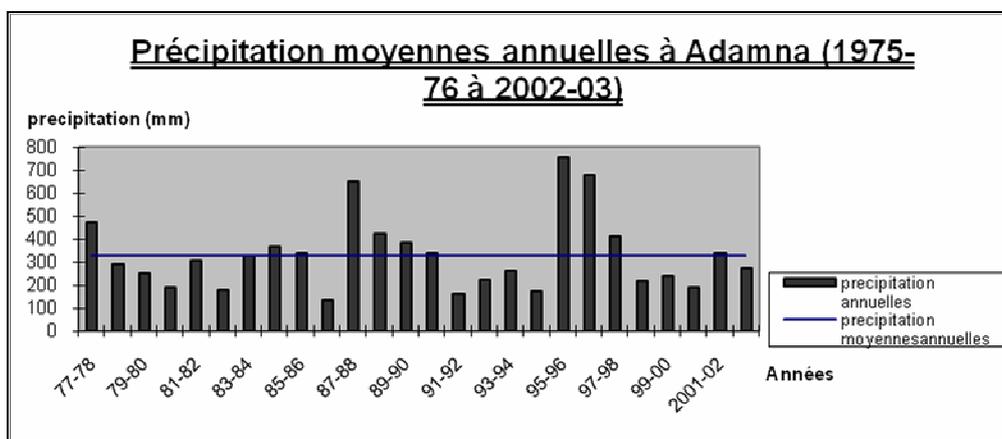


Fig. 12 : précipitation moyennes annuelles à la station ADAMNA (période de 1977 à 2002)

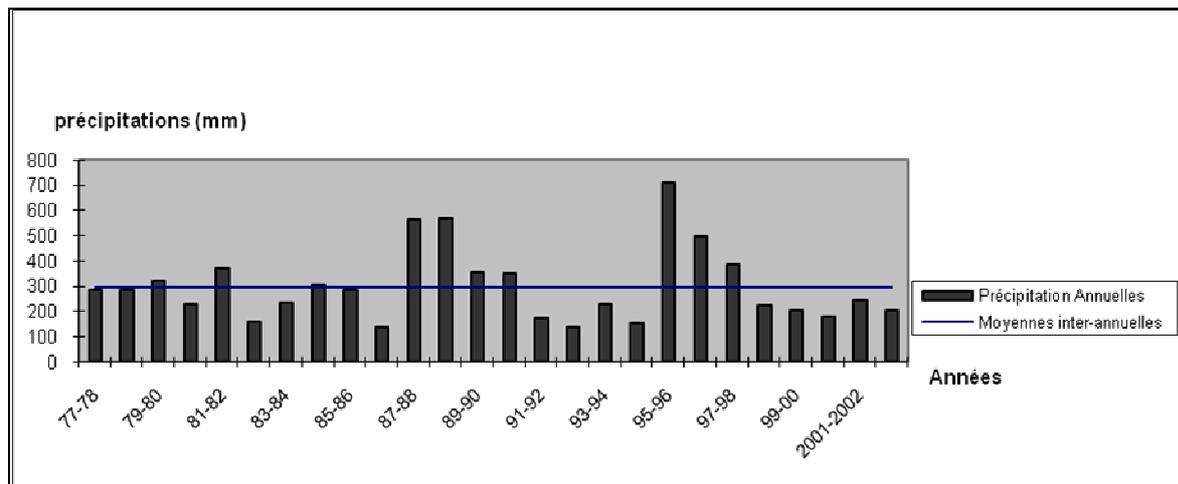


Fig. 13 : précipitations moyennes annuelles à la station IGROUNZAR (période de 1977 à 2002)

2) Débits de crues

2-1) Durée des crues

Le temps de base varie de 9h pour la crue du 16/4/1995 à 104 h pour la crue du 22/1/1996. Ceci témoigne de la brutalité de l'événement et de sa brièveté.

2-2) Temps de montée

Les temps de montées sont presque toujours courts. Il suffit parfois de quelques heures (0,5 h pour la crue de 26/11/1989) pour atteindre la pointe de crue.

2-3) Hydrogrammes de crues

Les hydrogrammes de crues sont parfois saillants avec une pointe fine et un débit maximum important. Ce sont des crues soudaines et brèves.

Ce type d'hydrogramme est un cas de figure relativement fréquent en milieu monticole semi-aride. Le rapport entre le débit de pointe et le débit initial est très important ; la crue peut même revenir dans un lit d'oued sec. Il suffit d'un orage très intense pour déclencher une onde de crue qui peut avoir un caractère de surprise en aval du bassin où il ne pleuvait pas.

D'autres hydrogrammes de crue ont une forme plus gonflée et bombée sans pointe bien définie, avec un temps de base étalé sur deux ou trois jours. La pluie responsable et généralement une pluie homogène et régulière qui dure plusieurs heures, ou une pluie composée de séquences d'averses espacées par des laps de temps de quelques heures. Les débits sont de plus en plus soutenus par les pluies et augmentent régulièrement, puis s'atténuent régulièrement sur une courbe de décrue de faible pente.

Le bassin versant de Ksob est caractérisé par un hydrogramme unitaire en cloche et dissymétrique ou à double pics avec un temps de montée plus court que la durée de décrue.

2-4) Les crues dans l'année hydrologique

On remarque que les crues de Ksob à l'aval (Adamna) se concentrent exclusivement dans une période qui va du mois d'Octobre au mois de Mai, avec une abondance marquée pour les mois de Novembre et Décembre, de ce fait ils sont comptés parmi les mois les plus pluvieux à Ksob (Tableau 3).

Un inventaire similaire des crues observées à l'exutoire amont (Zelten et Igrounzar) a permis d'avoir les répartitions mensuelles suivantes (Tableaux 4 et 5).

MOIS	Nombre de crues	Pourcentage
Octobre	4	11,42
Novembre	8	22,85
Décembre	7	20,00
Janvier	5	14,28
Février	5	14,28
Mars	4	11,42
Avril	1	2,85
Mai	1	2,85

Tableau 3 : Répartition mensuelle des crues à l'exutoire aval (station Adamna)

MOIS	Nombre de crues	Pourcentage
Octobre	3	10,34
Novembre	8	27,58
Décembre	5	17,24
Janvier	3	10,34
Février	5	17,24
Mars	3	10,34
Mai	2	6,89

Tableau 4 : Répartition mensuelle des crues à la station amont de Zelten

MOIS	Nombre de crues	Pourcentage
Octobre	3	8,10
Novembre	8	21,62
Décembre	7	18,91
Janvier	4	10,80
Février	7	18,91
Mars	3	8,10
Avril	2	5,40
Mai	1	2,70
Aout	1	2,70
Septembre	1	2,70

Tableau 5 : Répartition mensuelle des crues à la station amont d'Igrounzar

Les mois les plus riches en épisodes de crues dans les stations Zelten et Igrounzar sont Novembre, Décembre et Février.

2-5) Classification génétique des crues

Les crues sont classées selon leurs origines, cela contribuerait donc à discerner le rôle respectif des différents secteurs du bassin dans le déclenchement des crues sur le collecteur principal, et voir comment la combinaison des flots des divers affluents détermine-t-elle des situations plus ou moins dangereuses à Adamna.

On dispose d'une série de crues qui couvre une longue période, on a relevé 29 crues dans les stations amont et aval pour lesquelles on va essayer de chercher l'origine géographique du flux perturbant responsable. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant (Tableau 6).

Années	Dates	ADAMNA	IGROUNZAR	ZELTEN	Type de crue
1976-77	19/12	162,0	4,5	15,6	crue ADAMNA
1977-78	17/10	255,3	65,4	275,0	crue généralisée
1978-79	28/01	217,0	56,6		crue ADAMNA
1978-79	27-janv.			184,0	crue de ZELTEN
1979-80	18/10	144,4	28,3		crue ADAMNA
1979-80	23-févr.			65,7	crue de ZELTEN
1980-81	08/11	613,0	172,0	413,0	crue généralisée
1981-82	14/01	197,0			crue ADAMNA
1981-82	08-mai			313,0	crue de ZELTEN
1982-83	08/11	83,0	4,1	52,3	crue généralisée
1983-84	16/11	429,0	24,1	146,0	crue généralisée
1984-85	07-nov.	1330,0	673,0	660,0	crue généralisée
1985-86	01/03	141,0	14,4	48,6	crue généralisée
1986-87	11/02	84,1		59,8	crue généralisée
1987-88	04/12	583,0		364,0	crue généralisée
1988-89	10/11	1050,0	232,0	265,0	crue généralisée
1990-91	07/03 à 11h	568,0		210,0	crue généralisée
1990-91	07-mars		210,0		crue IGROUNZAR
1993-94	04/11	176,6			crue ADAMNA
1994-95	16-av.			207,0	crue de ZELTEN
1994-95	16/04	222,0		327,0	crue généralisée
1994-95	16-mars		167,0		crue IGROUNZAR
1995-96	22/01	1600,0	263,0	670,0	crue généralisée
1996-97	21/12	930,0	175,0	458,0	crue généralisée
1997-98	03/02	606,0	65,6		crue ADAMNA
1997/98	02-févr.			331,0	crue ZELTEN
1999-2000	14/10	150,0	23,7		crue ADAMNA
2000-2001	22/12	304,0		140,0	crue généralisée
2001-2002	24/12	1240,0	255,0	600,0	crue généralisée

Tableau 6 : Classification génétique des crues du bassin versant du Ksob

D'après ce tableau on distingue quatre classes de crue :

- Crue ADAMNA
- Crue IGROUNZAR
- Crue ZELTEN
- Crue généralisée

2-6) Vitesse de propagation des crues dans le bassin versant de Ksob

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, une amplitude, une longueur et un taux d'amortissement. La vitesse de propagation de l'onde est très variable. Elle varie d'un endroit à l'autre en fonction de la pente, de la forme du lit et de ses sinuosités, de la nature lithologique des berges et leurs rugosités et des ouvrages humains.

Pour obtenir la vitesse de propagation des crues de l'oued Ksob, la méthode consiste à diviser la distance séparant les deux stations amont et aval par la durée séparant le moment de pointe de la crue dans les deux stations.

3) Evolution des crues de l'amont vers l'aval

Le développement des crues de l'amont vers l'aval est fonction à la fois de la nature des précipitations génératrices de ces crues et de l'organisation du réseau hydrographique. On peut distinguer deux grands types de comportement des crues vers l'aval :

- Les crues qui grossissent de l'amont vers l'aval.
- Les crues qui s'amointrissent de l'amont vers l'aval.

3-1) Les crues grossissant vers l'aval

Ce sont des crues généralisées qui ont pris naissance dans une région quelconque du bassin à la suite de l'importance et de l'homogénéité spatiale des précipitations. Dans ce cas, la quasi-totalité des affluents contribuent à accroître les débits observés sur le cours principal. On prend trois exemples typiques de ce phénomène prélevés de la série des crues. Ils sont illustrés dans les figures 14, 15 et 16. Par exemple dans la crue de 22/01/1996, on a un débit de 933 m³/s à 17h devenu 1602 m³/s une heure plus tard à l'aval.

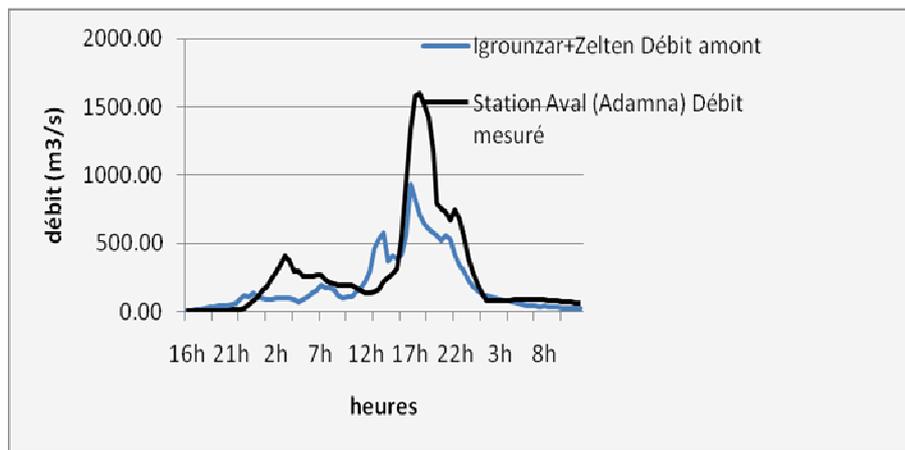


Fig. 14 : Hydrogrammes de la crue du 22/01/1996

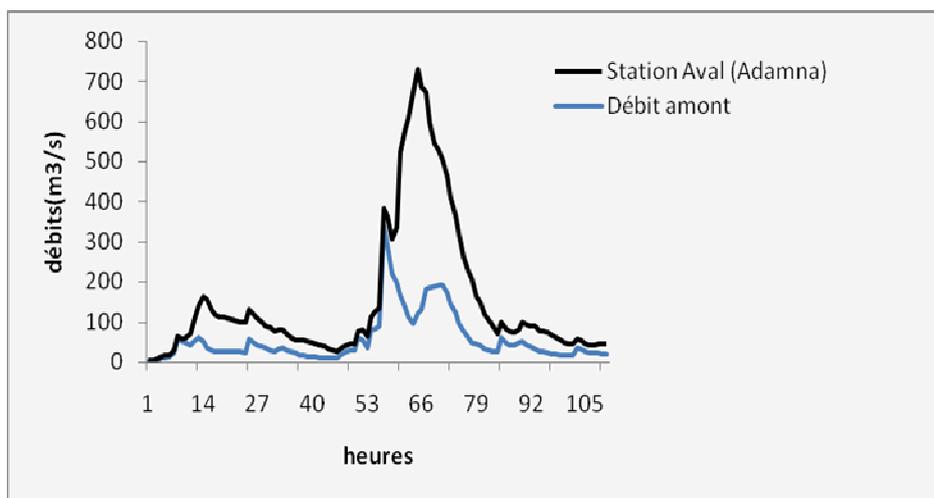


Fig.15 : Hydrogrammes de la crue du 3/02/1998

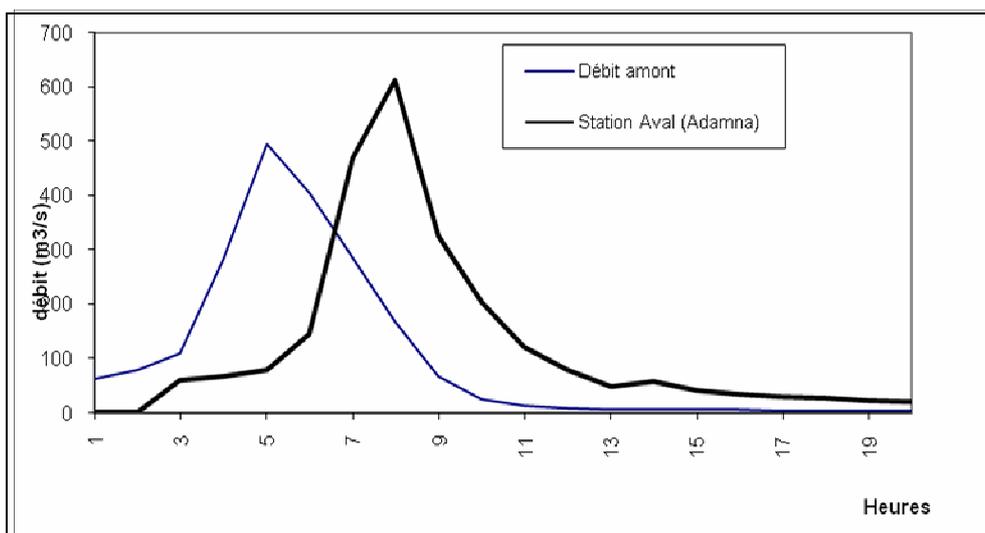


Fig. 16 : Hydrogrammes de la crue du 08/11/1980

3-2) Les crues amorties vers l'aval

Elles se développent à l'amont du bassin. Ces crues arrivant sur la plaine, perdent de grandes quantités d'eau qui s'infiltrent dans les alluvions du bassin ou s'évaporent. Ce type de crues est illustré par les exemples des figures 17 et 18. Par exemple, la crue de 17/10/1977 présente un débit amont de 340,4 m³/s à 18 h et qui s'affaibli deux heures plus tard à 255,3 m³/s en aval.

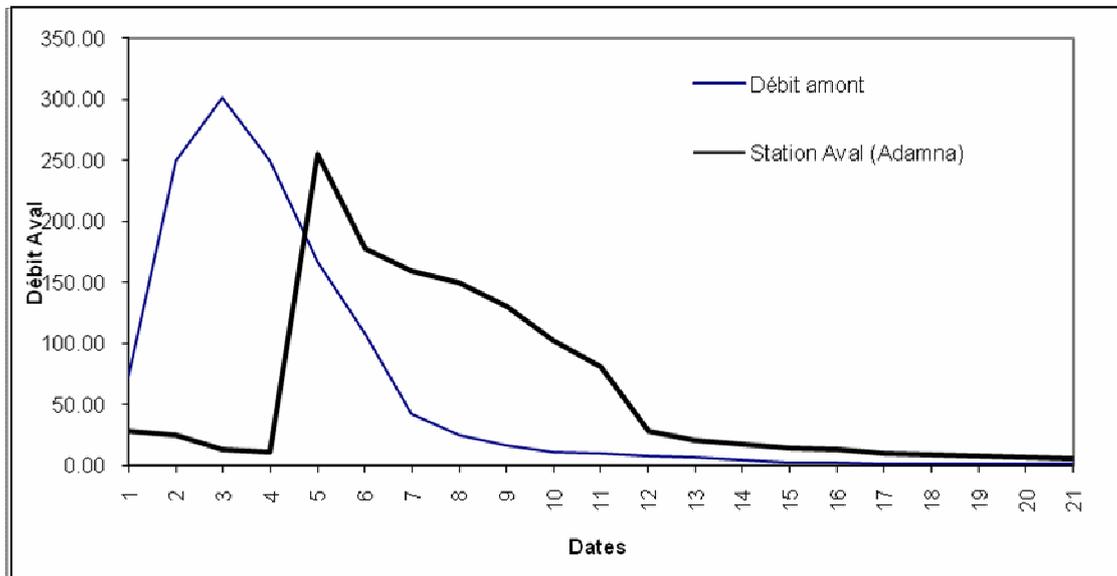


Fig. 17 : Hydrogrammes de la crue du 17/10/1977

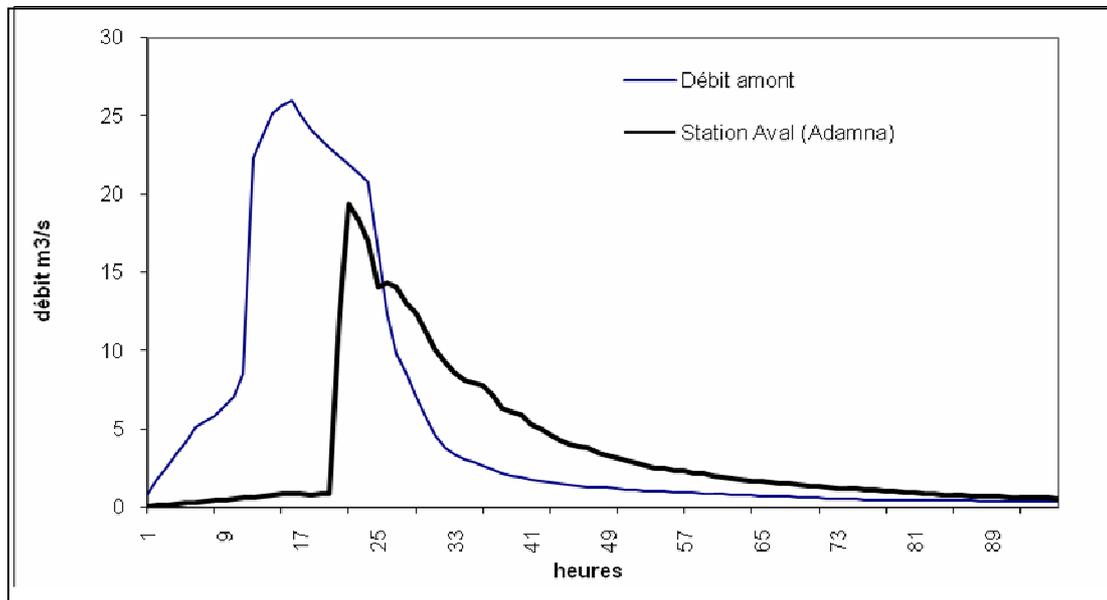


Fig. 18 : Hydrogrammes de la crue du 05/05/1993

Chapitre3 : La modélisation des crues par le modèle de Muskingum

1) Objectifs de la modélisation hydrologique

La modélisation consiste à mettre un processus en équation. La modélisation hydrologique revient à la traduction mathématique du cycle de l'eau : ses réservoirs et processus doivent être conceptualisés et simplifiés sous forme d'équation. Les objectifs de la modélisation sont multiples : prévisions (crues, sécheresses, gestion de l'irrigation d'ouvrages hydroélectriques, recharge d'aquifères) ou simulations de scénarii (changement climatique aménagement de bassins d'un point de vue qualité ou quantité d'eau).

2) Le modèle de Muskingum

C'est une méthode mathématique qui nous permet d'estimer le débit aval en cas de crue. Elle envisage l'hypothèse où le volume stocké ne dépend pas seulement du débit de la sortie (Q) mais de celui de l'entrée aussi (I).

2-1) Mise en équation

Sur un pas de temps Δt suffisamment court, l'équation de continuité a pour expression :

$$\left[\frac{I_1 + I_2}{2} \right] \Delta t - \left[\frac{Q_1 + Q_2}{2} \right] \Delta t = S_2 - S_1$$

Avec :

I_1 débit d'entrée à l'instant (t).

I_2 débit d'entrée à l'instant (t+ Δt).

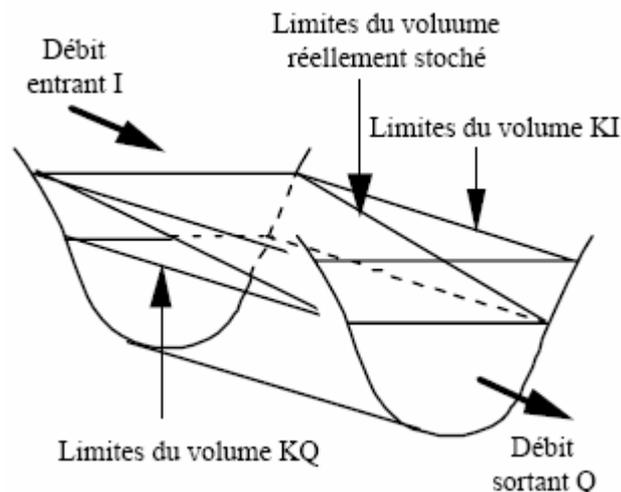
Q_1 débit de sortie à l'instant (t).

Q_2 débit de sortie à l'instant (t+ Δt).

S_1 volume d'eau stocké à l'instant (t).

S_2 volume d'eau stocké à l'instant (t+ Δt).

Δt temps de propagation de la crue entre l'amont et l'aval



Dans un premier temps, nous admettrons que K est une constante. Comme le suggère la figure ci-dessus, le volume stocké, si le débit était partout Q (régime uniforme), serait :

$$S = K Q$$

Si le débit était partout I (régime uniforme), le volume stocké serait :

$$S = K I$$

En régime transitoire, I est différent de Q et nous admettrons que le volume stocké dans le tronçon devient :

$$S = K Q + x (K I - K Q)$$

Cette équation, appelée généralement équation de Muskingum, se met sous la forme suivante :

$$S = K [x I + (1 - x) Q]$$

Où x est un terme sans dimension lié à l'amortissement de la crue dans le tronçon (coefficient d'atténuation) et K un temps lié au temps de propagation de la crue dans le tronçon.

L'équation de continuité devient alors :

$$S_2 - S_1 = K [x (I_2 - I_1) + (1 - x) (Q_2 - Q_1)] = \frac{\Delta t}{2} [(I_1 + I_2) - (Q_1 + Q_2)]$$

D'où :

$$K = \frac{\frac{\Delta t}{2} [(I_1 + I_2) - (Q_1 + Q_2)]}{x (I_2 - I_1) + (1 - x) (Q_2 - Q_1)} \quad (1)$$

Explicitant Q_2 à partir de Q_1, I_1, I_2, x et K :

$$\begin{aligned} Q_2 \left[K(1-x) + \frac{\Delta t}{2} \right] &= (I_1 + I_2) \frac{\Delta t}{2} - Q_1 \frac{\Delta t}{2} - K x (I_2 - I_1) + K (1-x) Q_1 \\ &= (I_2 - I_1) \left[\frac{\Delta t}{2} - Kx \right] + I_1 \Delta t + Q_1 \left[K(1-x) + \frac{\Delta t}{2} \right] - Q_1 \Delta t \end{aligned}$$

$$S_2 = Q_1 + \frac{\frac{\Delta t}{2} - Kx}{K(1-x) + \frac{\Delta t}{2}} (I_2 - I_1) + \frac{\Delta t}{K(1-x) + \frac{\Delta t}{2}} (I_2 - I_1)$$

$$Q_2 = Q_1 + A (I_1 - Q_1) + B (I_2 - I_1) \left\{ \begin{array}{l} A = \frac{\Delta t}{K(1-x) + \frac{\Delta t}{2}} \\ B = \frac{\frac{\Delta t}{2} - Kx}{K(1-x) + \frac{\Delta t}{2}} \end{array} \right. \quad (2)$$

Sous cette forme, on constate que A et B sont des constantes ne dépendant que de Δt , x et K (d'après J.P Laborde, 1999).

2-2) Méthodologie

a) Choix des paramètres utilisés dans le calcul du modèle

Pour aboutir à de bons résultats, on a suivi les étapes ci-dessous :

- le choix de bonnes crues est impératif (débits d'entrée et de sortie doivent être comparable, crues avec un seul pic).
- Dans notre cas, il existe deux stations à l'amont (ZELTEN et IGROUNZAR), ainsi on a procédé à la sommation des valeurs des débits journaliers des deux stations pour avoir un seul débit amont.
- La détermination du temps de propagation des crues entre les débits des pointes des stations amont (Zelten et Igrounzar, somme des deux débits amont) et la station aval Adamna.

b) Calcul de K moyen

Pour déterminer le K moyen, on a procédé de la manière suivante :

- On a tout d'abord multiplié les débits aval par un coefficient correcteur λ ($Q_{\max} \text{ amont} / Q_{\max} \text{ aval}$) afin de rendre les débits amont et aval comparables.
- En utilisant la relation (1), on a calculé les K_i pour toute la série de données et pour différentes valeurs de x_i comprises entre 0.1 et 0.5 avec un pas de 0.05.
- Détermination de K moyen en effectuant la moyenne arithmétique des K_i pour chaque x_i
- Calcul de l'écart type pour les K_i de chaque x_i

Ainsi, l'écart type le plus faible renseigne sur K moyen et le facteur d'atténuation x les plus convenables.

3) Calage du modèle

Le calage du modèle a pour but de trouver le jeu de paramètre qui approche le plus possible le comportement du modèle de celui du bassin modélisé.

Le calage demande donc le choix à la fois d'une méthode pour identifier les paramètres, ainsi que des séries de données destinées à fournir l'information nécessaire au calage. Le degré de réalisme des paramètres ainsi identifiés peut être évalué par le niveau de performance du modèle au stade de la validation.

Après avoir essayé différents paramètres, on a constaté que les modèles le plus performants sont ceux des crues du 8/11/1982 et du 3/02/1998 où les débits estimés par le modèle sont presque les mêmes que ceux mesurés réellement (fig. 19 et 20) avec un coefficient de détermination de l'ordre de 0,971 à 0.997. Les paramètres obtenus pour les deux modèles sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Paramètres	Crue du 8/11/1982	Crue du 3 /02/1998
λ	0,38	0,55
$\Delta T(s)$	3600	14400
X	0,3	0,2
K	16915,398	88969,62

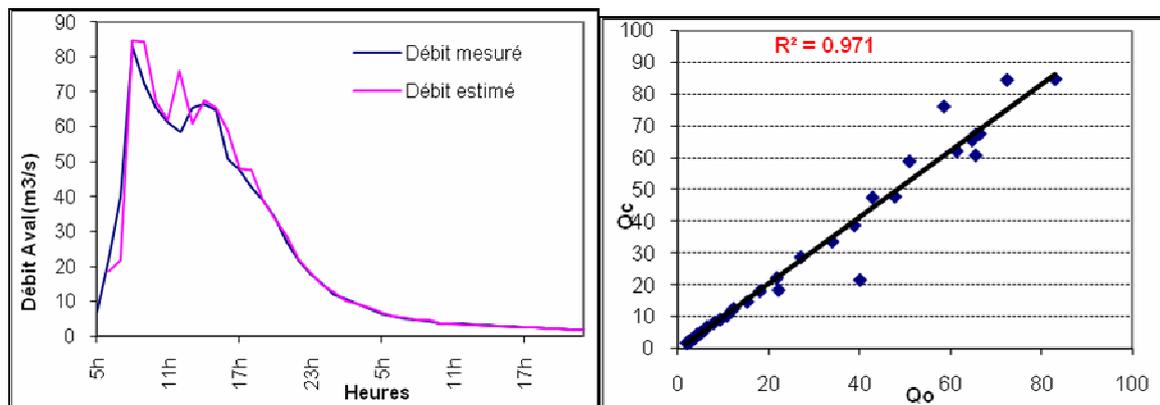


Fig. 19 : Relation entre le débit aval modélisé et le débit observé pour la crue du 8/11/1982

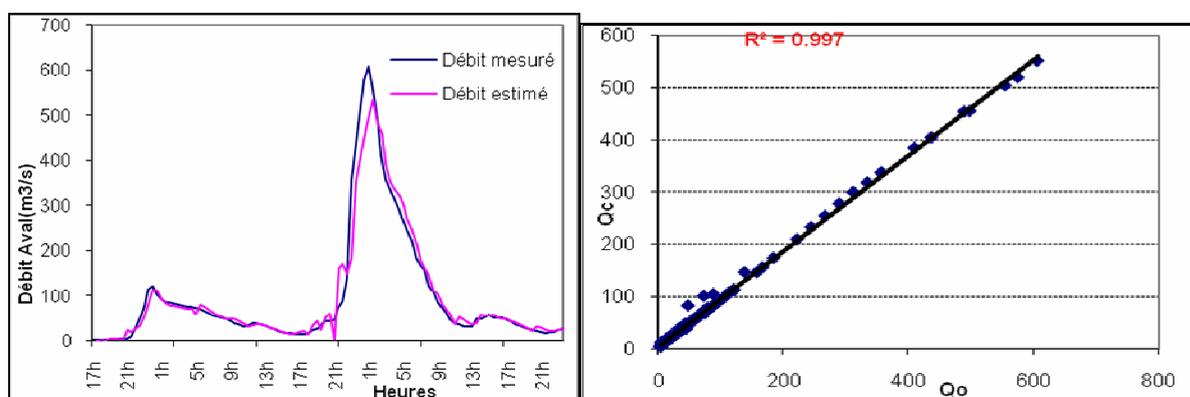


Fig. 20 : Relation entre le débit aval modélisé et le débit observé pour la crue du 3/02/1998

4) Validation des deux modèles

Dans cette partie, on va tester la fiabilité des deux modèles en utilisant leurs paramètres, lesquels seront appliqués aux autres crues pour le calcul des débits aval estimés.

4-1) Cas du modèle de la crue du 3/02/1998

Les hydrogrammes ci-dessous illustrent les résultats obtenus (fig. 21 à 33). On note une concordance relativement bonne avec des coefficients de détermination allant de 0,889 à 0,999.

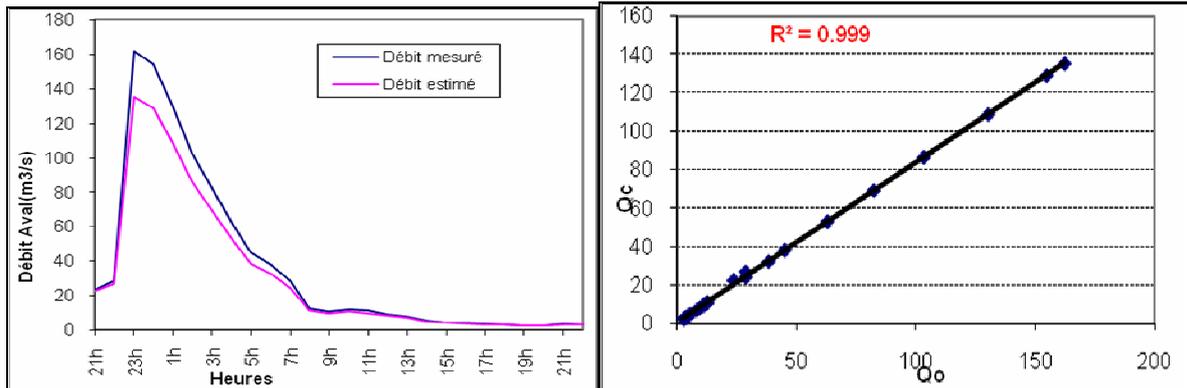


Fig. 21 : Relation débit aval mesuré –débit aval estimé de la crue du 19/12/1976

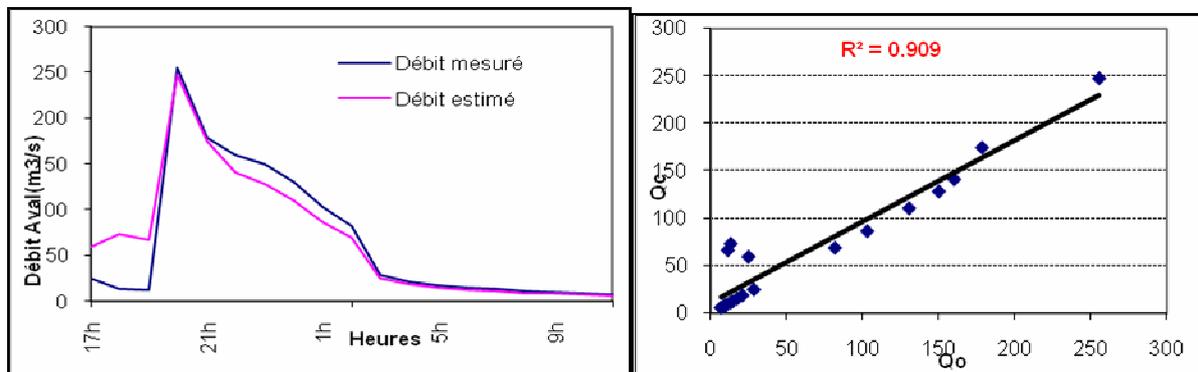


Fig. 22 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 17/10/1977

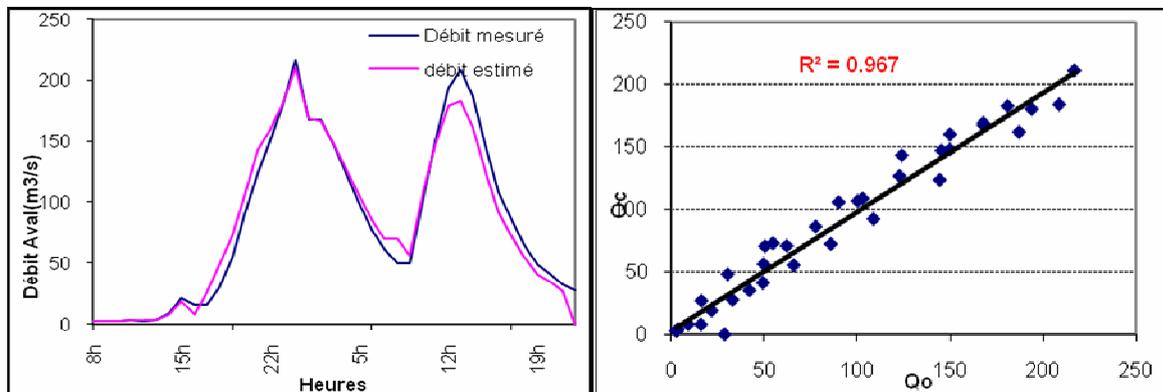


Fig. 23 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 28/01/1979

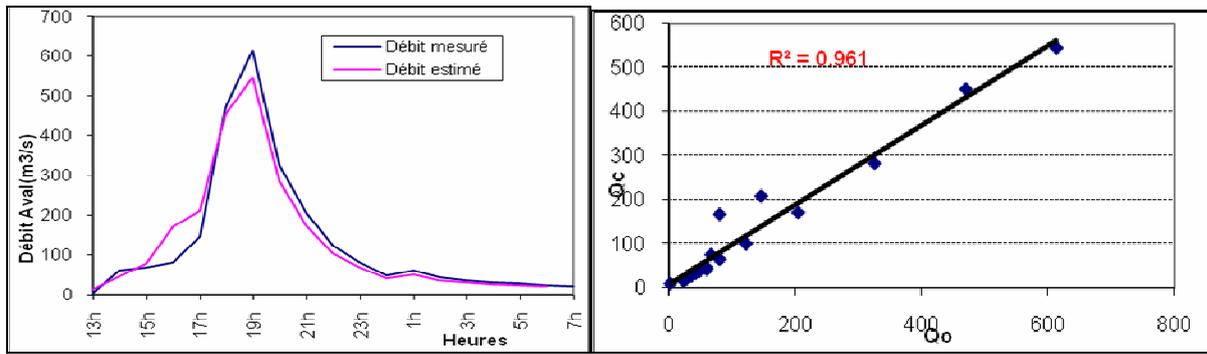


Fig. 24 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 8/11/1980

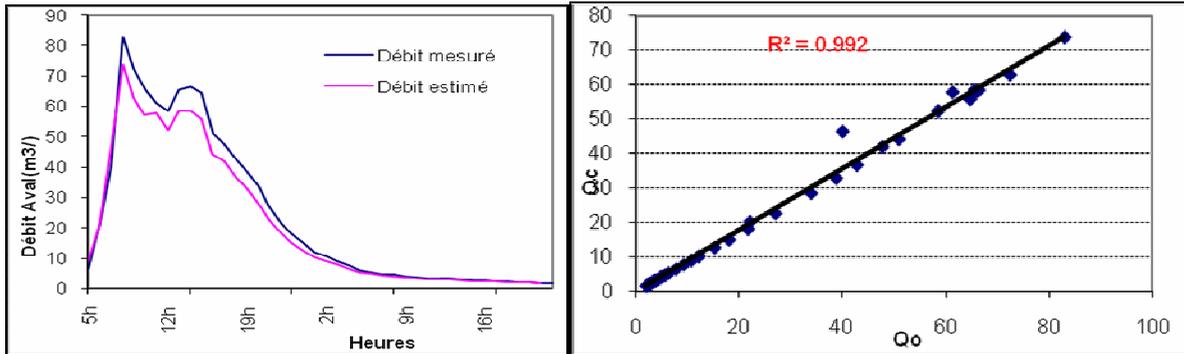


Fig. 25 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 8/11/1982

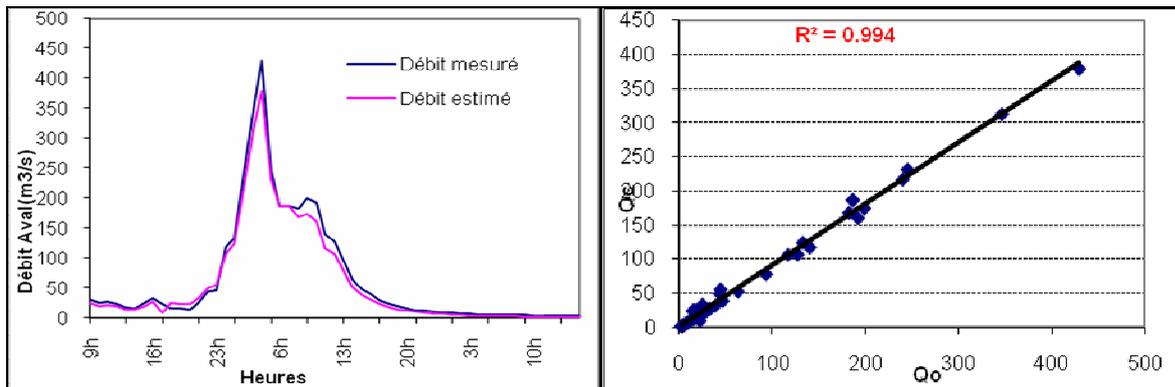


Fig. 26 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 15/11/1983

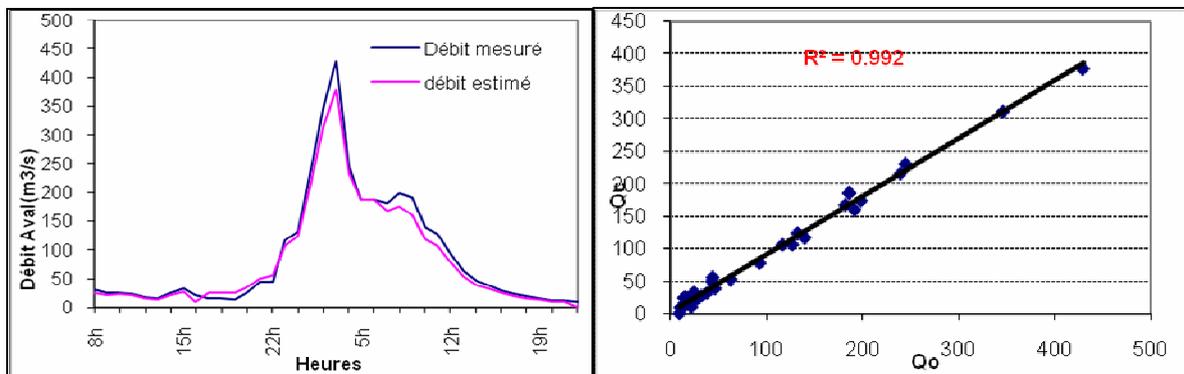


Fig. 27 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 16/11/1983

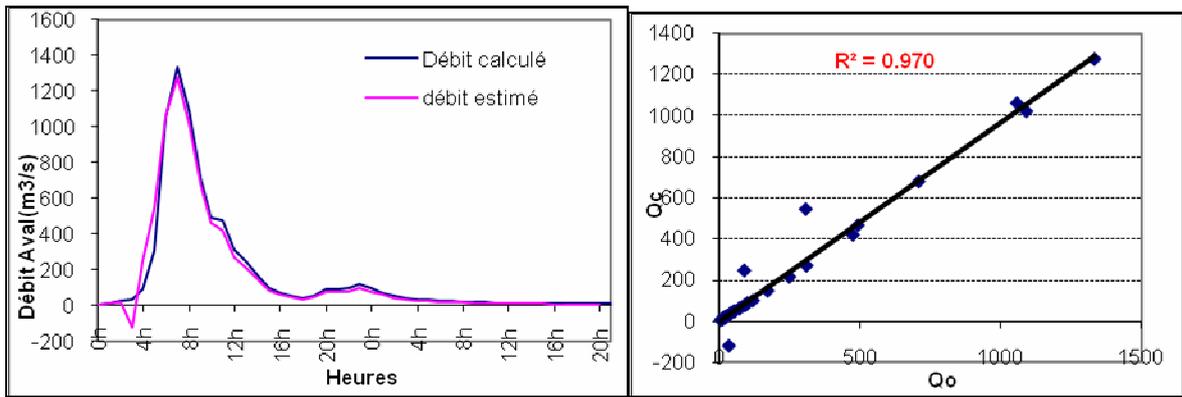


Fig. 28 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 7/01/1985

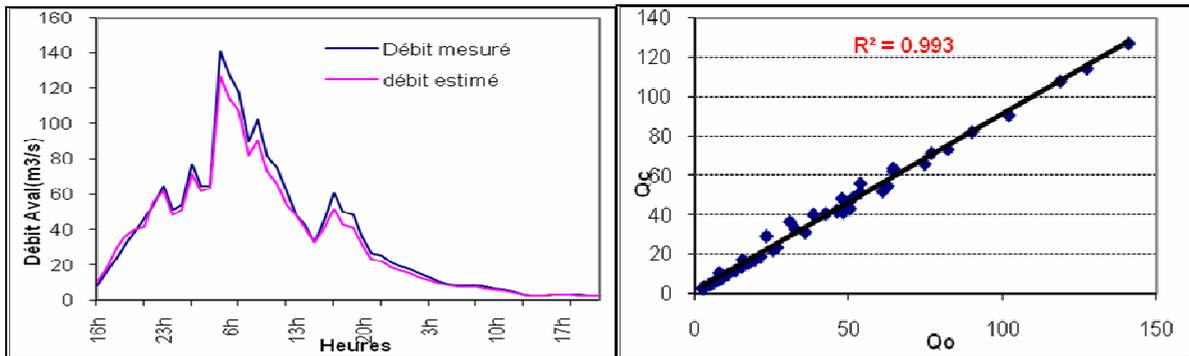


Fig. 29 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 1/03/1986

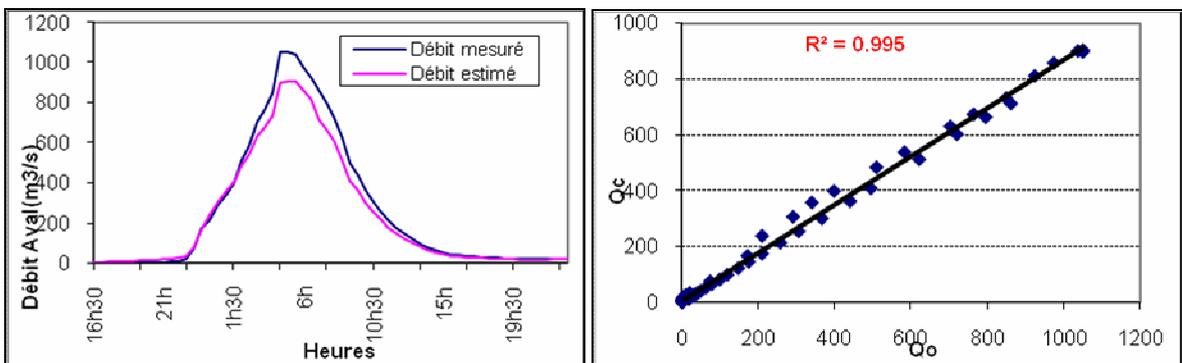


Fig. 30 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 10/11/1988

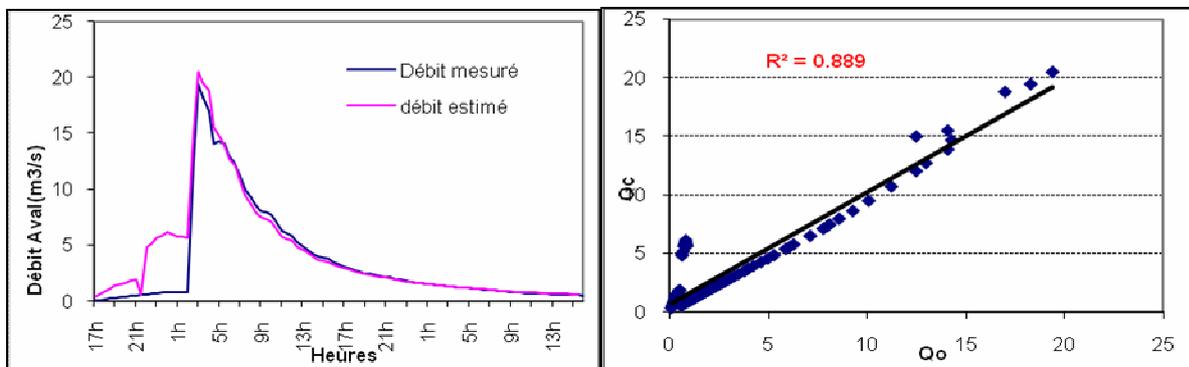


Fig. 31 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 5/05/1993

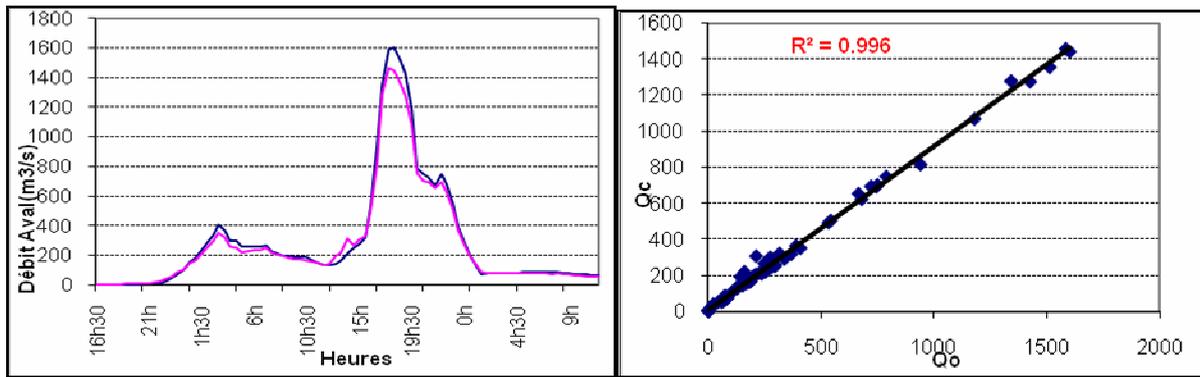


Fig. 32 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 22/01/1996

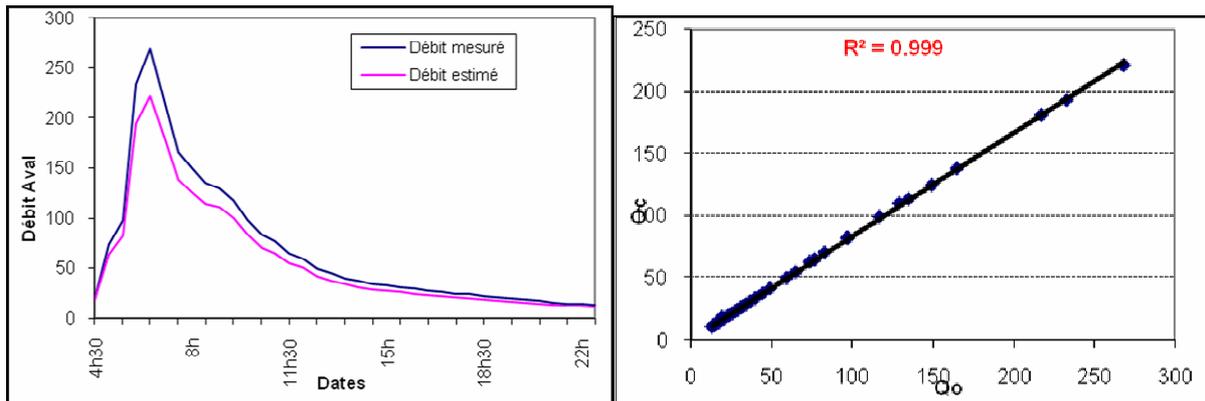


Fig. 33 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 26/11/2002

4-2) Cas du modèle de la crue du 8/11/1982

Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures 34 à 46. On note une très bonne concordance entre les débits mesurés et les débits calculés par le modèle, avec des coefficients de détermination allant de 0,957 à 0,999.

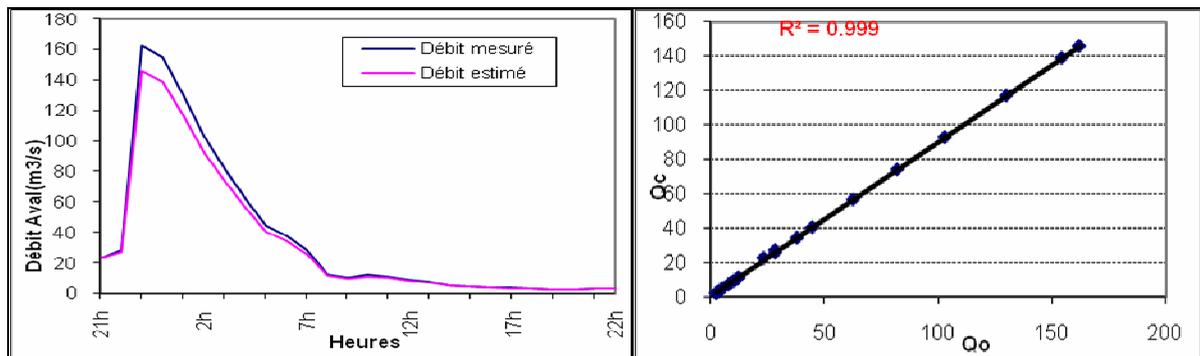


Fig. 34 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 19/12/1976

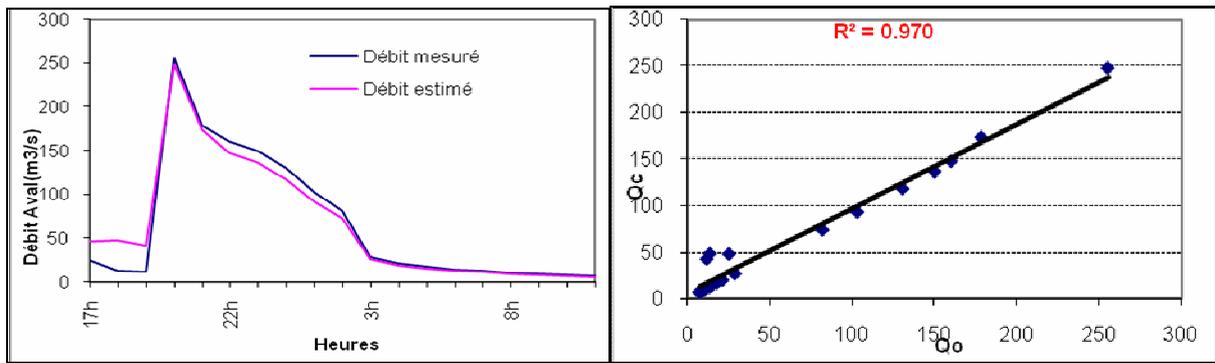


Fig. 35 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 17/10/1977

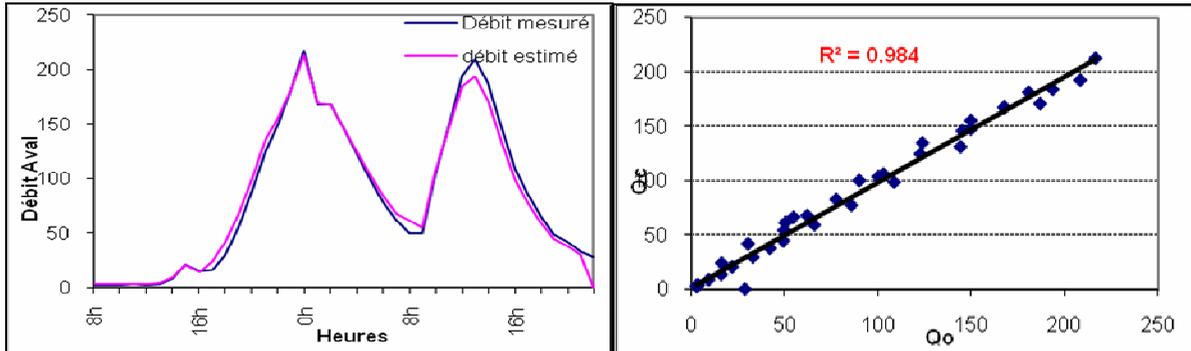


Fig. 36 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 28/01/1979

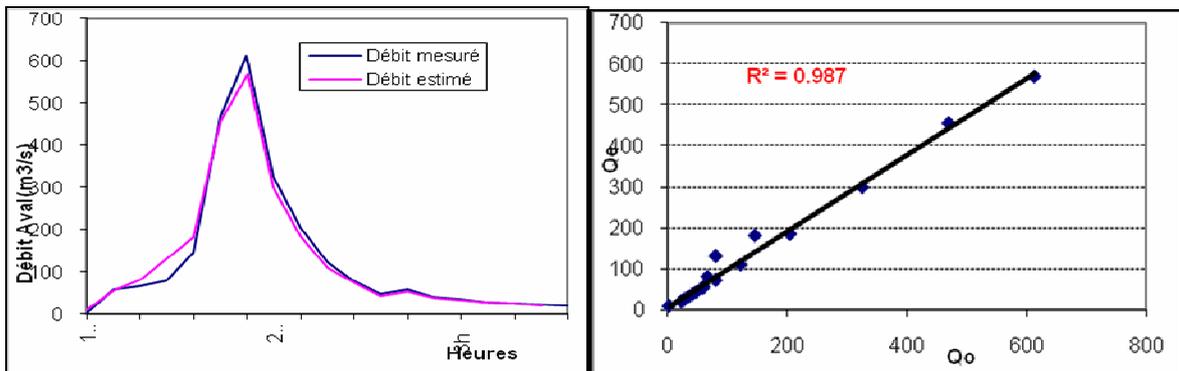


Fig. 37 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 8/11/1980

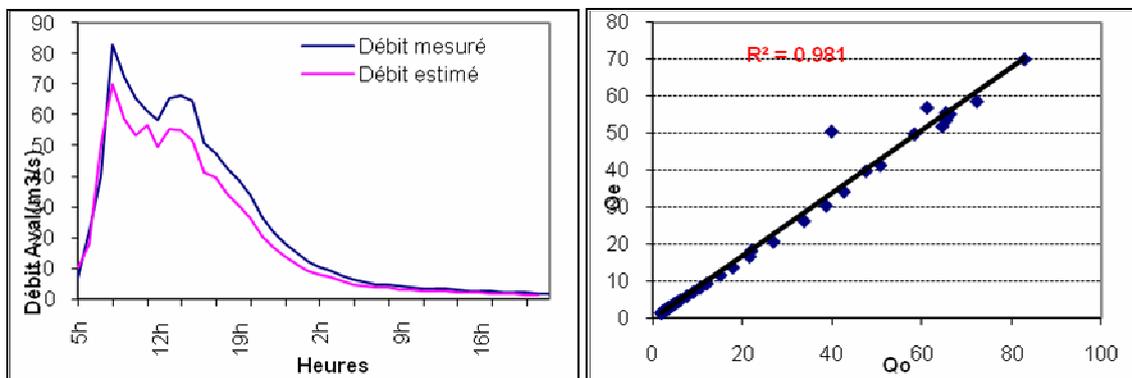


Fig. 38 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 8/11/1982

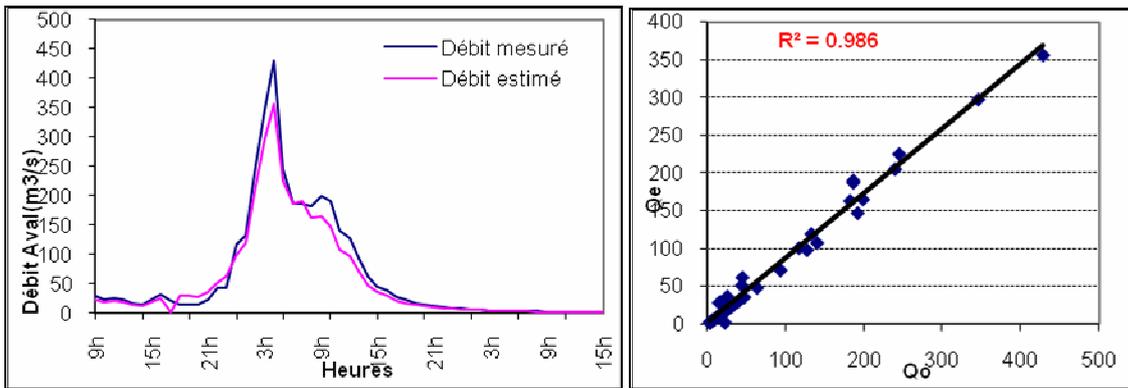


Fig. 39 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 15/11/1983

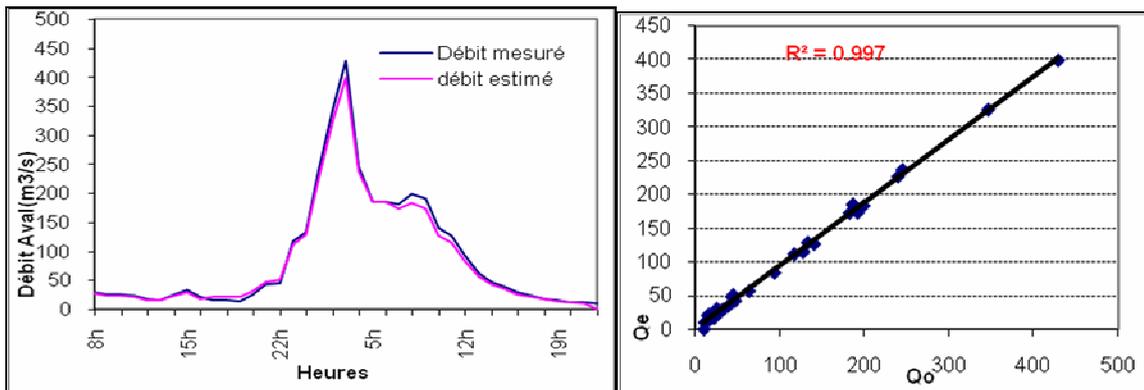


Fig. 40 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 16/11/1983

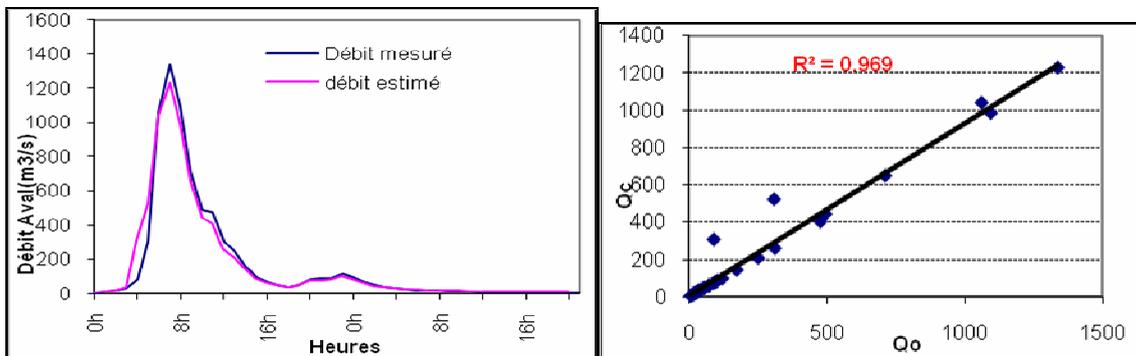


Fig. 41 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 7/01/1985

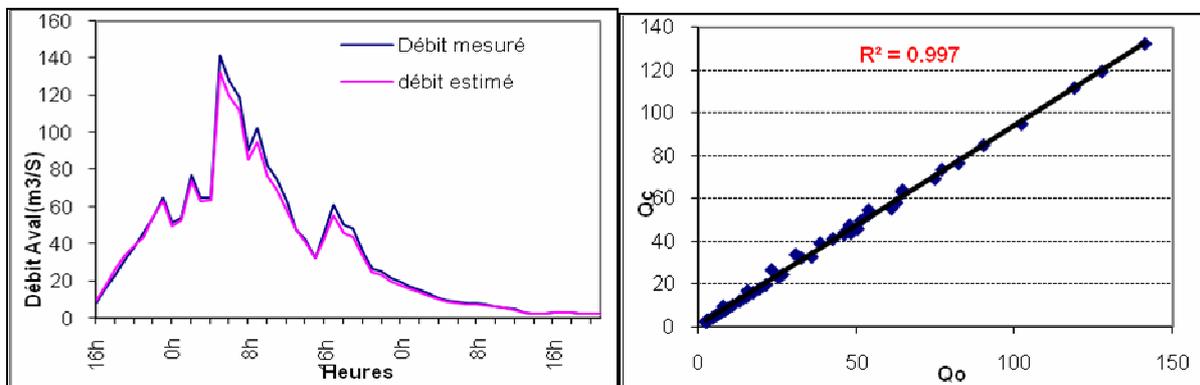


Fig. 42 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 1/03/1986

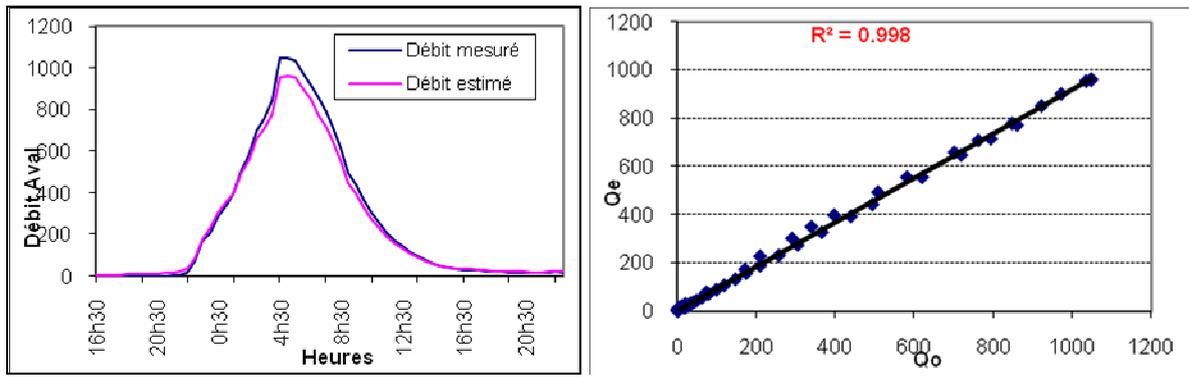


Fig. 43 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 10/11/1988

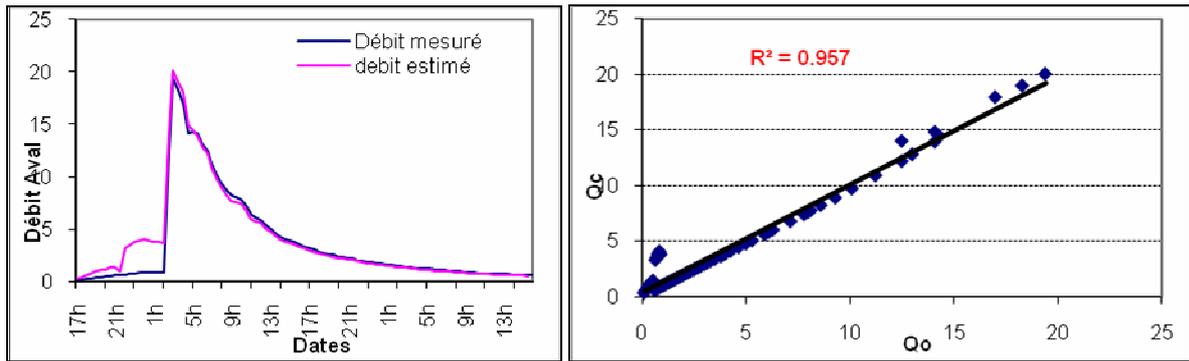


Fig. 44 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 5/05/1993

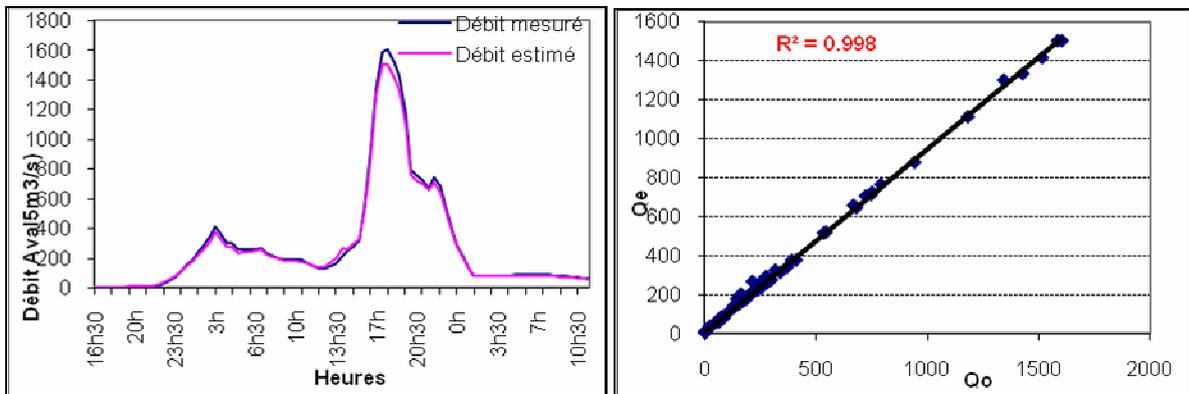


Fig. 45 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 22/01/1996

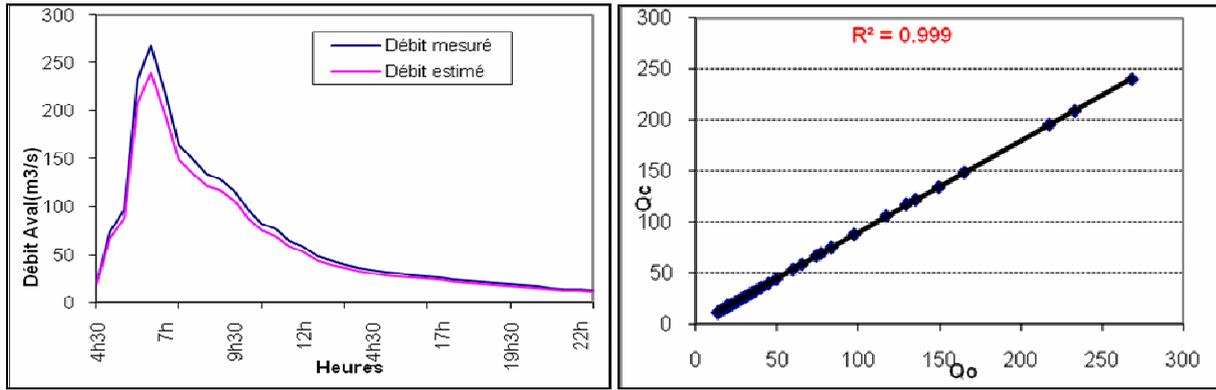


Fig. 46 : Relation débit aval mesuré -débit aval estimé de la crue du 26/11/2002

5) Simulation des débits aval à partir des débits amont

La simulation a été réalisée en utilisant les paramètres des modèles retenus et les débits amont (I). L'expression de la formule (2) a été utilisée, sauf que le premier débit aval a été pris en étant égal au premier débit amont. Après, chaque Q_1 va être remplacé par Q_2 et ainsi de suite le long de notre série de débits.

5-1) Cas du modèle de la crue du 3/02/1998

Les résultats de simulation sont illustrés par les figures ci dessous (fig. 47 à 57).

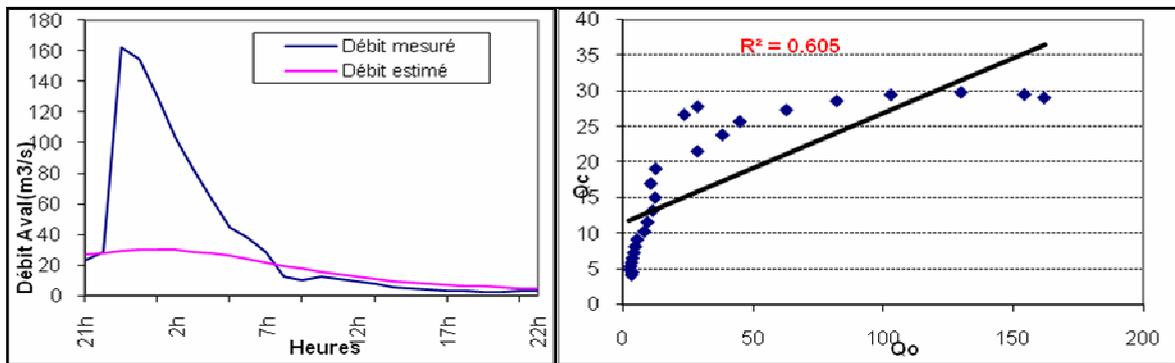


Fig. 47 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 19/12/1976

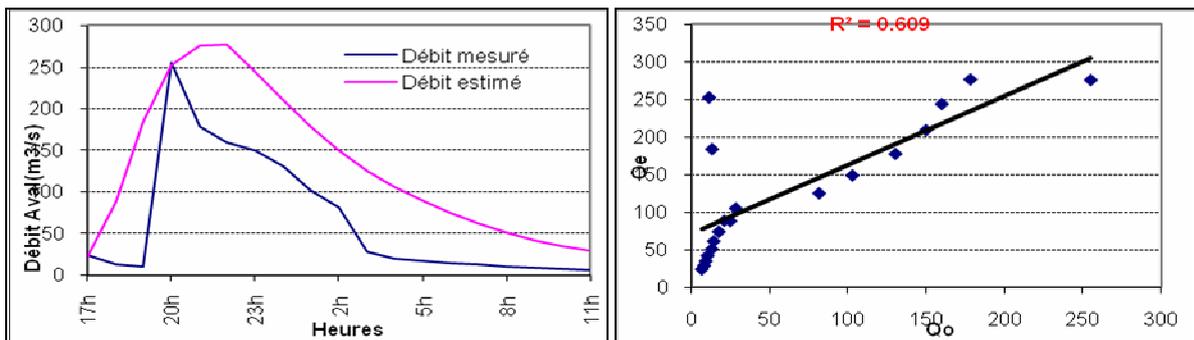


Fig. 48 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 17/10/1977

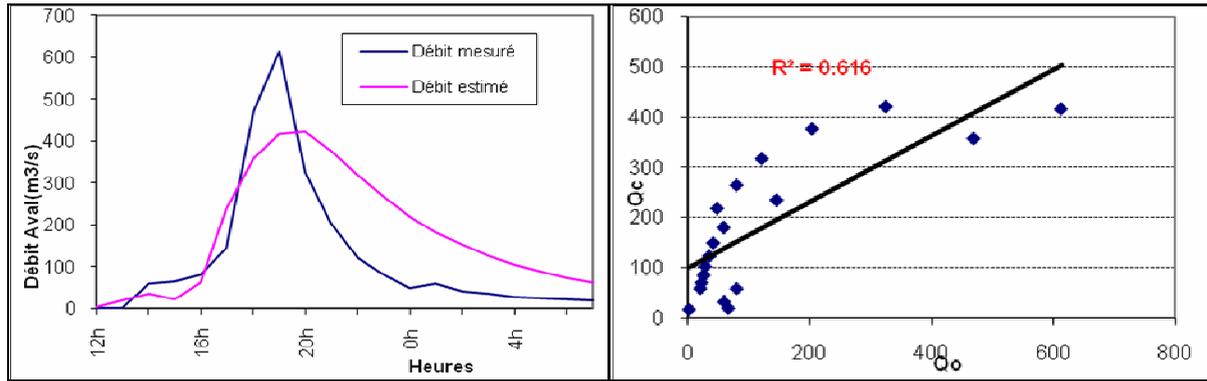


Fig. 49 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 8/11/1980

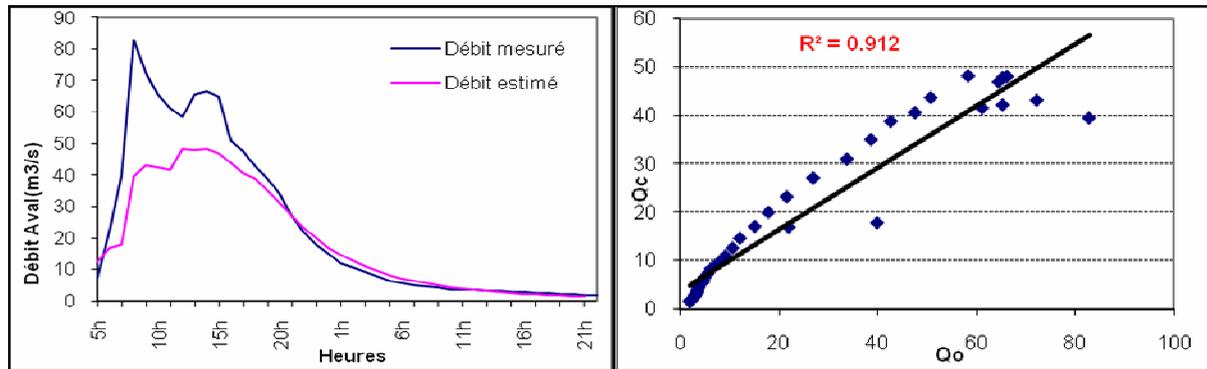


Fig. 50 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 8/11/1982

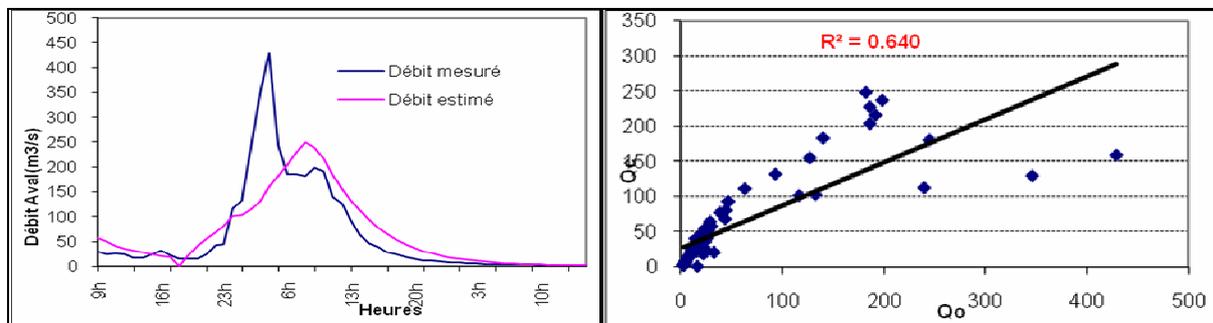


Fig. 51 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 15/11/1983

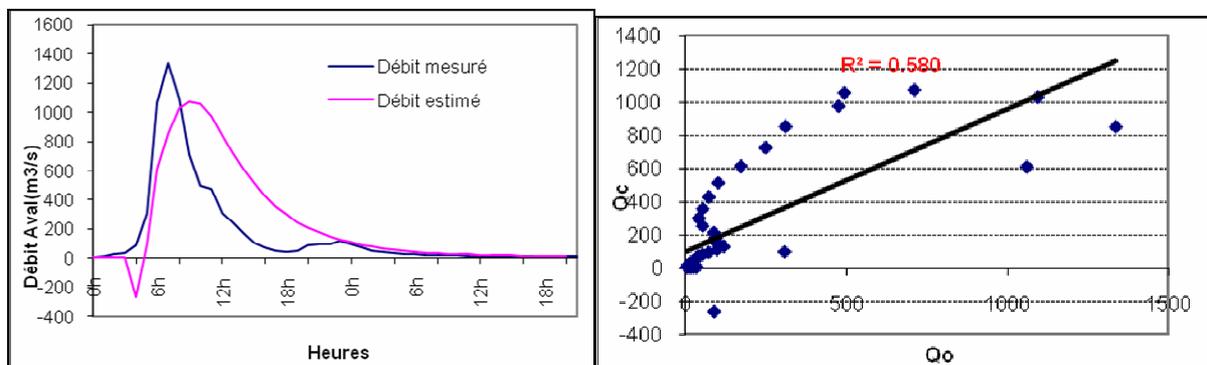


Fig. 52 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 6/01/1985

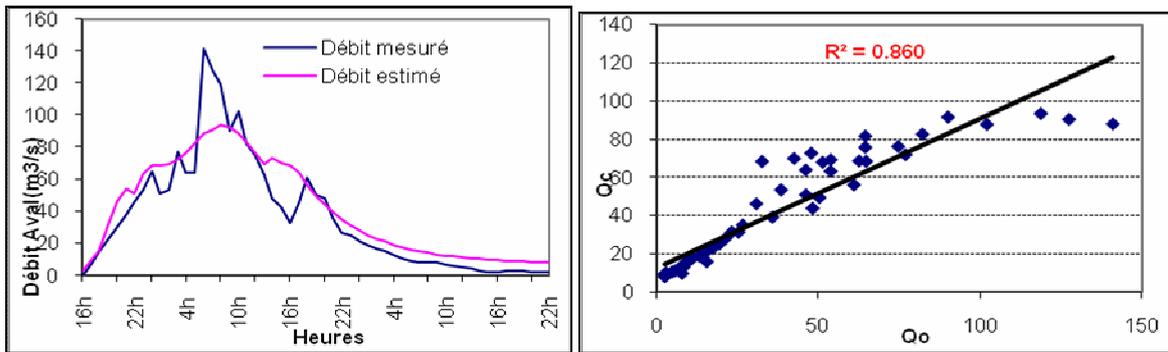


Fig. 53 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 1/03/1986

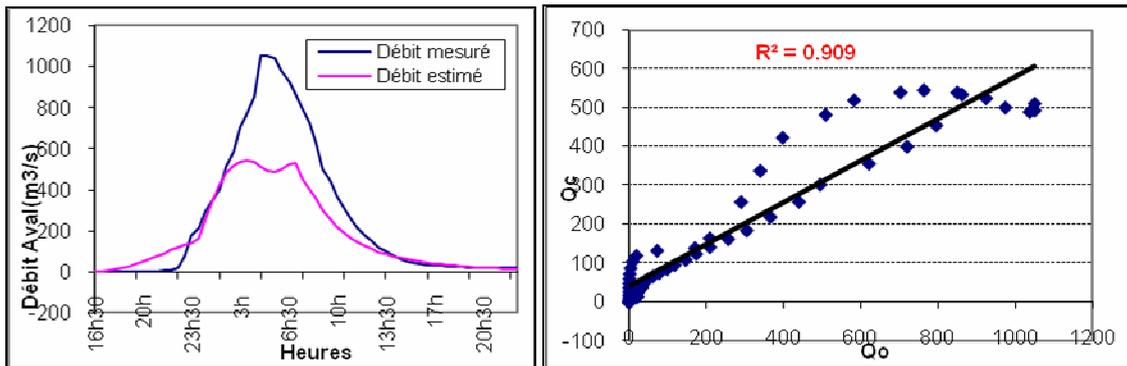


Fig. 54 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 10/11/1988

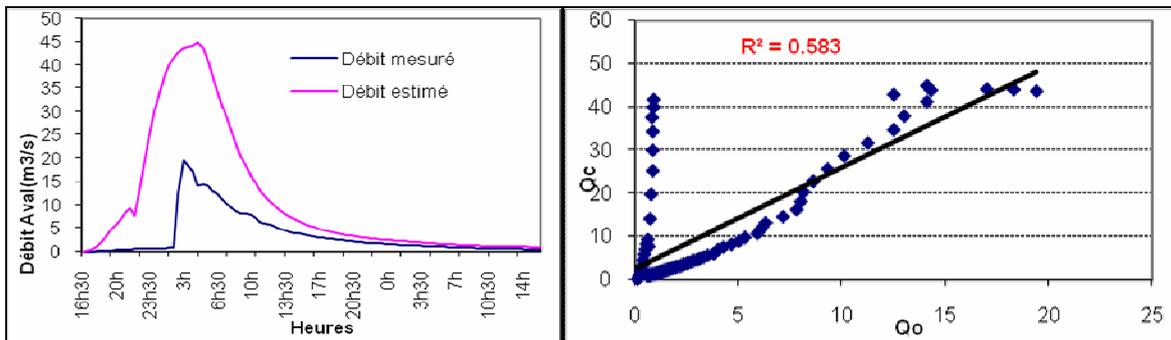


Fig. 55 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 5/05/1993

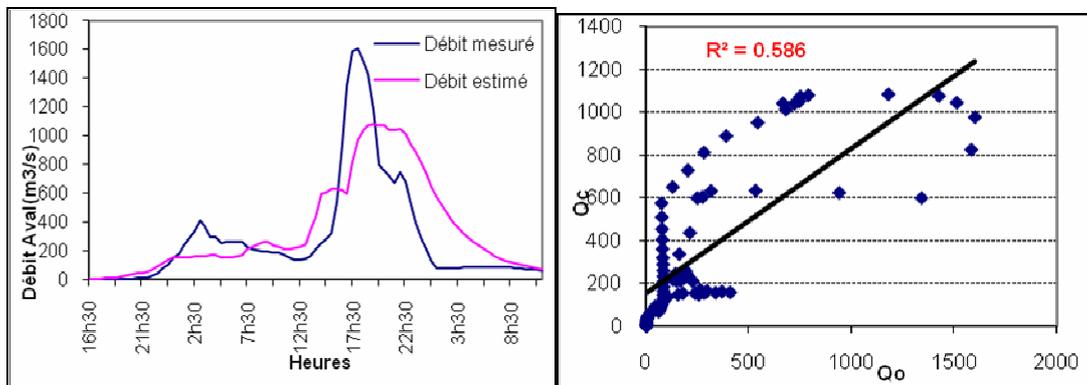


Fig. 56 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 22/01/1996

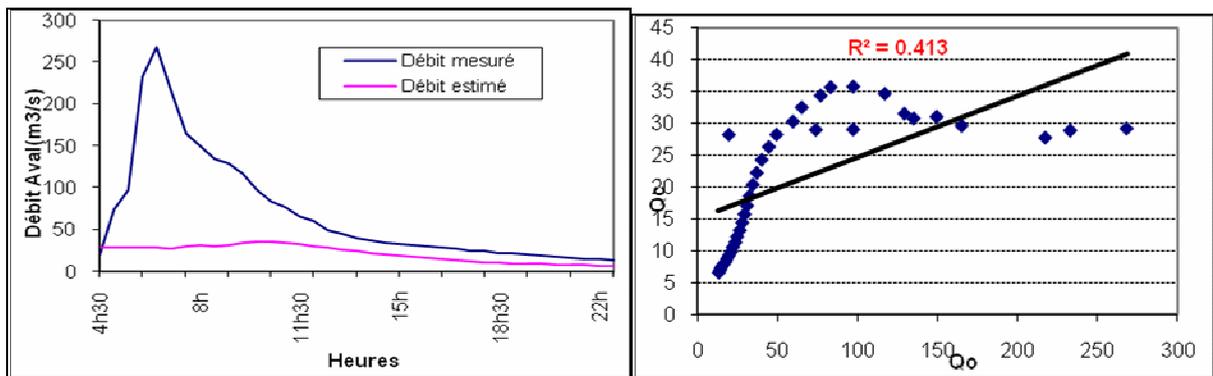


Fig. 57 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 26/11/2002

5-2) Cas du modèle de la crue du 8/11/1982

Les résultats de simulation sont résumés dans les figures ci dessous (fig. 58 à 67).

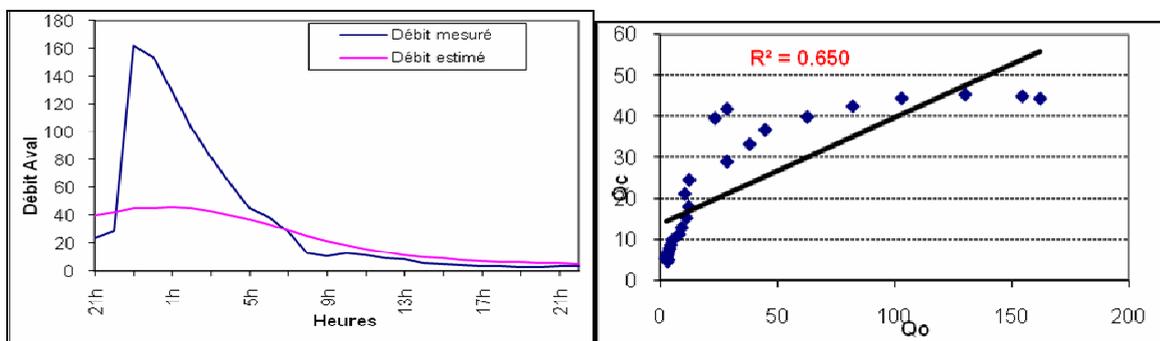


Fig. 58 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 19/12/1976

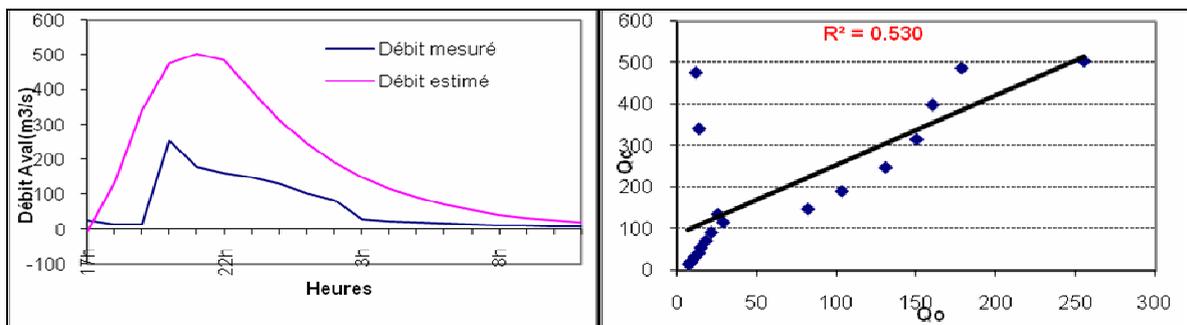


Fig. 59 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 17/10/1977

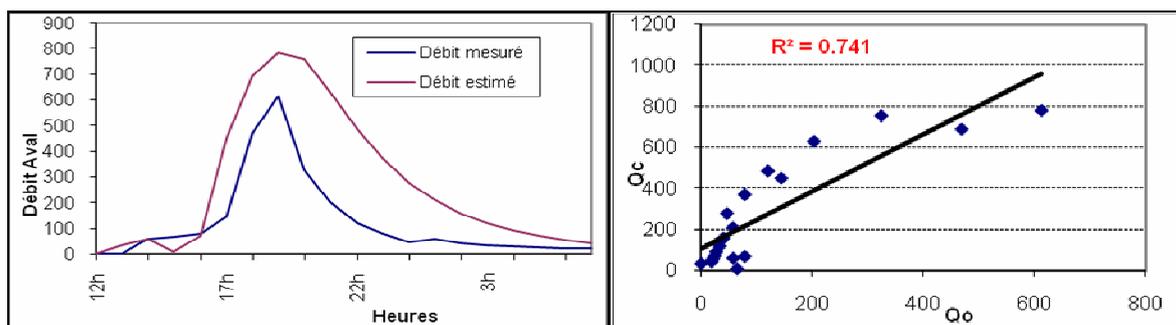


Fig. 60 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 8/11/1980

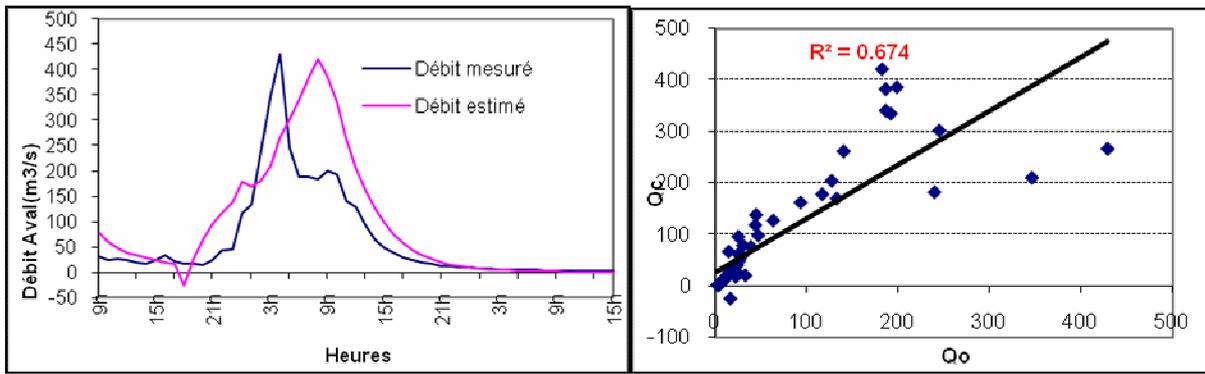


Fig. 61 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 15/11/1983

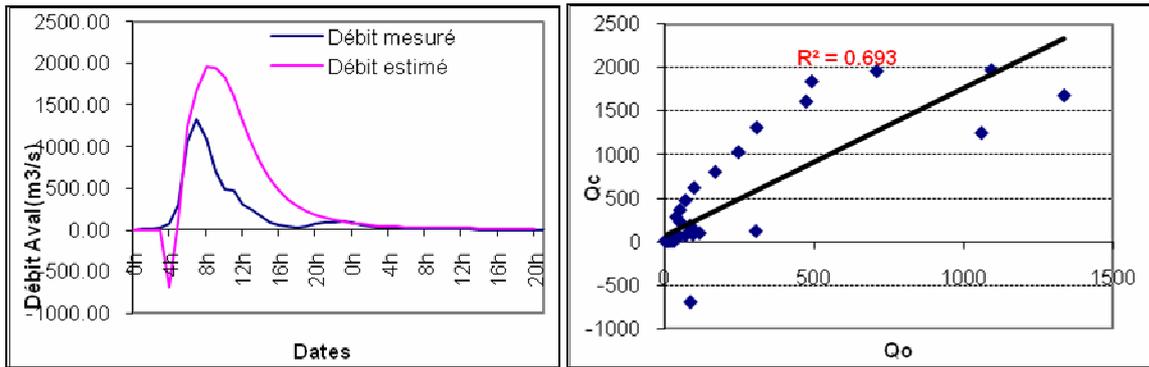


Fig. 62 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 6/01/1985

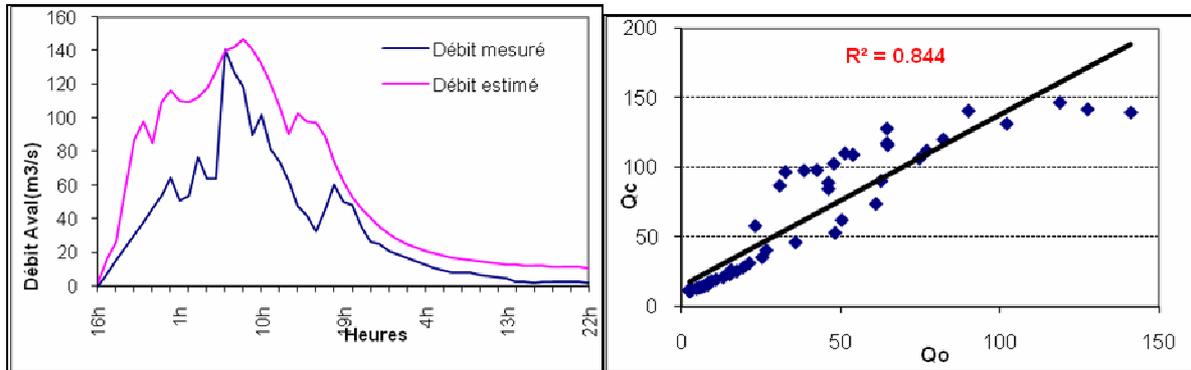


Fig. 63 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 1/03/1986

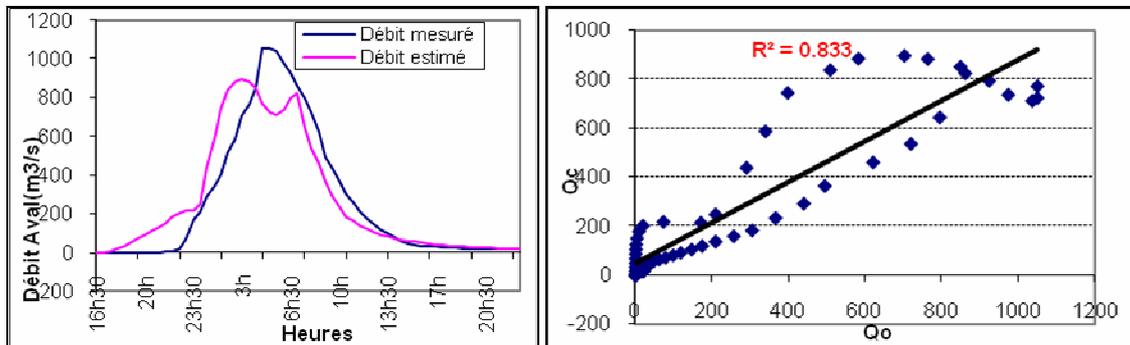


Fig. 64 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 10/11/1988

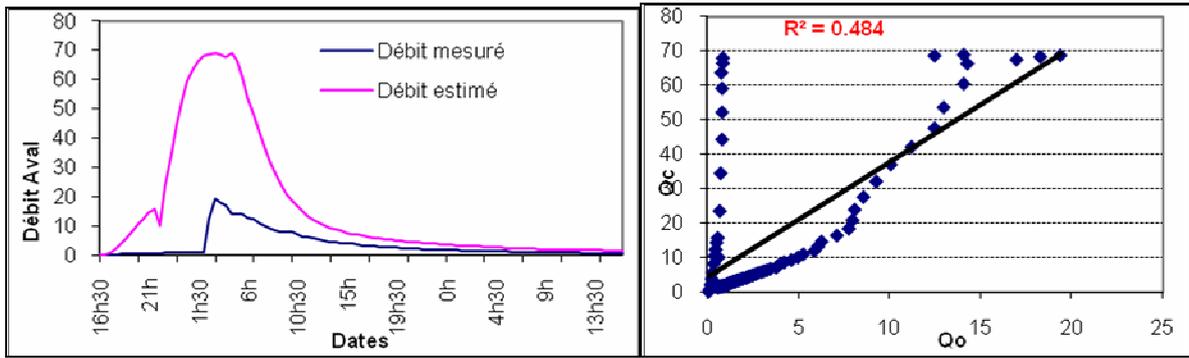


Fig. 65 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 5/05/1993

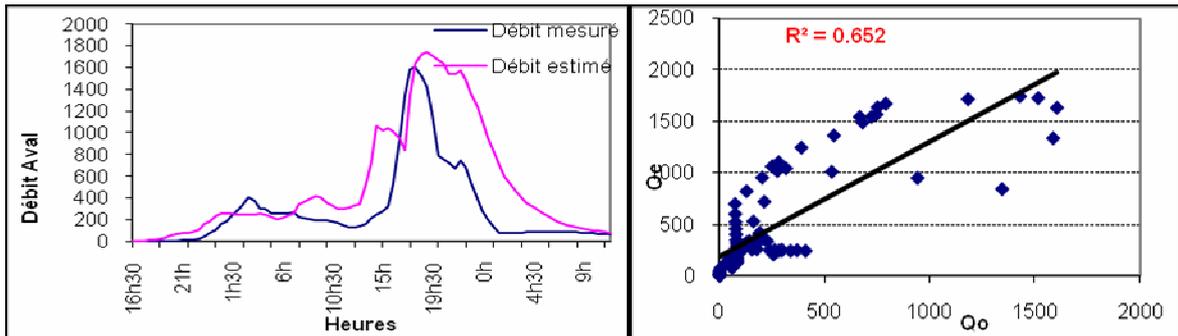


Fig. 66 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 22/01/1996

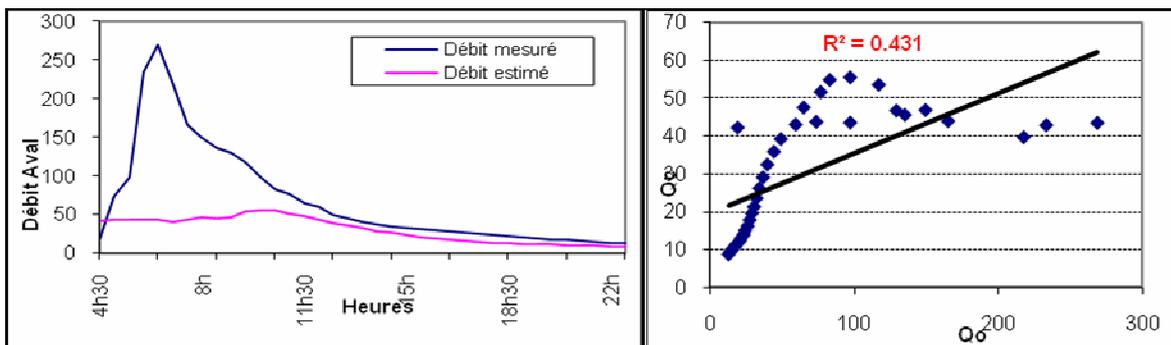


Fig. 67 : Relation débit aval simulé -débit aval mesuré de la crue du 26/11/2002

5-3) Commentaire des résultats de simulation

La surestimation des débits est obtenue généralement lorsque les hydrogrammes montrent une diminution des débits à l'exutoire par rapport à l'amont, cela peut s'expliquer par l'évaporation et l'infiltration d'une bonne partie des eaux entre l'aval et l'amont, le taux de ces dernières peut varier d'une saison à une autre. Or ces deux phénomènes n'agissent généralement pas frottement en cas de crues, car les vitesses de ces dernières et leurs courtes durées ne laissent pas le temps aux pertes d'agir. De ce fait, ce seraient les prélèvements des riverains (avec leurs seguias et autres) qui

peuvent jouer un rôle magistral dans les diminutions des débits vers l'aval et l'augmentation des débits simulés par rapport à ceux réellement observés.

Par contre la sous-estimation des débits est obtenue lorsque les hydrogrammes montrent une augmentation des débits à l'exutoire par rapport à l'amont, cela peut être expliqué par l'intervention des affluents du bassin intermédiaire entre l'amont (Zelten et Igrounzar) et l'aval (Adamna) suite à des précipitations intenses localisés entre l'amont et l'aval.

En conclusion, il s'avère que le modèle de la crue du 8/11/19882 est le modèle adéquat pour la simulation des débits de pointe, par contre le modèle de la crue du 3/2/1998 sous estime ces débits.

Enfin, le modèle de Muskingum, appliqué aux crues du bassin versant de l'Oued Ksob, est un modèle performant qui nous permet, en plus de la modélisation des crues, d'avoir un outil de prévision des débits de pointe pour une éventuelle alerte.

Conclusion générale

Dans ce projet de fin d'étude, on a fait une étude hydrologique du bassin versant de l'oued Ksob, suivi de l'application d'un modèle performant de modélisation, il s'agit bien du modèle Muskingum.

Ce bassin de superficie égale à 1480 km², de forme allongée, avec des pentes relativement fortes des versants et des affluents et des affleurements peu perméables sont tous des paramètres qui confèrent aux écoulements un caractère torrentiel et boueux, et offre un environnement propice aux crues.

Après avoir analysé les caractéristiques hydrométriques et pluviométriques de ce bassin, on a constaté que les temps de réponse et de concentration des eaux se raccourcissent, ce qui suggère une grande vigilance concernant la prévention et l'installation de systèmes d'alerte en amont des bassins.

Le modèle de Muskingum qui a été utilisé, a donné des résultats acceptables, mais il est préférable dans le futur de valider les résultats trouvés sur d'autres crues, en améliorant surtout les données hydrométriques et pluviométriques.

Pour cela, il est nécessaire, non seulement d'augmenter le nombre de station de jaugeage et surtout au niveau de la confluence des affluents avec le cours principal, mais aussi de bien étudier la répartition de ces stations dans le bassin afin d'avoir des renseignements sur le débit et la pluie sur la totalité du bassin.

BIBLIOGRAPHIE

- El Mimouni A., Daoudi L. & Ouajhain B. (2005). Rôle de la lithologie des versants sur les écoulements superficiels de l'oued Ksob (bassin d'Essaouira, Maroc). *3^{ème} journées Internationales des Géosciences de l'Environnement, El Jadida*, p. 127.
- El Mimouni A., Sipka V., Daoudi L. & Anthony, E. (2007). Apport des mesures courant métriques a la compréhension du fonctionnement du système hydrodynamique de la baie d'Essaouira. *4^{èmes} Journées Internationales des Géosciences de l'Environnement (IV^{ème} GEOENV)*, Tétouan, p. 111.
- El Mimouni A., Daoudi L., Saidi M.E. & Baiddah A. (2009). Comportement hydrologique et dynamique d'un bassin versant en milieu semi-aride : exemple du bassin versant du ksob (Haut Atlas occidental, Maroc). *Cuaternario & Geomorphologia* (sous presse).
- Gentile W. (1997). Caractérisation et suivi d'un champ dunaire par analyses sédimentologiques et télédétection (Essaouira-Cap Sim, Maroc Atlantique). *Thèse Université de Provence – Aix-Marseille I*, 307 p.
- Hander (1993).- Contribution a l'étude de la Bioclimatologie humaine au Maroc l'exemple d'Essaouira. *Thèse Univ. Paris IV*, 230 p.
- Humbert J., Najjar J., Ambroise B. & Amiet Y. (1982). Caractéristiques morphométriques et hydrographiques des bassins de la petite Fecht et du Ringel barch. *Recherche Géographique à Strasbourg*, 19-21, pp. 53-64.
- Içame N. (1994). Sédimentologie, stratigraphie séquentielle et diagenèse carbonatée des faciès du Crétacé Moyen du bassin d'Essaouira (Haut Atlas occidental, Maroc). *Thèse Univ. Tunis II*, 442 p.
- Michard A. (1976). Eléments de géologie marocaine. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, 252, 408 p.
- Rey J., Canerot J., Peybernes B., Taj-Eddine K. & Thieuloy J.P. (1988). Lithostratigraphy, biostratigraphy and sedimentary dynamic of the Lower Cretaceous deposits in the northern side of Western High Atlas (Morocco). *Cretaceous Research.*, 9, p. 141-158.
- Saidi M.E. (1995). Contribution à l'hydrologie profonde et superficielle du bassin du Souss (Maroc). *Thèse de l'université de Paris IV*, 120 p.
- Saidi ME., Daoudi L, Aresmouk H. & Blali A. (2003). Rôle du milieu physique dans l'amplification des crues en milieu montagnard : exemple de la crue du 17 Aout 1995 dans la vallée de l'Ourika (Haut Atlas, Maroc). *Rev. Sécheresse, Paris*, 14 (2), pp. 1-8.
- Weisrock A. & Fontugne M. (1991). Morphogenèse éolienne littorale au Pléistocène supérieur et à l'Holocène dans l'Oulja atlantique marocaine. *Quaternaire*, 2, pp. 565-569.