



# **MODELISATION DES CRUES DANS LE BASSIN DU BARRAGE MAKHAZINE, MAROC**

**YVES TRAMBLAY**

**Institut de Recherche pour le Développement  
Hydrosciences-Montpellier  
France**

**Mai 2012**

## ***Remerciements***

Cette étude à été réalisée durant une mission longue durée financée par l'Institut de Recherche pour le Développement, entre Février et Mai 2012 à Rabat.

Elle s'est déroulée dans la Division Hydrométéorologie de la Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE), du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement à Rabat.

Le travail à été mené en étroite collaboration avec l'ingénieur en chef de la division Hydrométéorologie, Redouane Bouaicha, qui a rendu possible l'accomplissement de ce projet, ainsi que les personnels de cette division, Asmae Bouzid, Fatima-Zahra Benfarji, Kamal Yalaoui, Mohammed Saad Frej.

Sont également remerciés les personnels de l'Agence de Bassin Hydraulique de Tétouan (ABHL), Nourredine Chikri, Abdallah Ezzine, Med Ali Abdelhakim Mesmoudi, Yassine Wahby, Nabil Qimch, pour leur accueil ainsi que l'accès aux données.

## INDEX DES FIGURES

Figure 1 : Bassin versant du barrage Makhazine et sous-bassin de Mdouar.....	7
Figure 2 : Précipitations moyennes mensuelles au barrage, Mdouar et Bab Taza entre 1991 et 2010.....	8
Figure 3 : Précipitations horaires enregistrées lors de l'épisode du 12/01/1987.....	9
Figure 4 : Débits journaliers à Mdouar entre 1969 et 2003 .....	9
Figure 5 : Fréquence mensuelle des maximums annuels (gauche) et maximums annuels (droite) enregistrés entre 1969 et 2003.....	10
Figure 6 : Relation entre le débit journalier entrant au barrage et à Mdouar entre 1984 et 2010 .....	11
Figure 7 : Ratio du débit journalier de Mdouar et celui entrant au barrage entre 1984 et 2010 .....	12
Figure 8 : Hydrogrammes horaires entrants au barrage et à Mdouar.....	12
Figure 9 : Distribution des paramètres CN, St et Tc optimisés pour chaque épisode.....	18
Figure 10 : Relations entre CN et API pour différentes valeurs de k.....	19
Figure 11 : Relations entre CN et débit moyen sur plusieurs jours avant les épisodes de crue.....	19
Figure 12 : Schéma du modèle pour la simulation des hydrogrammes au barrage.....	21
Figure 13 : Caractéristiques du barrage Makhazine.....	22
Figure 14 : Résultats de simulation des hydrogrammes entrants au barrage .....	23
Figure 15 : Hydrogrammes observés à Mdouar (vert) et au Barrage (rouge), et simulés au bassin intermédiaire (bleu).....	23

## INDEX DES TABLES

Table 1 : Matrice de corrélation (Pearson) des cumuls de précipitations.....	8
Table 2 : Episodes de crues disponibles.....	11
Table 3 : Indicateurs de performance du modèle en calibration et validation.....	20
Table 4 : Résultats de modélisation des hydrogrammes entrants au barrage Makhazine.....	22

## TABLE DES MATIERES

<b>1 INTRODUCTION</b> .....	5
<b>2 LE BASSIN DU BARRAGE MAKHAZINE ET DONNEES DISPONIBLES</b> .....	7
2.1 Présentation du bassin .....	7
2.2 Variabilité spatiale et temporelle des précipitations .....	8
2.3 Débits et crues à Mdouar .....	9
2.4 Apports au barrage Makhazine .....	10
<b>3 MODELISATION PLUIE-DEBIT EVENEMENTIELLE DES CRUES</b> .....	13
3.1 Débit de base .....	13
3.2 Fonction de production .....	13
3.3 Fonction de transfert.....	14
3.4 Calibration du modèle .....	15
3.5 Evaluation des simulations .....	16
<b>4 MODELISATION DES CRUES A MDOUAR</b> .....	17
4.1 Calibration des paramètres .....	17
4.2 Validation du modèle .....	20
<b>5 MODELISATION DES CRUES AU BARRAGE MAKHAZINE</b> .....	21
5.1 Description du modèle .....	21
5.2 Résultats des simulations .....	22
<b>6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b> .....	24
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	25
<b>ANNEXES</b> .....	27
Annexe 1 : Cumuls des précipitations horaires disponibles pour chaque épisode.....	28
Annexe 2 : Résultats de calibration des paramètres du modèle et Nash par épisode ..	29
Annexe 3 : Tracé des épisodes de crue à Mdouar en validation .....	30
Annexe 4 : Prévisions du modèle AL-BACHIR.....	31
Annexe 5 : Données satellitaires pour la modélisation hydrologique.....	33
Annexe 6 : Applications opérationnelles en temps réel .....	33

## 1 INTRODUCTION

L'objectif de la présente étude est de proposer une méthode de modélisation des crues applicable au Maroc pour la protection des ouvrages hydrauliques, tels que les barrages et les réservoirs. Le Maroc dispose en effet d'un nombre important de grands barrages, ainsi il est nécessaire d'améliorer la gestion de ces ouvrages lors des crues, avec le double objectif de maximiser la capacité de stockage des réservoirs, dans un contexte d'aridité croissante, mais aussi de minimiser les risques de déversement ou de rupture de ces ouvrages, pouvant causer de graves dégâts en aval. Le but est la diminution de la vulnérabilité ; développer la prévision des crues afin d'augmenter les délais d'alerte, afin notamment de mettre les populations en sécurité, grâce au développement de modèles utilisables de manière opérationnelle (à la fois en vigilance et prévision). Le Maroc a été soumis durant ces deux dernières décennies à des crues et inondations importantes causées par des épisodes pluvieux intenses (Bouaicha et Benabdelfadel, 2010). Ces épisodes causant d'importants dégâts humains et matériels ont eu lieu notamment en 1995 (Ourika), 1996-1997 (plaine du Gharb), décembre 2002 (Mohammadia, El Jadida, Taza, Tétouan, Settat, Berrechid), 2009-2010 (plaine du Gharb, Rabat, Errachidia, Missouri, IminTanout, Tanger, Nador, Casablanca, Khenifra, Tétouan, Agadir, Ait Melloul, Essaouira...).

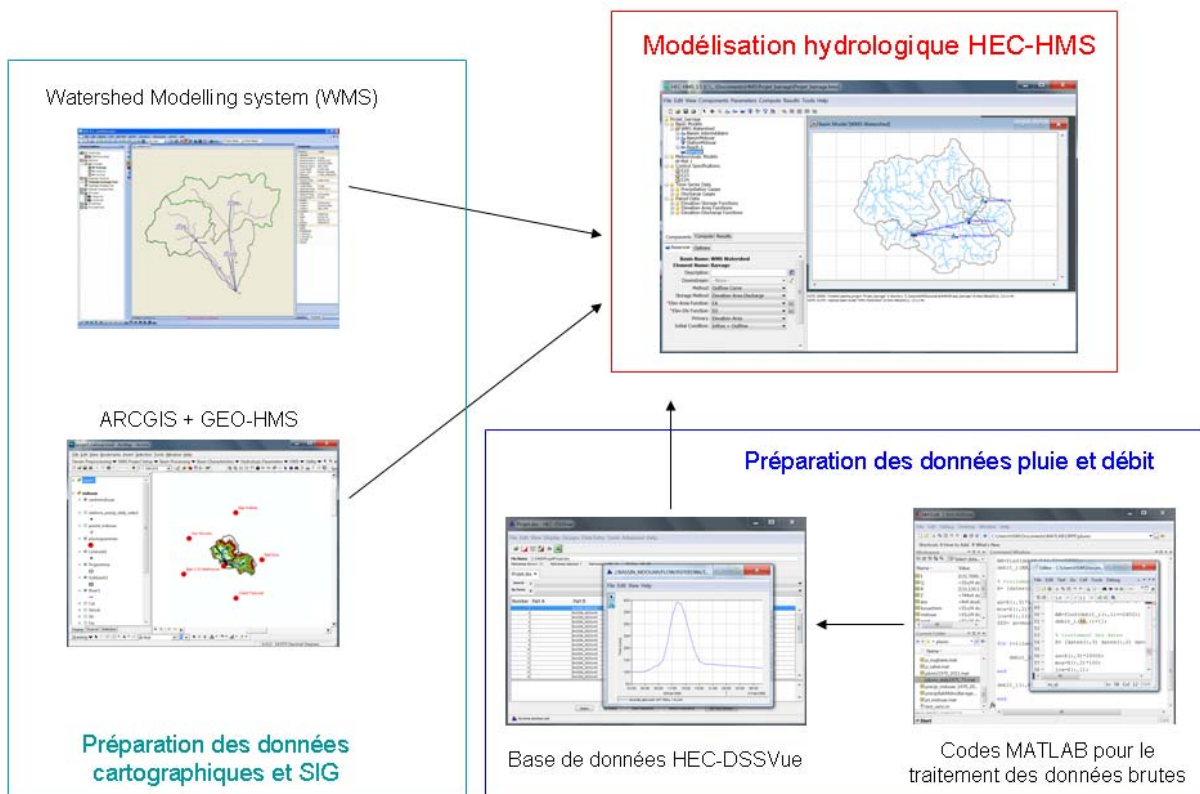
Le cas d'étude pour ce travail est le bassin versant du barrage Makhazine situé au nord dans le bassin de l'oued Loukkos. C'est la région avec la pluviométrie la plus importante du Maroc, de l'ordre de 1100 mm par an. Le barrage Makhazine est alimenté par un bassin de 1800 km<sup>2</sup> dont l'altitude croît vers l'est (en amont) jusqu'à atteindre 1600 mètres dans les premiers reliefs de la chaîne Riffaine. Une telle configuration, associée à une prédominance des sols imperméables et une forte pluviométrie, favorise la genèse de crues importantes. Ces crues sont causées par des épisodes de précipitations avec une grande étendue spatiale d'origine océanique. En outre, à 5 km du barrage en aval se trouve l'agglomération de Ksar El Kebir (200.000 habitants), dans une zone relativement plane donc très vulnérables aux inondations. Dans ce contexte, le but de ce travail est de développer un modèle utilisable pour la prévision quantitative des crues entrantes au barrage Makhazine, dans le but d'améliorer sa gestion. Les approches retenues s'appuient à la fois sur des outils utilisés dans de nombreux pays, et des méthodes de modélisation adaptées au contexte géographique et climatique du nord du Maroc.

## Mise en œuvre du projet

Sont présentées ici succinctement les différentes étapes de réalisation du projet :

- Le travail s'est déroulé de Février à Mai 2012 en accueil à la DRPE de Rabat, avec un financement de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, France)
- Le modèle à été développé avec des outils standards et gratuits (logiciel de modélisation hydrologique HEC-HMS et système de base de données HEC-DSSVue)
- Les données papiers fournies à la fois par la DRPE et l'ABHL ont été dépouillées manuellement, puis entrées dans une base de données DSS destinée à être alimentée par la suite grâce au système d'annonce de crue BAC21
- Des réunions régulières ont été planifiées avec le personnel de la division Hydrométéorologie, pour le suivi du travail, les choix techniques et les différentes étapes de réalisation du projet
- 2 visites ont été organisées en Février et Mai 2012 à l'ABHL de Tétouan, pour collecter des données, présenter les résultats et échanger avec les gestionnaires
- Une visite a été organisée à la Direction de la Météorologie Nationale à Casablanca, pour présenter les résultats et envisager les possibilités de collaboration future (intégration des données d'observation radar et de prévision du modèle AL-BACHIR)

## Outils informatiques utilisés :



## 2 LE BASSIN DU BARRAGE MAKHAZINE ET DONNEES DISPONIBLES

### 2.1 Présentation du bassin

Le barrage Makhazine (1800 km<sup>2</sup>) se situe dans le bassin de l'oued Loukkos, l'un des principaux cours d'eau du nord atlantique. Le climat est de type méditerranéen, avec l'alternance d'une saison humide aux températures modérées d'Octobre à Avril et d'une saison sèche et chaude de Mai à Septembre. Il subit aussi l'influence de l'océan Atlantique, à 40 km en aval du barrage Makhazine. Le bassin est composé à l'ouest de plaines avec une topographie peu marquée, tandis qu'à l'Est le relief devient plus accidenté et montagneux. L'altitude augmente progressivement vers l'Est jusqu'à atteindre 1600 mètres avec les premiers reliefs de la chaîne montagneuse du Rif. Cette configuration du relief associée à la présence de l'océan Atlantique à l'Ouest est la principale cause des précipitations importantes mesurées dans le bassin (1100 mm par an, Wahby 2008). Les sols de la partie amont du bassin sont constitués d'une alternance de marnes et de grès, tandis que la partie ouest et centrale du bassin est formée de séries marneuses soumises à une forte érosion. La prédominance des sols imperméables dans le bassin versant du Loukkos favorise le ruissellement, qui est accru par l'effet de pente à mesure que l'on progresse vers l'Est. On ne retrouve aucune ville ni centre urbain à l'amont du barrage. Le couvert végétal du bassin est caractérisé par la présence de matorrals, typiques des paysages méditerranéens, avec une prédominance des forêts de chêne-liège. La majeure partie du couvert forestier se situe à l'amont du bassin. A l'aval, l'agriculture constitue l'activité économique dominante au niveau du bassin, constitué de plaines cultivées.

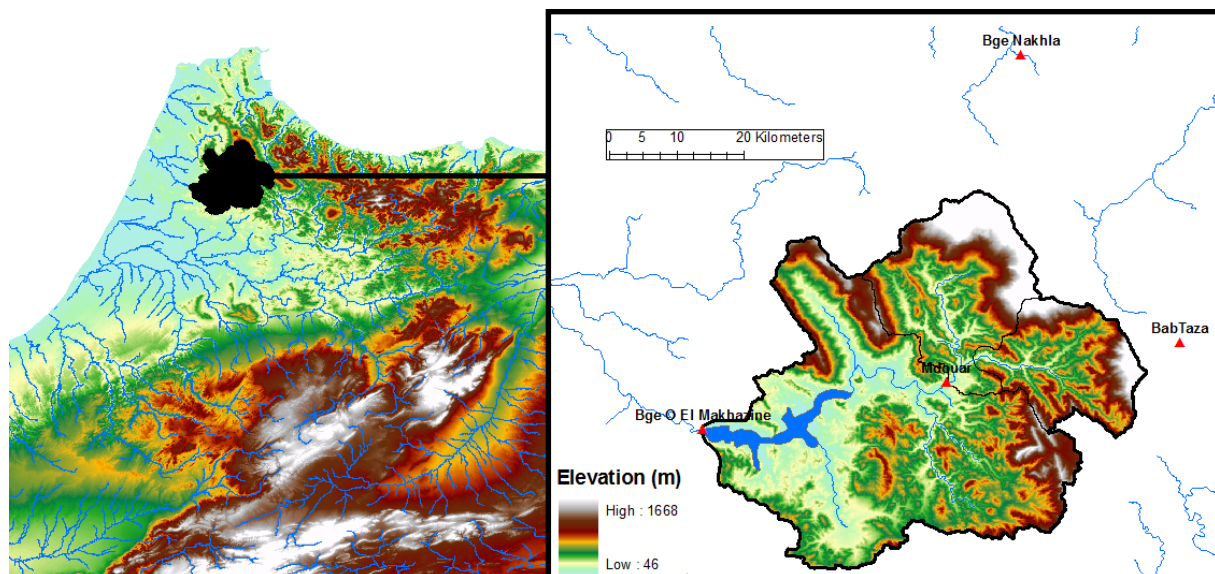


Figure 1 : Bassin versant du barrage Makhazine et sous-bassin de Mdouar

La situation géographique du bassin ainsi que sa configuration font qu'il dispose d'un potentiel important de ressources en eau. Le barrage Makhazine a été mis en service en 1979, il permet à la fois l'irrigation, l'alimentation en eau potable, la production d'énergie, ainsi que la protection contre les inondations de la plaine en aval (Wahby, 2008). C'est un barrage mixte en terre et enrochements haut de 67 mètres avec une capacité utile de 724 Mm<sup>3</sup>. Les apports annuels moyens sont de 678 Mm<sup>3</sup> et l'évaporation au niveau de la retenue du barrage s'élève à 1176 mm/an. Néanmoins la forte variabilité des précipitations entraînent une grande variabilité interannuelle des apports. La ville de Ksar El Kebir (200.000 habitants) située en

aval immédiat (5 km) du barrage constitue une zone de plaine très vulnérable aux inondations.

## 2.2 Variabilité spatiale et temporelle des précipitations

Des données de précipitations quotidiennes sont disponibles pour les stations du barrage Makhazine (60 m), Mdouar (90 m), Nakhla (210 m) et Bab Taza (900 m) entre 1980 et 2011. Pour ces stations, des données de précipitation au pas de temps 5 minutes sont aussi disponibles pour quelques épisodes. Elles ont été dépouillées manuellement, l'inventaire complet des cumuls par épisodes est disponible dans l'annexe 1.

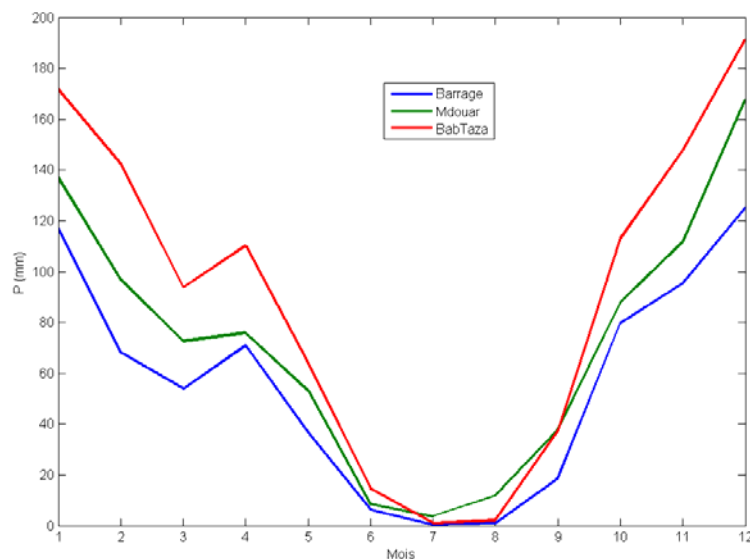


Figure 2 : Précipitations moyennes mensuelles au barrage, Mdouar et Bab Taza entre 1991 et 2010

Au niveau des données journalières et mensuelles, on observe un net gradient Ouest-Est, avec des précipitations augmentant du barrage Makhazine vers la station de Bab Taza (Figure 2). Ce gradient suit l'augmentation progressive de l'altitude du bassin de la plaine du Loukkos à l'Ouest vers les premiers reliefs du massif du Rif à l'Est. L'analyse à l'échelle événementielle confirme cette caractéristique des pluies comme l'indique la table 2 qui présente les cumuls pour les épisodes retenus dans les 4 stations. Les précipitations sont systématiquement plus importantes à Bab Taza qu'à Mdouar et qu'au barrage Makhazine. On trouve également une corrélation importante entre les cumuls par épisode dans les différentes stations, notamment entre Mdouar et Bab Taza ( $r = 0,96$ ) comme le montre la matrice de corrélations de la table 1.

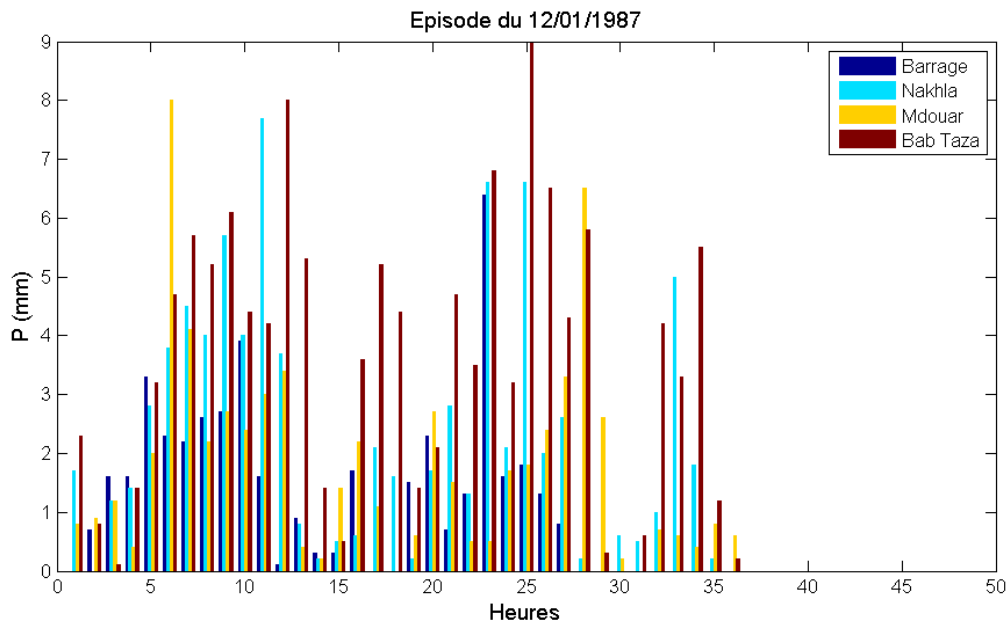
Table 1 : Matrice de corrélation (Pearson) des cumuls de précipitations

	Barrage	Nakhla	Mdouar	Bab Taza
Barrage	1	0,66	0,94	0,89
Nakhla	0,66	1	0,79	0,82
Mdouar	0,94	0,79	1	0,96
Bab Taza	0,89	0,82	0,96	1

Toujours à l'échelle événementielle, on constate une assez forte concomitance temporelle des épisodes pluvieux aux différentes stations. Comme le montre la figure 3 représentant les précipitations au pas de temps horaire de l'épisode du 12/01/1987, les pluies touchent quasi



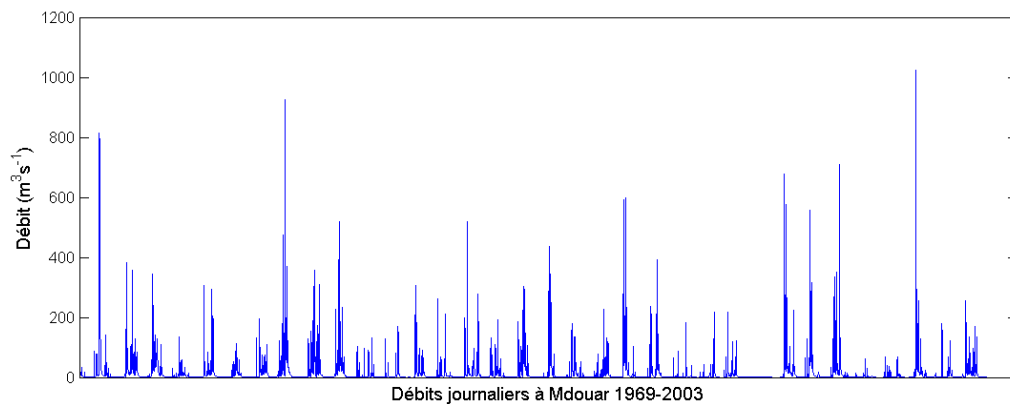
simultanément les 4 stations, bien que les stations de Nakhla et Bab Taza soient respectivement à 67km et 60 km de la station du barrage Makhazine. Les épisodes pluvieux à l'origine des crues dans le bassin du barrage présentent une grande étendue spatiale. Une telle configuration des champs pluvieux est favorable à la génération de crues potentiellement importantes par la mise en place du ruissellement simultanément dans les différents affluents. Néanmoins la densité de postes pluviographiques étant faible pour une telle superficie (1800km<sup>2</sup>), il est difficile d'analyser en détail la répartition spatiale des intensités de précipitations à l'échelle du bassin versant complet.



**Figure 3 : Précipitations horaires enregistrées lors de l'épisode du 12/01/1987**

### 2.3 Débits et crues à Mdouar

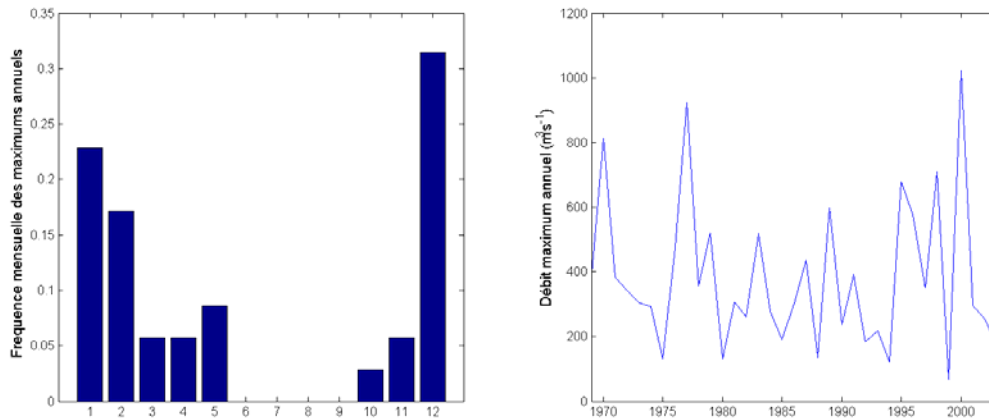
Le débit mesuré à Mdouar depuis 1969 est marqué par une forte saisonnalité, avec la majorité de l'écoulement s'observant pendant la période hivernale, mais également par une forte variabilité interannuelle. La longue chronique de données journalière disponible (Figure 4) permet d'analyser les extrêmes de débit durant cette période.



**Figure 4 : Débits journaliers à Mdouar entre 1969 et 2003**

On observe 75% des crues maximales annuelles durant la période de décembre à février (Figure 5). Aucune tendance sur les extrêmes de débits n'est observée entre 1969 et 2003,

néanmoins on constate une forte variabilité des maximums annuels, entre 69 et 1023 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> selon les années.



**Figure 5 : Fréquence mensuelle des maximums annuels (gauche) et maximums annuels (droite) enregistrés entre 1969 et 2003**

A partir des données de débits instantanés à Mdouar, les épisodes de crue pour lesquels des données de précipitations étaient disponibles ont été extraits. La table 2 (page suivante) montre les 24 épisodes disponibles entre 1981 et 2008, la très grande majorité d'entre eux se déroulant pendant la période hivernale. Les précipitations totales ont été calculées sur le bassin avec les données des pluviographes de Mdouar et Bab Taza, pondérées par la méthode de l'inverse distance. Le débit de base a été extrait en début d'épisode, et le volume de ruissellement a été séparé du débit de base au cours des épisodes modélisé par un modèle simple de récession détaillé dans la section 3.1. Le coefficient de ruissellement moyen sur tous ces épisodes est de 0,52 mais il peut être très variable, entre 0,19 et 0,89 indiquant des conditions initiales de saturation du bassin très différentes d'un épisode à l'autre.

## 2.4 Apports au barrage Makhazine

Le bilan journalier du barrage entre 1984 et 2010 étant disponible, on peut comparer les débits entrants au barrage à ceux mesurés au principal affluent, Mdouar. La figure 6 montre la relation entre les débits entrants mesurés au barrage et ceux mesurés à la station de Mdouar. La ligne verte indiquant la première bissectrice permet de constater que les débits entrants au barrage sont la plupart du temps supérieurs à ceux de Mdouar, montrant ainsi l'importance de la contribution du bassin intermédiaire. Si dans l'ensemble une bonne corrélation existe entre les débits au barrage et à Mdouar, de nombreuses valeurs singulières ne vérifient pas une relation linéaire entre les deux variables. Ainsi, une simple régression linéaire causerait dans un nombre important de cas une forte surestimation, ou sous-estimation, des débits entrants au barrage. Le graphique de la figure 7 montre la contribution relative de Mdouar pour les débits entrants au barrage classés en ordre croissant. On observe que pour les débits les plus importants, la contribution de Mdouar varie entre 25% et 75% du débit entrant mesuré au barrage. On obtient des résultats comparables en utilisant des débits moyennés sur 2 jours. Pour les épisodes retenus présentés dans la table 2, en moyenne le débit enregistré à Mdouar correspond à 56% du débit entrant au barrage. Cette contribution de Mdouar peut varier entre 37% et 77% selon les épisodes.

Table 2 : Episodes de crues disponibles

Episodes	Débit de base (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Débit max. (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Volume de ruissellement direct (m <sup>3</sup> )	Durée (heures)	Précipitations totales (mm)	Précip. max. en 1h (mm)	Coefficient de ruissellement
28/12/1981	5,9	421	23778720	51	68,0	9,7	0,53
31/12/1981	51,2	602	25587720	54	74,8	7,1	0,52
10/01/1982	8,9	355	17212320	59	68,4	7,9	0,38
16/01/1982	30,1	423	15691320	62	36,7	3,8	0,65
25/02/1982	18	399	4879080	39	27,0	7,6	0,28
15/11/1983	10,4	679	24539400	38	99,1	8,5	0,38
15/12/1983	4,9	1890	94051800	123	252,2	12,3	0,57
20/12/1983	116	1640	23935320	20	43,4	10,4	0,84
18/05/1984	149	540	13856400	37	61,6	7,1	0,34
26/11/1985	77	644	9829800	49	77,4	7,9	0,19
01/01/1986	18,3	366	5120280	27	20,5	6,2	0,38
29/01/1986	3	546	22030920	50	69,9	6,3	0,48
31/01/1986	73,3	287	13764960	70	31,0	3,8	0,68
17/02/1986	149	528	16167960	56	31,6	6,1	0,78
20/02/1986	95,7	406	7435440	33	16,5	4,2	0,69
07/03/1986	25,4	603	14391720	39	32,7	7,6	0,67
12/01/1987	102,8	762	22367520	45	103,5	7,8	0,33
29/01/1987	7	1110	75436560	80	180,7	12,0	0,64
21/02/1987	60,8	550	29235240	82	55,0	5,9	0,81
03/12/1987	41,6	464	8060040	41	52,2	7,3	0,24
27/12/1995	20	720	16187400	21	52,3	12,8	0,47
14/11/2002	0,5	763	16591320	22	75,6	16,0	0,34
08/12/2003	61	1355,1	38754000	47	66,8	8,8	0,89
29/11/2008	19	308,7	5117760	17	28,2	13,0	0,28

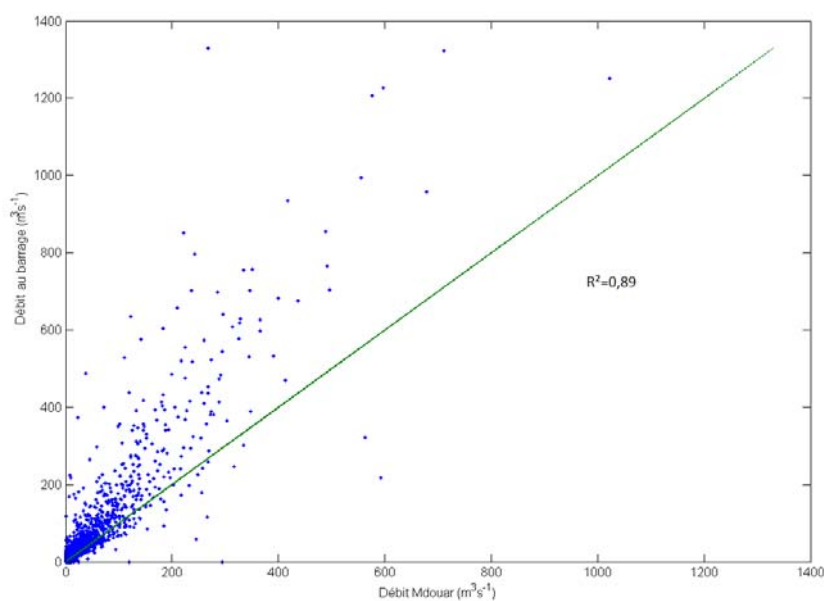
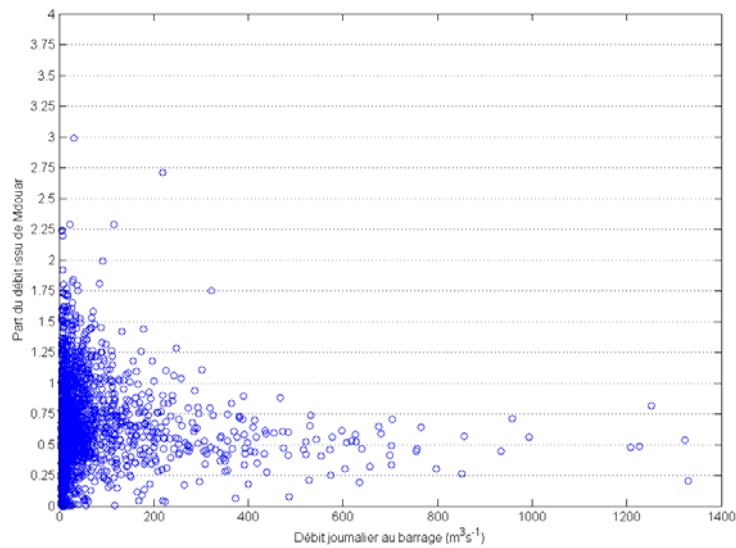
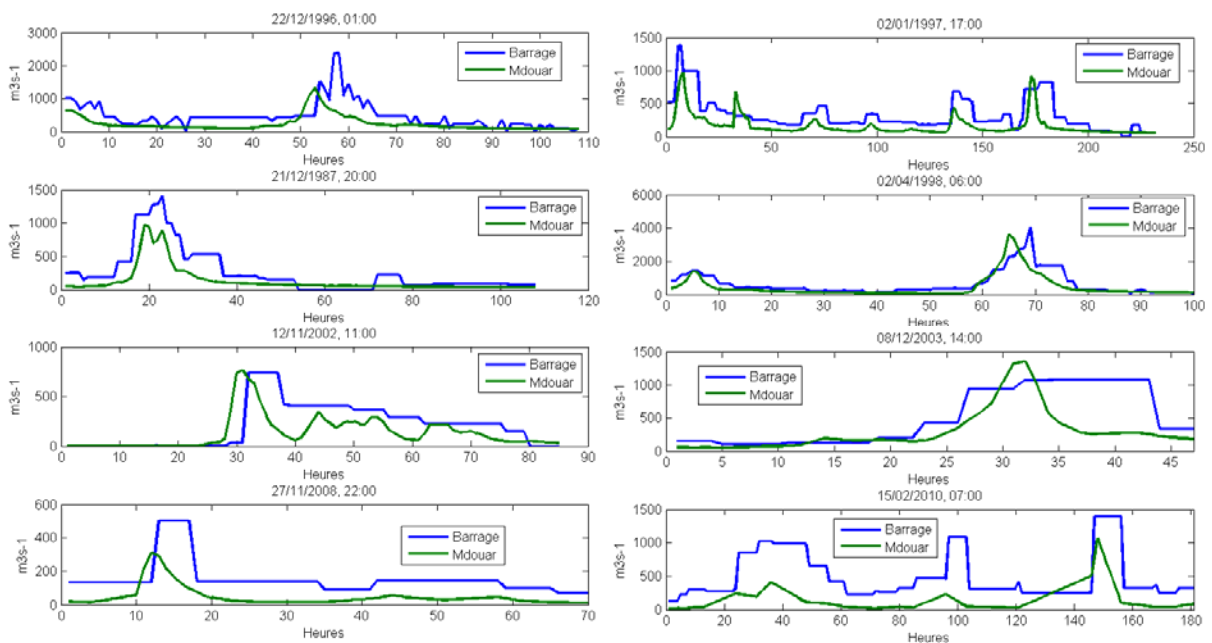


Figure 6 : Relation entre le débit journalier entrant au barrage et à Mdouar entre 1984 et 2010



**Figure 7 : Ratio du débit journalier de Mdouar et celui entrant au barrage entre 1984 et 2010**

Pour certains épisodes de crue les débits horaires à Mdouar et les débits entrants au barrage à des pas de temps variables infra-journaliers sont disponibles. Les débits au barrage ont été interpolés au pas de temps horaire, les graphiques sont présentés dans la figure 8. Comme il a été constaté précédemment, la contribution de Mdouar est variable selon les épisodes. Certaines pointes de crues sont décalées, avec un décalage entre 2 et 4 heures, d'autres simultanées à Mdouar et au barrage. Ce comportement reflète la contribution variable du bassin intermédiaire selon la localisation des précipitations ; des pluies plutôt localisées en amont sur Mdouar induiront un décalage de la pointe de crue tandis qu'une pluie généralisée sur tout le bassin entrainera une réponse simultanée des bassins intermédiaire et de Mdouar.



**Figure 8 : Hydrogrammes horaires entrants au barrage et à Mdouar**

### 3 MODELISATION PLUIE-DEBIT EVENEMENTIELLE DES CRUES

Cette section décrit la modélisation conceptuelle mise en œuvre dans le bassin de Mdouar (655 km<sup>2</sup>), puis celui du barrage (1800 km<sup>2</sup>), en utilisant la plate-forme HEC-HMS, disponible gratuitement sur internet (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>). La modélisation pluie-débit des crues nécessite de considérer plusieurs composantes de l'écoulement ; le débit de base, les pertes et le transfert de l'écoulement des versants vers l'exutoire.

#### 3.1 Débit de base

Le débit de base est la composante du débit qui retourne dans le cours d'eau depuis le stockage souterrain et les aquifères. La connaissance du débit de base est importante pour modéliser la récession de l'hydrogramme après la pointe de débit, ainsi que pour estimer le volume de la crue. HEC-HMS dispose de trois modèles pour le débit de base : constant mensuel, réservoir linéaire et récession. Le modèle constant mensuel est une approche très simple mais qui n'est pas adaptée au contexte semi aride où des variations importantes des conditions de saturation des bassins peuvent être observées au cours d'un même mois. La méthode du réservoir linéaire peut être utilisée seulement avec un modèle de pertes de type SMA continu. La méthode de récession est une approche qui utilise un modèle de récession exponentielle du débit de base. Cette approche couramment utilisée est retenue dans le cadre de ce projet, elle est adaptée pour les bassins où le volume des crues est fortement influencé par les événements pluvieux (USACE 2010). Dans le modèle de récession exponentielle, le débit de base  $B_t$  au pas de temps  $t$  est défini par :

$$B_t = B_i R_c^t \quad (1)$$

Où  $B_i$  est le débit de base initial au temps  $t_0$  et  $R_c$  la constante de décroissance exponentielle. Les paramètres de la récession sont :

1. Le débit de base initial,  $B_i$  (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)
2. La constante de récession  $R_c$  ([0-1])
3. Seuil,  $T_d$  ([0-1])

Le débit de base est le débit initial au début de la simulation. La constante de récession décrit le taux de décroissance du débit de base. C'est la part du débit de base au temps  $t$  par rapport au temps  $t-1$ . Le seuil est le point de l'hydrographe où le débit de base remplace le débit de ruissellement direct, il est exprimé en proportion du débit de pointe de la crue (USACE, 2010).

#### 3.2 Fonction de production

Dans le modèle HEC-HMS, la superficie du bassin peut être divisée en zones imperméables et en zones perméables. Dans les zones imperméables, l'eau s'écoule sans interception, évaporation, transpiration ou infiltration. En zones perméables, l'écoulement est sujet à des pertes (USACE, 2001), HEC-HMS dispose de différentes méthodes pour les estimer : pertes initiales et constantes (*initial and constant*), déficit initial et constant (*deficit and constant*), Green et Ampt, SCS et un modèle continu de l'humidité des sols SMA (*soil moisture accounting*).

Dans le cadre de cette étude, le modèle de pertes SCS (USDA-SCS, 1985) à été retenu. De nombreuses études ont en effet utilisé avec succès ce modèle en contexte méditerranéen semi-aride (Brocca et al., 2009; Trambly et al., 2010). Par ailleurs ce modèle est adapté pour rendre compte des conditions initiales d'humidité des bassins versants à l'échelle événementielle. Le paramètre CN (ou S) peut en effet être relié à différents indicateurs d'humidité des sols, mesurés sur le terrain (Huang et al., 2007 ; Brocca et al., 2009 ; Trambly et al., 2010), issus de modèles (Marchandise et Viel, 2009) ou de données satellite (Brocca et al., 2010).

Dans le modèle SCS, l'excès de précipitations est estimé en fonction des précipitations cumulées sur l'épisode :

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

Où  $P_e$  désigne l'excès de précipitations,  $P$  le total des précipitations,  $I_a$  les pertes initiales et  $S$  le potentiel maximum de rétention. Dans la méthode SCS, les pertes initiales sont données par la relation  $I_a = 0,2S$ . Le potentiel de rétention  $S$  est relié au *Curve Number* (CN), lui-même pouvant être estimé par des tables décrivant les différents types de sols (USDA-SCS, 1985) ou bien par calibration avec des données observées :

$$S = \frac{254400 - 254CN}{CN} \quad (3)$$

### 3.3 Fonction de transfert

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

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

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1} \quad (4)$$

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

$$C_A = \frac{\Delta t}{S_t + 0,5\Delta t} \quad \text{et} \quad C_B = 1 - C_A \quad (5)$$

$\Delta t$  est le pas de temps de calcul, ici 1 heure.

Les paramètres requis par la méthode de Clark sont donc :

1. Le temps de concentration,  $T_c$  (heures)
2. Le coefficient de stockage,  $S_t$  (heures)

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

### 3.4 Calibration du modèle

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

1. Le modèle hydrologique est destiné à une application opérationnelle, et non pas pour la recherche scientifique (mais par exemple pour la planification, la conception d'ouvrages).
2. Les critères pour l'évaluation de la performance du modèle sont définis par rapport aux tâches opérationnelles.
3. Les critères sont calculés en comparant les estimations du modèle avec les observations.

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

$$PWRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (Q_o(t) - Q_M(t))^2 \frac{Q_o(t) + Q_A}{2Q_A}}{N}} \quad \text{et} \quad Q_A \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Q_o(t) \quad (6)$$

Avec  $Q_o$  le débit observé,  $Q_M$  le débit simulé au pas de temps  $t$ , et  $Q_A$  le débit moyen observé.

Le processus de calibration vise à trouver les paramètres optimaux pour minimiser la fonction objective. Elle peut être manuelle, par essai-erreurs de différentes valeurs de paramètres, ou automatique. Deux méthodes de calibration automatiques sont disponibles dans HEC-HMS :

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

Le processus d'optimisation automatique est contraint par les valeurs initiales des paramètres à optimiser ainsi qu'un intervalle de valeurs probables à spécifier dans HEC-HMS. Ainsi il est nécessaire de tester l'optimisation avec plusieurs valeurs initiales des paramètres, pour éviter des minimums locaux de la fonction objective pouvant donner des jeux de paramètres non-optimaux. Les valeurs initiales peuvent être estimées de manière empirique avec différentes caractéristiques du bassin versant, comme les tables destinées à estimer le paramètre CN de la méthode SCS (USDA-SCS, 1985). Il est à noter que HEC-HMS ne permet pas la calibration multicritères. La calibration multicritère repose sur l'utilisation simultanée de plusieurs fonctions objectives, par exemple sur les volumes, la pointe de crue et la synchronisation des événements de crue (Moussa et Chahinian, 2009).

### 3.5 Evaluation des simulations

Outre l'examen visuel des hydrogrammes simulés, différentes métriques peuvent être utilisées pour mesurer la capacité du modèle pluie-débit à reproduire les épisodes de crue. Pour chaque événement, une mesure couramment utilisées en hydrologie est le coefficient de Nash entre les débits mesurés  $Q$  et les débits calculés  $Qe$  pour chaque pas de temps  $t$  :

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t - Qe_t)^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t - \bar{Q})^2} \quad (7)$$

Pour évaluer la capacité du modèle à reproduire plusieurs épisodes, on peut faire la moyenne ou la médiane du coefficient de Nash, ou encore calculer les biais (RBIAS) et erreurs quadratiques relatives (RRMSE) sur les volumes et les pointes de crue :

$$RBIAS[\%] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{X_i - Y_i}{X_i} \right) \times 100 \quad (8)$$

$$RRMSE[\%] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{X_i - Y_i}{X_i} \right)^2} \times 100 \quad (9)$$

Où X et Y sont les volumes ou pointes de crues respectivement observées et mesurées pour chaque épisode  $i$ . Le biais et l'erreur quadratique relative sont exprimés en pourcentages.



## 4 MODELISATION DES CRUES A MDOUAR

La structure du modèle détaillé dans la section précédente est utilisée pour modéliser les crues dans le bassin de Mdouar (655 km<sup>2</sup>). Les données de précipitations à 5 minutes sont disponibles pour plusieurs épisodes dans les stations de Mdouar (24 épisodes) et Bab Taza (20 épisodes). Les précipitations sont interpolées par la méthode de l'inverse distance afin de produire une pluie moyenne à l'échelle du bassin de Mdouar. On considère ainsi une modélisation globale, sans spatialisation de la pluie ni des propriétés des sols, le bassin présentant une occupation des sols assez homogène et sans zones imperméables.

Les pas de temps des débits disponibles à Mdouar sont variables, le pas le temps le plus fin pour quelques épisodes de crue est de 60 minutes et plus rarement 30 minutes. Aussi le pas de temps horaire est choisi pour la modélisation, au vu des temps de réponses observés selon les épisodes, entre 2 et 4 heures entre le centre de gravité des précipitations et la pointe de débit. Un modèle événementiel est choisi car de longues chroniques de données à des pas de temps infra-journaliers (horaire, tri-horaire...) ne sont pas disponibles dans le bassin. Avec le déploiement de stations automatiques de télémessure, on pourrait envisager dans le futur une modélisation continue sur ces bassins versants.

24 épisodes de crue sont disponibles entre 1981 et 2008, la grande majorité ont eu lieu dans la période hivernale entre novembre et février. L'objectif étant de tester la possibilité de faire un modèle utilisable pour la prévision opérationnelle, il est nécessaire de fixer tous les paramètres et de proposer de techniques d'estimation pour les paramètres ne pouvant être fixés à une valeur unique pour tous les événements (Bouvier et al., 2006). Dans un premier temps, les paramètres sont calibrés pour reproduire au mieux chaque épisode de crue.

### 4.1 Calibration des paramètres

Les paramètres du modèle de récession pour le débit de base sont fixés par calibration et examen visuel préalable sur tous les événements. En effet, ils ne sont pas supposés changer d'un épisode à l'autre car ils sont déterminés par les propriétés physiques du bassin. La constante de récession  $R_c$  est fixée à 0,75 et le seuil  $T_q$  à 0,3. Seul le débit de base initial en début d'épisode est nécessaire. On observe dans la table 2 décrivant les épisodes que ce débit de base initial est très variable selon les épisodes, de 0 à 149 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, ce qui justifie l'approche retenue ici par rapport à un débit de base fixé sur une base mensuelle.

Les paramètres de l'hydrogramme de Clark sont également déterminés par les caractéristiques des bassins tels que la superficie, la forme et la topographie, mais néanmoins dans certains cas la calibration peut s'avérer problématique et influencer sur les résultats de simulation. Aussi les valeurs de  $S_t$  et  $T_c$  ont été calibrées pour chaque épisode, afin d'évaluer leur distribution. Le graphique 9 montre la distribution de  $S_t$  et  $T_c$  obtenus par calibration pour chaque épisode. Les valeurs médianes respectivement de 2,5 pour  $S_t$  et 4,1 pour  $T_c$  sont convenables pour le plus grand nombre d'épisodes. Néanmoins, on observe pour certains épisodes des valeurs s'écartant de ces paramètres, avec des valeurs de  $S_t$  dépassant 4. Ces épisodes sont ceux des 31/12/1981, 10/01/1982, 15/11/1983, 29/01/1986, 21/02/1987, présentant plusieurs pointes de crues successives durant des épisodes relativement longs. Pour reproduire au mieux ces hydrogrammes, la calibration tend donc à surestimer le stock à l'échelle du bassin,  $S_t$ , pour mieux reproduire la décrue. Ce comportement a déjà été documenté dans le cas de modèles globaux (avec des précipitations non-spatialisés), où la calibration des paramètres permet de

compenser les incertitudes sur les précipitations, mais leur faisant perdre ainsi toute signification physique (Andréassian et al., 2001 ; Arnaud et al., 2011).

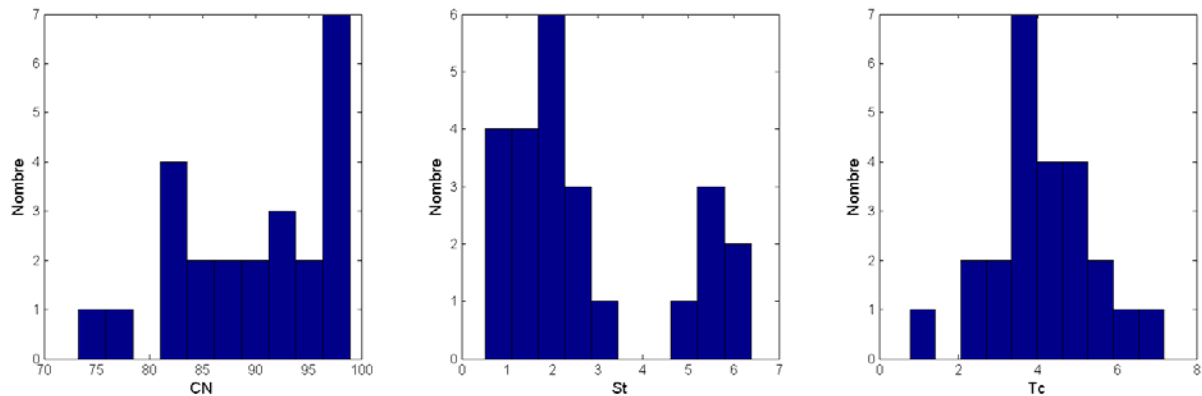


Figure 9 : Distribution des paramètres CN, St et Tc optimisés pour chaque épisode

Enfin, le paramètre CN, représentant l'état du stock hydrique dans le bassin au début des événements est lui aussi calibré pour chaque épisode. Les valeurs optimisées de CN pour chaque événement varient de 73,2 à 98,9, ce qui indique une grande variété de conditions initiales de saturation des sols au début des différents épisodes retenus. La figure 9 montre que les valeurs de ce paramètre ne sont pas distribuées selon une loi Normale, ainsi une valeur moyenne ne serait pas représentative de tous les épisodes. Différentes approches existent dans la littérature pour estimer ce paramètre CN pour chaque épisode, soit avec le débit de base, les précipitations antérieures, ou des mesures d'humidité au sol ou satellite. L'approche SCS classique consiste à faire varier le CN en fonction des précipitations antécédentes sur 5 jours (USDA-SCS, 1985), néanmoins plusieurs travaux ont montré que dans le cas de bassins Méditerranéens avec une forte influence des conditions initiales d'humidité cette approche n'était pas indiquée (Brocca et al., 2009 ; Trambly et al., 2010). En effet, en comparant les précipitations cumulées les 5 jours précédents les épisodes de crue avec le paramètre CN calibré par épisode, on n'obtient qu'un  $R^2=0,19$ . L'indice de précipitations antérieures (API) de Kohler (1951) a également été testé. Cet index permet de reproduire l'état de saturation du bassin grâce au calcul des précipitations cumulées les jours précédents. L'indice d'un jour  $j$  est égal à l'indice du jour précédent  $j-1$  multiplié par le facteur  $k$ , si une pluie intervient le cumul journalier est ajouté à l'indice :

$$API_j = k.API_{j-1} + P_j \quad (10)$$

Le paramètre  $k$  peut être estimé grâce à des tables, ou optimisé comme cela a été fait ici pour maximiser la corrélation entre l'API et le CN. La figure 10 ci-dessous montre que la valeur optimale de  $k$  est de 0,976 pour un  $R^2$  de 0,65 entre le CN et l' $API_{k=0,96}$ . La relation, satisfaisante d'un point de vue statistique, montre néanmoins un comportement non linéaire des valeurs dans la partie centrale du graphique.

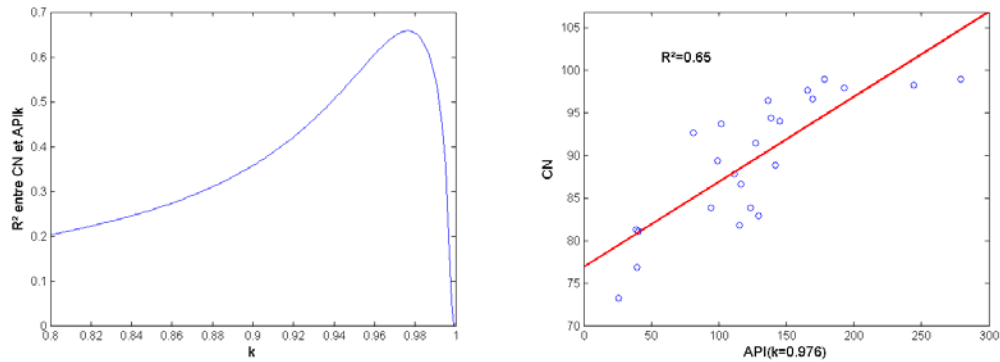


Figure 10 : Relations entre CN et API pour différentes valeurs de k

Un autre indicateur pour estimer le CN, le débit moyen sur plusieurs jours précédents les épisodes de crue, a été également testé, avec succès, en faisant varier le nombre de jours sur lesquels ce débit moyen était calculé. Les résultats sont présentés sur la figure 11, on observe que le débit moyen sur les 6 jours précédents les événements permet d'estimer convenablement les valeurs de CN, avec  $R^2=0,75$ .

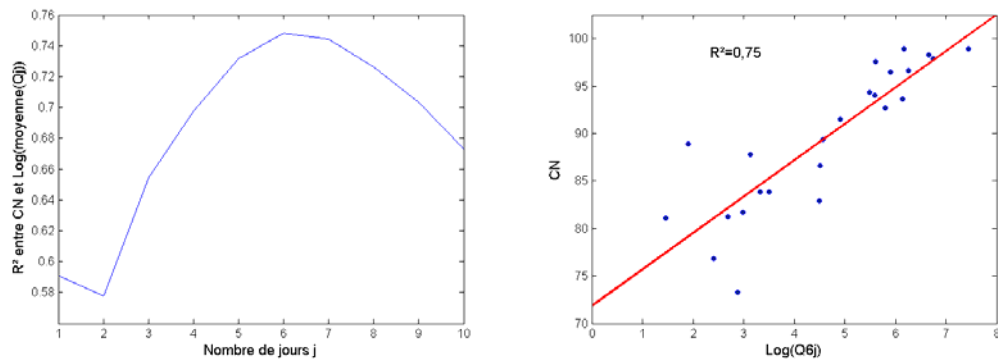


Figure 11 : Relations entre CN et débit moyen sur plusieurs jours avant les épisodes de crue

On obtient ainsi la relation suivante qui permettra d'estimer la valeur du paramètre CN pour chaque épisode de crue, à partir du débit des jours précédents :

$$CN = 3,83 \text{Log}(Q_6) + 71,86 \quad (11)$$

Le modèle avec les paramètres  $CN$ ,  $S_t$  et  $T_c$  optimisés pour chaque épisode donne des résultats satisfaisants (Table 3), avec un Nash médian de 0,81 et des erreurs sur les volumes de 12% et sur les pointes de crues de 21%. Les résultats complets de calibration sont présentés dans l'annexe 2. Le modèle tend à surestimer des volumes (+6,18%) mais sous-estimer les pointes de crues (-15,9%). Ces résultats sont obtenus en utilisant une précipitation moyenne sur le bassin calculée avec 2 pluviographes pour les épisodes entre 1981 et 1987 (20 épisodes) et 1 pluviographe, Mdouar, pour les épisodes après 1987. Pour les 20 épisodes avec 2 pluviographes disponibles, en utilisant seul le pluviographe de Mdouar on obtient des résultats très similaires à ceux obtenus en utilisant Mdouar et Bab Taza. En considérant seulement ces 20 épisodes on obtient des erreurs sur les volumes de 10% avec Mdouar et de 11% avec Mdouar+Bab Taza. De même, sur les pointes de crues l'erreur globale passe de 18% avec Mdouar et 16% avec Mdouar+Bab Taza. Ainsi les précipitations mesurées à Mdouar sont plus représentatives de la pluie totale enregistrée au niveau du bassin que celles de Bab Taza. Néanmoins, on peut attribuer une large part des erreurs du modèle à la mauvaise

connaissance de la variabilité spatiale de la pluie, ne disposant que d'un nombre très réduit de pluviographes pour une telle superficie. Les simulations seraient sans doute améliorées en disposant d'un nombre plus important de stations au sol ou de données de précipitations radar.

#### 4.2 Validation du modèle

Pour tester l'applicabilité du modèle développé en prévision, on procède à une validation. La procédure de validation retenue est une approche de ré-échantillonnage de type *Jack-Knife*. Elle consiste, pour les  $n$  épisodes de crue disponibles, à retirer successivement chaque épisode  $i$ , ré-estimer les paramètres du modèle avec les épisodes  $n-1$  restants, puis utiliser le modèle afin de simuler l'épisode  $i$  et enfin mesurer l'erreur par rapports aux données observées. Cette approche permet d'appréhender les incertitudes globales sur un grand nombre d'épisodes, et ainsi d'évaluer la performance que le modèle pourrait avoir en prévision sur de nouveaux épisodes.

Table 3 : Indicateurs de performance du modèle en calibration et validation

Indicateurs	Calibration	Validation
Nash médian	0,82	0,77
Nash moyen	0,77	0,65
RBIAS Volume	6,18%	2,76%
RRMSE Volume	11,76%	20,73%
RBIAS Qmax	-15,96%	-18,48%
RRMSE Qmax	21,28%	29,80%

En appliquant cette approche, on observe que les paramètres du modèle de l'hydrogramme unitaire de Clark varient peu. Ainsi en retirant chaque épisode et en recalculant la valeur moyenne de  $S_t$  et  $T_c$  avec les épisodes restants, on obtient des erreurs moyennes de 0,08 pour  $S_t$  et 0,1 pour  $T_c$  (correspondant à des RRMSE de 3% et 2%, respectivement) ce qui indique une très faible variation de ces paramètres selon les épisodes. Ainsi la procédure de ré-échantillonnage ne concernera que le paramètre CN, les autres paramètres étant fixés. Le CN est ré-estimé pour chaque épisode avec la procédure de ré-échantillonnage. Pour chaque épisode, la relation de l'équation 11 est ré-estimée avec les épisodes restants. Les variations du paramètre CN calculé ainsi sont plus fortes que celles obtenues sur les paramètres  $S_t$  et  $T_c$ , avec des variations supérieures à 4%. De plus, les valeurs prises par CN ont une grande influence sur les volumes écoulés lors de chaque crue. La performance du modèle en validation est dégradée par rapport à sa performance en calibration. Les résultats demeurent néanmoins acceptables (Table 3), avec un Nash médian de 0,77 et des erreurs sur les volumes de 21% et sur les pointes de crues de 30%.

Les résultats de simulation en validation pour chaque épisode sont tracés sur les figures dans l'annexe 3. De manière globale le modèle est capable de reproduire fidèlement les crues, mêmes complexes, du bassin de Mdouar, comme l'indique un Nash median de 0,77. Néanmoins, pour certains épisodes tels que ceux des 20/12/1983, 01/01/1986, 07/03/1986, les débits simulés sont fortement sous-estimés par rapport aux débits observés. Ce résultat illustre l'impact des incertitudes sur les précipitations. On peut en effet envisager l'hypothèse que ces épisodes sont mal modélisés à cause de la mauvaise connaissance de la pluie reçue par le bassin ; il est possible que pour ces épisodes la variabilité spatiale de la pluie soit importante et donc que les pluies mesurées uniquement à Mdouar et Bab Taza ne soient pas représentatives.

## 5 MODELISATION DES CRUES AU BARRAGE MAKHAZINE

Après le modèle pluie-débit élaboré pour Mdouar, il devient possible de tester un modèle à l'échelle du bassin tout entier pour modéliser les hydrogrammes entrants au barrage. Néanmoins, on ne dispose que de 3 hydrogrammes à des pas de temps infra-journaliers au barrage, pour les épisodes du 14/11/2002, 08/12/2003 et 29/11/2008 et pour ces 3 épisodes seules les données de précipitations à Mdouar sont disponibles. Les données au barrage sont les apports à différents pas de temps, horaires, aux 3 heures ou 7 heures selon les cas, elles ont été interpolées pour reconstituer des hydrogrammes horaires. Par conséquent, il est impossible de développer un modèle au barrage similaire à celui pour les crues de Mdouar, étant donné la grande incertitude sur les précipitations (un seul poste pour 1800km<sup>2</sup>) et le nombre réduit d'épisodes qui ne permet pas d'évaluer l'incertitude sur les paramètres.

### 5.1 Description du modèle

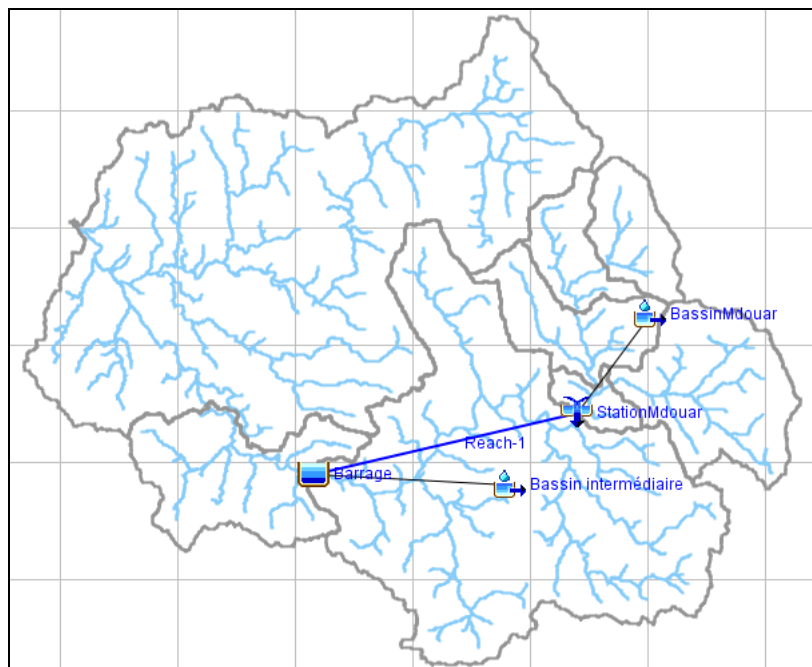


Figure 12 : Schéma du modèle pour la simulation des hydrogrammes au barrage

On ajoute ici au modèle précédemment développé pour Mdouar le bassin intermédiaire, d'une superficie de 1146 km<sup>2</sup> (Figure 12) En l'absence de débits mesurés pour ce bassin, on utilise les mêmes paramètres de transfert et de récession que ceux obtenus pour le bassin de Mdouar. Seul le CN pour le bassin intermédiaire sera calibré pour chaque épisode, le CN obtenu précédemment par calibration pour Mdouar sera conservé. La fonction objective utilise ici l'hydrogramme observé entrant au barrage pour la calibration du modèle. Des essais préliminaires ont indiqué qu'il était nécessaire d'introduire un élément supplémentaire au modèle, pour correctement simuler la propagation des hydrogrammes de Mdouar au barrage. Ainsi un composant de routage a été introduit (reach-1 sur la figure 12). Le modèle de Muskingum a été testé dans un premier temps mais l'estimation des paramètres K et X s'est révélée instable pour les épisodes choisis, induisant des valeurs de paramètres irréalistes. Ainsi un simple modèle de décalage (*lag*) a été retenu, avec un seul paramètre décrivant le décalage en heures entre les 2 hydrogrammes.

Le modèle HEC-HMS permet également de modéliser le comportement d'ouvrages hydraulique, tel qu'un barrage. Dans le modèle HEC-HMS le barrage Makhazine a été représenté par un réservoir, permettant de simuler un débit sortant et la quantité d'eau stockée. Les caractéristiques du barrage ont été rentrées dans le modèle afin de calculer le débit sortant en fonction de la relation hauteur/superficie, hauteur/volume, et hauteur/déversement de l'évacuateur de crue (figure 13). On voit que l'évacuateur de crue de type 'tulipe' commence à déverser à partir d'une cote de 61,5 mètres.

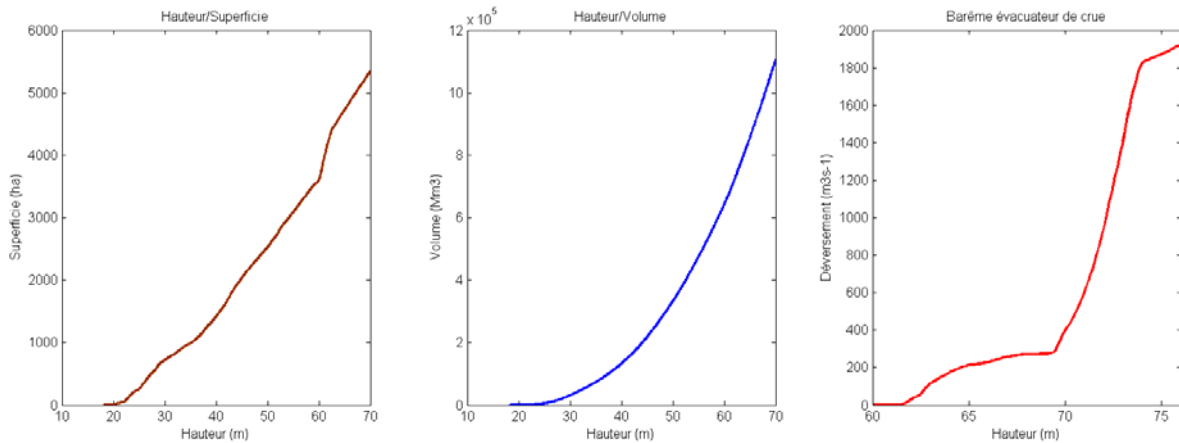


Figure 13 : Caractéristiques du barrage Makhazine

## 5.2 Résultats des simulations

Les paramètres obtenus par calibration sont donnés dans la table 4. On observe que les valeurs du CN calibrées pour le bassin intermédiaire sont dans les 3 cas inférieures aux valeurs de CN obtenues pour Mdouar. Le décalage temporel entre les hydrogrammes de Mdouar et ceux du barrage sont dans les 3 cas très proches, de l'ordre de 3 heures. Pour l'ensemble des épisodes, le biais relatif (RBIAS) obtenu est de 1,7% sur les volumes, 13,3% sur les pointes de crue, l'erreur (RRMSE) est de 6,9% sur les volumes, 18,1% sur les pointes de crue. La figure 14 représente les hydrogrammes simulés au barrage pour les 3 épisodes, on voit que la synchronisation temporelle est bonne et les volumes de crue sont correctement représentés, même si ils sont difficiles à évaluer du fait du lissage temporel des données disponibles au barrage. Le modèle permet aussi de reproduire à la fois le niveau du réservoir du barrage au cours du temps et le débit sortant de l'évacuateur de crue en aval. Dans le cadre d'une utilisation du modèle pour la prévision des crues, ces variables peuvent alors fournir une information très importante pour la gestion du stock durant les crues.

Table 4 : Résultats de modélisation des hydrogrammes entrants au barrage Makhazine

Episodes	CN Mdouar	CN Bassin Intermédiaire	Lag (min)	Volume simulé	Volume observé	Qmax simulé	Qmax observé	Différence volume	Différence Qmax
14nov.2002	76,85	57,865	175,95	11,09	10,5	852,6	736,3	5,6%	15,8%
08déc.2003	98,26	72,942	178,09	44,31	48,06	1374,8	1084,5	-7,8%	26,8%
29nov.2008	88,85	81,426	178,47	9,65	8,99	491,3	504,4	7,3%	-2,6%

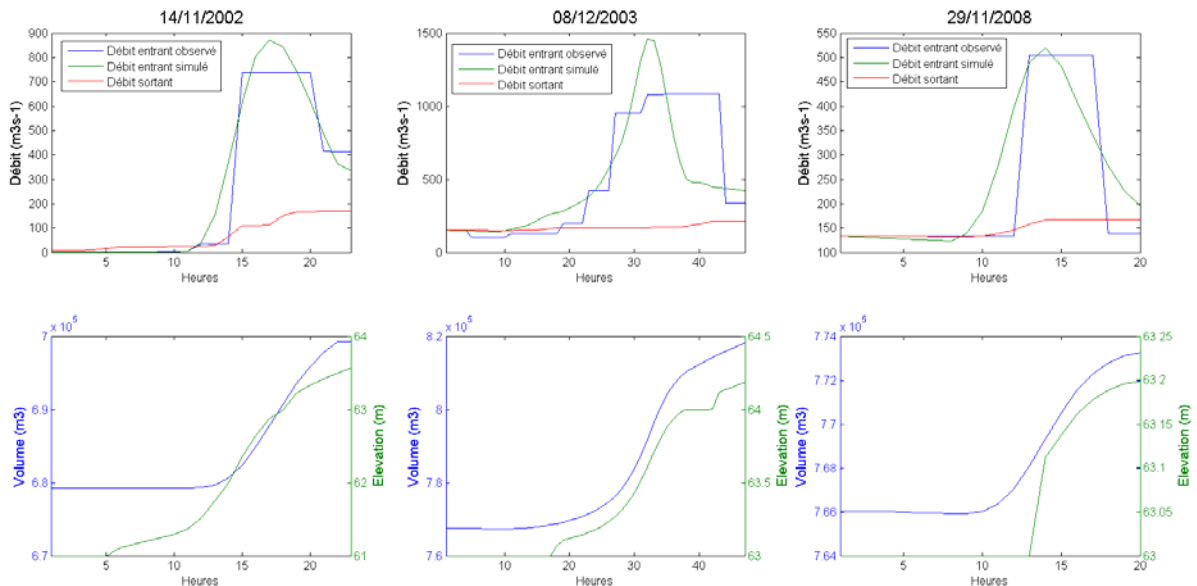


Figure 14 : Résultats de simulation des hydrogrammes entrants au barrage

L'un des intérêts de cette modélisation des hydrogrammes entrants au barrage est qu'il permet de simuler les apports du bassin intermédiaire, pour lequel on ne dispose pas de données. La figure 15 montre pour les 3 épisodes les hydrogrammes observés au barrage et à Mdouar, ainsi que l'histogramme simulé par le modèle correspondant à la contribution du bassin intermédiaire. On constate que le débit est plus important à Mdouar, il constitue la majorité des apports pour les épisodes du 14/11/2002 et du 08/12/2003, tandis que pour l'épisode du 29/11/2008 les apports du bassin intermédiaire sont plus importants. La part relative de la contribution des deux bassins ainsi que le décalage temporel observé entre les hydrogrammes sont la conséquence directe de la localisation et de l'intensité des cellules pluvieuses à l'origine des épisodes de crue. Des épisodes localisés sur la partie amont (Mdouar) vont entraîner un décalage temporel plus important, tandis que des pluies impactant tout le bassin vont produire une contribution similaire des sous-bassins. Cet aspect ne peut pas être modélisé avec les données disponibles pour ce travail. En effet, il est nécessaire de disposer d'une information spatialisée à l'échelle du bassin pour estimer les pluies reçues pour chaque événement. Elle permettrait d'améliorer grandement le modèle, qui fournit des résultats déjà encourageants.

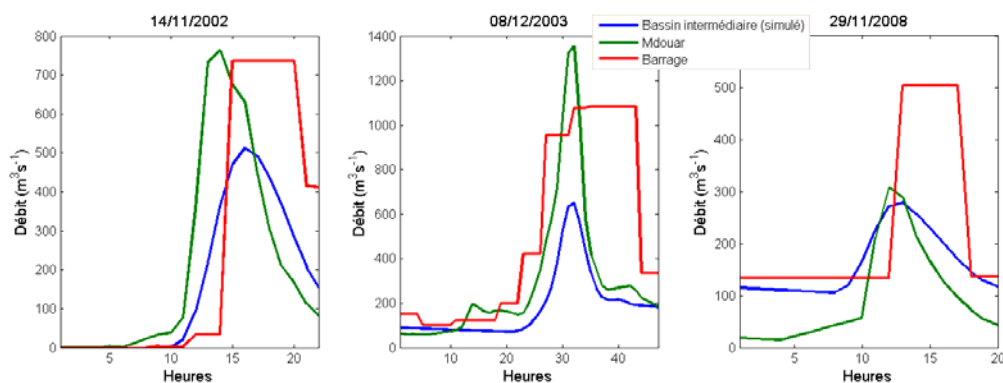


Figure 15 : Hydrogrammes observés à Mdouar (vert) et au Barrage (rouge), et simulés au bassin intermédiaire (bleu)

## 6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Une application de modélisation des crues dans le bassin du barrage Mahkazine a été présentée, en utilisant la plate forme de modélisation HEC-HMS. Le modèle événementiel qui a été développé permet de reproduire, avec un nombre réduit de paramètres les crues dans le sous-bassin de Mdouar (650km<sup>2</sup>) et les hydrogrammes entrants au barrage Makhazine. Malgré la faible densité de postes pluviométriques disponibles, il est possible d'estimer les volumes d'eau générés lors des crues de manière satisfaisante avec des erreurs de l'ordre de 10 à 20%. Il est envisageable d'implémenter ce type de modèle pour un fonctionnement en temps réel car il repose sur des composantes et des équations connues et documentées (voir annexe XX). L'Agence de bassin hydraulique de Tétouan dispose déjà d'un réseau de télémessure reliant les différentes stations de précipitations et de débit du bassin à un poste concentrateur de données. Le modèle pourrait ainsi fonctionner en temps réel, alimenté par les données des stations transmises au poste concentrateur. Un tel outil permettrait d'anticiper la réponse hydrologique du bassin lors des précipitations, avec un temps d'anticipation de l'ordre de 6-8 heures, après un épisode pluvieux. Ainsi la gestion du barrage serait améliorée, permettant à la fois de maximiser le remplissage du réservoir et de minimiser les risques de déversement et d'inondations en aval. Cette modélisation hydrologique pourrait par ailleurs être complétée par une modélisation hydraulique en aval du barrage pour élaborer des scénarios de plaine d'inondation pour différents volumes de lâchers au barrage, afin d'améliorer la gestion du risque inondation au niveau de la ville de Ksar El Kebir.

A l'issue de ce travail ont été produits, outre le présent rapport, un support de formation sur le logiciel HEC-HMS afin de faciliter son déploiement dans des études ultérieures sur d'autres bassins, ainsi qu'une base de données au format DSS des données de pluie et de débit. Cette base de données pourra être alimentée dans le futur grâce aux données collectées quotidiennement par le bureau d'annonce des crues. L'ajout de nouveaux épisodes de crue, notamment au barrage, permettra une estimation plus robuste des paramètres du modèle, car reposant sur un nombre plus important d'épisodes. La calibration d'un tel modèle sur un grand nombre d'épisodes permet en effet d'analyser en détail la variabilité des paramètres et ainsi réduire les incertitudes sur sa capacité à reproduire les crues futures qui seront observées dans le bassin. Une meilleure connaissance des précipitations lors des crues, en particulier leur répartition spatiale, permettra également d'augmenter la performance du modèle. L'estimation des précipitations reçues à l'échelle du bassin pourra être améliorée grâce à l'installation de pluviomètres supplémentaires, en particulier dans les zones de relief les plus importantes. Une autre possibilité serait d'utiliser des données de précipitations estimées par le radar météorologique de la ville de Larache, opéré par la Direction de la Météorologie Nationale et situé à 38 kilomètres en aval du barrage.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Andréassian V., Perrin C., Michel C., Usart-Sanchez I., Lavabre J. 2001. Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models, *Journal of Hydrology* 250, 206–223.
- Arnaud P., Lavabre J., Fouchier C., Diss S., Javelle, P. 2011. Sensitivity of hydrological models to uncertainty in rainfall input. *Hydrological Sciences Journal* 56, 397-410.
- Bouaicha, R., Benabdelfadel, A., 2010. Variabilité et gestion des eaux de surface au Maroc. *Sécheresse* 21, 1–5.
- Bouvier, C., Ayrat, P.A., Brunet, P., Crespy, A., Marchandise, A., Martin, C., 2007. Recent advances in rainfall–runoff modelling: extrapolation to extreme floods in southern France. In: *Proceedings of AMHY-FRIEND International Workshop on Hydrological Extremes, Rende (CS), 3–4 May 2006.*
- Brocca L., Melone F., Moramarco T., Singh V.P., 2009. Assimilation of observed soil moisture data in storm rainfall–runoff modelling. *Journal of Hydrologic Engineering* 14, 153–165.
- Brocca L., Melone F., Moramarco T., Wagner W., Naeimi V., Bartalis Z., Hasenauer S. 2010. Improving runoff prediction through the assimilation of the ASCAT soil moisture product. *Hydrology and Earth System Science* 14, 1881–1893.
- Huang M., Gallichand J., Dong C., Wang Z., Shao M., 2007. Use of soil moisture data and curve number method for estimating runoff in the Loess Plateau of China. *Hydrological Processes* 21, 1471–1481.
- Klemeš V. 1986. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal* 31, 13–24.
- Kohler, M.A., Linsley, R.K., 1951. Predicting Runoff from Storm Rainfall. Res. Paper 34, US Weather Bureau, Washington, DC.
- Marchandise A., Viel, C. 2009 Utilisation des indices d’humidité de la chaîne Safran-Isba-Modcou de Météo-France pour la vigilance et la prévision opérationnelle des crues. *La Houille Blanche* 6, 35–41.
- Moussa R., Chahinian N. 2009. Comparison of different multi-objective calibration criteria using a conceptual rainfall-runoff model of flood events. *Hydrology and Earth System Science* 13, 519–535.
- Sabol G.V., 1988. Clark Unit Hydrograph and r-parameter estimation. *Journal of Hydraulic Engineering* 114, 103-111.

Tramblay Y., Bouvier C., Martin C., Didon-Lescot J.-F., Todorovik D., Domergue J.-M. 2010. Assessment of initial soil moisture conditions for event-based rainfall-runoff modeling, *Journal of Hydrology* 387, 176–187.

Tramblay Y., Bouvier C., Ayrat P.A., Marchandise A. 2011. Impact of rainfall spatial distribution on rainfall-runoff modelling efficiency and initial soil moisture conditions estimation. *Natural Hazards and Earth System Science* 11, 157–170.

USACE. 2010. Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical reference manual version 3.5. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering center, Davis, CA.

USDA-SCS, 1985. National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Washington, DC.

Wahby Y. 2008. Modélisation de la gestion des ressources en eau par le modèle MIKE BASIN et élaboration d'un SIG dans le bassin du Loukkos. Rapport de projet de fin d'étude, Université Mohammed V, Ecole Mohammadia d'ingénieurs de Rabat.

## **ANNEXES**

**Annexe 1 : Cumuls des précipitations horaires disponibles pour chaque épisode**

**Annexe 2 : Résultat de calibration des paramètres du modèle et Nash des épisodes**

**Annexe 3 : Tracé des épisodes en validation**

**Annexe 4 : Prévisions du modèle AL-BACHIR**

**Annexe 5 : Données satellitaires pour la modélisation hydrologique**

**Annexe 6 : Applications opérationnelles en temps réel**

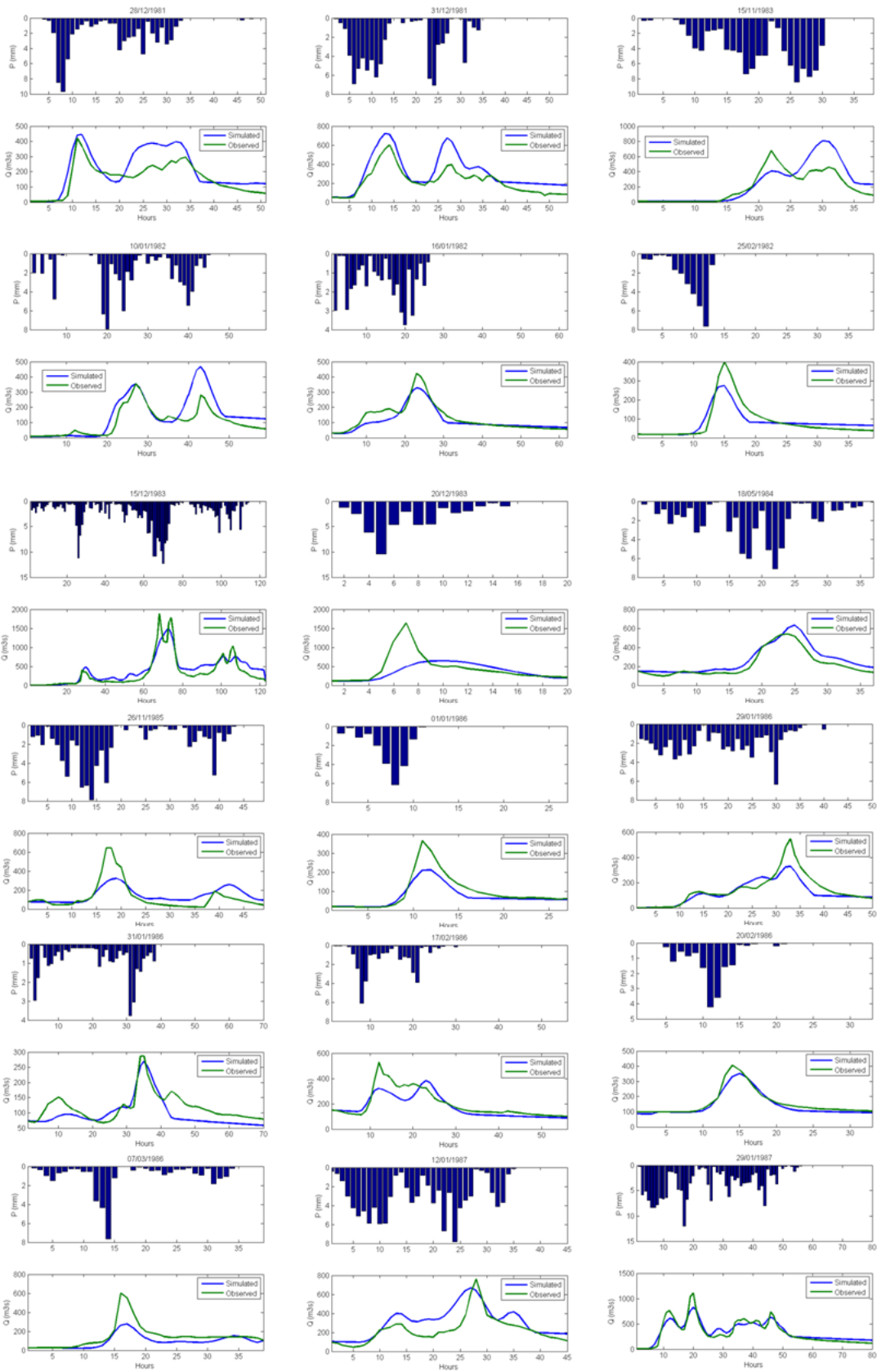
**Annexe 1 : Cumuls des précipitations horaires disponibles pour chaque épisode**

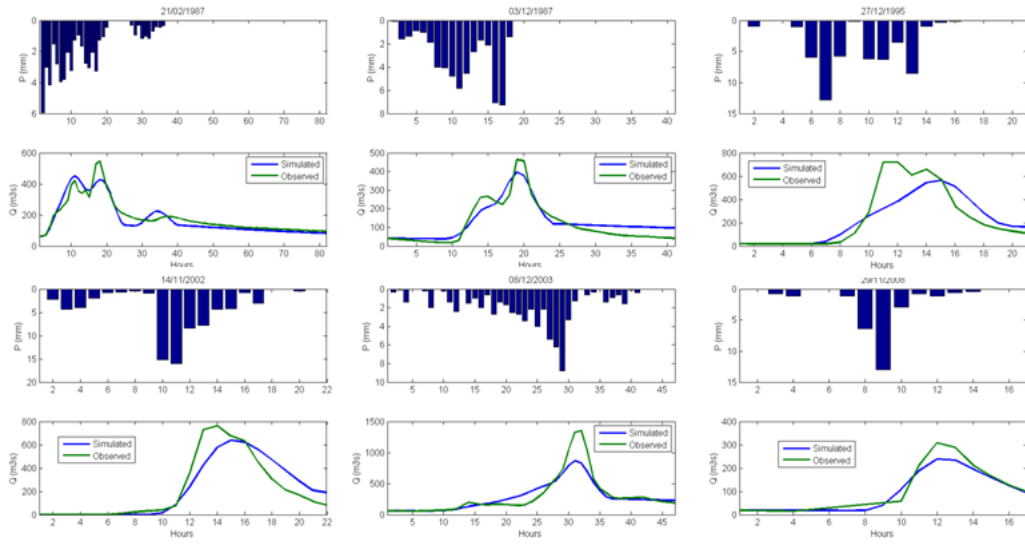
<b>Episodes</b>	<b>Mdouar</b>	<b>Bab Taza</b>	<b>Nakhla</b>	<b>Barrage</b>
28/12/1981	44,6	91	44,9	-
31/12/1981	61,4	88	74,4	-
10/01/1982	51,6	86,2	30,3	-
16/01/1982	43	37,3	33,4	-
25/02/1982	29,1	25	4,6	18,9
15/11/1983	84,4	113,4	45,1	-
15/12/1983	245,7	259,7	114,3	-
20/12/1983	39	47,7	30,3	20,3
18/05/1984	56,4	72,3	43,1	18,6
26/11/1985	77,7	82,8	-	42,8
01/01/1986	19,3	21,7	6,3	0,7
29/01/1986	54,2	87,5	39,6	9
31/01/1986	41,8	20,7	21,4	-
17/02/1986	28,8	34,5	-	-
20/02/1986	15,5	17,4	-	1,5
07/03/1986	42,3	25	20,3	22,3
12/01/1987	81,5	129,1	63,8	43,5
29/01/1987	145,6	215	83,7	80,8
21/02/1987	44,4	72,6	-	24,7
03/12/1987	35,8	68,3	12,5	25,3
27/12/1995	52,8	-	-	-
14/11/2002	75,6	-	-	-
08/12/2003	66,8	-	-	-
29/11/2008	28,2	-	-	-

## Annexe 2 : Résultats de calibration des paramètres du modèle et Nash par épisode

Episodes	CN	St	Tc	Nash
28/12/1981	92,68	5,56	3,31	0,64
31/12/1981	93,65	6,08	2,68	0,75
10/01/1982	86,61	5,33	3,76	0,59
16/01/1982	96,45	1,95	5,58	0,92
25/02/1982	91,47	1,57	6,25	0,82
15/11/1983	81,23	6,38	0,78	0,50
15/12/1983	83,86	2,21	3,83	0,82
20/12/1983	98,90	0,53	3,32	0,42
18/05/1984	82,92	1,54	3,76	0,89
26/11/1985	81,08	2,64	3,96	0,55
01/01/1986	94,37	1,93	4,64	0,91
29/01/1986	87,81	4,77	4,26	0,79
31/01/1986	94,00	1,57	4,60	0,50
17/02/1986	98,93	3,33	5,21	0,81
20/02/1986	97,89	2,46	3,42	0,96
07/03/1986	97,60	1,98	4,61	0,86
12/01/1987	73,28	0,97	7,18	0,71
29/01/1987	83,86	2,28	3,74	0,89
21/02/1987	96,64	5,42	2,23	0,88
03/12/1987	81,74	2,12	4,47	0,87
27/12/1995	89,32	0,51	5,15	0,75
14/11/2002	76,85	1,11	3,48	0,84
08/12/2003	98,27	1,05	5,57	0,82
29/11/2008	88,85	1,75	4,63	0,95
<b>Moyenne</b>	<b>89,51</b>	<b>2,51</b>	<b>4,11</b>	<b>0,77</b>

### Annexe 3 : Tracé des épisodes de crue à Mdouar en validation





**Annexe 4 : Prévisions du modèle AL-BACHIR**

Les prévisions issues du modèle AL-BACHIR de la Direction de la Météorologie Nationale ont été fournies pour 3 épisodes de crue ; ceux du 14 novembre 2002, du 9 décembre 2003 et du 29 novembre 2008. Les données sont disponibles toutes les 3 heures, avec une simulation du modèle tous les jours réalisée à minuit. Elles ont été fournies avec un fichier aide (*readme*) sur leur format :

Les fichiers "ascii.PFanneemoisjour.echeance" comportent six colonnes :

Colonne 1: Longitude

Colonne 2: Latitude

Colonne 3: SURFPREC.EAU.CON

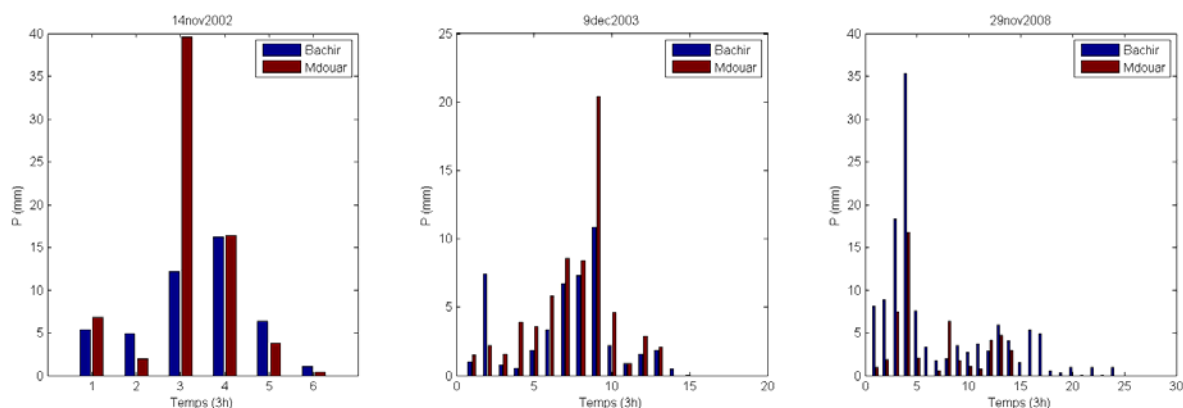
Colonne 4: SURFPREC.NEI.CON

Colonne 5: SURFPREC.EAU.GEC

Colonne 6: SURFPREC.NEI.GEC

Les précipitations prévues par le modèle au point de grille  $i$  = la somme des 4 composantes (colonnes 3, 4, 5 et 6) au point  $i$ . Il s'agit bien des précipitations cumulées. Les précipitations cumulées entre 03H et 06H par exemple = RR à 06H - RR à 03H

Les données pour les 3 épisodes, contenus dans 380 fichiers individuels, ont été extraites grâce à un code développé sous Matlab. Etant donné que seule la station de Mdouar dispose d'enregistrements de précipitations pour ces épisodes, les données des points de grille du modèle AL-BACHIR ont été interpolées linéairement à la station de Mdouar (il est à noter qu'un biais est introduit quand on compare des données spatialisées en grille à des données ponctuelles. Il faudrait comparer les sorties de AL-BACHIR avec des données de précipitations interpolées, ou des données radar).



<b>Episodes</b>	<b>Cumul Bachir</b>	<b>Cumul Mdouar</b>	<b>Différence</b>
14-nov-02	46,1	69,0	-33,26%
09-déc-03	46,9	66,5	-29,47%
29-nov-08	123,7	51,8	138,79%

On constate que le modèle AL-BACHIR permet de reproduire l'occurrence des précipitations, mais pas leur intensité, qui est une variable météorologique très difficile à simuler. Ces données pourraient néanmoins être utilisées pour établir des seuils de vigilance à partir des cumuls journaliers.



## Annexe 5 : Données satellitaires pour la modélisation hydrologique

Des produits dérivés de l'information satellitaire ont été récemment rendus disponibles pour la communauté scientifique, il s'agit des données TRMM et ASCAT. Dans un futur proche, ils pourraient être utiles pour des applications opérationnelles au Maroc.

### TRMM

Les données TRMM ('Tropical Rainfall Measuring Mission', <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>) sont des données de précipitations estimées à partir de données satellites par point de grille avec une résolution de 0.25°, sur les latitudes comprises entre 50°N et 50°S. Néanmoins, au-delà des cumuls mensuels de nombreuses études ont montré que dans l'état actuel ces données ne sont pas utilisables au pas de temps quotidien ou horaire sans correction. Les données sont accessibles en téléchargement par FTP = <ftp://trmmopen.gsfc.nasa.gov/pub/merged/>

Références :

- Hughes D.A. 2006. *Comparison of satellite rainfall data with observations from gauging station networks. Journal of Hydrology* 327, 399– 410.
- Montero-Martínez, G., V. Zarraluqui-Such, and F. García-García. 2012. *Evaluation of 2B31 TRMM-product rain estimates for single precipitation events over a region with complex topographic features, J. Geophys. Res., 117, D02101, doi:10.1029/2011JD016280.*
- Stisen S., Sandholt I. 2010. *Evaluation of remote-sensing-based rainfall products through predictive capability in hydrological runoff modelling Hydrol. Process.* 24, 879–891.

### ASCAT

Les données ASCAT (<http://www.esa.int/esaME/ascats.html>) permettent depuis 2007 d'obtenir une estimation de l'humidité des sols à l'échelle globale à une résolution de 25km<sup>2</sup>, une variable importante pour la connaissance des conditions de saturation des bassins versants. L'assimilation de ces données dans des modèles hydrologiques a été testée avec succès pour des bassins méditerranéens. Elles sont déjà utilisées pour des applications opérationnelles, et disponibles par FTP après inscription = <http://www.ipf.tuwien.ac.at/radar/index.php?go=ascats>

Références :

- Brocca L., F. Melone, T. Moramarco, W. Wagner, V. Naeimi, Z. Bartalis, and S. Hasenauer. 2010. *Improving runoff prediction through the assimilation of the ASCATsoil moisture product. Hydrol. Earth Syst. Sci., 14, http://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/7/4113/2010/hessd-7-4113-2010.html*
- Brocca L, et al. 2012. *Soil moisture estimation through ASCAT and AMSR-E sensors: An intercomparison and validation study across Europe. Remote Sensing of Environment* 115 (2011) 3390–3408
- Dharssi I., K. J. Bovis, B. Macpherson, and C. P. Jones. 2011. *Operational assimilation of ASCAT surface soil wetness at the Met Office. Hydrol. Earth Syst. Sci., 15, http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/2729/2011/hess-15-2729-2011.html*

## Annexe 6 : Applications opérationnelles en temps réel

Le modèle développé pourra être utilisé à des fins opérationnelles si des données de précipitations et de débit à Mdouar sont disponibles en temps réel. En effet, le système de télémessure mis en place à l'ABHL ces deux dernières années permettrait d'alimenter un tel modèle. Dans le cas du bassin de Mdouar, les équations du modèle sont documentées (section 3.1, 3.2 et 3.3) ; elles associent une fonction de production de type SCS, un hydrogramme unitaire de Clarke pour le transfert et une représentation du débit de base par une fonction de récession exponentielle. Les paramètres ont été calibrés et validés dans les sections précédentes (4.1 et 4.2), permettant ainsi de simuler un débit à Mdouar pour chaque pas de temps  $t$  :

- Le débit de base en début d'évènement  $B_i$  est fixé grâce au débit enregistré à Mdouar à  $t_0$ . Les paramètres de constante de récession et du seuil sont fixes, avec  $R_c = 0,75$  et  $T_d = 0,3$ .
- Les paramètres de l'hydrogramme unitaires sont également fixes, avec le temps de concentration  $T_c = 4,1$  et le coefficient de stockage  $S_i = 2,5$ .
- Seule la valeur de CN varie par évènement, on peut l'estimer en utilisant l'équation 11, qui relie les valeurs de CN avec le logarithme du débit journalier moyen des 6 jours qui précèdent la date de l'évènement que l'on veut modéliser.

Avec un tel modèle, pour chaque pas de temps où des données de précipitations seront disponibles (par exemple chaque heure) on peut simuler la réponse du bassin en produisant un débit à Mdouar. On peut donc reproduire au cours du temps un hydrogramme de crue, permettant ainsi d'anticiper la réponse du bassin. On pourra également envisager une procédure d'assimilation en temps réel des débits mesurés à Mdouar, afin de re-calibrer les paramètres du modèle au cours de l'épisode et ainsi mieux reproduire la crue en train de se dérouler. Cette procédure peut être mise en place par l'utilisation d'un filtre de Kalman, méthode fréquemment utilisée pour l'assimilation de données.

Ce type de modélisation en temps réel peut être développé avec des langages de programmation classiques (C++, Fortran...), ou encore en utilisant des plates-formes de modélisation déjà existantes, parmi lesquelles :

- Corps Water Management System (CWMS)  
[www.hec.usace.army.mil/cwms/cwms.html](http://www.hec.usace.army.mil/cwms/cwms.html)
- PALM coupler  
[www.cerfacs.fr/globc/PALM\\_WEB/](http://www.cerfacs.fr/globc/PALM_WEB/)