

Sommaire

<i>Remerciements</i>	ii
RESUME	iv
ABSTRACT.....	iv
Liste des figures	v
Liste des tableaux.....	vii
Sommaire	viii
INTRODUCTION	1
1) L'objectif du projet.....	1
2) Pourquoi travailler sur le bassin versant du N'fis ?	2
3) L'organisation du rapport	2
4) Présentation de service d'accueil.....	3
Chapitre I :PROCESSUS DE GENESE ET DE PROPAGATION DES CRUES ET LEURS MODELISATIONS	6
I- Les processus de genèse et de propagation des crues.....	6
1-Théorie de Horton à propos du ruissellement	6
2-Théorie des aires contributives saturées	7
II- LA MODELISATION HYDROLOGIQUE	9
1)Modèles pluie-débit	9
2) Modèles débit-débit	12
CHAPITRE II : ZONE DE ETUDE ET DONNES DISPONNIBLES.....	24
I-Présentation du zone d'étude : le bassin de l'oued N'fis	24

1) Localisation géographique.....	25
2) Géologie générale et lithologie.....	27
3) Le climat et végétation :	29
4) Réseau hydrographique :	29
II-Analyse hydrologique	31
1) Précipitations	31
2) Débits de crues.....	37
CHAPITRE III : CALAGE DU MODELE DE MUSKINGUM SUR LE BASSIN DU NFIS ET L'APPORT DE CELUI-CI SUR LA GESTION DU BARRAGE DE WIRGANE.....	50
I- Calage de modèle	50
1) Méthodologie utilisée dans ce projet :.....	50
2) Calage du modèle et ses critères d'évaluation.	51
3) Validation du modèle.....	54
4) Commentaire sur les résultats de la validation:	57
II - L'apport du modèle calé A la gestion du barrage Wirgane.	58
1) Présentation de barrage Wirgane	58
2) Démarches	59
CONCLUSION ET PRESPECTIVES.....	67
ANNEXES.....	71

INTRODUCTION

L'analyse et la caractérisation précise de la variabilité des ressources en eau , l'aménagement des barrages sur des fleuves et leurs gestions notamment en périodes de crues, ou l'exploitation des cours d'eau pour l'irrigation supposent une bonne connaissance des crues, cela constitue un domaine de recherche indispensable, en ce sens qu'il doit déboucher sur l'élaboration de scénarios permettant la prévision et la gestion de ces ressources. «Le développement de l'informatique et des études sur les systèmes complexes naturels (le bassin versant), ont provoqué ces dernières décennies, une prolifération de modèles mathématiques en hydrologie, qui aident à comprendre, gérer et réduire la complexité des différents phénomènes hydrologiques» (Benkaci et Dechemi, 2004).

Le bassin du N'FIS est le sous bassin principal de l'oued Tensift. Il est nécessaire en période de crue de faire une bonne prévision des débits ou des hauteurs d'eau qui vont être atteintes à cause des enjeux à l'aval du N'fis, qu'il s'agisse de pertes humaines ou économiques. Le premier est lié à la sécurité des population et le deuxième à la conservation des terrains agricoles , à la sécurité des barrages Wirgane et Lalla Takerkouste , et à la valeur économique de l'eau. Le N'FIS est connu pour ses crues dévastatrices, notamment celle du 28/10/1999 (débit de pointe de $1575 \text{ m}^3/\text{s}$), qui causent des dégâts considérables : destruction des terrains agricoles par l'érosion agressive, envasement des retenus des barrages et inondation des axes routiers.

.

1) L'OBJECTIF DU PROJET

Dans le but d'assurer un suivi continu de la situation hydrologique sur ce bassin, minimiser les dégâts et garantir une gestion optimale des retenues des barrages (Wirgan et Lalla Takarkouste), l'ABHT souhaite développer la modélisation des crues basé sur le modèle de Muskingum. Mon stage de fin d'étude de Master, s'inscrit dans le cadre de ce projet. Ce stage à pour objectif de

calibrer un modèle de transfert ou routage hydrologique reposent sur une représentation globale de phénomène dans le réseau hydrographique du sous bassin versant du N'fis pour pouvoir simuler un débit à l'aval de oued N'fis à partir d'un débit amont de ce dernier. Cet outil peut être intégré à la chaîne de prévision des crues et être directement utilisable par l'agence du bassin hydraulique de Tensift.

2) POURQUOI TRAVAILLER SUR LE BASSIN VERSANT DU N'FIS ?

La modélisation des crues pour faire une bonne prévision de ceux-ci sur les bassins versants marocain est un domaine intéressant surtout ces derniers années pendent lesquelles le Maroc a connu des inondations très importantes causant de grands dégâts. Dans ce travail on choisit le bassin de N'fis car les principaux sous bassins du Tensift (l'ourika à Amenzal, Agnous et Tiourdiou) ont déjà un système d'annonce des crues, alors que ce n'est pas encore le cas du N'fis où deux barrages importants (Lalla Takerkouste et Wirgane) existent. De plus, l'utilisation du modèle de Musingum est conditionné par l'existence de stations amont et aval ce qui est le cas du N'fis.

3) L'ORGANISATION DU RAPPORT

Ce rapport de projet de fin d'étude s'organise en 3 chapitres. Après une présentation du service d'accueil (ABHT), le première chapitre est une synthèse bibliographique des processus de genèse des crues, et différentes modèles existants (modèles pluie-débit et débit-débit) en présentant brièvement les quelques équations et notions sur lesquelles reposent ces dernières avec une présentation détaillée du modèle de Muskingum. Le deuxième chapitre s'attache à la caractérisation de zone d'étude par une analyse hydrologique à partir des données disponibles à l'ABHT pour comprendre le comportement de bassin du N'fis lors d'un événement pluvieux. Le troisième chapitre sera consacré à l'application du modèle de Muskingum sur le bassin versant du N'fis. Pour valider notre modèle on comparera les débits simulés par routage aux débits observés mesurés à des stations hydrométriques, puis on exploitera les résultats pour la gestion de la

retenue du barrage Wirgane. Enfin, nous présenterons les conclusions et les perspectives que nous tirons de ce travail.

4) *PRESENTATION DE SERVICE D'ACCUEIL*

Instaurée par le décret n° 2-00-479 du 14 novembre 2000 et, en application de l'article 20 de la loi 10/95 sur l'eau, l'agence du bassin hydraulique du Tensift est administrée par un conseil d'administration composé de tous les acteurs de l'eau : élus, associations professionnelles, groupements d'usagers, industriels, agriculteurs, établissements publics et départements ministériel, qui décident ensemble des plans, des programmes et projets de développement des ressources en eau concernant son bassin hydrographique. Elle est opérationnelle depuis le 8 avril 2002.

L'agence de bassin hydraulique du Tensift a pour mission d'évaluer, de planifier, de développer et de gérer les ressources en eau au niveau de sa zone d'action.

La zone d'action de l'agence correspond au bassin hydraulique du Tensift (Figure i.1) et s'étend sur une superficie de 24.800 km². Le cadre géographique est très varié et renferme six grands ensembles naturels : la plaine de bahira-Gantour, la chaîne des jebilets, le Haouz de Marrakech, le bassin d'Essaouira-Chichaoua, l'ancien massif du Haut atlas et enfin le haut atlas occidental. Le climat aride et semi aride est l'élément qui donne le plus d'homogénéité à la région.

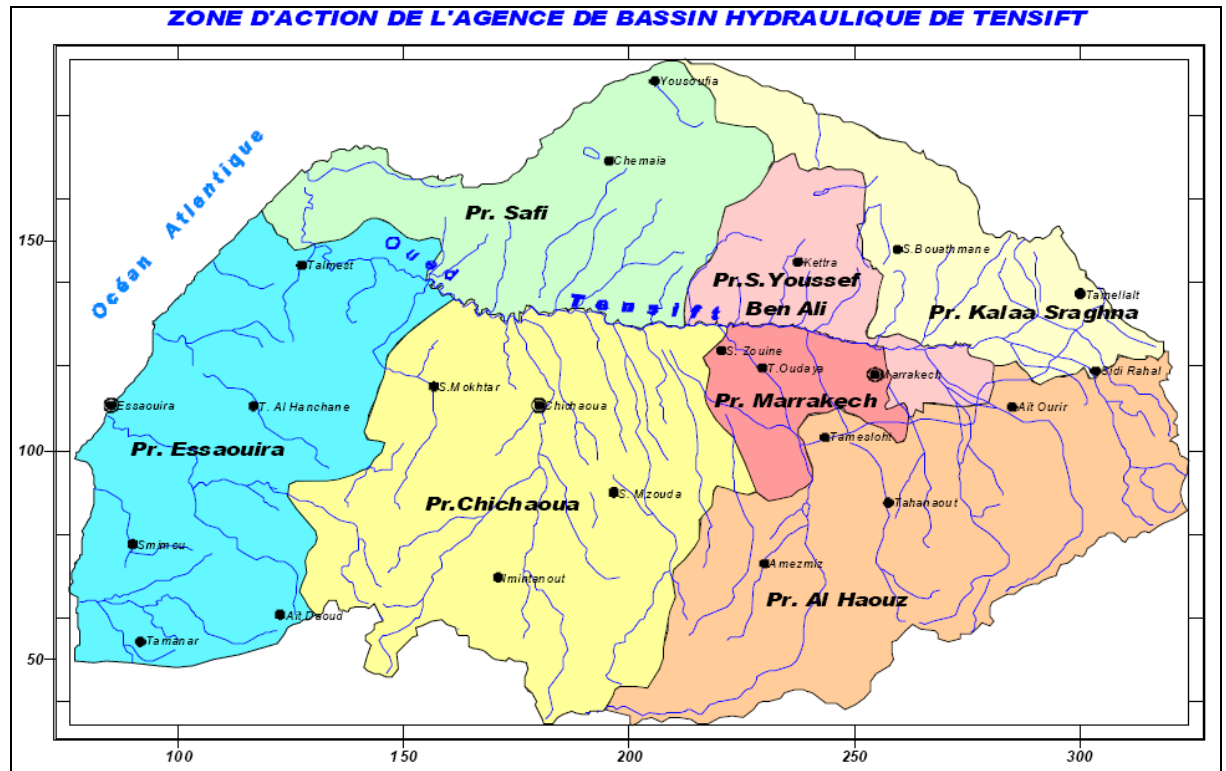


Figure i.1 : Zone d'action de l'agence de bassin hydraulique de Tensift (d'après l'ABHT)

L'agence est organisée en 4 divisions, j'ai été accueilli au sein de la division « Développement des ressources en eau » qui composé de 3 services

➤ *Service Suivi et Evaluation des ressources en eau*

- Gère le fichier IRE (= Inventaire des Ressources en Eau) et les réseaux de mesure;
- Gère le réseau d'annonce de crues;
- Réalise les études sur les ressources en eau du bassin;
- Réalise les travaux de recherche d'eau souterraine et les prospections géophysiques;
- Edite les annuaires, les monographies et les bulletins de situation hydrologique;
- Programme et coordonne les activités du PAGER (= Programme d'Approvisionnement des Groupements Ruraux en Eau potable) au niveau du bassin.

➤ *Service Planification des ressources en eau*

- Etablit et actualise les PDAIRE (= Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau) et suit leur mise en œuvre ;
- Suit la situation d'AEP (= Alimentation en Eau Potable) des villes et centres au niveau du bassin ;
- Réalise les études économiques des projets d'aménagement des ressources en eau ;
- Réalise les études d'impact sur les ressources en eau en coordination avec les autres services de l'agence
- Participe aux études d'aménagement du bassin.

➤ *Service gestion et préservation des ressources en eau*

- Elabore, assure et met en œuvre la stratégie de gestion intégrée des ressources en eau;
- Suit la situation des retenues de barrages et des nappes d'eau souterraine ;
- Elabore les programmes prévisionnels de fourniture d'eau et leur ventilation en collaboration avec les usagers et veille à leur mise en œuvre ;
- Elabore et met en œuvre, en collaboration avec les différents partenaires de l'agence les plans d'intervention pour faire face aux pénuries d'eau ;
- Elabore et met en œuvre des programmes de gestion des crues et des plans d'intervention pour atténuer les dégâts qu'elles occasionnent ;
- Elabore et met en œuvre les programmes de développement des ressources en eau non conventionnelles (recharge artificielle, réutilisation des eaux usées, des eaux saumâtres etc....) ;
- Gère le laboratoire et réalise les analyses de la qualité de l'eau et l'inventaire des foyers de pollution ;
- Elabore et met en œuvre avec les partenaires de l'agence, des programmes de Lutte contre la pollution des ressources en eau.

CHAPITRE I : PROCESSUS DE GENESE ET DE PROPAGATION DES CRUES ET LEURS MODELISATIONS

I- LES PROCESSUS DE GENESE ET DE PROPAGATION DES CRUES

L'objectif de cette partie est de présenter une revue bibliographique des processus de genèse des crues pour comprendre leurs complexités. Cette partie s'appuie sur les revues bibliographiques d'Ambroise (1999), d'Estupina-Borrell (2004), et de Weill (2007).

«Comprendre les processus dominants dans la genèse des débits des rivières est encore aujourd'hui une question clé de l'hydrologie. En effet, le fonctionnement hydrologique des bassins versants et des versants reste encore mal connu» (Weill, 2007).

Dans la dimension latérale de l'écoulement de surface, il s'agit surtout de conceptualiser les transferts du lieu de production vers le cours d'eau. On distingue le ruissellement de surface qui est généré par excès d'infiltration (ruissellement Hortonien), du ruissellement sur surface saturée (ruissellement de Dunne) (Dunne, 1968).

1-Théorie de Horton à propos du ruissellement

Cette théorie (Horton, 1933) est la plus connue pour expliquer la réponse rapide des bassins versants aux événements pluvieux. Celle-ci stipule que «l'écoulement apparaît lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité maximale du sol à absorber l'eau. Cette capacité, caractérisée par l'infiltrabilité du sol, est supposée décroissante dans le temps jusqu'à une valeur constante. L'écoulement de surface se produit donc lorsque la capacité d'infiltration devient inférieure à l'intensité des précipitations. Toute l'eau qui ne peut pas être infiltrée dans le sol participe au ruissellement.» Estupina-Borrell,(2004) **(Figure :I .1)**

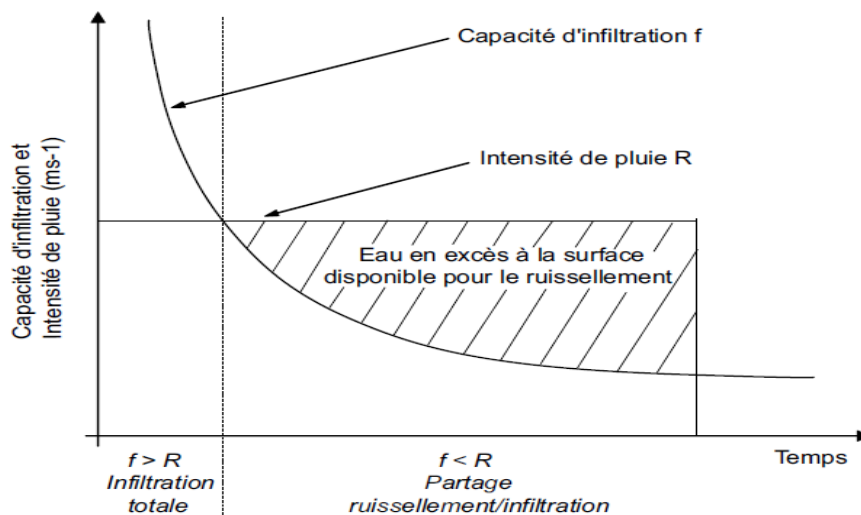


Figure 1.1 :Représentation schématique du ruissellement hortonien (d'après Weil, 2007)

2-Théorie des aires contributives saturées

«Dès 1960, Cappus (1960) a évoqué des phénomènes de genèse de crue bien différents de ceux de Horton. Il parle d'un ruissellement provoqué par la totalité de la pluie tombant sur un sol saturé ou imperméable, dont l'étendue varie avec le niveau de la nappe phréatique. Le bassin étudié était un bassin du Massif Central agricole et pastoral soumis à un climat tempéré. Reprenant cette idée, (Hewlett, 1961) mentionne la notion de « surfaces contributives », qui sera reprise par (Hewlett & Hibbert (1967) en précisant l'idée que les écoulements sub-surfaciques peuvent générer des contributions significantes dans les hydrogrammes de crue et non pas seulement le ruissellement surfacique, suite à des expériences réalisés aux USA. Depuis cette théorie a fait son chemin (Dunne, 1983). On parle aujourd'hui d'aires contributives saturées sur lesquelles le ruissellement apparaît par refus d'infiltration d'un sol saturé (dépassement d'un seuil de saturation) car la totalité de la porosité est déjà occupée par de l'eau (Fig. 1.2). La nappe affleure alors la surface du sol. On parle de « saturation du sol par dessous ». Estupina-Borrell, (2004)

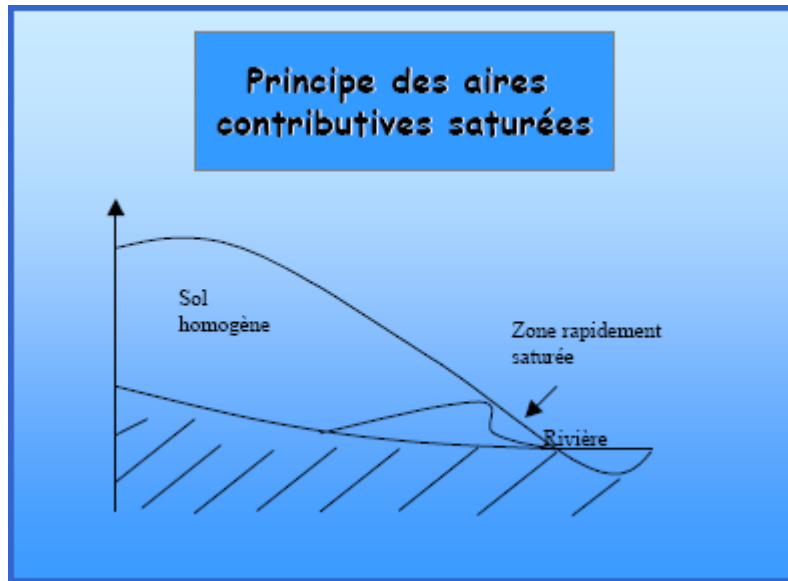


Figure I.2 : le principe de la théorie des aires contributives saturées (d'après Estupina-Borrell, 2004).

La lame d'eau du cours d'eau est soumise à des pertes par transmission et au processus d'évaporation Weill,(2007). Les pertes par transmission représentent un volume d'eau qui s'infiltre dans le lit du cours d'eau et dans les berges. Les pertes sont plus ou moins importantes selon la nature du lit de rivière. Elles contribuent soit à l'alimentation des aquifères, soit à l'alimentation de zones non saturées adjacentes. «L'évaporation le long du réseau hydrographique est fonction de la demande évaporatoire, de la longueur et de la largeur du cours d'eau» Weill (2007).

D'autres phénomènes peuvent être ajoutés à ces écoulements et modifier ainsi les conditions de production du ruissellement. Globalement on peut dire que la genèse des crues est résulte d'une combinaison des processus beaucoup plus complexes qui restent mal connus malgré tous les efforts effectués.

II- LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

Cette partie du chapitre I s'appuie sur les revues bibliographiques très riches de Musy (1998), Ambroise (1999), Serhir (2005), Moussu (2007) et Mouehi (2007).

La première partie de ce chapitre est consacrée à représenter une revue bibliographique qui nous permet de comprendre les processus de redistribution de l'eau de pluie lorsqu'elle atteint le sol. Nous proposons aussi un aperçu bibliographique concernant la modélisation de ces processus c'est-à-dire les différents modèles existents (pluie-débit et débit-débit). Les méthodes de calage ne seront pas abordées dans ce chapitre.

«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'équations. Les objectifs de la modélisation hydrologique sont multiples : prévisions (crues, sécheresses, gestion de l'irrigation d'ouvrages hydroélectriques, recharge d'aquifères) ou simulations de scénario (changement climatique aménagement de bassins d'un point de vue qualité ou quantité d'eau)» Musy, (1998).

1) Modèles pluie-débit

Les modèles pluie-débit décrivent les différentes étapes de transformation de la pluie en débit, autrement dit présentent les différentes voies que suivra l'eau atmosphérique entre le moment où elle atteint le sol et celui où elle rejoint la rivière.

Il existe un grand nombre et types de modèles pluie-débit, qui vont ainsi simuler un débit à l'exutoire d'un bassin versant, parmi les données d'entrées on utilise la précipitation et l'Evapotranspiration potentielle (ETP) comme. Ambroise (1999) a proposé la classification suivante:

- ✓ modèles déterministes ou stochastiques, selon la nature de leurs variables et paramètres et/ou de leurs relations;
- ✓ modèles **empiriques** ou **physiques** (ou théoriques; "physically-based models"), selon la nature des relations utilisées ; avec la classe intermédiaire des modèles conceptuels

(ou paramétriques - termes bien ambigus), reposant sur une certaine conceptualisation du fonctionnement du système mais faisant intervenir des relations empiriques pour le décrire;

- ✓ modèles **globaux** ("lumped models") ou **spatialisés** (ou à discrétisation spatiale; "spatially-distributed models"), selon que l'unité spatiale de base dans les équations est l'ensemble du bassin ou chacun de ses points; avec la classe intermédiaire des modèles semi-spatialisés ("semi-distributed models") où le bassin est découpé en sous-unités supposées homogènes et considérées chacune globalement;
- ✓ modèles **cinématiques** (descriptifs) ou **dynamiques** (explicatifs), selon que l'évolution temporelle est simplement décrite ou mise aussi en relation avec les forces qui la causent.

«D'autres auteurs ont vu qu'il n'y a pas de conflit entre ces différents modèles qui ont été développés à des fins différentes : les modèles physiques et distribués pour une étude plus fine des processus hydrologiques, et les modèles conceptuels pour une détermination des paramètres moyens sur le bassin étudié et des débits à l'exutoire uniquement» Moussu (2007).

Ces modèles diffèrent les uns des autres par leurs segmentations spatiales, le pas de temps de calcul, les variables d'entrée et les paramètres de calage.

On peut schématiser ces différents modèles par la figure (I.3)

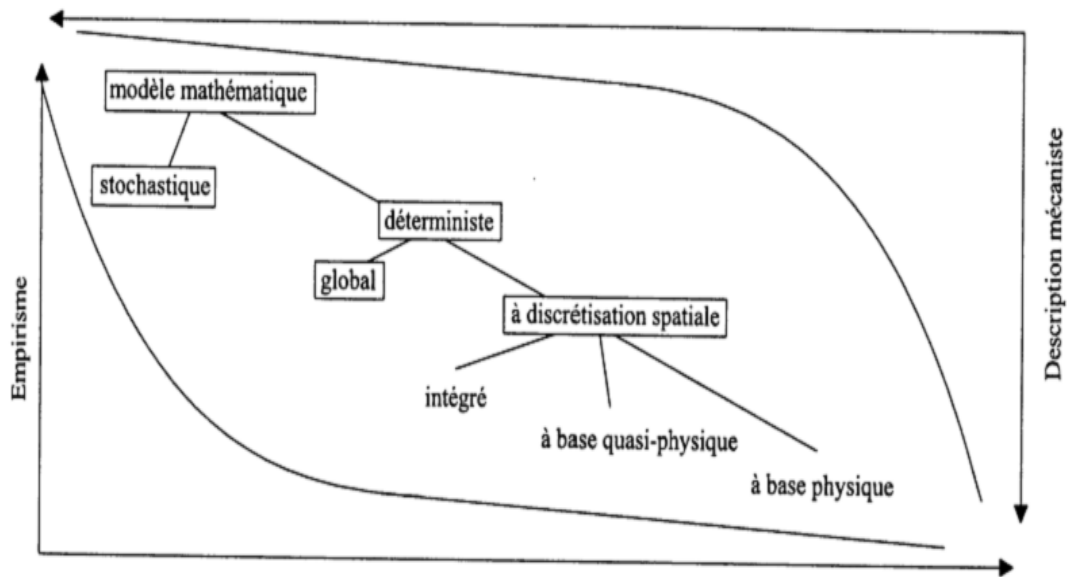


Figure I.3 :Typologie possible des modèles hydrologiques (d'après Jordan, 1992)

Notre recherche et analyse bibliographique nous permet de dire que parmi les modèles pluie-débit les plus connues sur tout en France et simples on trouve le modèle GR4J (pour Génie Rural 4 paramètres) Perrin et al., (2003) (**Figure I.4**), «qui est un modèle hydrologique conceptuel global fonctionnant au pas de temps journalier. Le nombre de paramètres est limité à quatre Ce modèle a été développé sur la base d'un grand nombre de bassins versants, incluant des bassins versants à climats contrastés. En revanche, comme tous les modèles conceptuels, le jeu de paramètres est susceptible de dépendre de la période de calage (longueur et caractéristiques climatiques). Les simulations sont donc soumises, entre autres, aux incertitudes liées au calage des paramètres.» Rojas-Serna, (2005).

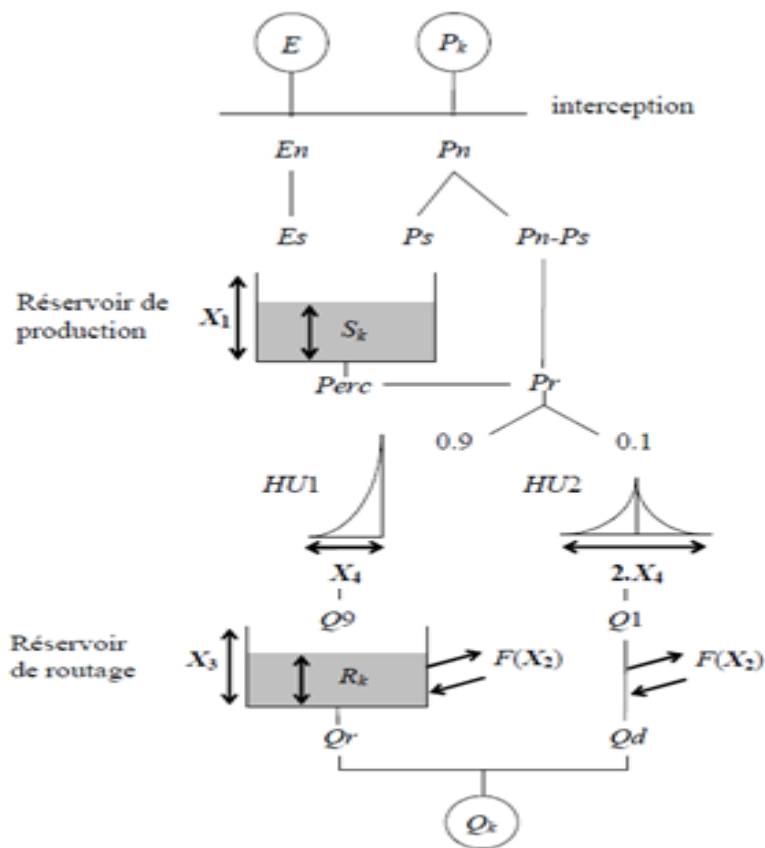


Figure I.4 : Schéma de la structure du modèle GR4J (www.cemagref.fr)

2) Modèles débit-débit

Ces modèles consistent à simuler un débit sortant à un point aval en fonction d'un débit entrant à un point amont, généralement ces modèles négligent la modélisation des apports latéraux.

Selon Moussu (2007) on peut classer ces modèles en :

- ✓ **modèles globaux** réalisent le transfert de l'écoulement d'un point amont à un point aval. Ils ne permettent l'estimation du débit qu'au point aval.
- ✓ **modèles** distribués prennent explicitement en compte la variabilité spatiale des processus, des variables d'entrée, des conditions aux limites et des caractéristiques du bassin versant. Ils permettent donc l'estimation du débit (et de la hauteur d'eau) en tout point du réseau hydrographique.

2-1) Présentation bibliographique du mode de fonctionnement des différents modèles de transfert

Notre recherche bibliographique de cette partie s'appuie sur celles de Seghir (2005), Musy (1998) et de Mouehi (2007).

Les méthodes de calcul de propagation en cours d'eau servent à déterminer les niveaux d'eau et les débits le long d'un système fluvial, lorsque l'écoulement se propage dans le système sous forme d'une onde de crue.

«L'écoulement à surface libre des eaux observé dans les rivières est régi par le système d'équations différentielles non linéaires de Barré de Saint Venant, comprenant une équation de conservation et une équation dynamique. Les conditions habituelles de l'hydrologie permettent souvent de reformuler en les simplifiant ces équations d'hydraulique, en cherchant notamment à les linéaires. Ce sont en général ces modèles plus ou moins simplifiés qui sont mis en œuvre dans les schémas de "routage" des modèles hydrologiques. La théorie de l'onde cinématique, par exemple, est une approximation linéaire du premier ordre du système de Saint Venant».Mouehi (2007)

Les ondes de crue subissent des modifications au cours de leur déplacement vers l'aval. On procède, en fait, au calcul de propagation hydraulique afin d'évaluer le temps de déplacement de l'onde de crue ainsi que les modifications et l'atténuation qu'elle subit en tenant compte des effets de la vitesse de l'onde, de l'emmagasinement et du frottement dans le cours d'eau.

Seghir (2005), a dit qu'il existe des méthodes hydrauliques et hydrologiques et toutes les deux exigent deux équations. **Les méthodes hydrauliques** reposent sur l'équation de continuité et l'équation de quantité de mouvement en canal à surface libre. **Les méthodes hydrologiques** font appel à l'équation de continuité et à la relation empirique : "**emmagasinement - écoulement**".

Le choix d'une méthode dépend des caractéristiques du cours d'eau, de la précision exigée, des données disponibles.

✓ Méthodes hydrauliques

Ces méthodes font appel aux équations dynamiques complètes de Saint-Venant. Celles-ci décrivent l'écoulement unidimensionnel varié à surface libre à l'aide des relations différentielles suivantes :

équation de continuité

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} = q \quad (1)$$

équation de quantité de mouvement

Selon Henderson (1966):

$$S_f = S_0 \left[1 - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \right] \quad (2)$$

écoulement uniforme permanent $\longrightarrow$
 écoulement varié permanent $\longrightarrow$
 écoulement varié non permanent $\longrightarrow$

où

S_0 : pente du lit [$L.L^{-1}$]

S_f : la pente de frottement [$L.L^{-1}$]

g : l'accélération due à la gravité [$L^2.T^{-1}$]

Q : le débit [$L^3.T^{-1}$]

v : la vitesse [$L.T^{-1}$]

B : la largeur à la surface du cours d'eau [L]

y : la profondeur d'écoulement [L]

q : l'apport latéral au cours d'eau [$L^3.T^{-1}$]

x, t : sont les variables distance [L] et temps [T]

S_f peut être exprimée à l'aide de relations comme l'équation de Manning ou de Chézy.

Manning :
$$v = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S_f^{1/2} \quad (3)$$

Chézy :
$$v = c \sqrt{R_h S_f} \quad (4)$$

où n et c sont des coefficients de rugosité.

L'équation (2) subit des simplifications pour réduire la complexité des calculs

La méthode cinématique est le résultat de la simplification la plus radicale de l'équation de mouvement complète. Ne comportant aucun terme de dispersion, elle considère que les seuls termes moteur de l'écoulement sont la pente d'énergie S_f et la pente du lit S_o .

$$S_f = S_o \quad (5)$$

Ainsi dans le cadre de l'approximation cinématique, l'atténuation de l'onde de crue n'est pas simulée. On peut alors faire l'hypothèse d'un régime permanent, tel que décrit par les équations de Manning (eq. 3) ou Chezy (eq. 4). En combinant l'équation de continuité (eq. 1) et l'équation de Manning exprimé en fonction d'une variable on aboutit à l'équation de l'onde cinématique.

La méthode cinématique offre une assez bonne représentation du comportement observé dans les cours d'eau à pente raide et moyennement raide.

La méthode de diffusion est utilisée lorsque les effets de la pente de l'écoulement ne peuvent pas être ignorés (cours d'eau à pente moins raide), l'écoulement n'est donc pas uniforme.

Pour pouvoir simuler l'atténuation de la pointe de crue à mesure que la crue se propage vers l'aval, on utilise l'équation dynamique simplifiée :

$$S_f = S_o - \frac{\partial y}{\partial x} \quad (6)$$

Cette équation est résolue en la combinant avec l'équation de continuité (eq. 1). On obtient alors l'équation de l'onde diffusante.

2-2) La modélisation des crues par méthode de Muskingum :

La méthode des fonctions d'acheminement hydrologique reposent sur une approche conceptuelle des phénomènes. La plus ancienne et la plus populaire est celle de **Muskingum** «du nom de la rivière ou McCarthy l'a appliquée la première fois en 1934» (Hingray et al., 2009). Elle est basée sur l'équation de conservation de la masse et sur une relation empirique : "**débit - emmagasinement**", les deux appliquées à un tronçon de cours d'eau.

La méthode de Muskingum suppose que le profil en travers de la section a une géométrie constante sur tout le bief et que le débit sortant est proportionnel à la section mouillée (Fig :I.5).

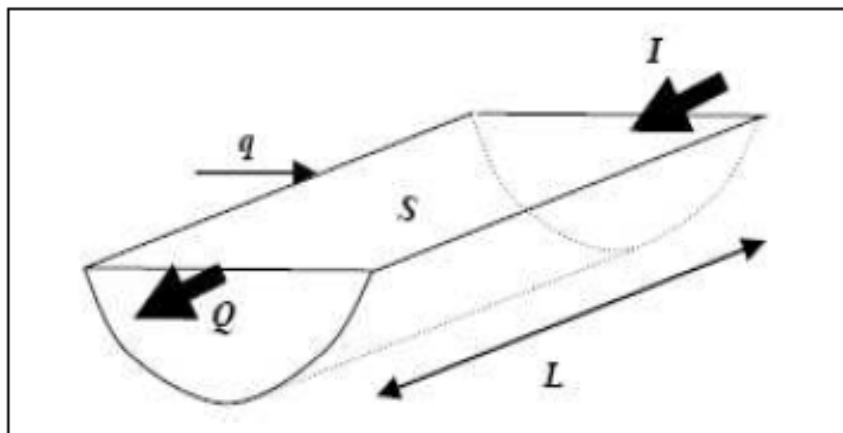


Figure I.5: schéma de la méthode de Muskingum (Dingman, 2002).

L'équation de conservation établit un équilibre entre la différence entre les entrées (I) et les sorties (O) du tronçon et la variation de stockage sur une période de temps choisi.

$$I - O = \frac{dS}{dt} \quad (7)$$

S est l'emmagasinement.

La relation d'emménagement est exprimée dans cette méthode par une fonction linéaire du débit d'entrée au tronçon et de son débit à la sortie.

$$S = KO + KX (I - O) \quad (8)$$

soit

$$S = K (XI + (1 - X) O) \quad (9)$$

K est un paramètre de proportionnalité de l'équation d'emménagement (unités de temps)

X est un facteur de pondération qui établit l'importance relative de l'apport et de la sortie

X varie de 0 à 0,5. Une valeur moyenne est prise à 0.2

Si l'on considère un intervalle de temps Δt , on aura :

$$\frac{S_2 - S_1}{\Delta t} = K[X[I_2 - I_1]] + (1 - X)(O_2 - O_1) \quad (10)$$

L'équation de continuité exprimée sous forme de différences finies s'écrit :

$$\frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{O_1 + O_2}{2} = \frac{S_2 - S_1}{\Delta t} \quad (11)$$

En combinant les relations (10) et (11) et après développement et simplification, on obtient la relation :

$$O_2 = C_1 I_2 + C_2 I_1 + C_3 O_1 \quad (12)$$

où

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (13)$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (14)$$

$$C_3 = \frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (15)$$

Avec :

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1 \quad (16)$$

Le calcul de l'hydrogramme de sortie par Muskingum est basé sur la connaissance des paramètres **X** et **K**. On procède par un calage basé sur des données d'hydrogrammes d'apports et de sortie simultanément observés. Le calage sera plus fiable si plusieurs événements observés sont disponibles.

✓ **L'influence des paramètres K et X de Muskingum sur la propagation des crues.**

D'après (Musy,1999) les valeurs de K et X ont une influence directe sur la propagation des crues sur un bief (Figure: I.6)

Lorsque K augmente, la pointe de la crue à l'aval devient plus tardive.

Le coefficient X est un facteur de pondération entre les débits entrant et sortant. La valeur X=0,5 correspond à une simple translation de la crue. Une diminution de la valeur de X signifie une atténuation plus forte de la pointe de la crue.

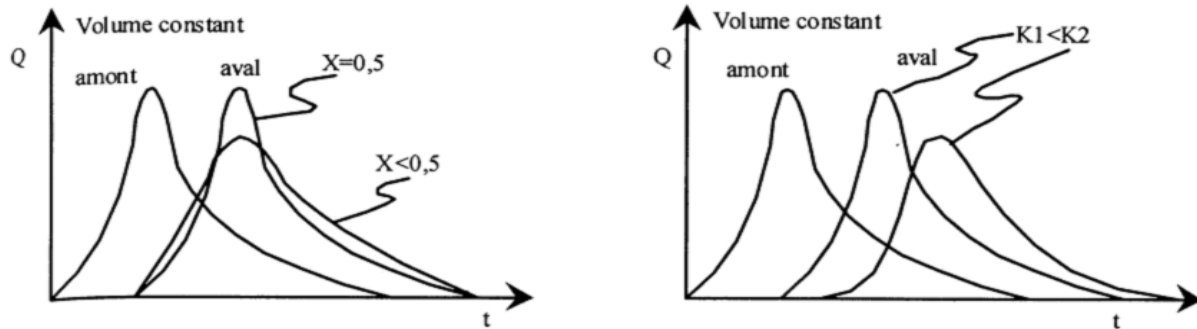


Figure I.6 :Sensibilité des paramètres K et X (d'après Musy, 1999)

✓ Calcul des paramètres K et X

En combinant les équations (10) et (11) on trouve que le paramètre K est égal à :

$$K = \frac{0.5\Delta t[(I_2 + I_1) - (O_2 + O_1)]}{X(I_2 - I_1) + (1 - X)(O_2 - O_1)} = \frac{N}{D} \quad (20)$$

Les méthodes les plus utilisées Hingroy et al, (2009) pour estimer le paramètre K sont :

- **Une méthode graphique** classique, dans laquelle on fixe une valeur approximative de X à la lumière d'indications fournies par des calculs régionaux antécédents ou parfois même arbitrairement ($X = 0.2$) et sur la base des hydrogrammes d'entrée et de sortie observés. On dresse un graphique de N par rapport à D (figure I.7). La courbe est sous forme d'une boucle plus ou moins ouverte.

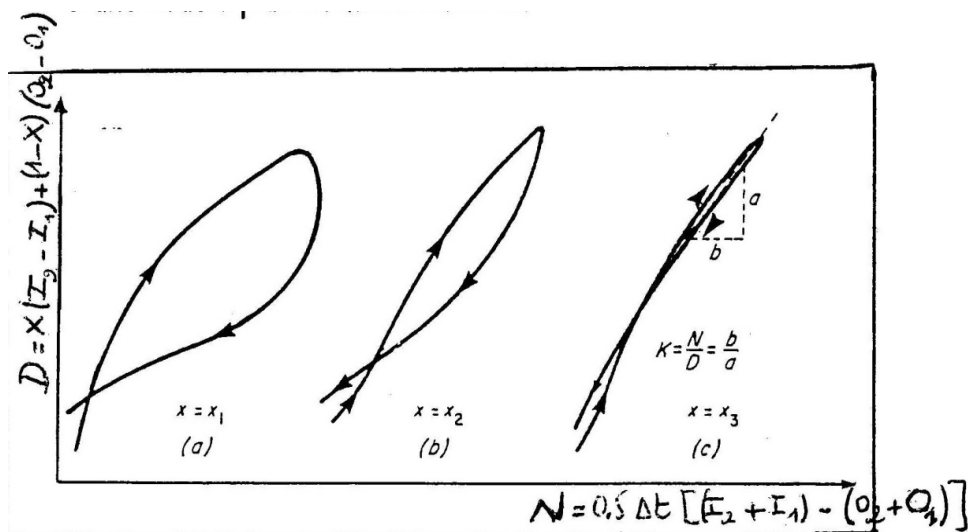


Figure I.7: Détermination des paramètres X et K de Muskingum (Seghir, 2005)

Et on répète l'opération, en changeant la valeur de X jusqu'à tomber sur la valeur X_c dont le graphique de N par rapport à D donne une courbe où les deux parties de la boucle se superposent ou la relation devient linéaire. On retient alors la valeur X_c comme valeur valable.

Le paramètre K se calcule enfin par l'inverse de la pente de la courbe de N par rapport à D .

Soit $K = b/a$.

Dans les cas où on ne dispose pas d'hydrogrammes observés pour trouver les valeurs des paramètres K et X , on doit recourir aux variables physiques que représentent ces paramètres.

K est généralement proche de la durée du déplacement de l'onde de crue à travers le bief. Cette durée est fonction de la vitesse moyenne U de l'écoulement, donc du débit, et de la forme de la section. Le tableau I.1 donne la célérité c de l'onde en fonction de la vitesse de l'écoulement et de la forme de la section. K vaut approximativement $\Delta x / c$, ou Δx est la longueur du bief.

Forme de la section	C (Manning)	C (Chézy)
Rectangle large	$5/3 \cdot U$	$3/2 \cdot U$
Triangulaire	$4/3 \cdot U$	$5/4 \cdot U$
Parabole large	$11/9 \cdot U$	$7/6 \cdot U$

Tableau I.1 :Célérité de l'onde c en fonction de la forme de la section et de la vitesse de l' écoulement V [m/s], pour 2 lois de frottement classiques (Hingray et al., 2009)

Une autre estimation du paramètre K , plus couramment utilisée, consiste à utiliser la vitesse de l' écoulement dans le bief et la longueur de celui-ci.

$$\frac{\Delta X}{U} = K$$

Tel que : Δx est la longueur de bief et U la vitesse de l'écoulement.

La vitesse de l'écoulement se calcule soit à partir du débit maximal (méthode américaine), soit en faisant une moyenne pondérée des débits (méthode française):

$$U = \frac{Q_{max}}{A} \quad \text{méthode américaine}$$

$$\frac{Q_i}{A_i} = U \Rightarrow U = \frac{\sum Q_i w_i}{\sum Q_i} \quad \text{méthode française}$$

Tel que :

A est la surface de bief et A_i représente la surface du tronçon.

Le paramètre X n'est pas directement relié à une variable physique, il est donc nettement plus difficile de lui attribuer une valeur. Le paramètre X est plus petit que 0,5 pour qu'il y ait un étalement de l'onde de crue, $X=0,5$ correspondant à une simple translation.

✓ Les contraintes de calage des paramètres de Muskingum

Les différentes contraintes que les paramètres de Muskingum doivent respecter pour conduire à une propagation satisfaisante des débits sont les suivantes (Hingray et al., 2009) :

Afin d'assurer une propagation satisfaisante des débits, les paramètres du modèle de Muskingum doivent respecter trois conditions :

1- Pour que la crue soit atténuée lors de passage dans le bief, il faut que $X < 0.5$.

2- Les coefficients C_1 , C_2 et C_3 doivent être supérieurs à zéro sinon les débits sortant peuvent prendre des valeurs négatives. Ce ci impose les deux conditions supplémentaires suivantes :

$\Delta x / \Delta t \leq C / 2x$ et $\Delta x / \Delta t \geq C / 2(1 - x)$ ou C est la célérité de l'onde de crue à estimer sur la base d'un débit caractéristique de la crue considérée. Le domaine de validité de paramètres de Muskingum est résumé sur la figure suivante :

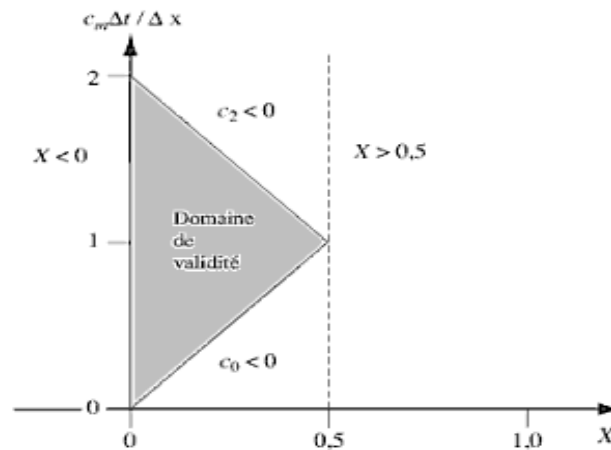


Figure 1.8 : Domaine de validité des paramètres de méthode de Muskingum (d'après Hingray et al., 2009)

3-Le pas de temps Δt doit être suffisamment petit pour permettre une description raisonnable de la montée de la crue. D'après l'USCE, elle doit être inférieure à 5 fois le temps de pointe t_p .

$$\Delta t < t_p / 5$$

4-Mentionnons finalement que pour simuler le routage sur un tronçon de rivière entre deux sections distantes de longueur L le modèle de Muskingum à été souvent appliqué de façon globale en considérant un élément de stockage unique. Il est en fait généralement nécessaire de découper le tronçon étudié en sous tronçon de sorte par exemple que le temps de parcours au sein de chacun d'entre eux soit approximativement égale au pas de temps Δt (USACE 1934) le nombre de N de tronçon suggéré est :

$$N = L / \Delta t \geq T_t / \Delta t \text{ avec } T_t = L / C$$

Ou C est la célérité de l'onde de crue et T_t est le temps de transferts de cette onde de crue au sein de tronçon de longueur L considéré.

En conclusion, la recherche bibliographique montre que malgré les études effectuées jusqu'à présent, notre connaissance du système bassin versant et des processus de la genèse des crues sur restent limitées

De nombreux modèles mathématiques ont été développés depuis les années soixante, pour synthétiser ces processus. Suite à la demande de l'ABHT, nous allons travailler avec le modèle de Muskingum.

CHAPITRE II : ZONE DE ETUDE ET DONNES DISPONNIBLES

I-PRESENTATION DU ZONE D'ETUDE : LE BASSIN DE L'OUED N'FIS

La zone d'étude correspond au Bassin de l'Oued N'fis qui fait partie du bassin hydraulique de Tensift (Fig. II . 1). Ce dernier s'étend sur une superficie de 31827 Km² avec un relief très contrasté (altitude entre 0 et 4167m). Il est limité au Sud par la ligne de crête du Haut Atlas, au Nord par le massif précambrien de Jbilet, à l'Est par la ligne de partage des eaux, peu marquée, séparant le bassin de Tensift de Tessaout, et à l'Ouest par l'Océan Atlantique où se situe son exutoire.

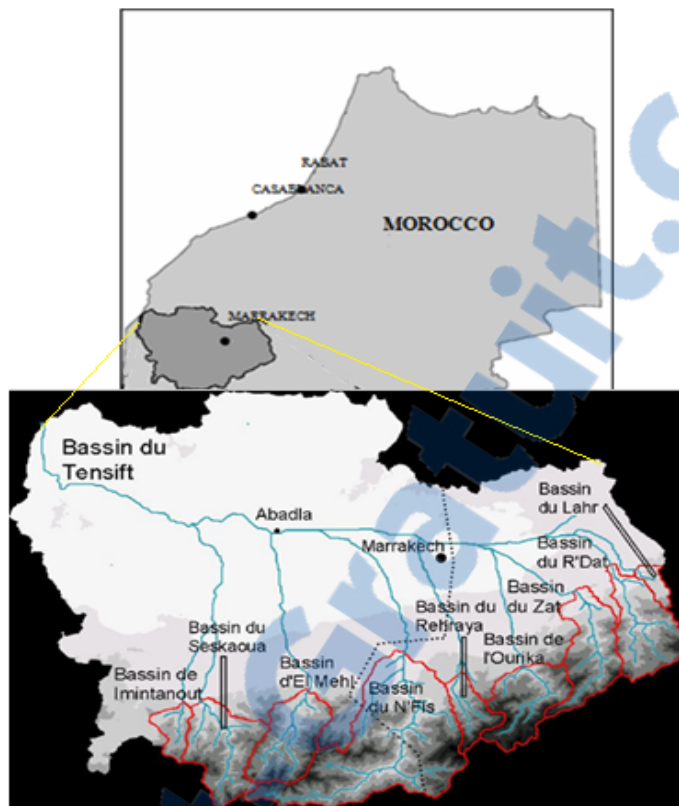


Fig. II.1 : Situation du bassin hydraulique de Tensift et délimitation des sous bassins

(D'après Anne Chaponnière, 2005 modifié) (La ligne de partage climatique est en pointillés)

1) Localisation géographique

Le bassin versant du N'Fis fait partie du Haouz occidental. Il est situé sur le flanc Nord du massif central à l'ouest de Toubkal (4165m), entre les latitudes 31°,22 N- 30°,50 S et les longitudes 7°,55 E-8°,40 W (Figure. II.2). Le N'fis constitue l'un des principaux oueds atlasiques qui débouchent dans le Haouz et qui sont responsables de son comblement. Il appartient au système hydrographique du Tensift qui n'est que sa colature naturelle et l'évacuateur vers l'océan du surplus des apports ayant ruisselé ou percolé à travers la plaine.

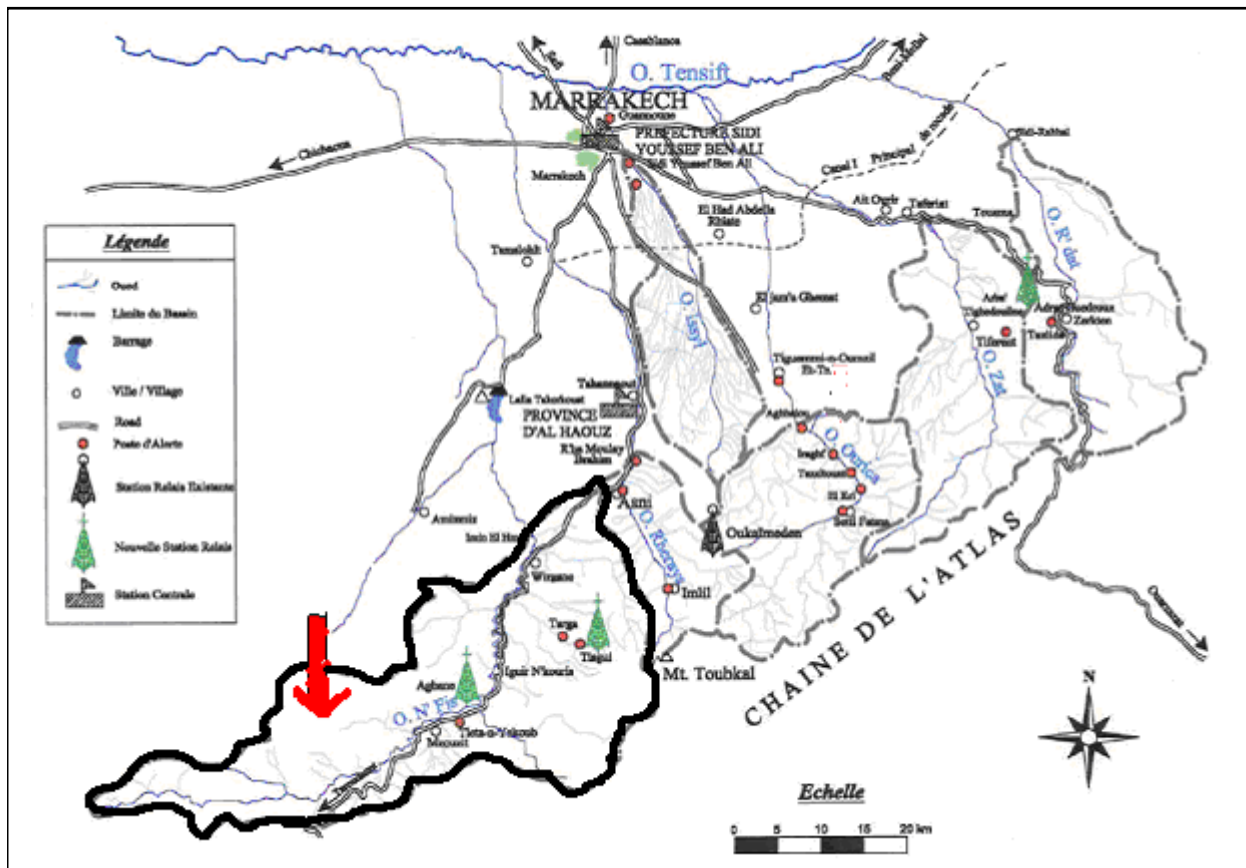
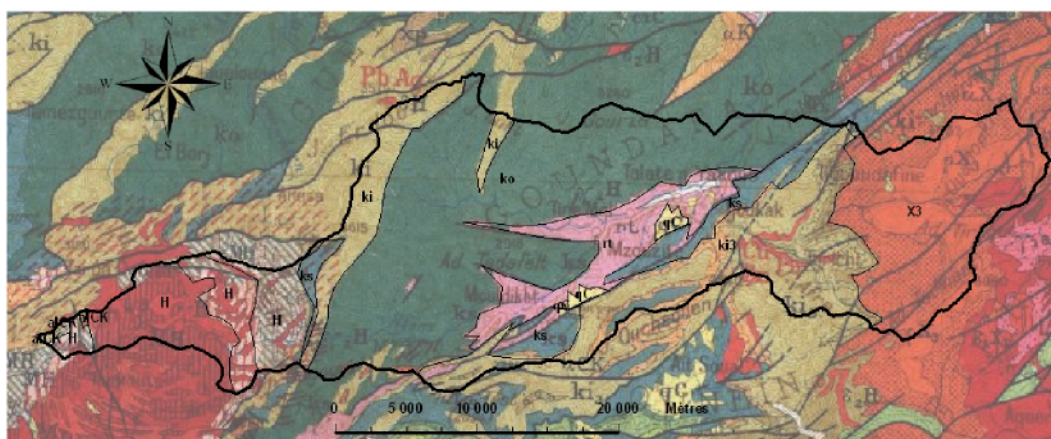


Figure. II .2 : Localisation géographique du bassin du N'fis (d'après Aresmouk, 2005)

2) Géologie générale et lithologie

Le bassin versant du N'FIS se compose essentiellement d'un socle primaire affecté par l'orogénèse hercynienne dont la couverture est d'âge secondaire et tertiaire (**Fig II.3**), sa partie montagneuse est constituée essentiellement par une masse importante de schistes d'âge primaire et de calcaires. On note au milieu de ce secteur de grandes cuvettes Permo-triasiques (Talat N'yaakoub, Tagoundaft, ...etc.) caractérisées par une dominance de grès et d'argiles. Les hauts massifs granitiques sont situés au SW (massif de Tichka) ; suivis en haut vers la source du N'fis par les formations calcaires très dures.



Symbole	Echelle stratigraphique	Lithologie
qC	Quaternaire moyen et ancien	Formation de plaine IV et III
rt	Permo-Trias continental	Grès et argiles
H	Orogénie hercynienne	Roches magmatiques
alCK	Orogénie hercynienne	Tufs
ko	Cambro-Ordovicien	Formations I à dominantes schisteuse
ks	Acadien	Formations I à dominantes schisteuse
ki3	Cambrien inférieur à moyen	Formations I à dominantes calcaire
ki	Cambrien inférieur	Formations I à dominantes schisteuse
X3	Précambrien III	Roches magmatiques

Figure. II.3 : Carte géologique et du bassin versant de N'fis (d'après Juillerat 2004)

On note que dans l'ensemble, les faciès imperméables restent prédominants dans la partie active du bassin(Tab.II.1).



Globalement, le bassin du N'Fis est formé en grande partie par des schistes et des roches peu perméables et de roches magmatiques dures et imperméables(Fig.II.4).

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

Tableau II.1 : Perméabilité des sols du N'fis(D'après ABHT)

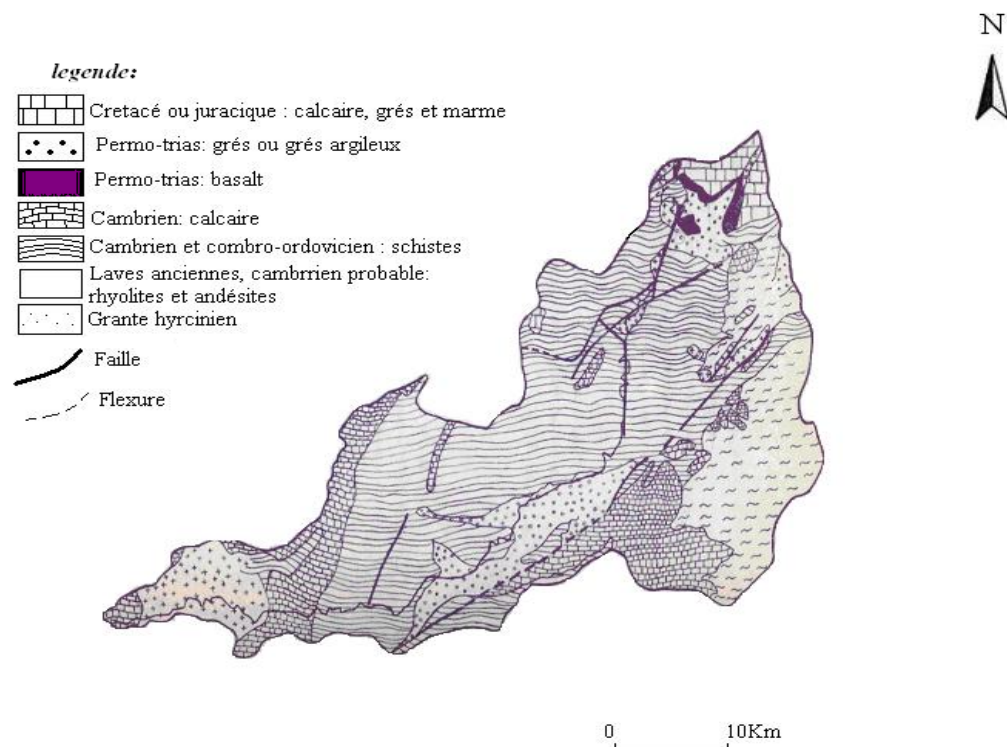


Figure II.4: Carte lithologique du bassin versant de N'Fis

3) Le climat et végétation :

Les caractéristiques climatiques du bassin versant sont résumées dans le tableau II.2

Pluviométrie	Température	Evaporation	Vitesse de vent	Humidité
Atteignent 700mm dans la haute montagne	-moyenne : 18.6°C -maximale absolue : 46°C -minimale absolue :-7.4°C	-1833,7 mm (bac COLLORADO) -1821.8 mm (PICHE)	1,0 m/s	moyenne mensuelle : -7 heures est de 64% - à 14 heures est de 48% - à 18 heures est de 49% - à 21 heures est de : 55%

Tableau II.2 : Climatologie du bassin du N'fis

La végétation du bassin est influencée essentiellement par la température et l'altitude. Selon El wahidi (2004) les hautes températures du piémont assurent des conditions favorables au développement des espèces steppiques herbacées (Jujubier, Doun...etc.). Le froid des hautes altitudes favorise le développement des espèces herbacées (Bulplévres épineux...etc.) et des espèces à végétation ligneuse et arborée

4) Réseau hydrographique :

L'oued N'FIS est le sous bassin principal de l'oued Tensift. Il draine une superficie de 1686 km² au niveau du barrage LALLA TAKERKOUST dont le bassin versant coïncide

pratiquement avec la limite aval des zones de ruissellement actif. Son cours d'eau principal mesure 152 km jusqu'à la confluence avec l'oued Tensift. L'ensemble du réseau hydrographique mesure 3322 km environ au barrage, soit une densité de drainage de 1.97 km/km², ce réseau est bien hiérarchisé., comme nous l'indique la figure (II.5).

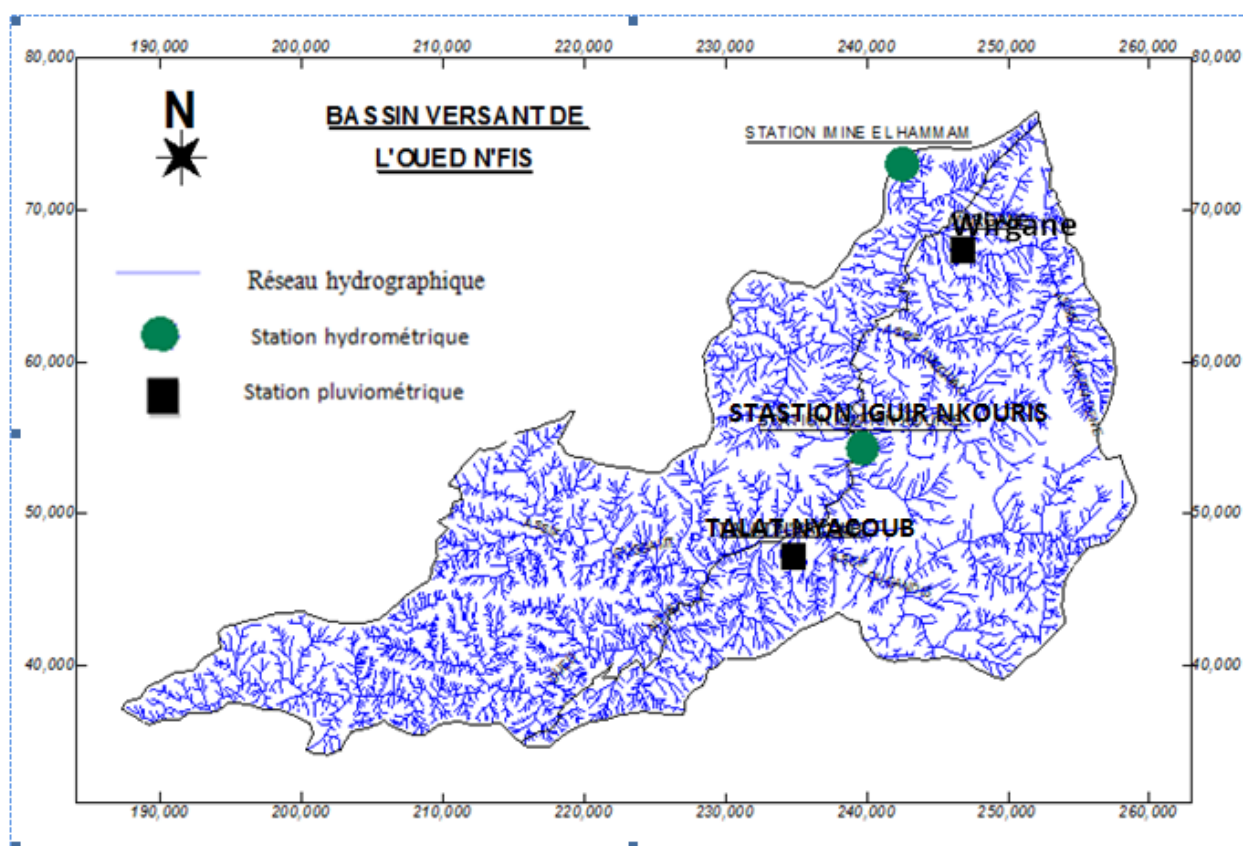


Figure II.5 : Réseau Hydrographique du N'Fis

Les principaux affluents du N'fis sont :

- L'oued AMEZMIZ affluent rive gauche drainant un bassin de 105 Km² à la station hydrologique SIDI HSSAIN (N° 2431/53) en service depuis Janvier 1988.

- ASSIF OUGDEMOT: affluent rive gauche du N'Fis qui prend naissance aux environs d'IGDAT à une altitude de 3616 m.
- Oued OUIRGANE : affluent rive droite, il prend naissance dans la région de TAZAGHANT à une altitude de 3650 m environ.
- ASSIF IMIGDAL : affluent rive droite, il prend naissance à l'altitude 3400 m environ.
- ASSIF N'AUGRANDIS: affluent rive droite, il prend naissance dans la région de OUANOUKRIM à une altitude de 3600 environ.

II-ANALYSE HYDROLOGIQUE

Pour réaliser ce projet l'ABHT a mis à notre disposition une base de données (pluviométriques et hydrométriques) au pas de temps journalier. Ces données nous permettent de faire une analyse hydrologique afin de comprendre la réponse ou le comportement du sous bassin du N'fis à un événement pluvieux.

1) Précipitations

1-1) les données disponibles

L'analyse pluviométrique a concerné les sept stations réparties sur notre zone d'étude. Les stations de mesure et leurs périodes de données sont présentés dans le tableau suivant :

Nous remarquons que l'historique des données disponibles est variable d'une station à l'autre.

	stations	Précipitations mensuelles et annuelles
1	Arhbar	1960-2004
2	Idni	1964-2004
3	Iguir N'Kouris	1974-2010
4	Ijoukak	1960-2004
5	Imine El Hammam	1969-2010
6	Ouirgane	1978-2004
7	Talat N'Ous	1962-2004

Tableau II .3 : Données de précipitations disponibles dans le bassin versant de N'fis

1-2) traitement des données hydro-pluviométriques

1 -2-1) Présentation des données

Ces données correspondent à des mesures qui ont été effectuées au niveau des stations pluviométriques du bassin du N'Fis de 1960 à 2002. Depuis, toutes les données sont traitées et organisées dans une application (BADRE 21) connecté directement à l'agence centrale à Rabat. Elles sont sous forme des moyennes mensuelles, par contre les débits sont données sous forme journalière.

Pour mieux comprendre le comportement du bassin du N'Fis, on a choisi un intervalle de temps pour ce bassin, mais le problème qui se pose c'est le manque de données pour certaines stations et le fait que les mesures effectuées ne sont pas représentatives. En effet, cette région est caractérisée par une zone de haute altitude qui reçoit parfois le maximum de précipitations et par conséquent ces zones ne sont pas équipées par des stations pluviométriques, ce qui influence les résultats d'analyse et les interprétations qui en découlent.

1-2-2) analyse des données pluviométriques

Le traitement, l'analyse et l'interprétation des données sont faites à différents pas de temps, pour mieux comprendre le régime hydro-pluviométrique et les facteurs qui influencent le comportement hydrologique du bassin versant de N'Fis.

a) Précipitations moyennes mensuelles interannuelles

Elles sont données par le calcul des moyennes arithmétiques des moyennes mensuelles annuelles de la série disponible. La variation de ces précipitations est illustrée par la figure II.6 .

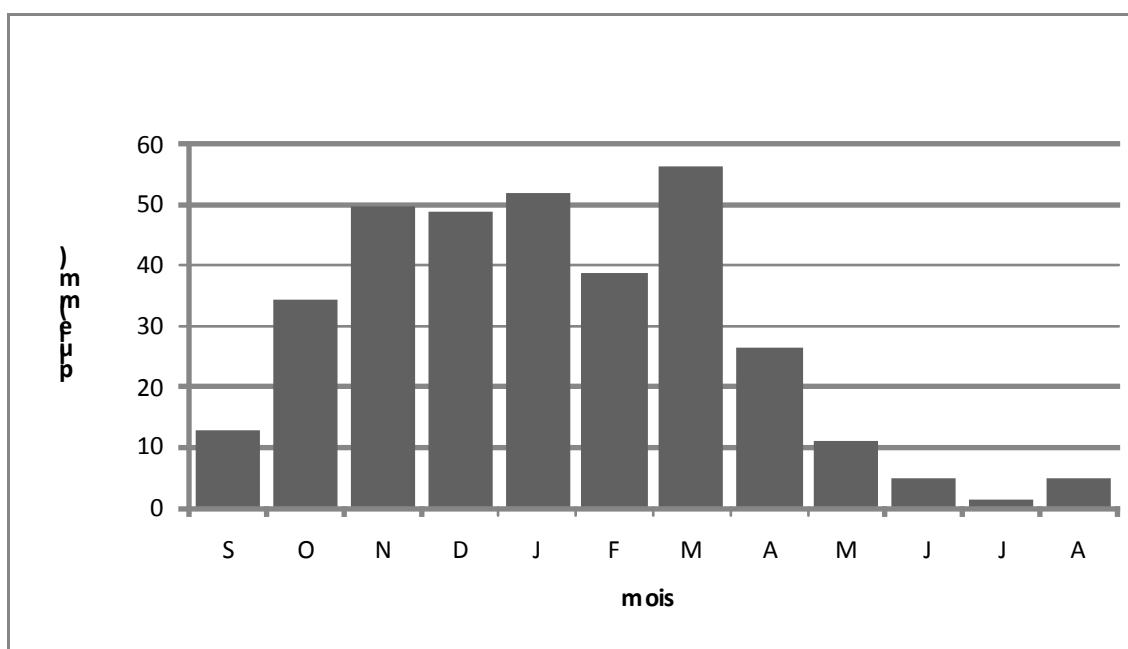


Figure II.6 : Moyenne mensuelle des précipitations à N'Fis sur toute la période de mesure (de 1960 à 2004)

L'histogramme reflète un changement irrégulier des précipitations durant toute l'année. Les précipitations augmentent de Septembre jusqu'à Novembre avec une légère diminution en Décembre. Le maximum est atteint en Mars avec une anomalie au mois de Février. Dès Mars les précipitations s'atténuent jusqu'à Août. Ceci nous permet de distinguer deux périodes :

- Une pluvieuse et humide, observée depuis Octobre jusqu'à Avril avec un maximum en Mars.
- Une autre sèche de Mai à Septembre avec des minimums enregistrés en Juillet et Août.

b- Précipitations moyennes annuelles

Les moyennes annuelles sont obtenues à partir de la somme des moyennes mensuelles.

On note d'après l'analyse des données l'irrégularité des précipitations d'une année à l'autre. Les années les plus humides sont 1962, 1967 et 1970 ; le maximum est de l'ordre de 796,9mm. Les années les plus sèches sont 1960, 1972 et 1974 ; le minimum est de l'ordre de 142,4mm.

✓ *distribution spatiale de la pluie*

Les stations pluviométriques existant dans la zone d'étude exhibent des hauteurs de précipitations bien différentes les unes des autres ; de nombreux paramètres conditionnent cette nuance, notamment l'altitude et l'exposition. Les stations situées à des altitudes importantes reçoivent des hauteurs de précipitations importantes.

«L'exposition joue un rôle primordiale dans les hauteurs de pluie, une station placée sur un versant qui fait face aux flux de masses d'air humide reçoit la partie du lion de pluie par contre un pluviomètre abrité par apport aux flux humide se retrouve marginalisé et reçoit des volumes non significatifs de pluie (cas D'Iguir N'Kouris)» (Barchane, **2005**) figures (II.7) et .(II.8)

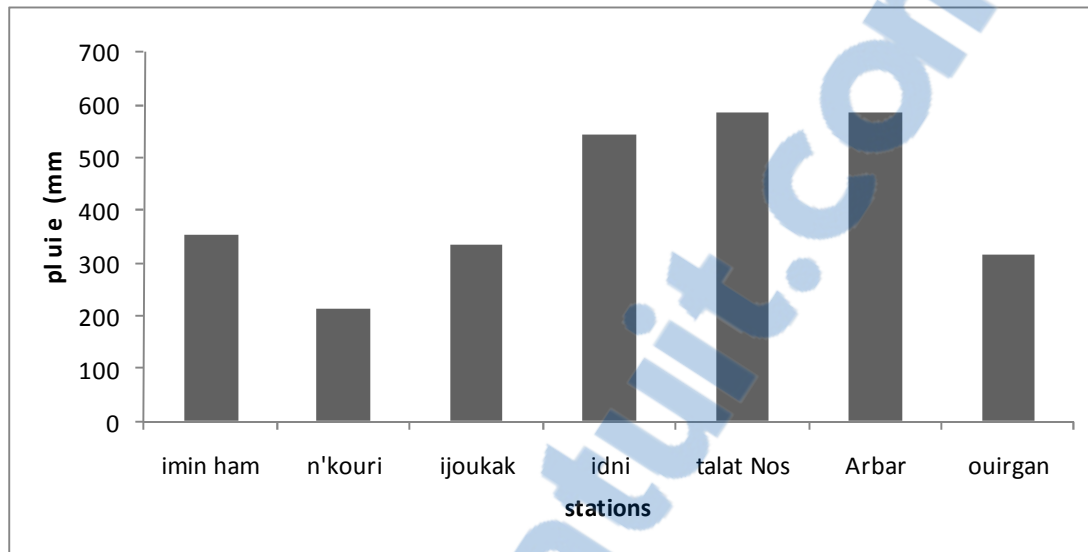


Figure II.7. : Répartition spatiale des précipitations des différentes stations du bassin du N'fis (de 1960 à 2004)

2) Débits de crues

2-1) Durée

D'après Les données enregistrées à un pas de temps horaire on peut noter que la durée de crues observées aux six stations hydrométriques varient généralement de 3 heures à 48 heures ; mais pour la plus part des crues, le temps de base est d'une dizaine d'heures seulement. Ce ci traduit la brutalité des événements et brièveté. En comparant les bassins versants entre eux, nous constatons que les durées de crue sont plus longues sur le bassin de N'Fis que sur les autres bassins : la crue du 05/11/1988 atteint 10 jours et demi (05/11/1988) à Iguir N'koris. La surface drainée par le N'Fis étant plus large, les temps de concentration des eaux dans le cours principal seraient plus importants. Il en résulte des hydrogrammes plus étalés avec d'importants volumes d'eau. Pour la crue du 2 novembre 1987 par exemple, le temps de base fut de 20 heures à Iguir N'Kouris et 37 heures à Imine El Hammam puis d'environ 46 heures pendant la crue de 4 décembre 1987 et 36 heures pour celle du 10 novembre 1988, toujours à Imine El Hammam.

2-2) Temps de montée

Les temps de montée sont presque toujours très courts. Il suffit parfois de quelques heures (1,5 h pour la crue de 09/11/1984) pour atteindre la pointe de crue. Ces temps de montée brefs et rapides appellent à la nécessité des stations d'alerte et d'annonce de crues en amont des bassins versants comme ce fut le cas pour le bassin de l'ourika à Amenzal, Agnous et Tiourdiou.

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, donc assez redoutables, comme celle du 2 novembre 1987 à Iguir N'Kouris. Figure (II.9)

Ce type d'hydrogramme est un cas de figure relativement fréquent en milieu 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 surprendre en aval du bassin où il ne pleuvait pas.

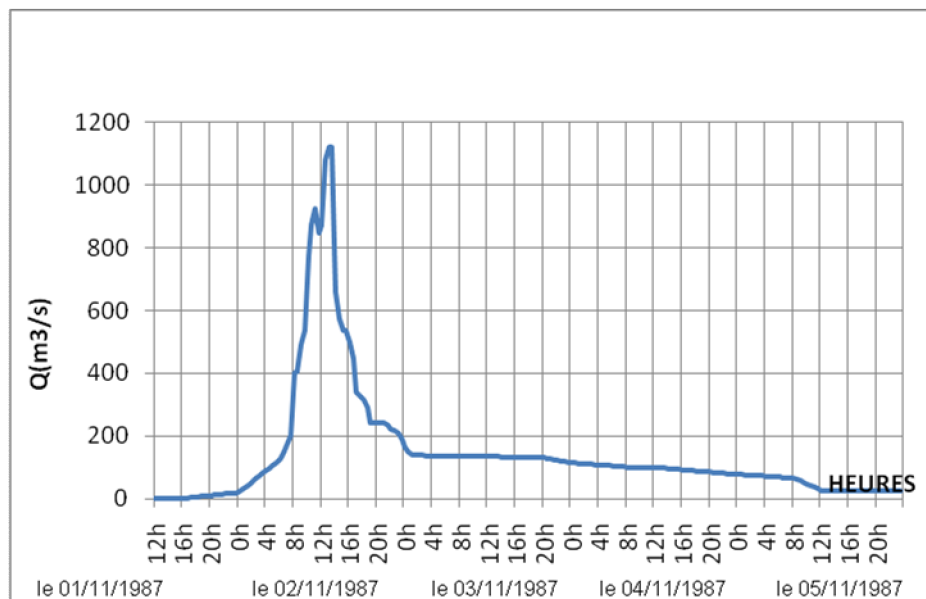


Figure II.9: hydrogramme de la crue du 02/11/1987 à Iguir N'kouris

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 de ce type d'hydrogrammes est 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 pour former une courbe de décrue de faible pente (cas de la crue du 18/12/2002) Figure (II.10).

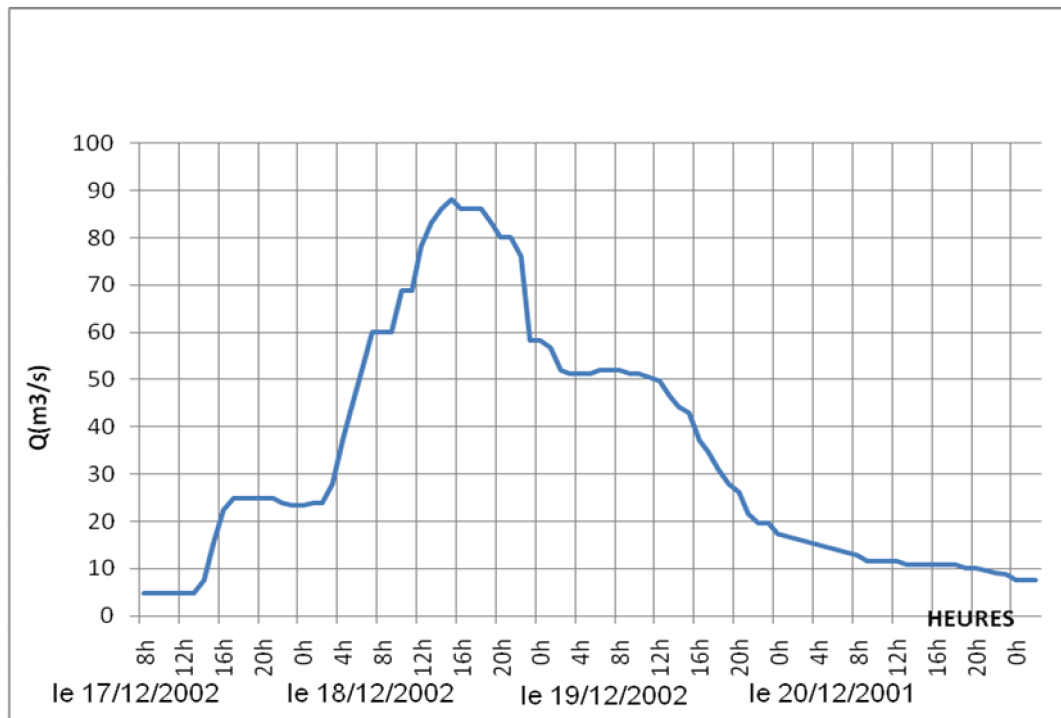


Figure II.10 : hydrogramme de la crue du 18/12/2002 à Iguir N'kouris

En résumé, on peut dire que les crues du Tensift en général, et du sous bassin de N'Fis en particulier sont caractérisées par un hydrogramme en cloche et dissymétrique avec un temps de montée plus court que le temps de décrue. Celle-ci est généralement suivie par un tarissement prolongé.

2-4) Les crues dans l'année hydrologique

D'après l'analyse des différentes crues générées sur le N'Fis à l'amont (à la station d'Iguir N'kouris), on peut noter que celles-ci se concentrent exclusivement dans une période qui va du mois d'Août au mois de Mars, avec une abondance marquée pour les mois de Novembre et Janvier (Tableau II.4).

Mois	Nombre de crues	Pourcentage
Août	1	6,25%
Septembre	1	6,25%
Novembre	5	31,25%
Décembre	2	12,50%
Janvier	4	25%
Mars	3	18,75%

Tableau II.4: Répartition mensuelle des crues à la station amont (Iguir N'Kouris)
du bassin versant de N'Fis

Les mois les plus riches en épisodes de crues sont Novembre et Janvier qui sont aussi parmi les mois les plus pluvieux à Iguir N'Kouris, autrement dit que l'origine des crues à N'kouris est généralement pluvial.

Un inventaire similaire des crues observées à Imin El Hammam a permis d'avoir les répartitions mensuelles suivantes (Tableau II.5) :

Mois	Nombre de crues	Pourcentage
Août	1	5,8%
Septembre	1	5,8%
octobre	2	11,7%
Novembre	5	29,4%
Décembre	3	17,6%
Janvier	3	17,6%
Mars	2	11,7%

Tableau II.5: Répartition mensuelle des crues à l'exutoire aval (Imine El Hammam)
du bassin versant du N'Fis

Ces répartitions dans le temps des crues du N'Fis à différents niveaux du bassin versant, laissent prévoir que ce bassin, vaste de 823,6km² à Imine El Hammam, peut être subdivisé en plusieurs secteurs où les dangers de crue ne se manifestent pas partout au même mois ou à la même saison, chaque région pouvant avoir sa période de prédilection directement liée à son climat local.

2-5) Classification générale des crues

On classe les crues de l'oued N'fis 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 des situations plus ou moins dangereuses à Imine El Hammam.

Pour cela on choisit une série de crues qui couvre une longue période, nous avons relevé 20 crues dans les deux stations pour lesquelles on va essayer de chercher l'origine géographique et le flux perturbant responsable. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant (Tableau II.6) :

Date de la crue				Débit de pointe (m3/s)		Volume 10 ⁶ m3		Type de crue
Date de début		Date de fin		N'koris	Imine El hammam	N'koris	Imine El hammam	
N'koris	Imine Ham	N'koris	Imine Ham					
26/09/1976 à 8h	26/09/1976 à 12h	28/09/1976 à 20h	29/09/1976 à 12h	119	111	5.343	6.29	crue du N'Fis amont
06/01/1978 à 18h	06/01/1978 à 16h	09/01/1978 à 18h	10/01/1978 à 8h	263	301	19.402	22.709	crue généralisée
17/01/1979 à 16h	18/01/1979 à 8h	20/01/1979 à 18h	20/01/1979 à 16h	403	400	28.357	31.193	crue généralisée

16/03/1980 à 7h	16/03/1980 à 12h	19/03/1980 à 16h	19/03/1980 à 12h	127	132	10.071	8.872	crue généralisée
15/11/1983 à 0h	15/11/1983 à 22h	18/11/1983 à 6h30	18/11/1983 à 16h	393	482	20.994	22.773	crue généralisée
27/01/1987 à 15h30	27/01/1987 à 16h	29/01/1987 à 15h30	30/01/1987 à 12h	135	156	5.157	12.032	crue du N'Fis amont
01/11/1987 à 16h30	02/11/1987 à 5h	05/11/1987 à 12h	06/11/1987 à 0h	1120	810	50.065	55.816	crue du N'Fis amont
09/11/1988 à 11h	05/11/1988 à 16h	12/11/1988 à 16h	16/11/1988 à 0h	585	1220	46.175	110.899	crue généralisée
-	23/10/1989 à 16h	-	29/10/1989 à 12h	-	455	-	49.891	crue localisée à Imin El Hammam
08/03/1990 à 10h	-	12/03/1990 à 7h	-	229	-	22.32	-	crue du N'Fis amont
05/12/1991 à 5h	07/12/1991 à 2h	10/12/1991 à 14h	12/12/1991 à 16h	319	446	54.148	56.653	crue généralisée

30/10/1993 à 16h	-	03/11/1993 à 8h	-	-	283	-	22.686	crue localisée à Imin El Hammam
07/08/1994 à 20h	-	08/08/1994 à 7h	-	146.2	-	1.386	-	crue du N'Fis amont
-	17/08/1995 à 16h	-	18/08/1995 à 6h	-	501	-	8.882	crue localisée à Imin El Hammam
14/12/1995 à 11h30	14/12/1995 à 16h	18/12/1995 à 12h	17/12/1995 à 16h	212	502	16.643	29.965	crue généralisée
13/11/1996 à 1h	-	16/11/1996 à 8h	-	123.9	-	2.911	-	crue du N'Fis amont
23/12/2001 à 8h	-	28/12/2001 à 8h	-	69.76	-	6.76	-	crue du N'Fis amont
-	13/08/2003 à 12h	-	15/08/2003 à 19h	-	364 364	-	5.22	crue localisée à Imin El Hammam
29/11/2006 à 10h	29/11/2006 à 15h	30/11/2006 à 12h	30/11/2006 à 14h	82.5	52	3.9	2.24	crue généralisée

Tableau II.6: Classification des crues du bassin versant du N'Fis

D'après ce tableau on distingue trois grandes classes de crue :

- crues localisées à Imin El hammam : 4 crues
- crues de N'Fis amont : 9 crues
- crues généralisées : 7 crues

a) les crues du N'Fis amont

Elles prennent naissance exclusivement en amont du bassin versant du N'Fis. Ces crues s'amortissent toujours ou disparaissent vers Imine El Hammam par manque d'alimentation suffisante des affluents, et par d'éventuelles infiltrations et évaporations. Nous avons retiré du tableau neuf crues de ce type dont six ont été observées seulement à la station amont et les trois autres ont été marquées au niveau des deux stations, cas de la crue du 02/11/1987.

Les zones de précipitations maximales du bassin d'Iguir N'Kouris sont toujours dessinées sur les hautes montagnes qui reçoivent des vents pluvieux donnant sur ce secteur d'importantes chutes d'eau par le simple effet orographique.

b) les crues généralisées

Ce type des crues est fréquent dans le N'Fis et provoqué par l'ensemble des affluents. Elles peuvent parfois se déclencher simultanément aux deux stations, mais elles grossissent le plus souvent vers l'aval à cause de la participation de la totalité ou quasi-totalité des affluents à la même crue.

L'exemple illustrant ce type est celui de 09/11/1988, d'après la météorologie nationale, «son origine est due à un flux de perturbations provenant de l'Ouest».

C'est à l'amont où a été enregistré le première débit ($585\text{m}^3/\text{s}$) le 9/11/1988 et puis plus profondément dans la vallée en aval (Imine El Hammam) où le débit de $1220\text{m}^3/\text{s}$ a été enregistré.

c) les crues localisées à Imin El Hammam

Elles résultent des perturbations venant du S-W. Si on prend l'exemple de la crue du 17/08/1995 où le débit est de l'ordre de $501\text{m}^3/\text{s}$, alors qu'à Iguir N'Kouris il ne dépasse pas $0,167\text{m}^3/\text{s}$, ceci peut être expliqué par la situation météorologique du 17 Août 1995. An effet, en altitude, le flux du S-W amène des canaries de l'air humide, frais et convectivement instable sur la région du Haut Atlas. En surface, l'air chaud d'origine continentale suit les courbures cycloniques et vient s'attaquer par le Nord, au relief du Haut Atlas en s'humidifiant sur son chemin par de l'air maritime provenant de l'atlantique. Cet air arrive l'après midi avec une température dépassant 40°C , il se produit alors un soulèvement brutal, qui s'accroît par l'instabilité, provoquée par la convection thermique d'une part et par l'effet orographique au vent de la montagne d'autre part, il en résulte une formation locale de nuage orageux très épais (Météorologie Nationale).

2-6) Vitesse de propagation des crues du N'Fis

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 des berges et leurs rugosités et des ouvrages humains.

2-7) 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.

Les crues de N'Fis apparaissent en général assez brusquement, et leur évolution vers l'aval est assez variable. Ainsi, on peut distinguer deux grands types de comportements des crues vers l'aval :

- les crues qui grossissent de l'amont vers l'aval.
- les crues qui s'atténuent de l'amont vers l'aval.

a) 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. Les exemples typiques de ce phénomène prélevé de la série des crues sont illustrés dans les figures (II. 11, II. 12 et II. 13). Dans le cas du 16/03/1980, par exemple, des pluies abondantes se sont abattues sur différents secteurs du bassin. Ces importantes précipitations ont alimenté les différents collecteurs de l'Oued N'Fis de l'amont vers l'aval, ce qui explique qu'on ait enregistré à Iguir N'Kouris le 16/03/1980 un débit de pointe $127\text{m}^3/\text{s}$ à 15h devenu $132\text{m}^3/\text{s}$, 3 heures plus tard à Imin El Hammam, le volume a baissé de $10,071.10^6\text{m}^3$ à $8,872.10^6\text{m}^3$ ce qui signale l'élargissement du cours d'eau vers Imine El hammam.

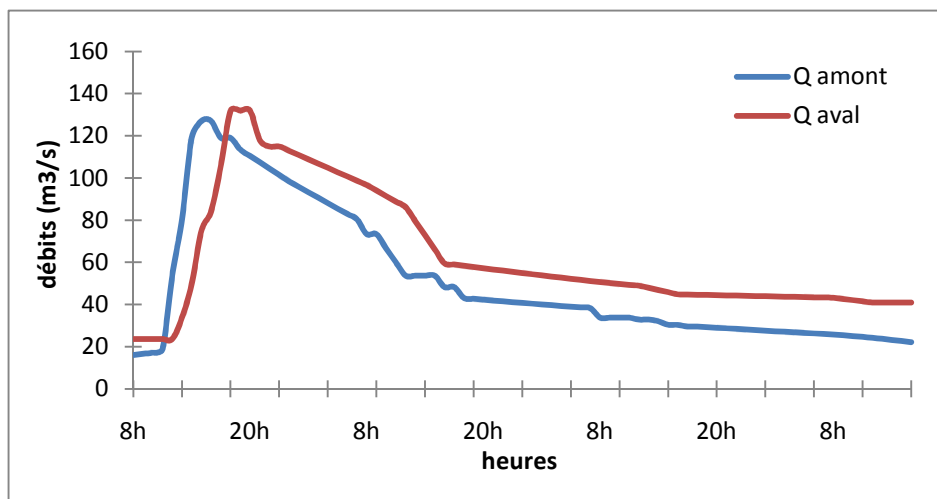


Figure II.11 : Hydrogramme de la crue du 16/03/1980



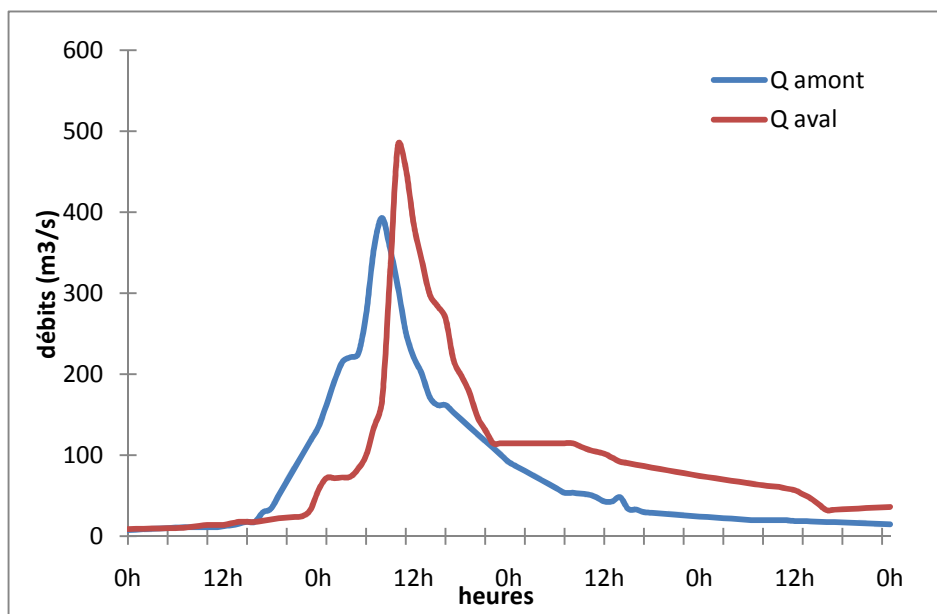


Figure II.12: Hydrogramme de la crue du 16/11/1983

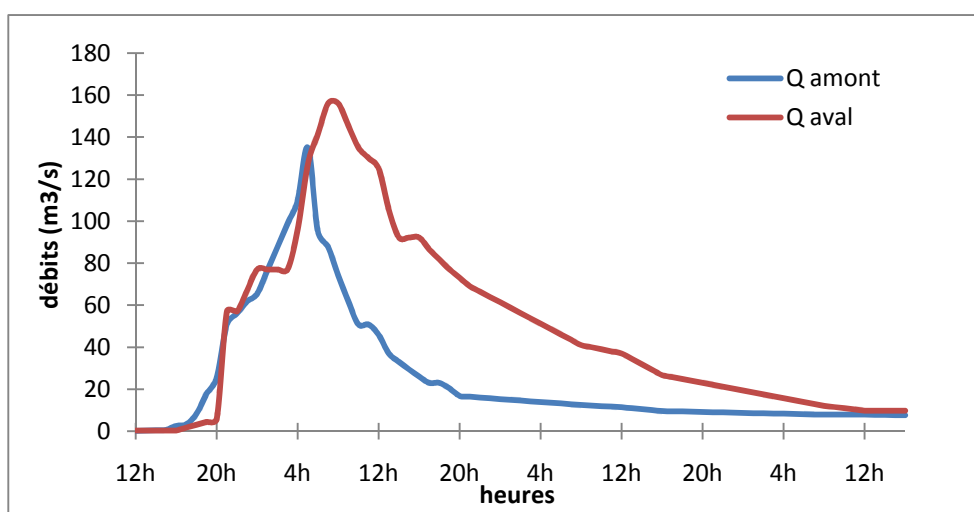


Figure II. 13: Hydrogramme de la crue du 28/01/1987

b) les crues amorties vers l'aval

Rapport-gratuit.com



LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Elles se développent à l'amont du bassin. Elles résultent d'une pluie dont l'aire s'étend sur les versants en amont d'Iguir N'Kouris. Ces crues arrivant sur la plaine, perdent de grandes quantités d'eau qui se perdant à travers les seguias (la perte peut atteindre 83%) qui s'échelonnent le long de l'oued N'Fis. Ce type de crues est illustré par les exemples des figures (II. 14) et (II. 15) . Par exemple, dans le cas de la crue du 02/11/1987 le débit en amont qui était de 1120m³/s à 13 h est affaibli, 3 heures plus tard, à 810m³/s en aval.

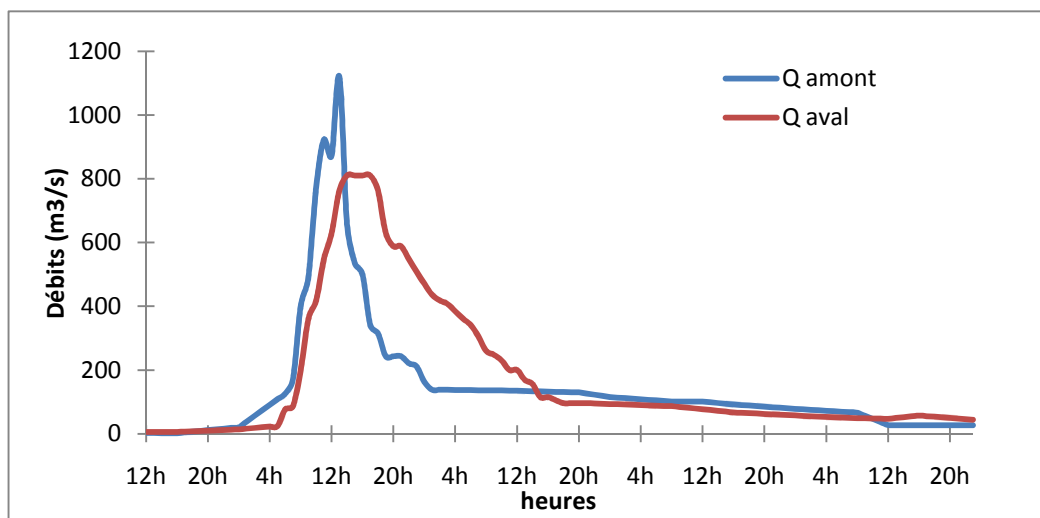


Figure II.14: Hydrogramme de la crue de 02/11/1987

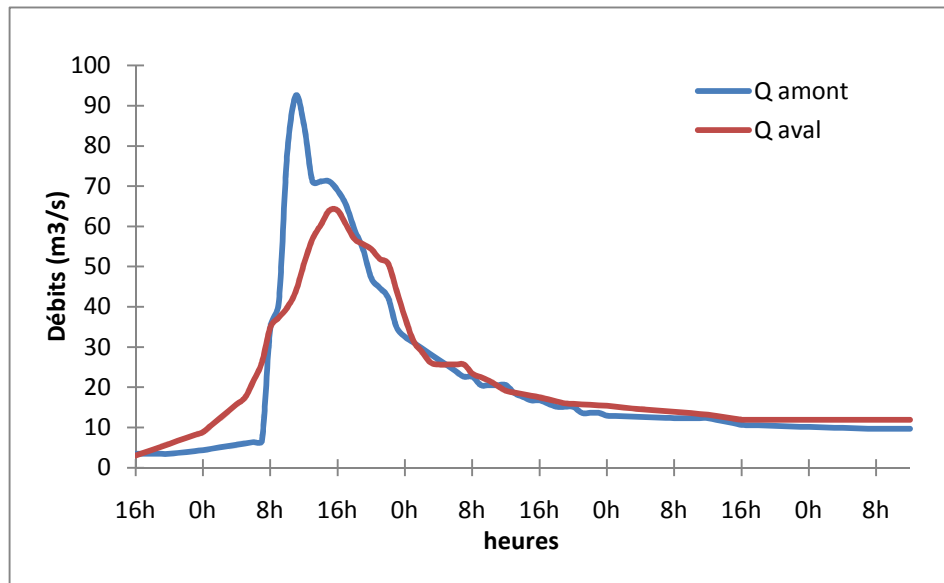


Figure II. 15: Hydrogramme de la crue de 07/03/1991

Les caractéristiques géographiques, morphologiques, topographiques et climatiques du bassin du N'fis influencent directement ses crues qui ont différentes distributions spatiales et temporelles.

Concernant l'origine des crues du N'fis, nous avons constaté que celles qui n'étaient pas d'origine mixte, ont pris leur naissance soit en amont du bassin (Iguir Nkouris), soit en aval du bassin (Imine El hammam). Cette faible diversité de l'origine géographique des crues, est due principalement à la superficie vaste de ce bassin, il faut peut-être en chercher l'explication dans le fait que la construction d'un collecteur à l'amont de N'fis qui nous permettra d'exploitation des crues localisées Nkouris .

Dans le choix d'une crue pour le calage de notre modèle, nous devons tenir compte de cette diversité.

CHAPITRE III : CALAGE DU MODELE DE MUSKINGUM SUR LE BASSIN DU ET L'APPORT DE CELUI-CI SUR LA GESTION DU BARRAGE DE WIRGANE

Pour réaliser le calage d'un modèle il faut suivre les étapes suivantes :

1. déterminer les paramètres qui sont à caler
2. choisir les critères d'évaluation de la performance d'un jeu de paramètres
3. trouver une procédure qui permette de converger rapidement vers un jeu de paramètres optimal
4. sélectionner les données de calage et de validation du modèle

I- CALAGE DE MODELE

1) Méthodologie utilisée dans ce projet :

On dispose des hydrogrammes amont et aval mesurés en même temps, pour cela on choisit parmi les méthodes de calage de K existantes la méthode graphique qui consiste à varier les valeurs de X de 0,1 à 0,5 de façon à tomber sur la valeur X_c dont le graphique (Figure I.6) de N par rapport à D donne une courbe où les deux parties de la boucle se superposent c'est-à-dire où la relation devient linéaire. Pour faire ça on a besoin de plusieurs calculs longs.

Pour automatiser ces calculs on programme sous langage Quick basic. On choisit une méthode qui nous permet de calculer un X_c correspond à un écart minimal entre les valeurs des débits mesurés et les valeurs simulés.

a) Choix des paramètres utilisés dans le calage du modèle

Le choix de bonnes crues est impératif . Les débits d'entrée et de sortie doivent être comparables. Les crues ne doivent avoir qu'un seul pic et être généralisées sur le sous bassin du N'fis . Pour cela les crues suivantes ont été choisies comme référence: 15/11/1983, 15/03/1980, 05/01/1978 , 01/11/1987. La détermination du temps de propagation des crues est importante

aussi. Nous avons supposé que le temps de propagation correspond au délais entre les débits des pointes d'Ighir N'Kouris et Imin El Hammam. Après l'analyse des données on prend $\Delta t = 25200s$

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

b) Calcul de K moyen

Pour déterminer la valeur du K moyen, nous avons procédé de la manière suivante :

En utilisant la relation (20), 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 0.01. Pour cela on fait deux tests par qbasic, le premier consiste à calculer à chaque X un écart et on retient la valeur X comme X_c qui donne un écart minimal ($ecart = \sqrt{var} = \sqrt{(Qs - Qo)^2}$)

Le deuxième test, qui est le plus précis, consiste à nous donner directement la valeur minimale de l'écart et son X correspondant (**Annexe 1**)

Après ces deux tests on prend $X = 0.15$ comme X_c

Le K moyen est déterminé en effectuant la moyenne arithmétique des K_i pour chaque x_i

2) Calage du modèle et ses critères d'évaluation.

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'un critère de qualité, 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.» barchane(2005)

Les critères d'évaluation utilisés dans ce travail sont deux coefficients :

$$\text{Coefficient de Nash : } Nash = 1 - \frac{\sum (Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t))^2}{\sum (Q_{obs}(t) - Q_{obsM})^2}$$

$Q_{obs}(t)$ et $Q_{sim}(t)$ sont les débits observés, respectivement simulés au temps t ; Q_{obsM} est le débit observé moyen sur la période d'évaluation

$$\text{Coefficient de Corrélation : } R = \frac{Cov(Q_{obs}, Q_{sim})}{\sqrt{var(Q_{obs}) \cdot var(Q_{sim})}}$$

On dit que le modèle est performant lorsque les valeurs de ses deux coefficients sont proches de 1

Après avoir essayé différents paramètres, on a constaté que le modèle est plus performant pour la simulation de crue de 15/11/1983 avec les paramètres suivants :

$$\Delta t = 25200s$$

$$X = 0,15$$

$$K = 76977s$$

On vérifie la validité de nos paramètres , c'est-a-dire ce que $C1$, $C2$ et $C3$ sont positifs et $C1+C2+C3 = 0$

D'après les équations (13,14 et 15) on calcule $C1$, $C2$ et $C3$

$$C1 = 0.0135$$

$$C2 = 0.31$$

$$C3 = 0.53$$

$$C1+C2+C3 = 0.85$$

Donc on peut admettre ces paramètres .

Les débits estimés par le modèle sont presque les mêmes que ceux mesurés réellement (fig. III.1). Le coefficient de détermination est de l'ordre de 0,98 pour le coefficient de corrélation et 0,99 pour le coefficient de Nash.

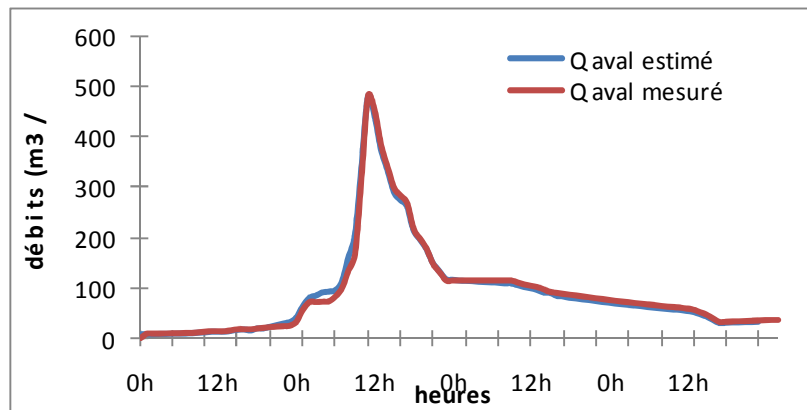


Figure III. 1: Hydrogrammes mesuré et simulé de la crue du 15/11/1983

On peut résumer ces étapes par le schéma suivant :

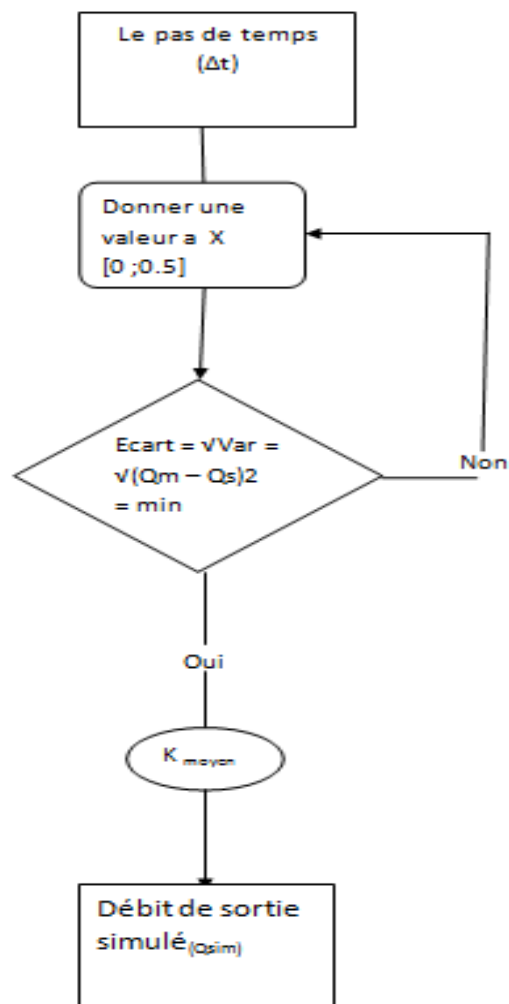


Figure III.2 : Schéma de calage de modèle de Muskingum

3) Validation du modèle

Pour valider notre modèle on comparera les débits simulés par routage aux débits observés mesurés à des stations hydrométriques.

Dans cette partie, on va tester la fiabilité du modèle en utilisant les paramètres de la crue du 15/11/1983. Ces paramètres ont été appliqués aux autres crues pour le calcul des débits aval estimés. Les hydrogrammes ci-dessous illustrent les résultats obtenus figures (III.3, III .4, et III.5). On note une bonne concordance avec des coefficients de détermination allant de 0,90 à 0,99 pour certaines crues, une faible corrélation pour certaines autres et moyenne pour les autres.

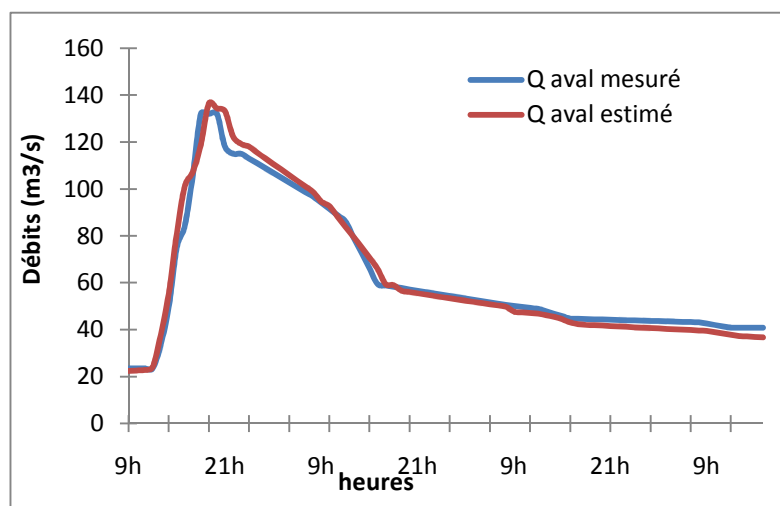


Figure III.3: Hydrogrammes mesuré et simulé de la crue du 16/03/1980

Pour cette crue Nash = 0.98 et R = 0.97.

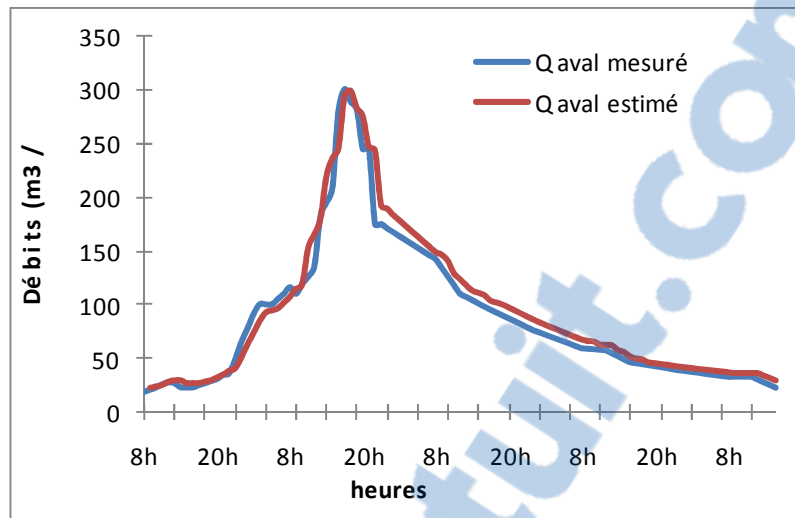


Figure III.4 :Hydrogrammes mesuré et simulé de la crue du 05/01/1978

Pour cette crue Nash = 0.99 et R = 0.96

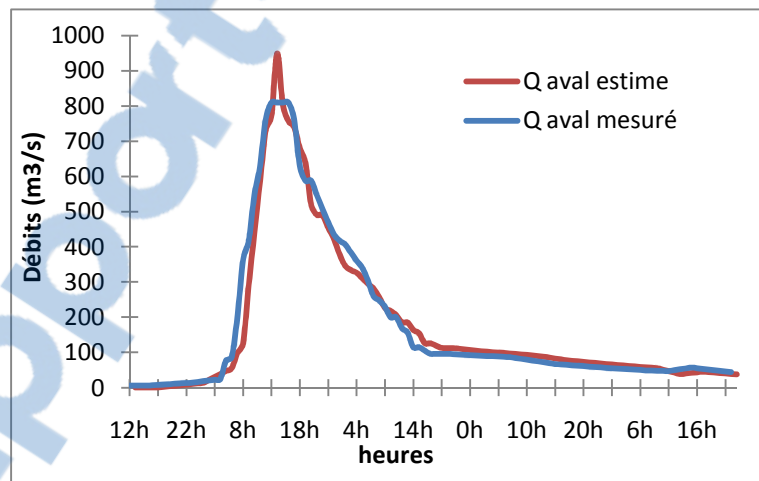


Figure III.5: Hydrogrammes mesurés et simulés de la crue du 01/11/1987

Nash = 0.93 et R = 0.95

Il ya certaines crues pour les quelles le modèle a une faible performance par rapport comme la crue du 06/03/1991 Figure (III. 5), 28/01/1987 Figure (III. 6) et 06/03/1991 Figure (III. 7)

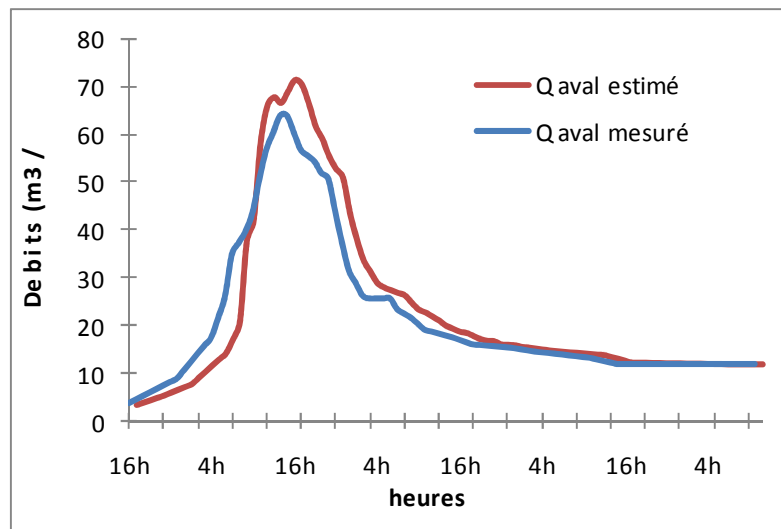


Figure III.6: Hydrogrammes mesurés et simulés de la crue du 31/05/1999

Nash = 0.90 et R = 0.92.

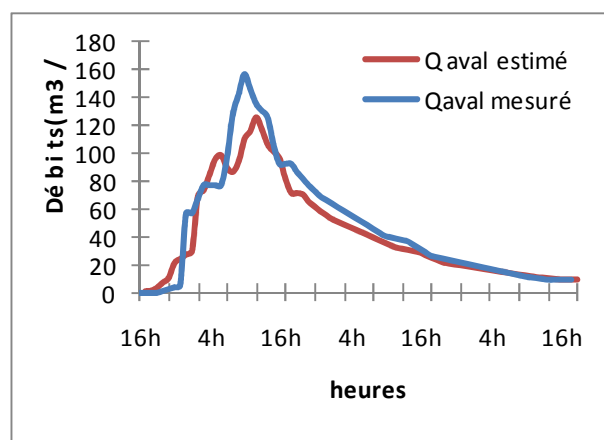


Figure III.7: Hydrogrammes mesurés et simulés de la crue du 28/01/1987

Nash = 0.92 et R = 0.96

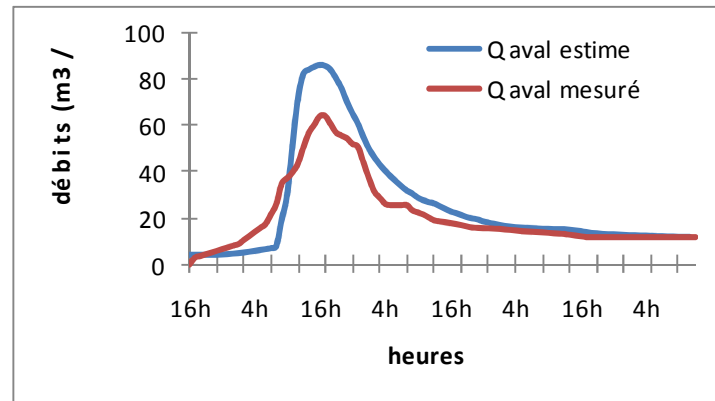


Figure III.8 : Hydrogrammes mesuré et simulé de la crue du 06/03/1991

Nash = 96 et R= 0.97

4) Commentaire sur les résultats de la validation:

D'après les résultats de la validation on peut noter une bonne performance pour certains crues comme celles du 16/03/1980, 05/01/1978 et 01/11/1987, de mauvais résultats pour d'autres crues soit par une surestimation comme celles du 06/03/1991 et du 31/05/1999 ou par une sous estimation comme celle du 28/01/1987.

La surestimation des débits est obtenue généralement lorsque les hydrogrammes montrent une diminution des débits à l'exutoire par apport à l'amont, cela peut être expliqué par 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 apport à l'amont, cela peut être expliqué par l'intervention des affluents du bassin intermédiaire entre Iguir N'Kouris et Imine El Hammam suite à des précipitations intenses localisées entre ces deux stations. Leurs volumes s'ajoutent à ceux arrivés au niveau d'Iguir N'Kouris pour constituer un hydrogramme plus important à Imin el hammam.



On peut noter aussi que notre modèle donne des bons résultats pour des crues dont le débit de pointe dépasse 130m³/s. La performance de ce modèle ne dépend pas du volume totale de la crue ni du temps de base de la crue.

II - L'APPORT DU MODELE CALE A LA GESTION DU BARRAGE WIRGANE.

L'important développement des barrages dans le monde est lié à la production d'énergie hydroélectrique et à la nécessité de stocker l'eau pour se prévenir contre la variabilité saisonnière ou interannuelle des écoulements (pour l'irrigation par exemple). Les barrages servent aussi à réduire les effets des inondations. Dans notre cas le barrage de Wirgane a un rôle principale dans la régularisation de l'écoulement sur oued N'fis à l'amont de barrage Lalla Takerkoust, pour cela on exploite notre modèle calé pour aider la prise de décisions concernant le barrage, afin que les crues de l'oued N'fis ne donnent pas lieu à des catastrophes.

1) Présentation de barrage Wirgane

Le barrage Wirgane est situé sur l'Oued N'fis à 65 km environ au sud de la ville de Marrakech, à 20 km environ à l'amont du barrage Lalla Takerkoust et à 1,5 km au nord du village du même nom (Figure III. 8). Avec une retenue de 70 Mm³, le barrage permet d'améliorer la capacité de régularisation de l'oued N'fis au niveau du barrage Lalla Takerkoust, de diminuer les pertes d'eau vers l'aval et de renforcer l'alimentation en eau potable et industrielle du Grand Marrakech. Ce barrage est de type en terre zonée, la cote de la retenue normale est 890 NGM, la surface de la retenue normale est 3 km², le volume de la retenue normale est 70 Mm³ et le volume régularisé supplémentaire est 17Mm³

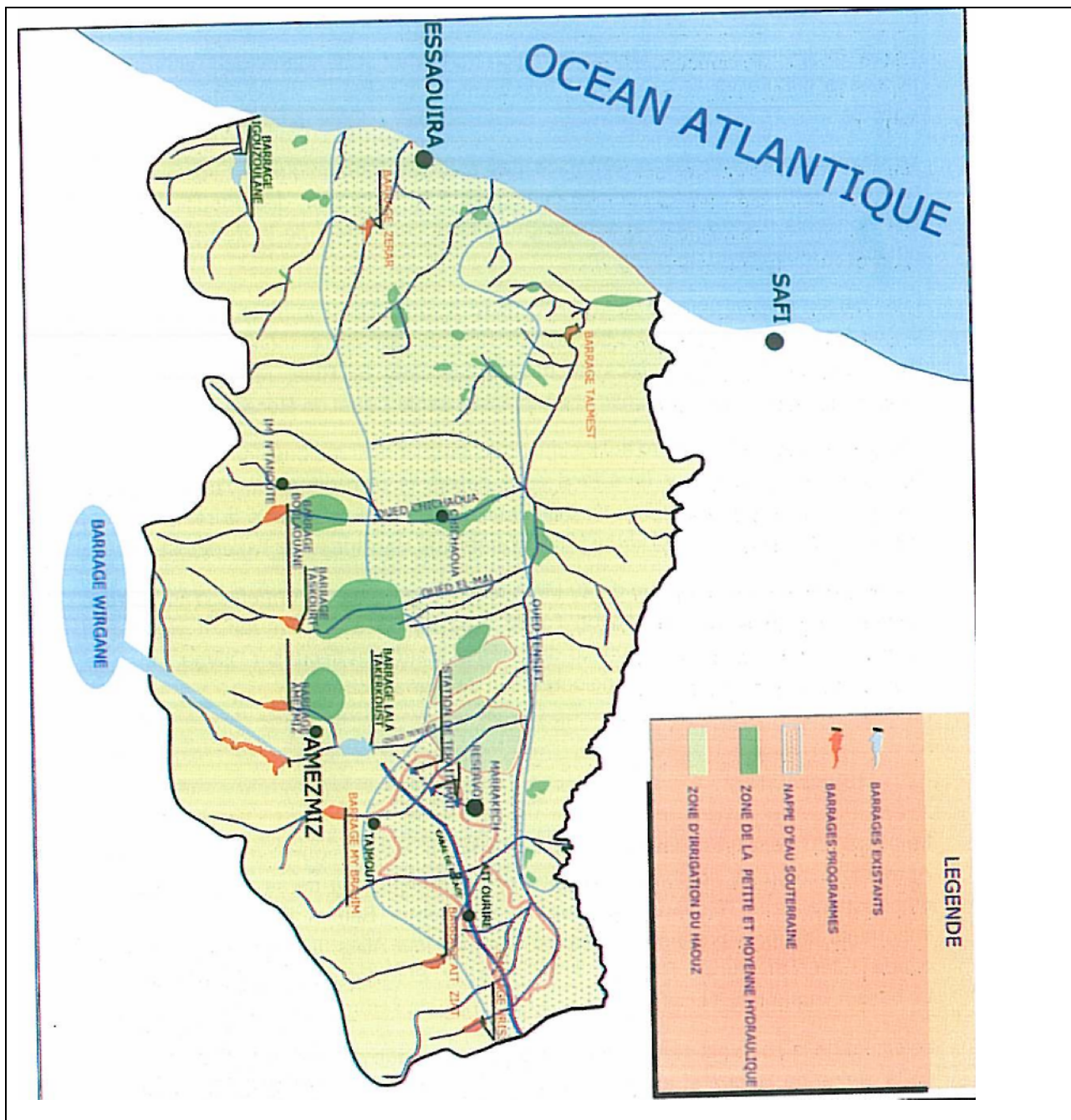


Figure III.9 : localisation de barrage Wirgane (d’après l’ABHT).

2) Démarches

Pour profiter de notre modèle calé pour l'obtention d'un outil d'aide à la décision on suit la démarche suivante :

Pour déterminer l'hydrogramme unitaire d'un bassin versant non-jaugé, deux méthodes sont utilisées :

La première méthode est celle de hydrogramme unitaire synthétique (HUS) du SCS le Soil Conservation Service et la seconde celle de Snyder (date) (Musy, 1999).

Le Soil Conservation Service (SCS) a effectué la synthèse d'un grand nombre d'HU identifiées sur des bassins versants de tailles et de régions différentes des Etats-Unis (Soil Conservation Service, 1975). Pour pouvoir comparer ces HU, il faut ramener les ordonnées et les abscisses à des grandeurs adimensionnelles, en divisant les débits par le débit de pointe Q_p et le temps par le temps de montée t_p . Pour cet HU synthétique moyen, les abscisses, exprimées par le rapport t/t_p et les ordonnées par $Q(t)/Q_p$. L'HUS et la courbe en S correspondante sont données à la figure (III. 10). On constate également que l'HU synthétique du SCS correspond toujours à une durée de référence D . Pour simplifier l'utilisation de l'HUS, le SCS propose une approximation triangulaire.

Les variables de la figure (III.10) sont les suivantes. Soit D la durée de l'averse de pluie nette, t_c le temps de concentration (Le SCS introduit une définition particulière du temps de concentration: temps s'écoulant entre la fin de l'averse et le point d'inflexion de la courbe de décrue), t_1 le lag soit le temps entre le milieu de l'averse et la pointe de l'hydrogramme (approximativement t_1 vaut $0,6.t_c$), t_p le temps de montée de l'hydrogramme, t_b la durée de la crue et t_b le temps de base de l'hydrogramme.

Cet HU est entièrement défini par les paramètres q_p et t_p . Comme nous le démontrerons par la suite l'approximation triangulaire de la figure III. 10, réduit le problème de la détermination de l'HU uniquement à l'estimation du paramètre t_p :

Pour déterminer t_p , t_r et t_b (fig. III. 10), on cherche l'hydrogramme triangulaire respectant les caractéristiques de THUS curviligne. Dans THUS triangulaire, 37,5% de la crue se situent avant la pointe de l'hydrogramme, on a donc $t_p/t_b = 0,375$:

$t_b = 2,67 t_p$.

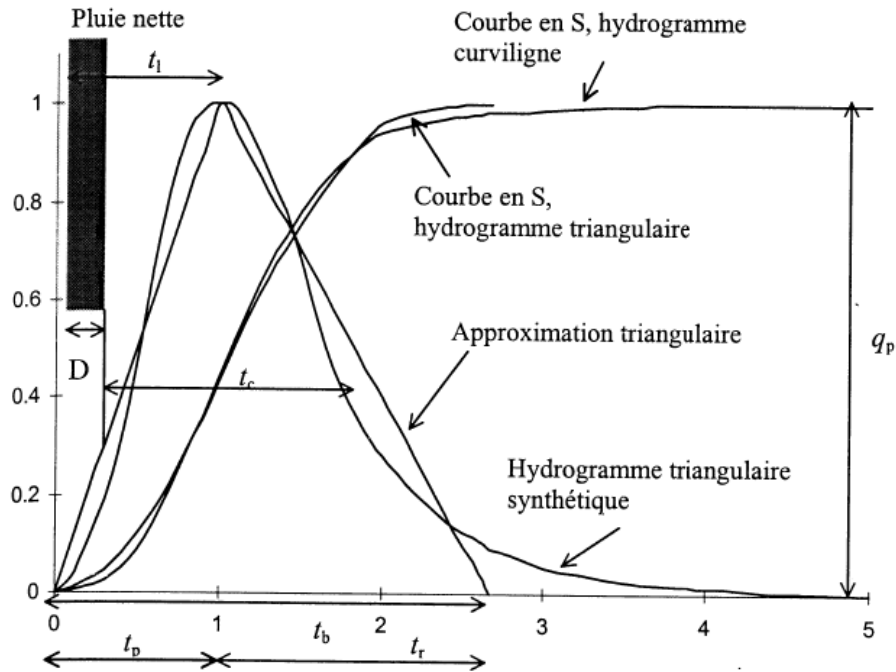


Figure III.10. Hydrogramme unitaire synthétique sans dimension proposé par le SCS, et son approximation triangulaire (D'après Soil Conservation Service, 1975)

Et le volume de la crue vaut:

$$V_t = q_p / 2 (t_p + t_r)$$

D'où l'on obtient une expression du débit de pointe en fonction du temps de montée :

$$q_p = (2 \cdot V_t) / ((t_p + t_r)) = V_t / t_p \cdot K$$

avec: $K = 2 / ((1 + t_r / t_p))$

Et $t_r = t_b - t_p = 2.67t_p - t_p = 1.67t_p$, nous disposons donc d'une équation

de Q_p en fonction de t_p . En remplaçant t_r par $1.67 t_p$ dans l'expression de K , on obtient $K = 0.75$.

Il faut maintenant relier l'HU triangulaire à la durée de référence D de la pluie nette. À l'aide la figure III.10, on constate que:

$$t_p = D/2 + t_l$$

Rappelons que le SCS suppose que $t_l = 0.6t_c$. Finalement on obtient une équation donnant le débit de pointe de l'HU triangulaire pour une durée de référence D et un volume de pluie nette V , en fonction d'un seul paramètre t_c .

$$Q_p = (1.5.V) / ((D + 1.2.t_c))$$

Il faut remarquer que cette équation s'applique aussi bien à l'HU triangulaire qu'à l'HUS curviligne, et qu'elle permet un calage de l'HUS même si la forme de celui-ci est fixée. Néanmoins il faut noter que le calage ne porte que sur les dimensions de l'hydrogramme et non sur sa forme, puisque le paramètre de forme K est toujours égal $K = 0.75$.

Toutes ces relations ne sont valables qu'aux États-Unis. Toutefois le calage du paramètre de forme K à partir d'observations reste possible.

Une autre méthode est celle de l'hydrogramme synthétique de Snyder (date) :

La construction de l'hydrogramme unitaire de Snyder se fait selon l'ordre suivant (Leconte, 2007) :

- On calcule le temps de délai du bassin versant: $t_L = 0.7517C_t (L.L_{ca})^{0.3}$
- On calcule le débit de pointe de H.U. ($m^3/s/cm$): $Q_p = 2.75.A.C_p / t_L$
- On calcule le temps de base: $t_b = 24(3 + t_L/8)$ pour les Grands bassins

t_b entre t et $3t_c$ et $5t_c$ pour les Petits et moyens bassins

- On calcule la largeur de l'hydrogramme à 50 et à 75% du débit de pointe:

$$W_{50} = 2.14(Q_p / A)^{-1.08}$$

$$W_{75} = 1.22(Q_p / A)^{-1.08}$$

- On lisse une courbe par les points calculés.
- On obtient un H.U. de durée t_r : $t_r = 0,18 t_L$
- Pour une autre durée: $t'_L = t_L + (t_R - t_r)/4$

Durant ce travail on a utilisé une méthode dérivée des deux premières, cette méthode qu'on appellera « méthode ABHT » ne tient pas en compte des temps de montée dans la détermination de l'hydrogramme unitaire. Pour la construire, on choisit un ensemble de crues généralisées sur oued N'fis, on détermine pour chacune son hydrogramme unitaire à partir de l'hydrogramme de crue, en divisant tous les débits par le débit de pointe. Puis on calcule la moyenne des débits pour chaque pas de temps et l'on aboutit ainsi à l'hydrogramme unitaire moyen (Figure :III.11) à la station amont du N'fis (Iguir Nkouris) .

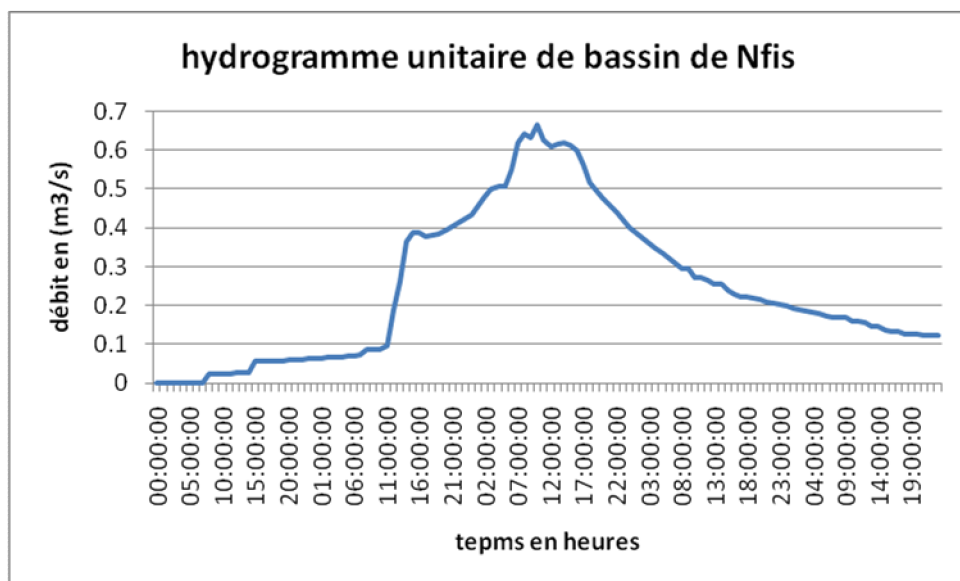


Figure III.11 : hydrogramme unitaire moyen à Iguire N'kouris

A fin de calculer une crue de période de retour donné (tableau III.1) , on multiplie le débit de pointe de la crue par l'hydrogramme unitaire déterminé donc on obtient un hydrogramme proche de la réalité. Cet hydrogramme est ensuite utilisé en entrée du modèle pour simuler l'hydrogramme aval (Imine El hammam). A partir de hydrogramme on calcule le volume qui arrive au barrage Wirgane En effet, on suppose que toute l'eau mesurée à la station aval arrive au barrage, c'est à dire s'il n'y a pas de pertes ou d'apports entre Imine El hammam et le barrage de Wirgane, donc l'hydrogramme simulé par notre modèle va alimenter complètement le barrage.

RECURRENCE STATION	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	200 ans	Taille échantillon (ans)
IGUIR NKORIS	340	525	725	1000	1250	1470	38
IMI NE ELHAMMAM	490	770	1070	1490	1825	2170	38

Tableau III.1 : les périodes de retour des crues de oued N'fis (d'après l'ABHT)

Pour illustrer la méthode, nous prendrons la crue du 15/11/1983 comme référence. Cette crue correspond à une période de retour de 5 ans, donc on multiplie l'hydrogramme unitaire par le débit de pointe d'une crue de période de retour de 5 ans qui est 340 m³/s on obtient l'hydrogramme suivant :

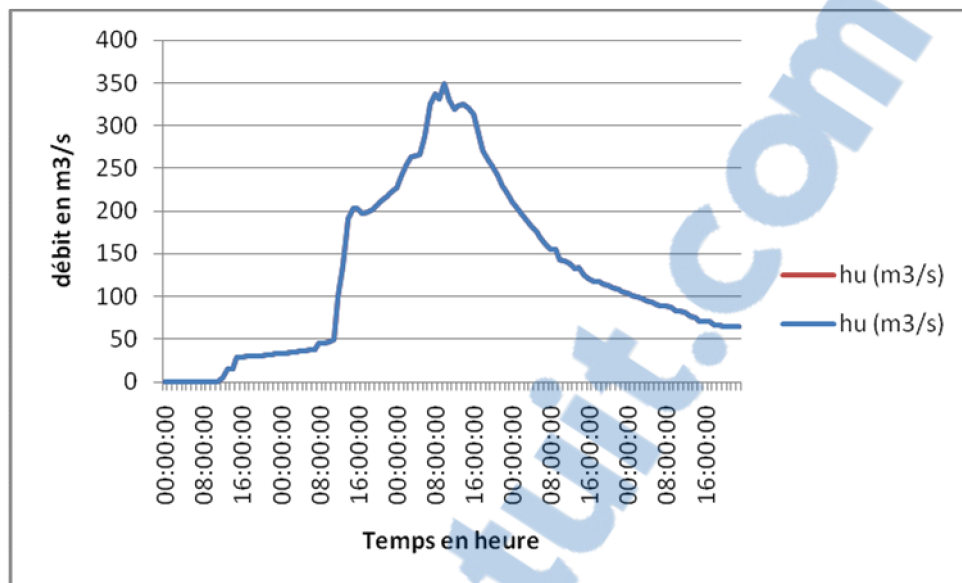


Figure III.12: hydrogramme de crue de 15/11/1983 à partir de l'hydrogramme unitaire

On prend l'hydrogramme obtenu comme donnée d'entrée de notre modèle pour obtenir un hydrogramme de sortie figure (III.13).

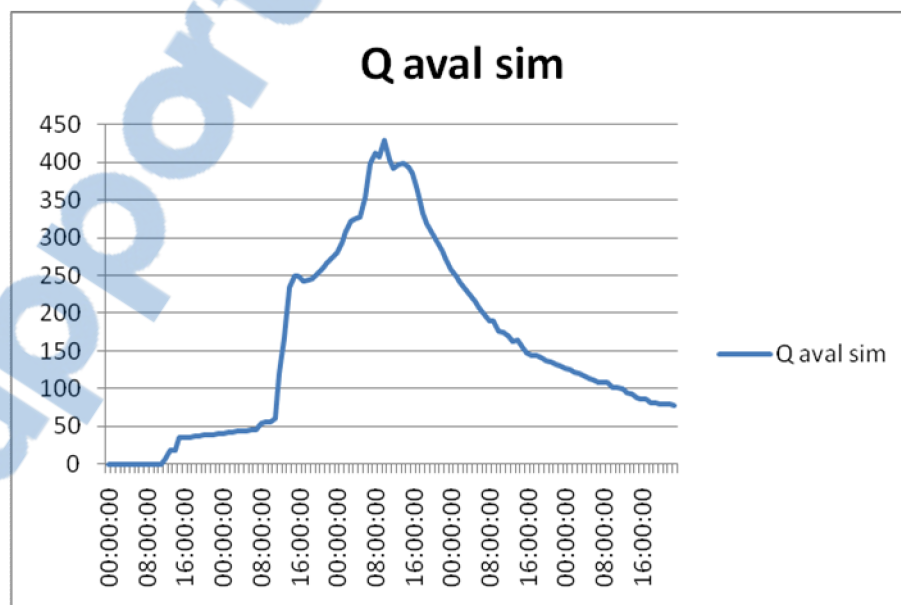


Figure III.13: l'hydrogramme simulé par le modèle

A partir de cet hydrogramme on calcule le volume total de la crue qui sera le volume arrivé au barrage Wirgane :

Pour cela on fait :

$$V1=Q1*dt$$

$$V2=Q2*dt$$

.

.

.

$$Vn = Qn*dt$$

$$V. Vtotal= V1+V2+V3+....Vn$$

$$V_{crue}=(Q1 +Q2 + Q3 + \dots + Qn)*\Delta t$$

Δt : le pas de temps d'acquisition des données

Après le calcul on trouve :

$$V = 22.67.10^6 \text{ m}^3.$$

A partir de ce volume calculé on peut prendre une décision concernant le débit à lâcher du barrage pour garantir une bonne régularisation de l'écoulement à l'amont de barrage Lalla Takerkouste. Notre modèle nous permet de prévoir le volume qui arrive au barrage de Wirgane lors d'une crue et donc on peut réduire les dégâts qui peuvent être causés par cette crue.

CONCLUSION ET PRESPECTIVES

Dans ce projet de fin d'étude, nous avons fait une étude hydrologique du bassin versant de l'Oued N'Fis, suivi de l'application du modèle de MUSKINGUM et son utilisation pour la gestion du barrage Wirgane lors d'une crue.

Après une analyse des données hydrologiques disponibles à l'ABHT, on a déterminé les caractéristiques hydrométriques et pluviométriques de ce bassin, on a constaté qu'il y a un manque d'instrumentation et un déséquilibre spatiale de leur répartition, ce qui a fait que les données n'étaient pas vraiment fiables tant du point de vue de la qualité que de la quantité. Le modèle qui a été utilisé, est un modèle de propagation de crues. Il nous permet de reconstituer des hydrogrammes observés, ainsi que de les simuler à partir des débits amont.

Ce travail nous a permis de déterminer le facteur d'atténuation ($x=0,15$) applicable au bassin et le temps relatif à la propagation des crues dans ce bassin. Ces paramètres nous ont aidé à obtenir un outil d'aide à la décision lors d'une crue pour conserver le barrage wirgane et garantir une bonne régularisation de l'écoulement à l'amont de barrage Lalla Takerkoust.

Le modèle de MUSKINGUM a donnée 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.

En perspective il faudrait augmenter le nombre de stations de jaugeage et surtout au niveau de la confluence des affluents avec le cours principal, avec une étude préalable sur la répartition de ces stations dans le bassin afin d'avoir des renseignements sur les débit et la pluie sur la totalité du bassin. Ceci permettrait de tenir compte les affluents intermédiaires entre les deux stations.

La méthode Muskingum-Manning permettrait de déterminer un k plus réaliste en utilisant les paramètres morphologiques tel que la pente moyenne et la largeur de le bief qui influencent la vitesse de l'onde. Donc il faudrait effectuer ce même travail en utilisant la méthode Muskingum –



Manning et comparer l'efficacité de cette méthode avec celle appliquée dans cette étude. Il serait donc intéressant de procéder à des levées topographiques afin de connaître les caractéristiques géométriques du cours d'eau.

Enfin, il faudrait penser à un modèle couplé pluie-débit et débit-débit qui prenne en compte aussi les barrages pour garantir une bonne prévision des crues et une gestion optimale des barrages sur ce bassin.

La prévision des crues est d'un intérêt évident pour l'anticipation de l'évolution de ces phénomènes. Elle permet aux services ayant en charge la sécurité des biens et des personnes de prendre les mesures appropriées. Pour cela on peut utiliser les radars météorologiques qui permettent la surveillance météorologique et le suivi des phénomènes météo graves en temps quasi-réel. Ils permettent ainsi de prévoir les crues avec une plus grande précision.

BIBLIOGRAPHIE

Abou-Elaaz K, Maïmouna I, 2006. Le bassin versant du N'Fis (Haut Atlas de Marrakech) Situation hydro-pluviométrique et bilans hydrologiques. Mémoire de fin d'études, Maîtrise Es Sciences Spécialisées Métallogénie. FSTG, Marrakech ,44pp .

Ambroise B, 1999 La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant -Processus, facteurs, modèles, 1999 Edition H * G * A, Bucarest.

Barchane F, 2005. Modélisation des crues par la méthode de Muskingum de bassin versant de Essaouira, cas de bassin versant de oued Ksoub. Mémoire de fin d'études, Maîtrise Es Sciences Spécialisées Hydrogéologie . FSTG, Marrakech, 56pp .

Benkaci Ali, T, Dechemi N, .Modélisation pluie-débit journalière par des modèles conceptuels et "boîte noire"; test d'un modèle neuroflou. Journal-des sciences, 49(5) Octobre 2004

Chaponniere. A , 2005. Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride Cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain) , Thèse ,Institut National Agronomique Paris-Grignon . Disciplines : Hydrologie et télédétection , 268pp.

Estupina Borrell V, 2004. Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair. Application à de petits bassins versants du sud de la France , . Thèse ,no 2100,Ecole Doctorale : Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace, Spécialité : Hydrologie à TOULOUSE, 254pp,

Fniguire F, Boukrim S , 2007. Etude dynamique et statistique des crues du Haut Atlas de Marrakech (Maroc), Cas des bassins versants du N'Fis, de la Ghiraya et de l'Ourika. Mémoire de fin d'études, Maîtrise Es Sciences Spécialisées Hydrogéologie. FSTG, Marrakech,56pp.

Hingray B, Picouet C, Musy A , 2009. Hydrologie 2 une Science pour l'ingénieur, 266-270pp, presses polytechnique et universitaire Romandes (PPUR), 1^{ère} édition

Jordan,J,P, 1992. Identification et modélisation des processus de génération des crues.

Application au bassin versant de la Haute- Mentu,Thèse no 1014,Ecole polytechniques ,Federale de Lausanne,318pp.

Juillerat M, 2004. Etude hydrologique comparative de 5 bassins versants du Haut Atlas marocain. Mémoire de fin d'études, Maîtrise Es Sciences Spécialisées Métallogénie. FSTG, Marrakech,70pp.

Mouelhi S , 2007.Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier , l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (Agro Paris Tech) , Spécialité : Sciences de l'eau.

Moussu F , 2007. Modélisation couplée pluie/débit débit/débit :Développement et application aux bassins non jaugés, projet de fin d'étude de Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie Parcours Hydrologie-Hydrogéologie, Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris.

Musy A, Higgy C. 1999 Hydrologie appliquée, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR).

Saidi M. E., Daoudi L., Aresmouk M. et Blali A 2003 : Rôle du Milieu Physique dans l'Amplification des Crues en Milieu Montagnard : exemple de la crue du 17 Août 1995 dans la vallée de l'Ourika, Sécheresse 14(2) :1-8 p.,article.

Serhir , 2005. cours polycopie La prévision hydrométéorologique, l'Ecole Hassania des Travaux Publics ,

Soil conservation service (SCS) 1975 : National Engineering Handbook : section 4 :Hydrology ;United states departement of Agriculture (USDA),.

Weill S, 2007 Modélisation des échanges surface/subsurface a l'échelle de la parcelle par une approche darcéenne multi domaine. Thèse , no 1998,Ecole des Mines de Paris Spécialité Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives, 170pp.

ANNEXES

ANNEXE I (Teste pour déterminer X_c)

```
INPUT Delt,N

DIM RBE(1 TO 200), RBSM(1 TO 200),ADEN(1 TO 200),ACA(1 TO 200),XX(1 TO 20),Var(1
TO 20),Ecart(1 TO 20),KK(1 TO 200),Moy(1 TO 200)

FOR I = 1 TO N

PRINT "dedit d entre "

INPUT RBE (I)

Print "debit de sortie "

INPUT RBSM(I)

NEXT I

FOR I = 1 TO N

PRINT "dbe=";RBE(I), "dbs =" ; RBSM

NEXT I

PRINT "calcule le coefficient ACA "

X1 = 0.1

X2 = 0.5

NN = (X2 – X1)/dx + 1

X = 0.1

FOR J = 1 TO N – 1

XX (I) =X

X = X + 0.01
```

```
FOR J = 1 TO N - 1
JJ = J + 1
ANUM(J) = 0.5*Delt*((RBE (JJ) + RBE (J)) - (RBSM (JJ) + RBSM(J)))
ADEN(J) = XX(I) * ( RBE(JJ) -RBE(J)) + (1 - XX(I))*(RBSM(JJ) - RBSM(J))
NEXT J
Moy (J) = 0
FOR J = 1 TO N - 1
Moy = Moy (J) + ACA (J)
NEXT J
Moy = Moy (J)*((N -1)^(-1))
CP1 (I) = Delt / Moy(J)*(1 - X) + 0.5*Delt
CP2 (I) = (0.5*Delt - Moy (J)*X) /Moy(J)*(1 - X) + 0.5*Delt
FOR J = 1 TO N - 1
JJ = J + 1
RBS (JJ) = RBSM (J) + CP1 (RBE(J) - RBSM(J)) + CP2*(RBE(JJ) - RBE (J))
NEXT J
Var = 0
FOR J = 1 TO N - 1
Var = Var + (RBS(J) -RBSM(J))^2
Var = Var / (N - 1)
Ecart (I) = SQR (Var)
NEXT I
FOR I = 1 TO NN
PRINT ) "Ecart "; I, "=", Ecart (I)
NEXT I
```

```
RBS(1) = RBSM(1)
S = 0
FOR I = 1 TO NN - 1
  II = I+1
  S = Ecart (II)
  IF (S < Ecart(I)) THEN GO TO 1 ELSE GO TO 2
  1 RAMIN = S
  I1 = II
  GO TO 3
  2 RAMIN = Ecart (I)
  I1 = I
  3 NEXT I
PRINT "EcartMIN "; RAMIN ; I1 , "XX= "; XX(I)
END
```

Annexe II (Teste pour déterminer les débits simulés à partir des débits mesurés)

INPUT Delt,N

DIM RBE(1 TO 200), RBSM(1 TO 200),ADEN(1 TO 200),ACA(1 TO 200),XX(1 TO 20),Var(1 TO 20),Ecart(1 TO 20),KK(1 TO 200),Moy(1 TO 200)

FOR I = 1 TO N

PRINT "debit d entre "

INPUT RBE (I)

Print "debit de sortie "

INPUT RBSM(I)

NEXT I

FOR I = 1 TO N

PRINT "dbe=";RBE(I), "dbs ="; RBSM

NEXT I

PRINT "calcule le coefficient ACA "

X1 = 0.1

X2 = 0.5

NN = (X2 – X1)/dx + 1

X = 0.1

FOR J = 1 TO N – 1

XX (I) =X

X = X + 0.01

FOR J = 1 TO N – 1

JJ = J + 1

```
ANUM(J) = 0.5*Delt*((RBE (JJ) + RBE (J)) – (RBSM (JJ) + RBSM(J)))
ADEN(J) = XX(I) * ( RBE(JJ) –RBE(J)) + (1 – XX(I))*(RBSM(JJ) – RBSM(J))
NEXT J
Moy (J) = 0
FOR J = 1 TO N – 1
Moy = Moy (J) + ACA (J)
NEXT J
Moy = Moy (J)*((N -1)^(-1))
CP1 (I) = Delt / Moy(J)*(1 – X) + 0.5*Delt
CP2 (I) = (0.5*Delt – Moy (J)*X) /Moy(J)*(1 – X) + 0.5*Delt
FOR J = 1 TO N – 1
JJ = J + 1
RBS (JJ) = RBSM (J) + CP1 (RBE(J) – RBSM(J)) + CP2*(RBE(JJ) – RBE (J))
NEXT J
PRINT "RBS "; J,"=" ; RBS(J)
NEXT I
END
```

