

---

## Sommaire

<i>Résumé</i>	<i>i</i>
<i>Sommaire</i>	<i>ii</i>
<i>Table des figures</i>	<i>iv</i>
<i>Table des tableaux</i>	<i>iv</i>
<b>REMERCIEMENT</b>	<b>1</b>
<i>Introduction</i>	<b>2</b>
<b>CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE</b>	<b>3</b>
1. Présentation géographique de la zone d'étude	4
2. Contexte géologique	5
2.1. Le contexte régional	5
2.2. La géologie de la zone d'étude	6
3. Le contexte hydro-climatique	8
3.1. La climatologie de la zone d'étude	8
3.2. Réseau pluviométrique (Agence du bassin hydraulique de Sebou)	9
3.3. L'hydrologie du bassin Rdat	11
3.4. Variation temporelle des débits annuelles de la station de Had Kort	12
3.4.1. Module annuel	13
3.4.2. Méthode des écarts	13
3.4.3. Coefficient d'hydraulicité :	14
3.4.4. UTILISATION DES DEBIT MENSUEL	15
3.4.5. COEFICIENT MENSUEL DU DEBIT	16
4. CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES ET TOPOGRAPHIQUES DU BASSIN	17
4.1. Aire et périmètre	17
4.2. Indice de compacité	17
4.3. Rectangle équivalent	17
4.4. Relief et hypsométrie du bassin	18
4.4.1. Carte hypsométrique	19
4.4.2. Courbe hypsométrique	19
4.4.3. La répartition des pentes	20
<b>CHAPITRE II. PROBLEMATIQUE, OBJEDTIFS ET METHODOLOGIE</b>	<b>23</b>

---

5. Problématique	24
6. Objectifs de l'étude	24
7. Approche et méthodologie	24
8. Outils informatiques utilisés	25
8.1. Arc gis (le module HecGeoHms)	25
8.2. Hec-Hms	26
9. Description de la démarche suivie	27
9.1. Débit de base	27
9.2. Fonction de production	28
9.3. Fonction de transfert	28
9.4. Calibration du modèle	29
9.5. Evaluation des simulations	30
9.6. Calibration des paramètres	31
9.7. Calcul du temps de concentration	31
<b>CHAPITRE III. PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS</b>	<b>33</b>
1. Présentation des Résultats	35
1.1. Évènement I : Résultat et Discussion	35
1.2. Évènement II : Résultat et Discussion	38
2. Conclusion	40
<b>Conclusion générale</b>	<b>41</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>42</b>

## Table des figures

Figure 1 : Présentation de la zone d'étude .....	4
Figure 2 : Géologie du bassin versant de l'Oued Rdat .....	7
Figure 3 : Répartition des précipitations sur le bassin de Sebou .....	8
<i>Figure 4. Précipitation mensuel enregistrées par le poste pluviométrique d'Ouled Yaakoub.....</i>	<i>10</i>
Figure 5 : Précipitations annuelles (poste d'ouled yaakoub) .....	11
Figure 6 : Réseau hydrographique du bassin Rdat .....	12
Figure 7 : Débits annuels de la station de Had Kourt .....	13
Figure 8. Ecart des débits de la station de Had Kourt .....	14
Figure 9 : Coefficient d'hydraulicité de l'oued Rdat au niveau de la station Had Kourt. ....	15
Figure 10 : Variation mensuelle des débits au niveau de la station de Had Kourt. ....	15
Figure 11 : Coefficient mensuel de débit .....	16
Figure 12 : Modèle Numérique de Terrain du bassin versant Rdat .....	18
Figure 13 : Classes hypsométriques au niveau du bassin Rdat .....	19
Figure 14 : Courbe hypsométrique du bassin de Rdat .....	20
<i>Figure 15. La carte des pentes du bassin versant Rdat. ....</i>	<i>21</i>
Figure 16. Aperçu de la méthodologie suivie .....	25
<i>Figure 17. Modèle HeCHms du bassin Rdat .....</i>	<i>26</i>
Figure 18. Résultats de simulation obtenue pour l'évènement I.....	35
Figure 19 : l'hydrogramme obtenu et les pluies correspondantes. ....	36
Figure 20. Résultats obtenue pour la simulation de l'évènement II. ....	38
Figure 21 : Comparaison des deux hydrogrammes simulé et observé. ....	38
Figure 22. Comparaison de L'écoulement de la fonction objective.....	39

## Table des tableaux

Tableau 1: Altitudes en fonction des surfaces cumulées inverse .....	19
Tableau 2:Classe des pentes .....	20
Tableau 3:Classe de pente en fonction % de surface et surfaces cumulées.....	21
Tableau 4. Tableau de débit simulé.....	35
Tableau 5: Résultats de comparaison de débit .....	36
Tableau 6 : Résultats de comparaison après calage.....	37
Tableau 7.Tableau de comparaison .....	39

### Introduction

Objet d'une forte demande (consommation domestique, industrielle, agricole...) et soumise à des pollutions de toute sorte, l'eau est une ressource dont la gestion est complexe, les enjeux (Politiques, économiques, environnementaux...) étant souvent conflictuels.

Parmi les outils disponibles pour tenter d'utiliser au mieux cette ressource, les modèles pluie-débit, ont pour objectif de reproduire à l'échelle du bassin versant les débits des fleuves et rivières (dont la connaissance peut être nécessaire pour la construction d'un ouvrage hydraulique, l'approvisionnement en eau potable d'une ville...) à partir de la mesure ou de la simulation des pluies. Comment intégrer ces contraintes naturelles aux modèles qui sont censés être capables de reproduire l'ensemble de ces phénomènes ? Si pendant longtemps on n'a pas eu d'autres choix que de se contenter de travailler avec des valeurs moyennes considérées comme représentatives de la totalité du bassin versant (c'est la philosophie de l'approche globale), les moyens étant encore trop limités pour prendre en compte l'hétérogénéité spatiale, ce n'est plus le cas aujourd'hui du fait de la puissance des outils informatiques et de la disponibilité des données spatialisées (Système d'Information Géographique, Modèle Numérique de Terrain...). Il est donc en principe possible d'intégrer la notion d'hétérogénéité spatiale d'un bassin versant dans le cadre de la modélisation pluie-débit.

Le comportement hydrologique d'un bassin versant est régi par l'ensemble de ses caractéristiques physiques. La pente, la géologie, la pédologie, le degré d'anthropisation, le couvert végétal sont autant des facteurs physiques pouvant avoir un impact sur la vitesse d'écoulement, le taux de ruissellement, l'infiltration et sur l'écrêtement de crue.

**CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

***1. Présentation géographique de la zone d'étude***

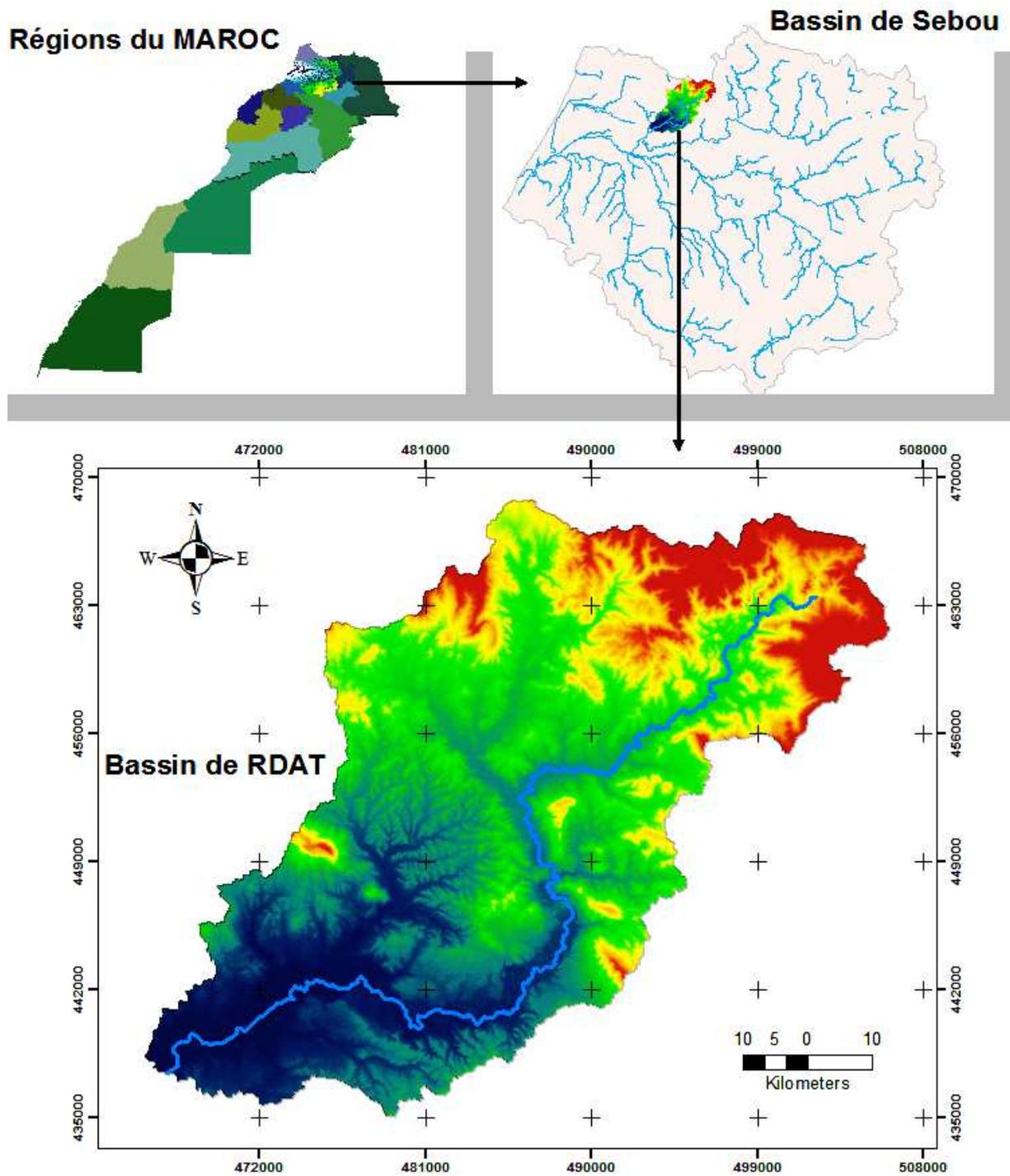


Figure 1 : Présentation de la zone d'étude

L'Oued Rdat est un affluent de Sebou, situé dans sa partie aval sur le flanc nord du bassin .il est limité à l'ouest par le bassin oued Itnin, à l'est, et ausud par le bassin de Ouargha et au nord par le bassin du Loukouss.

Le bassin est situé entre la latitude de 34° et 34°30' et la longitude 4°30' et 5°.

Les caractéristiques d'un bassin versant influence fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue.L'intensité de la réaction du bassin versant est influencée par diverses caractéristiques morphologiques : surface, forme, altitude, pente et orientation.

A ces facteurs s'ajoute d'autres caractéristiques telles que le couvert végétal et les caractéristiques du réseau hydrographique.

Les facteurs, d'ordre purement géométriques ou physique, s'estiment aisément à partir des carte adéquates ou en recourant à des techniques digitale et à des modèles numériques.

## **2. Contexte géologique**

### **2.1. Le contexte régional**

La structure géologique de la chaîne rifaine prend la forme d'un arc caractérisé par un déversement (plis, écailles profondes) et un écoulement de nappes superficielles qui se font des zones internes vers les zones externes intéressant la terre ferme.

la Lithologie des matériaux de la chaîne rifaine s'échelonne du Primaire au Quaternaire, donnant lieu à la prédominance des roches tendres et sensibles à l'érosion (Flyschs, argiles, schistes et marnes feuilletées).

Le substratum paléozoïque est pratiquement inconnu dans la zone pré-rifaine .On observe seulement quelques débris plus ou moins métamorphisés entrainés par les diapirs triasique.

Les dépôts du trias constitués surtout des argiles rouges avec du sel gemme et du gypse en quantité importante associés à des roches basaltiques, affleurent sous forme d'épointement à la faveur des mouvements diapiriques ou d'accident tectonique. Il est probable que ces formations plastiques constituaient le niveau de décollement dysharmonique généralisé entre les séries secondaires et tertiaires du sillon rifain externe et du soubassement (MICHARD, 1976).

Les formations du crétacé et du tertiaire caractérisés par des facies argilo-marneux constituent l'essentiel des matériaux géologiques servant comme roche mère pédogénétique pour les sols du bassin.

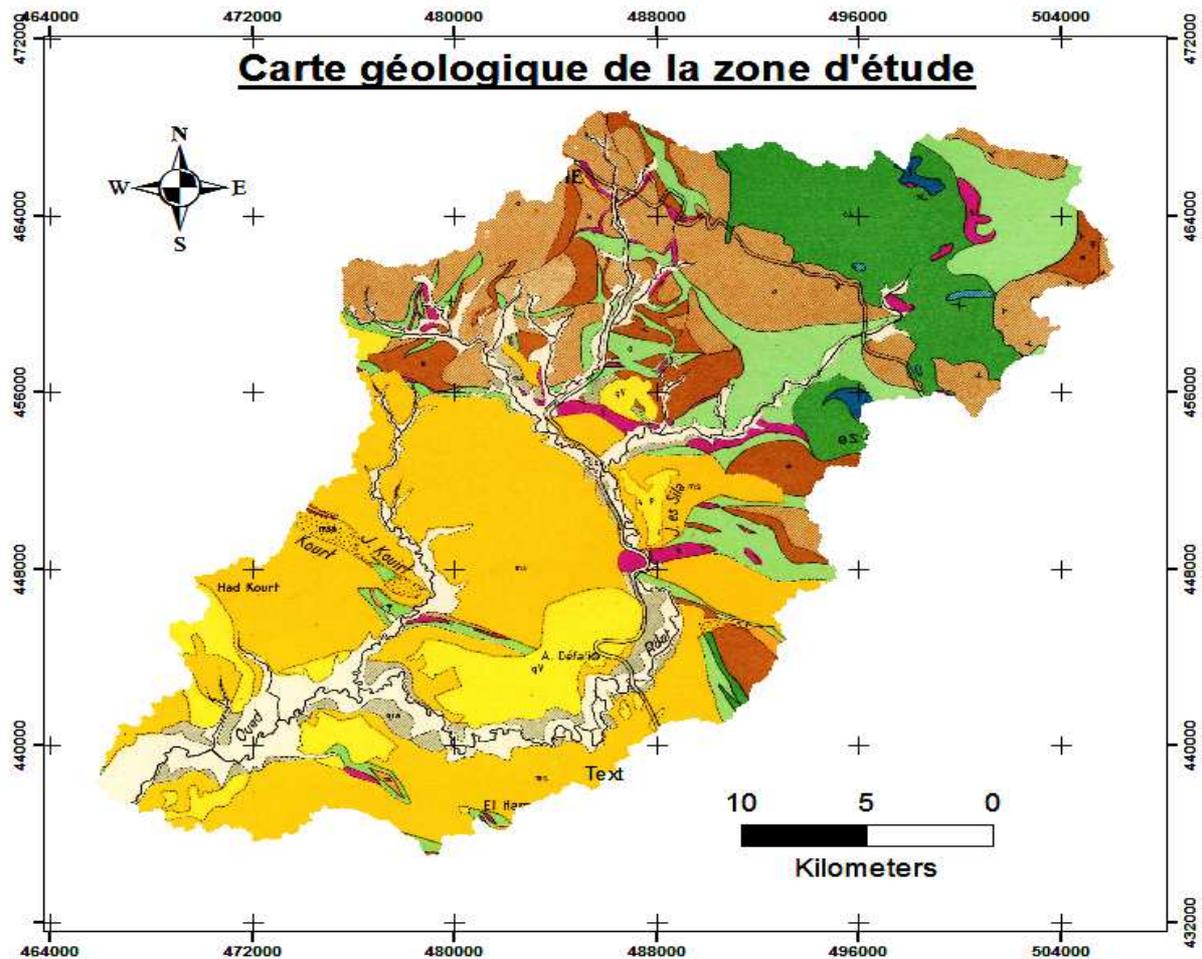
Le crétacé plus représenté que le trias sous forme de flysch noir à bancs de grès siliceux, flysch à bancs calcschiste pour le crétacé moyen, et flysch marneux pour le crétacé supérieur. Ce crétacé affleure dans le bassin surtout dans la partie nord et la partie centrale.

Pour le tertiaire, il est représenté par des dépôts d'âge éocène et oligocène en plus du miocène inférieur et moyen :

- Les dépôts Eocènes sont constitués par des marnes blanches, riches en rognons de silex. il forme de relief marneux.
- L'oligocène est constitué des flyschs à marne, grès et calcaire. Les couches terminales sont constituées par des marnes jaunes à niveau sableux et gréseux.
- Le miocène est constitué par des marnes et des alternances marno-calcaires.
- Le quaternaire est représenté par des terrasses constitués de dépôts provenant de l'érosion des marnes. Les dépôts les plus récents qui constituent les plus basses terrasses sont de nature limoneuse fortement calcaire (pléistocènes et holocènes).

## **2.2. La géologie de la zone d'étude**

Situé dans le domaine du périmètre externe, le bassin versant de l'oued Rdat est caractérisé par la prédominance des formations tertiaires. En amont du bassin on rencontre les formations du crétacé et du miocène inférieur et supérieur avec quelques affleurements triasique et jurassique surtout au niveau des traversés de la rivière ou phénomènes géologique (failles, diapirs...). En aval du bassin on rencontre principalement du pliocène et du quaternaire.



Légende

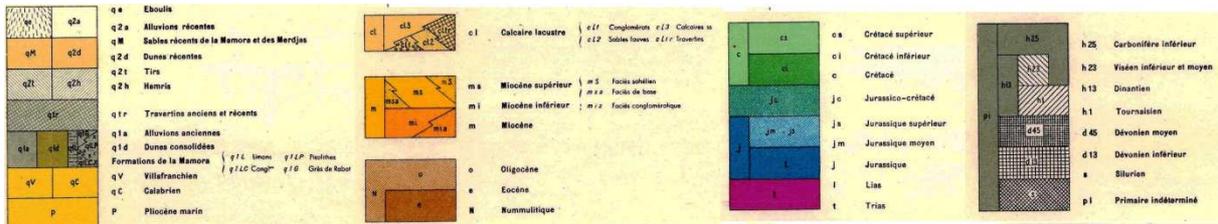


Figure 2 : Géologie du bassin versant de l'Oued Rdat

### 3. Le contexte hydro-climatique

#### 3.1. La climatologie de la zone d'étude

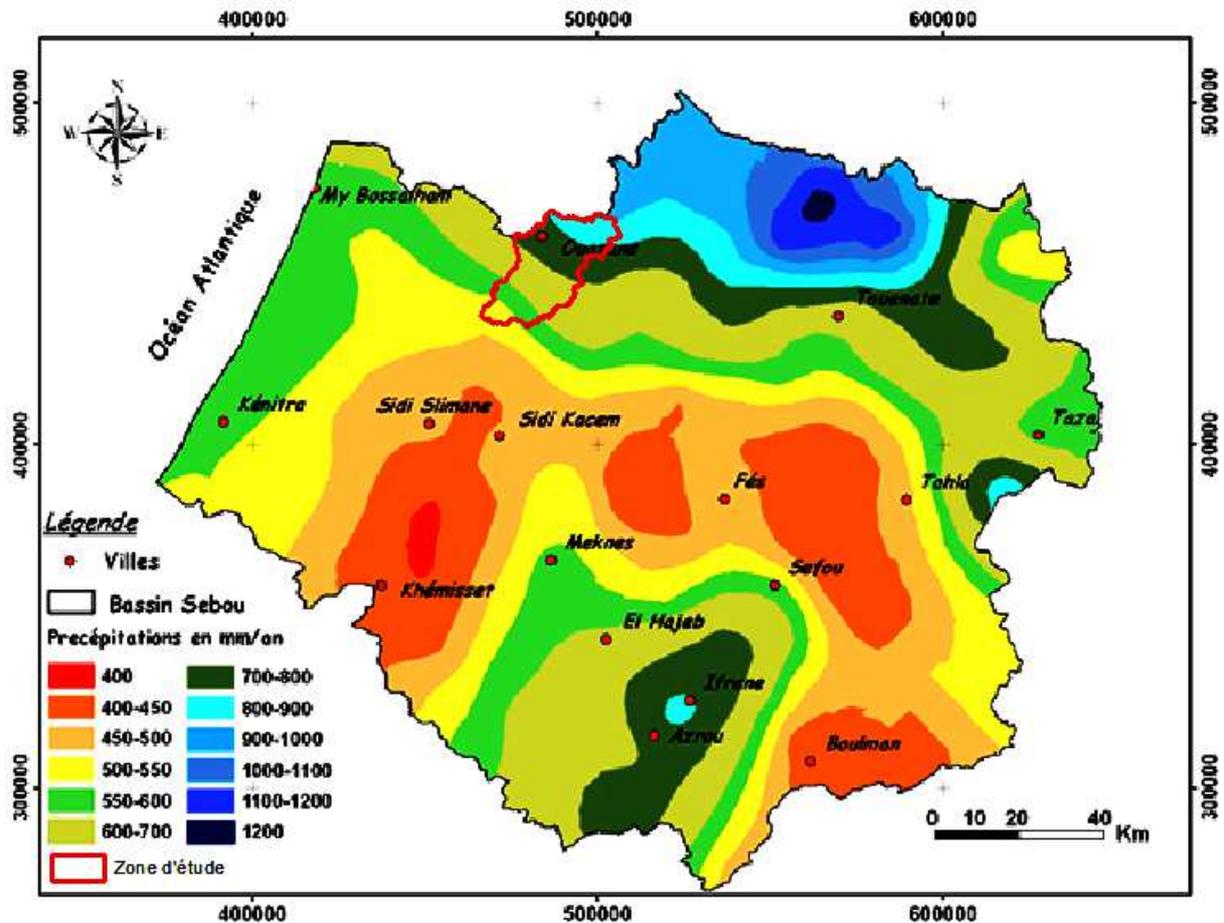


Figure 3 : Répartition des précipitations sur le bassin de Sebou

La réserve d'eau superficielle et souterraine, dans le bassin versant est le résultat de processus simultanés ou successifs des variables dans le temps et dans l'espace. La précipitation est une des variables explicatives importante de l'état de ces réserves. Ces précipitations peuvent être abordées sous différent angles :

- Quantité de précipitation rapportés avec un pas de temps données (journaliers, mensuel, annuel)
- Fréquences d'apparition des événements (le dépassement ou le non-dépassement).

- Intensité, c'est-à-dire la quantité d'eau tombée dans une unité de temps
- Nature de précipitation (solide, liquide)

Dans le cadre de la présente étude, on s'intéressera essentiellement à la quantité de précipitation apportée annuellement. Cette quantité sera toutefois déterminée sur la base des précipitations mensuelles. En effet, la pluviométrie est parmi les éléments ayant une grande utilité pour la définition des différents paramètres climatiques.

Dans un bassin versant en général on assiste à une forte variabilité spatio-temporelle des précipitations :

- Dans le temps : les variations sont quotidiennes, saisonnière (pluies augmentent en hiver et diminuent en été) annuelle et interannuelles.
- Dans l'espace : l'influence de l'altitude se fait sentir, puisque le nombre de jours de pluie est important en montagne (100 jours) contre 60 à 70 jours en plaine. La pluviométrie diminue aussi du nord (il pleut 93 jours) vers le sud (34 jours). En fin le gradient pluviométrique est influencé par la distance par rapport à la mer (les précipitations diminuent en allant vers l'intérieur). Elle est influencée aussi par l'exposition des versants vis à vis des entrées maritimes ou océaniques.

En résumé, on peut dire que les variables explicatives de la pluviométrie dans le bassin versant sont : l'altitude, l'exposition du bassin versant et l'éloignement par rapport à la mer.

### **3.2. Réseau pluviométrique (Agence du bassin hydraulique de Sebou)**

Les données pluviométriques sont la base de toutes études hydrologiques (statistique, climatique, planification et gestion des ressources en eau, délimitation des zones inondables). Cependant l'acquisition des données représentatives de précipitations sur une surface donnée nécessite un réseau d'observation étendu et bien reparti. L'importance de ce réseau résulte souvent d'un compromis entre la précision désirée et les contraintes de gestion (objectif de mesure et possibilité financière).

Par sa situation géographique dans le péricarpe au nord du Maroc, le bassin versant est soumis à un climat méditerranéen semi-aride caractérisé par un hiver tempéré et humide et un été chaud et sec, dans un régime semi continental. Cette situation fait que l'année pluviométrique est composée de deux saisons contrastées, une saison humide qui s'étend d'octobre à mai et une autre sèche de juin à septembre.

L'étude des précipitations liquides s'avère très primordiale du fait que ces précipitations sont les facteurs à souligner dans le processus de génération des crues et de formation des ressources en eau superficielles et souterraines.

A l'échelle du Maroc, et d'une manière générale, le nombre de jours de précipitation varie en fonction de la latitude puisqu'il diminue du nord vers le sud (93 jours au nord et 34 jours au sud (sous)).

#### Station Ouled Yaakoub

Au niveau de cette station, les précipitations moyennes annuelles montrent que le mois le plus arrosés correspond au mois de Décembre avec une moyenne de 136 mm alors que le mois d'Aout correspond au mois le plus sec avec une valeur de 3.5 mm.

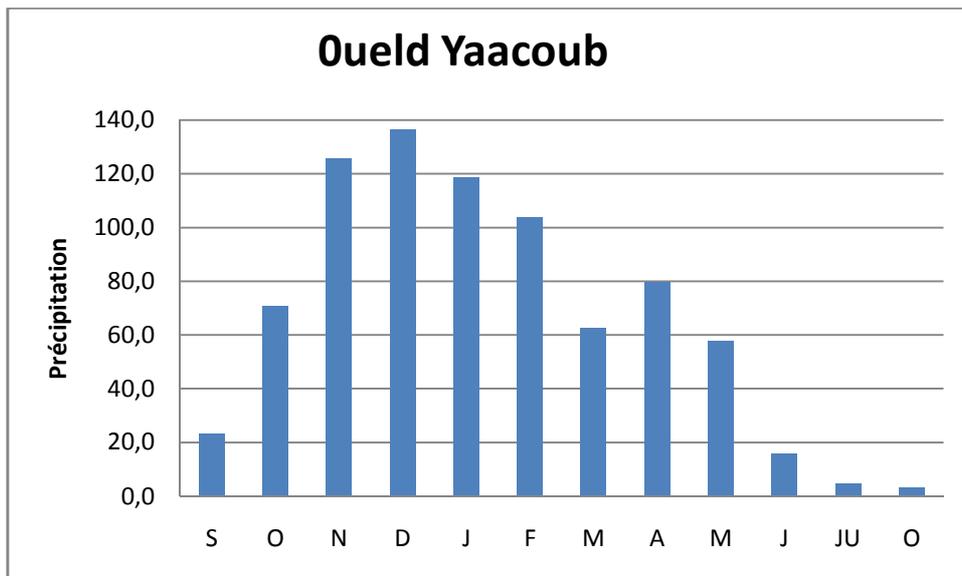


Figure 4. Précipitation mensuelle enregistrées par le poste pluviométrique d'Ouled Yaakoub

La figure 5 présente la répartition de la pluviométrie annuelle durant la période entre 1978 et 2009. Elle montre que l'année hydrologique 1996 constitue l'année la plus humide avec une précipitation moyenne de 1493 mm, alors que l'année 2005 correspond à l'année plus aride avec 176 mm.

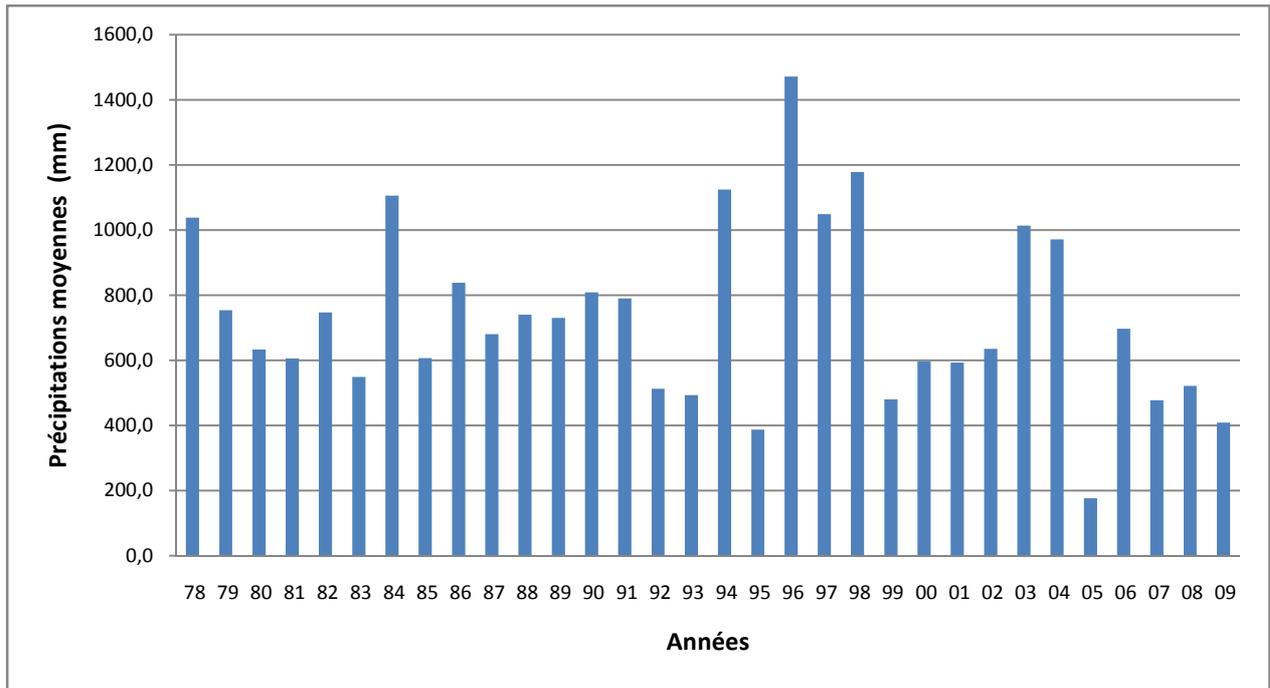


Figure 5 : Précipitations annuelles(poste d'ouled yaakoub)

### **3.3.L'hydrologie du bassin Rdat**

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanent ou temporaires, qui participe à l'écoulement dans le bassin versant. Le réseau hydrographique est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin. Il peut prendre une multitude de forme.

La différenciation du réseau hydrographique d'un bassin est due à quatre facteurs principaux :

- la Géologie : par sa sensibilité à l'érosion, la nature du substratum influence la forme du réseau hydrographique.
- le climat : réseau hydrographique est dense dans les régions montagneuses et humides, et il attendance à disparaître dans les régions désertiques.
- la pente :elle détermine si le cours d'eau est en phase érosive ou sédimentaire. Dans les régions les plus élevées, les cours d'eau participent souvent à l'érosion de la roche sur laquelle s'écoulent. Au contraire, en plaine, les cours d'eau s'écoulent sur un lit ou la sédimentation prédomine.

- l'anthropisation : le drainage des terres agricoles, la construction des barrages, l'endiguement, la protection des berges et la correction des cours d'eau modifient continuellement le tracé naturel du réseau hydrographique.

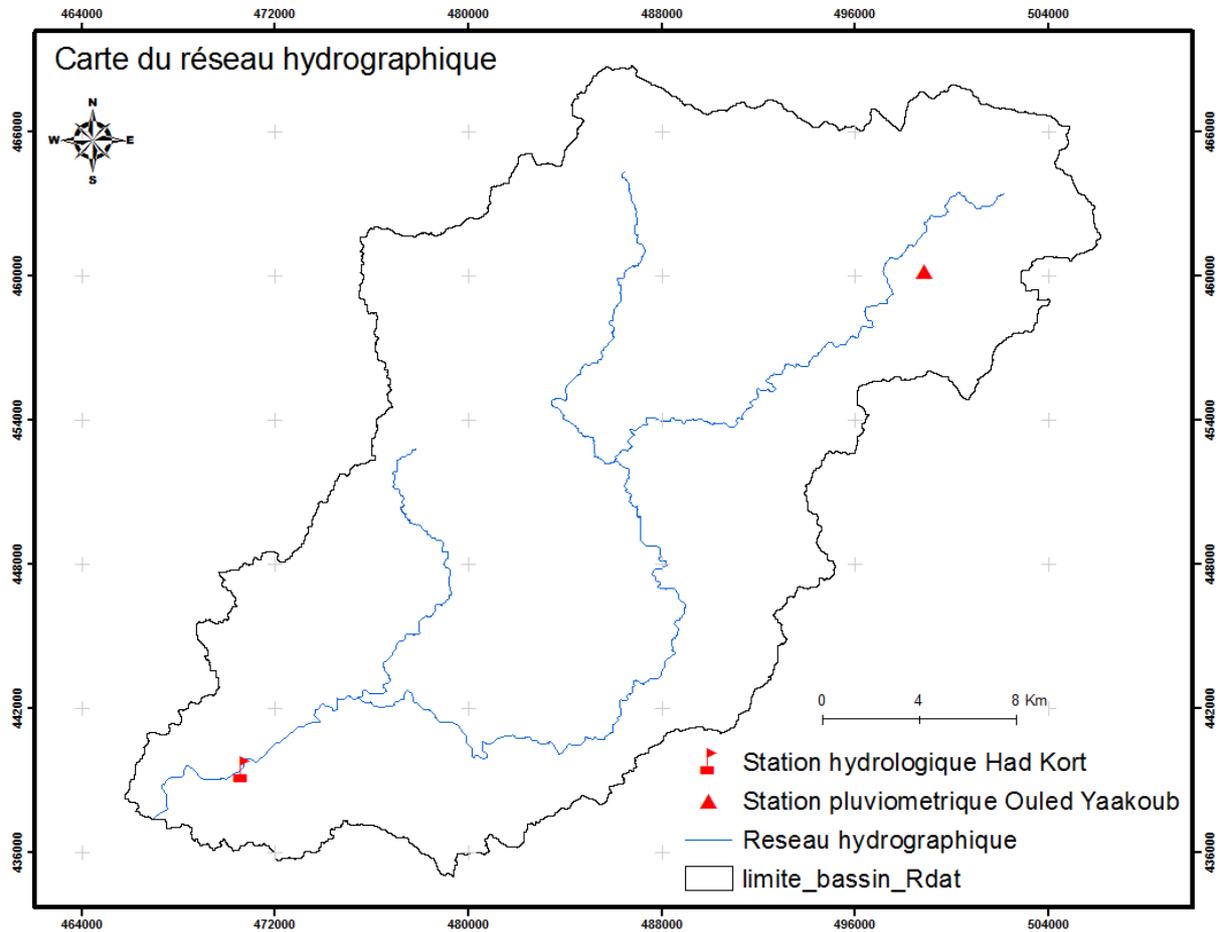


Figure 6 : Réseau hydrographique du bassin Rdat

Situé dans la zone semi-aride, le bassin versant de Rat, est sujet des problèmes de rareté de l'eau suite à une variabilité climatique annuelle et aussi interannuelle. De ce fait, une bonne connaissance du fonctionnement hydrologique et de son bilan, est une nécessité pour la mise en valeur des ressources en eau d'une part, et pour la bonne gestion des aléas hydro-climatiques d'autre part.

### **3.4. Variation temporelle des débits annuelles de la station de Had Kort**

Les débits mesurés au niveau de la station de Had Kort ont subi une étude selon une approche statistique probabiliste.

### 3.4.1. Module annuel

L'évolution des débits moyens annuels reflètent des irrégularités temporelles en tenant compte des variations interannuelles des débits de la station. Ces irrégularités temporelles mettent en relief une succession des périodes humides et des périodes sèches.

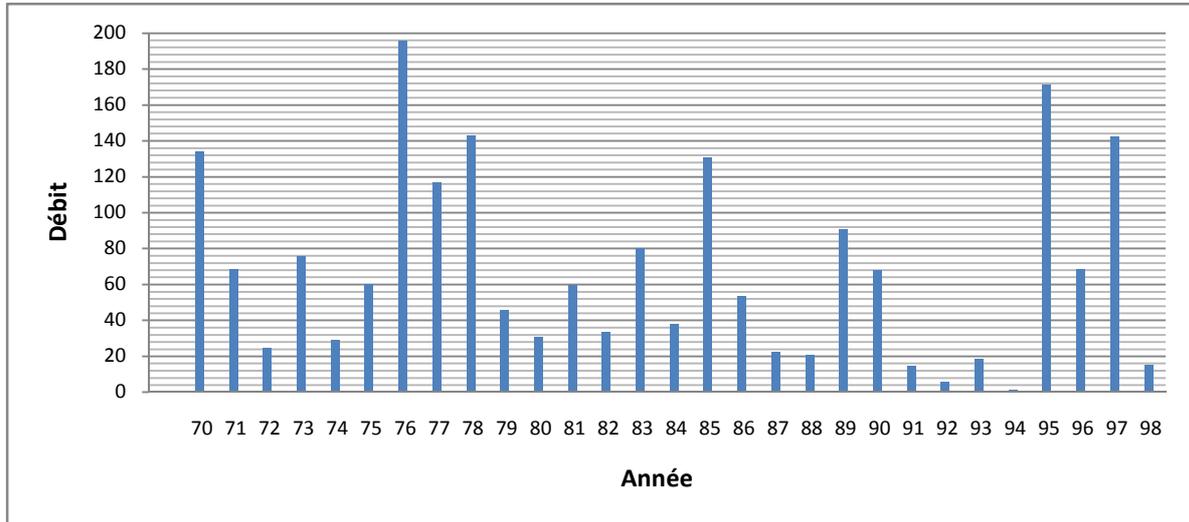


Figure 7 : Débits annuels de la station de Had Kourt

### 3.4.2. Méthode des écarts

Pour mettre en évidence les fluctuations hydro-climatiques qui ont affectés le bassin versant, la méthodologie des écarts ( $E_c$ ) des débits moyens annuels ( $Q_{ma}$ ) au débit moyens interannuel ( $Q_{mi}$ ) semble adéquate, puisqu'elle est utilisée avec succès par plusieurs auteurs : Probst et Tardy (1987) sur les fleuves mondiaux, et Etchanchu (1988) sur la Gérôme, et Haida et al (2000) sur le Sebou.

Cette méthode a permis de distinguer les périodes excédentaires ( $E_c > 0$ ) et les périodes déficitaires ou ( $E_c < 0$ )

$$E_c = (Q_{ma} - Q_{mi}) * 100 / Q_{mi}$$

Avec :  $Q_{ma}$  = débit moyen annuel

$Q_{mi}$  = débit moyen interannuel

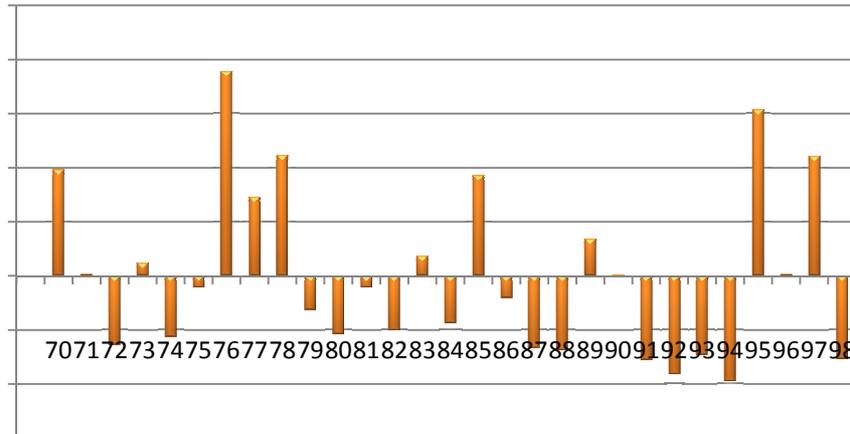


Figure 8. Ecart des débits de la station de Had Kourt

Les résultats obtenus révèlent une alternance de périodes excédentaires et déficitaires. Selon Haida et al (2000) l'alternance de ces périodes est expliquée par les fluctuations climatiques qui permettent de recharger les réservoirs en périodes excédentaires et de vidanger ces réservoirs en périodes déficitaires

### 3.4.3. Coefficient d'hydraulicité :

Pour un cours d'eau, le coefficient d'hydraulicité c'est le débit d'une année donnée sur le débit moyen interannuel calculé sur plusieurs années.

Pour un coefficient  $C_h > 1$  c'est une année humide à écoulement important, dans le cas contraire c'est une année à faible hydraulicité, c'est-à-dire un faible débit du cours d'eau. Les résultats du coefficient confirment les fluctuations hydro-climatiques.

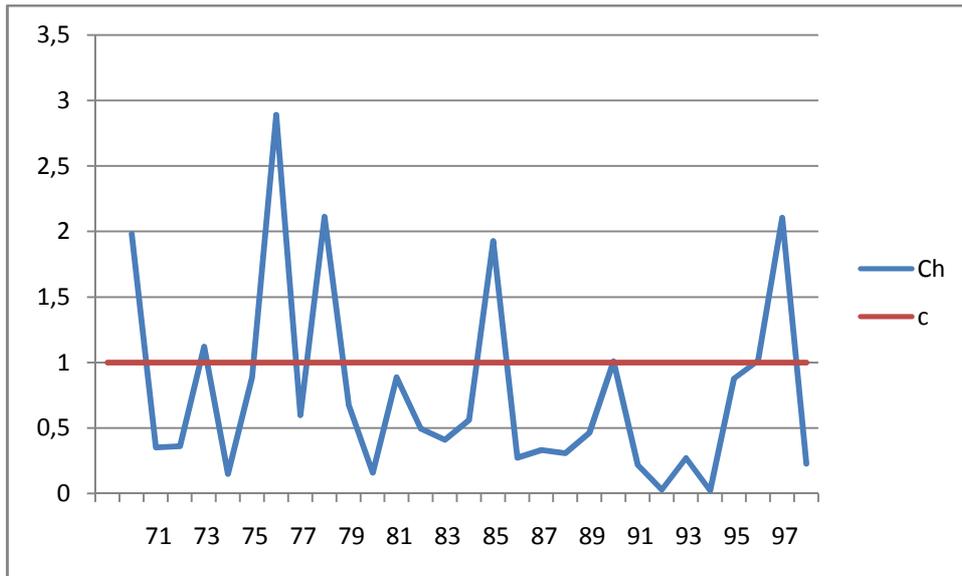


Figure 9 : Coefficient d'hydraulicité de l'oued Rdat au niveau de la station Had Kourt.

### 3.4.4. UTILISATION DES DEBIT MENSUEL

La figure 7 montre la variation mensuelle des débits au niveau de la station Had kourt qui reflète l'impact du climat semi-aride. Ainsi le régime hydrologique montre les variations saisonnières avec une période humide et une période sèche.

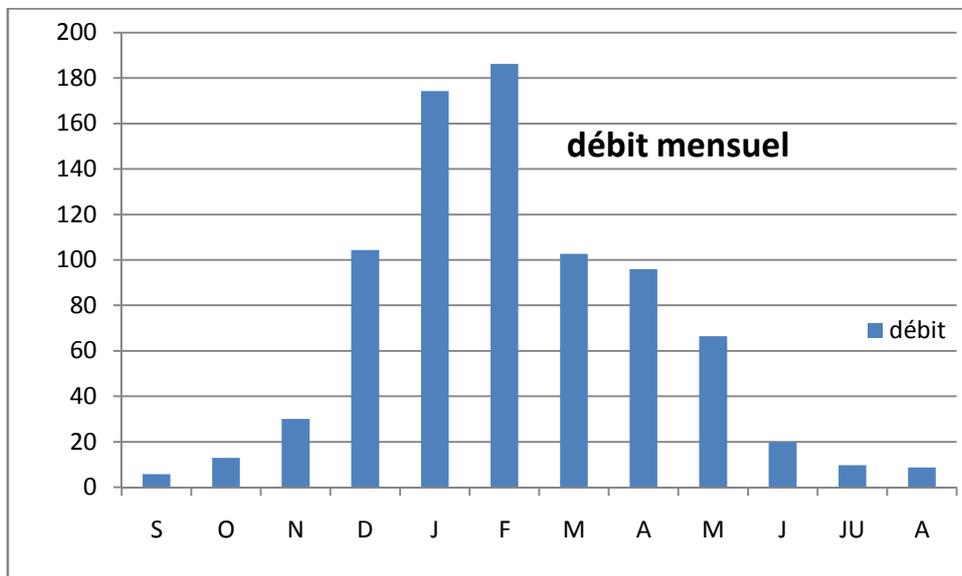


Figure 10 : Variation mensuelle des débits au niveau de la station de Had Kourt.

### **3.4.5. COEFFICIENT MENSUEL DU DEBIT**

Le coefficient mensuel des débits met en évidence la variabilité des écoulements, qui se manifeste par des périodes de hautes eaux et basses eaux. Le coefficient mensuel des débits est le rapport des débits moyens mensuels sur les débits moyens interannuels.

$$C = \frac{Q_m}{Q_{mi}}$$

Avec :

C : Coefficient moyen du débit

$Q_m$  : Débit moyen mensuel

$Q_{mi}$  : Débit moyen interannuel

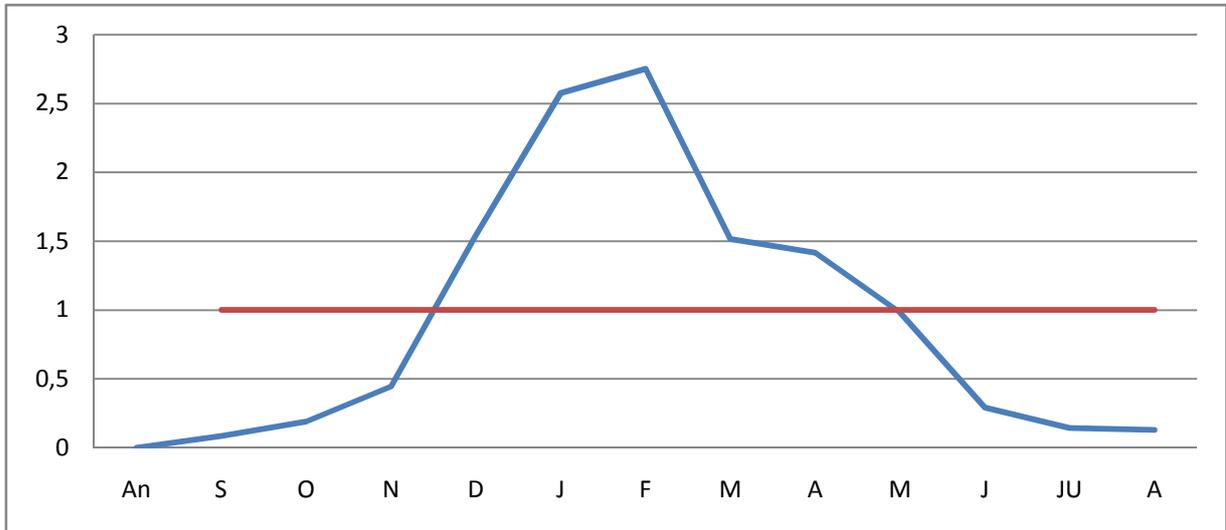


Figure 11 : Coefficient mensuel de débit

D'après le coefficient mensuel de débit, la période des hautes eaux ( $C > 1$ ) s'étale de décembre ( $C > 1$ ) jusqu'à avril mai. Elle enregistre des crues violentes qui caractérisent le mois de février. La période des basses eaux ( $C < 1$ ) est plus longue et s'étale de mai à décembre. Les étiages les plus sévères sont observés au mois de juillet, août et septembre.

#### **4. CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUESETTOPOGRAPHIQUESDU BASSIN**

##### **4.1. Aire et périmètre**

La superficie et le périmètre d'un bassin versant jouent un rôle primordial dans son étude. Leur influence se manifeste dans la nature de la relation entre le débit et le temps, un petit bassin versant réagit très vite à une averse.

Pour le bassin Rdat, il s'étale sur une superficie de 696km<sup>2</sup> et un périmètre de 207Km.

##### **4.2. Indice de compacité**

Indice admis pour les hydrologues pour caractériser la forme du bassin versant d'une part et d'autres part de renseigner sur la rapidité de la concentration des écoulements. Appelé indice de Gravelius, c'est le rapport du périmètre sur la racine carrée de la surface : le bassin est considéré comme bien drainé si l'indice tend vers 1.

Dans notre cas d'étude : le bassin Rdat

$$k_g = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}} = \frac{207}{\sqrt{696}} * 0.28 = 1.2$$

Avec :

Kg : l'indice de compacité

A : La surface du bassin

P : Le périmètre de bassin

L'indice de compacité est de l'ordre de 1.2, donc géométriquement, le bassin n'est pas très allongé. Donc c'est une compacité qui permet un rassemblement un peu rapide des eaux de ruissellement vers l'exutoire.

##### **4.3. Rectangle équivalent**

Appelé aussi rectangle de Gravelius, c'est un rectangle de même surface et de même périmètre que le bassin versant. De cette façon, les courbes de niveau deviennent des droites parallèles au petit côté du rectangle. L'un de ses petits côtés représente l'exutoire et l'autre côté représente l'altitude maximale du bassin.

Soit L et l la longueur et la largeur du rectangle équivalent et P et A le périmètre et la surface du bassin :

➤ Calcul de L et l

$$L = \frac{k_g \sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right] = 31.9 \text{ Km}$$

$$l = \frac{k_g \sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right] = 18.11 \text{ Km}$$

#### **4.4. Relief et hypsométrie du bassin**

La plupart des facteurs climatiques et hydrologiques varient avec l'altitude. Il est important de déterminer la répartition de la superficie du bassin versant par des tranches d'altitudes et de dégager les paramètres du relief. L'étude de l'hypsométrie du bassin de Rdat s'est basée sur le Modèle Numérique de Terrain ASTER GDEM.

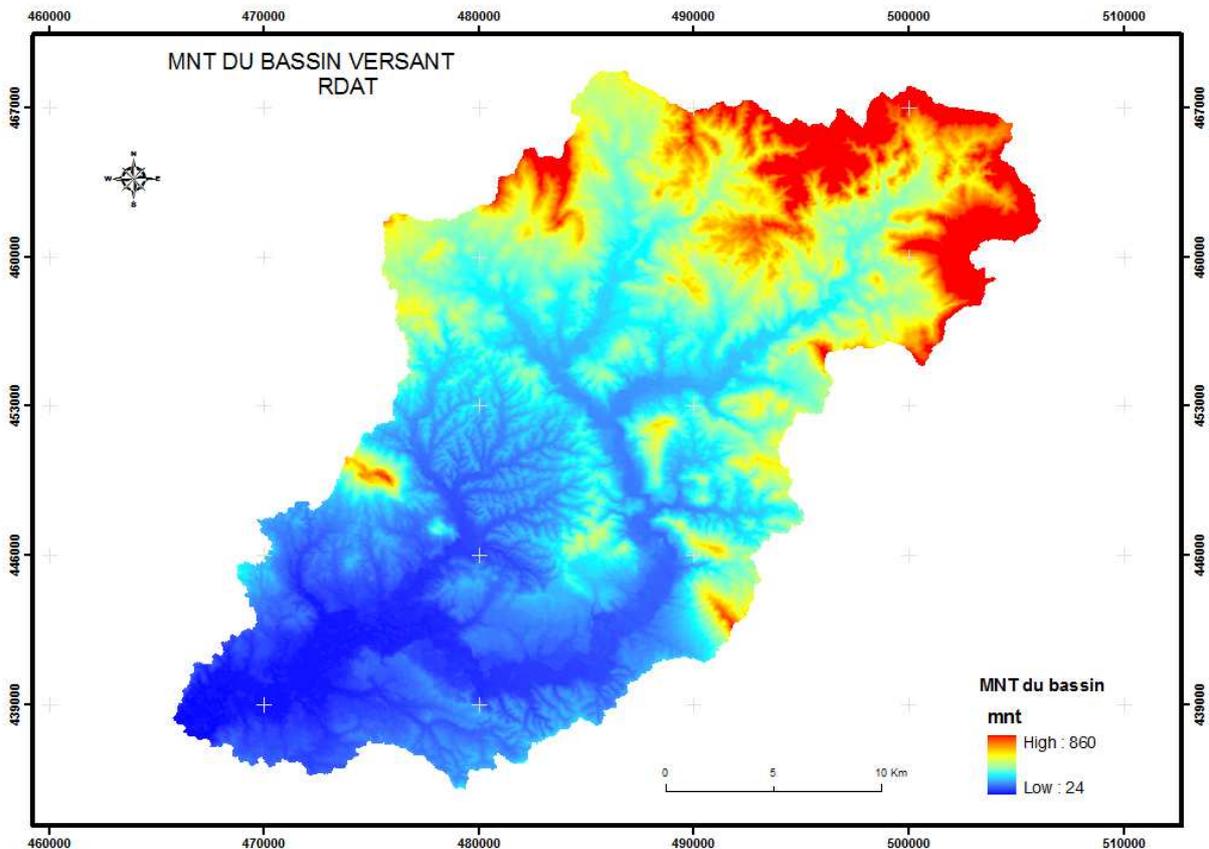


Figure 12 : Modèle Numérique de Terrain du bassin versant Rdat

**4.4.1. Carte hypsométrique**

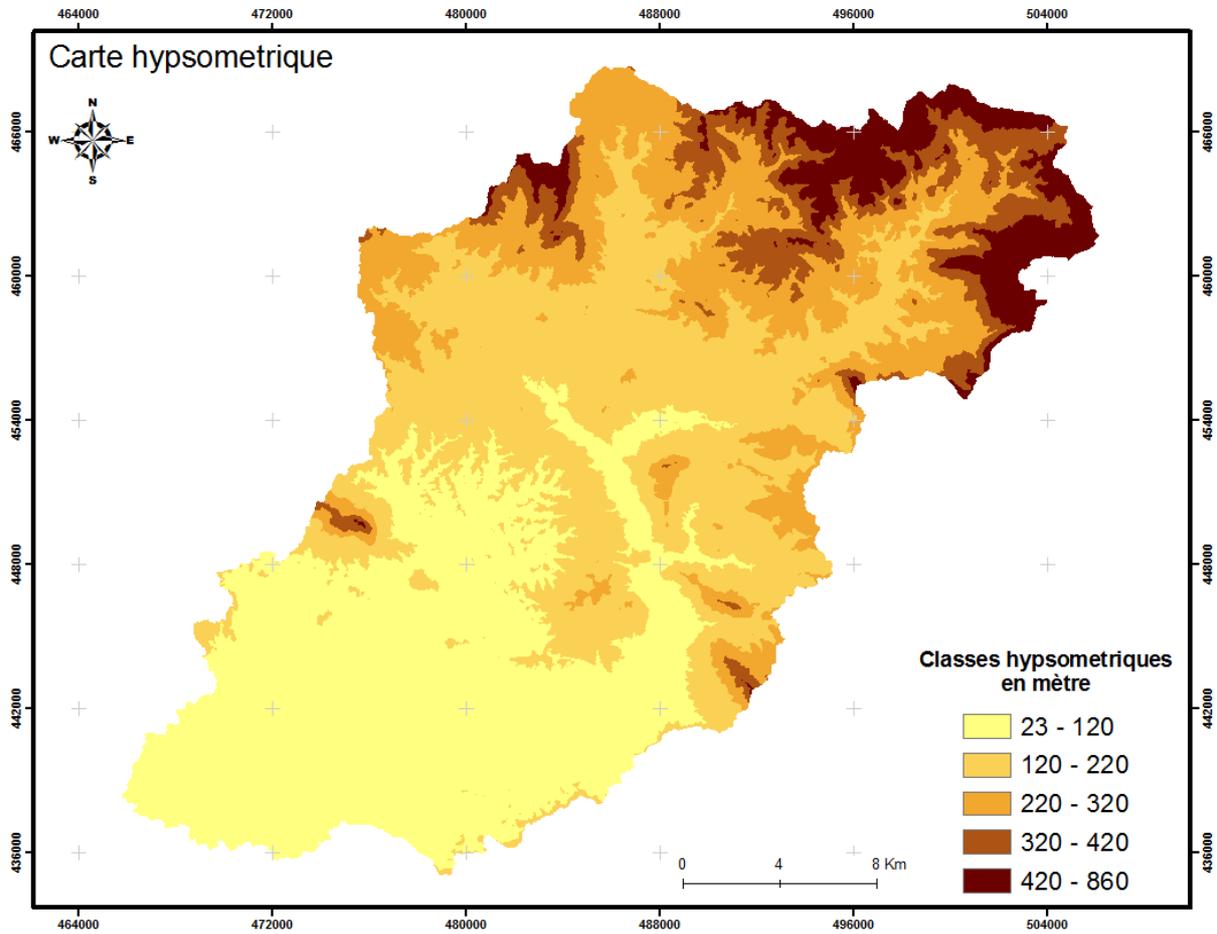


Figure 13 : Classes hypsométriques au niveau du bassin Rdat

**4.4.2. Courbe hypsométrique**

La répartition des différentes tranches d'altitudes du bassin versant de l'oued Rdat a été représentée par le graphique de la courbe hypsométrique (figure 14). Cette courbe révèle que les faibles altitudes occupent une grande partie de la surface du bassin.

Altitude en m	Surface cumulée inverse en %
23	100
120	64
220	32
320	14
420	6
860	0

Tableau 1: Altitudes en fonction des surfaces cumulées inverses

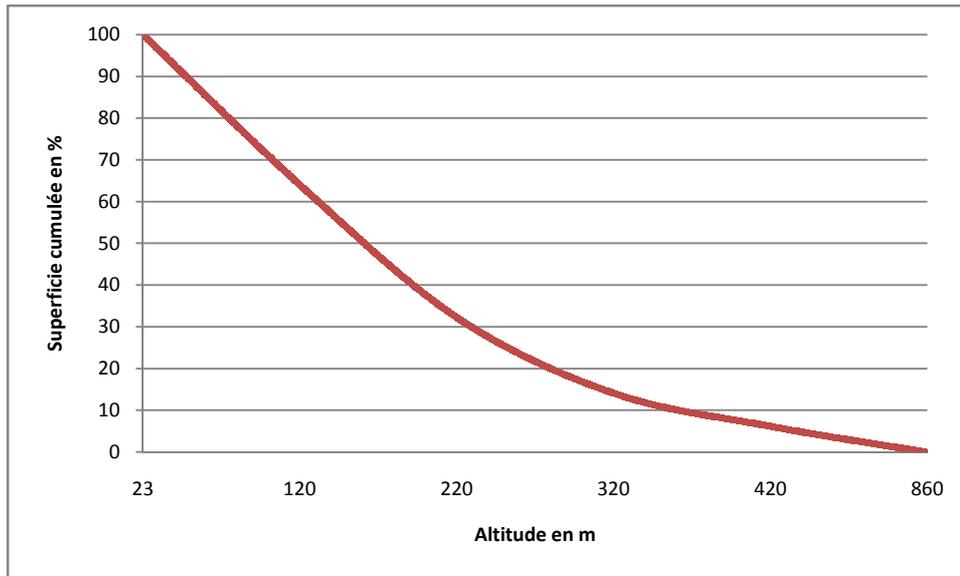


Figure 14 : Courbe hypsométrique du bassin de Rdat

#### 4.4.3. La répartition des pentes

La réalisation de la carte des pentes de notre zone d'étude, s'est basé sur l'MNT Aster GDEM, et grâce à la fonction <spatial analyse /slope> qui permet le calcul du dénivelé au niveau de chaque pixel. La carte obtenue de cette opération est de format raster ou chaque pixel est associé à une valeur de pente qui peut être exprimée en degré ou en pourcentage. Pour le calcul de la surface de chaque tranche de pente, on a utilisé l'utilitaire de calcul des surfaces qui permet après une transformation du fichier raster en un fichier vecteur de rassembler les classes de pentes dans des polygones.

Classes	TYPE DE PENTE
1	Nulle à faible (0 à 8%)
2	Modéré (8 à 16%)
3	Abrupte (16 à 26 %)
4	Abrupte (26 à 41 %)
5	Extrêmes (41 à 120%)

Tableau 2: Classe des pentes

Le tableau ci-dessous présente les superficies relatives à chaque classe de pente, ainsi que les surfaces cumulées de différentes classes.

Classe de pente	code	Surface (Km <sup>2</sup> )	surface cumulée (Km <sup>2</sup> )	Surface (%)	Surface cumulée (%)
0 - 8	1	244.4	244.4	35.1	35.1
8 - 16	2	221.1	465.5	31.7	66.8
16 -26	3	149.6	615.1	21.5	88.3
26 - 41	4	63.0	678.1	9.0	97.4
41 - 120	5	18.3	696.4	2.6	100.0
	TOTAL	696.4			

Tableau 3. Classes des pentes, surface et surface cumulée correspondantes

Les résultats obtenus montrent un pourcentage de 35% et de 32% pour les classes 1 et 2 qui représentent les pentes faibles à modéré c'est dire presque 67% de terrain. La classe 3 représente 21% du terrain, et les deux classes 4 et 5 ne représentent que 12% de terrain.

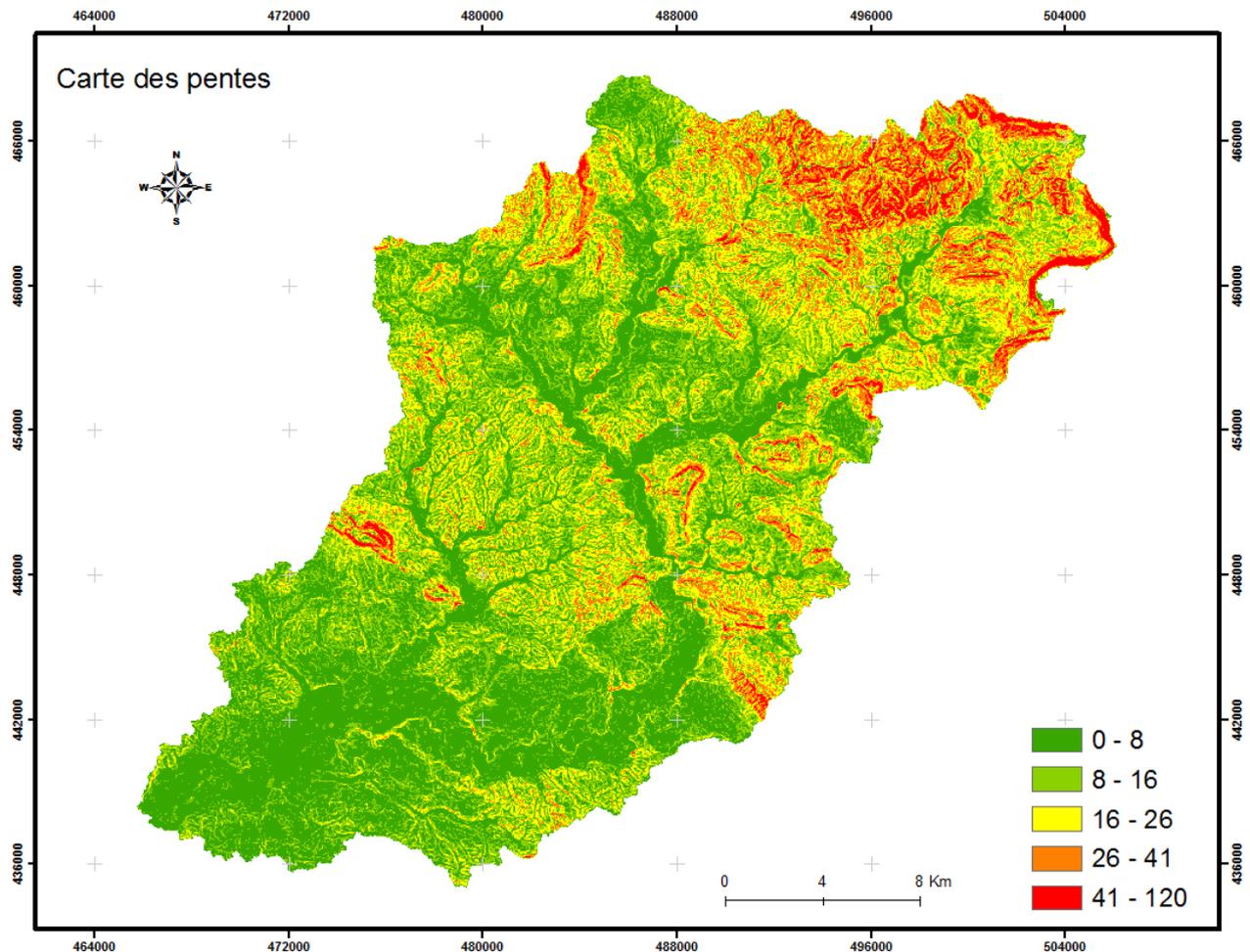


Figure 15. La carte des pentes du bassin versant Rdat.

La carte des pentes renseigne sur la variation de la raideur du relief. Cette variation joue un rôle primordial dans la détermination des caractéristiques du bassin versant. Elle renseigne

sur la topographie du bassin. Cette carte montre que les pentes les plus rudes se concentrent dans la partie amont au nord –est du bassin. Le reste du bassin est caractérisé par des pentes faibles à modérées.

En conclusion, on peut dire qu'il s'agit d'un bassin d'accumulation où la sédimentation l'emporte sur l'érosion, puisque la quasi-totalité de la superficie (88.3%) présente une pente faible à modérée. On peut donc constater qu'il s'agit d'un vieux bassin.

**CHAPITRE II. PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET  
MÉTHODOLOGIE**

## **5. Problématique**

Le Maroc a été soumis durant ces deux dernières décennies à des crues et inondations importantes causées par des épisodes pluvieux intenses. Ces épisodes qui ont causé d'importants dégâts humains et matériels ont eu lieu notamment en 1995 (Ourika), 1996-1997 (plaine du Gharb), décembre 2002 (Mohammedia, 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 bassin versant de l'oued Rdat est situé au flanc nord en aval de l'oued Sebou au nord du Maroc, pas loin de la région la plus pluvieuse du pays. Cette configuration, caractérisée par la prédominance des sols imperméables et une forte pluviométrie, favorise la genèse de crues importantes et surtout dans ces dernières années (averses violentes).

## **6. Objectifs de l'étude**

Le but de ce travail est d'élaborer un modèle hydrologique (transfert pluies-débits) de prévision quantitative des crues, afin de bien comprendre le comportement hydrologique du bassin versant de l'oued Rdat, Et ce dans le but d'améliorer la protection des populations installées en aval du bassin et leurs activités agricoles contre les inondations.

## **7. Approche et méthodologie**

La présente étude est basée sur l'approche géomatique, qui utilise les systèmes d'informations géographiques, la télédétection et la modélisation comme principaux outils de traitements et de restitution des données.

La méthodologie suivie est récapitulée par la figure 16 ci-dessous. Il s'agit de collecter et traiter les données en relation avec les caractéristiques physiques du bassin étudié, et les préparer sous forme d'un SIG à l'aide de l'extension HecGeoHms, puis exporter le résultat vers le logiciel de modélisation hydrologique HecHms, qui permet dans un premier temps d'introduire les données hydro-climatiques requises, et ensuite, de faire les simulations demandées.

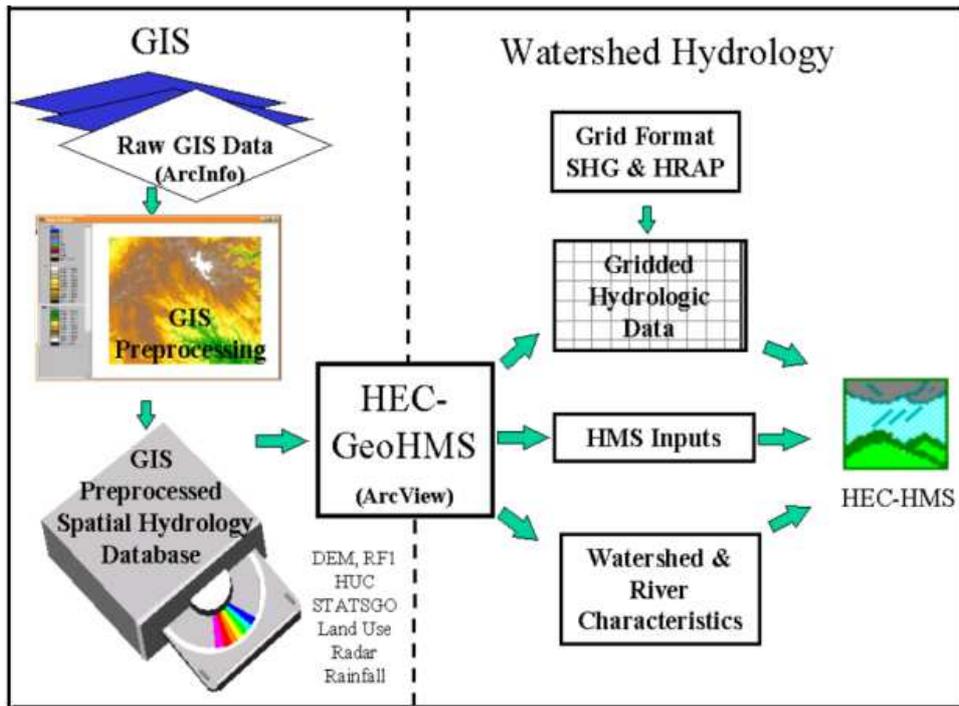


Figure 16. Aperçu de la méthodologie suivie (Source : HEC-GeoHMS\_Users\_Manual\_5.0)

## 8. Outils informatiques utilisés

Pour réaliser cette étude, on a utilisé une plateforme de logiciels qui concordent entre eux : ArcGis (avec l'extension HECGEOHMS) et HECHMS.

### 8.1. Arc gis (le module HecGeoHms)

Hec-GeoHms est une extension d'ArcGis qui permet de préparer le modèle physique du bassin, ainsi que les cartes de fond. Outre le modèle du bassin, Hec-GeoHms peut également créer le modèle météorologique, et les fichiers de paramètres sous forme de grides.

## 8.2. Hec-Hms

HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) est un logiciel d'hydrologie développé par les ingénieurs de l'armée des Etats Unis (US Army Corps of Engineers) pour modéliser les phénomènes hydrologiques dans les bassins versants qui permet de simuler la transformation pluies-débits, la propagation des hydrogrammes dans les biefs, et le stockage des volumes d'eau dans les réservoirs.

Le modèle HEC-HMS a été déjà utilisé dans le contexte Marocain dans plusieurs études qui ont démontré son adaptabilité au contexte climatique semi-aride et particulièrement pour la gestion des crues dans le cadre des expériences menées dans le bassin de Martil en 2005 et de Todgha en 2007(Fadel et all 2011).

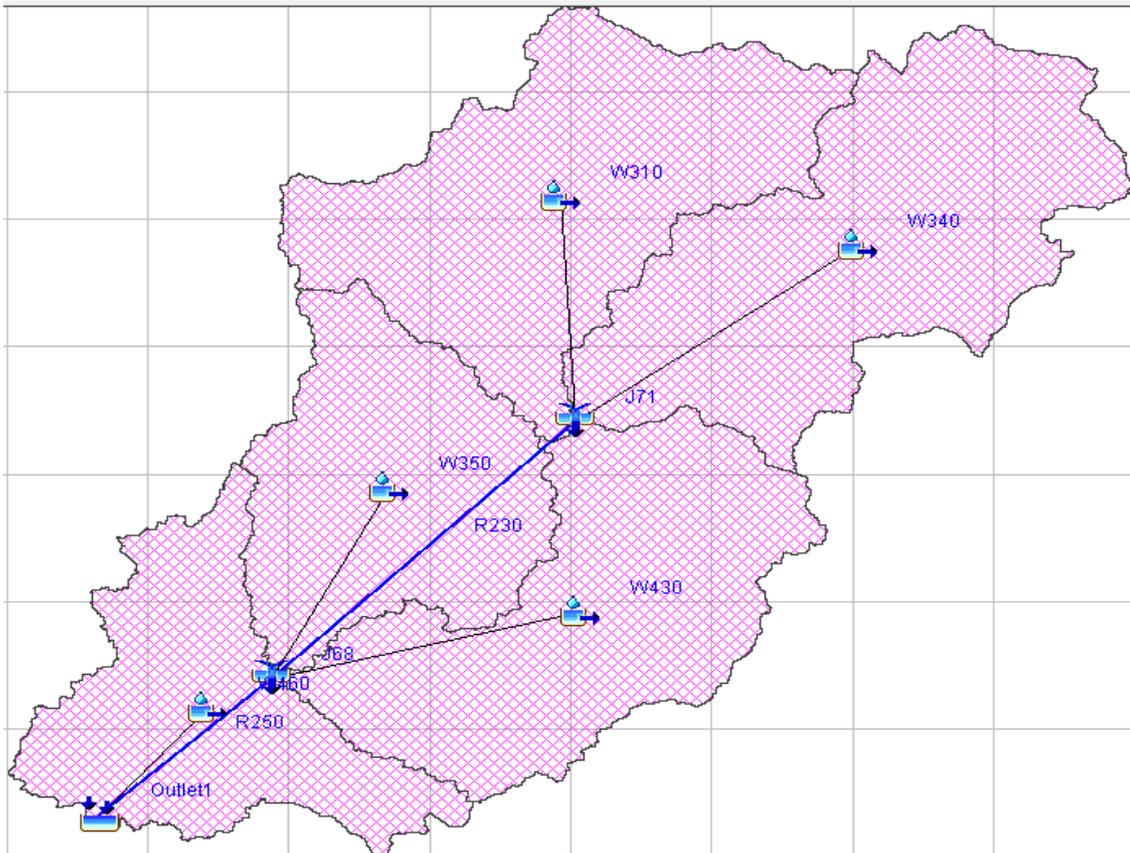


Figure 17. Modèle HecHms du bassin Rdat

## **9. Description de la démarche suivie**

Cette section décrit la modélisation conceptuelle mise en œuvre dans le bassin Rdat de superficie de 696km<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 nécessite la prise en considération de plusieurs composantes de l'écoulement : le débit de base, les pertes et le transfert de l'écoulement des versants vers l'exutoire.

### **9.1. 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. 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 test défini par :

$$B_t = B_i R_c^t$$

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)
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  $t-1$ .

### **9.2. 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 (déficit 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) a été retenu. De nombreuses études ont en effet utilisé avec succès ce modèle en contexte méditerranéen semi-aride (Brocca et al, 2009 ; Tramblay 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 ; Tramblay 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 :

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

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 :

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

### **9.3. Fonction de transfert**

Une fois que les précipitations en excès sont connues, elles sont transformées en ruissellement 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 (Sabot, 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 moyen sortant du réservoir pendant une période  $t$  est donné par :

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1}$$

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

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

$\Delta t$  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 pluies et débits sont disponibles.

#### **9.4. 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. 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 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.

$$PWRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (Q_0(t) - Q_M(t))^2 \frac{Q_0(t) + Q_A}{2Q_A}}{N}} \quad \text{et} \quad Q_A \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Q_0(t)$$

Avec  $Q_0$  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 univarié, 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.

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).

### **9.5. 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 évènement, une mesure couramment utilisées en hydrologie est le coefficient de Nash entre les débits mesurés  $Q$  et les débits calculés  $Q_e$  pour chaque pas de temps  $t$ :

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t - Q_{e_t})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t - \bar{Q})^2}$$

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 :

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

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

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.

### **9.6. 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 évènements. 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 Rc est fixée à 0,8 et le seuil Td à 0,2. Seul le débit de base initial en début d'épisode est nécessaire. 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 Stet Tcont ont été calibrées pour chaque épisode, afin d'évaluer leur distribution.

### **9.7. Calcul du temps de concentration**

Le temps de concentration Tc ou temps de pointe, est le temps nécessaire pour qu'une particule d'eau provenant de la partie la plus éloignée du bassin pour parvenir à l'exutoire.

Son calcul se fait en utilisant les formules empiriques suivantes :

➤ **La formule de kirpich**

$$T_c = 0.01947 \times L^{0.77} \times I^{-0.385}$$

Où : Tc: temps de concentration en min,

L : longueur du Talweg en m,

I: pente moyenne du Talweg en m/m.

➤ **La formule de Turazza**

$$T_c = 0.108 \times (S \times L)^{0.333} \times I^{0.5}$$

Où : Tc: temps de concentration en h,

L : longueur du Talweg en km,

I : pente moyenne en m/m.

S : superficie du bassin versant en km<sup>2</sup>.

➤ **La formule de Giordotti**

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{DH}}$$

Où :  $T_c$  = Temps de concentration en heures,

S = surface du BV en Km<sup>2</sup>,

L = longueur du Talweg en Km,

DH: Dénivelée maximale du BV en m.

Cette formule est la mieux adaptée aux bassins versants ruraux.

**CHAPITRE III. PRESENTATION ET DISCUSSION DES  
RESULTATS**

Les données utilisées en entrée du modèle (pluies et débits) ont été mesurées par des pluviomètres situés sur le bassin versant. A partir de ces relevés, nous avons calculé la moyenne surfacique des précipitations. Elle est obtenue par moyenne arithmétique après avoir affecté un coefficient de pondération à chaque station pluviométrique. Le fait qu'on ne dispose pas de données instantanées des pluies sur plusieurs stations du bassin, on se contentait de la seule station d'Ouled yaakoub, dont on dispose des résultats des précipitations instantanées.

On a choisi deux événements successives, le premier s'étale sur la période du 31 décembre 1995 à 2:00 jusqu'au 25 janvier 1996 à 9 :00, et le deuxième du 20 décembre 1996 à 2:00 au 23 décembre 1996, à 21:00, avec un pas de temps d'une heure.

## 1. Présentation des Résultats

### 1.1. Évènement I : Résultat et Discussion

La simulation de l'évènement (I) a donné les résultats suivants

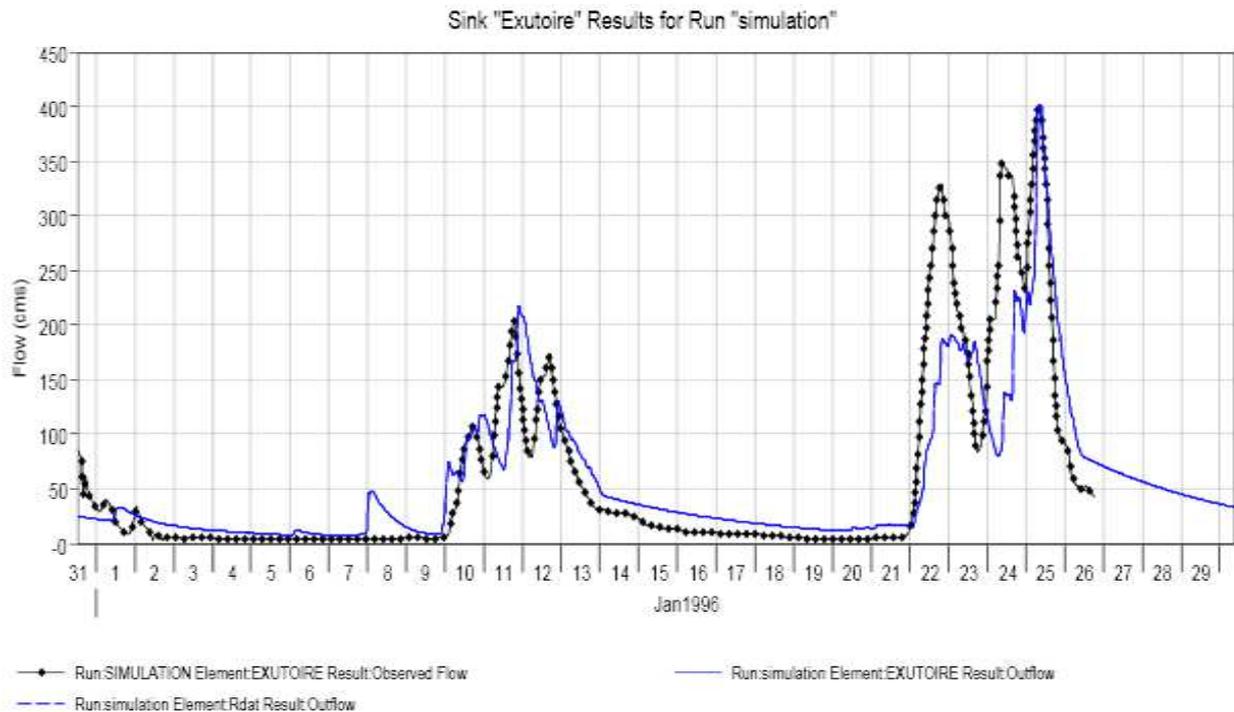


Figure 18. Résultats de simulation obtenue pour l'évènement I.

On remarque que les résultats de la simulation sont très proches de ceux observés (gaugés dans la station de Had kourt en aval) puisque les deux hydrogrammes correspondants se ressemblent beaucoup sur le plan visuel. Le tableau 4 présente le récapitulatif des résultats de la simulation.

Bassin	Surface km <sup>2</sup>	Débit simulé m <sup>3</sup> /s	Temps	Volume Million M <sup>3</sup>
Rdat	696	401,3	25 janv. 1996, 08:00	209,8

Tableau 5. Récapitulatif des résultats de la simulation

Le tableau 5 récapitule les résultats de comparaison entre le débit simulé et le débit observés.



Tableau 6: Résultats de comparaison entre le débit simulé et le débit observé

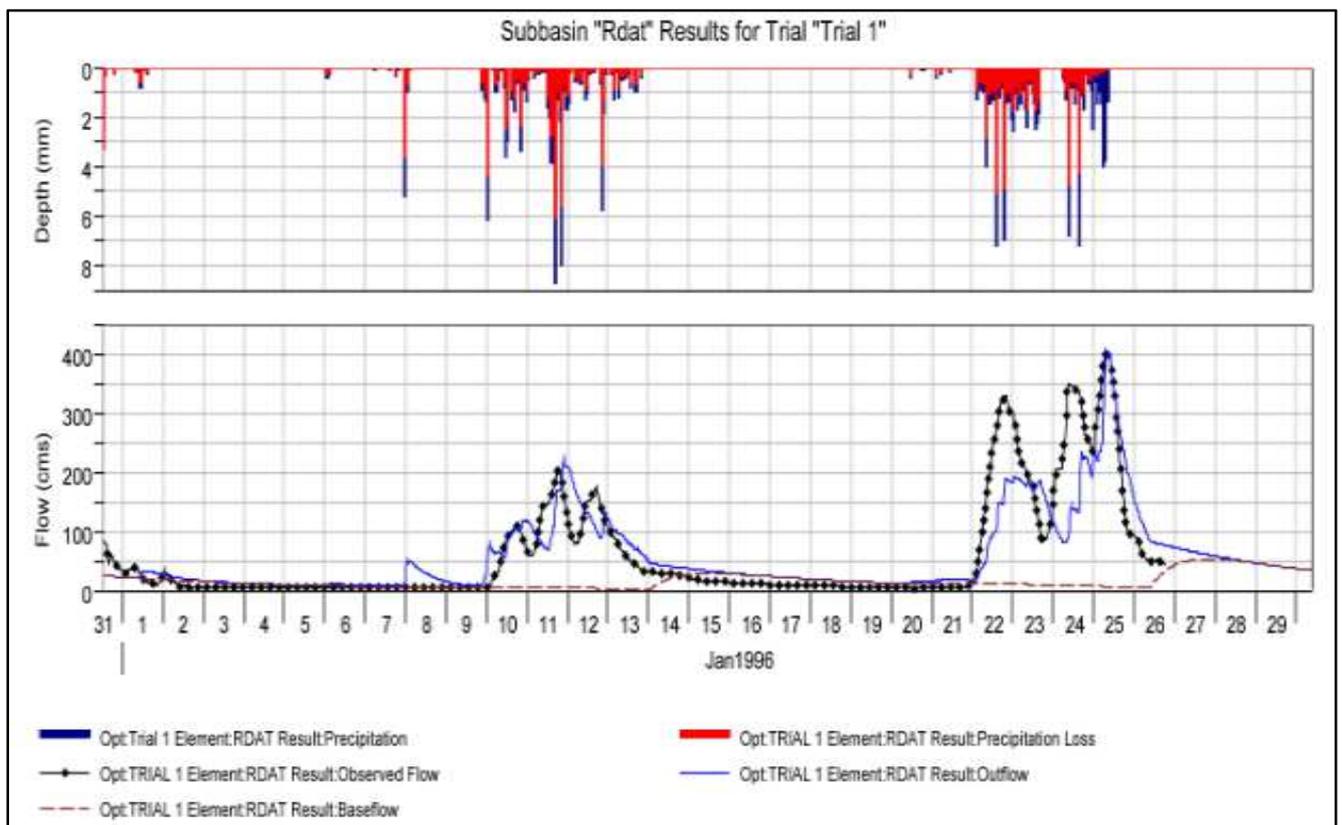


Figure 19 : l'hydrogramme obtenu et les pluies correspondantes.

Hydrograph Comparison

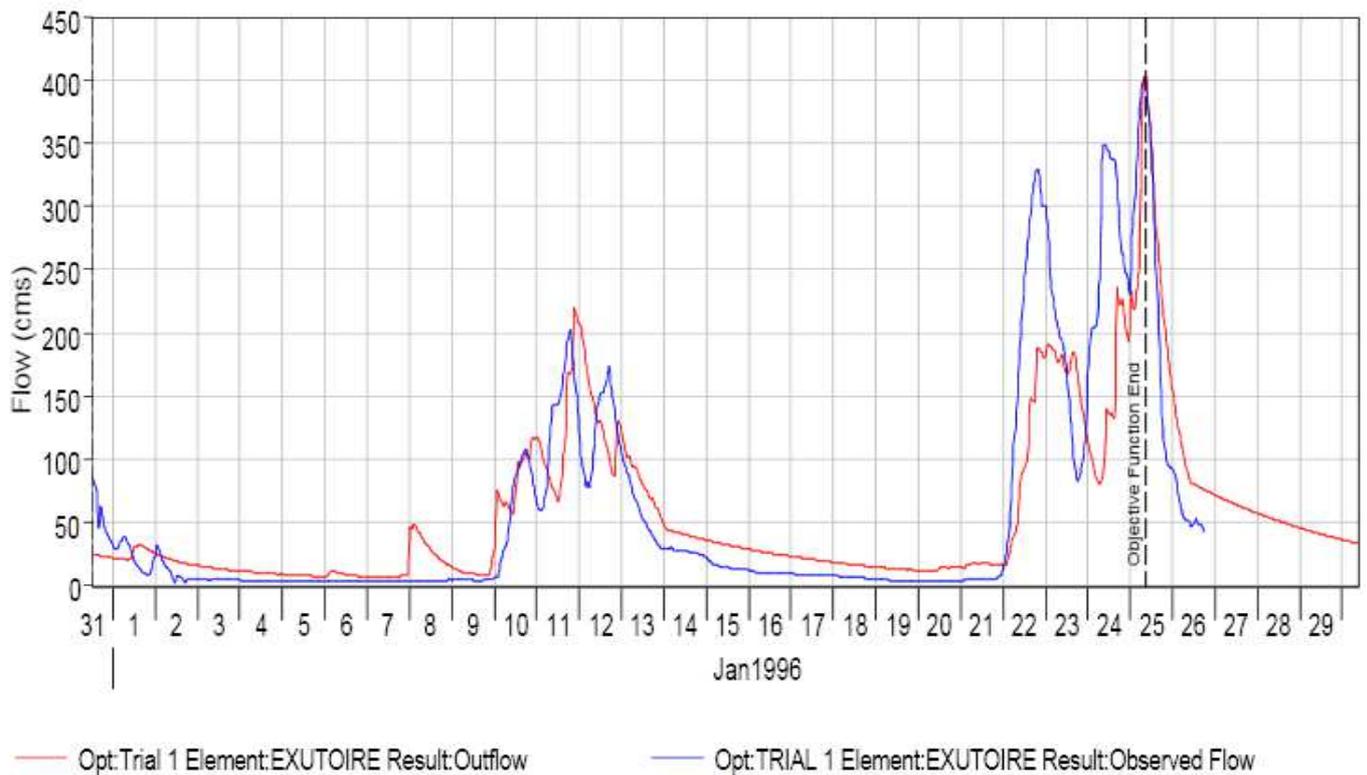


Figure 20 : Comparaison des deux hydrogrammessimulé et observé.

mesure	Simulé	Observé	Différence	% de différence
Volume (MM)	194,49	187,86	6,63	3,53
Débit de pointe (M3/S)	399,4	399,9	-0,5	0,1
Heure de pointe	25janv.1996, 07:30	25janv.1996, 08:00		
Heure de centre de gravité	19janv.1996, 07:34	25déc.2089, 09:52		

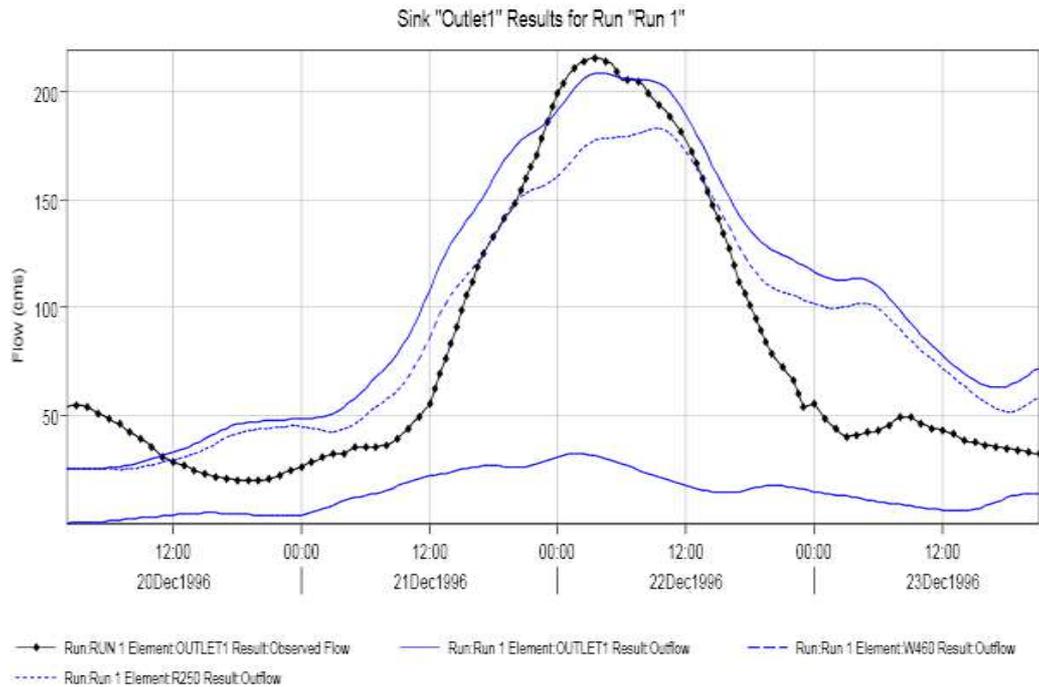
Tableau 7 : Résultats de comparaison après le calage

D'après les resultat obtenu,on remarque qu'il ya une légère différence entre le debit observé et simulé : debit observé( $399.4m^3$ ) est légèrement superieur au debit simulé( $399,9m^3$ ) .aussi on remarque que l'heure de pointe de débit observé est à 8h, 25 janvier1996 alors que celui de pointe simulé est à 7h30 à 25 janvier1996.

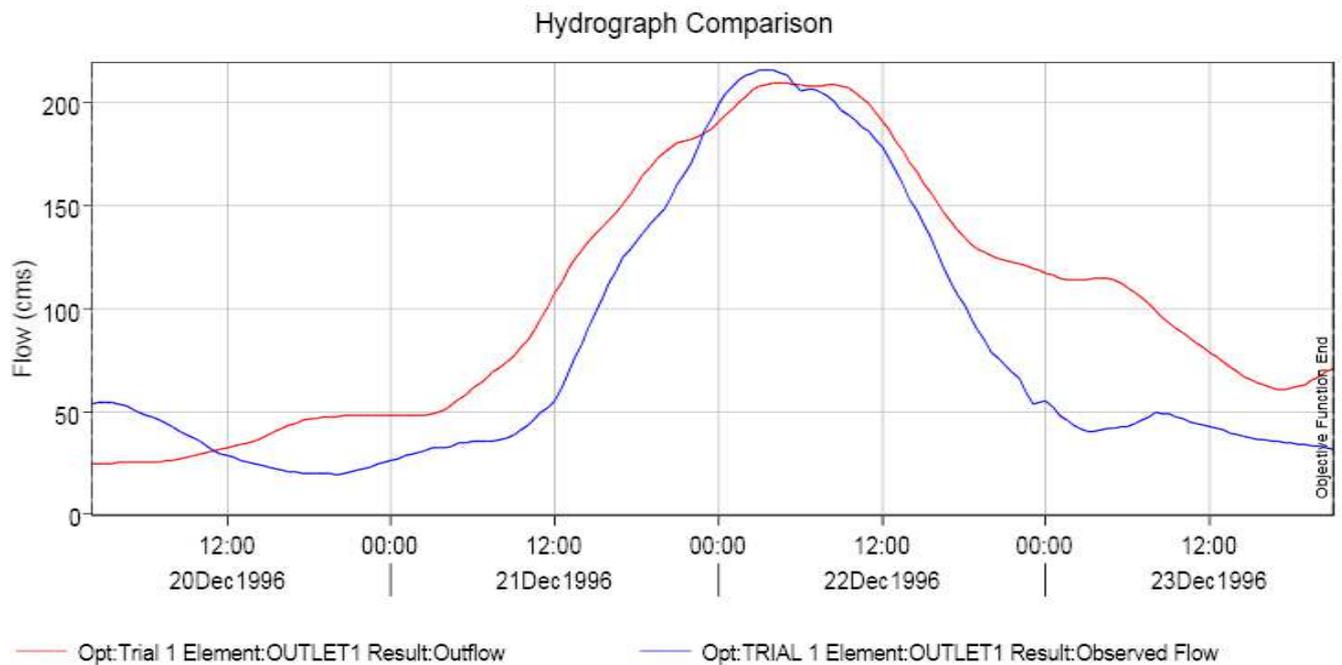
On peut expliquer la difference du volume d'eau simulé superieur et celle jaugé par l'intervention d'autres parametrestelque le pompage ou dervation de ce volume avant la stationhydrologique.

**1.2. Évènement II : Résultat et Discussion**

L'évènement II s'étale Du 20décembre 1996 à 02:00 jusqu'au 23décembre 1996 à 21:00. La simulation a donné les résultats suivants :



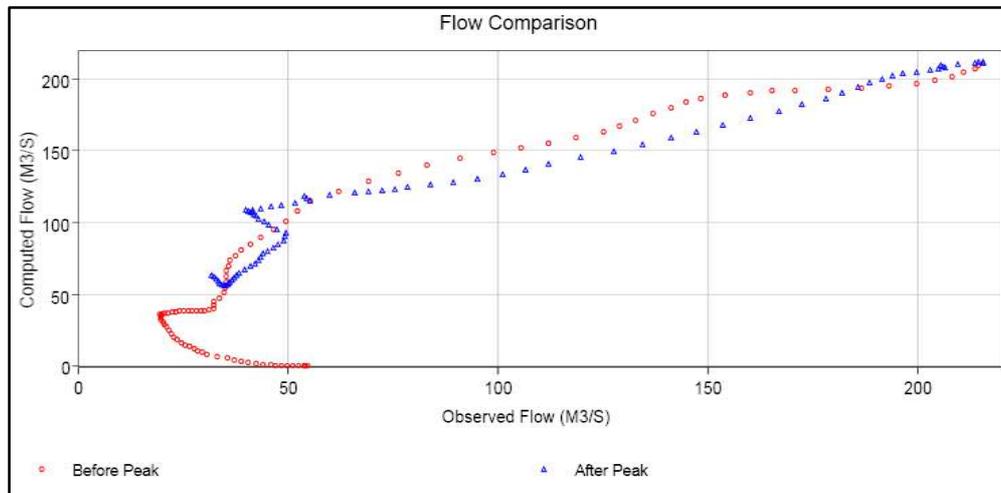
**Figure 20. Résultats obtenue pour la simulation de l'évènement II.**



**Figure 21 : Comparaison des deux hydrogrammes simulé et observé.**

Mesure	Simulé	Observé	différence	% de différence
Volume (M.M <sup>3</sup> )	48,96	37,72	11,24	29,80
Débit de pointe (M3/S)	209,4	215,4	-5,9	2,8
Heure de pointe	22déc.1996, 04:00	22déc.1996, 03:00		
Heure de centre de gravité	22déc.1996, 05:52	22déc.1996, 03:11		
Volume (M.M <sup>3</sup> )	48,96	37,72	11,24	29,80

**Tableau 8. Résultats de simulation pour l'événement II.**



**Figure 22. Comparaison de L'écoulement de la fonction objective**

Les résultats de la simulation à partir des précipitations mesurées dans les stations en amont du bassin figurent dans le tableau 7 ci-dessus. D'après ce tableau on remarque que le débit simulé est de l'ordre de 209,4 m<sup>3</sup>/s, tandis que le débit observé est de l'ordre de 215 m<sup>3</sup>/s. D'autre part, on remarque un léger décalage au niveau du temps du pic.

Pour le volume enregistré 49 MM<sup>3</sup> supérieur à celui observé, 38 MM<sup>3</sup>. D'une manière générale, on peut expliquer cette différence par l'évacuation de volume d'eau hors de la zone de jaugeage, soit par infiltration sur les néoformations de quaternaire le long du cours d'eau, soit par un pompage pour l'irrigation.

## ***2. Conclusion***

La modélisation hydrologique par HecHms a permis de simuler deux événements dont les données ont été mesurées au niveau des stations du bassin versant. On a abouti à construire un modèle hydrologique qui a permis de reproduire des événements vécus avec un degré de fidélité que nous estimons acceptable. Les résultats de simulation obtenus sont le plus souvent proches des débits mesurés à l'exutoire du bassin versant, surtout après avoir procédé au calage de plusieurs paramètres hydrologiques du modèle qui ont été corrigés.

### **Conclusion générale**

Afin d'étudier le comportement hydrologique du bassin versant de l'oued Rdat, dans le but de contribuer à la bonne gestion et exploitation de ses ressources en eau, nous avons procédé à l'élaboration d'un modèle hydrologique basé sur la plate-forme HecHms développée par le corps des ingénieurs de l'armée américaine.

Ce travail a porté sur l'analyse des données du bassin versant Rdat sur deux volets principaux :

Dans un premier temps, on a commencé par donner un aperçu sur la géologie de la région notamment le rif occidental, et celui de bassin versant situé dans la partie du pré rif et l'étape qui suit, on s'est intéressé à l'étude géométrique du bassin versant. A ce stade, on a pu établir une étude basée sur la construction du modèle du bassin soit par l'élaboration des cartes tel que la carte d'altitude, la carte de la pente et de la carte du réseau hydrographique et aussi effectuer certains calculs pour spécifier mieux le bassin tel que le périmètre, la superficie, et le coefficient de compacité.

L'étape finale on a eu recours à Hec-Hms et Hec-GéoHms pour établir la modélisation hydrologique pluie-débit du bassin, on se basant sur les données de précipitation du poste pluviométrique d'Ouled Yaakoub et la station hydrologique de Had Kourt pour faire le calage du modèle, afin d'élaborer un modèle événementiel du bassin pouvant estimer les débits et volumes d'eau après les averses.

## **Bibliographie**

Abdelghani Gartet, 1994 : morphogenèse et hydrologie dans le bassin versant d'oued leben.

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.

Fadel ET all 2011) Travaux de l'Institut Scientifique, Rabat, série Géologie & Géographie physique, n°23, p. 33-38.

Haida S., Probst J. I., Ait For A et Senoussi M. (1999). Hydrologie et fluctuation climatique

Klemeš V. 1986. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal* 31, 13–24.

Michard (1976) *Element de Geologies Marocaine*

Probst, J.L. et Tardy (1987) long range stream flow and world continental runoff fluctuation since the beginning of the century. *Journal of Hydrology*. N°94, 289-311

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.

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.