
Licence en Sciences et Techniques Eau & Environnement

Mémoire de de fin d'études

*Evaluation comparative du bilan hydrique au
niveau bassin versant de GHDAT*

Par

CHELLAH Hajar | EL HABBAZI Hajar

Soutenu le 11/03/2022 devant le jury composé de :

SAIDI Mohamed El Mehdi: (FST- Marrakech), Encadrant interne.

CHOUKRI Fatiha : (ABHT-Marrakech), Encadrante externe.

ABOUNKI Intissar : (ABHT-Marrakech), Encadrante externe.

MOUSTADRAF Jalal : (FST- Marrakech), Examineur.

Remerciement

En premier lieu, nous tenons à remercier M. Mohamed El Mehdi SAIDI, professeur et directeur de recherche à la Faculté des Sciences et Techniques pour son encadrement pédagogique, ainsi que pour l'intérêt avec lequel il a suivi la progression de ce travail, pour ses conseils efficaces et ses judicieuses directives tout au long de la période de la réalisation de ce travail.

Nos remerciements s'adressent également à Monsieur le Directeur de l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT), pour nous avoir acceptées au sein de son Etablissement, notre encadrante Mme. CHOUKRI Fatiha pour l'assistance et les orientations de ce travail. Les mots sont impuissants à exprimer notre très haute considération et notre grande admiration pour son ardeur au travail depuis le début de ce projet.

Et nous adressons nos remerciements les plus profondes à Mme. ABOUNKI Intissar pour sa disponibilité et son soutien durant la période du stage.

Nos remerciements vont également aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce travail.

Enfin, nous tenons à remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Table de matière

Remerciement.....	1
Table de matière.....	2
Liste des tableaux.....	4
Liste des figures.....	5
Introduction générale	6
Présentation de l'organisme d'accueil :	8
Chapitre 1 : Synthèse bibliographique :	9
I. Définition :	9
II. Méthode de calcul :	10
1. Précipitation :	10
2. Evapotranspiration :	10
3. Ruissellement :	12
4. Infiltration :	12
Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude :	14
I. Définition du bassin versant :	14
II. Cadre général de la zone d'étude :	14
1. Situation géographique du Bassin versant GHDAT :	14
2. Climat :	15
3. Cadre géologique :	16
4. Occupation du sol et végétation :	19
5. Réseau hydrographique :	20
III. Caractéristiques du bassin versant GHDAT :	22
1. Caractéristiques morphométriques du bassin versant.....	22
A. Caractéristiques géométriques	22
B. Caractéristiques du relief :	23
C. Caractéristiques du réseau hydrographique :	28

Chapitre 3 : Collecte des données et calcul du bilan hydrique :	31
I. Collecte et analyse des données :	31
1. Evapotranspiration estimée par la plateforme WAPOR :	32
2. Précipitation estimée par la plateforme WAPOR :	33
II. Validation des données :	34
1. Analyse comparative des données pluviométriques de WAPOR et mesurées :	34
2. Corrélation entre les précipitations des données WAPOR et mesurées :	37
III. Synthèse : Bilan hydrique du GHDAT :	40
1. Bilan hydrique annuel observé général du bassin GHDAT :	40
2. Relation précipitation-débit :	41
3. Etude de la variabilité d'évapotranspiration :	44
Conclusion	45
Bibliographie	46
Webographies	46
Annexe 1 :	47
Annexe 2 :	51

Liste des tableaux

Tableau 1: Les phases géologiques du bassin versant GHEDAT (Darif ,2013).....	18
Tableau 2: Pourcentages des surfaces du bassin étudié en fonction des taux d'infiltrations (D'après Juillerat, 2004)	19
Tableau 3: Couverture d'occupation des sols dans la zone d'étude (Réf : Darif 2013)	20
Tableau 4 : La répartition des tranches d'altitudes du bassin versant du Ghdat.....	25
Tableau 5: Calcul du temps de concentration avec différentes méthodes	30
Tableau 6: Bilan hydrique annuel observé 2001 – 2016.....	40
Tableau 7: Tableau comparatif des précipitations et débit du bassin GHDAT 2009 - 2016...	41
Tableau 8 : Tableau comparatif des précipitations (WAPOR) et débit du bassin GHDAT 2009 – 2016.....	42
Tableau 9: La variabilité pluviométrique et débits du bassin	43
Tableau 10: Tableau comparatif des évapotranspirations (WAPOR et observé) du bassin GHDAT 2009 – 2016.....	44

Liste des figures

Figure 1: Schéma simplifier des composant du bilan hydrique (www.supagro.fr).....	9
Figure 2: Situation géographique du bassin versant GH DAT	15
Figure 3: Carte géologique du bassin versant de Ghdat (HIQUI Abdessamad 2013-2015).....	17
Figure 4: Carte du bassin versant GH DAT avec les réseaux hydrographiques	21
Figure 5: Rectangle équivalent	23
Figure 6 : Carte hypsométrique du bassin versant GH DAT	24
Figure 7: Courbe hypsométrique pour le bassin versant Ghdat	25
Figure 8: Carte des pentes (en degrés) du bassin versant GH DAT.....	27
Figure 9: Exemple de la méthode de STRAHLER.....	28
Figure 10: Classification du réseau hydrographique selon STRAHLER (calculé par Arc Gis)	29
Figure 11: Estimation des évapotranspirations mensuelles 2009-2016	32
Figure 12: Estimation des évapotranspirations annuelles 2009-2016.....	32
Figure 13: Estimation des précipitations mensuelles 2009-2016.....	33
Figure 14: Estimation des précipitations annuelles 2009-2016	34
Figure 15: Correspondances des précipitations journalières entre les données WAPOR et celles mesurées à Sidi Rahal (2009-2016)	35
Figure 16: Correspondances des précipitations mensuelles entre les données WAPOR et celles mesurées à Sidi Rahal (2009-2016).....	35
Figure 17: Correspondances des précipitations annuelles entre les données WAPOR et celles mesurées à Sidi Rahal (2009 – 2016)	36
Figure 18 : Correspondances des précipitations saisonnières de WAPOR et celles mesurées à Sidi Rahal (2009-2016).....	37
Figure 19: Corrélation des précipitations journalières entre WAPOR et mesurées de 2009-2016.....	38
Figure 20: Corrélation des précipitations mensuelles entre WAPOR et mesuré de 2009-2016	38
Figure 21: Corrélation des précipitations saisonnières entre WAPOR et mesuré de 2009-2016.....	38
Figure 22: Corrélation des précipitations annuelles entre WAPOR et mesuré de 2009-2016.....	38
Figure 23: Variations simultanées des précipitations et débits mensuels à Sidi Rahal 2009 - 2016.....	41
Figure 24 : Evolution comparative des pluies (WAPOR) et des débits à la Station de Sidi Rahal 2009 - 2016	42
Figure 25: Variation comparative des coefficients d'écoulement annuels entre WAPOR et observé de 2009-2016	43
Figure 26: Variation comparative des évapotranspirations entre WAPOR et observé de 2009-2016 ..	44

Introduction générale

Au cours de ces dernières décennies, l'eau est de plus en plus menacée par la rareté étant donné qu'au fil du temps, les besoins en eau ne cessent de s'accroître.

Cette précieuse ressource est soumise aux effets des changements climatiques qui s'avèrent comme causes principales des inondations, des sécheresses et de la désertification.

Les études hydrologiques des bassins versants sont complexes, surtout celle basées sur des données mesurées et des méthodes empiriques.

Cependant, la révolution technologique en matière de la télédétection spatiale et des systèmes d'information géographiques (SIG) a permis la facilitation de l'acquisition, l'analyse et le traitement des différents paramètres physiques des bassins versants nécessaire pour l'élaboration des études hydrologiques et climatiques.

Dans ce sens, on s'est penché sur l'utilisation de la plateforme WAPOR, un portail de la FAO (Food and Agriculture Organisation) pour le suivi de la productivité de l'eau grâce au libre accès aux données dérivées de la télédétection.

Cet outil aide à :

- Surveiller la productivité de l'eau ;
- Identifier les écarts de productivité de l'eau ;
- Proposer des solutions pour les combler ;
- Contribuer à une augmentation durable de la production agricole ;

En même temps, il prend en compte les écosystèmes et l'utilisation équitable des ressources en eau, ce qui devrait conduire à terme à une réduction globale du stress hydrique. Notre projet de fin d'étude intitulé, est réalisé au sein de l'agence bassin hydraulique du TENSIFT, et a pour objectifs :

- ✓ Caractérisation du bassin versant de l'oued GH DAT à l'aide de l'outil SIG (ARCGIS) ;
- ✓ Collecte et comparaison des données hydro climatiques mesurées et celles de l'outil WAPOR disponibles pour la période 2009 -2016.
- ✓ Etablir un bilan hydrique pour les deux catégories des données, et vérifier la précision des données de WAPOR.

Ce travail se représente comme suit :

- ✓ Présentation de l'organisme d'accueil.
- ✓ Chapitre 1 : Synthèse bibliographique.
- ✓ Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude.
- ✓ Chapitre 3 : Collecte des données et calcul du bilan hydrique.

Présentation de l'organisme d'accueil :

L'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT) est instaurée par le décret n° 2-00-479 du 14 Novembre 2000, en application de l'article 20 de la loi sur l'eau du Tensift. Elle constitue un espace de concertation au service de l'eau, et a comme mission d'assurer une gestion intégrée et concertée des ressources en eau pour un développement durable du Bassin Hydraulique du Tensift.

L'Agence du Bassin Hydraulique est chargée de :

- Elaborer le PDAIRE et de veiller à son application ;
- Délivrer les autorisations et les concessions d'utilisation du DPH ;
- Fournir les aides financières et l'assistance technique dans le domaine de la pollution des RE, de l'aménagement et de l'utilisation du DPH ;
- Réaliser les mesures et les études nécessaires à l'évaluation, la planification et la gestion des ressources en eau ;
- Réaliser les mesures de qualité de l'eau et d'appliquer les dispositions réglementaires relatives à la protection des RE et à la restauration de leur qualité ;
- Proposer et d'exécuter les mesures adéquates pour assurer l'approvisionnement en eau en cas de pénurie d'eau ou pour prévenir les risques d'inondation ;
- Gérer et contrôler l'utilisation des ressources en eau mobilisées ;
- Réaliser les infrastructures nécessaires à la prévention et à la lutte contre les inondations ;
- Tenir un registre des droits d'eau reconnus et des concessions et autorisations de prélèvement d'eau accordées.

La Loi 10-95 sur l'Eau, Section III, Articles 20 - 24

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique :

I. Définition :

Le bilan hydrique est une synthèse parfaite de tous les éléments physiques du milieu : précipitations, évaporation, écoulement, humidité du sol et du sous-sol. Il exprime l'équilibre des changements entre toutes les **ressources en eau** (précipitations, **ruissellement**) qui entrent dans un système (stockage) et celles qui le quittent (**évapotranspiration**), par rapport à une zone et à une période de temps. Il joue un rôle majeur dans la **détermination** de la quantité d'eau disponible pour une région. Il se formalise par une équation, valable pour un profil de sol λ ayant un couvert végétal N :

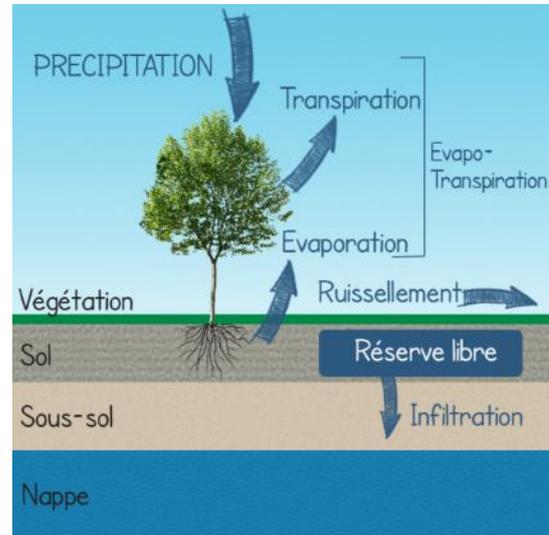


Figure 1: Schéma simplifié des composants du bilan hydrique (www.supagro.fr)

$$P = ETR + R + I$$

Précipitation (P) : Toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre). Elles sont exprimées en intensité (mm/h) ou en lame d'eau précipitée (mm).

Ruissellement (R) : est l'écoulement des eaux à la surface de la terre, notamment la surface des sols, contrairement à celle qui pénètre par infiltration. L'intensité des précipitations favorise le ruissellement en proportion de l'insuffisance de l'infiltration et de la capacité de rétention de la surface du sol.

Évapotranspiration (ETR) : est une combinaison de deux processus :

- L'évaporation : précisément l'évaporation directe, désigne l'eau qui s'évapore à partir d'un sol (nu) ou d'un plan d'eau. Autrement, l'évaporation est un transfert de l'eau, à partir de la surface du sol, vers l'atmosphère.
- La transpiration : désigne la transpiration des végétaux à travers les stomates (micropores par lesquels l'eau s'évapore) de leurs feuilles. Les racines des végétaux captent

l'eau qui se trouve dans le sol. Une fois parvenue aux feuilles, une partie de l'eau va s'évaporer à travers les stomates des feuilles. L'autre partie va servir à la photosynthèse.

Infiltration (I) : Désigne le mouvement de l'eau pénétrant dans les couches superficielles du sol et l'écoulement de cette eau dans le sol et le sous-sol, sous l'action de la gravité et des effets de pression. **(Darif, 2013)**

II. Méthode de calcul :

1. Précipitation :

$$P_{moy} = \frac{\sum A_i \cdot P_i}{A}$$

Avec :

P_{moy} : précipitation moyenne sur le bassin,

A : aire totale du bassin (=∑A_i),

P_i : précipitation enregistrée à la station i,

A_i : superficie du polygone associée à la station i.

2. Evapotranspiration :

A. Formule de Thornthwaite :

$$ETP(m) = 16 * \left[\frac{10 * \bar{T}(m)}{I} \right]^a * F(m, \phi)$$

ETP(m) : l'évapotranspiration moyenne du mois m (m = 1 à 12) en mm,

T : moyenne interannuelle des températures du mois, °C

a : 0.016 * I + 0.5

I : indice thermique annuel

F(m, φ) : facteur correctif fonction du mois (m) et de la latitude

$$I = \sum_{m=1}^{12} i(m) \qquad i(m) = \left[\frac{\bar{T}(m)}{5} \right]^{1,514}$$

B. Formule du Turc :

Cette formule est valable pour une humidité relative (**hr**) $\geq 50\%$ (sur le mois)

$$ETP = 0,013J(Rg + 50) \left(\frac{T}{T + 15} \right)$$

La deuxième formule pour **hr** $< 50\%$.

$$ETP = 0,013J(Rg + 50) \left(\frac{T}{T + 15} \right) \left(1 + \frac{50 - hr}{70} \right)$$

Avec :

ETP : évapotranspiration en mm/mois,

J : nombre de jours dans le mois,

T : température moyenne sur le mois ($^{\circ}\text{C}$),

Hr : humidité relative moyenne (%),

Rg : rayonnement solaire moyen (ici mesuré) en $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{jour}$.

C. Formule de Penman-Monteith :

L'équation de Penman-Monteith (Monteith, 1965) prédit le taux d'évaporation et de transpiration totale à l'aide des données météorologiques couramment mesurées (rayonnement solaire, température de l'air, pression de vapeur et vitesse du vent).

$$ET0 = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{Cste}{T + 273} u2(es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 ue)}$$

Avec :

ET0 = évapotranspiration de référence, en mm/j ou mm/h,

Rn = rayonnement global en $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{j}$ ou $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{h}$,

G = flux de chaleur dans le sol par conduction en $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{j}$ ou $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{h}$,

Δ et γ = constantes en $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$,

Cste = 900 pour un pas de temps journalier et 37 pour un pas de temps horaire,

$$\gamma = 0,665 * 10^{-3} P$$

$$\Delta = \frac{4098 e_{sat}(T)}{(T + 237,5)^2}$$

$$esat(T) = 0,6108e^{\frac{17,27T}{T+237,3}}$$

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 z}{293} \right)^{5,26}$$

T = température en °C (Dans la méthode FAO, l'approximation T_{surface} = T_{atmosphère} est effectuée),

P = pression atmosphérique en kPa,

Z (présent dans la formule de P) = altitude par rapport à la mer (m), pour la station Aston : 1781 mètres.

Es (T) = esat (T), la pression de vapeur saturante en kPa,

Ea(T) = pression de vapeur actuelle en kPa
= humidité relative * es / 100,

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8z - 5,42)}$$

u₂ = vitesse du vent à 2 mètres du sol en m/s.

Ayant la vitesse du vent à 10 mètres du sol, nous utiliserons la formule suivante, avec z l'altitude à laquelle la vitesse est mesurée (ici 10 mètres).

3. Ruissellement :

A. Méthode de Tixeront-Bercaloff

$$R = \frac{P^3}{3 * (ETP)^2}$$

B. Méthode de SOGREAH

$$R = 720 \left(\frac{P - 250}{1000} \right)^{1,85}$$

C. Le coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement est déterminé par ce calcul :

Cr = Volume d'eau ruisselé / Volume d'eau versé

4. Infiltration :

A. La formule de Horton :

La capacité d'infiltration s'exprime comme suit :

$$I(t) = i_f + (i_0 - i_f) \cdot e^{-\gamma \cdot t}$$

Avec :

$i(t)$: capacité d'infiltration au temps t [mm/h],

i_0 : capacité d'infiltration respectivement initiale dépendant surtout du type de sol [mm/h],

i_f : capacité d'infiltration finale [mm/h],

t : temps écoulé depuis le début de l'averse [h],

γ : constante empirique, fonction de la nature du sol [min⁻¹].

L'utilisation de ce type d'équation, quoique répandue, reste limitée, car la détermination des paramètres, i_0 , i_f , et g présente certaines difficultés pratiques.

B. La formule de l'Institut d'Aménagement des Terres et des Eaux de l'EPFL :

La relation est légèrement différente de celle de Horton (seulement deux paramètres). Elle est du type :

$$I(t) = i_f + a \cdot e^{-bt}$$

Avec : $i(t)$:

capacité d'infiltration au temps t [mm/h],

i_f : capacité d'infiltration finale [mm/h],

a et b : coefficients d'ajustement.

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude :

I. Définition du bassin versant :

Un bassin versant ou bassin hydrographique est une portion de territoire délimitée par des lignes de crête (ou lignes de partage des eaux) et irriguée par un même réseau hydrographique (une rivière, avec tous ses affluents et tous les cours d'eau qui alimentent ce territoire).

A l'intérieur d'un même bassin, toutes les eaux reçues suivent, du fait du relief, une pente naturelle et se concentrent vers un même point de sortie appelé exutoire. Dans un bassin versant, l'eau se fraye des chemins sur et dans les sols. Elle prend en charge des particules : sédiments, matière organique, produits chimiques...

II. Cadre général de la zone d'étude :

1. Situation géographique du Bassin versant GH DAT :

Le bassin de GH DAT fait partie du système hydraulique de l'oued Tensift dans sa partie Haouz Mejjate qui comporte une dizaine de bassins de plus ou moins grande importance. En effet, le bassin de GH DAT est caractérisé par une superficie de 540.79 km² dont son exutoire est localisé à SIDI RAHAL. Il est situé au Sud Est de Marrakech entre la latitude 31°10' et 31°40' Nord et entre la longitude 7°10' et 7°40' Ouest. L'exutoire Sidi Rahal est contrôlé par une station hydrologique gérée par l'ABHT dont les coordonnées Lambert : X = 303143 m

Y = 117733 m Z = 687 m.

Le bassin de Ghdat est situé à l'Est du bassin Haouz-Mejjate (Figure 2). Il est délimité à l'Est par le sous bassin Larh, au Sud par les montagnes du Haut Atlas, au Nord par l'oued Tensift et à l'Ouest par le sous bassin de Zat.

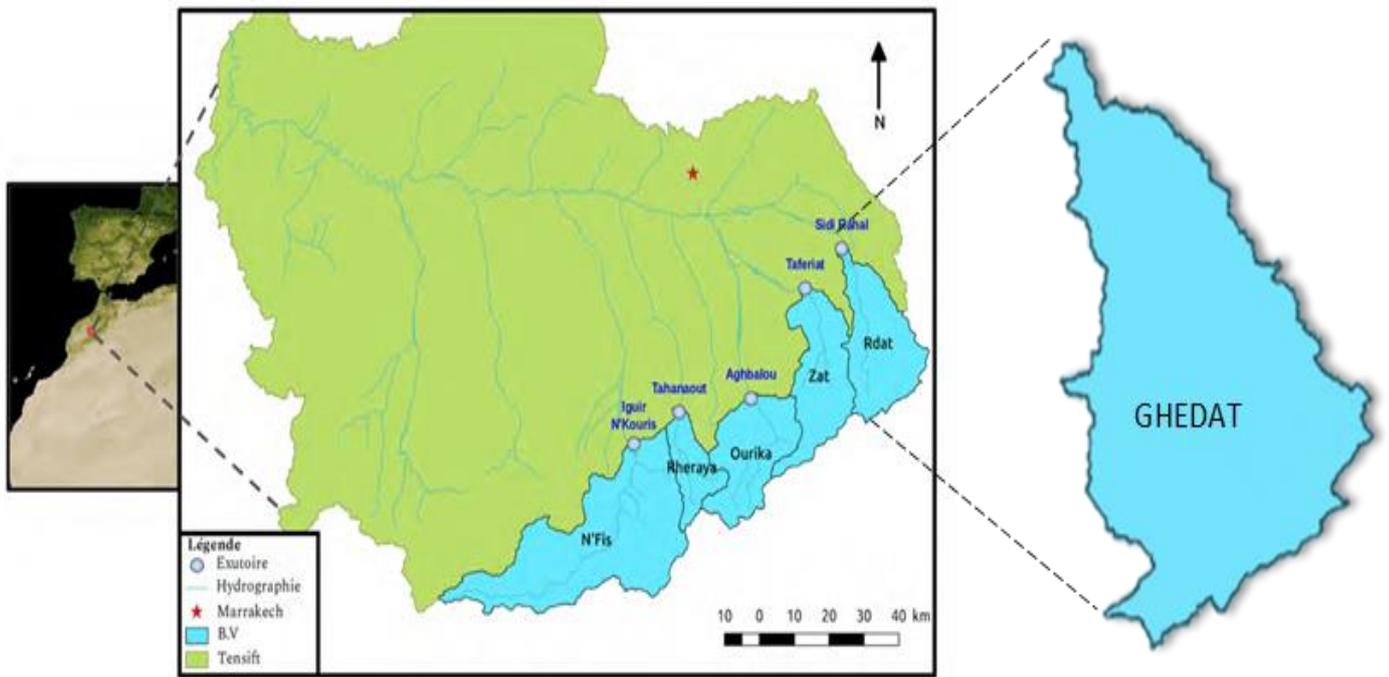


Figure 2: Situation géographique du bassin versant GHEDAT

2. Climat :

Le climat du bassin versant du Ghdat résulte de l'influence des deux facteurs suivants :

- **La continentalité** : l'influence de la continentalité se manifeste par des températures maximales élevées en été et des températures minimales faibles en hiver.
- **Le caractère montagneux de la plus grande partie du bassin (Haut Atlas)** : Le caractère montagneux entraîne une croissance de la pluviométrie, une accentuation de la rigueur des hivers et un adoucissement des étés avec l'altitude.

Les deux facteurs placent le bassin du Ghdat dans une zone climatique type continental, aride à semi-aride, les températures moyennes mensuelles varient entre 12.3°C et 28.2 °C. La valeur maximale pendant période allant de 1969/70 à 2003/04 est de l'ordre de 45.0 et qui a été enregistrée pendant le mois le plus chaud de l'année à savoir juillet de l'année 1972/73 ; et le minimum de la même série a été enregistré pendant le mois février de l'année 1969/70 avec une valeur de -5.6 °C.

La zone du Tensift qui comprend le bassin du Ghdat est caractérisé par des variations de précipitations dans le temps et dans l'espace.

La période pluvieuse s'étend du mois d'Octobre jusqu'au mois d'Avril et la période sèche se situe entre le mois de Mai et le mois de Septembre. La pluviosité annuelle dans le Haut Atlas est en moyenne de l'ordre de 600 à 800 mm, alors que dans la zone située entre le piémont du

Haut Atlas et la plaine du Haouz, cette moyenne varie entre 300 et 400 mm, plus précisément dans la station Sidi Rahal elle est de 351.7 mm (étude SBOT).

Environ 80 % à 90% de ces précipitations se déroulent pendant la saison pluvieuse. Le vent souffle le plus souvent de l'Ouest ou Nord-Ouest avec une vitesse moyenne qui varie entre 1.5 et 3.4 m/s à Marrakech (**Yaghiyo, 2000**).

3. Cadre géologique :

A. Phase tectonique :

Dans ce bassin versant, les caractères généraux affectant le substratum de la région sont divers : En général les jeux de failles ou de plis ont débuté depuis le précambrien et le paléozoïque, ils se sont intensifiés pendant les deux phases récentes dites atlasiques ; l'une post-éocène et anti-miocène, l'autre pliocène supérieur. A ces dernières phases se rapporteraient les plis, failles et flexures qui ont affecté la haute chaîne magmatique et la formation permo-triasique du bassin de GH DAT. La direction de ces failles est NE-SW à ENE-WSW. Ces déformations violentes ont provoqué une grande diaclase des roches capables de retenir des nappes qui assurent la pérennité de l'écoulement dans ce bassin. Elles sont aussi à la base de son ossature actuelle : des versants raides ou espacés, des ruptures de pentes. Toutefois la vigueur de la tectonique dépend de la nature lithologique (**Sabatier, 1982**)

B. Phases géologiques :

Le bassin GHDAT s'étend sur des formations et des ères géologiques variées (**figures 3**) :

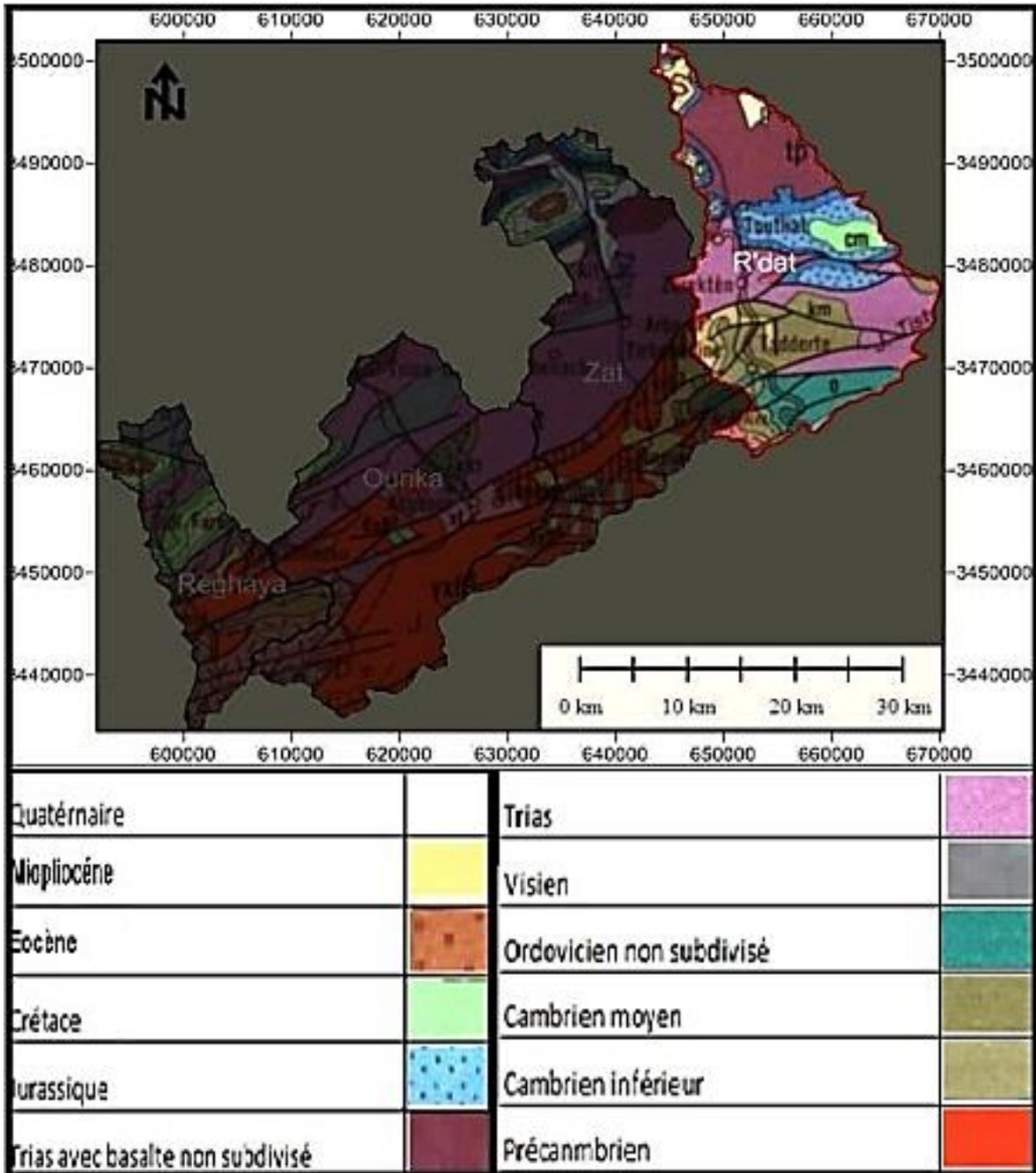


Figure 3: Carte géologique du bassin versant de Ghdat (HIQUI Abdessamad 2013-2015)

Tableau 1: Les phases géologiques du bassin versant GHEDAT (Darif, 2013)

	L'ère	Lithologie	MILIEU
La partie amont (Altitudes supérieures à 2000 m)	Mésozoïques	Les schistes et les quartzites.	
La partie septentrionale (Altitudes inférieures à 2000 m)	Cénozoïque et quaternaire	Dépôts continentaux et d'autres marins tels que les marnes et les calcaires Affleurements marno-gréseux	Piémont nord du Haut Atlas
	permo-triasique	Des basaltes altérés, sombres ou verdâtres, Un complexe rouge, grés marnes ou argiles salifères Des grés, des argiles, et des conglomérats	permo-triasique
	La phase hercynienne (carbonifère)	Le granite	La partie sud du bassin de Ghdat
	Le cambrien moyen, le cambro-ordovicien, l'ordovicien, le goth andain le dévonien et le carbonifère.	Les séries schisteuses résistantes	
	Cambrien	Les laves anciennes représentent des roches résistantes et sombres, Ces laves sont : Des andésites variées, verdâtres à l'état normal, Grisâtre ou rouge sombres quand elles sont altérées Des rhyolites brun sombre dont la couleur varie en fonction de l'altération	Le massif de l'Ouanoukrim et du Tazaghat

C. La lithologie :

Dans l'ensemble, la lithologie du bassin du GHDAT est constituée de 30% de terrains imperméables, 56% de terrains semi perméables et 14 % de terrains perméables (**P. Pascon 1977**).

La plus importante caractéristique de ces formations géologiques, c'est qu'elles sont en majeure partie imperméables, ce qui favorise l'écoulement superficiel et éventuellement la naissance de crues importantes en cas de pluies conséquentes.

- D'après ces données on constate que presque la totalité du bassin est constituée de faciès qui sont généralement semi perméables. Le tableau suivant donne les pourcentages des surfaces du bassin en fonction des taux d'infiltration confirme les données géologiques susmentionnées.

Tableau 2: Pourcentages des surfaces du bassin étudié en fonction des taux d'infiltrations (D'après Juillerat, 2004)

Taux d'infiltration [0% - 5%]	Taux d'infiltration [6% - 20%]	Taux d'infiltration [21% - 35%]	Taux d'infiltration [36% - 50%]	Taux d'infiltration [51% - 65%]	Taux d'infiltration [66% - 82%]
24.25 %	26.45 %	44.51%	0.51%	1.05 %	3.24 %

D'après le tableau on constate que presque la moitié du bassin de Ghdat présente des terrains dont l'infiltration est comprise entre 21 et 35 %.

4. Occupation du sol et végétation :

Les conditions climatiques et la nature morphologique du bassin favorisent le développement d'une couverture végétale hétérogène, formée essentiellement de plantes steppiques, de plantes herbacées et des plantes ligneuses arborées.

L'agriculture dans les régions de Ghdat est marquée par une diversification de la production : on y trouve des céréales, des abricotiers, des agrumes, des pommes de terre, des oliviers, des rosiers, des fourrages, du bétail, du miel...Etc.

La superficie agricole de cette région est d'environ 95 Km² soit 17 % de la superficie totale, tandis que la partie forestière est estimée à 122.36 Km² soit 23 % de la superficie totale. Le reste des superficies est partagé entre les vergers ; les pâturages ; les terrains rocheux ; et les terrains inconnus. (**Réf : Darif 2013**)

Tableau 3: Couverture d'occupation des sols dans la zone d'étude (Réf : Darif 2013)

Occupation des sols	Bassin de GHDAT	
	Superficies (Km ²)	%
Fortes vergers	19.15	3.6
Agriculture	95	17
Pâturages/ /terrains nus	180	33.8
Terrains rocheux	1	0.2
Terrains inconnus	34	21.4

5. Réseau hydrographique :

Un réseau hydrographique est un organisme d'écoulement d'importance très variable, formé par un ensemble d'éléments linéaires hiérarchisés. L'espace drainé est un bassin hydrographique (bassin versant) délimité par des lignes de partage des eaux qui le séparent des réseaux adjacents.

L'oued GHDAT est un affluent atlasique du Tensift, ses principaux affluents sont :

- Assif-N-Tichkaqui est à l'origine de l'oued Ghdad et dont la source se situe à une altitude de 2200mètres environ.
- Oued Imizer, formé par la confluence de l'oued Imarighne et l'oued Tihizat.
- Assif-N-Ifraden.
- Oued Tissert.

Pour la délimitation du bassin versant GHDAT et l'extraction du réseau hydrographiques couvrant ce dernier, nous avons utilisé logiciel ArcGIS (10.3) (les étapes de délimitation sont résumées sur (l'**Annexe 1**). Le résultat de la délimitation est illustré sur **la figure (4)**

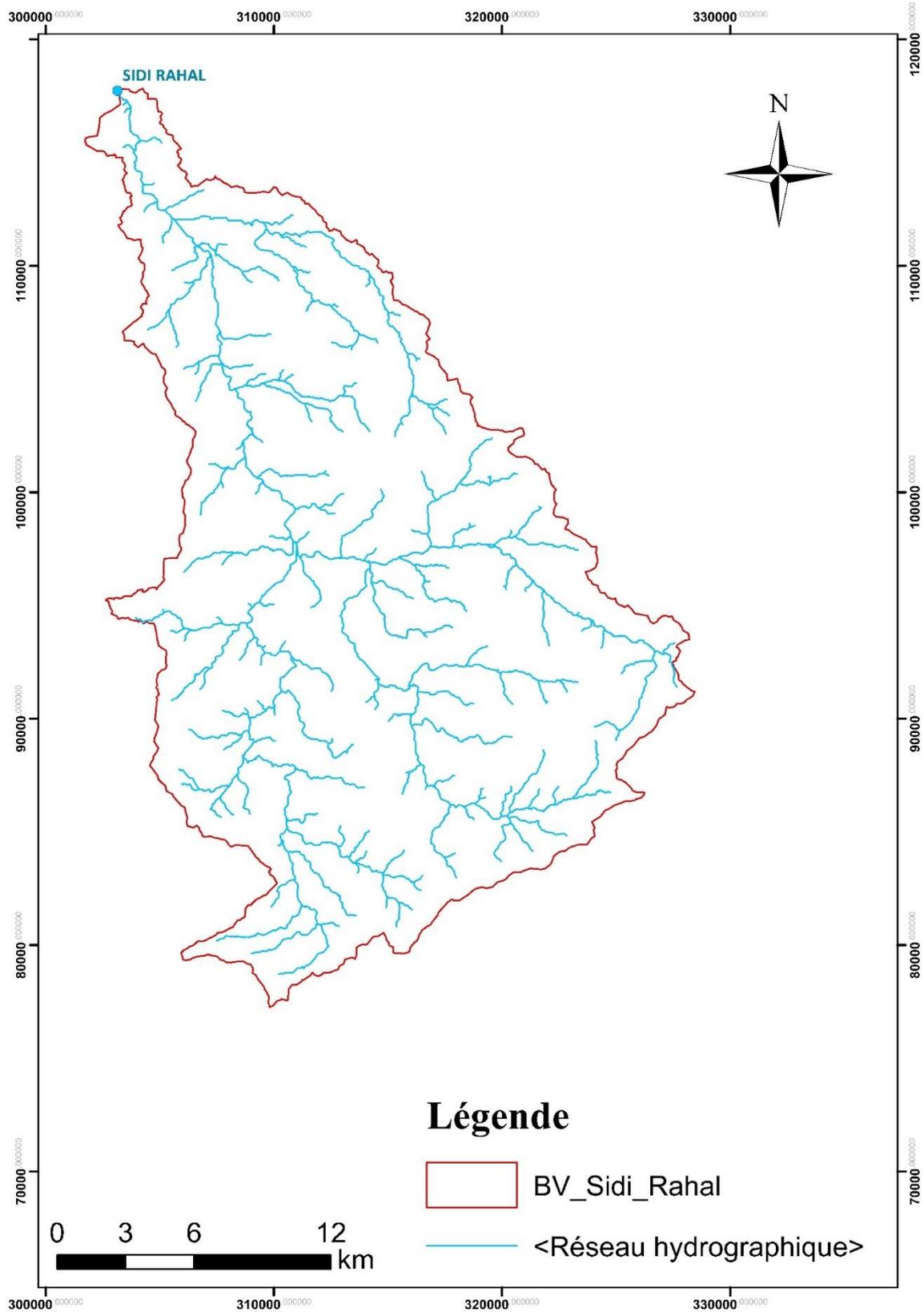


Figure 4: Carte du bassin versant GHDAT avec les réseaux hydrographiques

III. Caractéristiques du bassin versant GH DAT :

1. Caractéristiques morphométriques du bassin versant

A. Caractéristiques géométriques

a) Aire et périmètre :

L'aire est la portion du plan délimitée par la ligne de crête, ou contour du bassin. Elle est mesurée soit à l'aide d'un planimètre, soit par la méthode des petits carrés, généralement exprimée en Km².

Le périmètre est la longueur, généralement exprimée en km, de la ligne de contour du bassin ; sa mesure est faite à l'aide d'un curvimètre. Pour certaines applications on trace le périmètre stylisé du bassin en lissant son contour.

Surface du BV Ghdat : 540.795 Km²

Périmètre du BV Ghdat : 143.637 Km

b) Indice de compacité de GRAVELIUS :

L'indice admis par les hydrologues pour caractériser la forme d'un bassin versant est l'indice de compacité de GRAVELIUS qui est le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface.

Si A est la surface du bassin en Km² et P son périmètre en km, le coefficient Kc est égal à :

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{A\pi}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} = 1,72$$

Le bassin a une forme allongée, Ainsi on peut dire que le bassin Ghdat est presque sept fois plus long que large.

c) Rectangle équivalent :

Cette notion a été introduite pour pouvoir comparer des bassins entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques géométriques sur l'écoulement.

Soit L et I la longueur et la largeur du rectangle, et P et A le périmètre et l'aire du bassin versant.

On a:

$$L = \frac{K\sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K}\right)^2} \right] = 1.72 * \frac{\sqrt{540}}{1.12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{1.72}\right)^2} \right) = 62.81 \text{ km}$$

$$l = \frac{P}{L} = \frac{540.795}{62.81} = 8.60 \text{ km}$$

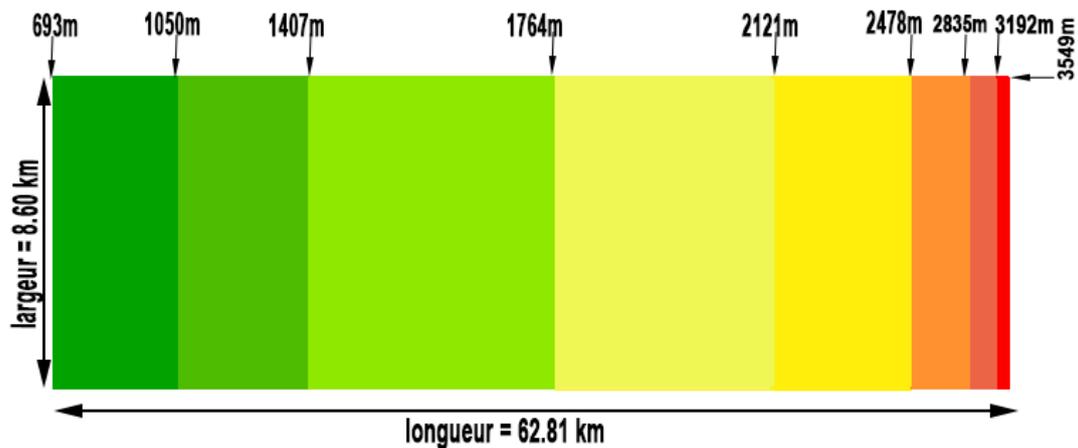


Figure 5: Rectangle équivalent

B. Caractéristiques du relief :

a) Carte hypsométrique

La carte hypsométrique permet de visualiser les différentes zones d'altitude d'un bassin versant. La carte (**Figure 6**) montre une prédominance des terrains compris entre **693 km et 3549 km**.

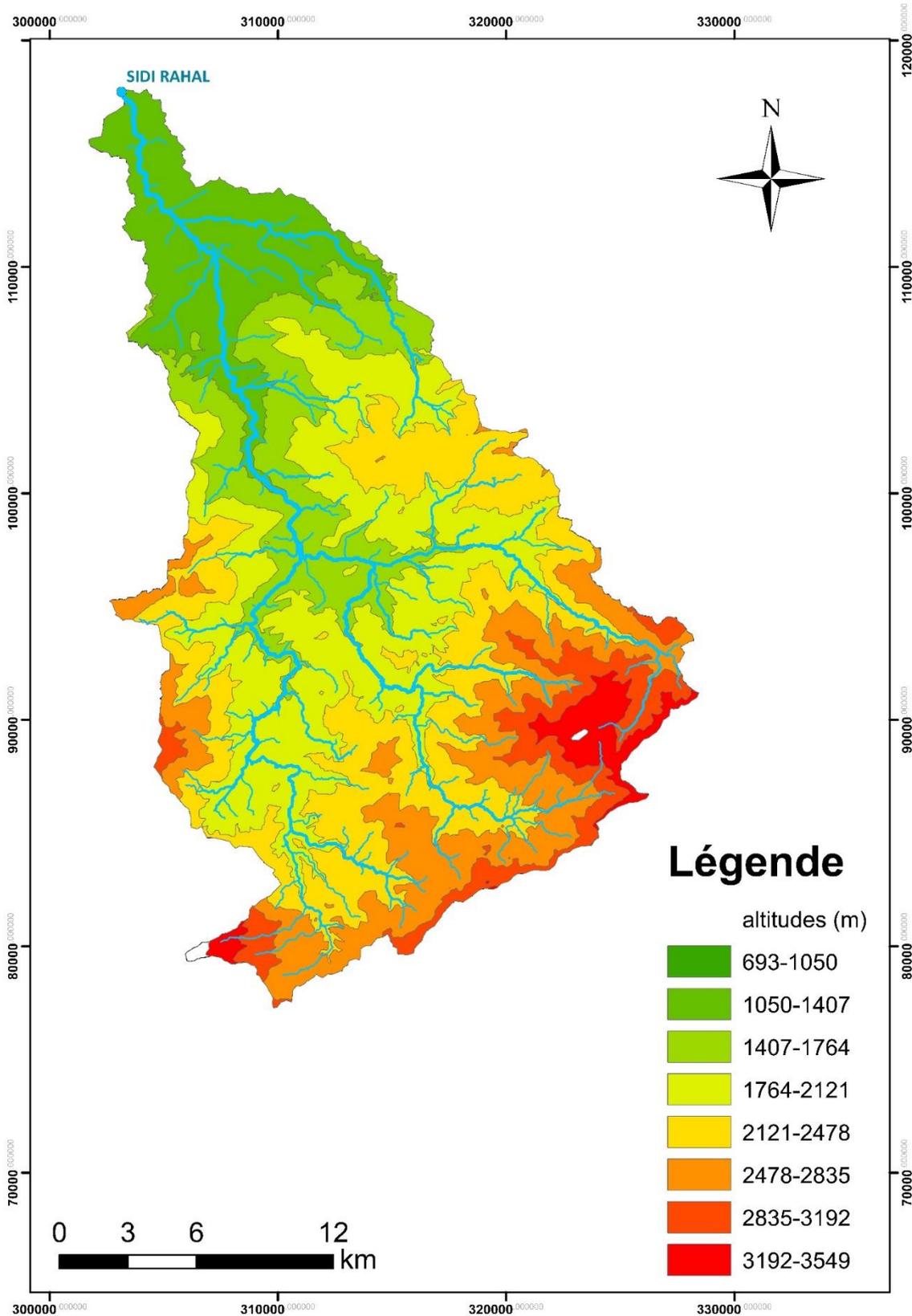


Figure 6 : Carte hypsométrique du bassin versant GHDAT

b) Courbe hypsométrique

Le relief d'un bassin est souvent caractérisé par la courbe de sa répartition hypsométrique. **La figure 7** montre en ordonnée l'altitude Z, et, en abscisse le pourcentage de la surface du bassin dont l'altitude est à supérieure ou égale à Z, rapportée à la surface totale du bassin.

Le tableau 4 représente les répartitions hypsométriques, leurs surfaces et surfaces cumulées

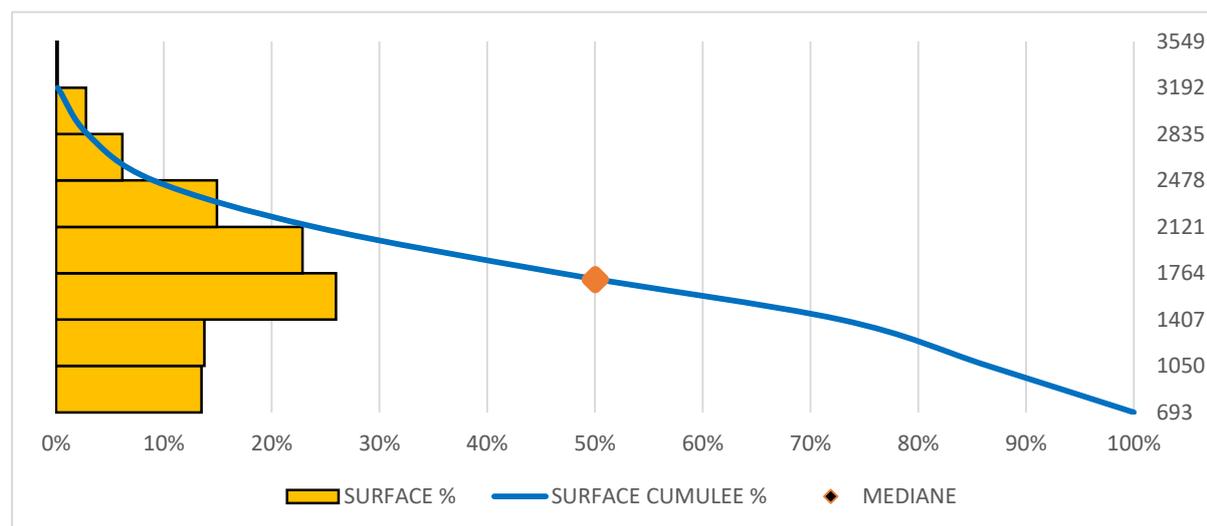


Figure 7: Courbe hypsométrique pour le bassin versant Ghdat

Tableau 4 : La répartition des tranches d'altitudes du bassin versant du Ghdat

Tranche d'altitude (m)	Surface (Km ²)	Surface (%)	Surface cumulée (%)
693 - 1050	72,98	13,49	13,49
1050 - 1407	74,34	13,74	27,23
1407 - 1764	140,46	25,97	53,20
1764 - 2121	123,65	22,86	76,06
2121 - 2478	80,64	14,91	90,97
2478 - 2835	33,14	6,13	97,09
2835 - 3192	14,97	2,77	99,86
3192 - 3549	0,75	0,14	100,00

A partir de la courbe hypsométrique nous pouvons extraire :

- **Les altitudes : maximale et minimale**

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire. Ces deux données deviennent surtout importantes lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologiques telles que la température, la précipitation et le couvert neigeux. Elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente.

- **L'altitude moyenne**

L'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique. On peut la définir comme suit :

Avec :

$$H_{moy} = \sum \frac{A_i \cdot h_i}{A}$$

H_{moy} : altitude moyenne du bassin [m] ;

A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau [km²] ;

h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ;

A : superficie totale du bassin versant [km²].

L'altitude moyenne est peu représentative de la réalité. Toutefois, elle est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques.

- **L'altitude médiane**

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière.

L'altitude maximale (m)	L'altitude minimale (m)	L'altitude moyenne (m)	L'altitude médiane(m)
3549 m	693 m	1736,19 m	1715 m

c) Carte de pente :

La figure 8 présente la carte des pentes au niveau du bassin versant de GH DAT.

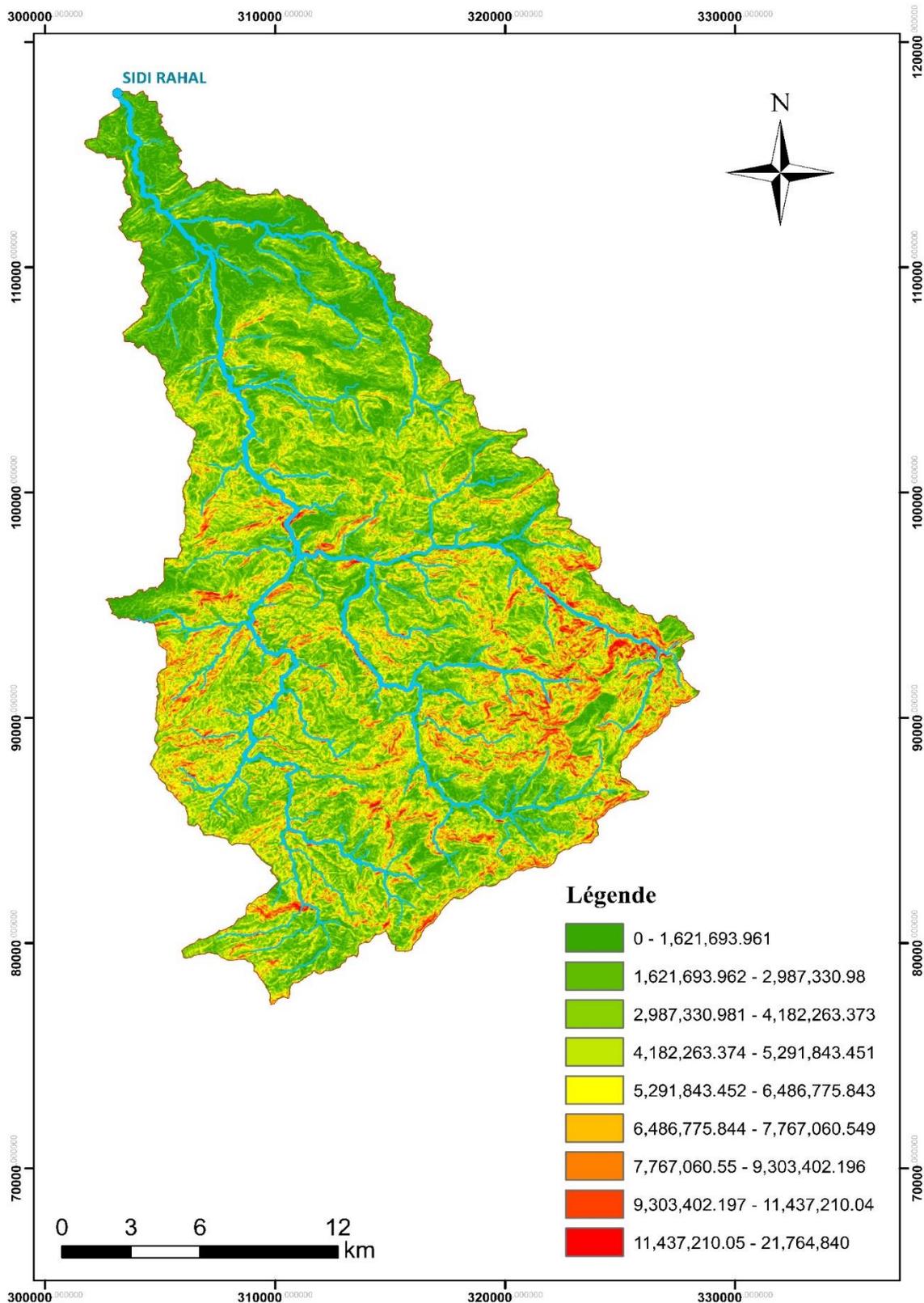


Figure 8: Carte des pentes (en degrés) du bassin versant GH DAT

d) La pente moyenne du bassin versant :

La pente moyenne est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin. Elle est considérée comme une variable indépendante. Elle donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct, donc sur le temps de concentration T_c , et influence directement le débit de pointe lors d'une averse. La pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

$$im = \frac{Hmax - Hmin}{L} = 45,47_{m/km}$$

im : pente moyenne [m/km ou 0/00],

L : la longueur du cours d'eau principal en [km],

Hmax et Hmin : sont respectivement les altitudes max et min le long du cours d'eau [m],

C. Caractéristiques du réseau hydrographique :

Un réseau hydrographique est donc l'ensemble des cours d'eau, affluents et sous-affluents d'une rivière ou d'un même fleuve. A l'état naturel tous les réseaux sont hiérarchisés, de nombreux auteurs ont proposé des classifications de ces réseaux.

a) Classification du réseau hydrographique selon STRAHLER :

La hiérarchisation d'écoulement est une méthode d'attribution d'un ordre numérique aux liaisons d'un réseau hydrographique. Cet ordre est un moyen qui permet d'identifier et de classer des types de cours d'eau en fonction de leur nombre d'affluents.

La méthode de STRAHLER est la méthode de hiérarchisation d'écoulement la plus utilisée. Elle se base sur :

- Toutes les liaisons sans affluents sont classées avec la valeur 1 et sont connus sous le nom du premier ordre.
- L'ordre d'écoulement augmente lorsque des cours d'eau du même ordre se croisent.
- L'intersection de deux liaisons de premier ordre crée donc une liaison de deuxième ordre.

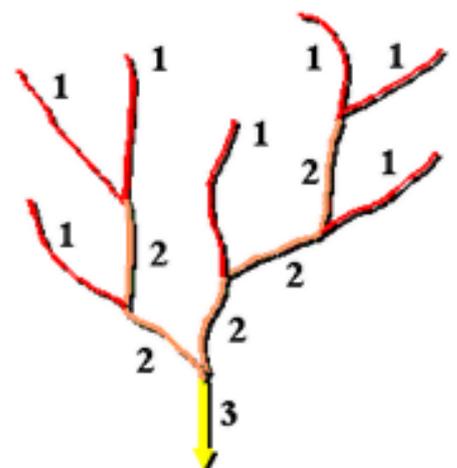


Figure 9: Exemple de la méthode de STRAHLER

- L'intersection de deux liaisons de deuxième ordre crée une liaison de troisième ordre. En revanche, l'intersection de deux liaisons d'ordres différents n'incrémente pas l'ordre.

Le résultat de la méthode STRAHLER relative au cas d'étude de bassin versant GHDAT est présenté sur la **figure 10**.

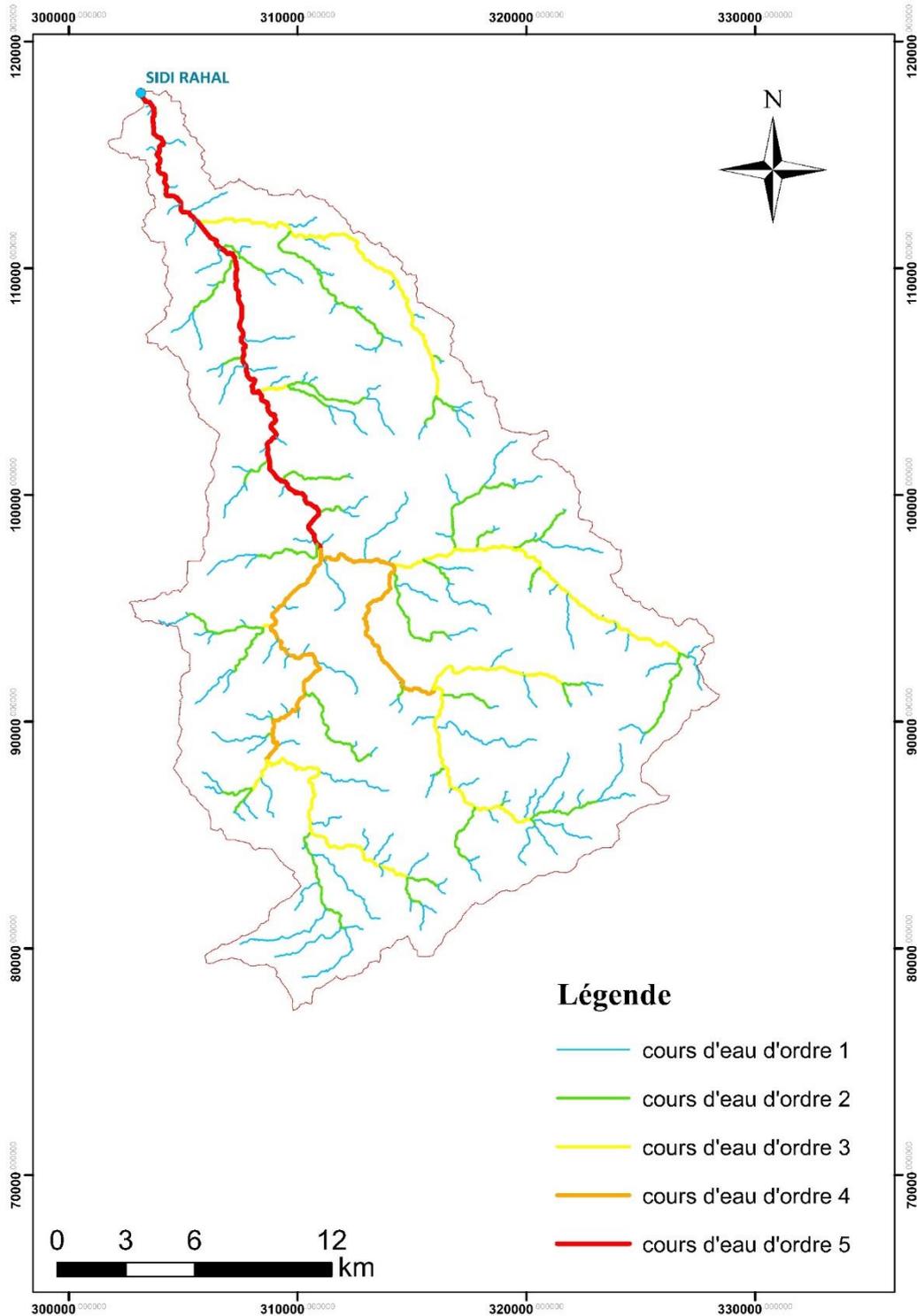


Figure 10: Classification du réseau hydrographique selon STRAHLER (calculé par Arc Gis)

b) Densité de drainage

La densité de drainage, introduite par Horton, est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant autrement dit c'est le rapport de la longueur des canaux d'écoulement à la superficie du bassin.

$$Dd = \frac{\sum L}{A} = \frac{418,11}{540.795} = 0,77 \text{ km/km}^2$$

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques.

D. Le temps de concentration :

Le temps de concentration est le temps écoulé entre le début d'une précipitation et l'atteinte du débit maximal à l'exutoire du bassin versant.

Tableau 5: Calcul du temps de concentration avec différentes méthodes

Formule	Paramètre	Calcul
<p>GIANDOTTI :</p> $Tc(h) = \frac{4\sqrt{S} + 1,5L}{0,8\sqrt{Hmoy - Hmin}}$	<p>TC : Temps de concentration en heures</p> <p>S : Surface du bassin en km²</p> <p>L : Longueur du rectangle équivalent en km</p> <p>Hmoy : Altitude moyenne en m</p> <p>Hmin : Altitude minimale de l'exutoire en m</p>	7,25
<p>Van Te Chow :</p> $Tc(h) = 0,123\left(\frac{L}{I^{0,5}}\right)^{0,64}$	<p>L : longueur de la cour d'eau principal en km.</p> <p>I : pente moyenne du bassin versant en m/m.</p>	4,68
<p>Kirpich :</p> $Tc(h) = 0,95 \frac{L^{1,155}}{D^{0,385}}$	<p>L : longueur de la cour d'eau principal en km.</p> <p>D : différent altitude entre les extrémités cours d'eau principale en m.</p>	5.29
<p>Californienne :</p> $Tc(h) = 0,1452\left(\frac{L}{P^{0,5}}\right)^{0,77}$	<p>L : longueur du cours d'eau principal en Km.</p> <p>P : pente moyenne du bassin versant en m/m.</p>	11,56

Le temps de concentration moyenne du bassin versant du GH DAT étant de 7 heures, ce qui implique que les eaux arriveraient rapidement au niveau de l'exutoire, impliquant ainsi l'utilité de la mise en place d'un réseau d'alerte des crues dans ce bassin.

Chapitre 3 : Collecte des données et calcul du bilan hydrique :

I. Collecte et analyse des données :

Pour notre cas d'étude (Bassin versant GHDAT), l'acquisition des données des différentes composantes (Précipitation, évapotranspiration) du bilan hydrique sont calculées à l'aide de l'outil **WAPOR (lien, date de la visite)**.

- Base de données WAPOR

WAPOR est le portail de la FAO permettant de surveiller la productivité de l'eau grâce à un accès ouvert aux données dérivées de télédétection. Il surveille et rend compte de la productivité de l'eau pour l'agriculture en Afrique et au Proche-Orient et fournit un accès ouvert à la base de données sur la productivité de l'eau et à ses milliers de couches cartographiques sous-jacentes. Il permet des interrogations directes de données, des analyses de séries chronologiques, des statistiques de zone et le téléchargement de données de variables clés associées aux évaluations de la productivité de l'eau et des terres.

Les données WAPOR sont disponibles en accès libre dans le portail WAPOR (https://wapor.apps.fao.org/home/WAPOR_2/2) et sont obtenues suivant une méthodologie techniquement rationnelle.

- Structure de la base de données

La base de données WAPOR fournit des données à trois niveaux de résolution différents :

Niveau 1 - niveau **continental** : résolution au sol de 250 m couvrant l'Afrique et le Proche Orient.

Niveau 2 - niveau du **pays** : 26 pays et territoires et 6 bassins fluviaux (100 m) ;

Niveau 3 - niveau sous-**national** : 12 zones avec une résolution de 30 m.

Pour notre cas, nous avons utilisé Niveau 1 (niveau **continental**).

- Disponibilité des données

Surveillance continue de janvier 2009 à ce jour, à 10 jours ou tous les jours (pour les précipitations et ET0).

Pour le calcul de bilan hydrique du GHDAT, on s'intéressera aux composantes suivantes : Précipitation, évapotranspiration, débit.

1. Evapotranspiration estimée par la plateforme WAPOR :

La plateforme WAPOR utilise l'équation de Penman-Monteith (P-M), adaptée aux données d'entrée de la télédétection, pour calculer l'évapotranspiration. Les figures 11 et 12 illustrent respectivement la répartition mensuelle et annuelle des évapotranspirations dans la zone d'étude (GHDAT).

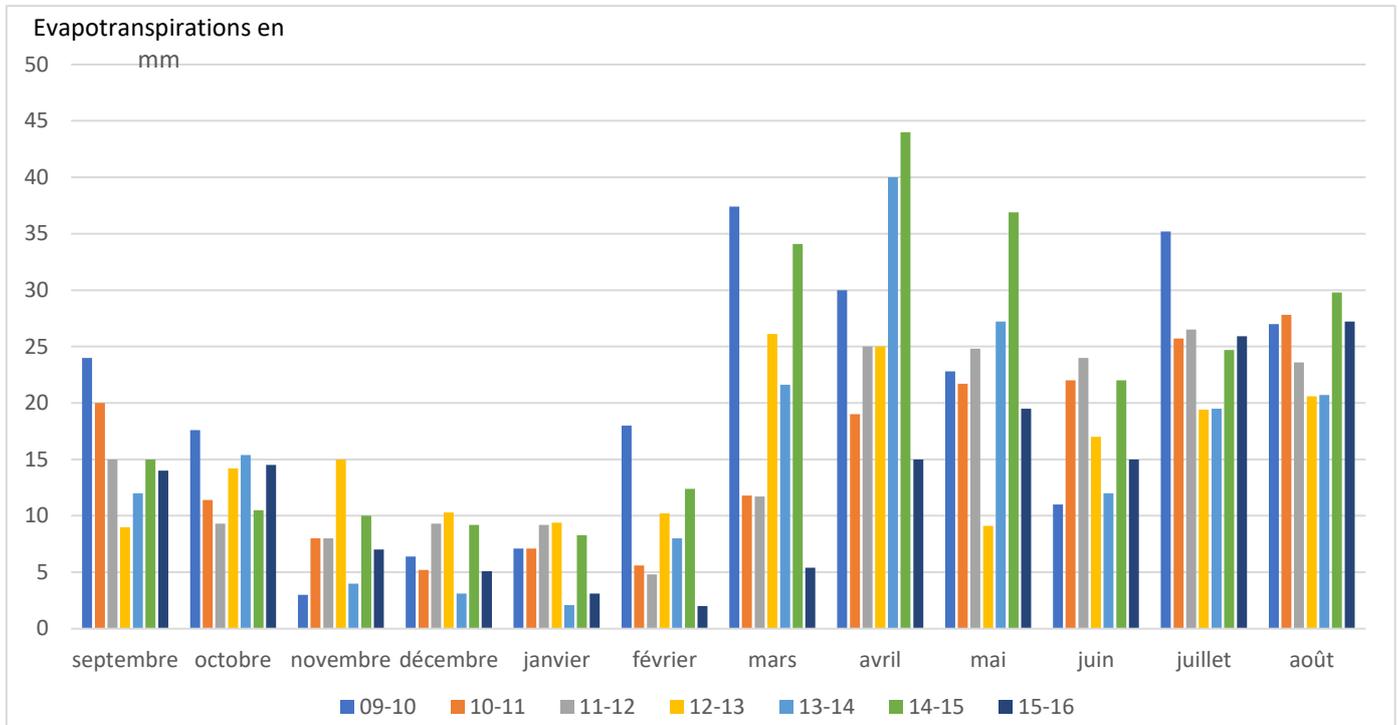


Figure 11: Estimation des évapotranspirations mensuelles 2009-2016

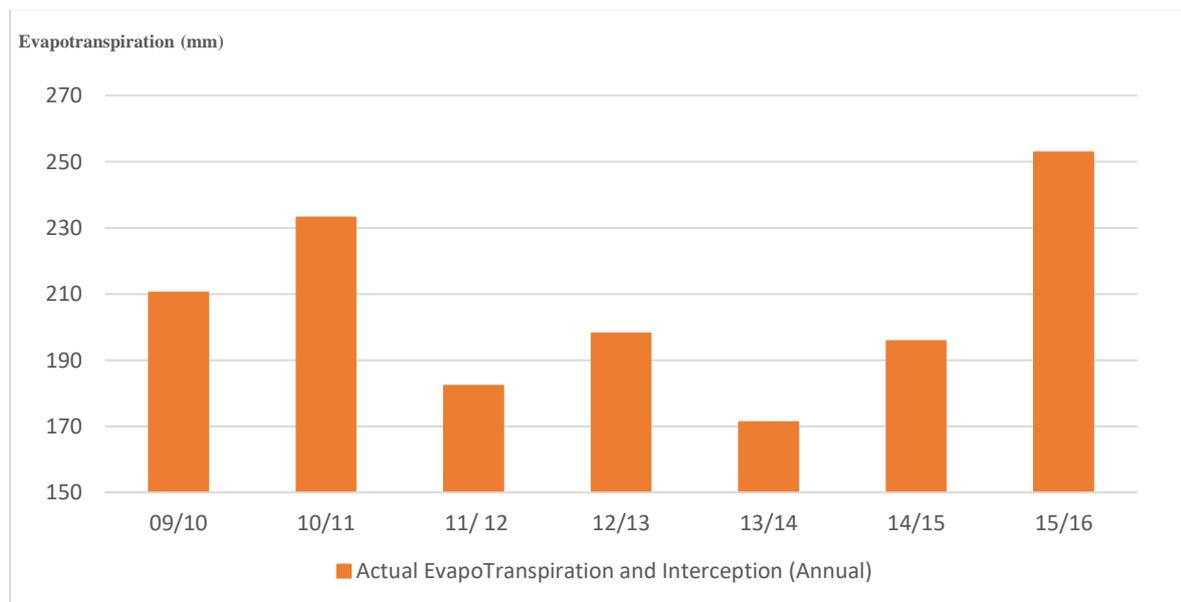


Figure 12: Estimation des évapotranspirations annuelles 2009-2016

D'après la **figure 12**, on constate que la valeur maximale d'évapotranspiration entre l'année 2009 et 2016 s'élève à 252,8 mm enregistrée pendant l'année 2015. C'est dû principalement au record enregistré au mois d'avril 2015 (voir **figure 11**).

2. Précipitation estimée par la plateforme WAPOR :

Dans le but d'estimer les précipitations, on a utilisé la plateforme WAPOR qui se base sur les données CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station data). Ces derniers permettent d'incorporer une imagerie de résolution par satellite de 5 km avec les données des stations in-situ pour créer une série temporelle des précipitations.

Les **figures 13 - 14** illustrent respectivement la répartition mensuelle et annuelle des taux des précipitations dans la zone d'étude (GHDAT).

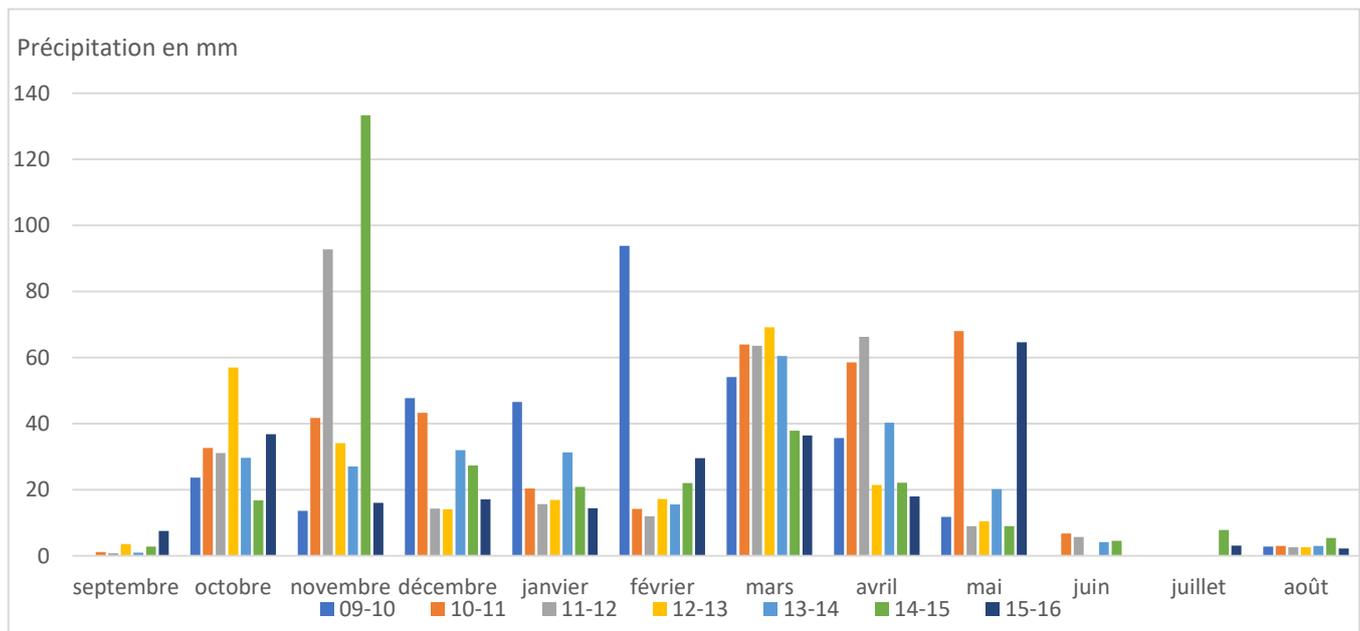


Figure 13: Estimation des précipitations mensuelles 2009-2016

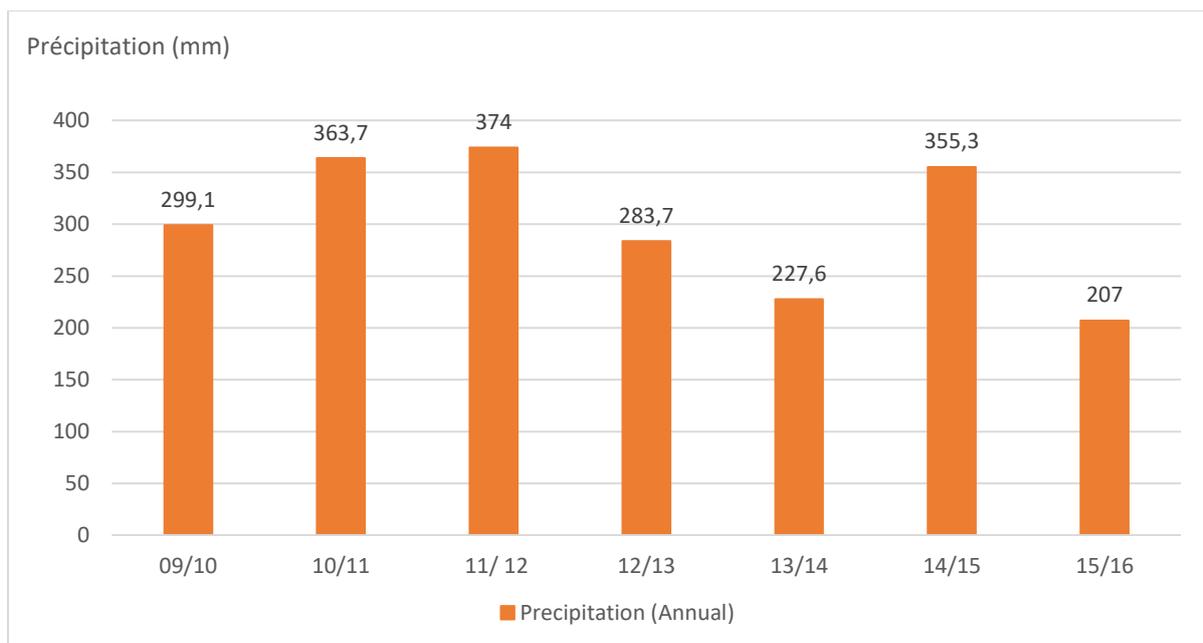


Figure 14: Estimation des précipitations annuelles 2009-2016

Malgré le record de précipitation mensuelle enregistré en novembre 2015, l'année 2011 est l'année caractérisée par le taux maximale de précipitation sur les 8 ans (entre 2009 et 2016). Ceci dû à une répartition de précipitation homogène sur toute les saisons de l'année 2011.

II. Validation des données :

Afin de vérifier et valider les données de précipitation issues de la plateforme WAPOR, on a effectué une étude comparative avec les données mesurées.

1. Analyse comparative des données pluviométriques de WAPOR et mesurées :

Les figures 15 – 16 - 17 - 18 récapitulent les données des précipitations (mm) issues de la station météorologique de SIDI RAHAL et celles de la plateforme WAPOR entre l'année 2009 et 2016 :

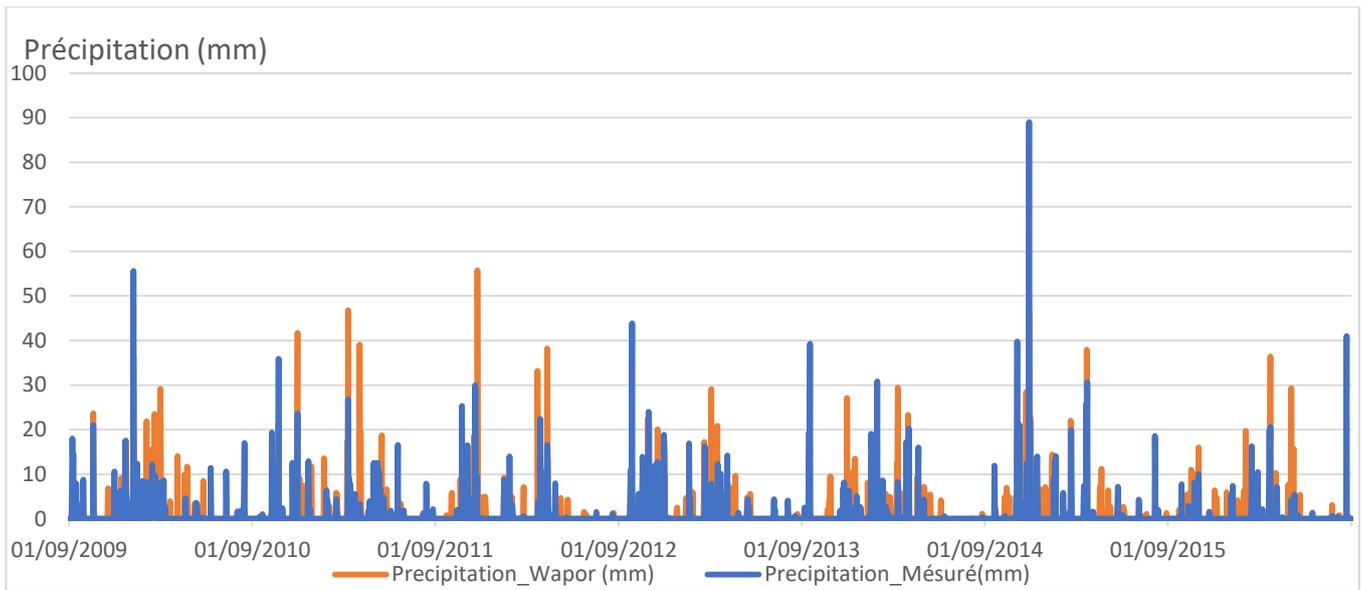


Figure 15: Correspondances des précipitations journalières entre les données WAPOR et celles mesurées à Sidi Rahal (2009-2016)

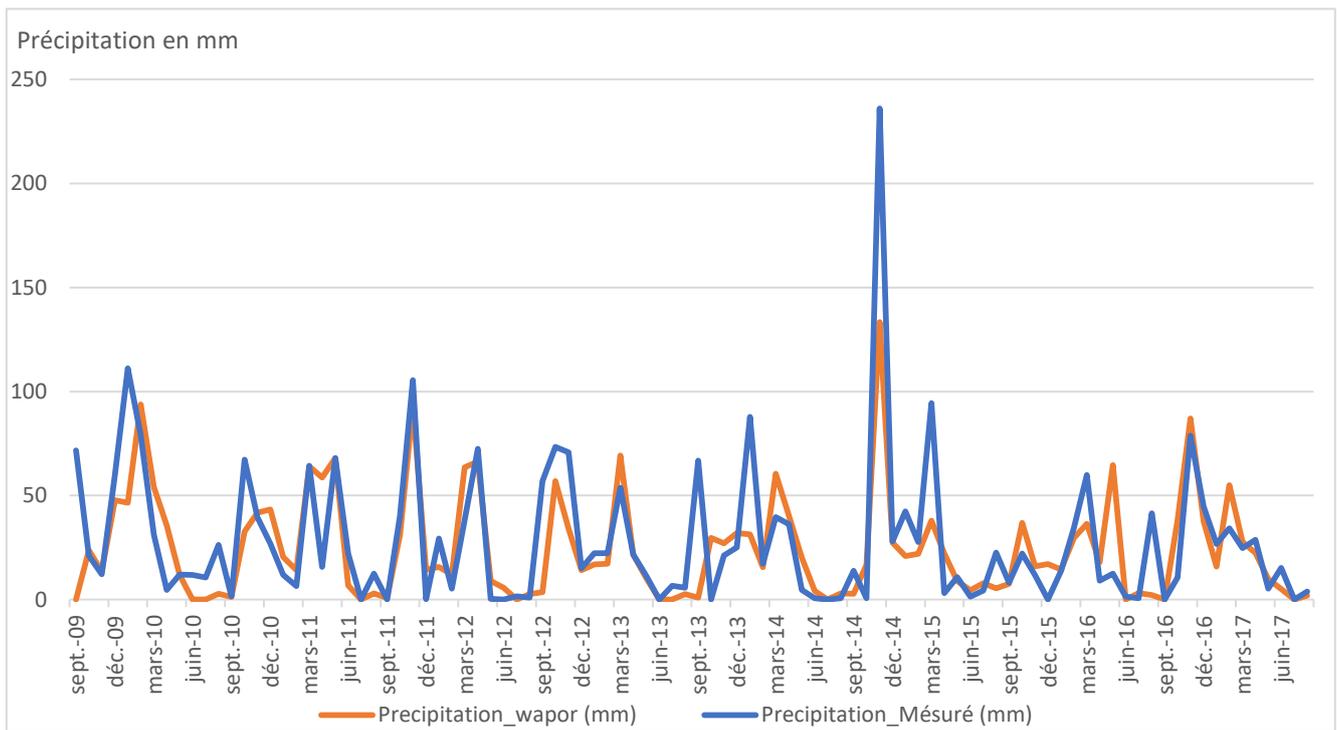


Figure 16: Correspondances des précipitations mensuelles entre les données WAPOR et celles mesurées à Sidi Rahal (2009-2016)

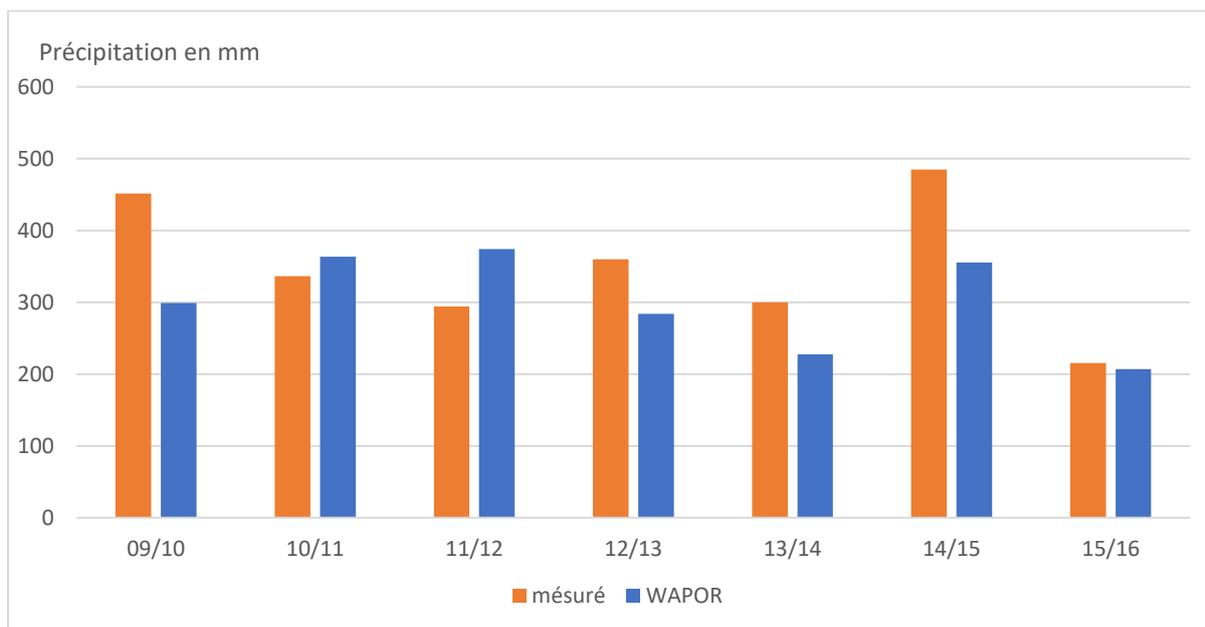


Figure 17: Correspondances des précipitations annuelles entre les données WAPOR et celles mesurées à Sidi Rahal (2009 – 2016)

- On remarque que les données de WAPOR suivent presque la même tendance des données mesurées, avec une déviation des données WAPOR qui varie entre **-52,2 mm et 102,7 mm (Figure16)**.
- L'année 2014 est l'année la plus pluvieuse, selon l'Agence de Bassin Hydraulique de Tensift, le bassin GHDAT a connu, le 28/11/2014, une séquence pluviométrique d'une grande ampleur (89mm). Cependant, les données WAPOR enregistre un pic le 24/11/2011 pour une valeur de 55.8mm.
- On constate que les valeurs maximales et minimales des précipitations mesurées, journalières, mensuelles et annuelles est enregistrées sur les mêmes périodes. Tandis que pour les données WAPOR, on remarque l'absence de cette cohérence sur la période étudiée, ceci peut être justifié par la méthode d'estimation utilisée par cette plateforme qui se base principalement sur la technique de la télédétection. Les résultats de cette technique sont généralement perturbés par la couverture du ciel par les nuages.

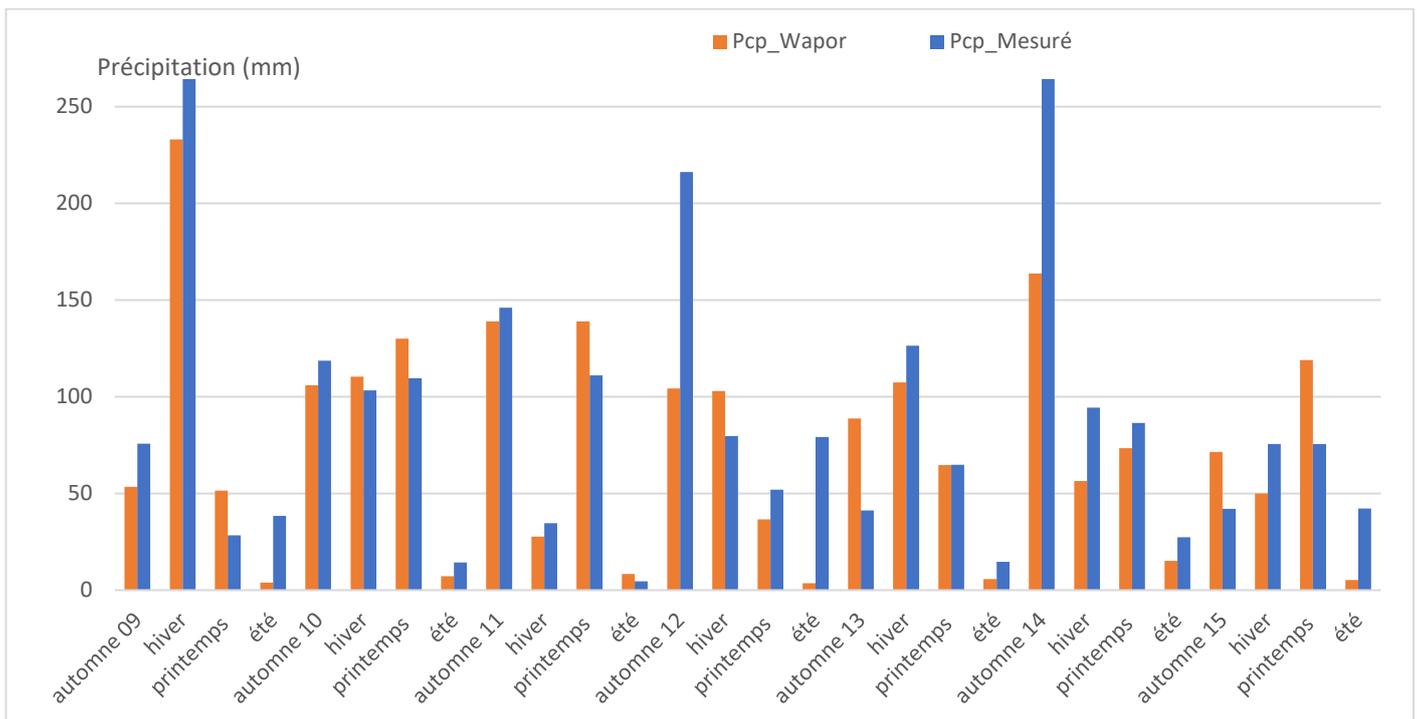


Figure 18 : Correspondances des précipitations saisonnières de WAPOR et celles mesurées à Sidi Rahal (2009-2016)

D'après la figure 18 :

- On remarque que la saison d'automne présente la saison la plus pluvieuse à l'exception des années 2009, 2013 et 2015 où le pic est enregistré à la saison hivernale.

- La valeur maximale des précipitations durant toute la période étudiée est enregistrée en hiver 2009 avec une valeur de 266.9 mm pour les données mesurées et 233.1 mm pour les données de WAPOR. Cependant, la valeur minimale des précipitations est enregistrée à la saison d'été pour deux années différentes :

- Pour les données WAPOR : La valeur s'élève à 3.6 mm en 2013
- Pour les données mesurées : La valeur atteint 4.6 mm en 2011

⇒ D'après ces figures, on constate une variation remarquable entre les données de WAPOR et celles mesurées

2. Corrélation entre les précipitations des données WAPOR et mesurées :

La corrélation par régression linéaire reflète le degré de liaison entre la précipitation des données WAPOR et observées, sur une période de 8 ans de 2009 à 2016.

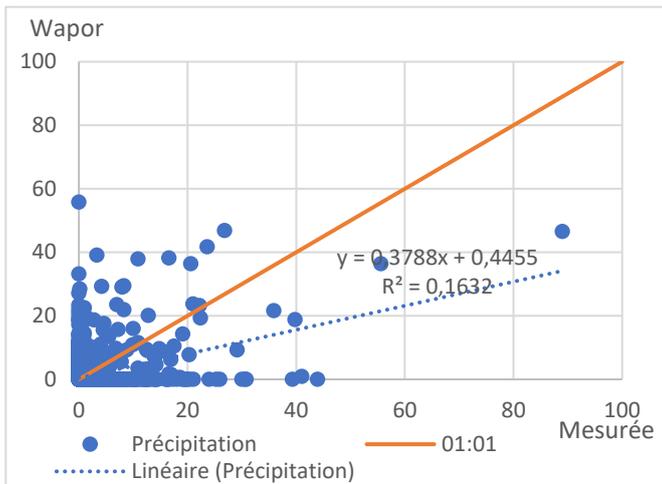


Figure 19: Corrélation des précipitations journalières entre WAPOR et mesurées de 2009-2016

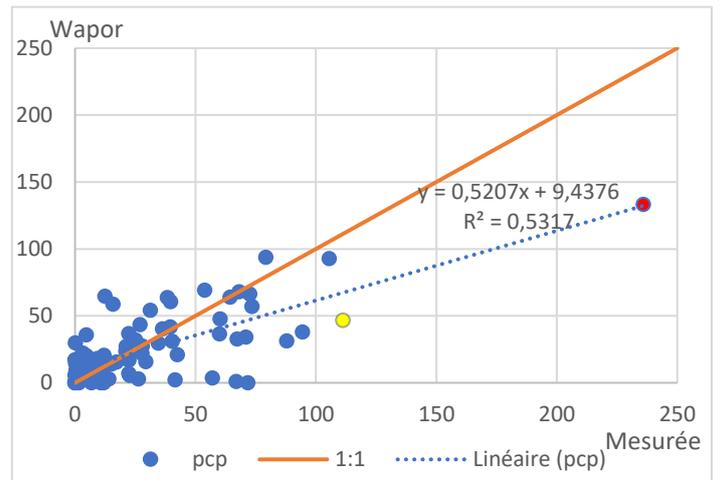


Figure 20: Corrélation des précipitations mensuelles entre WAPOR et mesuré de 2009-2016

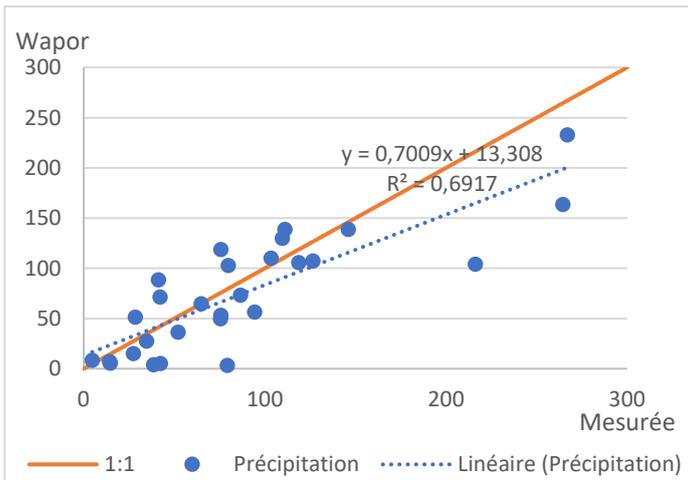


Figure 21: Corrélation des précipitations saisonnières entre WAPOR et mesuré de 2009-2016

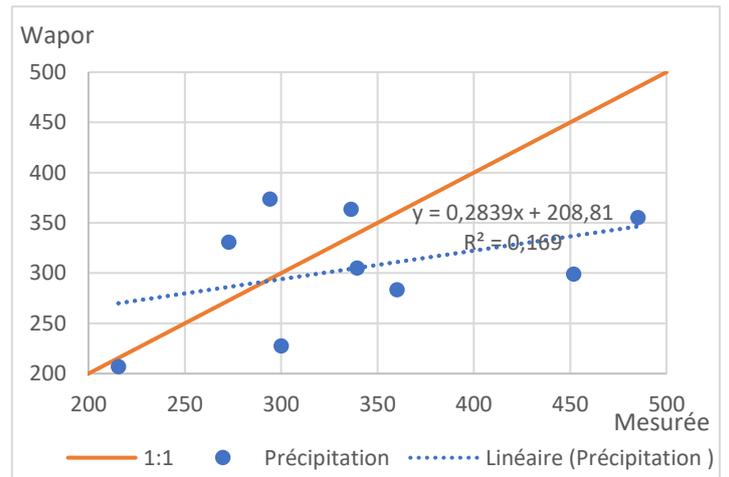


Figure 22: Corrélation des précipitations annuelles entre WAPOR et mesuré de 2009-2016

Les figures 19 – 20 – 21 – 22 présentent une corrélation des précipitations linéaire entre WAPOR et mesuré. Les corrélations des précipitations journalières, mensuelles, saisonnières et annuelles indiquent des valeurs positives.

On observe que les précipitations mensuelles et saisonnières ont des coefficients de corrélation relativement acceptables : pour les précipitations mensuelles ($R = 0.73$) et les précipitations saisonnières ($R = 0.83$).

Au niveau des précipitations journalières et annuelles les coefficients de corrélation sont faibles et égalent à 0,40, ceci peut être justifié par la taille de campagne de mesure. En effet tant que les nombres des données sont élevés, la corrélation est fortement impactée.

A titre d'exemple, pour le diagramme de précipitations mensuelles on observe le point avec la plus grande déviation (102,2 mm en novembre 2014) (point rouge sur le diagramme) ce qui perturbe l'estimation issue de la plateforme WAPOR.

La courbe orange dans tous ces graphes délimite deux zones :

- Zone au-dessous de la courbe : présente la zone des valeurs WAPOR sous-estimées.
- Zone au-dessus de la courbe : présente la zone des valeurs WAPOR surestimées.

III. Synthèse : Bilan hydrique du GHDAT :

1. Bilan hydrique annuel observé général du bassin GHDAT :

Dans le but de calculer le bilan hydrique de bassin versant GHDAT, on a utilisé l'équation suivante :

$$P = ETR + R + I$$

Où :

P : Précipitation en mm

R : Ruissellement en mm

I : Infiltration

ETR : Evapotranspiration en mm

Pour notre cas d'étude, on néglige l'infiltration car le sol est peu perméable ainsi que l'eau infiltrée est récupérée à l'exutoire.

D'autre part, on étend les données de précipitation de la station SIDI RHAL sur tout le bassin versant, sous prétexte que cette station est la seule ancienne station du bassin et il y a un manque de données d'autres stations.

En conséquence, le bilan hydrique du bassin versant GHDAT calculé restera approximatif.

Les résultats du calcul des différentes composantes du bilan hydrique pour la période de 2001 à 2016 sont récapitulés sur le **tableau 6**.

Tableau 6: Bilan hydrique annuel observé 2001 – 2016

Année	Précipitation	débit en m ³ /s	Ruissellement (mm)	EVP	coefficient de ruissellement
2001	241,3	0,40	23,45	217,85	0,10
2002	347,3	0,87	50,58	296,72	0,15
2003	389,7	4,11	239,61	150,09	0,61
2004	245,8	2,07	120,95	124,85	0,49
2005	383,5	2,06	120,29	263,21	0,31
2006	204,8	0,92	53,48	151,32	0,26
2007	212	0,87	50,92	161,08	0,24
2008	416,7	3,82	222,95	193,75	0,54
2009	451,70	3,61	210,51	241,19	0,47
2010	336,20	1,01	58,78	277,42	0,17
2011	294,10	1,21	70,42	223,68	0,24
2012	360,10	1,71	99,51	260,59	0,28
2013	300,00	0,65	37,90	262,10	0,13
2014	485,10	6,00	350,14	134,96	0,72
2015	215,50	1,17	68,51	146,99	0,32
2016	272,80	1,69	98,52	174,28	0,36

On remarque que l'évapotranspiration atteint son maximum (296.72 mm) en 2002 et la valeur minimale s'élève à 134.96 mm enregistrée en 2014.

2. Relation précipitation-débit :

a) Extrait des données observés

Tableau 7: Tableau comparatif des précipitations et débit du bassin GH DAT 2009 - 2016

Année	Précipitation	débit en m3/s	Ruissellement (mm)
2009	451,70	3,61	210,51
2010	336,20	1,01	58,78
2011	294,10	1,21	70,42
2012	360,10	1,71	99,51
2013	300,00	0,65	37,90
2014	485,10	6,00	350,14
2015	215,50	1,17	68,51
2016	272,80	1,69	98,52

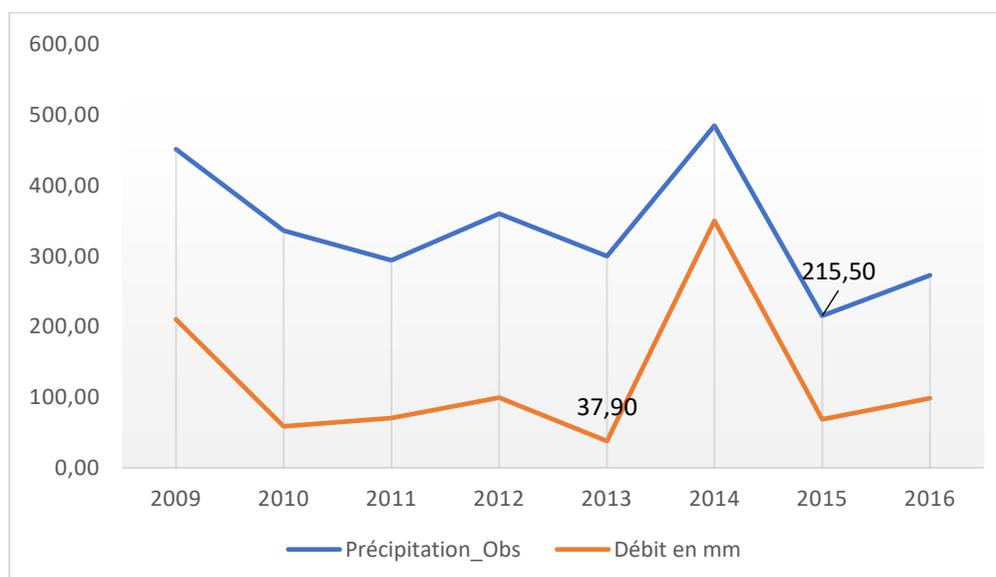


Figure 23: Variations simultanées des précipitations et débits mensuels à Sidi Rahal 2009 - 2016

Globalement le graphe des précipitations suit la même allure de débit. On remarque que l'année 2013 a connu le plus faible débit (37,90 mm) sur les 8 ans, or la valeur minimale de précipitation atteint 215,50 mm enregistrée en 2015.

D'autre part, l'année 2014 présente l'année la plus pluvieuse. Ces précipitations ont causé des débits de crue qui n'ont jamais été observés auparavant.

b) Extrait des données estimés par WAPOR :

Tableau 8 : Tableau comparatif des précipitations (WAPOR) et débit du bassin GH DAT 2009 – 2016

Année	Précipitation WAPOR	débit en m3/s	Ruissellement (mm)
2009	299,1	3,61	210,51
2010	363,7	1,01	58,78
2011	374	1,21	70,42
2012	283,7	1,71	99,51
2013	227,6	0,65	37,90
2014	355,3	6,00	350,14
2015	207	1,17	68,51
2016	331	1,69	98,52

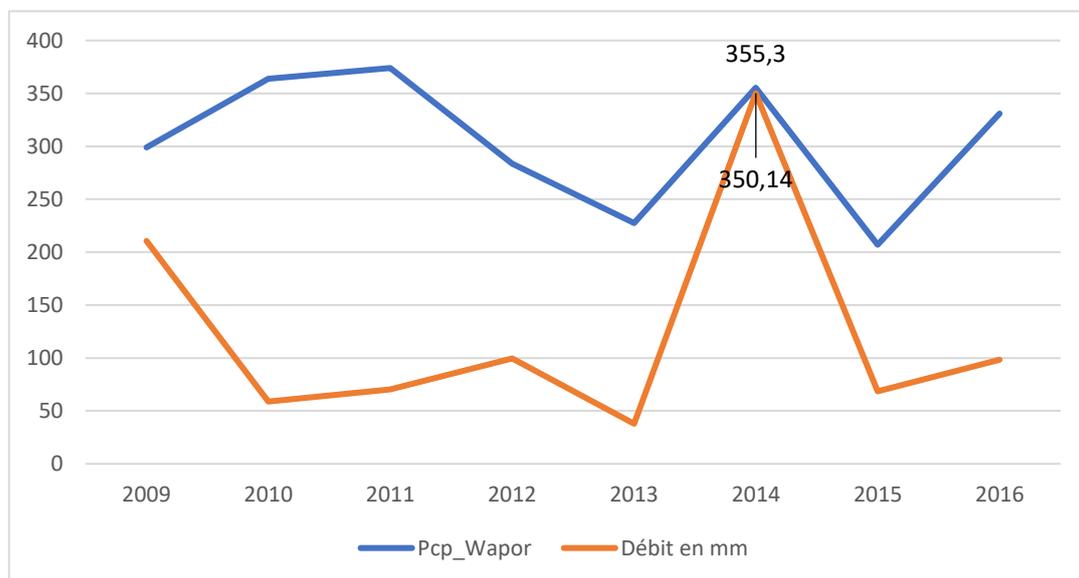


Figure 24 : Evolution comparative des pluies (WAPOR) et des débits à la Station de Sidi Rahal 2009 - 2016

- Le pic des précipitations est enregistré en 2011, or la valeur de débit enregistrée est moins importante par rapport aux autres années.
- Le débit le plus élevé est enregistré en 2014 (350,14 mm). Il correspond à une valeur de précipitation de 355,3 mm. En conséquence la valeur de l'évapotranspiration sera égale 5,16 mm par an ce qui semble absurde et peut être justifié par la différence d'échelle des deux paramètres (les mesures du débit sur l'échelle de tout le bassin versant GH DAT et les précipitations estimées uniquement l'échelle de la station aval de SIDI RAHAL) Mais également de potentielles incertitudes des estimations de la base WAPOR.

c) Analyse de la variabilité pluviométrique et débits du bassin :

Le coefficient d'écoulement c'est le rapport, exprimé en pourcentage, entre la quantité d'eau écoulée par la quantité d'eau précipitée.

Tableau 9: La variabilité pluviométrique et débits du bassin

Année	Précipitation Observé	Précipitation WAPOR	Ruissellement (mm)	Coefficient de ruissellement (Observé)	Coefficient de ruissellement (WAPOR)
2009	451,70	299,1	210,51	47%	70%
2010	336,20	363,7	58,78	17%	16%
2011	294,10	374	70,42	24%	19%
2012	360,10	283,7	99,51	28%	35%
2013	300,00	227,6	37,90	13%	17%
2014	485,10	355,3	350,14	72%	99%
2015	215,50	207	68,51	32%	33%
2016	272,80	331	98,52	36%	30%

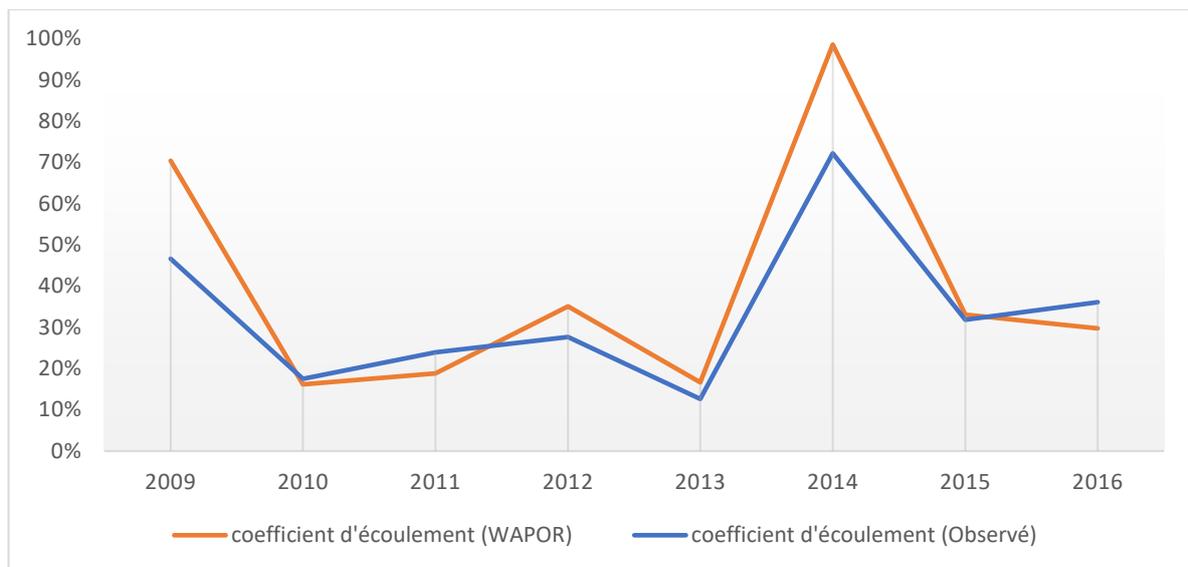


Figure 25: Variation comparative des coefficients d'écoulement annuels entre WAPOR et observé de 2009-2016

- Le coefficient d'écoulement reste approximatif, vu que l'échelle des paramètres (débits et précipitation) est différente.
- La fluctuation entre les courbes reste faible sauf l'année 2009 et 2014 où on remarque une différence assez importante qui s'élève à 30% pour l'année 2014.

3. Etude de la variabilité d'évapotranspiration :

Tableau 10: Tableau comparatif des évapotranspirations (WAPOR et observé) du bassin GHDAT 2009 – 2016

Année	Précipitation observé	Ruissellement	Evaporation observé	Evapotranspiration WAPOR
2009	451,70	210,51	241,19	210,5
2010	336,20	58,78	277,42	233,1
2011	294,10	70,42	223,68	182,3
2012	360,10	99,51	260,59	198,1
2013	300,00	37,90	262,10	171,3
2014	485,10	350,14	134,96	195,8
2015	215,50	68,51	146,99	252,8
2016	272,80	98,52	174,28	155,6

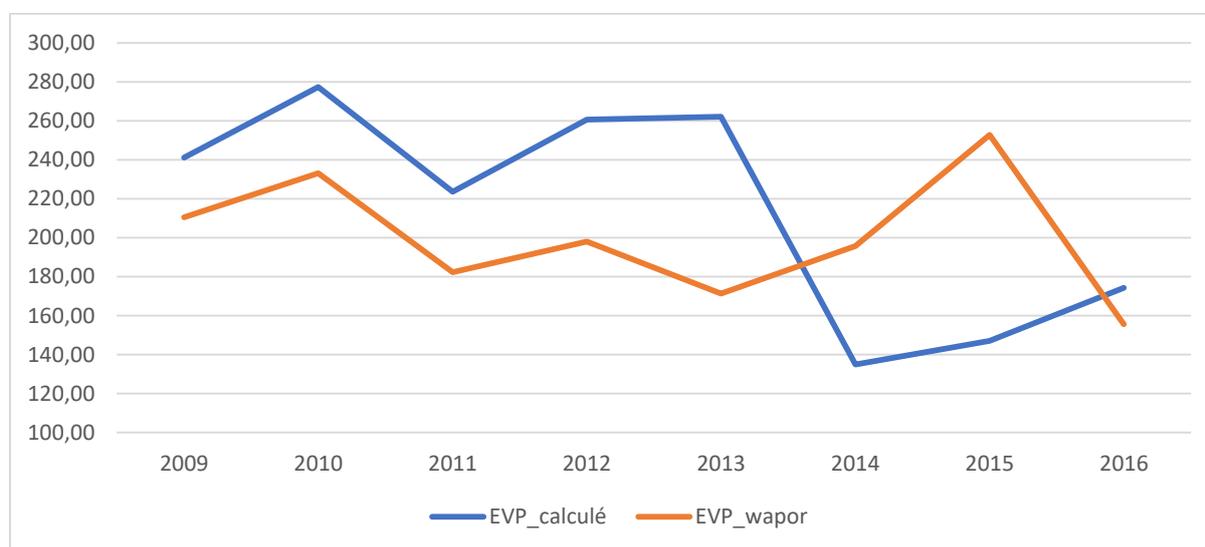


Figure 26: Variation comparative des évapotranspirations entre WAPOR et observé de 2009-2016

La formule utilisée pour le calcul de l'évapotranspiration néglige l'infiltration.

D'après la figure 26, on remarque que, pour la période 2009-2013, l'évapotranspiration calculée est supérieure à celle de WAPOR, en raison du stockage des eaux infiltrées (les débits n'étaient pas aussi forts que les pluies).

En contrepartie, à partir de 2014, on constate l'inversion d'allure des valeurs d'évapotranspiration ($EVP_{WAPOR} > EVP_{calculé}$). Ceci serait dû à la période de déstockages des eaux infiltrées, mais aussi à la sous-estimation de la pluie. Celle-ci prise au niveau de Sidi Rahal, elle ne représente pas la pluie réelle qui serait tombée sur tout le bassin.

Conclusion

Au terme de ce projet de fin d'études, nous avons élaboré une étude hydrologique du bassin versant du GH DAT. Ce travail consiste à évaluer d'une part les différentes caractéristiques de ce bassin à l'aide d'un outil de SIG et d'autre part à effectuer une étude comparative des données hydro pluviométriques mesurées à la station de SIDI RAHAL et celles issues de la plateforme WAPOR. Ceci dans l'objectif de vérifier la précision de cette plateforme et calculer le bilan hydrique du bassin.

Le bassin versant de GH DAT a une superficie et un périmètre respectivement de l'ordre de 541 km² et 144 km. Les caractéristiques physiques de ce bassin versant montrent qu'il possède une forme allongée $K_G=1,72$ avec un rectangle équivalent de 62,81 km de longueur et 8.60 km de largeur. L'analyse de la carte hypsométrique et celle des pentes donne une pente moyenne de 45,47 m/km. De plus, le site a un sol peu perméable en amont et plus perméable en aval avec un couvert végétal peu dense.

Ensuite, l'étude comparative des précipitations mesurées à la station SIDI RAHAL de 2009 à 2016 et celles issues de la plateforme WAPOR, a montré que les données de WAPOR présentent une déviation annuelle moyenne de l'ordre 34 mm (moyenne annuelle des précipitations mesurées et celles de WAPOR est respectivement de 305,2 mm et de 339,4 mm). Ce qui impacte négativement la fiabilité du bilan hydrique calculé à base de cette plateforme.

Finalement, pour notre cas d'étude, le site est caractérisé par des taux de précipitation hétérogènes sur les 8ans (2009-2016), ce qui affaiblit la précision des données issues du WAPOR.

Bibliographie

ABHT : Agence du bassin hydraulique de Tensift EL Haouz, le bassin versant de l'oued R'dat, note interne, 23 p.

AHT GROUP AG –RESING 2016 : Rapport : Diagnostic du sous bassin de Ghdat, 104p.

DARIF Oumkaltoum 2013 : Le fonctionnement hydrologique du bassin versant de R'Dat (Haut Atlas de Marrakech) et conséquences environnementales des crues de l'oued, 85p. Mémoire de fin d'études, Master eau et Environnement, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech.

HIQUI Abdessamad 2013-2015 : Mémoire de fin d'études intitulé : Les événements hydrologiques exceptionnels du Haut Atlas de Marrakech. Analyse fréquentielle, simulation et application au cas de novembre 2014, 65p.

Mohamed El Mehdi SAIDI : LE COMPLEXE BASSIN – VERSANT, 16p.

Mohamed El Mehdi SAIDI 2013 : Apport des logiciels de SIG dans la morphométrie des bassins versants (L'exemple d'ArcGIS Guide méthodologique d'utilisation). Guide méthodologique d'utilisation, 9p.

Webographies

<https://www.fao.org/in-action/teledetection-a-lappui-de-la-productivite-de-leau/aperçu/fr/>

La dernière mise à jour (24/10/2021) ;

<https://www.fao.org/in-action/teledetection-a-lappui-de-la-productivite-de-leau/productivite-de-leau-et-des-terres/fr/>

La dernière mise à jour (24/10/2021) ;

<https://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre1/chapitre1.html>

La dernière mise à jour (15/01/2022) ;

www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/BilanHydrique_1.html

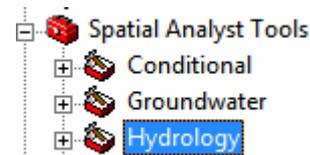
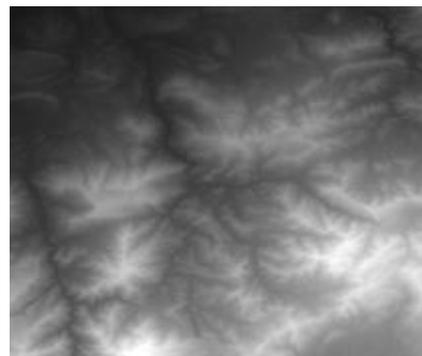
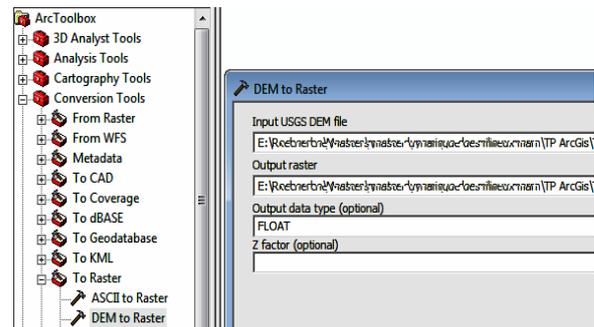
La dernière mise à jour (18/01/2022) ;

Annexe 1 :

Délimitation du bassin versant sous ArcGIS

Ouvrir ArcMap puis convertir le fichier DEM en image Raster par l'outil ArcToolbox :

- Développez ArcToolbox et allez à l'outil « Conversion Tools »
- puis à « To Raster » et enfin double-cliquez sur « DEM to Raster ».
- Renseignez le champ « Input Dem File » avec votre DEM découpée. Dans le champ « Output Raster » le logiciel spécifie le fichier raster de sortie et son emplacement. Validez par OK.
- S'il n'y a pas d'erreur, la conversion s'effectue et l'image raster grisâtre s'affiche et une couche s'ajoute dans le menu à gauche des « Layers ».
- Vérifiez que votre projection est appliquée, en apercevant les coordonnées Lambert sur la barre d'état (barre inférieure).
- L'étude hydromorphologique d'un bassin versant par ArcGis s'effectue à l'aide de l'application hydrology qui se trouve dans ArcToolBox – Spatial Analyst Tools.

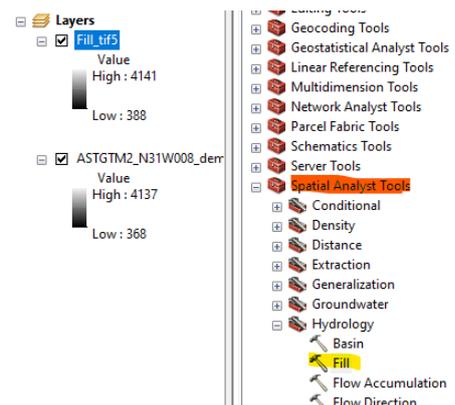


➤ La fonction Fill (Comblé les puits)

Permet de combler des cellules identifiées comme étant des points bas (Par défaut la commande recherche la plus faible valeur voisine d'altitude et l'utilise pour combler la dépression). Cette fonction s'exécute sur votre couche raster (grisâtre) établie précédemment par :

ArcToolBox – Spatial Analyst Tools hydrology – Fill

Après l'exécution de cette commande, une nouvelle couche est créée et ajoutée dans la zone des « layers ».



➤ **La fonction « Flow Direction » (Directions des écoulements)**

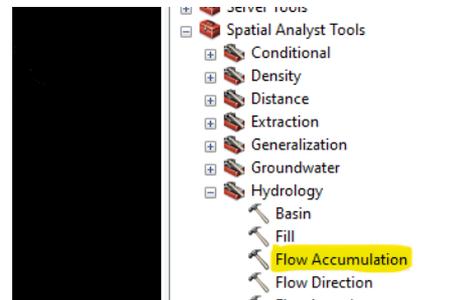
Cette commande permet d'identifier les directions des écoulements dans la carte raster MNT. Cochez la case Force flow at edge ; et dans input surface, votre carte raster à puits comblés doit être spécifiée.

En cliquant sur Ok, la fonction va créer et afficher une nouvelle couche (ici, Flow Direction1)



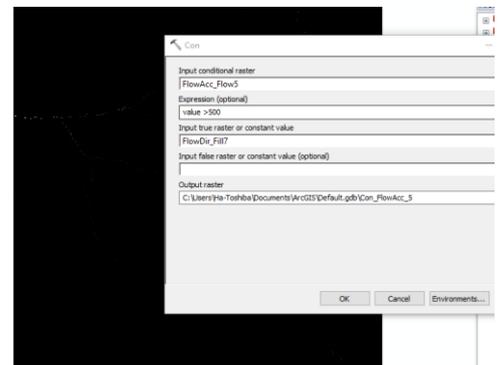
➤ **La fonction « Flow accumulation » (Accumulation des écoulements)**

Cette commande permet de calculer, pour chaque cellule, la quantité d'eau accumulée dans la cellule du fait des écoulements amont. Dans le champ Direction raster, spécifiez la couche nouvellement créée par la fonction Flow Direction. On obtient une nouvelle couche raster (exemple ici, Flow accumulation1)



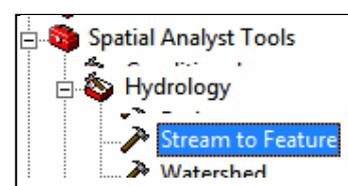
➤ **La fonction Vectorisation du réseau hydrographique**

Cette commande permet de générer une couche correspondant au réseau hydrographique. Le niveau de détail du réseau peut être défini par l'utilisateur en nombre de cellules : 200, 300, 500, 1000...etc. dans la fenêtre Expression. Ceci en y tapant value > nombre (Plus le nombre est petit, plus le détail est grand).

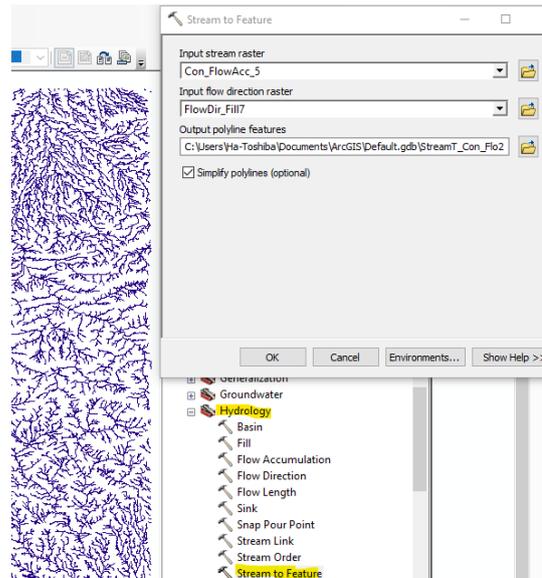


- Déroulez : ArcToolbox – Spatial Analyst Tools – Conditional – Con
- Dans le champ Input conditional raster mettez votre coche raster « Flow Accumulation », et Dans le champ Input true raster, mettez votre couche raster « Flow Direction ».
- Validez par Ok pour obtenir une nouvelle couche raster du réseau hydrographique.

Pour convertir ce réseau en shapefile linéaire :
ArcToolbox – Spatial Analyst Tools – Hydrology – Stream to Feature



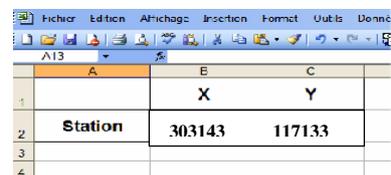
Remplissez les champs Input stream raster et Input flow direction raster respectivement par la couche raster (du réseau hydrographique) qui vient d'être créée et la couche raster « Flow Direction ». Vous obtiendrez une nouvelle couche de forme linéaire (shapefile) représentant le réseau hydrographique.



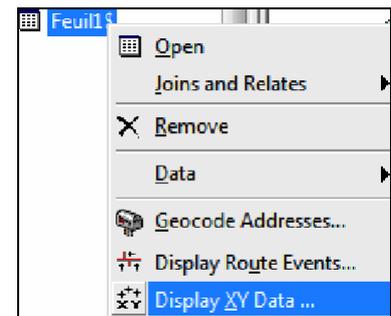
➤ Désigner un exutoire

Pour placer un exutoire particulier sur le cours d'eau et délimiter de bassin à cet exutoire :

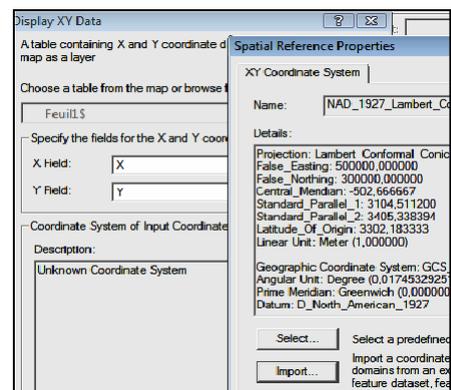
Ouvrez (éventuellement) le fichier Excel contenant les coordonnées de l'exutoire. Ceci par le bouton « Add Data » et allez chercher votre fichier Excel et désignez y votre feuille (feuille1). La couche du tableur Excel s'ouvre et se place en dessous de toutes les couches. Cliquez dessus avec le bouton droit puis Display XY Data. (Ou éventuellement Creat XY)



Remarque : Vous pouvez aussi placer directement le point sur le cours principal, par le bouton Go to XY, et tapez les coordonnées dans les deux cases X et Y.



Attribuez une projection à la nouvelle couche ponctuelle via le bouton Edit et importer (avec le bouton Import) le système de projection de l'une de vos couches (réseau hydrographique ou limite du bassin ... par exemple)
Le Shapefile ponctuel est aussitôt créé et placé (cette fois) au-dessus de toutes les couches.



- Projections d'objets ponctuels :

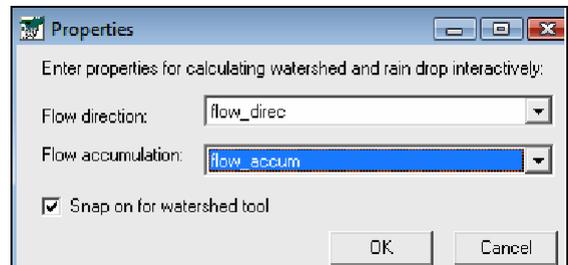
Pour projeter des stations de mesures par exemple, on procède de la même façon : Ouvrir un fichier Excel préétabli contenant ces stations et leurs coordonnées géographiques. Puis

bouton droit et choisir Display XY Data et enfin attribuez une projection à la nouvelle couche ponctuelle en l'important d'une autre couche.

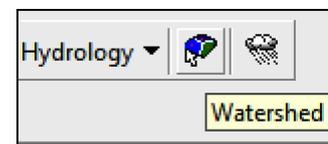
➤ La fonction Bassin versant

Pour intégrer cette fonction à ArcToolBox (rubrique Spatial Analyst Tools) :

Menu Tools – Customize – Add From file. Allez chercher votre fichier (esrihydrology_v2.dll) et cliquez sur ouvrir. La commande hydrology modeling s'ajoutera à votre ArcToolBox. Cochez-la pour l'ajouter à la barre d'outils visible d'ArcMap.

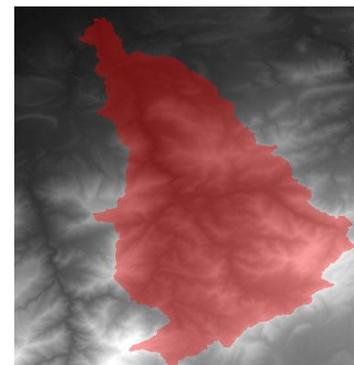


L'exutoire étant indiqué, il faut maintenant découper le bassin versant à la limite de cet exutoire. Pour cela, dans la nouvelle application ajoutée (hydrology modeling) allez à la fonction Interactive Properties... et renseignez les champs Flow direction et Flow accumulation.



Si vous validez, l'icône Watershed est activée.

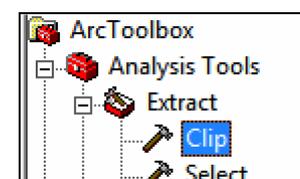
En cliquant sur cette icône bleue, le curseur se transforme en signe +. Vous pouvez alors cliquer directement sur votre exutoire. Le bassin versant fermé à cet exutoire est aussitôt affiché. Et sa couche raster est ajoutée à la table des matières. Il suffit alors la convertir en « shapefile » polygonal par : ArcToolbox - Conversion Tools - from Raster - Raster to polygon.



Une nouvelle couche de forme polygonale est créée.

Maintenant pour découper le réseau hydrographique sur la limite finale du bassin versant

ArcToolbox – Analysis Tools – Extract – Clip



Renseignez les champs Input Features et Clip Features respectivement avec la couche à découper (le réseau hydrographique) et celle qui va servir de limite de découpe (le shapefile du bassin versant).

Vous pouvez aussi désigner le répertoire de sauvegarde et le nom de la nouvelle couche. Validez enfin par OK.

Une nouvelle couche de réseau hydrographique limité au contour du bassin versant est créée. L'ancien réseau peut donc être supprimé.



Annexe 2 :

- Précipitation mensuelle :

Catégorie	Pcp_wapor (mm)	Pcp_Obs (mm)			
30/09/2009	0	71,7	30/09/2013	1	66,8
31/10/2009	23,7	21	31/10/2013	29,7	0,1
30/11/2009	13,6	12,1	30/11/2013	27,1	21,2
31/12/2009	47,7	60,1	31/12/2013	32	25,1
31/01/2010	46,6	111,2	31/01/2014	31,3	87,8
28/02/2010	93,8	79,1	28/02/2014	15,6	17,2
31/03/2010	54,1	31,2	31/03/2014	60,5	39,6
30/04/2010	35,7	4,6	30/04/2014	40,3	36,3
31/05/2010	11,8	12	31/05/2014	20,2	4,6
30/06/2010	0	11,8	30/06/2014	4,2	0,6
31/07/2010	0	10,6	31/07/2014	0	0
31/08/2010	2,8	26,3	31/08/2014	3	0,7
30/09/2010	1,2	1,6	30/09/2014	2,8	13,9
31/10/2010	32,7	67,2	31/10/2014	16,8	0,6
30/11/2010	41,7	39,5	30/11/2014	133,3	236
31/12/2010	43,3	26,9	31/12/2014	27,3	27,9
31/01/2011	20,4	11,9	31/01/2015	20,9	42,4
28/02/2011	14,2	6,5	28/02/2015	22	27,7
31/03/2011	64	64,3	31/03/2015	37,9	94,4
30/04/2011	58,6	15,7	30/04/2015	22,1	3,1
31/05/2011	68	68	31/05/2015	9	10,8
30/06/2011	6,8	22,2	30/06/2015	4,5	1,4
31/07/2011	0	0	31/07/2015	7,8	4,3
31/08/2011	3	12,4	31/08/2015	5,4	22,6
30/09/2011	0,8	0	30/09/2015	7,5	8,2
31/10/2011	31,1	40,3	31/10/2015	36,8	22,2
30/11/2011	92,8	105,5	30/11/2015	16	11,7
31/12/2011	14,3	0,2	31/12/2015	17,1	0
31/01/2012	15,7	29,3	31/01/2016	14,4	13,9
29/02/2012	12	5,3	29/02/2016	29,6	34,5
31/03/2012	63,6	38,3	31/03/2016	36,4	59,9
30/04/2012	66,3	72,4	30/04/2016	18	9,1
31/05/2012	9	0,3	31/05/2016	64,6	12,4
30/06/2012	5,7	0	30/06/2016	0	1,4
31/07/2012	0	1,5	31/07/2016	3,1	0,7
31/08/2012	2,6	1	31/08/2016	2,2	41,5
30/09/2012	3,6	56,9	30/09/2016	0	0
31/10/2012	57	73,4	31/10/2016	38,1	10,7
30/11/2012	34,1	70,8	30/11/2016	87	78,7
31/12/2012	14,1	15,1	31/12/2016	37,6	44,7
31/01/2013	16,9	22,3	31/01/2017	15,9	26,7
28/02/2013	17,2	22,3	28/02/2017	54,9	34,2
31/03/2013	69,2	53,7	31/03/2017	27,7	24,7
30/04/2013	21,5	21,6	30/04/2017	22,4	28,7
31/05/2013	10,4	11,6	31/05/2017	9,9	5,3
30/06/2013	0	0	30/06/2017	5,1	15,2
31/07/2013	0	6,7	31/07/2017	0	0
31/08/2013	2,6	5,7	31/08/2017	1,9	3,9

- Débit mensuelle :

Catégorie	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
2009	5,24	1,87	0,03	2,43	7,34	12,32	12,31	0,02	0,02	0,02	0,07	1,65
2010	0,16	5,34	0,33	1,22	0,03	0,01	0,10	0,37	2,15	1,00	0,01	1,38
2011	0,99	1,63	5,45	0,43	0,43	0,06	0,72	4,72	0,02	0,02	0,02	0,01
2012	0,39	1,07	5,74	3,94	1,15	0,36	2,65	5,10	0,04	0,02	0,01	0,01
2013	1,27	0,01	0	0,01	1,21	3,36	0,58	1,32	0,01	0,01	0,01	0,01
2014	0,83	0,01	22,00	17,00	11,99	2,54	9,75	6,06	0,91	0,52	0,40	0,03
2015	0,07	0,03	0,02	0,01	0,01	2,01	5,70	1,81	3,23	0,07	0,33	0,81
2016	0,59	0,50	3,82	6,13	0,25	3,39	1,36	0,75	0,48	1,48	0,62	0,91