

Hydrologie des bassins versants du Haut Atlas marocain.

L. HANICH¹, V. SIMONEAUX², G. BOULET ET AG. CHEHBOUNI²

(1) Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech, Marocain, BP. 549, Av. A. Khattabi, 40 000, Marrakech, Maroc, hanich@fstg-marrakech.ac.ma

(2) Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO), 18, av. Edouard Belin 31401 Toulouse cedex 9, France

Toute la région de Marrakech est située dans un contexte climatique aride à semi aride. La quantité de l'eau disponible est faible et variable dans l'espace et dans le temps. En plus de la rareté de l'eau et de son inégale répartition, due à l'effet des changements climatiques observée à l'échelle planétaire, la région est soumise à une demande croissante en eau. Dans ce contexte, la gestion rationnelle et rigoureuse des ressources en eau revêt une importance primordiale pour le développement durable de la région, et notamment pour mettre en valeur le potentiel des terres irriguées en plaine et éviter que la pénurie d'eau ne soit une entrave au développement socio-économique.

La partie Sud du bassin de Tensift, le Haut Atlas, est caractérisée par des altitudes élevées pouvant dépasser 4000 mètres. A l'opposé la partie Nord est occupée par la plaine du Haouz dont l'altitude est voisine de 500 m. Les précipitations en montagne sont comprises entre 300 et 900 mm, alors que dans la plaine elles sont comprises entre 150 et 300 mm. Inversement, le besoin en eau est nettement supérieure dans la plaine où les températures sont plus élevées et la végétation plus importantes. Ces deux effets combinés font que l'on peut à juste titre considérer le Haut Atlas comme le château d'eau de la plaine du Haouz. Le transfert d'eau entre ces deux compartiments se fait par le captage des seguias à la sortie des oueds de montagne, la retenue d'eau dans de grands barrages, ainsi que par l'infiltration des oueds vers la nappe phréatique.

L'objectif de cette étude est de qualifier les bassins versants du Haut Atlas marocain et de quantifier leur apport d'eau à la nappe Plio-quadernaire de la plaine du Haouz. Les oueds, associés à leurs bassins versants, N'Fis, Rhéraya, Ourika, Zat et R'Dat, assurent quasiment la totalité de la recharge de cette nappe. Pour mener à terme cette étude, nous avons utilisé un système d'information géographique, afin d'obtenir toutes les caractéristiques géographiques et physiographiques de chaque bassin versant. Suite à cela, nous nous sommes intéressés aux données hydropluviométriques sur une durée de 30 ans (précipitations et débits) des exutoires associés aux cinq bassins versants que nous avons traités à différents pas de temps afin d'étudier la relation pluie-débit et de qualifier l'influence de la fonte des neiges sur les débits. Nous avons découvert que la participation de la fonte des neiges sur les débits, assurant la pérennité de l'écoulement toute l'année, se produit dans les bassins Rhéraya, Ourika et Zat alors que dans les deux autres bassins versants, le débit dépend essentiellement de la pluie. Ceci a été confirmé par l'étude de la dynamique de la couverture neigeuse du Haut Atlas par télédétection. Le volume d'eau apporté à la nappe de la plaine du Haouz est de près de 500 millions de m³/an. La contribution de chaque bassin versant dans ce volume est de 26,5 % pour le bassin versant de l'oued N'Fis, 9,2 % pour le bassin versant de Rhéraya, 32,7 % pour le bassin versant de Ourika, 18,7 % pour le bassin versant de Zat et 12,8 % pour le bassin versant de R'Dat.

Mots clés : Haut Atlas, Hydrologie, recharge de nappe, Maroc

Abstract: The aim of this study is to qualify the watersheds of the High Moroccan Atlas and to quantify their contribution to the recharge of Plio-quaternary groundwater of the Haouz plain. The wadis, associated with these watersheds, N'Fis, Rhéraya, Ourika, Zat and R'Dat, ensures almost the totality of the recharge. To undertake this study in the long term, we used a geographical information system, in order to obtain all the geographical and physiographical characteristics of each catchment area. Following that, we were interested in the hydropluviometric data (precipitations and flows) of the discharge system associated with the five watersheds, which we treated with various steps of time in order to study the relation rain-flow and to qualify the influence of the snowmelt on the flows. We discovered that the participation of the snow melt on the flows, ensuring the perennality of the flow all the year, occurs in Rhéraya, Ourika and Zat watersheds whereas in the two other, the flow depends primarily on the rain. The volume of water brought to the groundwater of the Haouz plain is of almost 500 million m³/year. The contribution of each area catchment in this volume is 26,5 % for the N'Fis watershed, 9,2 % for the Rhéraya watershed, 32,7 % for the Ourika watershed, 18,7 % for the Zat watershed and 12,8 % for the R' Dat watershed.

Key words: High Atlas, Hydrology, recharge, Morocco

INTRODUCTION

Toute la région de Marrakech, objet de ce travail, est située dans un contexte climatique aride à semi aride. La quantité de l'eau disponible est faible et variable dans l'espace et dans le temps. En plus de la rareté de l'eau et de son inégale répartition la région est soumise à une demande croissante en eau. Dans ce contexte, la gestion rationnelle et rigoureuse des ressources en eau revêt une importance primordiale pour le développement durable de la région, et notamment pour mettre en valeur le potentiel des terres irriguées en plaine et éviter que la pénurie d'eau ne soit une entrave au développement socio-économique.

La partie Sud du bassin de Tensift, le Haut Atlas (Fig. 1), est caractérisée par des altitudes élevées pouvant dépasser 4000 mètres. A l'opposé la partie Nord est occupée par la plaine du Haouz dont l'altitude est voisine de 500 m. Les précipitations en montagne sont comprises entre 300 et 900 mm, alors que dans la plaine elles sont comprises entre 150 et 300 mm. Inversement, le besoin en eau est nettement supérieure dans la plaine où les températures sont plus élevées et la végétation plus importantes. Ces deux effets combinés font que l'on peut à juste titre considérer l'Atlas comme le château d'eau de la plaine du Haouz. Le transfert d'eau entre ces deux compartiments se fait par le captage des seguias à la sortie des oueds de montagne, la retenue d'eau dans de grands barrages, ainsi que par l'infiltration des oueds vers la nappe phréatique.

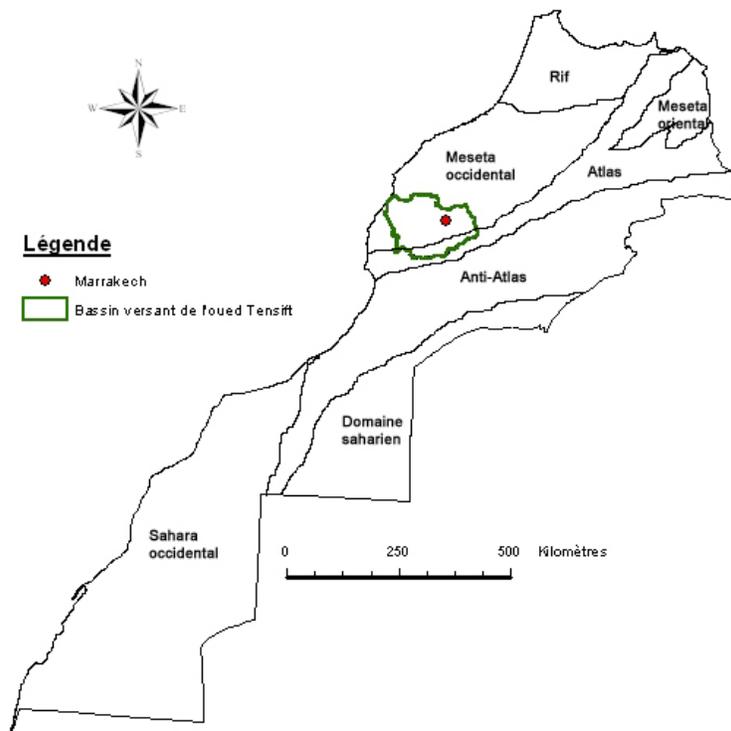


Figure 1 : Carte de situation du bassin versant de Tensift

Le présent travail a pour but de qualifier et de quantifier le principal apport d'eau de la nappe Plio-quaternaire de la plaine du Haouz. Cinq oueds du Haut Atlas assurent quasiment la totalité de la recharge de cette nappe. Ces oueds, associées à leurs bassins versants respectifs, sont d'Ouest en Est (Fig. 2) : l'oued N'Fis ayant comme exutoire Iguir N'Kouris, l'oued Rhéraya ayant comme exutoire Tahanout, l'oued Ourika ayant comme exutoire Aghbalou, l'oued Zat ayant comme exutoire Taferiat et l'oued R'Dat ayant comme exutoire Sidi Rahal. Nous aborderons la présentation des caractéristiques physiographiques des cinq bassins versants étudiés afin de mieux comprendre les processus

hydrologiques, le traitement et l'analyse des données hydropluviométriques, à différents pas de temps afin de confirmer l'influence de la couverture neigeuse sur l'écoulement et de quantifier l'apport d'eau à la nappe phréatique du Haouz.

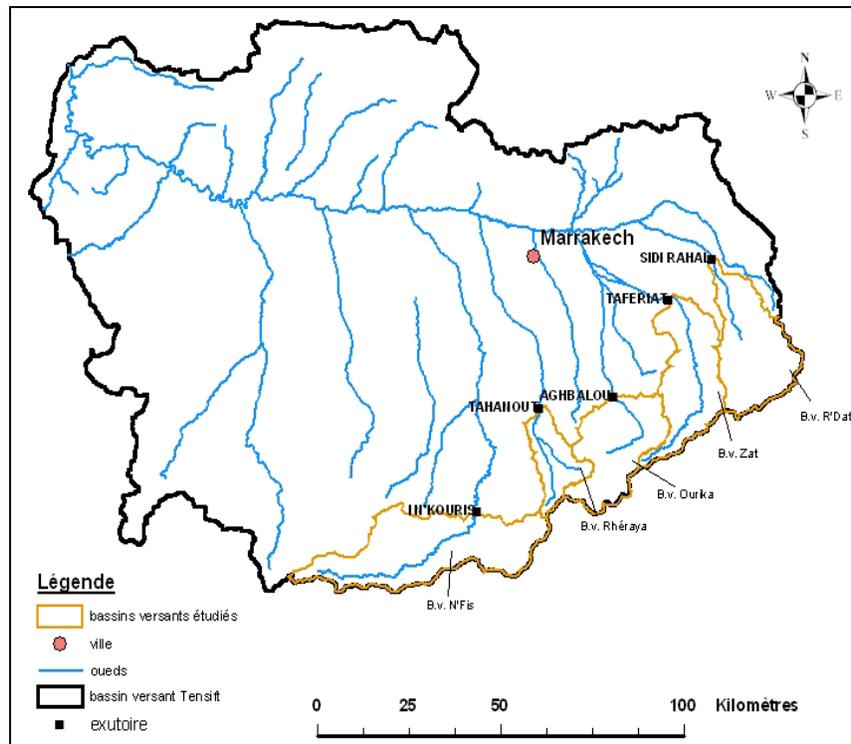


Figure 2 : Situation géographique des bassins versant étudiés

CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES DES BASSINS VERSANTS

Nous allons analyser les principales caractéristiques morphométriques et hydrographiques des bassins versants de N'Fis, Rhéraya, Ourika, Zat et R'Dat. Ces informations essentiellement descriptives, nous paraissent indispensables pour la compréhension du fonctionnement de ces bassins. Les caractéristiques physiographiques utilisées sont le périmètre, la surface, les altitudes, les pentes, l'indice de compacité, la longueur et la largeur du rectangle équivalent, la longueur du cours d'eau principal et la longueur totale du réseau hydrographique.

Le tableau 1 nous permet de constater que :

- les bassins versants des oueds N'Fis, Rhéraya et Ourika ont des altitudes élevées (altitude moyenne au dessus de 2150 m) et des pentes importantes (pente moyenne de l'ordre de 20 %) laissant présager une fortes érosion et un relief très accentué. Les précipitations devraient être solide sur les hauteurs impliquant un écoulement plus important lors de la fonte des neiges.

- Les bassins versants des oueds Zat et R'Dat sont plus bas en altitudes (altitude moyenne autour de 1500 m avec des minima en dessous des 1000 m) et ont des pentes moyennes moins importantes (de l'ordre de 14-15 %). Le régime des précipitations devrait être moins perturbé par la fonte des neiges que les bassins versants précédents.

-Les bassins N'Fis, Rhéraya, Ourika et Zat ont des densités de drainage supérieures à 3 tandis que le bassin versant R'Dat a une densité de drainage de 2,5. Par conséquent l'érosion devrait y être moins importante que sur les autres bassins.

La différence entre ces bassins se fait donc, essentiellement, au niveau des reliefs et des pentes. Les bassins versants les plus hauts en altitude devraient délivrer plus d'eau à l'exutoire que les deux plus bas.

	Périmètre (P) en km	Surface (A) en km ²	Altitude max. en m	Altitude moy. en m	Altitude min. en m	Pente max. (en %)	Pente moy. (en %)	Pente min. (en %)
N'Fis	187,1	823,8	4088	2202,1	1115	62,5	19,3	0,1
Rheraya	81,3	225,3	4098	2165,8	1068	45,9	19,1	0
Ourika	117,1	502,6	3996	2444,5	1018	46,4	19,9	0,14
Zat	134,9	525,9	3847	1831,7	794	45,7	15,5	0
R'Dat	122,2	552	3476	1718,7	722	39,4	13,8	0
	Indice de compacité Kg	Longueur du rectangle équivalent (en km)	Largeur du rectangle équivalent (en km)	longueur totale des cours d'eau (km)	LOG (longueur du cours d'eau principale) (en km)	Dd (densité de drainage) (en km-1)	Ecart type des pentes	Ecart type des altitudes
N'Fis	1,8	83,7	9,8	2887,2	67,9	3,5	7,9	508,4
Rheraya	1,5	34,0	6,6	865,4	45,6	3,8	9,1	705,6
Ourika	1,5	48,1	10,4	1550,6	26,2	3,1	8,7	540,6
Zat	1,6	58,5	9,0	1663,5	61,1	3,2	9,7	666,3
R'Dat	1,5	50,1	11,0	1374,8	27,9	2,5	7,7	664,9

Tableau 1 : Comparaison des caractéristiques physiographiques des cinq bassins versants

Les caractéristiques physiographiques permettent de calculer le temps de concentration de l'eau écoulée dans le bassin versant par la relation de Giandoht (Rmich et Hafoud ; 2004) (Tableau 2). Le temps de concentration représente le temps maximal nécessaire au ruissellement en provenance du point le plus lointain du bassin pour atteindre l'exutoire. Ce temps de concentration est très important pour l'alerte d'un risque de crue dans un bassin versant. Nous pouvons constater, dans ce tableau, que les bassins versants réagissant le plus vite à de fortes précipitations sont les bassins de l'Ourika et de Rhéraya avec des temps de concentrations de 5h20min et de 4h11min. Les crues, dans ces bassins versants, seront plus dangereuses que dans les autres bassins versants, où les temps de concentrations sont plus élevés, impliquant la mise en place d'un réseau d'alerte des crues efficace dans ces deux bassins.

	Iguir N'Kouris N'Fis	Tahanout Rhéraya	Aghbalou Ourika	Taferiat Zat	Sidi Rahal R'Dat
Surface bassin versant (km ²)	823,8	225,3	502,6	525,9	552
Longueur rectangle équivalent (km)	83,7	34	48,1	58,5	50,1
Altitude de l'exutoire (m)	1131	1068	1018	722	794
Altitude moyenne (m)	2202,1	2165,8	2444,5	1831,7	1718,7
Temps de concentration (heure)	9,18	4,19	5,36	6,73	6,95
	9h10min	4h11min	5h20min	6h44min	7h

Tableau 2 : Temps de concentration des différents bassins versants

TRAITEMENT DES DONNEES HYDROPLUVIOMETRIQUES

Les données hydropluviométriques utilisées correspondent à ceux des cinq stations hydrologiques localisées aux exutoires de chaque bassin versant. Pour l'analyse de ces données, il a été choisi de travailler à différents pas de temps pour établir des comparaisons à l'échelle mensuelle, saisonnière et annuelle des précipitations et des débits.

Précipitations dans les cinq bassins versants

Précipitation mensuelle

Les précipitations mensuelles aux cinq stations ont été obtenues par le calcul de la moyenne arithmétique des données journalières de chaque mois. Les périodes analysées sont de trente ans environ saufs pour la station de Tafériat où la période n'est que de 20 ans. Le tableau 3 montre les précipitations mois par mois ainsi que les moyennes mensuelles à chaque station. Nous pouvons voir que les mois les plus pluvieux sont d'octobre à mars et que les mois les plus secs sont de juin à septembre. La station la plus arrosée est celle de Aghbalou. La station la moins arrosée est celle de Iguir N'Kouris. Le mois le plus arrosé est mars pour les stations de Tafériat et d'Iguir N'Kouris tandis que pour les autres stations c'est le mois d'avril. Le mois le moins arrosé pour les cinq stations est juillet. Nous pouvons constater que la répartition mensuelle des précipitations est identique pour les stations de Tahanout et d'Aghbalou avec une augmentation des précipitations de septembre à novembre, puis diminution en décembre, augmentation jusqu'en avril et diminution jusqu'au mois de juillet avec une légère augmentation au mois d'août. A Iguir N'Kouris, les précipitations augmentent de septembre à octobre, diminuent en novembre, augmentent jusqu'au mois de janvier, diminuent en septembre, augmentent en mars puis diminuent jusqu'au mois de juillet avec une légère augmentation au mois d'août. Aux stations de Tafériat et de Sidi Rahal, les précipitations augmentent du mois de septembre à novembre, diminuent en décembre, augmentent en janvier, diminuent en février, augmentent en mars et avril, puis diminuent jusqu'au mois de juillet avec une légère augmentation au mois d'août. La répartition des précipitations est unimodale (pic au mois de mars ou avril) sauf à Aghbalou où elle est bimodale (pics en janvier et avril).

		S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A	Moyenne
Aghbalou	1968 à 2004	16,7	47,4	55,4	46,3	63,6	65,2	86,3	87,6	49,3	15,0	3,2	6,3	45,2
Taferiat	1982 à 2003	10,7	36,5	50,3	47,2	53,4	46,9	55,2	41,2	24,4	9,3	1,6	5,7	31,9
Iguir N'Kouris	1973 à 2004	9,5	26,0	23,5	27,8	30,6	27,1	35,6	19,8	7,7	2,7	2,5	6,1	18,3
Sidi Rahal	1967 à 2003	9,5	33,0	42,4	35,6	47,4	42,0	49,6	50,0	24,1	8,1	3,0	5,9	29,2
Tahanout	1970 à 2003	12,5	33,3	36,7	31,9	43,4	50,1	54,4	56,7	28,7	12,8	3,0	4,6	30,7

Tableau 3 : tableau des moyennes mensuelles des cinq stations

Précipitation saisonnière

Les précipitations saisonnières ont été calculées à partir des données mensuelles. Les précipitations d'automne sont la somme des mois de septembre, octobre et novembre. Les précipitations en hiver sont la somme des précipitations des mois de décembre, janvier et février. Les précipitations du printemps sont la somme des précipitations des mois de mars, avril et mai. Les précipitations d'été sont la somme

des précipitations des mois de juin, juillet et août. La figure 3 montre la répartition saisonnière des précipitations aux cinq stations. Nous pouvons constater que les précipitations sont plus abondantes au printemps pour les stations d'Aghbalou et de Tahanout et en hiver pour les autres. La saison la plus sèche est l'été avec des précipitations de 15 à 30 mm.

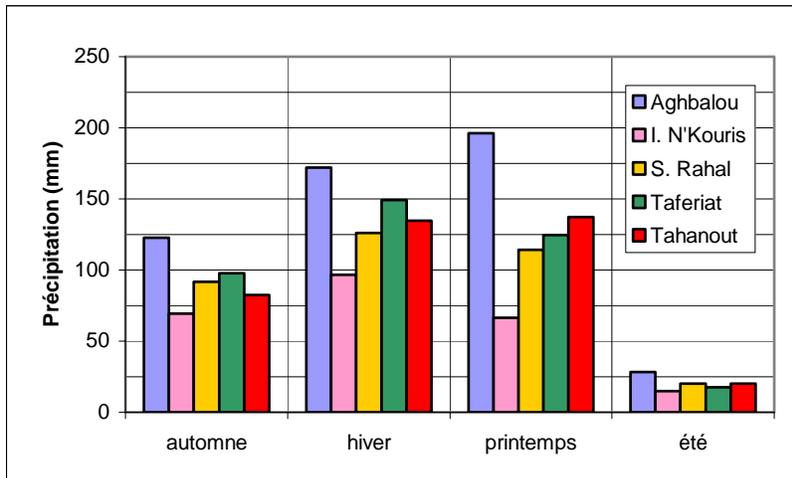


Figure 3 : Variation saisonnière comparative des précipitations aux cinq stations de 1983/84 à 2002/03

Précipitation annuelle

Les précipitations moyennes annuelles ont été obtenues par sommation des moyennes mensuelles de chaque année pour chaque bassin versant. Les histogrammes de la figure 4 montrent l'évolution annuelle des précipitations. Nous pouvons voir que, dans la période de 1983 à 2003, deux années ont été exceptionnellement pluvieuses. Ce sont les années 1988/89 et 1995/96. Les cinq stations ont enregistré, pendant ces années, de fortes précipitations à plus de 400mm d'eau. Deux années ont été particulièrement sèches, sauf à Aghbalou où les précipitations n'ont jamais été inférieures à 276,9 mm, ce sont les années 1992/93 et 2000/01 avec des précipitations inférieurs à 250 mm.

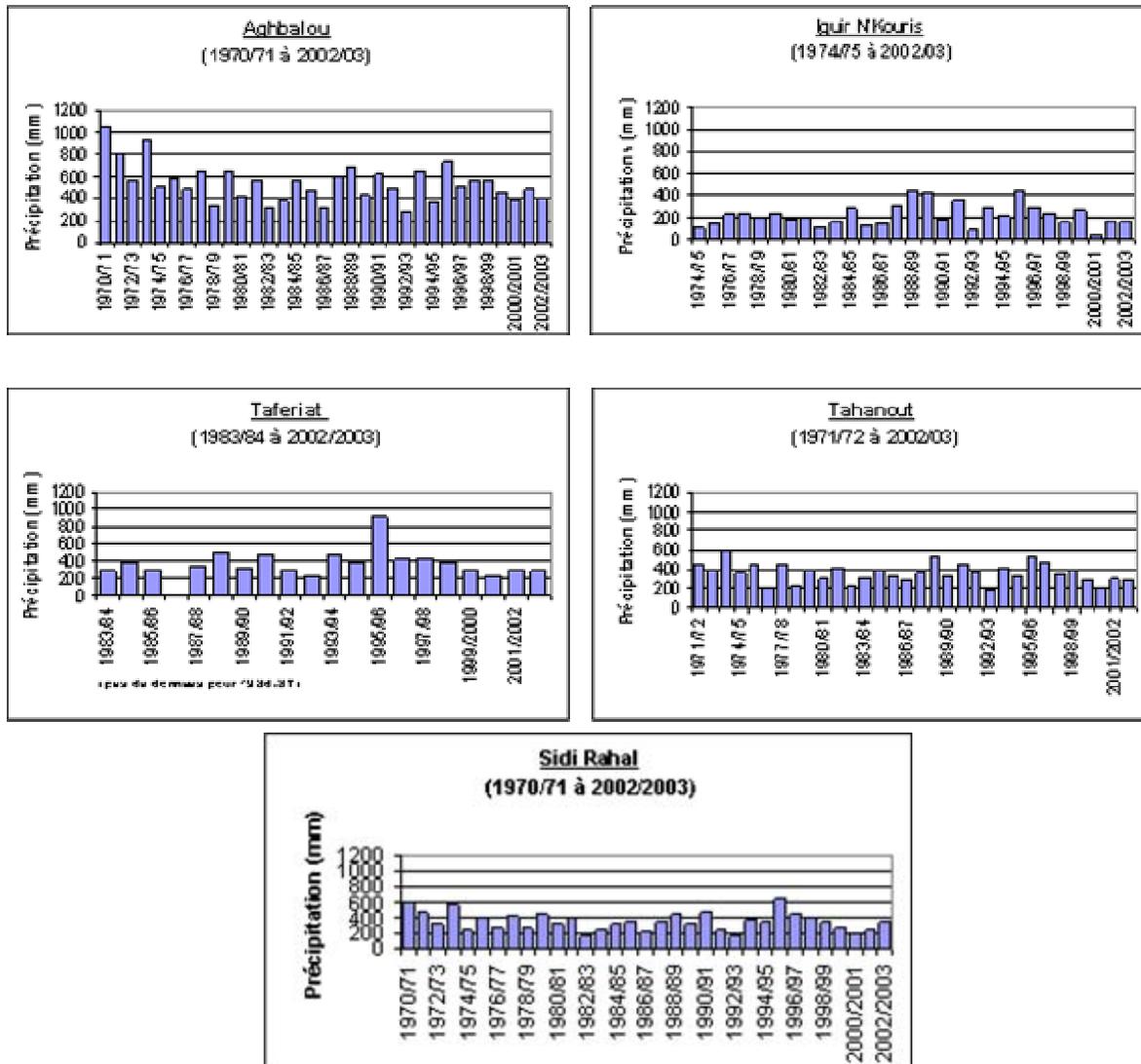


Figure 4 : Précipitation moyenne annuelle aux cinq stations

Débits à l'exutoire des cinq bassins versants

Débits mensuels

Les débits moyens mensuels aux cinq stations ont été obtenus par le calcul de la moyenne arithmétique des données des débits mensuels de chaque année. La période d'études a été définie afin de prendre en compte le maximum de données compatible sur les cinq stations. Cette période s'étend de 1974/75 à 2002/03. Le graphique de la figure 5 présente la variation de débits tout au long de l'année. Pour les cinq stations, nous constatons une légère augmentation de débit de septembre à février. Pour Iguir N'Kouris, l'augmentation est plus brutale de septembre à décembre où le débit passe de 0,42 à 6,58 m³/s. Le débit maximum, pour les stations de Iguir N'Kouris (8,54 m³/s) et Sidi Rahal (5,39 m³/s), est atteint au mois de mars. Le débit maximum, aux stations de Taferiat (6,62 m³/s) et Aghbalou (14,22 m³/s), est atteint en avril. Il est atteint en mai à Tahanaout avec 6,62 m³/s. Le régime d'écoulement diminue ensuite pour reprendre un régime inférieur à 1,5 m³/s au mois de juillet et août. Nous pouvons dire que le bassin versant N'Fis, du fait de sa superficie plus grande que les autres bassins versants, reçoit pendant les mois d'octobre à février une grande quantité d'eau, expliquant ainsi la forte augmentation du débit pendant cette période non visible dans les autres bassins versants ayant une superficie moindre. Le décalage du pic de débits dans les différents bassins versants peut être expliqué

par la morphologie des bassins versants. En effet, nous pouvons constater que les pics interviennent aux mois d'avril à mai dans les bassins versants d'Aghbalou, de Tahanout et de Taferiat. Les tranches d'altitudes supérieures à 3000 m sont plus importantes dans ces trois bassins versants que dans les bassins de N'Fis et de R'Dat. L'apport en précipitations solides (neige) est donc plus importantes dans les bassins versants Ourika, Rhéraya et Zat que dans les deux autres et par conséquent la fonte des neige (et donc l'apport d'eau) sera supérieur aux mois d'avril et mai dans ces trois bassins.

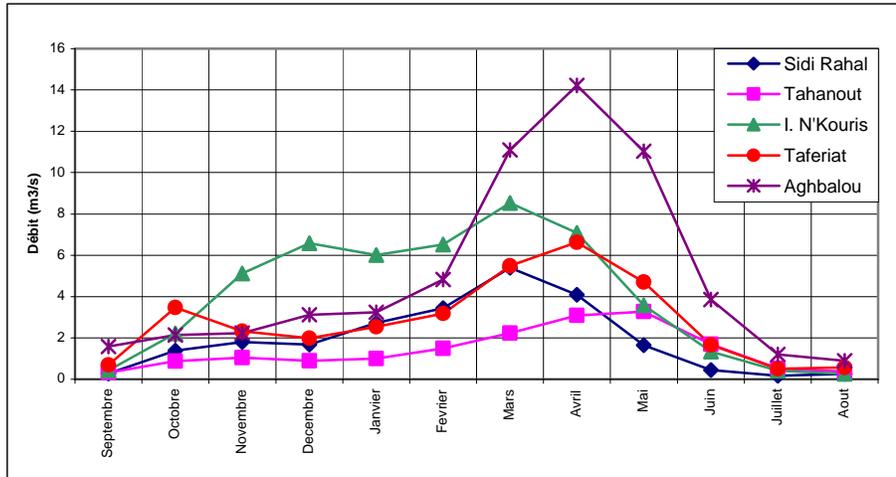


Figure 5 : Débit moyen mensuel aux cinq stations de 1974 à 2003 en m³/s

Débits saisonniers

Les débits saisonniers ont été calculés à partir des données mensuelles. La période prise en compte pour le calcul des moyennes saisonnières est de 1974/75 à 2002/03. La figure 6 présente la variation saisonnière des débits aux cinq stations étudiées. Nous constatons trois régimes différents à l'exutoire. Le premier est une augmentation lente de l'automne à l'hiver, puis plus forte de l'hiver au printemps. La chute de débits intervient entre le printemps et l'été. Les stations concernées par ce régime d'écoulement sont Tahanout, Taferiat et Aghbalou. Le deuxième régime est une augmentation constante de l'automne au printemps avec une diminution du printemps à l'été. La station concernée par ce régime d'écoulement est Sidi Rahal. Le troisième régime se traduit par une forte augmentation de débit de l'automne à l'hiver. Le débit reste à peu près constant durant l'hiver et le printemps (environ 19 m³/s) puis diminue fortement entre le printemps et l'été. La station concernée par ce régime d'écoulement est Iguir N'Kouris.

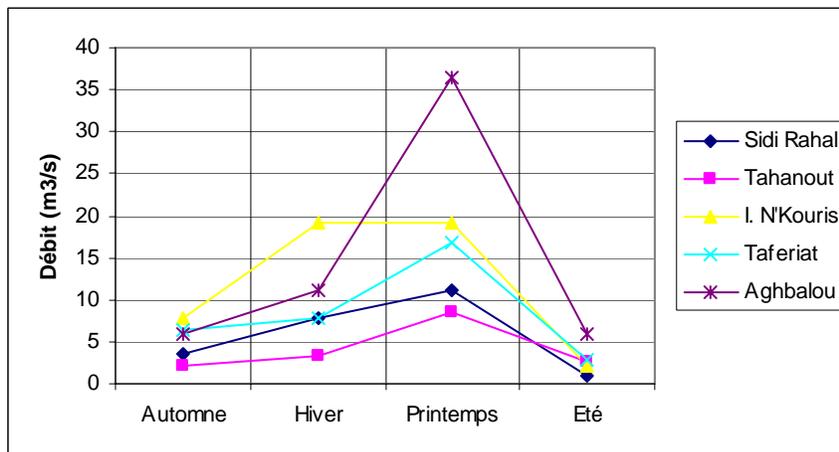


Figure 6 : Débits moyens saisonniers de 1974 à 2003 en m³/s

Débites annuels

La figure 7 présente les débits moyens annuels aux exutoires des bassins versants. Les mesures ont été prises pendant la période de 1974/75 à 2002/03. Sur ce graphique nous constatons que plusieurs années sont marquées par de forts débits sur les cinq stations comme les années 1991/92, 1993/94, 1995/96 et 1999/00. Les années à faibles débits sont 1982/83 et 2000/01. Ces années particulières sont visibles sur les cinq stations mais les réponses à l'exutoire sont différentes. Les réponses de débits aux exutoires de Tahanout, Taferiat et Sidi Rahal sont quasiment identiques dans le temps et en intensité. Au contraire, la station d'Aghbalou enregistre des intensités importantes dans les débits pour les années 1979/80, de 1989/90 à 1991/92 et 1993/94. La station d'Iguir N'Kouris enregistre des pics de débits importants pour les années de 1977/78 à 1978/79, de 1987/88 à 1989/90, en 1991/92 et de 1995/96 à 1997/98.

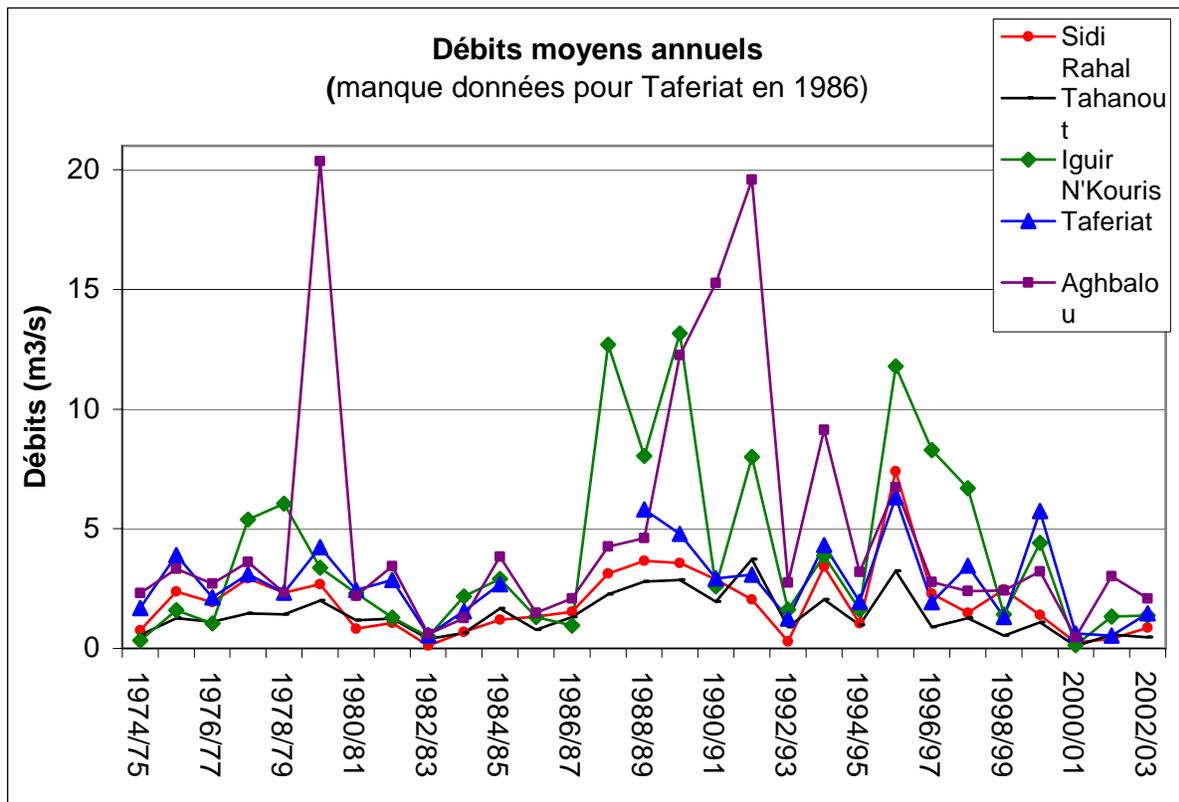


Figure 7 : Débits moyens annuels aux cinq stations

CORRELATION PLUIE-DEBIT

Ce paragraphe a pour but de mettre en évidence la contribution de la pluie et de la neige sur les débits à l'exutoire et de comprendre les mécanismes hydrologiques. Nous allons étudier les interactions entre la pluie et le débit à des pas de temps annuel et mensuel.

Corrélation entre les précipitations et les débits moyens annuels

La figure 8 montre le lien existant entre les précipitations et les débits moyens annuels aux cinq stations. Nous pouvons remarquer que deux stations ont des coefficients de corrélation proche de 1. Pour les stations d'Iguir N'Kouris ($R = 0,85$ pour N'Fis) et de Sidi Rahal ($R = 0,84$ pour R'Dat), les

précipitations sont étroitement liées aux débits. Aux stations de Tahanout, d'Aghbalou et de Taferiat, les coefficients sont respectivement de 0,57, 0,42 et de 0,61. Ces coefficients sont assez faibles. Ce qui peu être mis en relation avec la couverture neigeuse provoquant un décalage dans le temps entre les précipitations et l'écoulement à l'exutoire pendant la fonte des neiges. Les deux bassins versants à l'Est et à l'Ouest (R'Dat et N'Fis), de la zone d'étude, recevraient moins de neige et par conséquent l'écoulement proviendrait quasiment de la pluie. La neige provoquerait un stockage de l'eau déferant l'écoulement sur une plus grande période dans les trois bassins versants au centre de la zone d'étude (Rhéraya, Ourika et Zat).

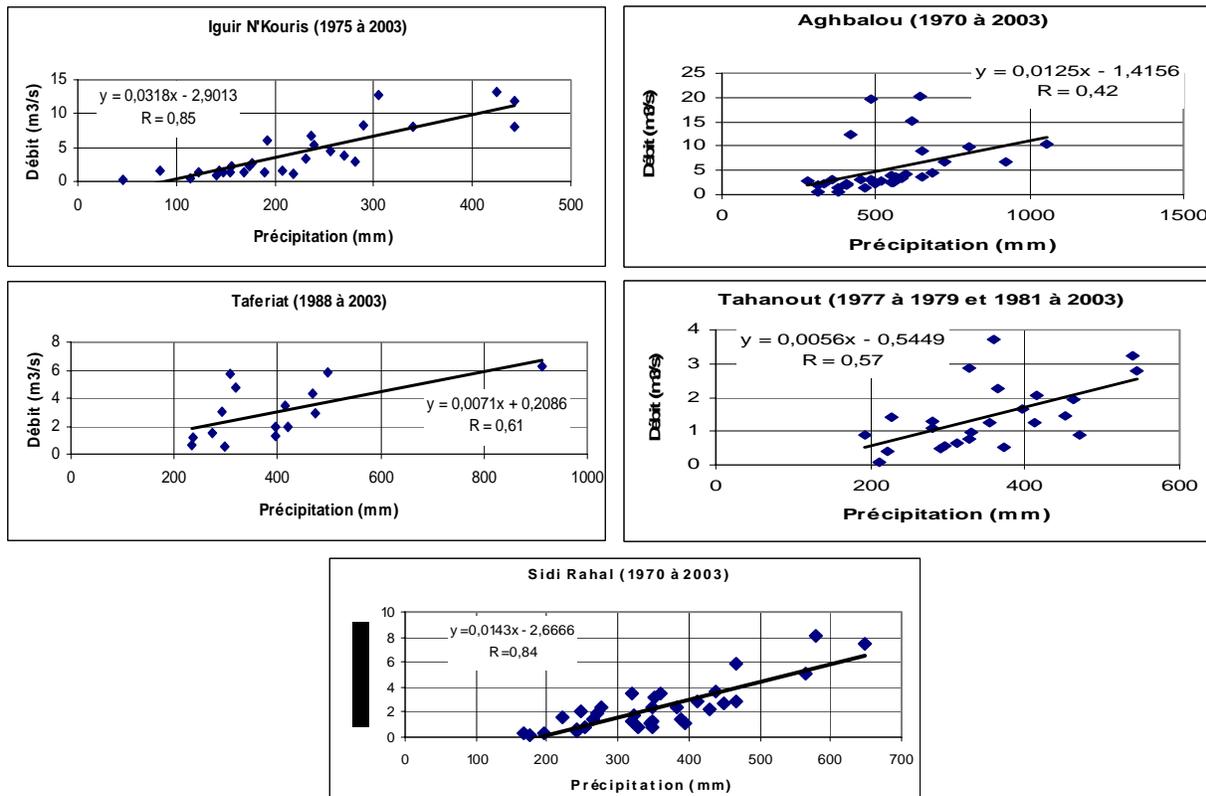


Figure 8 : Graphiques de corrélation entre les précipitations et les débits annuels

Corrélation entre les précipitations et les débits moyens mensuels

La figure 9 montre le lien existant entre les précipitations et les débits moyens mensuels particuliers aux cinq stations. Nous pouvons remarquer que deux stations ont des coefficients de corrélation relativement bon. Pour les stations d'Iguir N'Kouris ($R = 0,63$ pour N'Fis) et de Sidi Rahal ($R = 0,61$ pour R'Dat). Nous pouvons donc dire que les précipitations sont étroitement liées aux débits. Aux stations de Tahanout, d'Aghbalou et de Taferiat, les coefficients sont faibles et sont respectivement de 0,36, 0,26 et de 0,37. Les nuages de point, aux stations de Tahanout et d'Aghbalou, montrent que les débits importants correspondent, pour une bonne partie d'entre eux, à des précipitations faibles. Ceci implique une contribution importante de la couverture neigeuse dans les deux bassins versants associés. Aux stations de Sidi Rahal et d'Iguir N'Kouris, les débits et les précipitations augmentent avec des coefficients de corrélation assez élevés. Ceci indiquerait que la contribution de la neige est relativement faible par rapport aux pluies sur l'écoulement à l'exutoire des bassins versants R'Dat et N'Fis. Pour la station de Taferiat, les débits croient avec les précipitations sauf pour un point correspondant soit à une erreur de mesure soit à une crue faisant diminuer le coefficient de corrélation de manière significative. La quasi-totalité des faibles précipitations sont liées à des faibles débits. Ceci indiquerait que la neige à peu d'influence sur les écoulements.

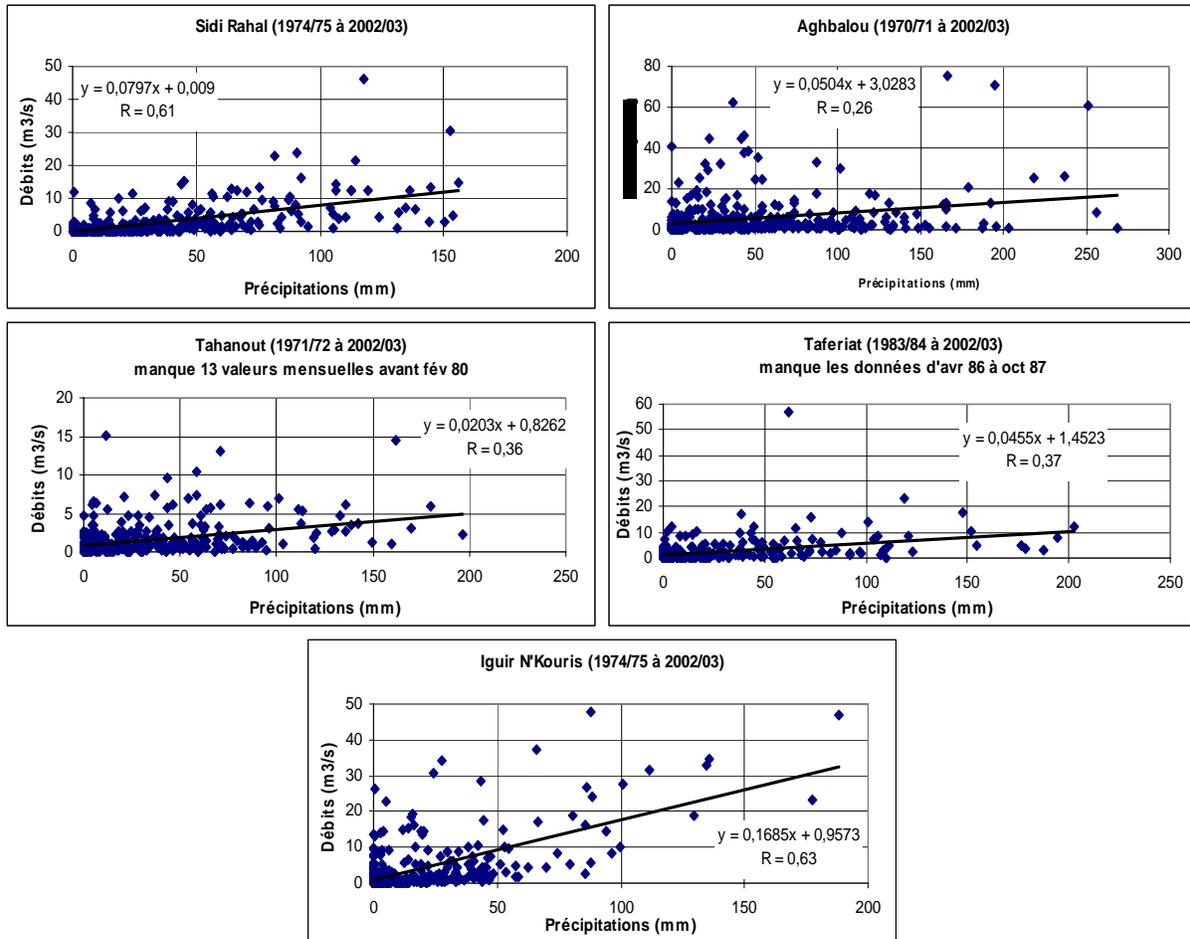


Figure 9 : Corrélations entre les précipitations et les débits mensuels particuliers aux cinq stations

Corrélation entre les précipitations et les débits moyens mensuels interannuels

La figure 10 (pour le bassin de N'Fis) et la figure 11 (pour le bassin de R'Dat) montrent respectivement le lien existant entre les précipitations et les débits mensuels interannuels à la station d'Iguir N'Kouris et à la station de Sidi Rahal sur la période 1974/75 à 2002/03. Nous pouvons constater que les nuages de point relatif aux mois s'alignent sur une même droite. On note ainsi que les débits augmentent quand les précipitations augmentent et cela de façon quasiment linéaire. L'écoulement dans le bassin du N'Fis ne dépendrait que de la pluie tombée sur cette zone.

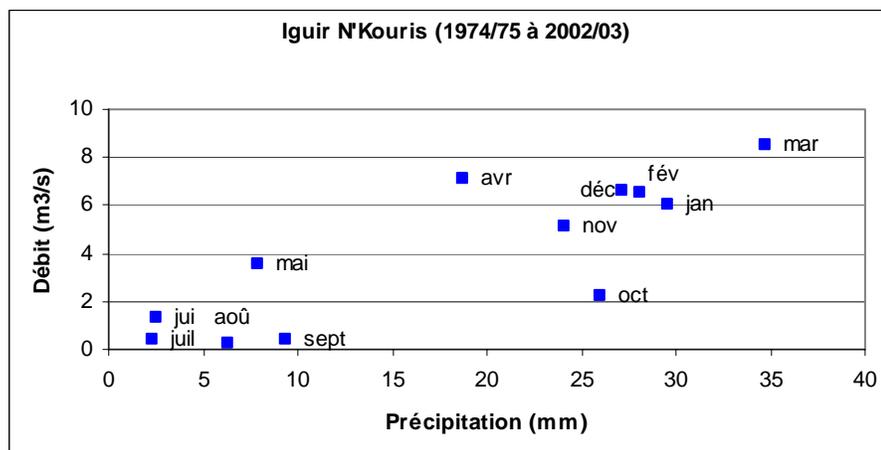


Figure 10 : Corrélation entre les précipitations et les débits mensuels interannuels à Iguir N'Kouris

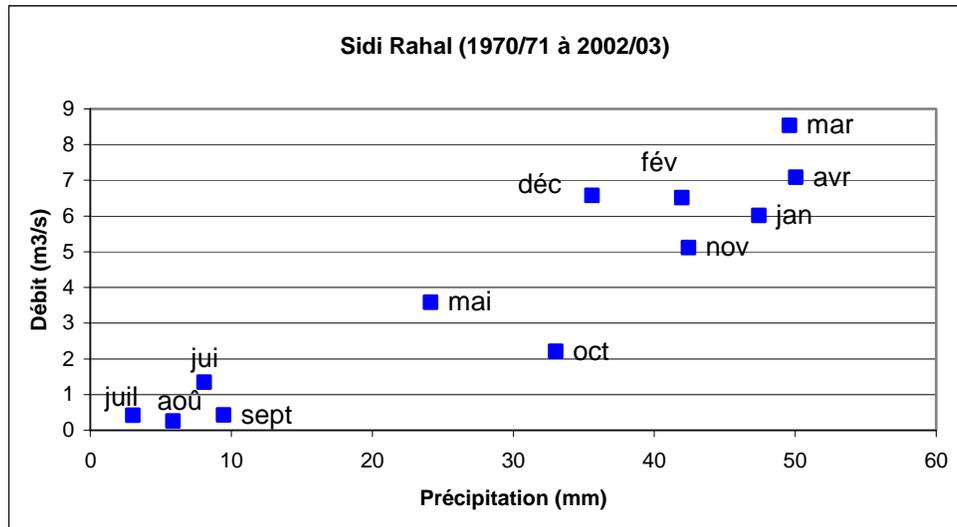


Figure 11 : Corrélation entre les précipitations et les débits mensuels interannuels à Sidi Rahal

Pour les stations de Tahanout (Rhéraya, Fig. 12), d'Aghbalou (Ourika, Fig. 13) et de Taferiat (Zat, Fig. 14). On constate que les mois d'août à février s'alignent sur une même droite, quand les précipitations augmentent les débits augmentent mais restent inférieurs à $1,48 \text{ m}^3/\text{s}$ pour Tahanout, inférieurs à $5,05 \text{ m}^3/\text{s}$ pour Aghbalou et inférieurs à $4,41 \text{ m}^3/\text{s}$ pour Taferiat. Les mois de mars à juillet s'alignent sur une autre droite faisant augmenter les débits plus fortement qu'avec la droite précédente. La courbe représentée par l'alignement des points première droite pourrait correspondre au régime d'écoulement issu essentiellement des précipitations alors que la deuxième droite, correspondrait à l'influence de la fonte des neiges produisant une augmentation du débit à l'exutoire. Cette forte augmentation de débits apparaît très nettement au mois de mai alors que les précipitations ont diminué de moitié par rapport à avril.

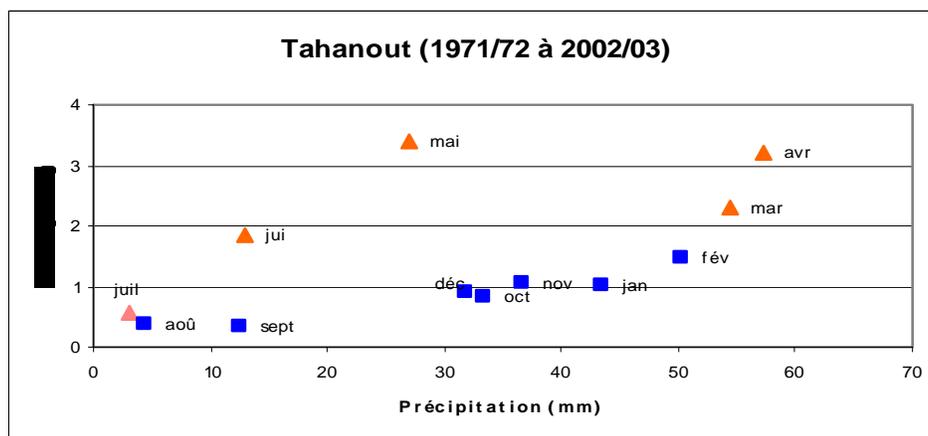


Figure 12 : Corrélation entre les précipitations et les débits mensuels interannuels à Tahanout

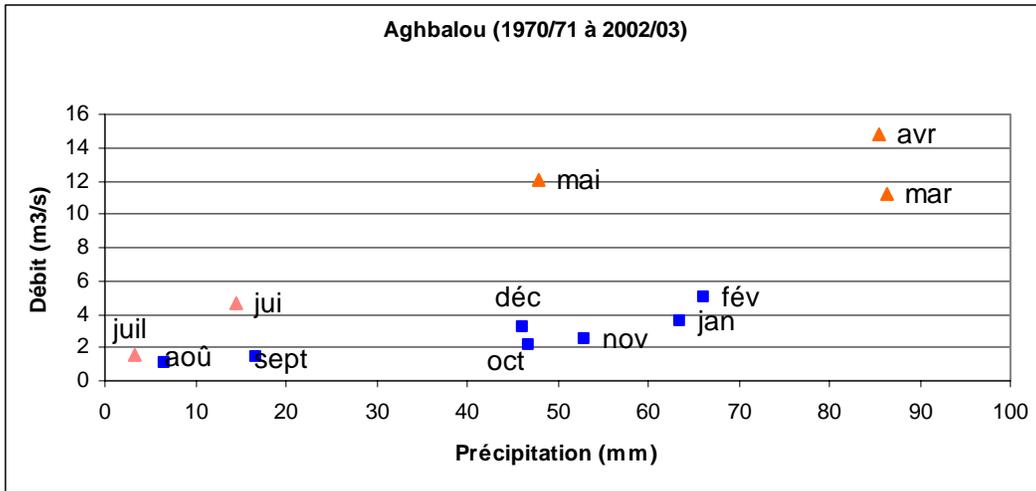


Figure 13 : Corrélation entre les précipitations et les débits mensuels interannuels à Aghbalou

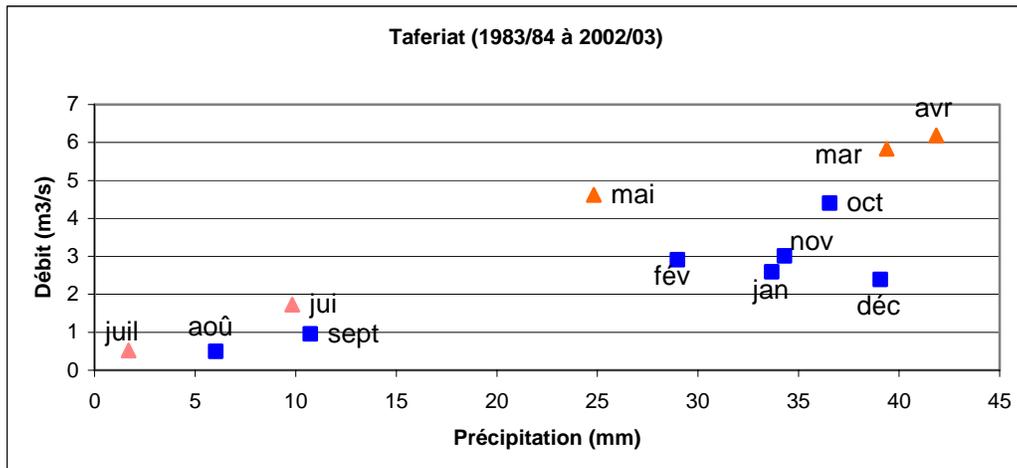


Figure 14 : Corrélation entre les précipitations et les débits mensuels interannuels à Taferiat

Ces figures montrent l'existence d'un apport de la fonte des neiges sur l'écoulement à l'exutoire pour les bassins versants de Tahanout, Ourika et Taferiat. Par contre, pour les bassins versants N'Fis et R'Dat, la distinction entre l'apport de la pluie et l'apport de la neige sur l'écoulement à l'exutoire n'apparaît pas aussi clairement que sur les bassins précédents. Nous pouvons donc dire que pour les bassins de Tahanout, Ourika et Taferiat les écoulements sont issus des pluies pendant la période allant d'août à février et l'apport d'eau issu de la fonte des neiges intervient de mars à juillet en produisant une augmentation de débits. Les bassins versants de N'Fis et de R'Dat ont leurs écoulements essentiellement issus des pluies, l'apport de la fonte des neiges sur le débit est donc négligeable.

BILAN HYDROLOGIQUE

L'établissement d'un bilan hydrologique a pour but de comparer les entrées et les sorties d'eau dans un bassin versant. Pour ce faire trois données sont à calculer :

- La lame d'eau écoulée est donnée par la relation : (Rmich et Hafoud ; 2004)

$H = Q * ((3600*24*365) / S)$, avec : H : lame d'eau écoulée en m, Q : débits à l'exutoire en m³/s, S : surface du bassin versant en m². La lame d'eau écoulée représente la hauteur d'eau écoulé à l'exutoire défini comme étant le rapport entre le débits et la surface du bassin versant en fonction du laps de temps considéré.

- Le déficit d'écoulement exprime la différence entre la hauteur d'eau reçu par un bassin versant et les écoulements superficiels issu de ce bassin pendant une même période. Il correspond théoriquement à la quantité d'eau évapotranspirée et la quantité infiltrée vers les nappes souterraines, mais cette partie d'eau infiltrée pourra ultérieurement être drainée par l'oued et ressortir par des résurgences ou des sources, elle correspond donc à un écoulement différé pouvant être comptabilisé avec les débits. Ceci laisse supposer que le déficit d'écoulement correspond uniquement à l'évapotranspiration réelle théorique. Le déficit d'écoulement est donné par la relation : $D = P - H$, avec : D : le déficit d'écoulement en mm, P : les précipitations en mm, H : la lame d'eau écoulée en mm.

- Le coefficient d'écoulement correspond au rapport entre la lame d'eau écoulée et les précipitations. Il exprime en pourcentage la tranche d'eau précipitée qui ruisselle jusqu'à l'exutoire du bassin versant. Ce coefficient est donné par la relation : $CE = H / P$, avec : CE : coefficient d'écoulement en %, P : les précipitations en mm, H : la lame d'eau écoulée en mm

Corrélation entre les précipitations et les coefficients d'écoulement

Sur la figure 15, nous pouvons remarquer que certains coefficients dépassent les 100%. Nous pouvons interpréter ces coefficients, correspondant à des pics de débits sur la figure, comme étant le résultat d'une fonte massive de la neige dans les sommets. La forme du bassin versant interférant sur l'écoulement, ou encore la non représentativité des précipitations à l'exutoire pour l'ensemble des précipitations du bassin versant. Treize valeurs sur l'ensemble des cinq stations dépassent les 100 % :

-4 valeurs pour la station d'Aghbalou durant les années 1973/74, 1979/80, 1989/90 et 1991/92.

-6 valeurs pour la station d'Iguir N'Kouris durant les années 1978/79, 1987/88, 1989/90, 1995/96, 1996/97 et 1997/98.

-1 valeur pour la station de Taferiat durant l'année 1999/00.

-2 valeurs pour la station de Tahanout durant les années 1989/90 et 1991/92.

-Pour la station de Sidi rahal, aucune valeur ne dépasse 100%.

D'après ce que nous avons vu dans les paragraphes précédents, l'apport d'eau par la fonte des neiges pourrait expliquer ces dépassements pour les stations de Tahanout, d'Aghbalou et de Taferiat. Pour la station de Sidi Rahal, aucune mesure ne dépasse 100 % ce qui tendrait à confirmer ce que nous venons de dire car ce bassin versant à un régime d'écoulement lié essentiellement aux précipitations. A la station d'Iguir N'Kouris ces dépassements, du fait du faible apport neigeux, pourrait être du à la non représentativité des pluies à l'exutoire car le bassin à une superficie de 823,8 km² ce qui est très supérieur au autres bassins versants.

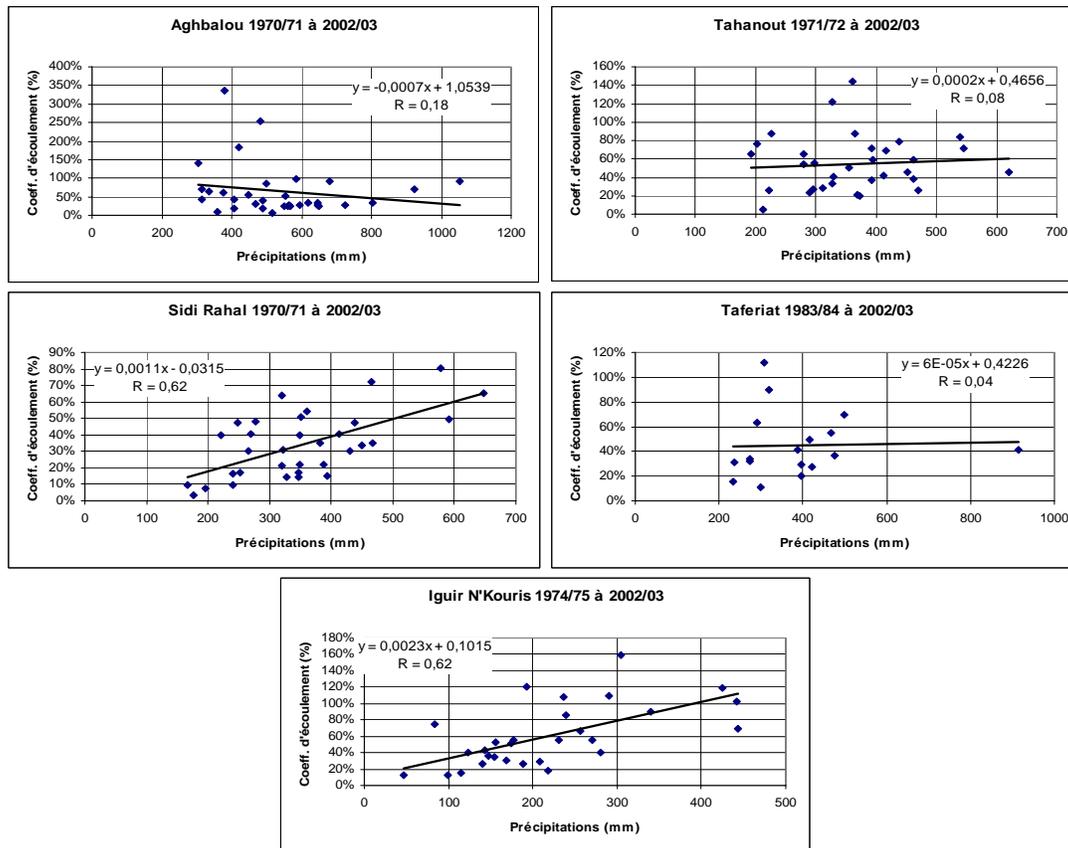


Figure 15 : Corrélation entre les précipitations et le coefficient d'écoulement aux cinq stations

Sur la figure 15, nous constatons que les coefficients de corrélation sont très bas notamment pour les stations de Tahanout, Aghbalou et Taferiat où ils ont des valeurs respectives de 0,08, 0,18 et 0,04. Pour les stations d'Iguir N'Kouris et de Sidi Rahal, les coefficients ont des valeurs acceptables de 0,62. Il n'y a donc pas de corrélation entre les précipitations et le coefficient d'écoulement pour les stations de Tahanout, d'Aghbalou et Taferiat. Ceci pourrait être expliqué par l'intervention de la neige sur les hauteurs des bassins stockant et relarguant des quantités d'eau interférant sur les écoulements. Les autres stations ont des coefficients de corrélation acceptable laissant apparaître peut d'interférence dans l'écoulement.

Corrélation entre les déficits d'écoulements et les précipitations annuels

La figure 16 présente la corrélation entre les précipitations annuels et le déficit d'écoulement aux cinq stations. Nous pouvons voir que les nuages de point sont assez dispersés et les coefficients de corrélation sont faibles pour les stations de Tahanout ($R=0,34$), Aghbalou ($R=0,32$), Iguir N'Kouris ($R=0,28$) et Sidi Rahal ($R=0,35$). Seule la station de Taferiat a un bon coefficient ($R=0,71$) de corrélation. Nous constatons sur ce graphique que le nuage de point, pour les précipitations inférieur à 500 mm, est très dispersé. Seul le point correspondant à l'année de 1995/96 de coordonnées 913,4 mm pour les précipitations et 535,34 mm pour le déficit d'écoulement s'aligne sur cette droite. Comme nous l'avons vu dans précédemment, l'année 1995/96 (correspondant à ce point) est une année de crue, il n'est donc pas représentatif du mécanisme d'écoulement dans ce bassin versant. En faisant la même corrélation sans prendre en compte ce point de l'année 1995/96, nous trouvons un coefficient de corrélation de 0,38 comparable aux autres bassins versants.

Les valeurs négatives dans ces différents graphiques, correspondent aux coefficients d'écoulement supérieur à 100 %. Cela voudrait dire qu'il y a plus d'eau écoulee que d'eau précipitée. Ce fait peut être expliqué par la géologie laissant présager un temps de séjour très long de l'eau infiltrée et une ou des nappe(s) phréatique(s) importantes dans les 4 bassins versants à bas coefficient de corrélation. La neige ne peut être mise en compte dans ce processus, car l'apport de la fonte des neiges est comptabilisé dans les débits annuels. Les séguias, canaux d'irrigations issues des oueds, peuvent aussi contribuer à ces résultats médiocres. En effet, dans le bassin versant du R'Dat, 18 séguias sont répertoriées et elles prélèvent 45 % de l'oued d'après l'étude SBOT (ABHT) durant la période 1946/86. Pour le bassin versant Ourika, les 23 séguias prélèvent 67 % de l'oued. Pour le bassin versant de Rhéraya, les 8 séguias prélèvent 56 % de l'oued. Pour le bassin versant Zat, les 27 séguias prélèvent 40 % de l'oued. Le bassin versant N'Fis ne possède pas de séguias dans ces limites. Cependant, à l'aval du Lalla Takerkoust, en aval d'Iguir N'Kouris, les 26 séguias prélèvent 83 % de l'oued.

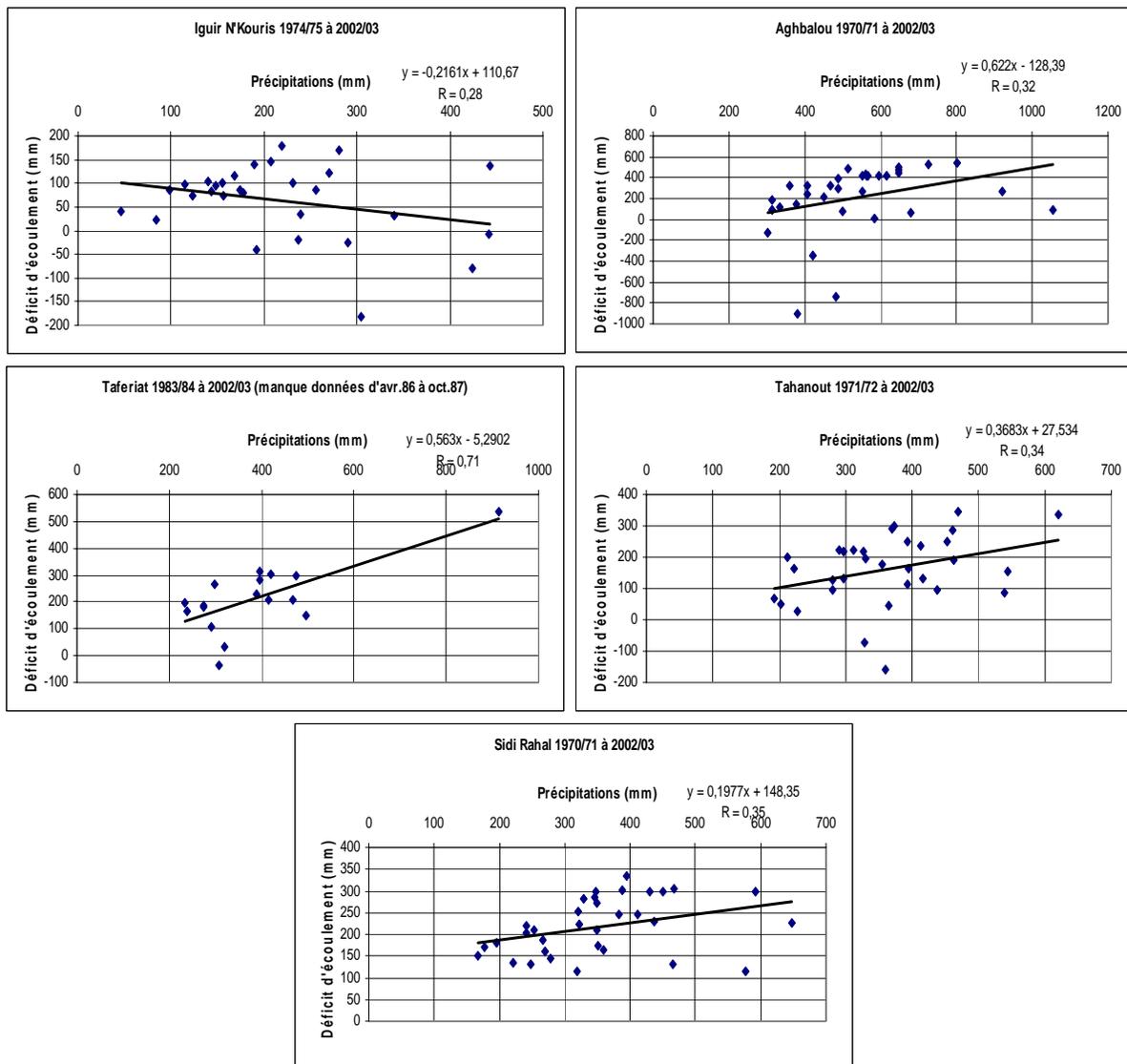


Figure 16 : Corrélation entre les précipitations et le déficit d'écoulement aux cinq stations d'études.

Synthèse d'écoulement

Le tableau 4 présente les volumes d'eau annuelle à l'exutoire des cinq bassins versants. Ils ont été calculés à partir des débits annuels moyens sur la période de 1974/75 à 2002/03. L'apport à la nappe phréatique Plio-quadernaire du Tensift est d'environ $477,14.10^6$ m³ d'eau en une année. L'apport le plus important provient du bassin versant d'Ourika (Aghbalou) avec 32,7 % de l'apport d'eau totale. L'apport du bassin versant N'Fis (Iguir N'Kouris) représente 26,5 %. L'apport du bassin versant Zat (Taferiat) représente 18,7 %. L'apport du bassin versant R'Dat (Sidi Rahal) représente 12,8 %. L'apport du bassin versant de Rhéraya (Tahanout) représente 9,2 %. Nous pouvons dire que les bassins versants avec une intervention de la couverture neigeuse (Ourika, Rheraya et Zat) délivrent plus d'eau que les bassins versants R'Dat et N'Fis.

Station	Apport d'eau annuel ($.10^6$ m ³)
Sidi Rahal	61,18
Tahanout	44,15
I N'Kouris	126,46
Taferiat	89,25
Aghbalou	156,10

Tableau 4 : Volume annuel à l'exutoire des cinq bassins versants

CONCLUSION

Cette étude basée sur la comparaison des différentes caractéristiques physiographiques et hydropluviométriques a permis de définir différents regroupements entre les bassins versants.

-Caractéristiques physiographiques les bassins N'Fis, Rhéraya et Ourika ont des altitudes et des pentes importantes laissant apparaître une intervention importantes des précipitations solides en hiver avec un fort écoulement contrairement au Zat et au R'Dat.

Les bassins N'Fis, Rhéraya, Ourika et Zat ont des densité de drainage supérieur à 3 tandis que le bassin versant R'Dat a une densité de drainage de 2,5 et par conséquent une érosion moins importante sur sa superficie.

- Caractéristiques hydropluviométriques

Les bassins N'Fis et R'Dat présentent une bonne corrélation entre les précipitations et les débits à l'exutoire traduisant que ces bassins ont peu ou pas d'intervention de l'apport de la fonte des neiges dans leurs débits. La couverture neigeuse sur le bassin versant N'Fis peut-être expliqué par sa faible proportion des tranches d'altitudes supérieurs à 3000 m et à sa proximité de l'océan Atlantique faisant augmenter les températures dans le bassin et limitant par là même les précipitations solides en hiver.

La présence de la couverture neigeuse dans le bassin Zat peut-être expliqué par le fait que 17 % de sa superficie a une altitude supérieure à 2500 m dans la partie sud du bassin favorisant les précipitations solides en hiver.

Nous avons pu mettre en évidence l'effet de la couverture neigeuse, dans les bassins versants Rhéraya, Ourika et Zat, sur l'apport d'eau dans la nappe des mois de mars à juillet. Une grande part de la vie socio-économique de la région de Marrakech dépend de ce volume d'eau restitué pendant les mois les

moins arrosés. Il est donc nécessaire de quantifier, le plus précisément possible, ce volume de neige (par télédétection) afin de mieux gérer l'agriculture dans les vallées et la plaine du Haouz et de ralentir ou de stopper la détérioration de la montagne causé par une forte érosion accéléré par l'exploitation excessive du couvert végétale par l'élevage et le bois de chauffe. L'état actuel du sol se traduit par un ruissellement plus important pouvant se traduire par des crues de grandes ampleurs dévastant les cultures et les habitations. Des modélisations sur la fonte des neiges et sur les prévisions des débits peuvent être apporté à ce rapport pour le compléter afin de mieux prévoir, et par conséquent mieux gérer le volume écoulement arrivant à la plaine.

Le volume d'eau total apporté par les oueds du Haut Atlas à la nappe Plio-quaternaire du Haouz est de $477.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$. Les bassins fournissant le plus d'eau sont N'Fis et Ourika avec 60 % de l'apport d'eau globale pour une superficie de 50 % de la superficie totale du domaine d'étude.

Remerciement

Les auteurs remercient l'Agence de Bassin Hydraulique du Tensift, qui a mis à disposition les données hydroclimatiques utilisées dans cette étude. Les auteurs ont bénéficié d'un financement du Ministère des Affaires Etrangères français et du Ministère marocain de d'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche Scientifique et de la Formation des Cadres (Programme d'Action Intégrée Volubilis «Gestion durable des ressources en eau dans le bassin versant de Tensift (région de Marrakech, n°MA/148/06) »).

BIBLIOGRAPHIE

Chotta, M., Quesmi, M. (2000). Etude hydro-pluviométrique du bassin versant N'Fis à l'Oudaya. Traitement des données et relation pluie-débit. Université Cadi Ayyad, FST Marrakech.

Rmich, A., Hafoud, N. (2004). Relation entre les précipitations et les débits au niveau du bassin versant de la Rhéraya de 1962 à 2003. Université Cadi Ayyad, FST Marrakech.

Moussyih, I., Barry, M.H. (2003). Bassins versants du Zat et du R'Dat (Haut Atlas, Maroc). Cartographie thématique et relation précipitations-débits. Université Cadi Ayyad, FST Marrakech.

Hanich, L., De Solan, B., Duchemin, B., Maisongrande, P., Chaponnière, A., Boulet, G., Chehbouni, G. (21-25 juillet 2003). Snow cover mapping using SPOT VEGETATION with high resolution data : Application in the Moroccan Atlas mountains. IGARSS 2003, 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.

Sinan, M. (2000). Méthodologie d'identification, d'évaluation et de protection des ressources en eau des aquifères régionaux par le couplage des SIG, de la géophysique et de la géostatistique, application à l'aquifère du Haouz de Marrakech (Maroc). Thèse de doctorat d'état, université Mohammed V, école Mohammadia d'ingénieurs, Rabat.

Riad, S. (2003). Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. Thèse en cotutelle, université des sciences et techniques de Lille et université Ibnou Zohr d'Agadir.